

**T.C.
NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YOZGAT İLİ VE ÇEVRESİNİN YÜZEYSEL TOPRAK
YAPISINDAKİ DOĞAL RADYOAKTİVİTENİN
BELİRLENEREK YILLIK ETKİN DOZ EŞDEĞERİNİN
BULUNMASI**

**Tezi Hazırlayan
Nilgün Cansu YILMAZ**

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. Meltem DEĞERLİER GUIOT**

**Fizik Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi**

**Haziran 2019
NEVŞEHİR**

NEVŞEHİR

Doç. Dr. Meltem DEĞERLİER GUIOT danışmanlığında Nilgün Cansu YILMAZ tarafından hazırlanan “**Yozgat İli ve Çevresinin Yüzeysel Toprak Yapısındaki Doğal Radyoaktivitenin Belirlenerek Yıllık Etkin Doz Eşdeğerinin Bulunması**” başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında **Yüksek Lisans Tezi Olarak** kabul edilmiştir.

25/06/2019

JÜRİ

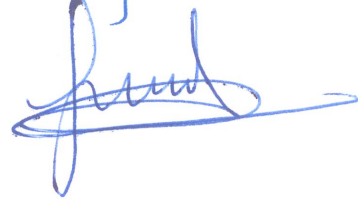
Başkan : Prof. Dr. Mehmet ERDOĞAN



Üye : Dr. Öğr. Üyesi Hilal İNCEBAY



Üye : Doç. Dr. Meltem DEĞERLİER GUIOT



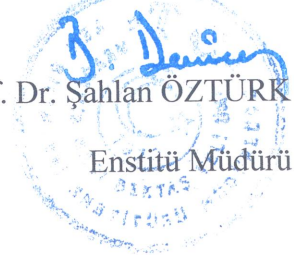
ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun 16.08/2019 tarih ve 49-485 sayılı kararı ile onaylanmıştır.

16/08/2019

Prof. Dr. Şahlan ÖZTÜRK

Enstitü Müdürü



TEZ BİLDİRİM SAYFASI

Tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada yer alan bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu ve bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

N.C.Ay.
Nilgün Cansu YILMAZ

Bu alışma Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından NEÜLÜP13F14 numaralı proje ile desteklenmiştir.

Bu alışma Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK) / ekmece Nükleer Araştırma Merkezi (ÇNAEM) ile Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi tarafından 03/12/2012 tarihli “Yozgat İlinin evresel Radyoaktivitesinin Belirlenmesi ve Doğal Fon Haritasının çıkarılması” isimli işbirliği protokolü tarafından desteklenmiştir.



TEŞEKKÜR

‘‘Yozgat ili ve çevresi yüzeysel toprak yapısındaki doğal radyoaktivitenin belirlenerek yıllık etkin doz eşdeğerinin bulunması’’ adlı tez çalıŐmamda ve yüksek lisans öğrenimim süresince hiçbir zaman emeğini ve desteğini benden esirgemeyen Sayın Hocam Doç. Dr. Meltem DEğERLIER GUIOT’a,

Bu süreçte maddi ve manevi olarak her türlü destek olan eŐim Murat YILMAZ’a,

Çalışma süreci boyunca yanımda olan değerli anneme, babama, motivasyon desteği icin kardeŐime,

İdari yardımlarıyla iŐimi kolaylaŐtıran Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Rektörlüğü’ne, Fen Bilimleri Enstitüsü’ne, Fizik Bölüm BaŐkanlıęı’na sonsuz teŐekkürlerimi sunarım.

**YOZGAT İLİ VE ÇEVRESİNİN YÜZEYSEL TOPRAK YAPISINDAKİ DOĞAL
RADYOAKTİVİTENİN BELİRLENEREK YILLIK ETKİN DOZ
EŞDEĞERİNİN BULUNMASI
(Yüksek Lisans Tezi)**

Nilgün Cansu YILMAZ

**NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Haziran 2019

ÖZET

Yozgat Orta Anadolu bölgesinde yer alan yaklaşık 420 000 kişilik nüfusa sahip 14123 km² yüzölçümlü bir ilimizdir. Bu çalışmada Yozgat ili, ilçe ve köylerini kapsayan bölgedeki yüzey toprağının doğal radyoaktivitesini belirlemek için 24 farklı ölçüm noktasından örnekler toplanmıştır. Bu örneklerin analizi Canberra serisi HpGe gama spektrometresi aracılığıyla yapılmıştır. Bu analiz sonucunda toprak örneklerinde ortalama aktivite konsantrasyonları ²²⁶Ra için 25,12 Bq/kg, ²³²Th için 31,9 Bq/kg, ⁴⁰K için 530,03 Bq/kg olarak belirlenmiştir. Toprak örneklerinin aktivite konsantrasyon değerlerine bağlı olarak havada soğurulan gama doz oranları ortalaması 53,12 nGy/h olarak bulunmuştur. Havada soğurulan gama doz oranlarına bağlı olarak hesaplanan ortalama yıllık etkin doz eşdeğeri ise 65,1 µSv/y olarak bulunmuştur. Ayrıca hesaplanan ortalama radyum eşdeğer aktivite indisi 11,5 Bq/kg, iç ve dış ışınlama indisleri sırasıyla 0,4 ve 0,3 ve temsili gama seviye indisi ise 0,8 olarak bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Toprak, Yozgat, Doğal Radyoaktivite, Gama, Yıllık Etkin Doz

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Meltem DEĞERLİER GUIOT

Sayfa Adeti:53

**DETERMINATION OF THE NATURAL RADIOACTIVITY OF SURFACE
SOIL STRUCTURE AND ANNUAL EFFECTIVE DOSES IN YOZGAT
REGION**

(M.Sc. Thesis)

Nilgün Cansu YILMAZ

**NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES**

June 2019

ABSTRACT

Yozgat is located in the Central Anatolia region and has 42000 population and 14123 km² area. In this research, 24 different surface soil samples were collected to determine natural radioactivity in Yozgat region. The analysis of the soil samples was performed by Canberra HpGe gamma spectrometry. As a result of this analysis, average activity concentrations are found 25.12 Bq/kg for ²²⁶Ra, 31.9 Bq/kg for ²³²Th and 530,03 Bq/kg for ⁴⁰K. Average absorbed gamma dose rates in the air due to the radionuclide concentrations in the soil were calculated as 53,12nGy/h. Average annual effective doses because of absorbed gamma dose rates in the air were found as 65µSv/y. Besides average radium equivalent activity index, internal and external hazard indexes and representative gamma level index were calculated as 11.5Bq/kg, 0.4, 0.3, 0.8 respectively.

