

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Neşe ÇOLAK

**NEVŞEHİR CİVARINDAN ALINAN TOPRAK
NUMUNELERİNDE DOĞAL RADYONÜKLİDLERİN
BELİRLENMESİ**

FİZİK ANABİLİM DALI

ADANA-2016

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**NEVŞEHİR CİVARINDAN ALINAN TOPRAK NUMUNELERİNDE
DOĞAL RADYONÜKLİDLERİN BELİRLENMESİ**

Neşe ÇOLAK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FİZİK ANABİLİM DALI

Bu Tez / /2016 Tarihinde Aşağıdaki Jüri Üyeleri Tarafından
Oybirliği/Oyçokluğu ile Kabul Edilmiştir.

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

.....
Doç. Dr. Cebail GÜMÜŞ
ÜYE

.....
Doç. Dr. O. Murat ÖZKENDİR
ÜYE

Bu Tez Enstitümüz Fizik Anabilim Dalında hazırlanmıştır.
Kod No:

Prof. Dr. Mustafa GÖK
Enstitü Müdürü

Bu Çalışma Ç. Ü. Araştırma Projeleri Birimi Tarafından Desteklenmiştir.
Proje No: FEF-2012-YL26

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

ÖZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NEVŞEHİR CİVARINDAN ALINAN TOPRAK NUMUNELERİNDE DOĞAL RADYONÜKLİDLERİN BELİRLENMESİ

Neşe ÇOLAK

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

Danışman : Prof. Dr. Yüksel UFUKTEPE
Yıl: 2016, Sayfa: 87
Jüri : Prof. Dr. Yüksel UFUKTEPE
: Doç. Dr. Cebail GÜMÜŞ
: Doç. Dr. Osman Murat ÖZKENDİR

Bu çalışmanın amacı, Nevşehir civarından toplanan yüzey toprağı örneklerindeki doğal (^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K) ve yapay (^{137}Cs) radyonüklitlerinin aktivite derişimlerini, HPGe detektörlü yüksek çözünürlüklü gama spektrometre kullanarak analiz etmek ve dış havada maruz kalınan dışsal iyonize radyasyonu hesaplamaktır. Toprak örneklerinde ölçülen ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K ve ^{137}Cs 'nin aktivite derişimlerinin ortalama değerleri, sırasıyla 44.93 Bq/kg, 51.52 Bq/kg, 662.55 Bq/kg ve 12.29 Bq/kg, Dış havada soğurulan gama doz hızı ve buna karşılık gelen yıllık etkin doz değerleri hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Radyoaktivite, gamma ışını spektrometresi, doğal radyoaktivite, Gama doz oranı, toprak

ABSTRACT

MSc THESIS

**DETERMINATION OF NATURAL RADIONUCLIDES IN SOIL
SAMPLES COLLECTED FROM NEVSEHIR IN TURKEY**

Neşe ÇOLAK

**ÇUKUROVA UNIVERSITY
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
DEPARTMENT OF PHYSICS**

Supervisor : Prof. Dr. Yüksel UFUKTEPE
Year: 2016, Pages: 87
Jury : Prof. Dr. Yüksel UFUKTEPE
: Assoc. Dr. Cebail GÜMÜŞ
: Assoc. Dr. Osman Murat ÖZKENDİR

In this study, we have determined activity concentration of natural (^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K) and artificial (^{137}Cs) radionuclides in soil samples from Nevşehir in Turkey. Soil samples were collected from surface. Each soil samples were counted by using high resolution Gamma spectrometer with HpGe detector. We have calculated activity concentration, absorbed dose rate, radium equivalent activity, external hazard index and compared with the published results.

Key Words: Radioactivity, gamma ray spectrometry, Soil, Natural radioactivity, Gamma dose rate.

GENİŞLETİLMİŞ ÖZET

Yeryüzünde yaşamını sürdüren tüm canlılar; engellemesi mümkün olmayan bir şekilde yaşadıkları çevrede (yeryüzündeki kayalardan, topraktan, sudan; uzaydan ve güneşten gelen kozmik ışınlardan vs.) doğal radyasyon kaynaklarından ve aktif maddelerin tıp, endüstri, deneysel araştırmalar, tarım ve hayvancılık alanlarında, nükleer santrallerde kullanılmasıyla ve nükleer atıkların oluşmasıyla, nükleer siyahların denenmesi ve kullanılmasıyla oluşan yapay radyonüklidlere yaşamlarını sürdürdüğü sürece maruz kalmaktadırlar.

Tüm canlılar doğal ve yapay kaynaklardan maruz kaldığı ve bu maruz kalınan radyasyona en büyük katkı doğal kaynaklardan olduğu için, yaşadığımız yerin ve üzerinde yaşadığımız yeryüzünün farklı yerlerindeki radyonüklid dağılımı ve doğal radyasyon seviyesinin bilinmesi tüm canlıların sağlıklı yaşamı için önem arz etmektedir.

Dünyanın doğal bir parçası olan ve doğal radyasyona kaynak olan, kayalarda ve toprakta yüksek yoğunluklarda bulunan ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K gibi radyonüklidler karasal kökenli doğal radyasyon kaynağını oluşturmaktadır. Karasal kökenli radyasyon yoğunluklarına etki eden en önemli faktör radyoaktivite kaynaklarının yerkabuğu üzerinde farklı yerlerde ve farklı oranlarda dağılmış olmasından kaynaklanmaktadır. Kayaç ve topraklardaki ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K kaynaklı doğal radyoaktivite yoğunluklarını kayacın veya toprağın yaşı ve büyüklüğü etkilemezken; rengi, tipi, oluşumu ve kimyasal bileşimi, bölgenin jeolojik yapısı ve coğrafi konumu, radyoaktif çekirdeklerin yerküre üzerindeki dağılım farklılıkları gibi özellikler etkilemektedir. Bu nedenle farklı yerlerde yaşamını sürdüren canlılar mesafe yakın olsa dahi ülkeden ülkeye olduğu gibi ilden ile dahi farklı yoğunlukta doğal radyasyona maruz kalmaktadır.

Atom; nükleonların (proton ve nötron) oluşturduğu ve elementlerin özelliklerini taşıyan çekirdekten ve etrafındaki orbitallerde dönen elektronlardan meydana gelmektedir ve bu atom çekirdeğinin kararlı olabilmesi de atomda

bulunan nükleonların oranına bağlıdır (bir atomun nötron sayısının proton sayısına oranı eşit olduğunda atom genelde kararlı haldedir). Atom numarası 83'ten büyük olduğu elementler için nötron/proton oranı büyüdükçe kararsızlık artar. Bu halde bulunan atomlara “radyonüklid” denir. Bol miktarda nükleona sahip çekirdekler kararlı hale gelebilmek için sahip oldukları fazla enerjilerini çeşitli parçacıklar salınımı yaparak başlangıçtaki halinden fiziksel ve kimyasal olarak farklı bir elemente dönüştüğü sürece de “radyoaktivite” denir.

Yerkürenin doğal bir parçası olan radyoaktif elementler kararlı elemente dönüşebilmek için kendiliğinden çekirdeklerinden enerji yaymaktadırlar. Toprakta bulunan radyasyon çok uzun yarı ömürlü olup birkaç milyar yıldan beri yeryüzünde bulunmaktadır. Toprakta bulunan ²³⁸U, ²³²Th ve ⁴⁰K gibi doğal radyonüklidler, toprağın radyoaktif özellik göstermesine neden olmaktadır (El-Shershaby, 2002). Bu radyonüklidler daha çok volkanik, fosfat, granit ve tuz kayalarında yüksek oranlarda bulunmaktadır. Bu kayalar doğa şartlarına bağlı olarak zamanla ufalanarak çok küçük parçalar halinde yağmur veya akıntı sularıyla toprağa karışıp topraktaki doğal radyoaktivitenin artmasına neden olurlar. Hatta, tarımda topraktaki verimi arttırmak için kullanılan suni gübreleme (radyoaktif ³²P içermektedir) gibi bazı insan aktiviteleri de yerel olarak yüzey toprak radyoaktivitesini arttırmaktadır (NCRP 45, 1975; Özger, 2005).

Kararsız halde bulunan radyoaktif çekirdekler kararlı bir çekirdeğe dönüşmek için çekirdeğinden üç çeşit ışıma yaparlar: 1) Alfa (α) parçacıkları, 2) Beta (β) parçacıkları ve 3) Gama (γ) ışınları'dır. Alfa ışınları enerjileri 4-9 MeV arasında değişen ve havada en fazla 6-7 cm kadar ilerleyebilen şiddetli olan iyonlaştırıcı parçacıklardır. Beta ışınları enerjileri 0,01 MeV ila 5 MeV arasında değişebilen ve havada 70-80 cm yol alabilen, metal levhalar tarafından durdurulabilen ışınlardır. Çekirdekteki enerji fazlalığı nedeniyle veya nüklid bozunma olayı ile radyasyon yayınladıktan sonra çoğunlukla hemen kararlı durumuna geçemez, bozunma sonucu oluşan nüklid, hala yarı kararlı durumda bulunur. Bu fazla kalan uyarılma enerjisi, elektromanyetik enerjide olan bir gama

radasyonu şeklinde hemen yayınlanır. Bu şekilde bozulan yarı kararlı nüklidin atom ve kütle sayılarında herhangi bir değişme olmaz.

Radyasyon, iç dönüşüm geçiren atomlar tarafından yayımlanan, boş ortamda ve madde içerisinde hareket edebilen enerji olarak tanımlanmaktadır. Yeryüzündeki tüm canlılar doğal ve yapay radyasyon kaynaklarına her zaman maruz kalmaktadırlar. Radyasyon birimlerinin başlıcaları; aktivite, ışınlama, absorblanan doz ve eşdeğer doz'dur. Aktivite; birim zamanda bozulan atomların sayısı olarak tanımlanmaktadır. Işınlama; X- ve γ -ışınlarının havayı iyonlaştırabilme kabiliyetinin bir ölçüsüdür. Eşdeğer doz; iyonlaştırıcı radyasyonların oluşturduğu meydana getirdiği zararlı biyolojik etkilerin bir ölçüsüdür.

Bu çalışmanın temel amacı da Niğde, Nevşehir ve Kayseri il sınırlarından, yüzey ve yüzeyin 30 cm altından alınan toprak numunelerinde doğal radyasyon seviyesinin belirlenmesidir. Bu amaç doğrultusunda 16 Ekim 2014 tarihinde Niğde, Nevşehir ve Kayseri il sınırları içinden alınan 16 yüzey ve 16 alt toprak numunesi toplamda 32 toprak numunesi ölçülerek Nevşehir toprağındaki doğal radyonüklid yoğunluğu araştırılmıştır.

Nevşehir civarından toplanan toprak numunelerindeki doğal radyasyon oranını belirlemek için gama spektrometre yöntemi kullanılarak Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı Gülten Günel Araştırma Laboratuvarı'nda bulunan yüksek çözünürlüklü Germanyum dedektöründe gerekli ölçümler yapılmıştır.

Numuneler birbirine yakın Niğde, Nevşehir ve Kayseri il sınırları içinden toplanmıştır. Numunelerin alındığı yer aralarında 10-15 km kadar mesafe bulunan 16 farklı noktadan toplanmıştır. Numuneler yüzey ve aynı yüzeyin 30 cm altından alınmıştır. Seçilen istasyonların erozyona uğramamış, düz bir arazi olmasına, yüzeyinin otlarla veya ağaçlarla kaplı olmayan bir arazi olmasına dikkat edildi. Yüzey çapa yardımıyla hafif vuruşlarla 1 cm derinliğinde ve deneyimiz için gerekli numune alınabilecek genişlikte kazıldı ve yaklaşık 1-2 kg toprak alındı.

İstasyonun koordinatları ve örnek kodu kalemle poşet üzerine yapıştırılan kağıda yazıldı.

Numunelerimiz ölçüme hazırlanmak ve ölçülmek üzere Çukurova Üniversitesine getirildi. Toprak numunelerimizi ölçüme hazırlamak için 1 mm elekten elendi, ardından 105 °C sıcaklıkta 24 saat kurutuldu ve 0.3 mm'lik elekten tekrar elendi. Numuneler hassas terazide darası alınmış olan 5x6 cm geometriye sahip numune kaplarına konularak her bir numunenin darası alındı. Net ağırlık, numune kabının darası, işlemin yapıldığı tarih, istasyon kodu ve koordinatları numune kabının üzerine yazıldı. Sigil edilen numune kaplarının sızdırmazlığı sağlandı ve ^{226}Ra ve onun ürün çekirdekleri olan ^{222}Rn arasındaki kalıcı dengenin oluşması için 4 hafta bekletildi ve ölçüme hazır hale gelen toprak numuneleri Çukurova Üniversitesi Fizik Bölümü Gülten GÜNEL Fizik Araştırma Laboratuvarı'ndaki Canberra GX5020 model yüksek çözünürlüklü germanyum dedektöründe (HPGe) ölçüldü.

Toplanan toprak numunelerinde aktivite konsantrasyonları, soğurulan doz hızı, radyum eşdeğeri, dış tehlike endeksi, yıllık gonadal doz eşdeğeri, yıllık etkin doz eşdeğeri ve yaşam boyu kanser riski değerleri hesaplandı.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında bana rehberlik eden, yönlendiren, çalışmamın her aşamasındaengin bilgi, öneri ve yardımlarını esirgemeyen, geniş hoşgörüsüyle destek veren, kendisiyle çalışma imkanına ve onuruna nail olduğum danışmanım, değerli ve saygıdeğer hocam Sayın Prof. Dr. Yüksel UFUKTEPE'ye; ikinci danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. F. Aysun UĞUR'a; lisans eğitimim sırasında öğrencisi olmakla mutluluk duyduğum hocam Sayın Prof. Dr. Ayşe POLATÖZ'e, ayrıca lisans eğitimim sırasında öğrencisi olmakla onur duyduğum saygıdeğer hocam Sayın Prof. Dr. Hakan ÖZTÜRK'e ve benim için en az hocam kadar değerli olan saygıdeğer eşi Sayın Şehriban ÖZTÜRK'e ve çalışmalarım süresince desteğinden dolayı değerli arkadaşlarım Elif GÖREN'e, Ferhat GEZER'e ve Z. Gizem PORTAKAL'a; benden manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, varlıklarıyla beni mutlu eden değerli dostlarım İlknur HOŞ'a ve Emine GÜRPINAR'a, Çukurova Üniversitesi'ndeki tüm değerli hocalarıma; özellikle de, benden maddi ve manevi desteklerini esirgemeyerek her zaman beni destekleyen ve daima yanımda olan değerli babam Sayın Tahsin ÇOLAK'a, değerli annem Sayın Şükran ÇOLAK'a, değerli ağabeyim ve eşi Sayın Özkan-Hatice ÇOLAK'a, değerli kardeşlerim ve eşleri Sayın Gökhan-Eda ÇOLAK ve Sayın Akif-Rabia ÇOLAK'a ömür boyu sonsuz minnet ve teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

SAYFA

ÖZ.....	I
ABSTRACT.....	II
GENİŞLETİLMİŞ ÖZET	III
TEŞEKKÜR.....	VII
İÇİNDEKİLER.....	VIII
ÇİZELGELER DİZİNİ	XII
ŞEKİLLER DİZİNİ	XIV
SİMGELER VE KISALTMALAR	XVI
1. GİRİŞ	1
1.1. Radyoaktivite	2
1.1.1. Doğal Radyoaktivite	4
1.1.1.1. Toryum Serisi	5
1.1.1.2. Uranyum Serisi	6
1.1.1.3. Aktinyum Serisi	7
1.1.1.4. Potasyum.....	12
1.1.1.5. Toprakta Bulunan Doğal Radyoaktivite	13
1.1.2. Radyoaktif Bozunma Yasası	14
1.1.2.1. Radyoaktif Bir Maddenin Yarılanma Süresi ve Ortalama Ömrü.....	17
1.1.3. Radyoaktif Bozunum Çeşitleri.....	20
1.1.3.1. Alfa (α) Işıması	20
1.1.3.2. Beta (β) Işıması.....	21
1.1.3.3. Gama (γ) Işıması	22
1.2. Radyasyon Tanımı ve Türleri	22

1.3. Radyasyon Kaynakları	23
1.4. Radyasyon Birimleri	24
1.4.1. Aktivite Birimleri	24
1.4.2. Işınlama Birimi	25
1.4.3. Soğurulan Doz Birimi.....	26
1.4.4. Eşdeğer Doz Birimi	26
1.5. Gama Işınlmasının Madde ile Etkileşmesi	27
1.5.1. Fotoelektrik Olay	28
1.5.2. Compton Saçılması.....	30
1.5.3. Çift Oluşumu	31
1.6. İnsan Vücudundaki Doğal Radyonüklidler	31
1.7. Radyoizotopların İnsan Vücuduna Geçişİ	33
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	37
3. MATERYAL VE METOD	45
3.1. Gama Spektrometresi.....	45
3.1.1. Yüksek Saflıktaki Germanyum Yarı İletken Dedektörleri.....	46
3.1.2. Önyükselteç	46
3.1.3. Yükselteç.....	47
3.1.4. Çok Kanallı Analizör.....	48
3.1.5. Analog Sayısal Dönüştürücü	49
3.1.6. ADC Ayırma Gücü.....	50
3.1.7. ADC Dönüşüm Kazancı.....	50
3.2. Gama Spektrometrik Analizlerde Kullanılan Dedektör Sistemi	51
3.3. Gama Spektrometrik Analizler	53
3.3.1. Pik Alanı Hesabı	53
3.3.2. Standartla Karşılaştırma Yöntemi	55

3.3.3. HPGe Dedektörünün Enerji Kalibrasyonu	58
3.3.4. HPGe Dedektörünün Mutlak Verim Kalibrasyonu	59
3.4. Havada Absorbe Edilmiş Doz Hızı (D)	61
3.5. Radium Eşdeğer Aktivitesi (R_{eq}) ve Dış Tehlike Endeksi (H_{ex})	61
3.6. Yıllık Gonadal Doz Eşdeğeri (YGDE)	62
3.7. Yıllık Etkin Doz Eşdeğeri (YEDE)	62
3.8. Yaşam Boyu Kanser Riski (AYKR).....	62
3.9. Toprak Numunelerinin Toplanması.....	63
3.10. Numunelerin Ölçüm için Hazırlanması.....	65
3.11. Numunelerin Gama Spektrometresinde Ölçümü.....	66
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	67
4.1. Toprak Örneklerindeki ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K Radyonüklidlerinden Elde Edilen Aktivite Derişim Değerleri.....	67
4.2. Havadaki Soğurulan Doz Hızı [D (nGy/h)]	72
4.3. Radium Eşdeğer Aktivitesi (R_{eq}) ve Dış Tehlike Endeksi (H_{ex})	74
4.4. Yıllık Gonadal Doz Eşdeğeri (YGDE)	75
4.5. Yıllık Etkin Doz Eşdeğeri (YEDE) ve Artan Yaşam Boyu Kanser Riski (AYKR).....	75
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	77
KAYNAKLAR	79
ÖZGEÇMİŞ	87



ÇİZELGELER DİZİNİ

SAYFA

Çizelge 1.1.	^{232}Th Serisi.....	9
Çizelge 1.2.	^{238}U Serisi	10
Çizelge 1.3.	^{235}U Serisi	11
Çizelge 1.4.	Tabiatta Tek Başına Bulunan Doğal Radyonüklidler.....	12
Çizelge 1.5.	Doğada bulunan ^{40}K , ^{238}U ve ^{232}Th 'nin yarı ömürleri, özgün aktivite değerleri ve bozunum başına yayınladıkları foton sayısı	13
Çizelge 1.6.	Toprakta ^{40}K , ^{238}U ve ^{232}Th radyonüklidlerinin ortalama aktivite kütle konsantrasyonları ve yeryüzünden 1m yukarıda soğurulan doz şiddetleri	14
Çizelge 1.7.	Bazı İzotopların Yarı-ömürleri	19
Çizelge 1.8.	Radyasyon Birimleri ve Dönüşüm Faktörleri.....	24
Çizelge 1.9.	Farklı Radyasyon Türleri İçin Kalite Faktörleri.....	27
Çizelge 3.1.	Yüksek Safılıkta Germanyum Dedektör Özellikleri	52
Çizelge 3.2.	IAEA/RGU-1 (Uranyum Standardı).....	57
Çizelge 3.3.	IAEA/RGTh-1 (Toryum standardı).....	57
Çizelge 3.4.	IAEA/RGK-1 (Potasyum Standardı).....	57
Çizelge 3.5.	Standartların kütle ve Sayım Süreleri.....	58
Çizelge 3.6.	Standart Kalibrasyon Kaynaklarının Özellikleri	59
Çizelge 3.7.	Verim Kalibrasyonu Verileri.....	60
Çizelge 3.8.	Toprak Numunelerinin Koordinatları.....	63
Çizelge 4.1.	Toprak örneklerinde ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K ve ^{137}Cs aktivite derişim değerleri.....	68
Çizelge 4.2.	Üst yüzey toprak örneklerinde hesaplanan Soğurulan doz hızı [D(nGy/h)], Radyum eşdeğeri [R_{eq} (Bq/kg)], Dış tehlike endeksi, Yıllık gonadal doz eşdeğeri [YGDE ($\mu\text{Sv/yıl}$)], Yıllık etkin doz eşdeğeri [YEDE ($\mu\text{Sv/yıl}$)] ve Yaşam boyu kanser riski değerleri.....	73



ŞEKİLLER DİZİNİ

SAYFA

Şekil 1.1.	N-Z Kararlılık Grafiği.....	4
Şekil 1.2.	^{232}Th 'in Bozunma Ürünleri Şeması	6
Şekil 1.3.	^{238}U Bozunma Ürünleri Şeması	7
Şekil 1.4.	Aktinyum Serisinin Parçalanması.....	8
Şekil 1.5.	Radyoaktif Bir Numune Miktarının Zamanla Değişimi	16
Şekil 1.6.	Yarı-ömür Ölçülmesi	19
Şekil 1.7.	Alfa Bozunumu.....	20
Şekil 1.8.	Beta Işınlının Oluşum Olayına Bir Örnek (^7Be).....	21
Şekil 1.9.	Gama Bozunumu	22
Şekil 1.10.	Fotoelektrik Olay, Compton Olayı ve Çift Oluşumunun Baskın Olduğu Bölgeler.....	29
Şekil 1.11.	Fotoelektrik Olayının Şematik Gösterimi	30
Şekil 1.12.	Compton Saçılması	30
Şekil 1.13.	Radyoizotopların Alınış, Atılış ve Transfer Yolları.....	32
Şekil 1.14.	Atmosfere Verilen Radyoaktif Maddelerin İnsana Geçiş Yolları.....	34
Şekil 1.15.	Yüzey ve Yeraltı Sularına Bırakılan Radyoaktif Maddelerin İnsana Geçiş.....	35
Şekil 3.1.	Yüksek Saflıktaki Germanyum Dedektörlü Gama Spektrometresi	46
Şekil 3.2.	Yüke Hassas Önyükseltecin Şematik Görünümü	47
Şekil 3.3.	Çok Kanallı Analizörde Kanal Numarası ve Puls Yüksekliği Arasındaki İlişki.....	48
Şekil 3.4.	Analog Sayısal Dönüştürücünün Şematik Görünümü).....	50
Şekil 3.5.	HPGe Dedektörlü Gama Spektrometri Sistemi	51
Şekil 3.6.	Pik Alanı Hesabı	54
Şekil 3.7.	%50 Bağıl Verimli HPGe Dedektörünün Mutlak Verim Eğrisi	60

Şekil 3.8.	Toprak numunelerinin alındığı noktalar ve Türkiye haritasındaki yerleri.....	65
Şekil 3.9.	Kalibrasyon ve Ölçümler için Kullanılan Plastik Örnek Kabı.....	66
Şekil 4.1.	Yüzey toprak örnekleri için Ra-226'nın aktivite derişim değerleri, Ortalama değeri; Türkiye değeri ve Dünya değeri.....	69
Şekil 4.2.	Yüzey toprak örnekleri için Th-232'nin aktivite derişim değerleri, Ortalama değeri; Türkiye değeri ve Dünya değeri.....	70
Şekil 4.3.	Yüzey toprak örnekleri için ⁴⁰ K'nın aktivite derişim değerleri, Ortalama değeri; Türkiye değeri ve Dünya değeri.....	71
Şekil 4.4.	Yüzey toprak örnekleri için ¹³⁷ Cs'nin aktivite derişim değerleri, Ortalama değeri; Türkiye değeri.....	72

SİMGELER VE KISALTMALAR

A	: Aktivite
A_s	: Standardın aktivitesi
A_x	: Örneğin aktivitesi
B	: Doğal fon
B_1	: Fotopikin sol tarafındaki doğal fon sayımının ortalaması
B_2	: Fotopikin sağ tarafındaki doğal fon sayımının ortalaması
Bq	: Becquerel
D	: Havada absorbe edilmiş doz hızı
dt	: Küçük zaman aralığı
E	: Elektrik alan
E_b	: Gelen fotonun enerjisi
E_i	: İlk enerji
E_f	: Son enerji
E_γ	: Gama enerjisi, gelen foton enerjisi
f_γ	: Gama yayınlanma olasılığı
G	: İlgilenilen bölgedeki pikin toplam alanı, ilgili bölgedeki toplam sayım sayısı
g	: Gram
h	: Planck sabiti, saat
I	: Etkinleşme sonrasındaki gama ışınının şiddeti
I_o	: Kaynaktan çıkan gama ışınının şiddeti
K	: Potasyum
keV	: Kiloelektronvolt
kg	: Kilogram
LET	: Lineer enerji transferi
m	: Güven katsayısı

mc^2	: Elektron ya da pozitronun durgun kütle enerjisi
m_s	: Standardın kütlesi
m_x	: Örneğin kütlesi
N	: Radyoaktif çekirdek sayısı, ilgili pikteki kanalların sayısı
n	: Pikin sağındaki ve solundaki doğal pik kanal sayısı, seçilen uç kanal sayısı, birim hacimdeki atom sayısı
$nGy..$	: Nanogrey
N_0	: Başlangıçtaki çekirdek sayısı, kaynağın aktivitesi
N_p	: Pik alanı
P	: Bozunma olasılığı
$P_Y(E)$	: E enerjili gama fotopikinin yayınlanma olasılığı,
S	: Net pik alanı
SI	: Uluslararası Birimler Sistemi
t	: Zaman, sayım zamanı
T_e	: Foto elektronun kinetik enerjisi
T_+	: Pozitronun kinetik enerjisi
T_-	: Elektronun kinetik enerjisi
$t_{1/2}$	: Yarı ömür
t_d	: Bozunum süresi
t_s	: Standardın sayım süresi
t_x	: Örneğin sayım süresi
Th	: Toryum
X	: X-ışını
Z	: Atom numarası
α	: Alfa
β	: Beta
ΔE	: Enerji Farkı

ε	: Verim
γ	: Gama
μ	: Lineer azalma katsayısı
μCi	: Mikrocurie
μSv	: Mikrosievert
τ	: Ortalama ömür
U	: Uranyum
ADC	: Analog sayısal dönüştürücü
HPGe	: Yüksek saflıkta germanyum dedektörü
IAEA/RGK-1	: UAEA Potasyum standardı
IAEA/RGTh-1	: UAEA Toryum standardı
IAEA/RGU-1	: UAEA Uranyum standardı
ICRU	: Uluslararası Radyasyon Birimleri Komisyonu
MCA	: Çok kanallı Analizör
MDA	: Minimum dedeksiyon aktivitesi
NaI(Tl)	: Talyum aktive edilmiş sodyum iyodür dedektör
UNSCEAR	: Birleşmiş Milletler Radyoaktivite Etkileri Bilimsel Komitesi



1. GİRİŞ

Tüm canlılar, yaşamları boyunca bulunduğu çevreden düşük veya yüksek oranda bir doğal radyasyon seviyesine sürekli ve kaçınılmaz bir şekilde maruz kalmaktadırlar. Bu doğal radyasyon seviyesi, dünyanın doğal bir parçasıdır ve bundan kaynaklı radyasyonu engellemek mümkün olmamaktadır. Kayaç ve topraklarda bulunan yüksek yoğunluklardaki ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K gibi radyonüklidler karasal kökenli doğal radyasyon kaynağını oluşturmaktadır. Karasal kökenli radyasyon yoğunluklarını etkileyen en önemli etken, radyoaktivite kaynaklarının yer kabuğunda farklı yerlerde ve farklı oranlarda dağılmış olmasındandır. Kayaç ve topraklardaki ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K kaynaklı doğal radyoaktivite yoğunluklarını toprağın veya taşın yaşı ve büyüklüğü etkilemezken; rengi, tipi, oluşumu ve kimyasal bileşimi, bölgenin jeolojik yapısı ve coğrafi konumu, radyoaktif çekirdeklerin yerküre üzerindeki farklı dağılımları gibi bazı özellikler doğal radyoaktivite yoğunluklarını etkilemektedir. Bu nedenle insanların maruz kaldığı bu ışınlardan aldığı doz oranları, bölgeden bölgeye hatta bir birine yakın yerleşim alanlarında dahi farklılıklar gösterebilmektedir.