Key Words: Soil, Yozgat, Natural Radioactivity, Gamma, Annual Effective Dose

Thesis Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Meltem DEĞERLİER GUIOT

Page Quantity: 53

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY SAYFASI	i
TEZ BİLDİRİM SAYFASI	ii
TEŞEKKÜR	iv
ÖZET	v
ABSTRACT	vi
İÇİNDEKİLER	vii
TABLolar LİSTESİ	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	xi
1. BÖLÜM	1
GİRİŞ	1
2. BÖLÜM	2
GENEL BİLGİLER	2
2.1. Radyoaktif Bozunma Kanunu	2
2.1.1. Alfa bozunması	3
2.1.2. Beta bozunması	3
2.1.3. Gama yayınlanması	5
2.2. Radyoaktif Bozunma Dengesi	5
2.2.1. Kalıcı denge	5
2.2.2. Geçici denge	6
2.2.3. Denge olmaması durumu	6
2.2.4. Gama ışını zayıflaması	7
2.3. Maddenin Foton ile Etkileşmesi	8
2.3.1. Foto elektrik etki	8
2.3.2. Compton saçılması	10
2.3.3. Çift oluşumu	12
2.4. Doğadaki Radyoaktivite	13
2.4.1. Kozmik radyasyon	13
2.4.2. Karasal radyasyon	14
2.5. Radyasyonun Biyolojik Etkileri	16

2.5.1. Bağıl biyolojik etkenlik (RBE)	16
2.5.2. Doz eşitliği	17
2.5.3. Çevresel kaynaklardan alınan dozlar	18
2.5.4. Biyolojik etkiler	19
2.5.5. Kısa zamanda alınan yüksek dozlar	19
2.5.6. Düşük seviyedeki dozlar	20
3. BÖLÜM	22
MATERYAL VE METOD	22
3.1. Gama Spektrometri Sistemi	22
4. BÖLÜM	24
BULGULAR VE SONUÇLAR	24
5. BÖLÜM	34
TARTIŞMA SONUÇ VE ÖNERİLER	34
KAYNAKLAR	37
ÖZGEÇMİŞ	39

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Karasal radyonüklitler	15
Tablo 2.2. Çeşitli radyasyonlar için kalite faktörü	17
Tablo 2.3. Doğal ve yapay kaynakların bazılarında bir yılda alınan doz miktarları	18
Tablo 2.4. Bazı radyasyon etkileri için eşik dozları	20
Tablo 2.5. Gelişen kanser ya da genetik bozulma riski	21
Tablo 4.1. Toprak örneklerinin ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K ve ^{137}Cs aktivite konsantrasyonları (Bq/kg)	25
Tablo 4.2. Yozgat İlini kapsayan bölgeden alınan 24 toprak örneğinin istatistikî değerlerini göstermektedir	28
Tablo 4.3. R_{aeq} , H_{ex} , H_{in} , I_{yr} , D_{R} ve AEDE değerlerini göstermektedir	33
Tablo 5.1. Türkiye'deki diğer iller için Ra^{226} , Th^{232} ve K^{40} aktivite konsantrasyon değerleri (Bq/kg)	35
Tablo 5.2. Radyum eşdeğer aktivite indisi, havada soğurulan gama doz oranı, temsili gama seviye indisi, iç ve dış ışınlama indisleri için tavsiye edilen değerler	36

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Beta bozunum elektronlarının sürekli enerji spektrumu.....	4
Şekil 2.2. Kalıcı denge durumunda ana ve kız çekirdeklerin aktivite durumlarının zamana bağlı olarak değişimleri	6
Şekil 2.3. Denge durumuna erişmeyen ana ve ürün çekirdek aktivitelerinin zamana göre değişimleri.....	7
Şekil 2.4. Fotoelektrik olay	10
Şekil 2.5. Compton saçılması.....	12
Şekil 2.6. Enerji fonksiyonu olarak farklı radyasyon çeşitleri için kalite faktörü.....	17
Şekil 3.1. Sintilasyon detektörlü tipik bir gama ışın spektrometri sistemi	22
Şekil 3.2. Canberra marka HpGe gama spektrometrik analiz sistemi.....	23
Şekil 4.1. Toprak örneklerindeki ²²⁶ Ra aktivite konsantrasyonlarıdeğerleri.....	26
Şekil 4.2. Toprak örneklerindeki ²³² Th aktivite konsantrasyonlarıdeğerleri.....	26
Şekil 4.3. Toprak örneklerindeki ⁴⁰ K aktivite konsantrasyonlarıdeğerleri.....	27
Şekil 4.4. Toprak örneklerindeki ¹³⁷ Cs aktivite konsantrasyonlarıdeğerleri	27
Şekil 4.5. Toprak örnekleri için hesaplanan radyum eşdeğer aktivite indisleri (Bq/kg).29	
Şekil 4.6. Toprak örnekleri için hesaplanan iç ve dış zarar indeksleri.....	30
Şekil 4.7. Toprak örnekleri için hesaplanan temsili gama seviye indisleri.....	31
Şekil 4.8. Örnekleme yerlerine göre havada soğurulan gama doz oranları	32
Şekil 4.9. Örnekleme yerlerine göre yıllık etkin doz eşdeğerleri.....	33