Topraktaki doğal radyasyon nedeniyle gıdalarda da radyasyon bulunmaktadır. Gıdalardan da genellikle, havuçta, patatesten, kuru yemişlerde, maden sularında diğer gıdalara nazaran daha yüksek oranlarda radyasyon bulunmaktadır. Bitkiler toprakta bulunan radyonüklidleri metabolizmasına yoğunlukla kökleri vasıtasıyla alırlar ve böylece gıdalarda da düşük veya yüksek değerlerde radyoaktivite bulunmaktadır. İnsanlar doğal radyonüklidleri solunum ve sindirim yoluyla vücutlarına almaktadırlar.

Radyoaktivitenin keşfi ile ve insanoğlunun bu keşfi; enerji üretimi, sağlık, endüstri ve tarım gibi çeşitli alanlarda kullanılmasıyla birlikte, bu keşif ve kullanım radyoaktivite kaynaklı sorunları da beraberinde getirmiştir. Ayrıca insanoğlunun yaşadığı ortamda kozmik ve toprak kaynaklı gama ışınlarından, yapı

malzemelerinden, havadan ve yiyeceklerden her an doğal radyasyona maruz kalması kaçınılmazdır.

Bu çalışmada 16 Ekim 2014 tarihinde Niğde, Nevşehir ve Kayseri civarlarından toplanan toprak numunelerinde doğal radyoaktif elementlerin (^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K) ve bunların kız ürünlerinin ve yapay radyoaktif elementlerinin (^{137}Cs) gama spektrometresi yöntemi ile aktiviteleri belirlenmiştir. Aralarında 10-15 km mesafe bulunan 16 istasyona ait yüzey ve aynı noktanın 30 cm derinliğinden alınan toprak numuneleri kullanılmıştır.

Niğde; 1229 m rakımlı, 7.400 km² (1/1000000 ölçekli harita) yüzölçümlü, 346.114 nüfuslu (www.nufusu.com), karasal iklime sahip İç Anadolu Bölgesi'nin bir şehridir. Niğde'nin ekonomisi tarıma dayalı; özellikle patates, elma ve şeker pancarı tarımı yapılmaktadır. 2013'te Niğde İlinde 3.948 ton patates üretilmiştir (www.tarim.gov.tr).

Nevşehir; 1224 m rakımlı, 5.407 km² (1/1000000 ölçekli harita) yüzölçümlü, 286.767 nüfuslu (www.nufusu.com), karasal iklime sahip İç Anadolu Bölgesi'nin bir şehridir. Nevşehir'in ekonomisi tarım ve turizme dayanmaktadır. Tahıl, yumrulu ve sanayi için üretilen tarım ürünleri yetiştirilmektedir. Özellikle Nevşehir patates üretiminde, Niğde ve İzmir'den sonra üçüncü sırada yer almaktadır.

Kayseri; 1054 m rakımlı, 17.170 (1/1000000 ölçekli harita) yüzölçümlü, 1.341.056 nüfuslu (www.nufusu.com), sert karasal iklime sahip İç Anadolu Bölgesi'nin bir şehridir. Kayseri'nin ekonomisi ticaret ve sanayiye dayalıdır. Tarım ürünleri olarak buğday, çavdar, arpa, baklagiller, şekerpancarı, patates ve soğan yetiştirilmektedir.

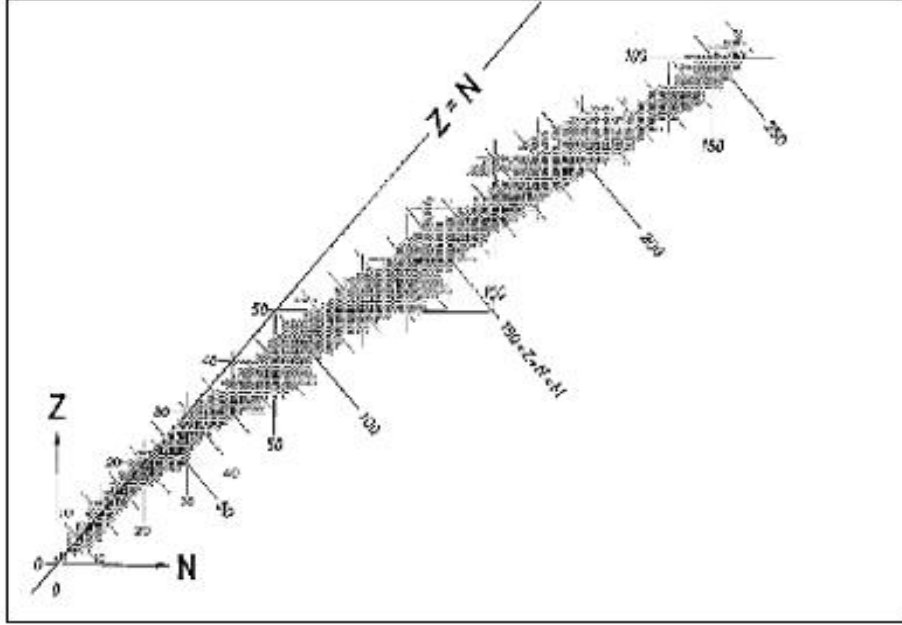
1.1. Radyoaktivite

Atom, elementlerin özelliklerini taşıyan ve nükleonların (proton ve nötron) oluşturduğu bir çekirdek ve bu çekirdeğin etrafındaki orbitallerde bulunan elektronlardan meydana gelmiştir. Atom çekirdeğinin kararlı olabilmesi

nükleonların oranına bağlı olmaktadır. Bir atomun nötron sayısının proton sayısına yaklaşık eşit olduğu durumda, genelde atom kararlı halde bulunmaktadır. Atomların çekirdeğindeki nükleonların oranı hafif elementler için bir olabilirken, ağır elementlere doğru gidildikçe nötronlar lehinde artar ve belli bir noktadan sonra da çekirdeğin kararlılığı bozulur. Atom numarası 83'ten büyük olan elementler için nötron/proton'a oranı büyür ve atomun kararsızlığı artar. Bu durumda olan atomlara “radyonüklit” denir. Radyonüklit adı verilen bu haldeki çekirdekler; bol miktardaki nükleonları sebebiyle kararsız haldedirler ve kararlı hale gelebilmek için sahip oldukları fazla enerjilerini çeşitli parçacıklar salınımı veya ışıma yaparak kararlı hale ve başlangıçtaki (atomun kararsız halde olduğu ve ışımaya başlamadan önceki hali) halinden, fiziksel ve kimyasal olarak farklı bir elemente dönüştüğü süreç “radyoaktivite” olarak tanımlanabilir.

Radyoizotop; doğada kendiliğinden bozunabiliyor, fiziksel ve kimyasal olarak başka bir elemente dönüşebiliyorsa veya doğada bulunan diğer radyoizotopların bozunmasıyla oluşuyorsa bu olaya “doğal radyoaktiflik” denilmektedir. Eğer bir radyoizotop, dışarıdan verilen bir uyarımla (bombardıman edilerek) bozunuma uğrattılıyor (reaktörlerde veya hızlandırıcılarda yapılan işlem), fiziksel ve kimyasal olarak başka bir elemente dönüştürülüyorsa bu olaya da “yapay radyoaktiflik” denilmektedir.

Kararlılık bir genelleme değildir ancak bazı çekirdeklere özgüdür ve (nötron sayısının) / (proton sayısına) yani N/Z 'nin değerine bağlıdır. Şekil 1.1'de bilinen çekirdeklerin n (nötron) ve p (proton) sayılarına göre dağılımı gösterilmiştir. Görüldüğü gibi kararlılık eğrisi ve civarındaki dar kararlılık bölgesi $N=Z$ olan hafif çekirdekleri temsil ederken daha ağır çekirdeklere gidildikçe $N/Z > 1$ olmaktadır.



Şekil 1.1. N-Z Kararlılık Grafiği (Krone, 1998)

Kararlı en ağır çekirdek ^{209}Bi için bu oran yaklaşık 1,5'tir. $N/Z > 1,5$ olan diğer tüm çekirdekler ise kararsızdırlar. Kararlı çekirdeklerin toplam sayısı 300 kadardır ve yalnız 40 tanesi doğaldır. Bilinen 274 kararlı izotoptan 162 tanesinin proton ve nötron sayıları çifttir. N ve Z 2, 4, 8 gibi çift sayılar olduğunda bunlara "çift-çift" çekirdekler denir. Kararlı izotopların 53'ünde N çift, Z tek; 55'inde N tek, Z çift ve yalnızca 4'ünde N ve Z tektir (tek-tek çekirdekler). Birkaç istisnai hal dışında çift-çift çekirdekler tek-tek çekirdeklerden daha kararlıdır (Krone, 1998).

Radyoaktivite, doğal ve yapay radyoaktivite olmak üzere ikiye ayrılır.

1.1.1. Doğal Radyoaktivite

Yerkürede bulunan ve yerkürenin doğal bir parçası olan kararsız radyoaktif elementler kararlı yapıda bir elemente dönüşebilmek için kendiliğinden, çekirdeklerinden enerji yaymaktadırlar.

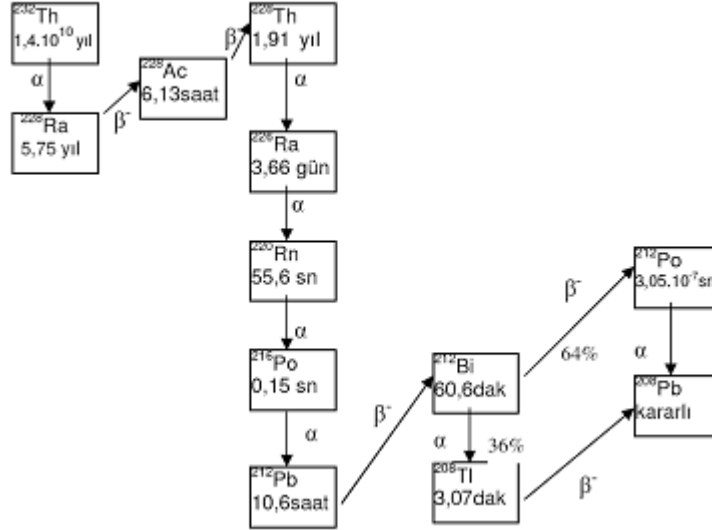
Doğal radyoaktif izotopların birçoğu ağır elementlerden olan üç seride toplanır. Bunlar;

- Toryum serisi (^{238}U kaynaklı)
- Uranyum serisi (^{232}Th kaynaklı)
- Aktinyum serisi (^{235}U kaynaklı)'dir.

1.1.1.1. Toryum Serisi

Toryum radyoaktif bozunum serisinin ana elemanı Th-232'dir. Toryum serisi 11 nüklidi içerir (Şekil 1.2). Kompleks bir gama spektrumu verir ve hemen hemen hepsi daima kararsızdır. Ürün nüklidler sırasıyla: Toryum-232, Radyum-228, Aktinyum-228, Toryum-228, Radyum-224, Radon-220, Polonyum-216, Kurşun-212, Bizmut-212, Polonyum-212, Talyum-208 ve son olarak kararlı Kurşun-208 izotopudur. Toryum serisi içinde en uygun karakteristik gama piki, Talyum-208'e ait olan 2.615 MeV enerjili piktir. Ayrıca Th-232, doğal Toryumun en önemli radyoizotopudur. Th-232'nin yarı ömrü 1.39×10^{10} yıl, spesifik aktivitesi ise 4.1 Bq/mg'dır. Doğal kaynakların jeolojik ölçüm ve tahlilleri amacıyla karakteristik üç gama enerjisi 1.461 MeV (K), 1.764 MeV (U) ve 2.615 MeV (Th) kullanılır (Kahveci, 1993; Dayanıklı, 2004).

Çizelge 1.1'de ^{232}Th 'ye ait yarıömür, enerji ve bağlı bolluk değerleri verilmiştir.

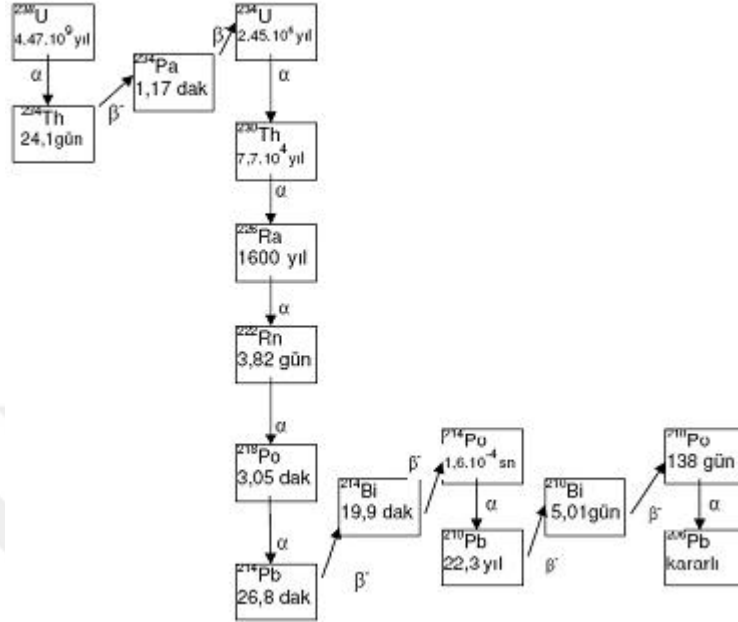


Şekil 1.2. ^{232}Th 'in Bozunma Ürünleri Şeması (NCRP 97, 1988)

1.1.1.2. Uranyum Serisi

Uranyum radyoaktif bozunum serisinin ana elemanı U-238'dir. Bu nüklidler, 8 alfa ve 6 beta parçacık emisyonu içerir. Başlıca kız çekirdekler sırasıyla; Toryum-234, Protaktinyum-234, Uranyum-234, Toryum-230, Radyum-226, Radon-222, Polonyum-218, Kurşun-214, Bizmut-214, Polonyum-214, Kurşun-210, Bizmut-210, Polonyum ve son olarak kararlı Kurşun-210 izotopudur (Şekil 1.3). Doğal uranyum esas olarak U-234, U-235 ve U-238 izotoplarından oluşur. Uranyum; atom numarası 92 ve atom ağırlığı 238,09 olan radyoaktif bir elementtir. Spesifik aktivitesi 12,33 Bq/mg'dır (Dayanıklı, 2004).

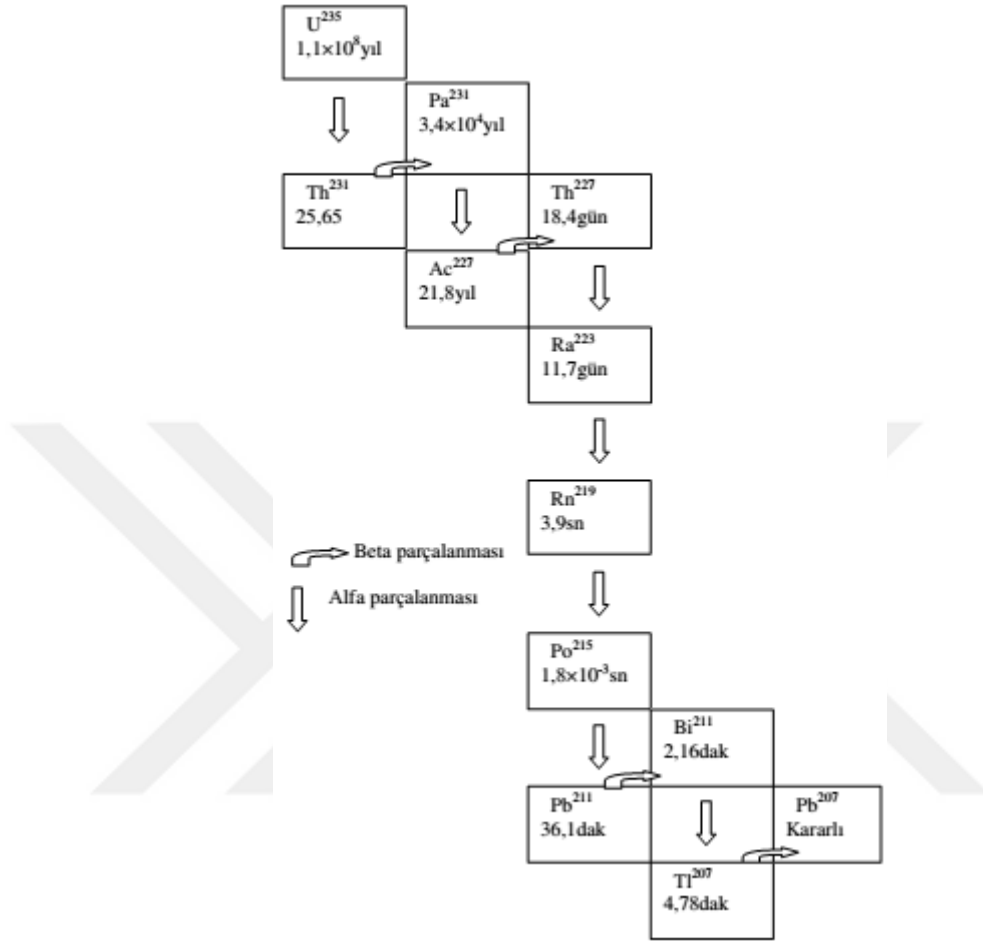
Çizelge 1.2'de ^{238}U 'e ait yarılanma süresi, enerji ve bağlı bolluk değerleri verilmiştir.

Şekil 1.3. ^{238}U Bozunma Ürünleri Şeması (NCRP 97, 1988)

1.1.1.3. Aktinyum Serisi

Bu seri ^{235}U ile başlar ve ^{207}Pb 'ye dönüşerek biter. Bu nüklidler 4 beta, 7 alfa parçacık emisyonu içermektedir. Başlıca kız çekirdekler ise sırasıyla; ^{231}Th , ^{231}Pa , ^{227}Ac , ^{227}Th , ^{223}Ra , ^{219}Rn , ^{215}Po , ^{211}Pb , ^{211}Bi , ^{207}Tl ve son olarak kararlı ^{207}Pb izotopu olmaktadır (Şekil 1.4).

Çizelge 1.3'te ^{235}U 'e ait yarılanma süresi, enerji ve bağlı bolluk değerleri verilmiştir. Ayrıca Çizelge 1.4'te tabiatta tek başına bulunan doğal radyonüklidlere ait yarılanma süresi, yayılan radyasyon, enerji ve bağlı bolluk değerleri verilmiştir.



Şekil 1.4. Aktinyum Serisinin Parçalanması (Görür, 2006)

Çizelge 1.1. ^{232}Th Serisi (Lowder ve ark, 1956; Özger, 2005)

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

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

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

Çizelge 1.3. ^{235}U Serisi (Lowder ve ark, 1956; Özger, 2005)

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

Çizelge 1.4. Tabiatta Tek Başına Bulunan Doğal Radyonüklidler (Lowder ve ark, 1956; Özger, 2005)

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

Doğal radyoaktif elementler doğada; kayalarda, toprakta, suda ve atmosferde (kozmetik ışınlar) bulunduğundan canlıların maruz kaldığı radyasyon ışınlamalarına en fazla katkı, doğal radyoaktivite kaynaklarından gelmektedir.

1.1.1.4. Potasyum

Doğal potasyumun küçük bir kısmı (% 0,12) radyoaktif ^{40}K 'tır. ^{40}K 'ın bozunması, 1,461 MeV'lik gama çıkışına neden olur. ^{40}K 'ın bozunumu sonucunda oluşan ürün çekirdek kararlıdır. Yer kabuğunun %2,6'sını oluşturması nedeniyle potasyum önemli bir elementtir. Boşluğu yaklaşık olarak 0,012 olan radyoaktif potasyumun yarı ömrü $1,26 \times 10^9$ yıl ve spesifik aktivitesi 3,3 Bq/mg'dır. Bunun anlamı ^{40}K 'ın her türlü koşulda konsantrasyonu sabittir ve gram başına saniyede 3,3 gama ışınlamayı yayınlar (Kahveci, 1993; Dayanıklı, 2004).

1.1.1.5. Toprakta Bulunan Doğal Radyoaktivite

Toprakta bulunan radyasyon çok uzun yarı ömürlü olup birkaç milyar yıldan beri yeryüzünde bulunmaktadır. Toprakta bulunan ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K gibi doğal radyonüklidler, toprağın radyoaktif özellik göstermesine neden olmaktadır (El-Shershaby, 2002). Bu radyonüklidler daha çok volkanik, fosfat, granit ve tuz kayalarında yüksek oranlarda bulunmaktadır. Bu kayalar doğa şartlarına bağlı olarak zamanla ufalanarak çok küçük parçalar halinde yağmur veya akıntı suları ile toprağa karışıp topraktaki doğal radyoaktivitenin artmasına neden olurlar. Hatta, tarımda topraktaki verimi artırmak için kullanılan suni gübreleme (radyoaktif ^{32}P içermektedir) gibi bazı insan aktiviteleri de yerel olarak yüzey toprak radyoaktivitesini arttırmaktadır (NCRP 45, 1975; Özger, 2005).

Doğadaki potasyumun %0,0118'i ^{40}K 'tır ve bozunumun sadece %11'inde gama ışınları yayınlanmaktadır. ^{40}K , kayalarda ve toprakta, uranyum ve toryuma nazaran ağırlıkça 10.000 kat fazla bulunmaktadır. Doğada bulunan ^{40}K , ^{238}U ve ^{232}Th 'nin yarı ömürleri, özgün aktivite değerleri ve bozunum başına yayınladıkları foton sayısı Çizelge 1.5'te verilmiştir (Theodorsson, 1996; Özger, 2005).

Çizelge 1.5. Doğada bulunan ^{40}K , ^{238}U ve ^{232}Th 'nin yarı ömürleri, özgün aktivite değerleri ve bozunum başına yayınladıkları foton sayısı (Theodorsson, 1996; Özger, 2005)

Radyonüklid	Yarı Ömür (Yıl)	Spesifik Aktivite (Bq/kg)	Foton/Bozunum (>50keV)
^{40}K	$1,25 \times 10^9$	$2,8 \times 10^4$	0,11
^{232}Th	$14,0 \times 10^9$	$4,02 \times 10^6$	2,08*
^{238}U	$4,5 \times 10^9$	$12,3 \times 10^6$	1,80*

* ^{238}U ve ^{232}Th serilerinin denge halinde olduğu kabul edilmiştir.

^{238}U 'in 14, ^{232}Th 'in 11 olan radyonüklidlerinin ve bozunma ürünlerinin çevrede (hava, su, kayalar ve gıda maddeleri) ve insanlardaki mevcudiyeti, iç ve

dış radyasyon dozlarını doğurmaktadır. Şekil 1.2, Şekil 1.3 ve Şekil 1.4'te ^{232}Th , ^{238}U ve Aktinyum (^{235}U kaynaklı)'a ait bozunma serileri gösterilmektedir (NCRP 97, 1988; Özger, 2005).

Toprakta ^{40}K , ^{238}U ve ^{232}Th radyonüklidlerinin ortalama aktivite kütle konsantrasyonları ve yeryüzünden 1m yukarıda soğurulan doz şiddetleri Çizelge 1.6'da verilmektedir (UNSCEAR, 1988). Yapılan hesaplamalarda toprak yoğunluğu 1.6 g/cm^3 alınmış ayrıca ^{238}U ve ^{232}Th 'in bütün bozunma ürünleriyle dengede olduğu düşünülmüştür. Her üç radyonüklidin ortalama konsantrasyonlarda toprakta bulunması durumunda, yeryüzünden 1m yukarıda γ radyasyonundan dolayı soğurulan doz şiddeti 44 nGy/saat olmaktadır (Myrick ve ark, 1983; Özger, 2005).

Çizelge 1.6. Toprakta ^{40}K , ^{238}U ve ^{232}Th radyonüklidlerinin ortalama aktivite kütle konsantrasyonları ve yeryüzünden 1m yukarıda soğurulan doz şiddetleri (UNSCEAR, 1988; Özger, 2005)

Radyonüklit	Ortalama Aktivite Kütle Konsantrasyonu (Bq/kg)	Havada soğurulan Doz Şiddeti (nGy/saat)
^{40}K	370 (100-700)	16 (4-30)
^{238}U	25 (10-50)	11 (4-21)
^{232}Th	25 (7-50)	17 (5-33)

Parantez içinde verilen değerler tipik oranlardır.

1.1.2. Radyoaktif Bozunma Yasası

Radyoaktif bir elementin değişim halinde bulunan atom sayısı, her an bu elementte mevcut olan atom sayısı ile orantılıdır. Radyoaktivite üstel olarak azalmaktadır. Radyoaktif bir elementin kararlılığı çekirdeğindeki nötron sayısının proton sayısına oranına bağlıdır ve bu oran arttıkça kararsızlık artmaktadır. En ağır kararlı çekirdek ^{209}Bi 'dir ve bundan sonra gelen elementler, kararsız elementlerdir. Kararsız halde olan radyoaktif element, kararlı hale gelebilmek için

çekirdeğinden çeşitli parçacıklar salarak ve ışıma yaparak başlangıçtaki halinden fiziksel ve kimyasal olarak farklı bir elemente dönüşerek kararlı hale gelir ve bu süreci kararlı bir elemente dönüşene kadar devam ettirir. Kararsız haldeki doğal radyoaktif çekirdekler alfa, beta ve gama bozunumları yaparak bir enerji seviyesinden başka bir enerji seviyesine çıkar. Çekirdek tarafından kendiliğinden gerçekleştirilen bu tür geçişler radyoaktif bozunum (parçalanma) olarak adlandırılır.

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

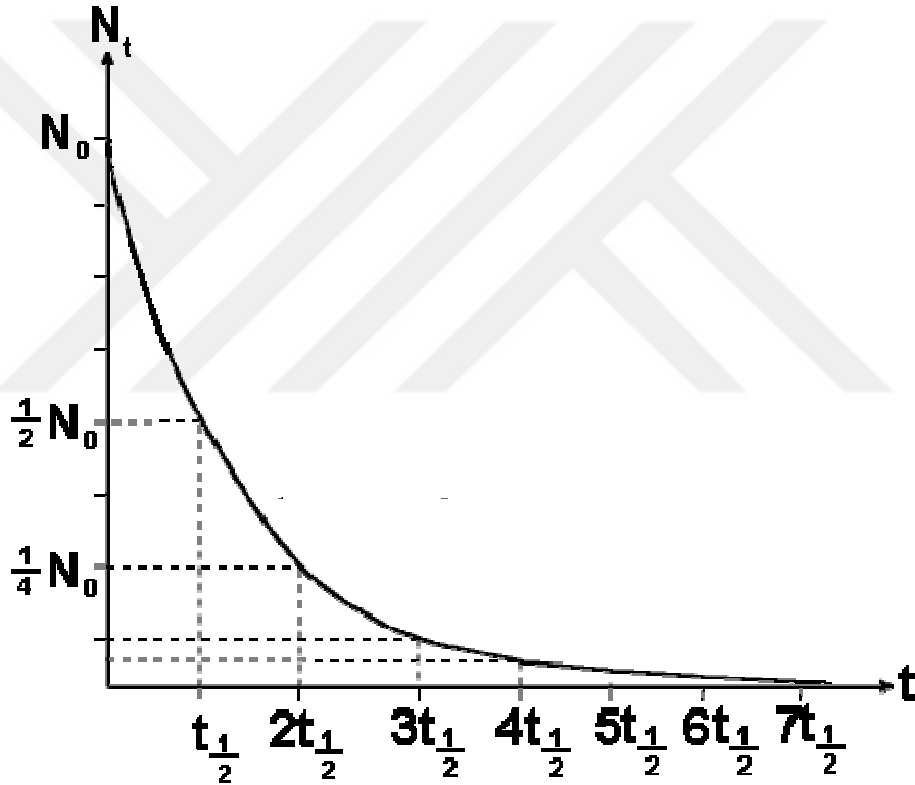
Radyoaktif bir çekirdekte birim zaman aralığında meydana gelen bozunma sayısı “çekirdeğin bozunma hızı” veya “aktivitesi” olarak tanımlanır. Eğer herhangi bir t anında N tane radyoaktif çekirdek varsa ve numuneye dışarıdan çekirdek ilave edilmiyorsa sonsuz küçük dt zaman aralığı içinde bozunan çekirdek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

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

Denklemdaki eksi işareti çekirdek sayısının zamanla azaldığını belirtir. Denklem (1.1)’deki diferansiyel denklem çözülerek “üstel radyoaktif bozunma yasası” elde edilir.

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

Denklemden t zamanı; $N(t)$, t zamanı sonunda geriye kalan çekirdek sayısı; N_0 , başlangıçtaki ($t=0$ iken) çekirdek sayısını ve λ ise radyoaktif numunenin bozunma sabitini gösterir ve birimi s^{-1} 'dir. Aşağıdaki grafik, üstel bozunma denkleminin ait değişimi vermektedir (Şekil 1.5).



Şekil 1.5. Radyoaktif Bir Numune Miktarının Zamanla Değişimi (Krane,1998)

Bozunma yasası denkleminin her iki tarafı λ ile çarpılırsa yukarıda bahsedilen aktivite için bir ifade bulunur.

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

Denlemdeki; $N\lambda$ 'ye, numunenin bozunma hızı veya aktifliği denir ve birim zaman başına bozunma sayısını verir. I ile gösterilir ve birimi bozunma/saniye'dir.

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

Burada I , t anındaki ve I_0 ise $t=0$ anındaki madde miktarıdır (Krane, 1998).

1.1.2.1. Radyoaktif Bir Maddenin Yarılanma Süresi ve Ortalama Ömrü

Radyoaktif bozunma yasasını ifade eden denklem, herhangi bir t anında bozunmadan kalabilen çekirdek sayısını verir. Kuramsal olarak bakıldığında numunedeki tüm çekirdeklerin bozunması için sonsuz zaman geçmesi gerekir. Yani ancak $t \rightarrow \infty$ için $N(t)=0$ olur. Bununla ilgilenmek yerine radyoaktif maddenin ayırt edici bir özelliği olan yarı ömür kavramı kullanılır. Yarı ömür radyoaktif bir elementin başlangıçtaki çekirdek sayısının yarıya inmesi için geçen zamandır. $T_{1/2}$ ile gösterilen yarı ömrü bulmak için $N=N_0/2$ alırsak,

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

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

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

elde edilir. Yarı ömür, çekirdeğin kimyasal ve fiziksel etkilerle değişmeyen bir özelliğidir. Buradan bozunma kanununu $\lambda=0,693/ T_{1/2}$ yazarak yeniden tanımlayabiliriz.

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

Bilinen radyoaktif izotopların yarı ömürleri oldukça geniş bir aralıktadır. En kısa yarı ömürlü çekirdek 10^{-21} s ile ${}^4_2\text{H}$, en uzun yarı ömürlü çekirdek ise 1017 yıl ile ${}^{204}\text{Pb}$ 'dir.

Eğer radyoaktif bozunmaya bir olasılık olarak bakılırsa, bozunma olasılık yoğunluğu fonksiyonu tanımlanabilir.

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

Çekirdeğin bir t ile $t+dt$ zaman aralığındaki bozunma olasılığını veren yukarıdaki ifadeden radyoaktif bir çekirdeğin bozunması için geçen ortalama zaman hesaplanabilir (Krane, 1998).

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

T_{ort} , radyoizotopun “ortalama ömrü” olarak adlandırılır. Yarı ömür ile ortalama ömür arasında aşağıdaki bağıntı yazılabilir.

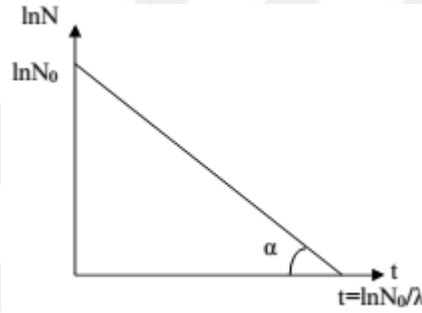
$$T = 0,693 T_{\text{ort}}, \quad T_{\text{ort}} = 1.443 T \quad (1.11)$$

Bozunum değişmezi λ (dolayısıyla yarı ömür), bir radyoaktif elementin ayırt edici bir özelliği olup değeri değişen fiziksel ve kimyasal şartlar ile değişmez. Denklem (1.2)'nin her iki tarafının logaritması alınır,

$$\ln N = \ln N_0 e^{-\lambda t} \quad (1.12)$$

bağıntısı elde edilir. $\ln N$ değerlerini t 'nin fonksiyonu olarak gösteren doğrunun eğimi λ bozunma sabitini verir (Şekil 1.6).

$$\tan \alpha = \frac{\ln N_0}{\frac{\ln N_0}{\lambda}} = \lambda \quad (1.13)$$



Şekil 1.6. Yarı-ömür Ölçülmesi (Yılmaz, 1998)

λ bilinince, T yarı ömür kolayca bulunur. Çeşitli radyoaktif elementlerin yarı ömürleri çok farklı basamaklarda değerler göstermektedir. Bu değerlerin bir kısmı Çizelge 1.7 'de gösterilmektedir (Yılmaz, 1998; Karadem, 2011).

Çizelge 1.7. Bazı İzotopların Yarı-ömürleri (Karadem, 2011)

İzotop	Yarı-ömür	Radyoaktiflik Türü
$^{232}_{90}\text{Th}$	1.39×10^{10} yıl	Alfa, Gama
$^{238}_{92}\text{U}$	4.5×10^9 yıl	Alfa, Gama
$^{226}_{88}\text{Ra}$	1620 yıl	Alfa, Gama
$^{222}_{86}\text{Rn}$	3.82 gün	Alfa
$(\text{ThC}')^{212}_{84}\text{Po}$	3×10^{-7} s	Alfa

1.1.3. Radyoaktif Bozunum Çeşitleri

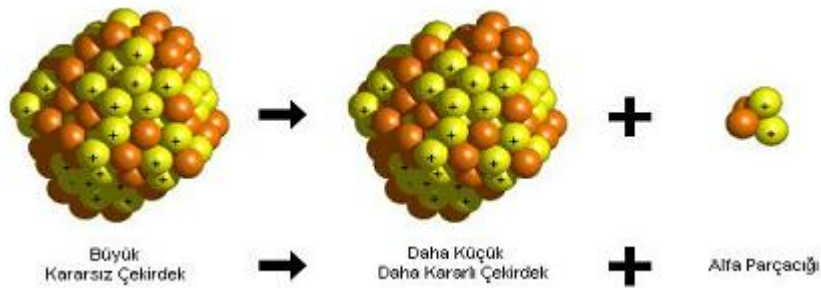
Kararsız halde olan radyoaktif çekirdekler kararlı bir çekirdeğe dönüşmek için çekirdeklerinden çeşitli ışımlar (α , β ve γ gibi) yaparak ilk halinden fiziksel ve kimyasal olarak farklı bir elemente dönüşür.

Radyoaktif maddeler üç çeşit ışıma yaparlar: 1) Alfa (α) parçacıkları, 2) Beta (β) parçacıkları ve 3) Gama (γ) ışınları'dır.

1.1.3.1. Alfa (α) Işınması

Alfa ışınları (parçacıkları); parçacığında iki proton ve iki nötron bulunan, enerjileri 4-9 MeV arasında, hızları $1,4 \times 10^4$ cm/s ila $2,2 \times 10^9$ cm/s arasında değişen ve elektronlardan daha ağır oldukları için havada en fazla 6-7 cm kadar ilerleyebilen şiddetli iyonlaştırıcı parçacıklardır.

Alfa ışıınımı yük sayısı 200'den büyük olan radyonüklidlerde kendiliğinden meydana gelir ve bir alfa ışıınımı yapmış olan çekirdeğin kütle sayısı 4, yükü (atom numarası) ise 2 azalır. Denklem (1.14). Şekil 1,7'de alfa bozunumu gösterilmiştir.



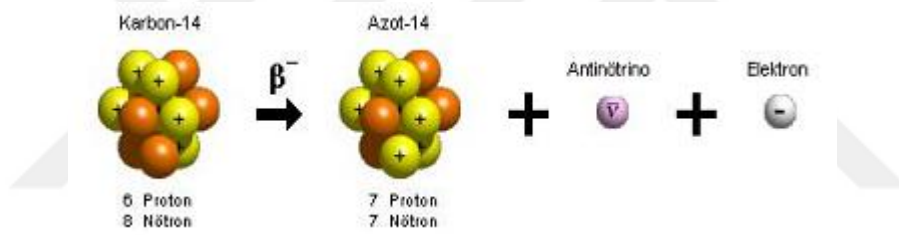
Şekil 1.7. Alfa Bozunumu (Erdoğan, 2010; Karadem, 2011)

1.1.3.2. Beta (β) Işınması

Enerjileri 0,01 MeV ila 5 MeV arasında değişen beta ışınımının maksimum enerjisi her radyonüklid için kendine özgüdür. En büyük enerjiye sahip betalar havada 70-80 cm yol alabilir ve birkaç milimetre kalınlığında metal levhalar tarafından durdurulabilirler.

Beta ışınımı, radyoaktif bir maddenin çekirdeğindeki nötron fazlalığından ileri gelir. Madde, kararsızlığını gidermek için çekirdeğindeki fazla nötronlardan birini proton ve elektrona dönüştürür (Denklem 1.15). Proton çekirdekte kalırken β^- parçacığı veya negatron adı verilen yüksek hızlı bir elektron fırlatır (Şekil 1.8).

$$p \rightarrow n + e^- + \tilde{\nu} \quad (1.15)$$



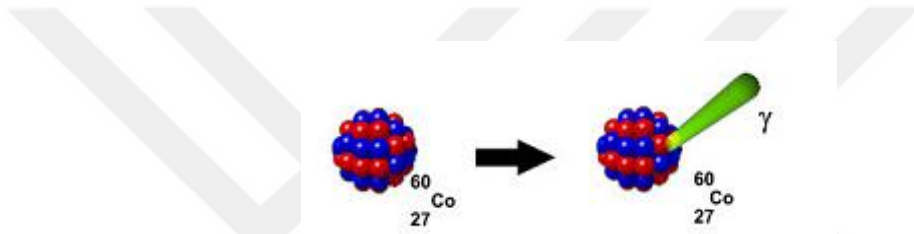
Şekil 1.8. Beta Işınlının Oluşum Olayına Bir Örnek (^{14}C) (Erdoğan, 2010; Karadem, 2011)

β^- ışınması yapan çekirdeğin atom numarası bir artarak kendinden bir sonraki elementin izobar atomuna dönüşür. Bu bozunumda atomun kütle numarası değişmez. Bu olaya “izobarik bozunma” adı verilir (Denklem 1.16).

$${}^A_Z X_n = {}^A_{Z+1} X'_{n-1} + e^- + \tilde{\nu} \quad (1.16)$$

1.1.3.3. Gama (γ) Işınması

Çekirdekteki enerji fazlalığı nedeniyle veya nüklid bozunma olayı ile radyasyon yayınladıktan sonra çoğunlukla hemen kararlı (temel enerji seviyesi) durumuna geçemez, bozunma sonucu oluşan nüklid, hala yarı kararlı durumdadır. Bu fazla kalan uyarılma enerjisi, elektromanyetik enerjide olan bir gama radyasyonu şeklinde hemen yayınlar (Şekil 1.9). Bu şekilde bozunan yarı kararlı nüklidin atom ve kütle sayılarında değişme olmaz, bu nedenle “izomerik bozunma” adı verilmiştir.



Şekil 1.9. Gama Bozunumu (Tüysüz ve ark, 2004; Gezer, 2011)

Gama yayınlanmasının yarı ömrü diğer bozunumlarla kıyaslandığında çok kısadır, genellikle 10^{-9} saniyeden daha küçüktür, ancak saat, hatta gün mertebesinde yarı ömürlü gama yayınlanması da vardır. Enerji spektrumları ise kesiklidir (Tüysüz, 2004; Gezer, 2011).

1.2. Radyasyon Tanımı ve Türleri

Radyasyon; iç dönüşüm geçiren atomlar tarafından yayımlanan, boşlukta ve madde içerisinde hareket edebilen enerji olarak tanımlanır. Yayımlanan kaynağın özelliğine bağlı olarak bu enerji parçacıklar ve elektromanyetik dalgalar tarafından taşınabilir. Radyasyonu tanımlamada üç parametre kullanılır.

- Enerjisi (düşük ve yüksek enerjili radyasyon)
- Türü (parçacık radyasyonu ve elektromanyetik radyasyon)
- Kaynağı (doğal ve yapay radyasyon kaynakları)

Yüksek enerjili radyasyon; iyonize radyasyon olarak da tanımlanır ve atomdan elektron koparabilen, dolayısıyla atomu iyonize eden radyasyon türüdür. Bunlar; Alfa, Beta, Gama ve X-Işınları'dır.

Düşük enerjili ya da iyonize olmayan radyasyon ise etkileştiği materyal içindeki atomları yeteri kadar enerjisi olmadığı için iyonize edemez ve sadece uyarmakla yetinir; mikrodalgalar, görünür ışık, radyo dalgaları, kızılötesi ve (çok kısa dalga boyluları hariç olmak üzere) morötesi ışık iyonize olmayan radyasyona örnektir.

Elektromanyetik spektrumu oluşturan bütün radyasyonlarda enerji, yüksüz ve kütesiz fotonlar tarafından taşınmakta, şayet iyonize edici elektromanyetik radyasyon çekirdekten yayımlanıyorsa "gama", yörüngeden yayımlanıyorsa "X-Işını" adını alır (Seyrek, 2007).

1.3. Radyasyon Kaynakları

Yeryüzünde yaşamını sürdüren tüm canlılar havadan, sudan, topraktan hatta kendi vücutları içerisindeki doğal radyasyon kaynaklarından ve bunlara ek olarak insanlar tarafından üretilen yapay radyasyon kaynaklarından her zaman ışınımına maruz kalmaktadırlar.

Havadaki doğal radyasyon, ya yeryüzündeki çeşitli çatlaklardan çıkan radyoaktif gazlardan özellikle de radon gazından ya da kozmik ışınlardan kaynaklanmaktadır. Bilhassa deniz aşırı yapılan uçak yolculuklarında kozmik ışınlar daha çok maruz kalırız. Topraktaki radyoaktivite ise uranyum, toryum ve bu radyoizotopların bozunum serilerinde yer alan diğer radyoaktif maddelerden kaynaklanır. Sudaki radyasyon, gerek havadaki gerekse topraktaki bu radyoaktif kaynakların su ile etkileşiminin bir sonucudur. Vücudumuzda da bazı radyoaktif maddeler bulunmaktadır. Bunlar içinde en önemlileri ^{40}K , ^{226}Ra ve ^{14}C 'tür.

Yapay radyasyon insanlar tarafından çeşitli amaçlarla üretilmiş radyoaktif izotopların kullanımından kaynaklanmaktadır. Bu radyasyon kaynakları tedavi amaçlı olarak terapide, teşhis amaçlı olarak ise röntgen, tomografi ve sintigrafi

çekimlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca endüstride kalite kontrol, gıda sektöründe ürünlerin raf ömrünü uzatmak için sterilizasyonda nükleer reaktörlerde enerji üretiminde radyoaktif maddelerden faydalanılmaktadır (Tüysüz ve ark, 2004).

1.4. Radyasyon Birimleri

Radyasyon birimlerinin başlıcaları; aktivite, ışınlama, absorblanan doz ve eşdeğer doz'dur. Uluslararası Radyasyon Birimleri Komisyonu (ICRU)'nun yaptığı çalışmalar sonucunda, aktivite için Curie, ışınlama için Röntgen, absorblanan doz için Rad ve eşdeğer doz için Rem'i radyasyon birimleri olarak tanımlamıştır. MKS sistemini esas alan Uluslararası Birimler Sistemi (International System of Unit, SI)'nın kabul edilmesiyle birlikte, ICRU 1971 yılında SI birimlerini tanımlamıştır. Bu kabule göre eski birimlerin yerine yenilerinin kullanılması önerilmiştir. Çizelge 1.8'de dönüşüm birimleri ve dönüşüm faktörleri verilmiştir (Özger, 2005).

Çizelge 1.8. Radyasyon Birimleri ve Dönüşüm Faktörleri (Özger, 2005)

Büyükölük	SI Birimi ve Sembölü	Eski Birimler ve Sembölü	Dönüşüm Faktörü
Aktivite	Becquerel (Bq)	Curie(Ci)	1Ci= 3.7x10 ¹⁰ Bq
İşnlama	Röntgen (C/kg)	Röntgen ®	1C/kg= 3876 R
Absorblanan Doz	Gray (Gy)	Rad(rad)	1Gy= 100 rad
Eşdeğer Doz	Sievert (Sv)	Rem(rem)	1Sv= 100 rem

1.4.1. Aktivite Birimleri

Birim zamanda bozunan atomların sayısı aktivite olarak tanımlanmaktadır. Aktivite birimi; eskiden 1 gram ²²⁶Ra'nın bozunma hızı olarak tanımlanmıştır ve Curie (Ci) olarak adlandırılmıştır. Saniyedeki 3.7x10¹⁰ bozunmaya 1 Curie denilmektedir. Curie'nin yaygın olarak kullanılan alt birimleri microcurie ve

pikocurie'dir. Yeni aktivite birimi, doğal radyoaktiviteyi keşfetmesi onuruna, Becquerel olarak adlandırılmıştır. Becquerel ve Curie arasındaki ilişki şöyledir;

$$1\text{Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ bozunma/s}$$

$$1 \text{ Bq} = 2.7 \times 10^{-11} \text{ Ci} = 27 \text{ pCi}$$

Aktivite, tek başına radyoaktif bir örneğin zararının ölçüsü değildir. Zarar, bozunma sırasında yayınlanan radyasyonun türüne bağlı olarak değişmektedir. Örnek vermek gerekirse; 100 Ci'lik ^{60}Co 'nun 1 metre uzağında 8 saat süreyle çalışan bir insanın alacağı tüm vücut dozu 1050 rem'dir ve bu ölümcül bir dozdur. Aynı koşullar altında 100 Ci'lik ^3H kaynağıyla çalışan bir insan hemen hemen hiç zarar görmeyecektir (Özger, 2005).

1.4.2. Işınlama Birimi

Işınlama, X- ve γ -ışınlarının havayı iyonlaştırma kabiliyetinin bir ölçüsüdür. Işınlama birimi Röntgen, normal hava şartlarında (0°C ve 760 mmHg basıncı) havanın 1 kg'ında $2,58 \times 10^{-4}$ Coulomb'luk elektrik yükü değerinde + ve – iyonlar oluşturan X- ve γ -radyasyon miktarıdır şeklinde tarif edilir. Bu tarif 3 MeV'e kadar olan X ve γ ışınları için geçerlidir.

Röntgen sadece ışınlama birimi olup, ne demetteki foton sayısını ne de enerjisini verir. Işınlamaya uğrayan bir maddedeki soğurma dozunu ifade etmez. Radyasyonun havayı iyonlaştırma kabiliyetinin bir ölçüsü olup radyasyon demetinin bir özelliğidir.

SI birimlerinde ışınlama birimi olarak Röntgen eşdeğeri karşılığının özel bir adı olmasına rağmen "Coulomb/kg" kullanılacaktır ve "1 Coulomb/kg; normal hava şartlarında (0°C ve 760 mmHg basıncı) havanın 1 kg'ında 1 Coulombluk elektrik yükü değerinde + ve – iyonlar oluşturan X ve γ radyasyon miktarı" şeklinde tanımlanmıştır (Görür, 2006).

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

$$1 \text{ R} = 2,58 \times 10^{-4} \text{ C/kg} \text{ şeklinde ifade edilir.}$$

1.4.3. Soğurulan Doz Birimi

Röntgen X ve γ ışınları için tanımlandığında başka radyasyonlar için kullanılamaz. Radyasyonun cinsinden, enerjisinden soğurucu ortamın özelliğinden bağımsız yeni bir birime gerek duyulmuştur.