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

U	Uranyum
Th	Toryum
K	Potasyum
Ra	Radyum
He	Helyum
Rn	Radon
At	Astatin
Po	Polonyum
Ba	Baryum
Tc	Teknesyum
Pu	Plütonyum
Pb	Kurşun
Bi	Bizmut
Fr	Fransiyum
Ac	Aktinyum
Pa	Protaktinyum
La	Lantan
Lu	Lutesyum
C	Karbon
H	Hidrojen
Be	Berilyum
Na	Sodyum
Sm	Samaryum
Cs	Sezyum

Cd	Kadmiyum
Co	Kobalt
Sn	Kalay
Am	Amerikyum
Te	Tellür
Cr	Krom
Sr	Stronsiyum
Tl	Talyum
I	İyot
HpGe	Gama Spektrometrik
Ge	Germanyum
α	Alfa Parçacığı
β	Beta Parçacığı
γ	Gama Parçacığı
X	X-Işını
λ	Dalga Boyu
n	Nötron
p	Proton
e^-	Elektron
m	Metre
n	Nano, Alt Birim (10^{-9})
μ	Mikro, Alt Birim (10^{-6})
h	Saat
y	Yıl
kg	Kilogram
DNA	Deoksiribo Nükleik Asit

E	Enerji (keV, MeV)
Bq	Becquerel, Radyoaktivite Birimi
Gy	Gray, Soğurulmuş Doz Birimi
Sv	Sievert, Eşdeğer Doz Birimi
R	Röntgen, Radyasyon Şiddet Birimi
m₀	Durgun Kütle
Φ	Metaller İçin İş Fonksiyonu
v	Frekans
c	Işık Hızı
T	Kinetik Enerji
RBE	Bağlı Biyolojik Etkenlik
IAEA	Uluslararası Atom Enerji Ajansı
ICRP	Uluslararası Radyolojik Koruma Komisyonu
UNSCEAR	Atom Radyasyon Etkileri Birleşmiş Milletler Raporu
TEAK	Türkiye Atom Enerji Kurumu
ÇNAEM	Çekmece Nükleer Araştırma Merkezi
AEDE	Yıllık Etkin Doz Eşdeğeri
OGDR	Ev Dışı Hava Sahası Gama Dozu
ECLR	Yaşam Boyu Kanser Riskixiii
LE	Ortalama İnsan Ömrü
RFSE	Risk Faktörü
D	Organların Etkin Doz Oranı

1. BÖLÜM

GİRİŞ

İnsanlar daima yerkabuğunun içinden ve dışarıdan kaynaklanan doğal radyonüklitlere maruz kalırlar. Doğal kaynaklardan kaynaklanan iyonize radyasyona maruziyet, toprak ve kayalarda bulunan doğal olarak oluşan radyoaktif elementlerden, dış uzaydan Dünya atmosferine giren kozmik ışıklardan ve yiyecekler, su ve hava yoluyla alınan radyoaktif elementlerin içsel ışınlamalarından oluşmaktadır. Doğal radyoaktivite, yerkabuğunun tümüne yayılmıştır ve toprak, kaya, su ve havanın jeolojik değişimlere bağlı olarak değişmesine göre farklılık göstermektedir. Topraktaki doğal radyoaktivite uranyum ve toryum serilerinden ve ayrıca potasyumdan ileri gelmektedir. Bu radyo nüklitlerin zararları insan vücudunun gama ışınlarına maruz kalması ayrıca radon ve onun bozunum ürünlerinin solunum yoluyla vücuda alınarak akciğerleri ışınlaması nedeniyle. Bu yüzden doğal kaynaklar nedeniyle maruz kalınan gama radyasyon dozlarının belirlenmesi, Dünya nüfusunun dış radyasyon dozuna en büyük katkıyı doğal radyasyonların vermesi sebebiyle önemlidir. Gama ışınları nedeniyle tavsiye edilen sınır değerlerin üzerindeki doğal radyasyon değerlerini önceden belirlemek önlemler almak açısından önemlidir. Ayrıca ilerde oluşabilecek radyoaktif kirlilik durumunda kıyaslama yapabilmek için doğal radyasyon seviyelerini önceden belirlemek önemlidir.

2. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER

2.1. Radyoaktif Bozunma Kanunu

Radyoaktif bozunma kanunu ilk olarak Rutherford ve Soddy tarafından radyoaktif örneğin aktivitesinin zamanla eksponansiyel olarak değişmesi durumunun gözlenmesi sonucu yüzyılın başlarında keşfedilmiştir. Kuantum mekanik durumunda nükleer bozunma işlemi nükleer çeşidin karakteristiğinin (λ), birim zaman için geçiş olasılığıyla ifade edilir. Eğer çekirdek birden daha fazla bozunma moduna sahipse λ her bir mod için ayrı ifade edilen sabitlerin toplamına eşittir.

$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \dots \quad (2.1)$$

N ile ifade edilen bir örnek çekirdekte çekirdeğin ortalama sayısı, dt zamanında bozulan çekirdeğin ortalama sayısıdır.

$$dN = - \lambda N dt \quad (2.2)$$

Burada N çekirdek sayısı ve λ ise bozunma sabitidir. Bu eşitliğin integralini alarak

$$N(t) = N(0) \exp (-\lambda t) \quad (2.3)$$

elde edilir. Burada N(0), t=0 anındaki çekirdek sayısıdır.