Işınlanan doz birimleri standart bir madde olarak seçilen normal şartlardaki hava için tanımlanmıştır. Bundan dolayı ışınlama dozu soğurucunun değil esas itibarıyla radyasyon demetinin özelliği hakkında fikir vermektedir. Bunun yanı sıra malzemelerde soğurulan enerjinin de ölçüsü gerekmektedir. Soğurulan doz büyüklüğü, malzemelerde soğurulan enerjinin bir ölçüsüdür.

Soğurulan doz için kullanılan eski birim rad (Roentgen Absorbed Dose)'dır. 1rad herhangi bir malzemenin 1 gramının 100 erg'lik enerji soğurması olarak tanımlanmıştır. SI birim sisteminde absorblanan doz birimi gray (Gy) olup, 1 kg'lık bir maddeye 1 joule'lük enerji veren herhangi bir iyonlaştırıcı radyasyon dozudur (Özger, 2005).

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$$

$$1 \text{ rad} = 10^{-2} \text{ J/kg}$$

$$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$$

1.4.4. Eşdeğer Doz Birimi

Soğurulan dozun meydana getirdiği biyolojik etkiler, iyonlaştırıcı radyasyonların tiplerine ve meydana getirdikleri iyonizasyonun yoğunluğuna bağlıdır. Biyolojik etkiler, iyonlaştırıcı radyasyonların geçtikleri ortamın birim uzunluktaki yolu boyunca kaybettikleri enerji miktarına (Lineer Enerji Transferi, LET) bağlıdır. LET değeri arttıkça biyolojik etkide artmaktadır. Böylece eşdeğer

doz birimi, iyonlaştırıcı radyasyonların oluşturduğu zararlı biyolojik etkilerin bir ölçüsü olmaktadır (Merdanoğlu, 2004).

Eşdeğer doz birimi, absorblanmış doz ile kalite faktörünün çarpımına eşittir. Çizelge 1.9'da çeşitli radyasyon tipleri için kalite faktörleri verilmiştir. Eşdeğer dozun eski birimi rem (Roentgen Equivalent Man)'dir. Yeni birimi ise Joule/kg olup Sievert(Sv) adı verilmiştir (www.taek.gov.tr; Gollnick, 1988; Özger, 2005).

$$1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}$$

$$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$$

Çizelge 1.9. Farklı Radyasyon Türleri İçin Kalite Faktörleri (Özger, 2005)

Radyasyon Türü	Kalite Faktörü
X ve Gama Işınları	1
Elektron ve Beta Parçacıkları	1
Nötronlar; enerjileri <10 keV	3
Nötronlar; enerjileri > 10 keV	10
Alfa Parçacıkları	20

1.5. Gama Işınlmasının Madde ile Etkileşmesi

Madde içerisinde ilerleyen gama ışınının şiddeti Denklem 1.17'de gösterildiği gibi eksponansiyel bir dağılım göstererek değişmektedir.

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (1.17)$$

Burada I_0 kaynaktan çıkan gama ışınının şiddeti, I ise etkileşme sonrasındaki gama ışınının şiddeti, μ değeri lineer azaltma katsayısı olarak adlandırılır ve Denklem 1.18'deki gibi verilir.

$$\mu = \sigma \times n \quad (1.18)$$

Burada; σ gama ışını için tesir kesiti, n ise birim hacimdeki atom sayısını göstermektedir.

Gama ışını için tesir kesiti, gama ışınının madde ile farklı şekillerde etkileşme olasılıklarının toplamı cinsinden verilebilir (Denklem 1.19).

$$\mu = \tau + \sigma + \kappa \quad (1.19)$$

Burada; τ , σ , κ sırasıyla fotoelektrik, Compton saçılması ve çift oluşumu olma olasılıklarını göstermektedir. Gama ışınlarının madde ile yaptığı etkileşmeleri üç farklı olay biçiminde özetlemek mümkündür.

Bu etkileşmeler;

1. Fotoelektrik Olay
2. Compton ve Thomson Saçılması
3. Çift Oluşumu'dur.

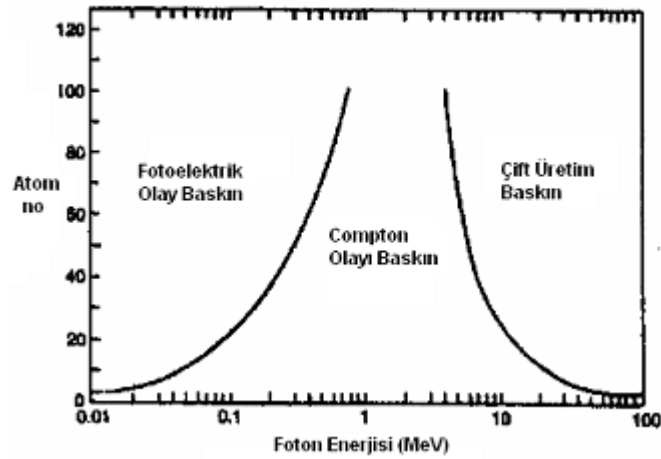
Tüm bu etkileşmeleri Şekil 1.10'da gösterilen bir grafikte ele alacak olursak; enerjisi düşük olan fotonlarda ve büyük Z 'ye sahip atomlarda fotoelektrik olay gerçekleşmektedir. Enerji miktarının artmasıyla birlikte, fotonun soğurulma olasılığı azalacağından, çarptığı atom tarafından enerjisinin tamamı soğurulamayarak foton Compton saçılması gerçekleşmektedir. 5 MeV'in üzerindeki enerjilerde ise çift oluşumu gerçekleşmektedir.

1.5.1. Fotoelektrik Olay

Fotoelektrik olayda, gelen foton atom tarafından soğurulur ve atomun elektronlardan birinin salınmasına neden olur. Serbest hale geçen elektrona "foto

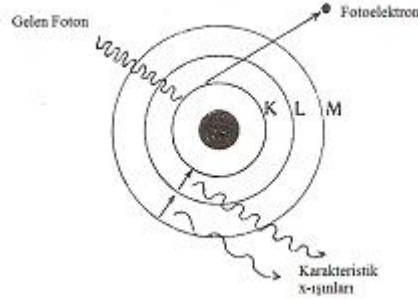
elektron” denir. Foto elektronun kinetik enerjisi (Denklem 1.20), gelen foton enerjisi ile elektronun bağlanma enerjisi arasındaki farka eşittir.

$$T_e = E_\gamma - E_b \quad (1.20)$$



Şekil 1.10. Fotoelektrik Olay, Compton Olayı ve Çift Oluşumunun Baskın Olduğu Bölgeler (Krane, 2001)

Fotoelektrik olayının gerçekleşmesi sonucu serbest hale geçen foto elektronlardan boşalan yerlere üst enerji seviyelerinden başka elektronların geçmesiyle karakteristik X-ışınları yayınlanır. Fotoelektrik soğurma olayının olma olasılığı, soğurucu materyalin atom numarasıyla artar, gelen foton enerjisi E_γ ile azalır (Krane, 2001). Fotoelektrik soğurmanın şematik diyagramı Şekil 1.11’de gösterilmiştir.

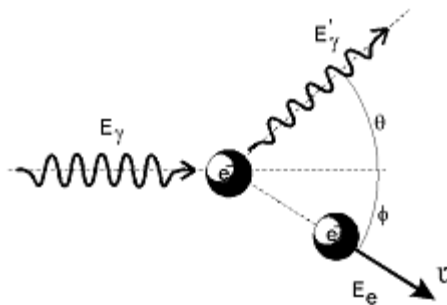


Şekil 1.11. Fotoelektrik Olayının Şematik Gösterimi (İlter, 2014)

1.5.2. Compton Saçılması

Compton saçılması; fotonun, atomun hemen hemen serbest halde bulunan elektronu ile etkileşerek fotonun ve elektronun saçılması olayıdır. Compton saçılmasının şematik diyagramı Şekil 1.12’de gösterilmektedir. Saçılan elektron, foton tarafından kaybedilen enerjiyi taşımakta, E_γ enerjisine sahip olarak gelen foton ise, E_γ' enerjisi ile saçılmaktadır. Saçılan foton için enerji, Denklem (1.21) ile verilir (Krane, 2001).

$$E_\gamma' = \frac{E_g}{1 + \left(\frac{E_g}{mc^2}\right)(1 - \cos\theta)} \quad (1.21)$$



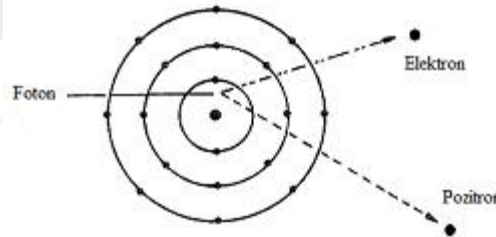
Şekil 1.12. Compton Saçılması (İlter, 2014)

1.5.3. Çift Oluşumu

Fotonların madde ile etkileşiminde çift oluşumu meydana gelebilmektedir (Şekil 1.13). Bu etkileşimde yüksek enerjiye sahip gama ışını bir elektron-pozitron çifti üretir. Elektron ve pozitronun durgun kütle enerjileri 0.511 MeV değerine sahip olduğundan, çift oluşumunun olabilmesi için gelen gama ışınının minimum 1.022 MeV enerjili olması gerekmektedir. Gelen gama ışının enerjisi Denklem (1.22) ile verilmiştir (Krane, 2001).

$$E_{\gamma} = T_{+} + mc^2 + T_{-} + mc^2 \quad (1.22)$$

Burada; E_{γ} , gelen gama ışınının enerjisi, (mc^2) elektron ya da pozitronun durgun kütle enerjisi, T_{+} ve T_{-} sırası ile pozitron ve elektronun kinetik enerjileridir.



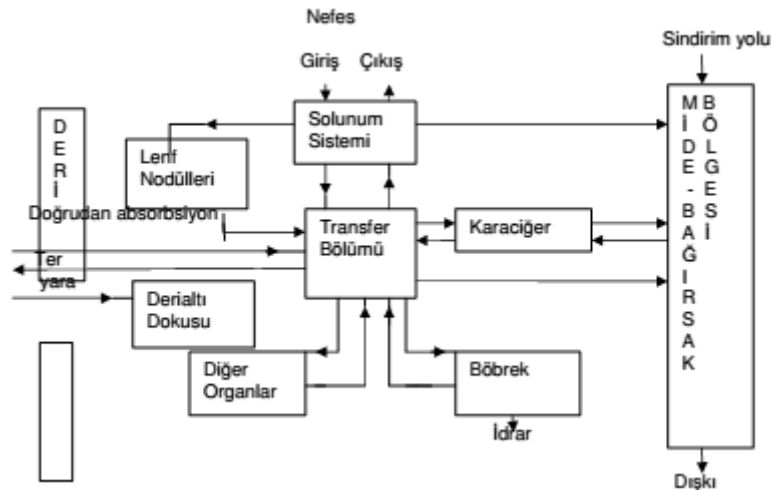
Şekil 1.13 Çift Oluşumunun Şematik Diyagramı (İlter, 2014)

1.6. İnsan Vücudundaki Doğal Radyonüklidler

İnsan vücudunda olan radyoaktif maddelerin davranışı hakkındaki bilgi, alınma biçimine göre atılımdaki oranın veya vücuttaki aktivite ölçümlerinin yorumu için gereklidir. Radyoaktif maddelerin giriş yolları, solunum bölgesi, sindirim yolları (gastrointestinal) ve deri gibi kısımlardır. Bu yollar, dahili transferler ve atılım yolları, Şekil 1.14'te şematik olarak gösterilmiştir. Radyoaktif maddeler hücre dışı sıvılarla transfer bölümüne doğru giderler. Vücuda giren radyoizotop oldukça kompleks ve değişik transferlerle vücudun belli bölgelerinde toplanır. Absorblanmış aktif madde, vücut içinde nispeten homojen olarak

dağılmakla beraber, giren radyoaktif elementin kimyasal özelliklerine göre farklı bölgelerde yoğunlaşır. Örnek olarak iyot tiroidi, toprak alkali metaller kemikte, plutonyum kemik ve karaciğerde, alkali metaller ise yumuşak dokularda toplanırlar. Radyoizotop vücuda girişinden sonra uzun bir zaman periyodunda idrar ve dışkı yoluyla dışarı atılır (Çetiner, 1990; Görür, 2006).

Radyoaktif maddeli taneciklerin, hava, toprak ve bitkilere bulaşması sonucu, vücudumuz dıştan ısınırken, solunum ve sindirim yoluyla vücut içine taşınan “radyoaktif maddeli hava ve besinler de” bizi içten ısınrlarlar.



Şekil 1.13. Radyoizotopların Alınış, Atılış ve Transfer Yolları (Görür, 2006)

Aslında insan, milyonlarca yıldan beri çevresinde ve vücudunda bulunan DOĞAL RADYOAKTİF MADDELER'den saçılan radyasyonlarla birlikte yaşamaktadır. Örneğin, besinler yoluyla vücudumuza yerleşen doğal potasyumdaki ^{40}K radyoizotopu, her insanda 4400 Bq'luk bir radyoaktivite göstermektedir. Hücreler bu gibi doğal radyoizotopların saldıgı radyasyonlara karşı gerekli savunmayı yaparak kendilerini korumaktadır.

İnsan vücudu, kendi içindeki ve çevresindeki doğal radyoaktif maddelerin yayınladığı 15000 kadar radyasyona her saniye hedef olmaktadır. Hatta

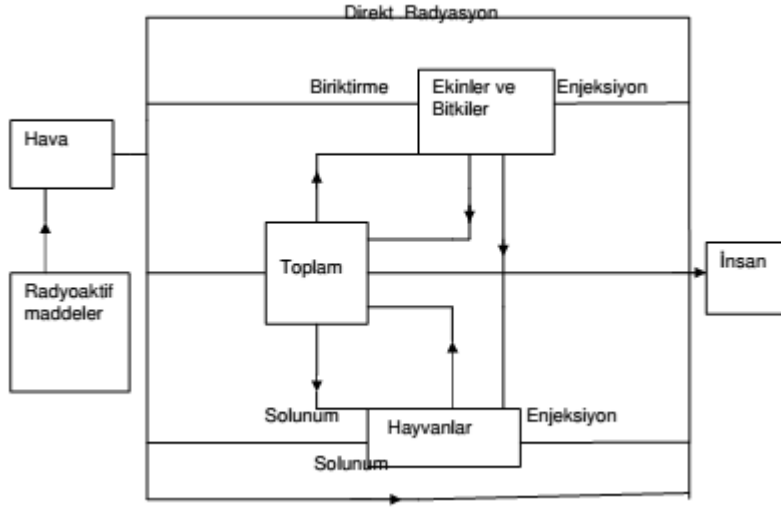
vücudumuzdan yayınlanan radyasyonlar, çevremizde bize yakın kişilere az da olsa ışınlamaktadır (Atakan, 1990; Görür, 2006).

^{40}K , ^{226}Ra ve ^{238}U 'in bozunma ürünleri, insan vücudunda bulunan doğal radyonüklidler olmakla beraber az miktarda ^{14}C ve ^3H 'de insan vücudunda bulunmaktadır. Bu radyonüklidler sindirim ve solunum yoluyla vücuda alınmaktadır.

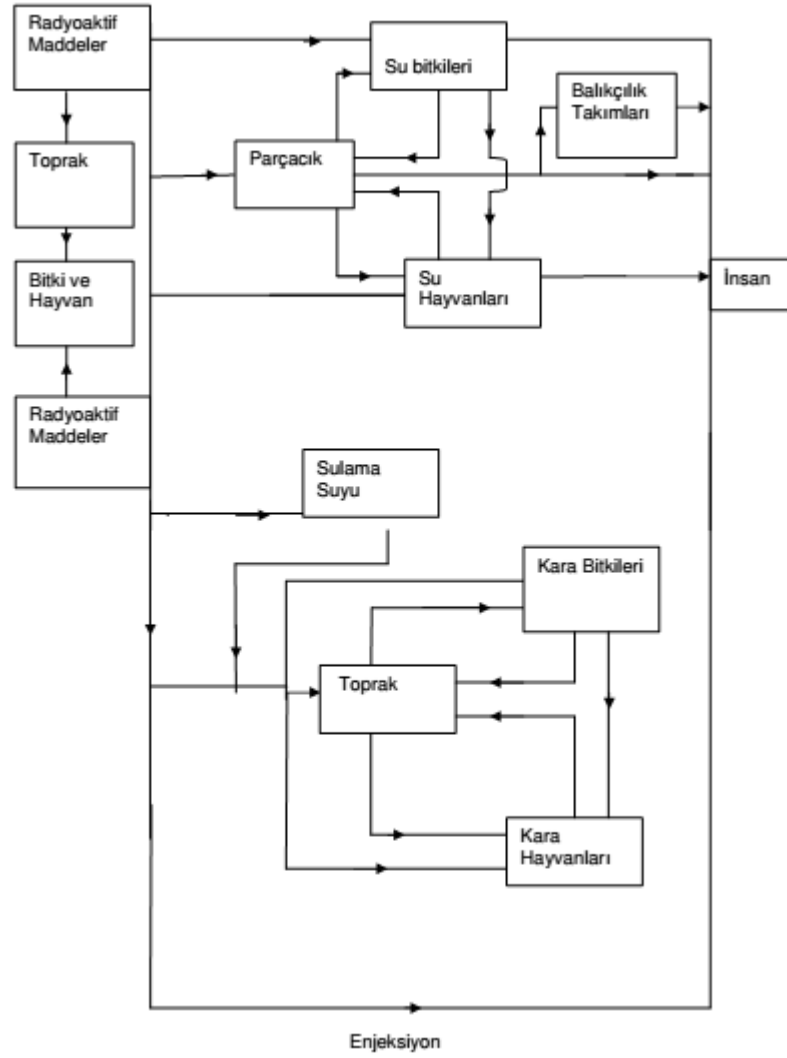
Hava ortamında bulunan toz ve parçacıklardaki radyoaktif maddeler, solunum yolu ile insan vücuduna girerler ve ışınlamalara neden olurlar. İnsan, iç ışınlamada en büyük radyasyon dozunu ^{222}Rn 'den almaktadır. Bu radyoaktif gaz atomları, yerde ve atmosferde difüzyonla ortaya çıkan toryum ve uranyum atomlarının bozunuma uğraması sonucu üretilirler. Radon ve toronun bozunma ürünlerine ek olarak, alfa-ışınları ve beta-ışınlarıyla birlikte gama ışınları da yayınlayan ^{210}Po , ^{210}Pb ve ^{210}Bi atomları solunum yoluyla vücuda girerler. İnşaat ve yapı malzemelerinden çıkan radyoaktif ^{222}Rn , evlerde solunumla vücuda alınan önemli radyonüklidtir (Karahan, 1997; Görür, 2006).

1.7. Radyoizotopların İnsan Vücuduna Geçiş

Radyoizotoplar insana çeşitli yollarla geçer. Bunlar; solunum, direkt temas ve enjeksiyonlardır. Enjeksiyonla geçişlerde; su-insan, su-bitki-insan, su-bitki-hayvan-insan, bitki-hayvan-insan, su-hayvan-insan gibi çeşitli geçişler mümkündür. Şekil 1.15'te atmosfere verilen radyoaktif maddelerin, Şekil 1.16'da yüzey ve yeraltı sularına geçen radyoaktif maddelerin insana geçiş yolları verilmiştir (Acar, 1987; Görür, 2006).



Şekil 1.14. Atmosfere Verilen Radyoaktif Maddelerin İnsana Geçiş Yolları (Görür, 2006)



Şekil 1.15. Yüzey ve Yeraltı Sularına Bırakılan Radyoaktif Maddelerin İnsana Geçiş (Görür, 2006)



2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Bu bölümle, tez konumuzla ilgili daha önce çeşitli ülke ve illerde yapılmış çalışmalar özetlenmiştir.

2014'te Yunanistan'da yapılan çalışmada, Yunanistan'ın her major (ana) plütonik (ısı etkisiyle oluşmuş) kütlelerinden (özellikle granit) toplanan 121 numunede ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K (Bq/kg)'ın spesifik (özel) radyoaktivitelerini belirlemek için γ -ışın spektrometresi kullanılarak analiz edilmiştir. Bu radyonüklidlerin aktivite yoğunluk aralıkları sırasıyla 2.3-266.4, 1.8-375.5, 55.0-1632.0 Bq/kg ve ortalama değerleri 79.2, 85.3 ve 881.4 Bq/kg olarak bulunmuştur. Üzerinde çalışılmış örneklerin (yaş, kaya tipi, renk, tane büyüklüğü, oluşum ve kimyasal bileşimi) bazı ayırt edici özellikleri ve ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın spesifik aktiviteleri arasındaki olası bağlantı incelenmiştir (Papadopoulos ve ark., 2014).

2005'te, Çin'in güneyinde bulunan Xianhuang şehrinden toplanan granit masifi (granit kitlesi) topraklarının doğal radyoaktiviteleri çalışılmıştır. Toplanan 55 numune düşük backgroundlu bir HPGe ile ölçülmüştür. ^{238}U 'ın radyoaktivite yoğunluğu 40.2 Bq/kg'dan 442 Bq/kg'a kadar, ^{40}K 'ın ise 442 Bq/kg'dan 913 Bq/kg'a kadar değişim göstermiş ^{232}Th 'nin değerleri ise çok az bazı farklılıklar göstermektedir. Doğal radyoaktivitenin radyolojik tehlikesini değerlendirmek amacıyla eşdeğer radyum aktivitesi (Ra_{eq}), absorbe edilmiş doz oranı ($\dot{D}$), yıllık etkin doz oranları ve dış tehlike indeksi (H_{ex}) hesaplanmış ve onaylanmış uluslararası değerlerle karşılaştırılmıştır. Bu çalışma özellikle Çin'in güneyindeki uranyum madeninin yakınındaki bir granit alanındaki background radyoaktivite yoğunlukları hakkında bilgi verir. Bu veriler granit tipi uranyum yataklarını keşfetmekte kullanılabilir (Yang ve ark., 2005).

2012'de Türkiye'de yapılan çalışmada, HPGe dedektörlü gama spektrometresi kullanılarak Zonguldak ili sahil kumlarında radyoaktivite ölçümleri yapılmıştır. 12 sahilden alınan toplam 28 kum numunesinde ölçülen ortalama aktivite değerleri, ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K ve ^{137}C için sırasıyla; 18.88 ± 1.16 , 8.35 ± 6.18 ,

167.66±12.17 ve 3.38±0.34 Bq/kg olarak bulunmuştur. Bu aktivite değerleri kullanılarak tahmin edilen yıllık ortalama etkin doz değeri ise 0.028±0.0056 mSv/y'dır. Elde edilen bu değer UNSCEAR 2000 raporunda belirtilen uluslararası ortalama etkin değer altındadır (Küçük, 2012).

2014 'te Türkiye'de Erçek Gölü'nden alınan numunelerle yapılan çalışmada, ²³⁸U, ²³²Th ve ⁴⁰K ve fisyon ürünü ¹³⁷Cs'nin ortalama yoğunlukları yüksek çözünürlüklü germanyum dedektörü ile ölçülmüş ve sonuçlar sırasıyla 18.9, 27.2, 524.0 ve 10.6 Bq/kg olarak bulunmuştur. Toprakta dağılmış radyonüklid kaynaklı yıllık etkin doz ve havada absorbe edilmiş gama doz oranı hesaplaması kullanılarak radyolojik risk değerlendirmesi yapılmıştır. Bu sonuçlar kullanılarak ¹³⁷Cs ve karasal radyasyon kaynaklı halkın aldığı yıllık dış etkin doz ve dış gama doz oranlarının ortalama değerleri sırasıyla 47 n Gy/h ve 0.6 nGy/h, 57.7 µSv ve 1.2 µSv olarak tahmin edilmiştir (Yıldız ve ark., 2014).

2010'da Güney Afrika'da yapılan çalışmada, Batı Namibia'daki Arandis'in komşu kasabasından ve Rössing Uranyum Maden Ocağı'ndan alınan toprak numunelerinde ²³⁸U, ²³²Th ve ⁴⁰K radyonüklidlerinin yoğunlukları, bu bölgenin toprağındaki radyasyon seviyesine dair temel bir veri elde edebilmek amacıyla yüksek çözünürlüklü germanyum dedektörlü HPGe ile ölçülmüştür. Toprak örneklerinde ²³⁸U'nin değeri 45.9±3.0 ila 1752.1±17.5 Bq/kg arasında, ²³²Th'in değeri 70.4±4.8 ila 1865.5±56.0 Bq/kg ve ⁴⁰K'nin değeri ise 376.5±18.1 ila 1300.7±50.7 Bq/kg arasında bulunmuştur. Bu yoğunluklar maden ocağı çevresinde ve kasabadaki yıllık etkin doz oranları ve absorbe edilmiş doz değerlerini hesaplamak için kullanılmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda yıllık etkin doz oranı 0.12±0.01 ila 1.60±0.04 arasında değiştiği ve ortalamasının da 0.30±0.21 mSv/y olduğu bulunmuş ve bu değer bu bölge için normal bir background radyasyon seviyesi olduğu sonucuna varılmıştır (Oyedele ve ark., 2010).