Bir radyoaktif örneğin aktivitesindeki eksponansiyel azalma λ sabiti ile belirlenir. Pratikte λ 'nın tersini kullanmak daha yaygındır.

$$\tau_m = 1 / \lambda \quad (2.4)$$

bu eşitlik ortalama ömür olarak adlandırılır. Bu değer, örneğin başlangıç aktivitesinin 1/e değerine bozunması için geçen zamandır. $T_{1/2}$ yarı ömür değeri ise örneğin başlangıç aktivitesinin yarısına bozunması için geçen zaman olarak adlandırılır [1]. Böylece

$$\frac{1}{2} = \exp(-\lambda T_{1/2}) \quad (2.5)$$

$$T_{1/2} = 1/\lambda \ln 2 = \tau_m \ln 2 \quad (2.6)$$

2.1.1. Alfa bozunması

Alfa parçacığı ${}^4_2\text{He}$ çekirdeğidir, sisteme iki proton ve iki nötronla bağlıdır ve genellikle çok fazla sayıda nükleon içeren çok ağır çekirdekler dengede kalabilmek için yayımlarlar. Böyle bir nükleon bulutunun yayınlanması enerji bakımından daha avantajlıdır çünkü alfa parçacığı nispeten yüksek bağlanma enerjisine sahiptir. Ana çekirdek (Z,A) reaksiyonla şu şekilde alfa parçacığı yayımlar.



Alfa bozunması teorik olarak çekirdeğin potansiyel bariyeri boyunca alfa parçacığının tünellemesi olayı şeklinde ilk olarak Gamov, Condon ve Gurney tarafından açıklanmıştır. Böylece alfa parçacığının monoenerjetik spektrumu gösterilmiştir. Potansiyel bariyeri geçişi enerjiye bağlı olduğundan tüm alfa kaynakları genellikle 4 -6 MeV arasındaki enerjilerde sınırlandırılmışlardır. Yüksek geçiş olasılığına sahip olanlar daha kısa yarı ömre sahiptirler. Bu nedenden dolayı yüksek enerji değişimi gerektiğinden bir çok alfa bozunması doğrudan kız çekirdeğin temel seviyesindedir. Kız çekirdeğin uyarılmış durumuna bozunmak yine de mümkündür ve bu çekirdekler enerji spektrumu her birisi bu tür bozunmaları gösteren birkaç monoenerjetik çizgiyi gösterir.

+ 2e elektrik yükü nedeniyle alfa parçacıkları maddede çok yüksek oranda enerji kaybederler. 5 MeV alfa parçacığı havada sadece birkaç santimetre ilerleyebilir. Bu nedenden dolayı parçacık soğurulması ve enerji kaybını minimize etmek için alfa kaynaklarının mümkün olduğu kadar ince yapılması gerekmektedir [1].

2.1.2. Beta bozunması

Beta parçacıkları hızlı elektronlar ya da pozitronlardır. Çekirdekte ilgili nükleonun fazlalığında bir nötron ya da protonun zayıf etkileşim bozunmasından meydana

gelmektedir. Örneğin nötron zengini bir çekirdekte bir nötron kendisini aşağıda gösterildiği gibi bir protona dönüştürür.



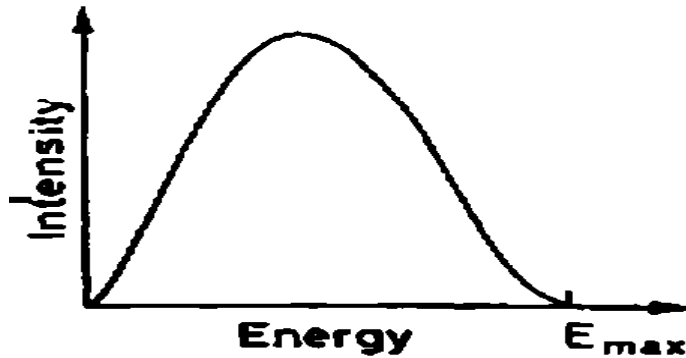
Burada elektron ve antinötrino yayınlanmıştır. Bu durumda kız çekirdek fazladan bir proton içerir ve atom numarası 1 artmıştır.

Benzer olarak



Bu durumda ise bir pozitron ve bir nötrino yayınlanır ve atom numarası 1 azalır. Her iki durumda aynı zayıf etkileşim nedeniyledir.

Beta bozunma işleminin temel karakteristiği beta parçacığının sürekli enerji spektrumuna sahip olmasıdır. Bu durum bozunma için gerekli enerjinin (Q değerinin) β parçacığı ve nötrino arasında (yada antinötrino) paylaşılmasıdır. Kız çekirdeğin küçük bir geri tepme enerjisi varsa bu ihmal edilir. Spektrumun maksimum enerjisi reaksiyonun Q değerine karşılık gelir. Çoğu beta kaynağı için bu maksimum değer birkaç on keV'den birkaç MeV değerine kadar değişir. Birçok beta kaynağında kız çekirdek uyarılmış durumda kalır ve hemen bir ya da daha fazla gama fotonu yayınlayarak durgun hale gelir. Bu kaynaklar aynı zamanda bu nedenle gama radyasyonu yayıcılarıdır [1].



Şekil 2.1. Beta bozunum elektronlarının sürekli enerji spektrumu

2.1.3. Gama yayımlanması

Atomun elektron kabuk yapısına benzer olarak çekirdekte ayrı enerji seviyeleri ile karakterize edilir. Bu seviyeler arasındaki geçişler doğru enerjili elektromanyetik radyasyonun yayımlanması ya da soğurulmasıyla yapılmaktadır. Bu enerji, seviyeler arasındaki enerji farkına eşit bir enerjidir. Birkaç yüz keV'den birkaç MeV'ye değişen bu fotonların enerjileri çekirdeğin yüksek bağlanma enerjileriyle karakterize edilirler. Bu yüksek enerjili fotonlar γ ışınları olarak adlandırılırlar ve yayımlanan çekirdeğin karakteristik spektrum çizgilerini gösterirler [1].

2.2. Radyoaktif Bozunma Dengesi

Ana ve ürün çekirdeklerin bozunum sabitleri arasındaki farka bağlı olarak bir miktar zaman sonra aktivitelerinin denge durumuna ulaşması mümkündür. Başlıca radyoaktif materyalin farklı uzunluktaki zaman durumlarına eşlik eden üç farklı senaryo mümkündür. Bunlar kalıcı denge, geçici denge ve dengenin olmaması durumlarıdır [2].

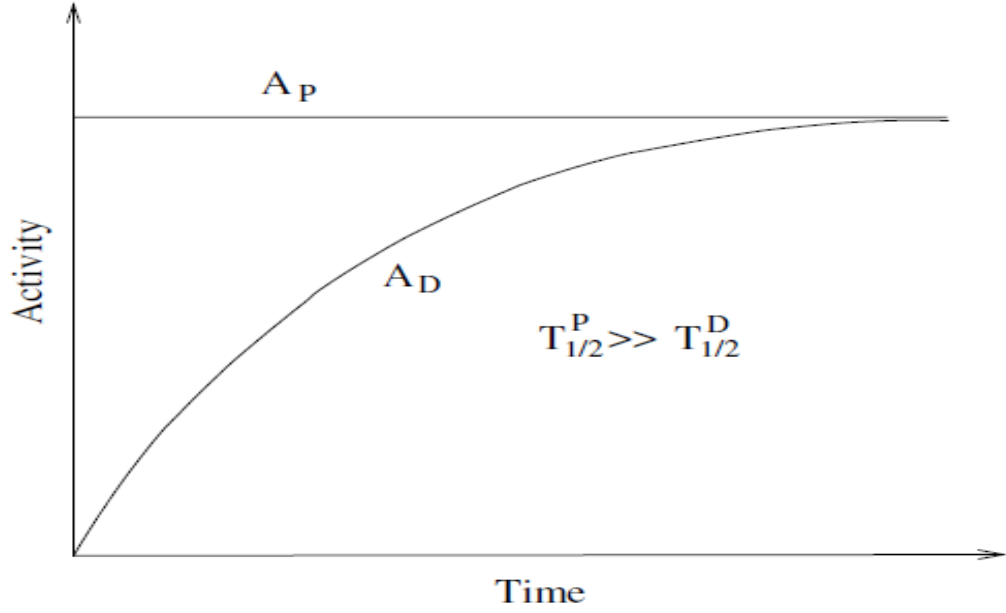
2.2.1. Kalıcı denge

Eğer ana çekirdeğin aktivitesi ürün çekirdeğin aktivitesine eşit olursa bu iki çekirdeğin kalıcı denge durumunda oldukları söylenebilir. Bu durum ana çekirdeğin yarı ömrünün ürün çekirdeğin yarı ömründen çok fazla olması durumunda gerçekleşir [2].

$$T_{1/2}^P \gg T_{1/2}^D \text{ ya da } \lambda_{dP} \ll \lambda_{dD} \quad (2.10)$$

$$A_p \cong A_d$$

(2.11)



Şekil 2.2. Kalıcı denge durumunda ana ve kız çekirdeklerin aktivite durumlarının zamana bağlı olarak değişimleri

2.2.2. Geçici denge

Ana ve ürün çekirdek aktiviteleri eşit değil fakat aralarında sabit bir kesir farkı olduğu zaman geçici denge durumuna erişirler. Bu durum ana çekirdeğin yarı ömrü ürün çekirdekten az oranda yüksek olduğu zaman gerçekleşir [2].

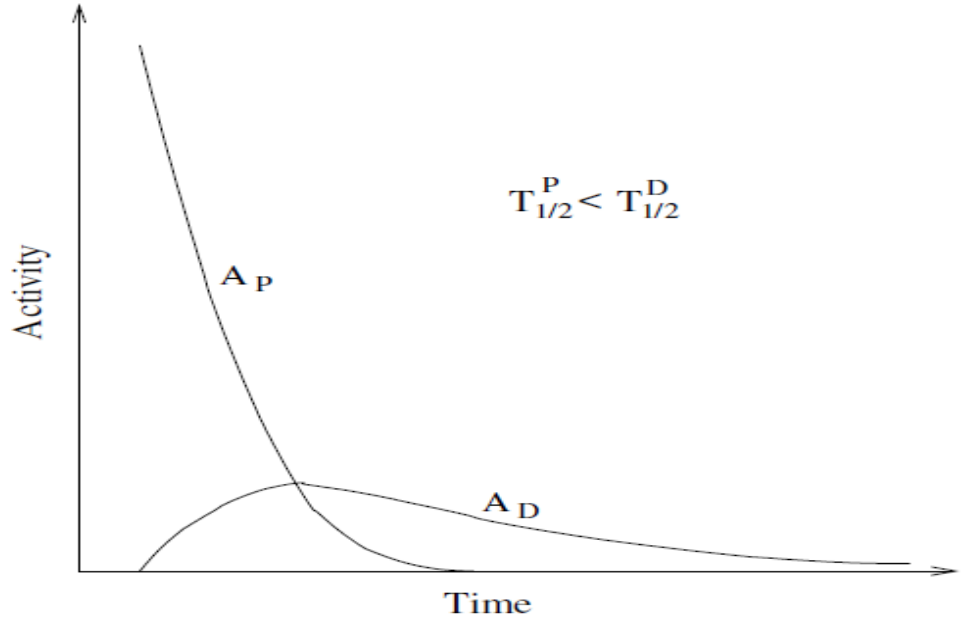
$$T_{1/2}^P > T_{1/2}^D \text{ ya da } \lambda_{dP} < \lambda_{dD} \quad (2.12)$$

$$\frac{A_p}{A_d} \cong 1 - \frac{\lambda_{dP}}{\lambda_{dD}} \quad (2.13)$$

2.2.3. Denge olmaması durumu

Ana çekirdeğin yarı ömrü ürün çekirdeğin yarı ömründen daha az ise ana çekirdek kız çekirdeğe bozunacağı için ana çekirdek çabucak yok olur. Sonuç olarak net aktiviteyi sadece ürün çekirdeğin aktivitesi belirleyecektir [2].