2013'te Hindistan'da yapılan çalışmada, Hindistan'ın Dadri şehrinde bulunan Ulusal Isı Güç Şirketi [National Thermal Power Corporation (NTPC)] civarından toplanan toprak numuneleriyle yapılan çalışmada, LR115-tip II nükleer

iz dedektörü ile mühürlü kutu tekniği kullanılarak radon aktivitesi ve radon soluma hızı oranları ölçüldü. Radon aktiviteleri 177.5 ± 23.1 ila 583.4 ± 4.9 Bq/m³ arasında bulunmuş ortalama değeri ise 330.5 ± 30.4 Bqm⁻³ olarak ölçülmüştür. Toplanan toprak örneklerinde yüzey solunum oranları 63.9 ± 8.3 ila 210.2 ± 15.1 mBq/m²h arasında bulunmuş ve ortalama değeri ise 119.1 ± 11.1 mBqm⁻²h⁻¹ olarak hesaplanmıştır, kitle solunum oranları ise 2.5 ± 0.3 ila 8.1 ± 0.6 mBqm⁻²h⁻¹ arasında bulunmuş ortalama değeri ise 4.6 ± 0.4 mBqm⁻²h⁻¹ olarak hesaplanmıştır. Ayrıca bu deneyde yüksek çözünürlüklü gama ışın spektroskopik sistemi kullanılarak toprakta doğal olarak oluşan radyonüklidlerin (²²⁶Ra, ²³²Th ve ⁴⁰K) aktivite yoğunlukları ölçülmüştür. Yapılan ölçümler sonucunda ²²⁶Ra için 32.2 ± 6.0 ila 120.9 ± 4.5 Bq/kg arasında, ²³²Th için 19.3 ± 0.9 ila 44.6 ± 1.5 Bq/kg arasında ve ⁴⁰K için de 195.4 ± 5.6 Bq/kg arasında değerler bulunmuş, genel ortalama değerleri ise ²²⁶Ra, ²³²Th ve ⁴⁰K için sırasıyla 70.0 ± 8.9 Bq/kg, 34.8 ± 1.2 Bq/kg ve 436.1 ± 5.6 Bq/kg olarak bulunmuştur. ²²⁶Ra, ²³²Th ve ⁴⁰K'nın etkinlik yoğunluklarından, radyum eşdeğer aktivite (Ra_{eq}) değeri hesaplanmış ve 73.4 ila 214.7 Bq/kg arasında bulunmuş; dış tehlike indeksi (H_{ex}) hesaplanmış ve değerleri 0.2 ila 0.6 arasında bulunmuştur (Mahur ve ark., 2013).

2013'te İran'da yapılan çalışmada, İran'ın kuzey kıyısında bulunan Ramsar'dan toplanan 8 farklı yer ve 6 farklı derinlikten (0-36 cm) toplanan kum örnekleri yüksek özünürlüklü gama ışını spektroskopisi kullanılarak ²²⁶Ra, ²³⁸U, ²³²Th ve ⁴⁰K ve ¹³⁷Cs'nin analizi gerçekleştirilmiştir. Doğal radyonüklidlerin ortalama spesifik aktiviteleri ²²⁶Ra, ²³⁸U, ²³²Th ve ⁴⁰K ve ¹³⁷Cs için sırasıyla 2.67 ± 0.17 , 17.9 ± 0.06 , 337.5 ± 0.61 ve 3.35 ± 0.12 Bq/kg olarak bulunmuştur. Ayrıca bu çalışmada doğal radyonüklid seviyelerindeki kum numunelerinin pH değerleri ve organik madde içeriğinin etkileri de araştırılmıştır. Ramsar plajı etrafından toplanan kum numuneleriyle yapılan ölçüm sonucu elde edilen değerler UNSCEAR (2000) tarafından yayınlanan dünya ortalaması değerleriyle karşılaştırılmış, yapılan karşılaştırmalar sonucunda plajdaki kum numunelerinde herhangi bir radyolojik risk bulunmamıştır (Tari ve ark., 2013).

2014'te Ürdün'ün güney kesiminde bulunan Ma'an topraklarındaki doğal radyoaktivite, radyolojik sağlık tehlikesini değerlendirmek ve Ürdün topraklarındaki çevresel radyoaktiviteyi incelemek amacıyla çalışma yapılmıştır. Bu çalışma için topraklar beş ayrı noktadan toplanmıştır. Toprakların kimyasal bileşimini belirlemek için XRF (X-ray flüoresans) spektrometresi kullanılmıştır. Toplam alfa ve toplam beta aktivite ölçümleri sıvı sintilasyon (pırıldama, parıldama) sayacı (LSC) ile yapılmış ve ortalama aktiviteleri sırasıyla 11.74 ± 5.90 , 888.68 ± 76.16 Bq/kg olarak bulunmuştur. Gama yayan radyonüklidlerin aktivite yoğunluklarını ölçmek için yüksek çözünürlüklü germanyum dedektörü kullanılmıştır. Ortalama spesifik ^{226}Ra , ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K için sırasıyla 57.7 ± 5.4 Bq/kg, 44.9 ± 6.3 Bq/kg, 18.1 ± 1.4 Bq/kg ve 138.1 ± 40.8 Bq/kg olarak bulunmuştur. Ayrıca bu çalışmada havada absorbe edilmiş ortalama doz miktarı 37.15 ± 3.53 nGy/h, yıllık etkin eşdeğer doz değeri ise 45.59 ± 4.33 $\mu\text{Sv/y}$ olarak bulunmuştur (Saleh ve ark., 2014).

2010'da Kamerun'da yapılan çalışmada, Kamerun'un güneybatı bölgesinde bulunan Awanda, Ngombas ve Bikoue'den 0-5 cm derinlikten toplanan toprak numunelerindeki ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın radyoaktivite yoğunlukları belirlenmiştir. Ölçümleri gerçekleştirmek ve verileri işlemek için çok kanallı analiz cihazına bağlanmış olan HPGe P-tipi bir dedektör kullanılmıştır. ^{226}Ra 'nın yaş ağırlık aktivite yoğunluğu 0.06 ± 0.01 ila 0.27 ± 0.02 kBq/kg arasında değişmiş, yaş ağırlık ortalama değeri ise 0.13 ± 0.01 kBq/kg olarak ölçülmüş, ^{232}Th 'nin yaş ağırlık aktivite yoğunluğu 0.10 ± 0.01 ila 0.70 ± 0.05 kBq/kg arasında değişmiş, yaş ağırlık ortalama değeri ise 0.39 ± 0.03 kBq/kg olarak bulunmuş ve ^{40}K 'ın ise yaş ağırlık aktivite yoğunluğu 0.37 ± 0.02 ila 1.53 ± 0.11 kBq/kg arasında değişmiş, yaş ağırlık ortalama değeri ise 0.85 ± 0.07 kBq/kg olarak bulunmuştur. Açık hava (outdoor:harici) yıllık etkin dozların ortalama değerleri Ngombas, Awanda ve Bikoue için sırasıyla 0.48 mSv/y, 0.39 mSv/y ve 0.38 mSv/y olarak bulunmuştur. Bu sonuçlara göre çalışılan alanların yüksek background seviyesine sahip olduğu söylenebilir (Abiama ve ark., 2010).

2013'te Türkiye'nin Kilis ili ve çevresinden farklı noktalardan toplanan yüzey toprak örneklerinde, karasal (^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K) ve antropojenik (^{137}Cs) radyonüklidlerin aktivite yoğunlukları ve dış ortamda maruz kalınan dış iyonize radyasyon değeri, yüksek çözünürlüklü germanyum dedektörlü HPGe kullanılarak ölçülmüştür. Toprak örneklerinde ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K ve ^{137}Cs 'in aktivite yoğunluklarının ortalama değerleri sırasıyla 16.1, 15.0, 206.0 ve 9.5 Bq/kg olarak bulunmuştur. Havada absorbe edilmiş gama doz oranının değeri 25 nGy/h'lik ortalamasıyla 5 ila 75 nGy/h arasında değiştiği, yıllık dış etkin doz ise 31 μSv ortalamasıyla 6 ila 92 μSv arasında değiştiği bulunmuştur (Canbazoglu ve ark., 2013).

2007'de Türkiye'nin güneyinde bulunan Adana ili ve civarından toplanan yüzey topraklarındaki doğal radyonüklidlerin yoğunlukları HPGe dedektörü kullanılarak yapılan çalışmada, ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın ortalama aktivite yoğunlukları sırasıyla 17.6 Bq/kg, 21.1 Bq/kg ve 297.5 Bq/kg olarak bulunmuştur. Adana'nın farklı alanları boyunca havadaki karasal radyonüklidlerin doğal gama ışın radyoaktivitesi hesaplanmıştır. Zemin seviyesinden yaklaşık 1 m yükseklikteki havada harici gama doz ölçümleri taşınabilir bir gama sintilasyon dedektörü kullanılarak belirlenmiştir. Havadaki gama doz ölçümleri toprak numunelerinin alındığı yerde yapılmıştır. Numunelerin alındığı istasyonlardaki ortalama harici gama doz oranları 67 nGy/h olarak belirlenmiştir. Burada yaşayanların maruz kaldığı yıllık etkin doz 82 μSv olarak bulunmuştur (Değerlier ve ark., 2007).

2012'de Türkiye'nin Osmaniye ili ve çevresinden farklı noktalardan toplanan yüzey toprak numunelerinde karasal radyonüklidlerin (^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K) dağılımını belirlenmiş ve dış ortamda dışsal maruz kalınmanın neden olduğu radyolojik etkileri tayin edilmiştir. Yapılan hesaplamalar sonunda ^{238}U 'in aktivite yoğunluğu 10.4 ± 0.7 Bq/kg ortalamasıyla 2.6 ila 38.1 Bq/kg arasında, ^{232}Th 'in aktivite yoğunluğu 12.2 ± 0.7 Bq/kg ortalamasıyla 3.7 ila 40.5 Bq/kg arasında, ^{40}K 'ın aktivite yoğunluğu ise 43.4 ± 12.8 Bq/kg ortalamasıyla 30.0 ila 639.7 Bq/kg arasında değişmiştir. Elde edilen aktivite yoğunluk sonuçları yıllık etkin doz ve dış

ortamda absorbe edilmiş gama doz oranını belirlemek için kullanılmıştır. Dış ortamda absorbe edilmiş gama doz oranları 22.4 ± 9.5 Bq/kg ortalamasıyla 5.2 ila 53.6 nGy/h arasında değişmektedir. Ortalama yıllık etkin doz ise 0.03 mSv olarak bulunmuştur. Bu çalışmada HPGe dedektörü kullanılmıştır (Uğur ve ark., 2012).

2006'da Pakistan'ın Punjab bölgesindeki Faisalabad şehri yakınındaki Pakka Anna'dan yaklaşık 80 hektarlık çorak ve ekili alandan toplanan topraklardaki radyoaktivite araştırılmıştır. ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K ve ^{137}Cs kaynaklı aktivite yoğunluk seviyeleri 5 cm aralıklarla 0-25 cm derinlikte 8 hektar boyunca 250 tuzlu toprak numunesi toplanmış ve HPGe dedektörü kullanılarak ölçülmüştür. İlgili radyonüklidlerin aktivite yoğunluk aralıkları hem çorak hem de ekili tuzlu topraklar için sırasıyla; ^{40}K , 499-604 ve 563-629 Bq/kg; ^{137}Cs , 3.57-3.6 ve 1.98-5.15 Bq/kg; ^{232}Th , 49-54 ve 46-62 Bq/kg; ^{226}Ra , 24-29 ve 27-33 Bq/kg aralıklarında bulunmuştur (Tufail ve ark., 2006).

2005'te Pakistan'ın Punjab bölgesindeki Lahore şehrine yakın Rakh Dera Chal'da 60 saatlik alandan tuzlu toprak numuneleri toplanmış ve bu toprak numunelerindeki radyoaktivite değerleri yüksek çözünürlüklü germanyum dedektörü yardımıyla ölçülmüştür. ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K ve ^{137}Cs kaynaklı aktivite yoğunluk seviyeleri, 5 cm aralıklarla 0-25 cm derinlikte 4 hektar boyunca toplanan 125 tuzlu toprak numunesinde ölçüldü. İlgili radyonüklidlerin aktivite yoğunlukları; ^{40}K için, 524.84-601.62 Bq/kg; ^{137}Cs için değer bulunmamış (alt sapma sınırından daha az); ^{226}Ra için, 24.73-28.17 Bq/kg; ^{232}Th için 45.46-28.17 Bq/kg aralıklarında bulunmuştur (Akhtar ve ark., 2005).

2013'te Slovenya'da eşit aralıklarla 70 noktadan toplanan toprak örneklerinde, gama spektrometresi kullanılarak ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K ve alfa spektrometresi kullanılarak da ^{234}U ve ^{238}U analizi yapılmıştır. Aktivite yoğunluklarının ortalamaları ve aralıkları; ^{40}K için 98-2600 Bq/kg ve 800 ± 520 Bq/kg, ^{232}Th için 9-170 Bq/kg ve 77 ± 33 Bq/kg, ^{226}Ra için 12-270 Bq/kg ve 63 ± 44 , ^{234}U için 12-84 Bq/kg ve 34 ± 19 Bq/kg, ^{238}U içinse 11-90 Bq/kg ve 34 ± 19 Bq/kg değerleri elde edilmiştir. Sonuçlar taşbilimi bakımından, ^{40}K ve ^{232}Th için en

yüksek ortalama değerleri karbonatlı kayalarda, ^{226}Ra için kil içeren klastik (parçalanır) sedimentlerde (tortularda) bulunmuştur. Ölçülen aktivite yoğunluklarına dayanılarak karasal gama doz oranları hesaplanmış, karbonatlar üzerinden en yüksek olan toplam doz oranı 15 ila 260 nGy/h arasında 110 ± 49 nGy/h aritmetik ortalamasıyla değişmektedir (Kovacs ve ark., 2013).

2012’de Türkiye’nin yedi coğrafi bölgesinden toplanan 1031 adet toprak numunesinde ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K ve ^{137}Cs ’in aktivite yoğunlukları yüksek çözünürlüklü germanyum dedektörlü HPGe kullanılarak hesaplanmıştır. ^{238}U ’in aktivite yoğunluğu 28.6 ± 0.7 Bq/kg ortalamaıyla 2.0 ila 220.0 Bq/kg arasında, ^{232}Th ’nin aktivite yoğunluğu 33.0 ± 0.7 Bq/kg ortalamaıyla 1.0 ila 158.6 Bq/kg arasında, ^{40}K ’ın aktivite yoğunluğu 448.5 ± 7.3 Bq/kg ortalamasıyla 26.0 ila 1603.2 Bq/kg arasında ve ^{137}Cs ’in aktivite yoğunluğu 13.4 ± 0.8 Bq/kg ortalamaıyla 1.0 ila 357.0 Bq/kg arasında değişmektedir. Ortalama element yoğunluk değerleri ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K için sırasıyla 2.3 mg/kg, 8.1 mg/kg ve 1.4% olarak bulunmuştur. Bütün yüzey toprak numuneleri için absorbe edilmiş gama doz oranı sırasıyla 51.9 nGy/h (4.7-234.3 nGy/h) ve 0.064 mSv/y (0.006-0.287 mSv/y) olarak değerlendirilmiştir (Turhan ve ark., 2012).

2011’de Türkiye’nin Trabzon ili ve 18 ilçesinden toplanan 222 toprak numunesinde ^{137}Cs ve primordial (dünya var olduğundan beri var olan) radyonüklid kaynaklı aktivite yoğunlukları ve absorbe edilmiş gama doz oranları HPGe dedektörü kullanılarak araştırılmıştır. Toprak numunelerindeki ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K ve ^{137}Cs ’nin ortalama aktivite yoğunlukları sırasıyla 41, 35, 437 ve 21 Bq/kg olarak bulunmuştur. Bu sonuçlara dayanılarak havadaki absorbe edilmiş gama doz ortalaması 59 nGy/h ve karasal gama radyasyonuna bağlı yıllık etkin doz ortalaması 72 μSv olarak bulunmuştur (Kurnaz ve ark., 2011).

2003’te Amman Akabe Ulusal Otoyolu (AANH) boyunca otoyol kenarının sekiz farklı istasyondan toplanan toprak numunelerinde doğal olarak oluşan karasal radyonüklidlerin (^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K) absorbe edilmiş gama doz oranları ve spesifik aktivitesi HPGe gama-ışın spektrometresi kullanılarak belirlenmiştir. Toprak

aktiviteleri ^{238}U için 22 ila 104 Bq/kg arasında, ^{232}Th için 21 ila 103 Bq/kg arasında ve ^{40}K içinse 138 ila 601 Bq/kg arasında değişmektedir. ^{238}U 'in en yüksek ortalama değeri Al-Hassa fosfat madeni yakınlarından alınan istasyonda bulunmuştur. Yıllık etkin eşdeğer doz 40-151 μSv arasında bulunmuştur. Bu ortalama değer, UNSCEAR-2000 yayınında verilen açık havada maruz kalınan küresel radyasyon aralığındadır (Al-Jundi ve ark., 2003).

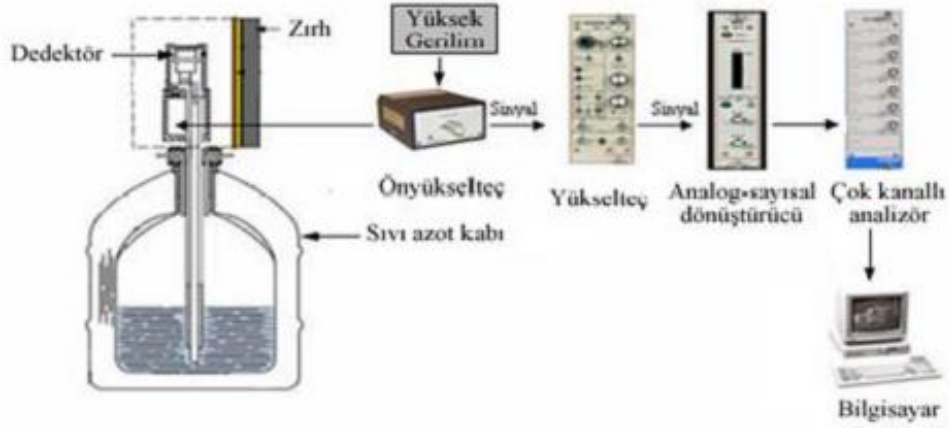


3. MATERYAL VE METOD

3.1. Gama Spektrometresi

Gama spektroskopisi, nükleer yapı analizi çalışmalarında çekirdeğin yapısının araştırılması ve bir maddenin radyoaktif olup olmadığını, radyoaktif ise ölçülen maddedeki radyoaktivitenin hangi izotoptan kaynaklandığını ve aktivite yoğunluğunun ne kadar olduğunu anlamada yaygın olarak kullanılan en hassas analitik ölçüm tekniğidir ve gama spektroskopisinde en yaygın olarak NaI(Tl) sintilasyon dedektörü ve HPGe yarı iletken dedektörleri kullanılmaktadır. Çevresel numunelerin radyoaktiflik analizinde gama spektroskopik yönteminin kullanılma sebepleri, analiz sırasında aynı örnekten farklı radyoaktif çekirdekleri aynı anda ve tek tek analiz etmenin mümkün olması ve numune hazırlamasının kolay ve hızlı olması ayrıca numune hazırlanırken herhangi bir kimyasal işlemin gerekmemesi, ölçümlerdeki yüksek kararlılık, veri işlemedeki doğruluk, analiz edilen bilgilerin güvenilirlik düzeylerinin yüksek olmasıdır.

Gama spektrometresinin bileşenler Na(Tl) gibi sintilasyon veya Ge(Li) ve HPGe gibi yarı iletken bir dedektör, bir önyükseltici, güç kaynağı (yüksek voltaj filtreli), yükseltici, analog sayısal dönüştürücü, çok kanallı analizör ve bilgisayar yazıcısından oluşur. Gama spektrometresi aşağıda Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



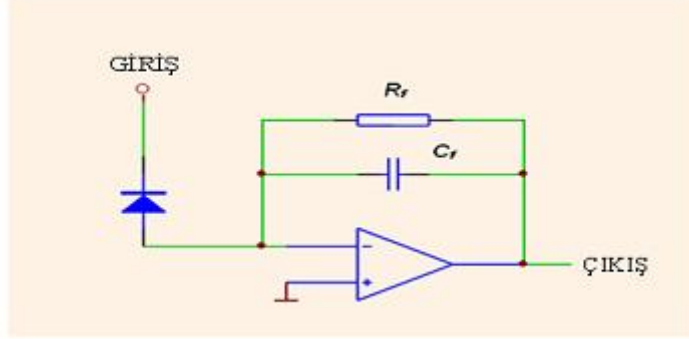
Şekil 3.1. Yüksek Saflıktaki Germanyum Dedektörlü Gama Spektrometresi (Solmaz, 2008).

3.1.1. Yüksek Saflıktaki Germanyum Yarı İletken Dedektörleri

İç bölgesi iyonlaşmış radyasyona (gama ve x ışınları) duyarlı olan P-İ-N yapısındaki yarı iletken diyotlardır. Germanyum kristaline gelen gama ışınlarının oluşturduğu elektron-deşik çiftlerine (elektron-deşik çiftleri ortalama enerjisi 77^0K sıvı azot sıcaklığında $2,96\text{ eV}$ 'tede oluşturulur) elektrik alanının uygulanmasıyla p ve n elektrotlarına hareket ederek gama ışınları sinyal oluştururlar. Dedektör LN2 kriostata yerleştirilen veya bağlanan vakum odasına monte edilmiş böylece hassas dedektör yüzeyleri nem ve diğer bulaşmalardan korunmuştur.

3.1.2. Önyükselteç

Dedektör ile etkileşme sonucu oluşan gama ışınlarının oluşturduğu yükler önyükselteşte toplanır ve önyükselteç burada herhangi bir puls şekillendirmesi yapmaz. Önyükseltecin buradaki görevi detektöre yüksek empedans vermek ve yükselteç ile dedektör arasında bir empedans uyumu oluşturmaktır. Önyükselteçler gerilime, akıma ve yüke duyarlılıklarına göre tasarlanabilirler ve kazancın dedektör kapasitansından bağımsız olması nedeniyle yüksek çözünürlüklü gama spektrometresinde yüke hassas önyükselteçler kullanılırlar (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Yüke Hassas Önyükseltecin Şematik Görünümü (Solmaz, 2008)

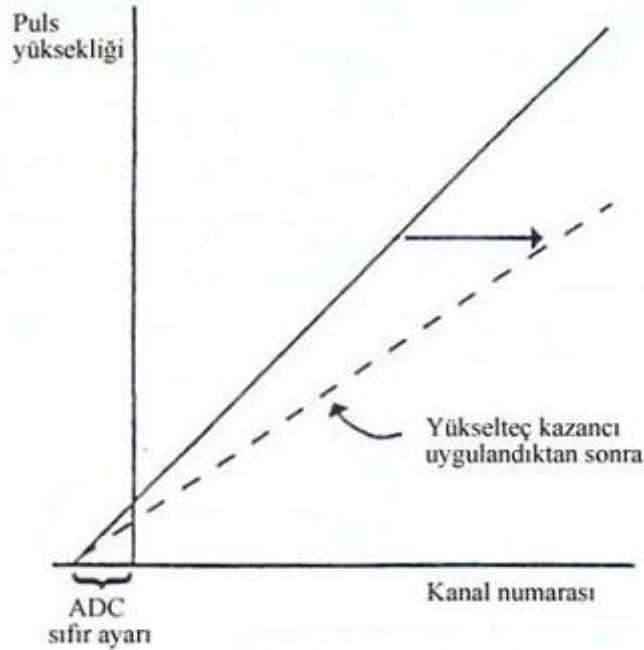
Önyükselteçteki C_f kapasitörü dedektörde oluşan yükü toplar ve yük toplandıkça kapasitördeki gerilim artar. R_f geri besleme direnci (önyükselteç girişini bir sonraki pulsa hazırlamak için) kapasitöre paralel olacak şekilde bağlanır. Böyle elde edilen önyükselteçler “direnc geri beslemeli önyükselteç” diye adlandırılmaktadır. Çıkış pulsunun doğma zamanı 100-700 ns kadar kısa ve hızlıdır. Bu zaman dedektörün yük toplama özelliğine bağlıdır. Ancak çıkış pulsun azalım zamanı uzundur. Buradaki azalım zamanı, geri besleme devresinin $R_f C_f$ çarpımı ile verilen zaman sabiti ile bulunur. Çıkış pulsunun azalım zamanının uzun olmasından dolayı art arda gelen pulsların üst üste binmesi ve R_f geri besleme direncinden kaynaklanan gürültü gibi direnc geri beslemeli önyükselteçlerin iki önemli sorunu vardır. Bu gürültüyü en aza indirgeyebilmek için direnc değeri büyük seçilir.

3.1.3. Yükselteç

Önyükselteçten çıkan kuyruklu pulslar, puls yüksekliğinin ölçülebilmesi için uygun değildir. Bu kuyruklu pulslar yükselteç tarafından büyütülerek daha kısa doğma zamanlı ve çok daha hızlı azalım zamanı olan pulslara dönüştürülürler (Knoll, 2000). Şekillendirmenin istenmeyen etkilerini düzeltmek için, yüksek çözünürlüklü gama spektrometresinde kullanılan yükselteçlerde sıfır-kutup düzeltmesi ve taban seviye düzeltmesi sağlanır.

3.1.4. Çok Kanallı Analizör

Dedektöre gelen gama ışını enerjisiyle orantılı yükseklikte oluşan pulsların yükselteçte şekillendirilmesinden sonra yapılacak işlem bu pulsların çok kanallı analizörde yüksekliklerine göre sıralanmasıdır. Günümüzde 13 bit, 14 bit spektrum kaydetme hafızasına sahip çok kanallı analizörler nükleer spektroskopi yaygın olarak kullanılmaktadır. Kural olarak çok kanallı analizöre gelen pulsun yüksekliği ve bu puls yüksekliğine karşılık gelen kanal numarası arasındaki ilişki doğrusal olmalıdır (Şekil 3.3). Küçük genlikli gürültü pulsların engellenmesi için, analog-sayısal dönüştürücü sıfır ayarı yapılmasına imkan verir. Çok kanallı analizörde integral ve diferansiyel olmak üzere iki farklı doğrusallık tanımlanır. İntegral doğrusallık, puls yüksekliği ve kanal numarası arasındaki doğrusallıktan sapmanın ölçüsü; diferansiyel doğrusallık ise kanal genişliklerinin kararlılığını gösterir ve integral doğrusallığa göre daha hassastır (Gezer, 2011).

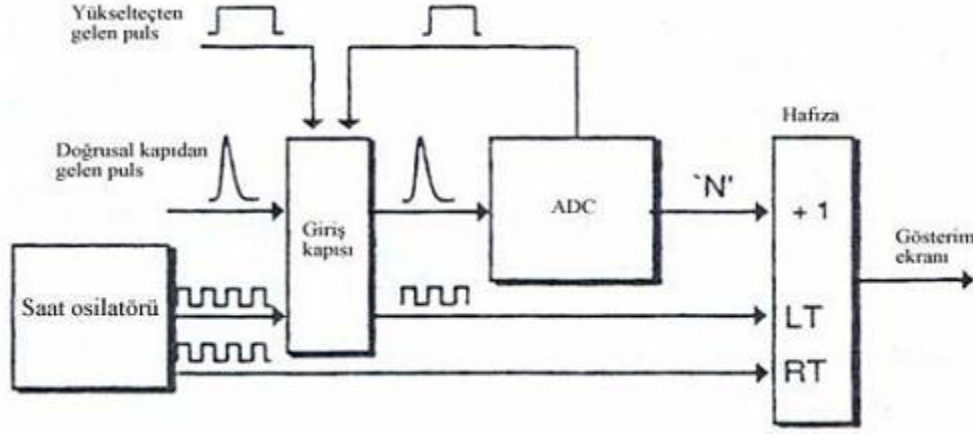


Şekil 3.3. Çok Kanallı Analizörde Kanal Numarası ve Puls Yüksekliği Arasındaki İlişki (Solmaz, 2008; Gezer, 2011)

Spektrum kaydetme hafızası olarak da nitelenen çok kanallı analizörün kanal sayısı 16K'ya kadar çıkmaktadır. Bu hafıza aynı anda veya bölünerek kullanılabilir. Spektrumun elde edilmesinde kullanılacak kanal sayısı dedektörün ayırma gücüne ve ilgilenilen enerji aralığına bağlı olarak seçilmektedir. Genellikle germanyum dedektörlerde yarı yükseklikteki tam genişliğin, $YYTG=4$ kanala eşit olduğu durum uygun kabul edilir. Germanyum dedektörlerde 1000 keV-1500 keV enerji aralığında $YYTG=2$ keV olduğundan kanal başına 0,5 keV enerji karşılık gelmektedir. Bu nedenle ilgilenilen enerji aralığı 2000 keV'den daha yüksek ise pratikte 4096 veya 8192 kanal seçilmesi gerekmektedir. Bu kanal sayısı, $[\text{ilgilenilen enerji aralığı (keV)}/YYTG(\text{keV})] \times YYTG (\text{kanal})$ ifadesinden belirlenir (Knoll, 2000; Gezer, 2011).

3.1.5. Analog Sayısal Dönüştürücü

Enerji spektroskopisinde yükselteçten gelen çıkış pulsu (analog sinyal) ADC'de eşdeğer bir sayıya dönüştürülmekte ve her puls yüksekliklerine göre sıralanmakta ve uygun bir kanala gönderilmektedir (Şekil 3.4). ADC tarafından kontrol edilen bir giriş kapısı bir önceki pulsun sayısallaştırılması sırasında ADC'ye puls gelmesini engellemektedir. ADC, meşgul olmadığı süre boyunca giriş kapısını açık tutacak mantık pulsu sağlar. Giriş kapısının açık olduğu süre, bu kapıya yönlendirilen saat osilatörü pulsları ile ölçülür. Bu pulsların sayısı sistemin aktif kaldığı sürenin (live time, LT) ölçüsüdür. Giriş kapısına gönderilmeyen saat osilatörü pulslarının sayısı ise geçen gerçek süreyi (real time, RT) belirler. Şekil 3.4'teki sistemin puls işlemediği süreye ise ölü zaman (DT) denilir ve $DT=RT-LT$ ifadesinden hesaplanır (Knoll, 2000; Gezer, 2011).



Şekil 3.4. Analog Sayısal Dönüştürücünün Şematik Görünümü (Solmaz, 2008; Gezer, 2011)

3.1.6. ADC Ayırma Gücü

Kullanılan toplam kanal sayısını ifade etmektedir. Genellikle m-bit ADC, 2^m tane kanalı ifade etmektedir. Örneğin 13 bit ADC, 8192 kanalı kaplayacak şekilde bir dönüşüm yapar. Germanyum dedektörlerle kullanılan sistemlerde genel olarak 16384 (16K), 8192 (8K) veya 4096 (4K) kanal bulunmakta ve ayırma gücü [ilgililenilen enerji aralığı (keV)/ADC kanal sayısı] ifadesinden hesaplanmaktadır.

3.1.7. ADC Dönüşüm Kazancı

Herhangi bir spektrumun elde edilebilmesi için kullanılan kanal sayısını ifade etmektedir. Sistemin ayırma gücü 16384 kanal olmasına rağmen, sadece 4096 kanal spektrumda kullanılır, bu durumda dönüşüm kazancı 4096 olacak ve 0-10V aralığındaki pulsler 1-4096 arasındaki kanallarda kaydedilecektir. Spektroskopi uygulamalarında üç tip ADC kullanılmaktadır. Bunlar Wilkinson tipi, Sabit dönüştürme zamanlı ve Ayraçları paralel bağlı (flash tipi) ADC'dir. Nükleer spektroskopi uygulamalarında yaygın olarak Wilkilson tipi ve Sabit dönüştürme zamanlı ADC tercih edilmektedir.

3.2. Gama Spektrometrik Analizlerde Kullanılan Dedektör Sistemi

Toplanmış olduğumuz toprak numunelerini Çizelge 3.1’de verilen özelliklere sahip Şekil 3.5’te gösterilen Canberra GX5020 model kuyu tipi bir HPGe dedektörü ile yapılmıştır.



Şekil 3.5. HPGe Dedektörlü Gama Spektrometri Sistemi (CANBERRA GX5020)

Çizelge 3.1. Yüksek Safılıkta Germanyum Dedektör Özellikleri (Canberra Handbook, 1998; Gezer, 2011).

Dedektör modeli	Canberra HPGe dedector
Bağıl verim	%50
Enerji ayırma gücü ve pik/Compton oranı ^{60}Co 'ın 1332,5 keV enerjideki yarı maksimumdaki tam genişliği	1,94 keV ve 69.8:1
Dedektör geometrisi ve kristal tipi	Kapalı uçlu, eş eksenli ve p-tipi Ge
Çapı ve yüksekliği	65.5 mm ve 62.5 mm
Pencere malzemesi, kalınlığı	Al, 1 mm ve 15,9 cm ²
Pencereden uzaklık	5 mm
Kriyostat ve azot kabı	Dikey geometrili

Dedektör, ortamdaki doğal fon radyasyonunun etkisini en aza indirmek için Canberra Model 747 zırhlı ile zırhlanmıştır. Zırh 9,5 mm kalınlığındaki çelik iskelet içinde 100 mm kalınlığında kurşundan oluşmaktadır. Zırhın iç kısmı 72-88 keV enerji aralığındaki Pb X-ışınları önlemek için 1 mm kalınlığında Cd ve Cd X-ışınlarını (24-28 keV) önlemek için 1,6 mm kalınlığında Cu ile kaplanmıştır. Zırhın taban kısmında halka şeklinde bir kurşunla kapatılmış 11,4 cm çapında boşluk bulunmaktadır. Bu boşluktan dikey geometrili kriyostat ve dedektör kabloları geçmektedir. Zırh içindeki saçılan radyasyonu en aza indirmek için dedektör zırhın merkezine yerleştirilmiştir. Azot soğutması için 50 L hacminde, çift duvarlı (vakumlu) bir sıvı azot kabı kullanılmıştır (Canberra Handbook, 1998; Gezer, 2011).

3.3. Gama Spektrometrik Analizler

3.3.1. Pik Alanı Hesabı

Tek pikin net alanı;

$$S=G-B \quad (3.1)$$

ile elde edilmektedir. Burada;

S: Net pik alanı

G: İlgili bölgedeki toplam sayım sayısı

B:Doğal fon'dur.

Aşağıda Şekil 3.6'te gösterilen pikte B alanı;

$$B = \frac{N}{2n} (B_1 + B_2) \quad (3.2)$$

eşitliğinden elde edilir. Burada;

N: İlgili pikteki kanalların sayısı

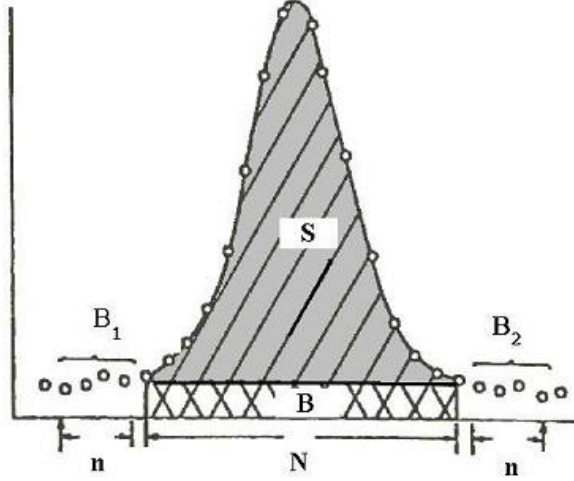
n: Pikin sağındaki ve solundaki doğal pik kanal sayısı'dır.

$$B_1 = \frac{\sum_{a=X_1}^{X_1+n-1} X_a}{n} \quad n \text{ fotopikin sol tarafındaki doğal fon sayımının}$$

ortalaması,

$$B_2 = \frac{\sum_{a=X_2-n+1}^{X_2} X_a}{n} \quad n \text{ fotopikin sağ tarafındaki doğal fon sayımının}$$

ortalaması,



Şekil 3.6. Pik Alanı Hesabı (Solmaz, 2008)

Net pik alanındaki belirsizlik Şekil 3.6’te gösterilen bir fotopik için aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır.

$$s = \sqrt{G + \frac{N}{2} \frac{(B_1 + B_2)}{n}} \quad (3.3)$$

S : Standart sapma

G: Piktaki toplam alan (sayım)

N: İlgilenilen piktaki toplam kanal sayısı

n: Seçilen uç kanal sayısı (4 veya 2)

B_1 ve B_2 ’yi daha önce yukarıda tanımlanmıştır. Hesaplanan pik alanındaki sayım istatistiğini yeterli derecede vurgulamak için, “yüzde hatası” aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$\%Hata = mS / N_p \quad (3.4)$$

Burada;

N_p : Pik alanı

S : standart sapma

m : Güven katsayısı'dır.

3.3.2. Standartla Karşılaştırma Yöntemi

Örneklerin aktivitelerinin hesaplanması için alternatif ve güvenilir bir yöntem de, standartlarla karşılaştırma yöntemidir. Bu yönteme göre, örnekleri ölçeceğimiz geometri ile aynı geometride daha önceden aktivitesi bilinen aktif uranyum, toryum ve potasyum standartları ölçülür, sayım hızları bulunur ve gama spektrumları elde edilir. Daha sonra aynı geometride hazırlanan örnekleri her biri en az 86000 saniye sayım süresi olacak şekilde ölçülür. Standardın aktivitesi bilindiği için sayım hızları oranından örneklerin aktivitesi kolaylıkla, daha güvenli bir şekilde hesaplanabilir. Spektrumlar ilgili radyonüklidler analizörde seçilerek, bilgisayar ortamına transfer edilmiş, bilgisayar ortamında sayım hızları hesaplanan örnekler standartların sayım hızlarıyla oranlanarak her örneğin özgül aktivitesi hesaplanmıştır.

Bu yöntemin en önemli avantajı, sayım hızları oranlanırken dedektör verimlerinin birbirini yok etmesi ve bunun sonucunda da verime bağlı hataların ortadan kalkmasıdır (Parmaksız, 2004).

$$A_s = \frac{(Sayim)_s / t_s}{\epsilon_f m_s} \times 1000 \quad (3.5)$$

$$A_s = \frac{(Sayim)_x / t_x}{\epsilon_f m_x} \times 1000 \quad (3.6)$$

İki bağıntı birbirine oranlandığında;

$$\frac{A_s}{A_x} = \frac{\frac{(Sayim)_s / t_s}{\epsilon_g m_s} \times 1000}{\frac{(Sayim)_x / t_x}{\epsilon_g m_x} \times 1000} \quad (3.7)$$

$$\frac{A_s}{A_x} = \frac{(Sayim)_s t_x m_x}{(Sayim)_x t_s m_s} \quad (3.8)$$

elde edilir. (Sayım/t)= sayım hızı olduğuna göre, ifade yeniden düzenlendiğinde;

$$\frac{A_s}{A_x} = \frac{(Sayim)_s}{t_s} \times \frac{t_x}{(Sayim)_x} \times \frac{m_x}{m_s} \quad (3.9)$$

$$A_s/A_x = (Sayımhızı)_s m_x / (Sayımhızı)_x m_s \quad (3.10)$$

buradan A_x çekilirse;

$$A_x = A_s \cdot (Sayım\ hızı)_x \cdot m_s / (Sayım\ hızı)_s \cdot m_x \quad (3.11)$$

elde edilir. Burada;

A_s =Standartın aktivitesi

A_x =Örneğin aktivitesi

m_s =Standartın kütlesi

m_x =Örneğin kütlesi

t_s =Standartın sayım süresi

t_x =Örneğin sayım süresi

ϵ =Dedektör verimi

f_γ =Gama yayınlanma olasılığı

Sayım/t=Sayım hızı'dır.

Çizelge 3.2. IAEA/RGU-1 (Uranyum Standardı) (Gezer, 2011)

Element	Derişim
Uranyum	400±2 µg/g
Toryum	1µg/g'dan daha az
Potasyum	20 µg/g'dan daha az

Çizelge 3.3. IAEA/RGTh-1 (Toryum standardı) (Gezer, 2011)

Element	Derişim
Toryum	800±16 µg/g
Uranyum	6,3±0,4 µg/g
Potasyum	0,02±0,01 µg/g

Çizelge 3.4. IAEA/RGK-1 (Potasyum Standardı) (Gezer, 2011)

Element	Derişim
Potasyum	44,8±0,3%
Uranyum	0,001 µg/g'dan daha az
Toryum	0,01 µg/g'dan daha az

Çizelge 3.5. Standartların Kütle ve Sayım Süreleri (Gezer, 2011)

	IAEA RGU-1	IAEA RGTH-1	IAEA RGK-1	IAEA Soil-375
Sayım Süresi	24154,3	25804,65	5331,525	1309,37
Kütle (g)	130,1	133,6	178,6	172,7302

Çizelge 3.2, Çizelge 3.3, Çizelge 3.4'te bu metotta kullanılan radyoaktif standartlar verilmiştir. Çizelge 3.5'te standartların kütle ve sayım süreleri verilmiştir.

3.3.3. HPGe Dedektörünün Enerji Kalibrasyonu

Bilgisayar hafızasında toplanan spektrumların analiz edilmesi için, hangi kanalın hangi enerjiye karşılık geldiğinin bilinmesi gerekir. Böylece numunede bulunan radyoaktif çekirdek türleri bulunabilir. Enerji kalibrasyonu yapılabilmesi için önceden enerjileri bilinen çekirdeklerden oluşmuş standart kaynaklara ihtiyaç vardır. Çizelge 3.6'da genel olarak kalibrasyon için kullanılan standart kaynaklara ait bilgiler verilmektedir. Enerji kalibrasyonu için dedektöre konulan standart kaynağın spektrumu elde edilerek hangi kanallara geldiği tespit edilmiştir (Gezer, 2011).

Çizelge 3.6. Standart Kalibrasyon Kaynaklarının Özellikleri (Gezer, 2011)

Gama Enerjisi (keV)	Radyonüklit	Yarı Ömür	Yayınlanma Olasılığı (%)	Aktivite (µCi)	Saniyedeki Gama Çıkışı	Toplam Belirsizlik (%)
88	Cd-109	462,6±0,7gün	3,63	1,437	1,930	3,1
122	Co-57	271,79±0,09gün	85,6	0,05533	1,752	3,0
159	Te-123m	119,7±0,1gün	84,0	0,06398	1,988	3,0
320	Cr-51	27,706±0,007gün	9,86	1847	6,738	3,1
392	Sn-113	115,09±0,04gün	64,89	0,2767	6,643	3,0
514	Sr-85	64,849±0,004gün	98,4	0,3899	14,200	3,0
662	Cs-137	30,17±0,16yıl	85,1	0,2438	7,677	3,0
898	Y-88	106,630±0,025gün	94,0	0,5472	19,030	3,0
1173	Co-60	5,272±0,001yıl	99,86	0,3055	11,290	3,0
1333	Co-60	5,272±0,001yıl	99,98	0,3055	11,300	3,0
1836	Y-88	106,63±0,025gün	99,36	0,5472	20,120	3,0

3.3.4. HPGe Dedektörünün Mutlak Verim Kalibrasyonu

%50 bağıl verimli HPGe dedektörünün verim kalibrasyonunu yapmak için IAEA'dan alınan ve örneklerle aynı geometriye sahip kaplarda hazırlanan RGU (uranyum cevheri), RGTh (toryum cevheri), RGK (K_2SO_4) ve Soil-375 standartları kullanılmıştır.

Çizelge 3.2, Çizelge 3.3 ve Çizelge 3.4'te bu metotta kullanılan radyoaktif standartlar verilmiştir. Standartlar dedektörün tepesine yerleştirilmiştir ve spektrumları elde edilmiştir. Çizelge 3.5'te standartların kütle ve sayım süreleri verilmiştir. %50 verimli HPGe dedektöründe, standart ile değişik mesafelerden ölçülerek her mesafe için ortalama verim bulunmuştur. Çizelge 3.7, Şekil 3.7'de deneysel olarak bulunan verim eğrisi uyarlanarak dedektörün mutlak verim eğrisi elde edilmiştir (Gezer, 2011).

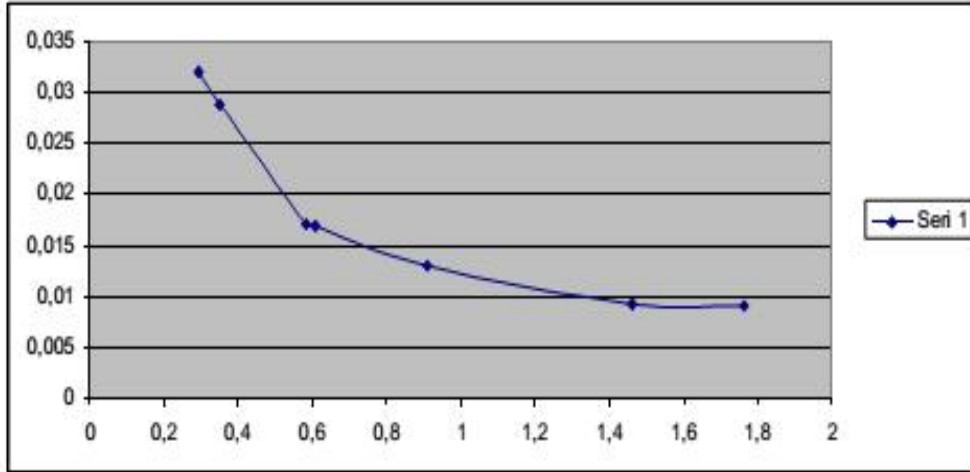
Deneysel olarak bulunan verim uygun bir fonksiyona uyarlanırsa;

$Y(\epsilon) = \exp[a+b*\ln(\epsilon)+c*\ln(\epsilon)^2+d*\ln(\epsilon)^3]$ elde edilir. Fonksiyondaki sabitlerin değerleri ise;

a: -4,53 b: $-6,50 \times 10^{-1}$ c: $5,13 \times 10^{-1}$ d: $2,54 \times 10^{-1}$ dir.

Çizelge 3.7. Verim Kalibrasyonu Verileri (Gezer, 2011)

Radyoizotop	Enerji (keV)	Deneysel	Verim Fit
Pb-214	295,207	0,031973391	0,032361577
Pb-214	351,925	0,028700041	0,027956064
Tl-208	583,191	0,017090938	0,017142287
Bi-214	609,318	0,0168893	0,01642408
Ac-911	911,16	0,012999298	0,011547408
K-60	1460,83	0,009284926	0,009234669
Bi-214	1764,515	0,009003414	0,009250239



Şekil 3.7. %50 Bağlı Verimli HPGe Dedektörünün Mutlak Verim Eğrisi (Gezer, 2011).

3.4. Havada Absorbe Edilmiş Doz Hızı (D)

^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K gibi doğal radyonüklidlerin, havada absorbe edilmiş doz oranına katkısı, ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın doğal spesifik etkinlik yoğunluklarına bağlıdır. Gama radyasyonuna en büyük katkı karasal radyonüklidlerden gelmektedir. Radyonüklid yoğunluğu ile karasal radyonüklid arasında doğrudan bir ilişki vardır. Eğer radyonüklid aktivitesi bilinirse, yerden 1 m yukarıda maruz kalınan havadaki doz oranı, Beck (1972) ve UNSCEAR (1988)'in önerdiği aşağıdaki bağıntı kullanılarak hesaplanabilir.

$$D(\text{nGy/h}) = 0.427 A_{\text{U}} + 0.662 A_{\text{Th}} + 0.0432 A_{\text{K}} \quad (3.13)$$

Burada; D, yerden 1 m yukarıda soğurulan doz oranı, A_{U} , A_{Th} ve A_{K} sırasıyla ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın aktivite yoğunluklarıdır. ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın dönüşüm faktörleri her Bq/kg için sırasıyla 0.427, 0.662 ve 0.0432 nGy/h'tir (Beck, 1972; Kurnaz, 2007; Bakkal, 2012).

3.5. Radyum Eşdeğer Aktivitesi (R_{eq}) ve Dış Tehlike Endeksi (H_{ex})

Radyum eşdeğer aktivitesi yaygın olarak kullanılan bir tehlike indeksidir ve Beretka ve Mathew (1985)'in verdiği aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır. ^{226}Ra 'nın 370 Bq/kg'lık aktivitesi, ^{232}Th 'nin 259 Bq/kg'lık aktivitesi ve ^{40}K 'ın 4810 Bq/kg'lık aktivitesinin aynı gama doz hızını ürettiği farz edilir (Kurnaz, 2007; Bakkal, 2007).

$$R_{\text{eq}} = A_{\text{Ra}} + 1.43 A_{\text{Th}} + 0.077 A_{\text{K}} \quad (3.14)$$

Burada; A_{Ra} , A_{Th} ve A_{K} sırasıyla, ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın Bq/kg biriminde aktivite yoğunluklarıdır.

Dış tehlike endeksi (H_{ex}), Krieger (1981)'in önerdiği aşağıdaki bağıntı kullanılarak hesaplanır (Kurnaz, 2007; Bakkal, 2012).

$$H_{ex} = A_{Ra}/370 + A_{Th}/259 + A_K/4810 \text{ } \text{£} 1 \quad (3.15)$$

Burada; A_{Ra} , A_{Th} ve A_K sırasıyla, ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın Bq/kg biriminde aktivite yoğunluklarıdır.

3.6. Yıllık Gonadal Doz Eşdeğeri (YGDE)

Kemik iliği ve kemik yüzey hücreleri aktivitesi, UNSCEAR (1988)'ın ilgilenilen organlar olarak kabul edilir. Bu nedenle ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın spesifik aktivitelerine bağlı YGDE, aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır (Mamont-Ciesla, 1982; Kurnaz, 2007; Bakkal, 2012).

$$\text{YGDE } (\mu\text{Sv/yıl}) = 3.09 A_{Ra} + 4.18 A_{Th} + 0.314 A_K \quad (3.16)$$

3.7. Yıllık Etkin Doz Eşdeğeri (YEDE)

Yıllık etkin doz eşdeğerinin hesaplanması için, havadaki absorblanan dozun etkin doza dönüşüm katsayısı ve bina dışı meşguliyet faktörü dikkate alınır. UNSCEAR (2000) raporlarında, yetişkinler için havadaki absorblanan dozun, etkin doza dönüşüm katsayısı olarak 0.7 Sv/Gy değeri ve bina içi meşguliyet faktörü olarak 0.2 değeri kullanılır. Yıllık etkin doz eşdeğeri aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır (Kurnaz, 2007; Bakkal, 2012)

$$\text{YEDE}(\mu\text{Sv/yıl}) = D(\text{nGy/h}) \times 8760(\text{saat/yıl}) \times 0.2 \times 0.7(\text{Sv/Gy}) \times 10^{-3} \quad (3.17)$$

3.8. Yaşam Boyu Kanseri Riski (AYKR)

Yaşam boyu kanser riski aşağıdaki bağıntı kullanılarak hesaplanır.

$$\text{AYKR} = \text{YEDE} \times \text{DL} \times \text{RF} \quad (3.18)$$

Burada; DL= yaşam süresi (70 yıl)

RF = risk faktörü (Sv⁻¹). Sievert başına ölümcül kanser riskini ifade eder. Stokastik etkiler için RF değeri 0.05 olarak alınır (ICRP, 1990; Kurnaz, 2007; Bakkal, 2012).

3.9. Toprak Numunelerinin Toplanması

Bu çalışma için gerekli olan toprak numuneleri; koordinatları aşağıda verilen Niğde, Nevşehir, Kayseri civarındaki topraklardan temin edildi. Numuneler istasyon denilen, aralarında yaklaşık 10-15 km kadar mesafe bulunan 16 noktadan toplandı. Toplam 16 istasyon bulunmaktadır. Aralarında 10-15 km mesafe bulunan her bir istasyonun yüzeyinden ve aynı istasyonun 30 cm derininden olmak üzere 1-2 kg ağırlığında 2 farklı toprak numunesi alındı. Bu istasyonların koordinatları, GPS cihazı ile K (kuzey) ve D (doğu) koordinatlar olarak tespit edildi. Numunelerin alındığı koordinatlar Çizelge 3.8’de yer almaktadır.