$$T_{1/2}^P < T_{1/2}^D \text{ ya da } \lambda_{dP} > \lambda_{dD} \quad (2.14)$$



Şekil 2.3. Denge durumuna erişmeyen ana ve ürün çekirdek aktivitelerinin zamana göre değişimleri

2.2.4. Gama ışını zayıflaması

Bir foton demeti düz bir çizgide hareket eden çok sayıda fotonlardan oluşur. Demet tek renkli olabilir ya da olmayabilir ve demetteki tüm fotonlar aynı enerjiye sahip olabilir ya da olmayabilir. Enerjilerine bağlı olarak demetteki her bir foton bazı etkileşimlerden birini gerçekleştirebilir. Belli bir enerjideki bir fotonun bir atomla etkileşiminin ve etkileşim çeşidinin kesin doğrulukta olacağını söylemek çok zor hatta imkansızdır. Çok sayıdaki fotonun tüm etkileşim mekanizması tesir kesiti gibi istatistiksel niceliklerin yardımıyla kesin doğrulukta tahmin edilebilir.

Radyasyon ölçümlerinde foton demetine maruz kalmak büyük parçacık demetlerine kıyasla nispeten daha kolaydır. Bunun nedeni fotonların madde ile etkileşiminin sınırlandırılmış ya da kesikli olmasıdır. Böylece foton başka herhangi bir parçacıkla etkileşime girmeyerek enerjisini kaybetmez ve demetin bir parçası olarak kalır. Bunun anlamı demetteki etkileşime girmeyen fotonların tümünün enerjisi demet materyalden geçtiği için sabit kalır. Fakat demetin şiddeti artırılırsa madde ile etkileşen foton kayıplarıyla maddeden geçer. Bu maddenin herhangi bir noktasında bulunabilir maddenin her bir birim uzunluğundaki foton demetinin şiddetindeki azalma her bir noktadaki şiddete bağlıdır.

$$\frac{dI}{dx} \propto -I \quad (2.15)$$

$$\rightarrow \frac{dI}{dx} = -\mu_t I \quad (2.16)$$

Burada dI , dx kalınlığından geçen demet için şiddetteki değişimdir. μ_t toplam lineer azalma katsayısıdır. Bu katsayı maddenin cinsine ve foton enerjisine bağlıdır. Yukarıdaki eşitliğin integralini alırsak

$$I = I_0 e^{-\mu_t x} \quad (2.17)$$

eşitliğini elde ederiz. Burada I_0 maddeye girmeden önce foton demetinin şiddeti ve I ise x derinliğindeki foton demetinin şiddetini vermektedir [2].

2.3. Maddenin Foton ile Etkileşmesi

Fotonlar yüksüzdürler ve bu nedenle Coulomb ya da nükleer kuvvetlerden etkilenmezler ve etkileşimleri kısa mesafelere yoğunlaşmıştır. Bundan dolayı foton demetinin şiddeti maddeden geçerken azalır.

Fotoelektrik etki, Compton Saçılması ve Çift Oluşumu yoluyla fotonlar madde ile etkileşirler. Raleigh ve Mie Saçılmalarını da fotonun madde ile diğer etkileşim şekilleridir. Bu etkileşim şekilleri farklı materyaller için yüksek tesir kesit bölgeleri ve farklı eşik enerjilerine sahiptir. Yeterli enerjiye sahip bir foton demeti bir maddeden geçtiği zaman demetteki fotonların tümü aynı tipteki etkileşime sahip olmaz. Bir foton demetindeki fotonların tümünün madde ile nasıl etkileştiğini bilmek istersek tüm etkileşmelerin tesir kesitlerine bakarız ve belli foton enerjisindeki en yüksek değerli olanı buluruz [2].

2.3.1. Foto elektrik etki

Dalga-parçacık ikilemine göre ışık bazı zamanlarda dalga ve bazen de parçacık olarak davranabilir. Fotoelektrik etki parçacık iddiasını onaylayan olaylardan birisidir. İlk olarak Einstein tarafından açıklanmış ve bu açıklama ona Nobel ödülünü getirmiştir. Bu

etki oldukça basittir. Işık bir materyale düştüğü zaman elektronların bu materyalden yayınlanabileceğini gösterir. Fakat elektronların yayınlanması ışığın şiddetine değil onun frekansına bağlıdır. Eğer ışığın frekansı belli bir değerden daha aşağıda ise hedef maddeye bağlı olarak elektron yayınlanması olmayabilir. Bu durum kesin olarak klasik dalga davranışı ile açıklanamaz. Einstein bu etkiyi ışığın kuantal olarak adlandırılan enerji paketleri ile açıklar. Bu paketlerin her biri E_γ 'ya eşit miktarda enerji taşır.