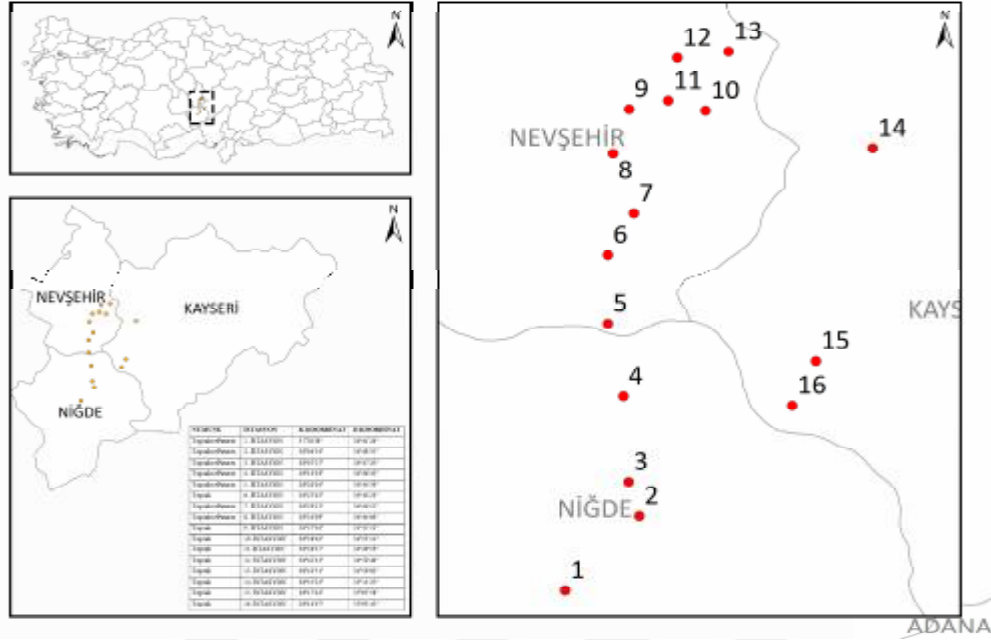
Çizelge 3.8. Toprak Numunelerinin Koordinatları

NUMUNE/Şehir	İSTASYON	K KOORDİNAT	D KOORDİNAT
Toprak/Niğde	1. İSTASYON	37°58'38"	34°41'26"
Toprak/Niğde	2. İSTASYON	38°04'54"	34°48'35"
Toprak/Niğde	3. İSTASYON	38°07'27"	34°47'20"
Toprak/Niğde	4. İSTASYON	38°14'19"	34°46'30"
Toprak/Nevşehir	5. İSTASYON	38°20'04"	34°44'39"
Toprak/Nevşehir	6. İSTASYON	38°25'43"	34°44'24"
Toprak/Nevşehir	7. İSTASYON	38°29'13"	34°46'52"
Toprak/Nevşehir	8. İSTASYON	38°34'09"	34°44'06"
Toprak/Nevşehir	9. İSTASYON	38°37'46"	34°45'52"
Toprak/Nevşehir	10. İSTASYON	38°38'02"	34°53'54"
Toprak/Nevşehir	11. İSTASYON	38°38'37"	34°49'59"
Toprak/Nevşehir	12. İSTASYON	38°42'12"	34°50'46"
Toprak/Nevşehir	13. İSTASYON	38°42'51"	34°56'02"
Toprak/Kayseri	14. İSTASYON	38°35'23"	35°11'23"
Toprak/Kayseri	15. İSTASYON	38°17'44"	35°05'58"
Toprak/Kayseri	16. İSTASYON	38°14'07"	35°03'43"

Toprak numuneleri toplanırken; metre, çapa, kürek, naylon poşet, etiket, ip, eldiven ve kalem aparatları kullanıldı.

Seçilen istasyonun bulunduğu bölgenin çeşitli özellikleri taşımasına özen gösterildi. Erozyona uğramamasına, homojen bir dağılım göstermesine, düz bir arazi olmasına, yüzeyin otlarla veya ağaçlarla kaplı olmamasına, istasyonun ağaç veya herhangi bir şeyle gölgelenmemiş bir arazide yer almasına dikkat edildi.

Bu özellikleri taşıyan ve aralarında 10-15 km mesafe bulunan yerlerden numuneler şu şekilde alındı. Çapa ile toprak yüzeyi hafif vuruşlarla yaklaşık 1 cm derinliğinde ve deneyimiz için gerekli miktarda toprak elde edebilecek genişlikteki alan kazıldı. Kazılmayla oluşan yaklaşık 1-2 kg toprak, içerisinden taş, ot, odun parçaları ve ağaç kabukları gibi deneyimizi olumsuz yönde etkileyecek olan gereksiz maddelerden ayıklandı. Gereksiz maddelerden ayıklanan toprak özel kürek yardımıyla alındı ve poşetlere konuldu. İstasyon numarası ve GPS cihazında okunan koordinat değerleri poşet üzerine yapıştırılan etikete kalem ile yazıldı. Aynı istasyon çapa yardımıyla 30 cm derine kadar kazıldı ve derinlik metre ile ölçüldü. 30 cm kazılan derinlikten yaklaşık 1-2 kg ağırlığındaki toprak; taş, ot, odun parçaları ve ağaç kabukları gibi deneyimizi olumsuz yönde etkileyecek olan gereksiz maddelerden ayıklandı. Gereksiz maddelerden ayıklanmış olan toprak özel kürek yardımıyla alınarak poşetlere konuldu. İstasyon numarası ve GPS cihazında okunan koordinat değerleri poşet üzerine yapıştırılan etikete kalem ile yazıldı. Bu işlemler 16 farklı istasyon için tekrar edildi. 16 istasyondan [her istasyondan 2 numune (yüzey ve 30 cm derinden) olmak üzere] toplam 32 adet toprak numunesi toplandı.



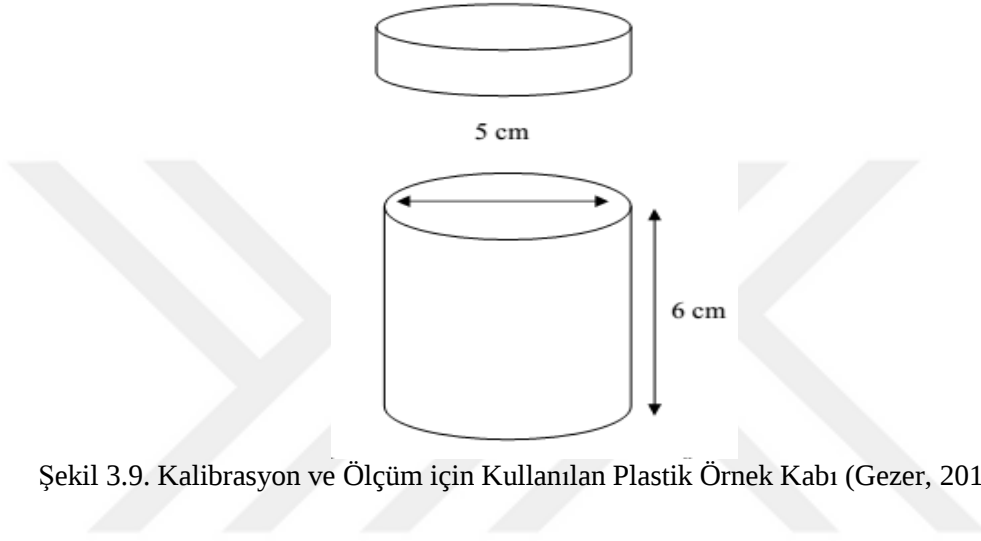
Şekil 3.8. Toprak numunelerinin alındığı noktalar ve Türkiye haritasındaki yerleri.

Şekil 3.8 de toplanan numunelerin kodları ve coğrafi konumları harita üzerinde gösterildi. Toprak numuneleri alındıktan sonra ölçüme hazırlamak ve ölçmek için, Çukurova Üniversitesi Fizik Bölümü Gülten Günel Fizik Araştırma Laboratuvarı'na getirildi.

3.10. Numunelerinin Ölçüm için Hazırlanması

Toprak numuneleri sayıma hazır hale getirilebilmesi için bir dizi işlemden geçirildi. 32 adet toprak numunemiz, 1 mm'lik elekten elendi ve Nüve marka FN 500 model etüvde, 105°C sıcaklıkta 24 saat boyunca tamamen kurutuldu. Kurutulduktan sonra 0.3 mm'lik elek ile tekrar elendi. Elekten geçirilen numuneler hassas terazide darası alınmış olan 5x6 cm geometriye sahip numune kaplarına (Şekil 3.14) konuldu. Her bir numunenin net ağırlığı alındı. Hazırlanan her bir numune kabının ağzı sigil edildi. Net ağırlık, numune kabının darası, bu işlemin yapıldığı tarih, istasyon numarası ve istasyonun koordinatları numune kabının

üzerine yapıştırılmış olan etikete kalem ile yazıldı. Siğil edilen numune kaplarının sızdırmazlığı sağlanarak ^{226}Ra ve onun ürün çekirdekleri olan ^{222}Rn arasındaki kalıcı dengeyi oluşturmak için 4 hafta bekletildi ve böylece numuneler radyoaktivite ölçümü işlemine hazır hale getirildi.



Şekil 3.9. Kalibrasyon ve Ölçüm için Kullanılan Plastik Örnek Kabı (Gezer, 2011)

3.11. Numunelerin Gama Spektrometresinde Ölçümü

Toprak numunelerinin doğal radyasyon seviyelerini belirlemek için; denge durumuna ulaşmış olan her bir toprak numunesinin aktivitesi, 86000 saniye süresince, Çukurova Üniversitesi Fizik Bölümü Gülten Günel Fizik Araştırma Laboratuvarı'nda Canberra GX5020 model yüksek çözünürlüklü germanyum dedektöründe (Şekil 3.5) analiz edildi. Sayım sonuçları çok kanallı analizöre aktarılarak, ilgili radyonüklidler için pikler tespit edildi. Seçilen pikler bilgisayar ortamına aktarıldı ve radyonüklidlerin aktiviteleri hesaplandı.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, yukarıda Türkiye üzerinde yerleri ve koordinatları verilen Nevşehir il sınırından toplanan toprak numunelerinin içeriğinde bulunan doğal radyonüklit konsantrasyonları belirlenmiştir. Birbirine yakın il sınırlarından toprağın homojen olarak alınmasına dikkat edildi (yaklaşık her 10-15 km’de bir istasyon olacak şekilde ve her istasyondan, yüzeyden ve 30 cm derinlikten alınan 2 toprak numunesi). Yüzeyden (Ü) 16 toprak numunesi ve aynı istasyonun 30 cm derininden (A) alınan 16 toprak numunesi (toplamda 32 toprak numunesi) Çukurova Üniversitesi Fizik Bölümü Gülten Günel Laboratuvarı’ndaki HPGe dedektöründe gama spektrometrik yöntem kullanılarak belirlenmiştir. ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K ve ^{137}Cs serileri için tespit edilen her bir radyonüklidin aktivitesi Çizelge 4.1’de verilmiş ve elde edilen sonuçlar ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

4.1. Toprak Örneklerindeki ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K Radyonüklidlerinden Elde Edilen Aktivite Derişim Değerleri

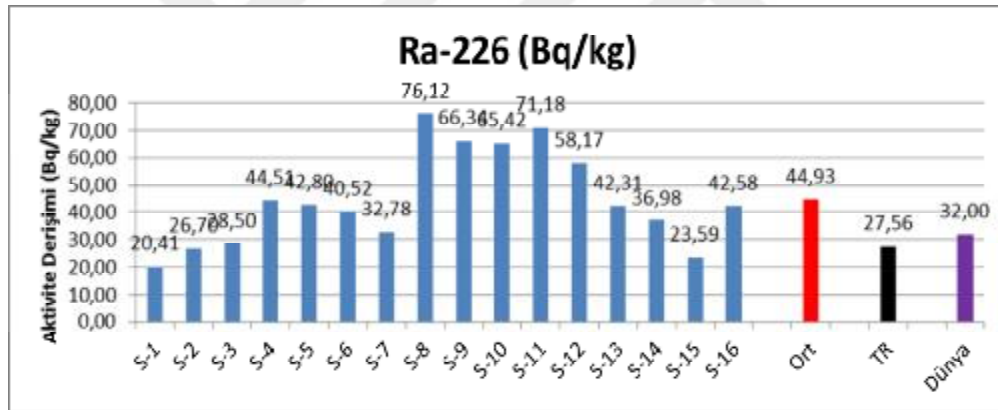
^{226}Ra ile ^{222}Rn arasındaki kalıcı dengeyi sağlamak için dört hafta bekletilen toprak örneklerindeki ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktivite derişim değerleri, aynı geometrideki RGU, RGTh ve RGK standartlarından elde edilen veriler ve Denklem (3.11) kullanılarak hesaplanmıştır. Birbirine yakın Niğde-Nevşehir-Kayseri il sınırları içinden temin edilen üst yüzey (Ü) ve 30 cm derinliğinden (A) alınan toprak örneklerindeki ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K ve ^{137}Cs aktivite derişim değerleri sırasıyla Çizelge 4.1 verilmektedir.

Çizelge 4.1. Toprak örneklerinin ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K ve ^{137}Cs aktivite derişim değerleri

Örnek Kodu/şehir	Örnek tanımı	Aktivite Derişimi (Bq/kg)							
		^{226}Ra	Hata	^{232}Th	Hata	^{40}K	Hata	^{137}Cs	Hata
S-1/Niğde	A	51,84	2,63	53,17	4,40	657,36	11,28	11,94	1,28
	Ü	20,41	2,52	20,55	6,76	621,39	17,63	<MDA	---
S-2/Niğde	A	10,64	1,57	12,99	4,61	567,36	12,16	3,69	0,68
	Ü	26,70	1,86	37,25	3,29	609,11	9,99	7,57	0,89
S-3/Niğde	A	27,83	2,71	56,88	4,62	547,72	10,52	9,49	1,11
	Ü	28,50	2,24	47,21	4,09	527,82	9,87	7,06	1,01
S-4/Niğde	A	27,26	1,68	18,20	3,02	678,59	11,76	9,19	0,81
	Ü	44,51	1,83	34,07	3,26	737,34	9,71	11,87	0,67
S-5/Nevşehir	A	54,82	2,71	59,64	4,56	382,93	6,67	11,12	1,06
	Ü	42,80	2,46	42,13	3,44	631,94	11,16	8,47	0,99
S-6/Nevşehir	A	42,32	3,13	45,04	5,82	697,29	13,52	8,62	1,09
	Ü	40,52	3,12	39,76	5,72	720,38	15,51	8,31	1,12
S-7/Nevşehir	A	51,55	2,57	56,69	4,56	725,31	11,49	8,16	1,00
	Ü	32,78	1,35	36,63	2,71	444,55	7,37	4,48	0,56
S-8/Nevşehir	A	76,71	4,07	89,09	7,68	953,88	22,53	12,30	1,09
	Ü	76,12	2,22	88,91	5,23	944,78	13,48	13,61	0,55
S-9/Nevşehir	A	69,98	4,05	102,69	8,19	872,20	21,65	25,09	1,38
	Ü	66,34	4,21	98,78	8,89	838,73	26,19	17,28	1,50
S-10/Nevşehir	A	65,39	4,09	74,21	7,29	881,78	22,70	28,39	1,58
	Ü	65,42	5,01	69,16	8,92	876,65	30,82	30,32	1,91
S-11/Nevşehir	A	74,32	3,81	83,68	7,23	887,50	24,60	12,51	1,05
	Ü	71,18	1,70	85,25	4,60	921,09	10,07	19,57	0,38
S-12/Nevşehir	A	56,15	1,92	67,91	4,18	725,37	10,80	12,81	0,60
	Ü	58,17	1,93	64,53	4,05	710,67	11,03	7,73	0,43
S-13/Nevşehir	A	45,05	3,54	47,82	6,89	596,21	21,71	19,96	1,36
	Ü	42,31	3,72	48,53	6,77	553,19	22,08	24,36	1,63
S-14/Kayseri	A	41,03	4,06	52,19	7,72	653,65	28,70	12,00	1,30
	Ü	36,98	1,11	44,14	2,57	629,72	7,82	11,54	0,34
S-15/Kayseri	A	27,75	2,72	24,48	4,16	283,05	13,40	19,52	1,45
	Ü	23,59	2,35	26,34	4,32	363,88	12,86	11,03	1,00
S-16/Kayseri	A	48,07	4,00	45,08	6,40	429,20	18,21	16,65	1,56
	Ü	42,58	1,75	41,10	3,06	469,77	8,82	13,45	0,53

^{226}Ra , ^{238}U 'nun bozunum serisinde bulunup, 186 keV'lik (%4 bollukta) bir enerji pikine sahiptir. ^{226}Ra 'nın 186 keV'deki bu piki ^{238}U 'in 185,7 keV'deki piki ile iç içe geçmesi nedeni ile hesaplamalarla bulunabilmektedir (Karahan, 1997; Özger, 2005). Yapılan ölçümler sonucu elde edilen 16 yüzey toprak numunesine ait

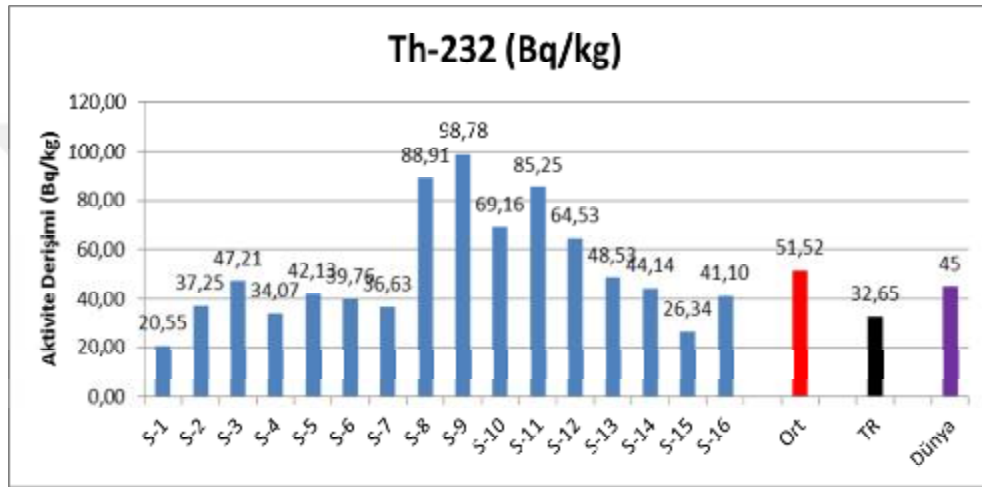
^{226}Ra 'nın radyoaktivite sonuçları, 16 numuneye ait sayısal sonucun ortalaması, Türkiye ortalaması ve dünya ortalaması değerlerine ait grafik aşağıda Şekil 4.1'de verilmiştir. Yapılan ölçümlerde ^{226}Ra 'nın aktivite konsantrasyonu yüzey toprak numunelerinde en küçük aktivite konsantrasyon değeri 20.41 ± 2.52 Bq/kg ile Niğde'den alınan S-1 numunesinde ölçülmüş; en yüksek aktivite konsantrasyon değeri ise 76.12 ± 2.22 Bq/kg ile Nevşehir'den alınan S-8 numunesinde ölçülmüştür. Ölçüm yapılan yüzey 16 (Ü) toprak numunesi için ^{226}Ra 'nın aktivite konsantrasyon ortalaması 44.93 Bq/kg olarak hesaplanmıştır. Bu değer Türkiye Atom Enerji Kurumu—[TAEK; www.taek.gov.tr; (Türkiye Çevresel Radyoaktivite Atlası)] tarafından verilen; Türkiye ortalaması olan 27.56 Bq/kg değerinden ve dünya ortalama değeri olan 32 Bq/kg değerinden büyüktür.



Şekil 4.1. Yüzey toprak örnekleri için Ra-226'nın aktivite derişim değerleri, Ortalama değeri; Türkiye değeri ve Dünya değeri

Yapılan ölçümler sonucu elde edilen 16 yüzey toprak numunesine ait ^{232}Th 'nin radyoaktivite sonuçları, 16 numuneye ait sayısal sonucun ortalaması, Türkiye ortalaması ve dünya ortalaması değerlerine ait grafik aşağıda Şekil 4.2'de verilmiştir. Buna göre, yüzey toprak numunelerindeki ^{232}Th 'nin en küçük aktivite konsantrasyon değeri 20.55 ± 6.76 Bq/kg ile Niğde'den alınan S-1 numunesinde ölçülmüş; en yüksek aktivite konsantrasyon değeri ise 98.78 ± 8.89 Bq/kg ile

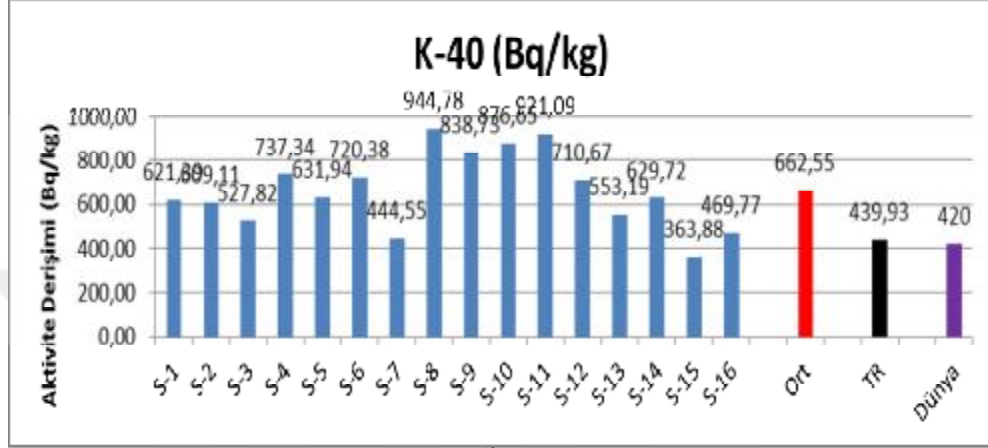
Nevşehir’den alınan S-9 numunesinde ölçülmüştür. Ölçüm yapılan yüzey 16 toprak numunesi için ortalama ^{232}Th ’nin aktivite konsantrasyon ortalaması 51.52 Bq/kg olarak hesaplanmıştır. Bu değer TAEK tarafından verilen; Türkiye ortalaması olan 32.65 Bq/kg değerinden ve dünya ortalama değeri olan 45 Bq/kg değerinden büyüktür.



Şekil 4.2. Yüzey toprak örnekleri için Th-232’nin aktivite derişim değerleri, Ortalama değeri; Türkiye değeri ve Dünya değeri

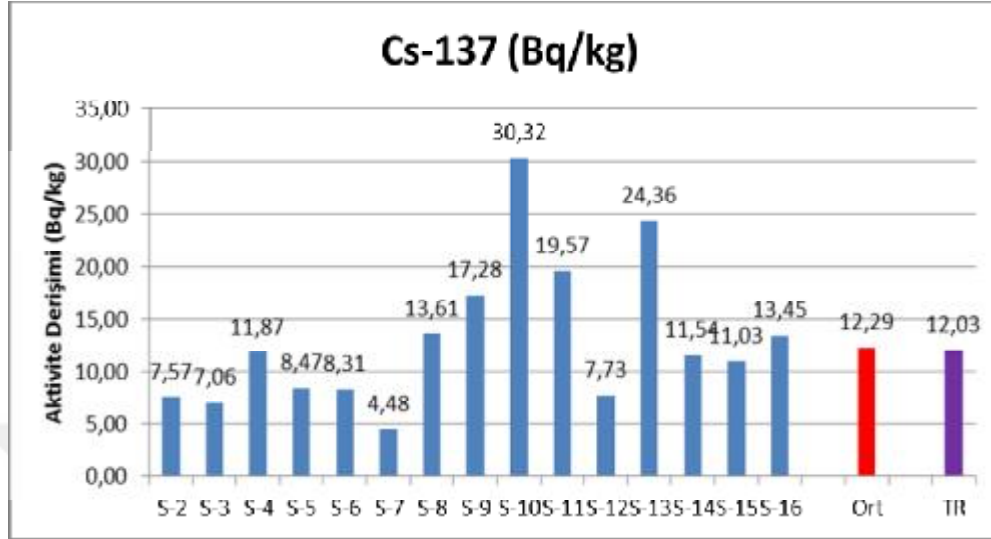
Yapılan ölçümler sonucu elde edilen 16 yüzey toprak numunesine ait ^{40}K ’ın radyoaktivite sonuçları, 16 numuneye ait sayısal sonucun ortalaması, Türkiye ortalaması ve dünya ortalaması değerlerine ait grafik aşağıda Şekil 4.3’de verilmiştir. Yapılan ölçümlerde ^{40}K ’ın aktivite konsantrasyonu yüzey toprak numunelerinde en küçük aktivite konsantrasyon değeri 363.88 ± 12.86 Bq/kg ile Kayseri’den alınan S-15 numunesinde ölçülmüş; en yüksek aktivite konsantrasyon değeri ise 944.78 ± 13.48 Bq/kg ile Nevşehir’den alınan S-8 numunesinde ölçülmüştür. Ölçüm yapılan yüzey 16 toprak numunesi için ortalama ^{40}K ’ın aktivite konsantrasyon ortalaması 662.55 Bq/kg olarak hesaplanmıştır. Bu değer TAEK

tarafından verilen; Türkiye ortalaması olan 439.93 Bq/kg değerinden ve dünya ortalama değeri olan 420 Bq/kg değerinden büyüktür.



Şekil 4.3. Yüzey toprak örnekleri için ^{40}K 'ın aktivite derişim değerleri, Ortalama değeri; Türkiye değeri ve Dünya değeri

Yapılan ölçümler sonucu elde edilen 16 yüzey toprak numunesine ait ^{137}Cs 'nin radyoaktivite sonuçları, 16 numuneye ait sayısal sonucun ortalaması, Türkiye ortalaması değerlerine ait grafik aşağıda Şekil 4.4'de verilmiştir. Yapılan ölçümlerde ^{137}Cs 'nin aktivite konsantrasyonu yüzey toprak numunelerinde en küçük aktivite konsantrasyon değeri minimum dedekte edilebilir aktivite ($< \text{MDA}$) değerinin altında olduğu tespit edilen Niğde'den alınan S-1 numunesinde ölçülmüş; en yüksek aktivite konsantrasyon değeri ise 30.32 ± 1.91 Bq/kg ile Nevşehir 'den alınan S-10 numunesinde ölçülmüştür. Ölçüm yapılan yüzey 16 toprak numunesi için ortalama ^{137}Cs 'nin aktivite konsantrasyon ortalaması 12.29 Bq/kg olarak hesaplanmıştır. Bu değer TAEK tarafından verilen; Türkiye ortalaması olan 12.03 Bq/kg değerine yakındır.



Şekil 4.4. Yüzey toprak örnekleri için ^{137}Cs 'nin aktivite derişim değerleri, Ortalama değeri; Türkiye değeri

4.2. Havadaki Soğurulan Doz Hızı [D (nGy/h)]

Denklem (3.13) kullanılarak hesaplanan havadaki soğurulan doz hızı değerleri Çizelge 4.2' de verilmiştir. Toprak numuneleri için havadaki soğurulan doz hızı D; 43.22 ila 132.17 nGy/saat arasında değişmektedir. Ortalama doz hızı ise 81.91 nGy/h'tir. Daha önce Türkiye illeri için yapılan çalışmalarda D değerleri Kilis (Bakkal, 2012), Kırklareli (Taskin, 2009), Adana (Değerlier, 2008), Kastamonu (Kam ve Bozkurt, 2007), Şanlıurfa (Bozkurt, 2007), Rize (Kurnaz, 2007), Manisa (Erees, 2006), İstanbul (Karahan ve Bayulken, 2000) illeri için sırasıyla 11.37, 71, 54, 53, 38, 77, 54 ve 49 nGy/saat olarak hesaplanmıştır (Bakkal, 2012). Bu değerler ile kıyaslandığında yukarıda koordinatları verilen yerlerden toplanan numunelerdeki ortalama doz değerinin yüksek olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.2. Üst yüzey toprak örneklerinde hesaplanan Soğurulan doz hızı [D(nGy/h)], Radium eşdeğeri [Ra_{eq} (Bq/kg)], Dış tehlike endeksi, Yıllık gonadal doz eşdeğeri [YGDE (μ Sv/yıl)], Yıllık etkin doz eşdeğeri [YEDE (μ Sv/yıl)] ve Yaşam boyu kanser riski [AYKR] değerleri

Örnek No	D (nGy/h)	Ra_{eq} (Bq/kg)	H_{ex}	YGDE (μ Sv/yıl)	YEDE (μ Sv/yıl)	AYKR
S-1	49.16	97.62	0.263	344.08	60.29	21.1×10^{-5}
S-2	62.37	126.84	0.342	429.46	76.50	26.77×10^{-5}
S-3	66.22	136.52	0.369	451.13	81.21	28.42×10^{-5}
S-4	73.41	149.93	0.405	511.47	90.03	31.51×10^{-5}
S-5	73.46	151.55	0.409	506.78	90.09	31.53×10^{-5}
S-6	74.74	152.77	0.412	517.60	91.66	32.08×10^{-5}
S-7	57.45	119.28	0.322	393.99	70.46	24.66×10^{-5}
S-8	132.17	275.77	0.745	903.51	162.09	56.73×10^{-5}
S-9	129.95	271.95	0.735	881.25	159.37	55.77×10^{-5}
S-10	111.58	231.68	0.626	766.50	136.84	47.89×10^{-5}
S-11	126.62	263.76	0.713	865.51	155.29	54.35×10^{-5}
S-12	98.25	205.01	0.554	672.59	120.49	42.17×10^{-5}
S-13	74.09	154.14	0.416	507.29	90.86	31.8×10^{-5}
S-14	72.21	148.43	0.401	496.50	88.56	30.99×10^{-5}
S-15	43.22	89.16	0.241	297.25	53.01	18.55×10^{-5}
S-16	65.68	137.45	0.371	450.87	80.55	28.19×10^{-5}
Ortalamlar	81.91	169.50	0.457	562.24	100.46	35.16×10^{-5}

Yukarıda koordinatları verilen Nevşehir il sınırından alınan toprak numuneleri için hesaplanan ortalama doz değeri 81.91 nGy/h'dir. Bu değer literatürde yer alan çeşitli bölgelere ait Türkiye illeri için hesaplanan doz değerlerinden ve dünya ortalaması olan 60 nGy/h'tan büyüktür (UNSCEAR, 2000; Bakkal, 2012). Numune sayısının az olması, radyoaktif riskler açısından genel bir kanıya ulaşmamız için yeterli değildir. Özellikle Nevşehir yöresi topraklarının daha kapsamlı bir örnekleme ile yeniden incelenmesi gerekmektedir.

4.3. Radium Eşdeğer Aktivitesi (Ra_{eq}) ve Dış Tehlike Endeksi (H_{ex})

Radium eşdeğer aktivitesi (Ra_{eq}) denklemi;

$$Ra_{eq} = A_{Ra} + \frac{226}{238} \times A_{Th} + \frac{40}{137} \times A_K \quad (4.2)$$

İle hesaplanır. Burada; A_{Ra} , A_{Th} ve A_K sırasıyla, ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın Bq/kg biriminde aktivite yoğunluklarıdır.

Diğer bir indis, (H_{ex}) Dış tehlike endeksi, Krieger (1981) tarafından önerilmiş olup, aşağıdaki bağıntı kullanılarak hesaplanır (Kurnaz, 2007; Bakkal, 2012).

$$H_{ex} = A_{Ra}/370 + A_{Th}/259 + A_K/4810 \leq 1 \quad (4.3)$$

Burada; A_{Ra} , A_{Th} ve A_K sırasıyla, ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın Bq/kg biriminde aktivite yoğunluklarıdır.

Radium eşdeğer aktivitesi (Ra_{eq}), bütün toprak numuneleri için Denklem (4.2) kullanılarak hesaplandı ve sonuçlar toplu olarak Çizelge 4.2 'de verildi. Buna göre Ra_{eq} değerleri 89.16 ila 275.77 Bq/kg arasında değişmiş ve ortalama değeri, 169.50 Bq/kg olarak bulunmuştur. Bu çalışmamızda Ra_{eq} 'nin hesaplanan ortalama

değeri tavsiye edilen maksimum değer olan 370 Bq/kg'dan daha düşüktür (Kurnaz, 2007; Bakkal, 2012).

Dış tehlike endeksi (H_{ex}) Denklem (4.3) kullanılarak hesaplandı ve sonuçlar Çizelge 4.2'de verildi. H_{ex} değerleri 0.241 ila 0.745 aralığında değişti ve ortalama değeri ise 0.457 olarak bulundu. Bütün H_{ex} değerleri 1'den küçük olarak bulundu.

4.4. Yıllık Gonadal Doz Eşdeğeri (YGDE)

Denklem (3.16) kullanılarak hesaplanan ve bulunan değerler Çizelge 4.2'de verilen Yıllık Gonadal Doz Eşdeğeri (YGDE) değerleri 297.25 ila 903.51 $\mu\text{Sv/yıl}$ aralığında değişti ve ortalama değeri ise 562.24 $\mu\text{Sv/yıl}$ bulundu.

4.5. Yıllık Etkin Doz Eşdeğeri (YEDE) ve Artan Yaşam Boyu Kanser Riski (AYKR)

Denklem (3.17) kullanılarak hesaplanan ve Çizelge 4.2'de verilen Yıllık etkin doz eşdeğeri (YEDE) değerleri 53.01 ila 162.09 $\mu\text{Sv/yıl}$ arasında değişti ve ortalama değeri 100.46 $\mu\text{Sv/yıl}$ olarak bulundu. Açık alan karasal gama radyasyonu için yıllık etkin doz eşdeğerinin Dünya ortalaması 70 $\mu\text{Sv/yıl}$ 'dır (UNSCEAR, 1988; Kurnaz, 2007; Bakkal, 2012). Dolayısıyla bulunan ortalama değer, dünya ortalama değerlerinden daha büyüktür. Türkiye'nin değişik illeri için de çalışmalar yapılmış ve YEDE değerleri hesaplanmıştır. Bu değerler Kilis (Bakkal, 2012), Kırklareli (Taskin, 2009), Manisa (Erees, 2006), Kastamonu (Kam ve Bozkurt, 2007), Adana (Degerlier, 2008) ve Şanlıurfa (Bozkurt, 2007) için sırası ile 13.94, 87, 66, 65, 67 ve 61 $\mu\text{Sv/yıl}$ 'dır (Bakkal, 2012). Bu çalışma için hesaplanan ortalama YEDE değeri 100.46 $\mu\text{Sv/yıl}$, Türkiye'nin diğer illeri için hesaplanan değerlerden büyüktür.

Bunlara ek olarak artan yaşam boyu kanser riski de (AYKR) Denklem (3.18) ile hesaplanarak Çizelge 4.2'de verildi. AYKR değerleri 18.55×10^{-5} ila 56.73×10^{-5} aralığında değişti ve ortalama değeri 35.16×10^{-5} olarak bulundu.



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Niğde-Nevşehir-Kayseri illerinin sınırları içinden seçilen bir yörünge boyunca toplanan toprak örneklerindeki doğal radyoaktivite konsantrasyonu ve buna bağlı risk indisleri, yüksek saflıkta (HPGe) dedektörü kullanılarak çalışılmıştır. Toplanan toprak numunelerinin; aktivite konsantrasyonları, yıllık gonadal doz eşdeğeri, yaşam boyu kanser riski değerleri, soğurulan doz hızı, radyum eşdeğer aktivitesi ve dış tehlike endeksleri, yıllık etkin doz eşdeğeri hesaplanmıştır. Buna göre genel olarak radyonüklidlerin aktivite konsantrasyonları Türkiye ve dünya ortalama değerlerinden daha yüksektir. ¹³⁷Cs aktivite konsantrasyon değeri Türkiye ortalama değerine yakındır.

Bundan sonraki çalışmalarda bu bölgenin daha ayrıntılı bir şekilde incelenmesi yararlı olacaktır. Bu çalışmada elde edilen değerler gelecekte yapılacak çalışmalarla kıyaslanarak sonuçlara ışık tutacaktır.



KAYNAKLAR

- Abiama, P.E., Ateba, P.O., Ben-Bolie, G.H., Ekobena, F.H.P., Khoukhi T.E., 2010. High Background Radiation Investigated By Gamma Spectrometry Of The Soil In The Southwestern Region Of Cameroon. Journal Of Environmental Radioactivity 101(2010) 739-743
- Acar, R., 1987. "Çernobil" Nükleer Reaktör Kazasından Sonra Çeşitli Yaş Grubu Hayvanların Kemiklerinde Sr-90 Birikiminin İncelenmesi. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 141s.
- Akhtar, N., Tufail, M., Ashraf, M., Iqbal, M.M., 2005. Measurement Of Environmental Radioactivity For Estimation Of Radiation Exposure From Saline Soil Of Lahore, Pakistan. Radiation Measurements 39 (2005) 11-14
- Al-Jundi, J., Al-Bataina, B.A., Abu-Rukah, Y., Shehadeh, H.M., 2003. Natural Radioactivity Concentrations In Soil Samples Along The Amman Aqaba Highway, Jordan. Radiation Measurement 36 (2003) 555-560
- Atakan, Y., 1990. Çernobil Radyasyon Çevre Ve İnsanlar Üzerindeki Etkileri, Çetiner, M.A., 1990. Çernobil Kazasından Sonra Çay Ve Diğer Gıdalardaki Cs-137'nin İnsana Geçişinin İncelenmesi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, Ankara, 141 S.
- Bakkal, S., 2012. "Kilis Toprak Örneklerinde ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K V ^{137}Cs Radyoaktivite Konsantrasyonlarının Belirlenmesi". Kilis 7 Aralık Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kilis.
- Beck, H.L., 1972. The Physics of Environmental Radiation Fields. Natural Radiation Environment II, Conf-720805 P2. Proceedings Of The Second International Symposium On The Natural Radiation Environment.
- Beretka, J., Mathew, P. J., 1985. Natural Radioactivity Of Australian Building Materials, Industrial Wastes And By-Product. Health. Phys. 48, 87-95

- Bozkurt, A., Yorulmaz, N., Kam, E., Karahan, G., Osmanlioglu, A.E., 2007. Assessment Of Environmental Radioactivity For Sanliurfa Region Of Southeastern Turkey. Radiat. Meas. 42, 1387-1391.
- Canbazoğlu, C., Turhan, Ş., Bakkal, S., Uğur, F.A., Gören, E., 2013. Analysis Of Gamma Emitting Radionuclides (Terrestrial And Anthropogenic) İn Soil Samples From Kilis Province İn South Anatolia, Turkey. Annals Of Nuclear Energy 62 (2013) 153-157
- Canberra, MCA Series 95User's Manual, Canberra Industries, Meriden, CT, U.S.A., (1986).
- Currie, L.A. Limits For Qualitative Dedection And Quantitative Determination. Anal Chem. (40, 586-593 (1968))
- Çetiner, M.A., 1990. Çernobil Kazasından Sonra Çay ve Diğer Gıdalardaki Cs-137'nin İnsana Geçişinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 141s.
- Dayanıklı, Ş.A., 2004. Manisa İlinde Kullanılan Bina Materyallerinde Radyoaktivite Tayini. Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi.
- Değerlier, M., “Adana İli Ve Çevresinin Çevresel Doğal Radyonüklidlerinin Saptanması Ve Doğal Radyasyonların Yıllık Etkin Doz Eşdeğerinin Bulunması”, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2007.
- Değerlier, M., Karahan, G., Özger, G., 2008. Radioactivity Concentrations And Dose Assessment For Soil Samples Around Adana, Turkey. Journal Of Environmental Radioactivity 99 (2008), 1018-1025.
- El-Shershaby, A., 2002. Study Of Radioactivity Levels Of Gable Gattar Iı İn The Notrh Eastern Desert Of Egypt, Applied Radiation And Isotopes, 57, S 131-135.

- Erdoğan, T., 2010. Uşak Ve Çevresindeki Derin Kuyu Sularında Radon Aktivitesinin Tayini, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 105s, Afyon.
- Erees, F.S., Akozcan, S., Parlak, Y., Cam, S., 2006. Assessment Of Dose Rates Around Manisa (Turkey). Radiat. Meas. 41, 598–601.
- Gezer, F., 2011. “Fosfojips’in Doğal Radyoaktifliğinin Belirlenmesi”. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Gollnıck, D.A., 1988. Basic Radiation Protection Technology, Pacific Radiation, Altadena.
- Görür, Ş., 2006. Çevresel Radyoaktivite İle Bu Çevrede Yaşayanlara Ait Dış Örneklerindeki Radyoaktivite Arasındaki İlişkinin Araştırılması. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi.
- Icrp, 1990. Recommendations Of The International Commission On Radiological Protection, Vol. 21 No. 1-3, Publication 60.
- İlter, S., 2014. Antikansorejen Aktivitesi Bilinen Bazı Şifalı Bitkilerdeki Radyoaktivite Konsantrasyon’unun Belirlenmesi, Kilis 7 Aralık Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Kilis.
- Kahveci, M., 1993. İzmir Çevresinde Yetiştirilen Patateslerde Radyoaktivite Tayini. Ege Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi.
- Kam, E., Bozkurt, A., 2007. Environmental Radioactivity Measurements İn Kastamonu Region Of Northern Turkey. Appl. Radiat. Isot. 65, 440-444.
- Karadem, A., 2011. Cr-39 Dedektörleri İle Mağaralarda Radon Konsantrasyonu Ölçümleri. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi.
- Karahan, G., 1997. “İstanbul’un Çevresel Ve Doğal Radyoaktivitesinin Tayini Ve Doğal Radyasyonların Yıllık Etkin Doz Eşdeğeri”, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul, 118s.
- Karahan, G., Bayulken, A., 2000. Assessment Of Gamma Dose Rates Around Istanbul (Turkey). J. Environ. Radioact. 47, 213–221.

- Knoll, F.G. 2000. Radiation Detection And Measurement Third Edition. Wiley, 816, New York.
- Kovacs, T., Szeiler, G., Fabian, F., Kardos, R., Gregoric, A., Vaupotic, J., 2013. Systematic Survey Of Natural Radioactivity Of Soil İn Slovenia. Journal Of Environmental Radioactivity 122 (2013) 70-78
- Krane, K., 1998. ‘‘Introductory Nuclear Physics’’, Oregon Universty
- Krane, K.S., 2001. Nükleer Fizik 1. Cilt, Palme Yayıncılık, Ankara.
- Krieger, R., 1981. Radioactivity Of Construction Materials. Betonwerk. Fertigteil-Tech. 47, 468.
- Kurnaz, A., Küçükömeroğlu, B., Damla, N., Çevik, U., 2011. Radiological Maps For Trabzon, Turkey. Volume 102, Issue 4, April 2011, Pages 393-399
- Kurnaz, A., Küçükömeroğlu, B., Keser, R., Okumuşoğlu, N.T., Korkmaz, F., Karahan, G., Çevik, U., 2007. Determination Of Radioactivity Levels And Hazards Of Soil And Sediment Samples İn Fırtına Valley (Rize, Turkey). Applied Radiation And Isotopes 65 (2007) 1281- 1289
- Küçük, C., 2012. Zonguldak İli Sahilleri Kum Örneklerinin Doğal Radyoaktivite Seviyelerinin İncelenmesi. Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı, Yüksek Lisan Tezi 77 Sayfa, Zonguldak, Türkiye.
- Lowder, W.M., And Sobon , L.R., 1956. ‘‘Background Radiation’’, Rep. Nyo-4712. Usaec, D.C., Washington.
- Mahur, A.K., Gupta, M., Varshney, R., Sonkawade, R.G., Verma, K.D., Prasad, R., 2013. Radon Exhalation And Gamma Radioactivity Levels İn Soil And Radiation Hazard Assessment İn The Surrounding Area Of National Thermal Power Corporation, Dadri. Radiation Measurements 50 (2013) 130-135
- Mamont-Ciesla, K., Gwiazdowski, B., Biernacka, M., Zak, A., 1982. Radioactivity Of Building Materials İn Poland. In: Vohra, G., Pillai, K.C., Sadavisan, S., (Eds.), Natural Radiation Environment. Halsted Press, New York, P. 551.

- Markkanen, M., 1995. Radiation Dose Assessments For Materials With Elevated Natural Radioactivity. Report Stuk-B-Sto 32, Radiation And Nuclear Safety Authority-Stuk, 1995.
- Merdanoğlu, B., 2004. ‘‘Kestambul (Çanakkale) Civarındaki Su, Toprak Ve Granit Örneklerinde Doğal Radyoaktivitenin Belirlenmesi’’ Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 70 S
- Myrick, T.E., Berven, B.A., Haywood, F.F., 1983. Determination Of Concentrations Of Selected Radionuclides In Surface Soil In The U.S. Health Physics, 45,631-642.
- Ncrp 45, 1975. National Council On Radiation Protection And Measurementsno.45, Natural Background Radiation In The U.S., Soil Radioactivity, S 54.
- Ncrp 97, 1988. ‘‘National Council On Radiation Protection And Measurements; Measurements Of Radon And Radon Daughters In Air’’, Ncrp Report No.97.
- Oyelede, J.A., Shimboyo, S., Sitoka, S., Gaoseb, F., 2010. Assessment Of Natural Radioactivity In The Soils Of Rossing Uranium Mine And Its Satellite Town In Western Namibia, Southern Africa. Nuclear Instruments And Methods In Physics Research A 619 (2010) 467-469
- Özger, A.G., 2005. ‘‘Ceyhan, Yumurtalık Ve Pozantı Bölgelerinin Doğal Radyoaktivite Düzeylerinin Belirlenmesi’’, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi.
- Papadopoulos, A.,Christofides, G., Koroneos, A., Papastefanou, C., Stoulos, S., 2014. Distribution Of ^{238}u , ^{232}th And ^{40}k In Plutonic Rocks Of Greece. Chemie Der Erde Xxx(2014)Xxx-Xxx.
- Parmaksız, A., 2004. ‘‘Gama Spektrometrik Yöntem ile Fosfojipsteki ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K Aktivitelerinin Ölçülmesi’’, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

- Saleh, H., Shayeb, M.A., 2014. Natural Radioactivity Distribution Of Southern Part Of Jordan (Ma'an) Soil. *Annals Of Nuclear Energy* 65 (2014) 184-189
- Seyrek, E., 2007. 'Radyoizotopların Üretimi Ve Radyoterapide Kullanılması', Gazi Üniversitesi, Ankara
- Solmaz Nur, A., 2008. Düşük Seviyeli Radyoaktivite Ölçümü İçin Kuyu-Tipi Ge Dedektörlü Bir Gama Spektrometresinin 40-2000 Kev Enerji Aralığında Verim Kalibrasyonunun Yapılması, Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü Ankara.
- Tari, M., Zarandi, S.A.M., Mohammadi, K., Zare, M.R., 2013. The Measurement Of Gamm-Emitting Radionuclides İn Beach Sand Cores Of Coastal Regions Of Ramsar, Iran Using Hpge Detectors. *Marine Pollution Bulletin* 74 (2013) 425-434
- Taskin, H., Karavus, M., Ay, P., Topuzoglu, A., Hidiroglu, S., Karahan, G., 2009. Radionuclide Concentrations İn Soil And Lifetime Cancer Risk Due To Gamma Radioactivity İn Kirklareli, Turkey. *Journal Of Environmental Radioactivity* 100, 49-53.
- Theodorsson, P., 1997., *Measurements Of Weak Radioactivity*, World Scientific Pub. Co.
- Tufail, M., Akhtar, N., Wagas, M., 2006. Measurement Of Terrestrial Radiation For Assessment Of Gamma Dose From Cultivated And Barren Saline Soils Of Faisalabad İn Pakistan. *Radiation Measurement* 41 (2006) 443-451
- Turhan, Ş., Köse, A., Varinlişioğlu, A., Şahin, N.K., Arıkan, I., Oğuz, F., Yücel, B., Özdemir, T., 2012. Distribution Of Terrestrial And Anthropogenic Radionuclides İn Turkish Surface Soil Samples. *Geoderma* 187-188 (2012) 117-124
- Tüysüz, M.Z., Yorulmaz, N., Bozkurt, A., 2004. Co-60 Radyoterapi Kaynağı İçin Monte Carlo Yöntemiyle Uygun Zırh Tasarımı. *Türk Fizik Derneği 22. Fizik Kongresi Bildiriler Kitapçığı*, Bodrum.

- Uğur, F.A., Turhan, Ş., Gören, E., Gezer, F., Yeğingil, Z., Şahan, H., Şahan, M., Tel, E., Karahan, G., 2012. A Survey Of Distribution Of Terrestrial Radionuclides İn Surface Soil Samples İn And Around Osmaniye Province, Turkey. Radiation Protection Dosimetry Submitted Manuscript. 20 Sayfa
- Unsear, United Nations Scientific Committee On The Effect Of Atomic Radiation, 1988. Sources, Effects And Risk Of İonizing Radiation, United Nations, New York.
- Unsear, United Nations Scientific Committee On The Effect Of Atomic Radiation, 2000. Sources, Effects And Risk Of İonizing Radiation, United Nations, New York.
- Yang, Y., Wu, X., Jiang, Z., Wang, W., Lu, J., Lin, J., Wang, L., Hsia, Y., 2005. Radioactivity Concentrations İn Soils Of The Xiazhuang Granite Area, China. Applied Radiation And Isotopes 63 (2005) 255-259
- Yıldız, N., 2004. Toprak Ve Bitki Ekosistemindeki Ağır Metaller. Zt-531. Yüksek Lisans Ders Notları. Erzurum.
- Yıldız, N., Oto, B., Turhan, Ş., Uğur, F.A., Gören, E., 2014. Radionuclide Determination And Radioactivity Evaluation Of Surface Soil Samples Collected Along The Erçek Lake Basin İn Eastern Anatolia, Turkey. Journal Of Geochemical Exploration 146 (2014) 34-39
- Yılmaz, M., 1998. Çekirdek Fiziği. Necatibey Eğitim Fakültesi Yayınları, No:003,200s, Balıkesir.
- <http://ww.nufusu.com/> (Erişim Tarihi 23.11.2016).
- <http://www.tarim.gov.tr> (Erişim Tarihi 23.11.2016).
- <http://www.taek.gov.tr> (Erişim Tarihi 17.12.2016)



ÖZGEÇMİŞ

05/02/1982 yılında Adana’da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Adana’da tamamladı. 2003 yılında başladığı Niğde Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü’nden 2004 yılında Çukurova Üniversitesine yatay geçiş yaptı ve 2007 yılında mezun oldu ve aynı yıl (2007) Çukurova Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü’nde Tezsiz Yüksek Lisansa başladı ve 2008 yılında tamamladı. 2009 yılında Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı Gülten GÜNEL Nükleer Fizik Araştırma Laboratuvarı’nda tezli yüksek lisansa başladı ve halen aynı laboratuvarda bilimsel çalışmalara devam etmektedir.