$$E_\gamma = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.18)$$

Burada ν frekans ve λ dalga boyunu ve c ışığın boşluktaki hızını göstermektedir. Elektronlar maddeye bağlı olduklarından onları maddeden koparmak için bağlanma enerjilerinden daha büyük miktarda bir enerji gerekmektedir. Metaller için bu enerji iş fonksiyonu olarak adlandırılır ve Φ sembolü ile gösterilmektedir. Böylece metal yüzeyinden bir elektronun yayınlanması için

$$E_\gamma \geq \Phi \quad (2.19)$$

$$\nu \geq \frac{\Phi}{h} \quad (2.20)$$

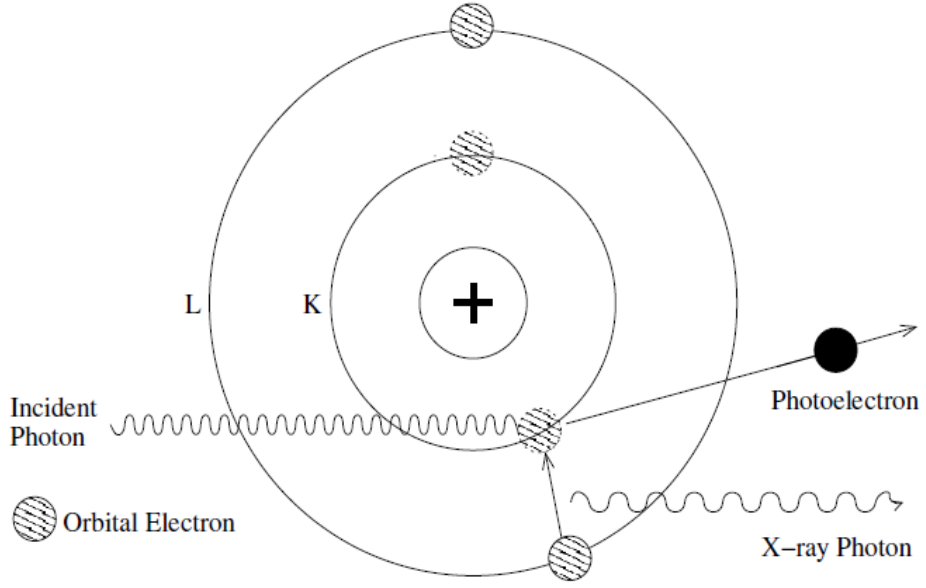
$$\lambda \leq \frac{hc}{\Phi} \quad (2.21)$$

olması gerekmektedir.

Foton enerjisi iş fonksiyonundan daha büyük ise geri kalan enerji yayınlanan elektron tarafından aşağıda verilen eşitlikteki gibi taşınır.

$$E_e = E_\gamma - \Phi \quad (2.22)$$

Metallerin tümü çok düşük iş fonksiyonuna sahip olduğundan çok düşük enerjili ışıklar bile elektronları serbest bırakabilir. Metallerin iş fonksiyonu yaklaşık olarak serbest metal atomlarının bağlanma enerjisinin yarısı kadardır.



Şekil 2.4. Fotoelektrik olay

Fotoelektrik etki serbest atomlarda da oluşabilir. Bu işlem sırasında bir foton tamamıyla bir atom tarafından soğurularak onu kararsız hale getirir. Atomlar tekrar kararlı hale dönebilmek için atomik kabuk bağlarındaki elektronlardan birini yayınlarlar. Doğal olarak bu işlem gelen fotonun atomdaki en zayıf bağlı elektronun bağlanma enerjisine eşit ya da daha büyük enerjiye sahip olmasını gerektirir. Yayınlanan elektron tarafından taşınan enerji aşağıdaki eşitlikte gösterildiği gibi gelen fotonun enerjisinden bağlanma enerjisini çıkararak bulunabilir.

$$E_e = E_\gamma - E_b \quad (2.23)$$

Fotoelektrik etki sırasında gelen foton tamamıyla kaybolduğu için bu olaya bir tek fotonun bir tek elektrona dönüşmesi olarak da bakılabilir [2].

2.3.2. Compton saçılması

Compton saçılması durgun durumda zayıf bağlı ya da serbest elektronlardan fotonların inelastik saçılması olayıdır. Elektronların hemen hemen serbest olmaları nedeniyle çarpışmanın sonucu olarak saçılabilirler.

Compton saçılması ilk olarak Compton tarafından 1923 yılında keşfedilmiştir. Saçılma deneyi esnasında saçılan ışığın dalga boyunun gelen ışıktan farklı olduğunu bulmuştur. Düşük atom numaralı elementlerin bağlanma enerjileri birkaç yüz eV aralığında iken laboratuvarlarda kullanılan gama ışın kaynaklarının enerjileri birkaç yüz keV arasında değişmektedir. Bu nedenle bağlı elektronların gelen fotonlara göre hemen hemen durgun ya da serbest olduklarını düşünebiliriz. Gelen fotonun enerjisinin hedef atomda daha içte yer alan elektronların bağlanma enerjisinden daha yüksekse genellikle Compton olayının gerçekleşmesi fotoelektrik olayın gerçekleşmesinden daha muhtemeldir. Basit enerji ve lineer momentum korunum kanunları gelen ve saçılan fotonların dalga boyları arasındaki ilişkiyi elde etmekte kullanılabilir.

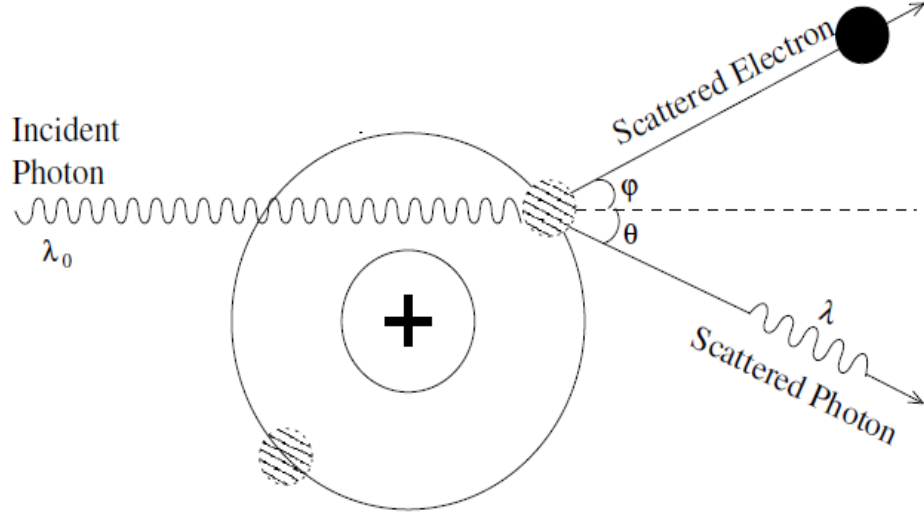
$$\lambda = \lambda_0 + \frac{h}{m_0c} [1 - \cos\theta] \quad (2.24)$$

λ_0 gelen fotonun dalga boyu ve λ ise saçılan fotonun dalga boyudur. m_0 elektron durgun durumdaki enerjisidir θ ise gelen ve saçılan fotonlar arasındaki açıdır.

Gelen ve saçılan foton enerjileri ise

$$E = E_{\gamma 0} \left[1 + \frac{E_{\gamma 0}}{m_0c^2} (1 - \cos\theta) \right] \quad (2.25)$$

olarak verilir. Bu eşitlikten anlaşıldığı üzere saçılan fotonun enerjisi sadece gelen fotonun enerjisine değil aynı zamanda saçılma açısına da bağlıdır [2].



Şekil 2.5. Compton saçılması

2.3.3. Çift oluşumu

Çift oluşumu foton korunumunun sonucu olarak onun elektron-positron çiftine dönüşmesi işlemidir. Fotonun kütsizelektron ve positronun kütesinin olması nedeniyle bu işlemin enerjinin kütleye dönüşmesi işlemi olduğunu söyleyebiliriz. Elektron-positron yok olma işlemi kütlelerin enerjiye dönüşmesi işlemidir. Bu nedenle çift oluşumu işlemine elektron-positron yok olması işleminin tersi olarak düşünülebilir. Fakat bu iki işlem arasında operasyonel bir fark vardır. Çift oluşumu işlemi daima bir başka materyalin içinde yer alırken elektron-positron yok olması işleminde böyle bir gereklilik yoktur. Daha açık olmak gerekirse çift oluşum olayında momentum korunumunu sağlamak için fotonunun yakınında bir parçacık olmak zorundadır. Ağır bir çekirdeğin yakınında olan bu işlem şu şekilde gösterilir:



burada X ve X* ağır çekirdeğin sırasıyla temel ve uyarılmış seviyelerini göstermektedir.

Enerji iki ayrı kütleye dönüştüğünden bu işlemin gerçekleşmesi için yeterli enerji gerekmektedir. Foton en azından elektron ve positronun durgun kütlelerine eşit miktardaki enerjiye sahip olmak zorundadır.

$$E_{\gamma,\text{thresh}} \geq 2m_e c^2 \quad (2.27)$$

$$E_{\gamma,\text{thresh}} \geq 1.022 \text{ MeV} \quad (2.28)$$

Burada m_e elektron ya da pozitronun kütlesini göstermektedir. Böylece 1.022 MeV değerinin altında enerji taşıyan bir foton elektron-positron dönüşümünü gerçekleştirmez.

Çift oluşumu, elektronlar gibi hafif parçacıkların yakınında da oluşabilir. Elektronun yakınındaki işlem genellikle üçlü oluşum olarak adlandırılır.

$$\gamma + e \rightarrow e + e^+ + e \quad (2.29)$$

bu olayda da çift oluşumda olduğu gibi sadece bir elektron ve bir pozitron üretilir. Fakat başlangıçta var olan elektron saçıldığı için detektörlerde iki elektron ve bir pozitron algılanır. Üçlü oluşum için eşik enerjisi 2.044 MeV dir [2].

2.4. Doğadaki Radyoaktivite

Doğal kaynaklar nedeniyle oluşan iyonize radyasyona insanların maruz kalması sürekli ve yeryüzündeki hayatın kaçınılmaz bir gerçeğidir. Tüm bireyler için radyasyon maruziyeti insan yapımı kaynaklardan gelen radyasyonla birleştirildiğinde fazla olabilmektedir. Doğal radyasyon maruziyetinin iki büyük nedeni vardır. Bunlardan birisi Dünya'nın atmosferine gelen yüksek enerjili kozmik ışın parçacıkları ve bir diğeri ise çevremizde her yerde hatta insan vücudunda bile var olan yer kabuğundan kaynaklı radyoaktif çekirdeklerdir. İnsanların doğal kaynak nedeni ile sahip oldukları iç ve dış radyasyon maruziyetlerin hepsi bu kaynaklardan meydana gelmektedir [3].

2.4.1. Kozmik radyasyon

Yerkabuğu dış uzaydan kaynaklanan yüksek enerjili parçacıklar tarafından sürekli olarak bombardıman edilirler. Bu kozmik ışınlar atmosferin içeriğindeki çekirdeklerle etkileşir, çok çeşitli etkileşimler gerçekleşir ve ikincil reaksiyon ürünleri havayolu yüksekliğinden yer seviyesine kadar atmosfer derinliğinde şiddetleri azalarak kozmik

ışın maruziyetine katkıda bulunurlar. Kozmik ışın etkileşimleri aynı zamanda kozmojenik radyonüklitler olarak bilinen radyoaktif çekirdekleri üretir. Bunlardan en iyi bilinenleri ^3H ve ^{14}C dür.

Atmosferde kozmik ışın parçacıklarının etkileşimleri ^3H , ^7Be , ^{14}C ve ^{22}Na gibi çekirdekleri içeren çok sayıda radyonüklit üretir. Esasen hedef çekirdekten (temelde nitrojen, oksijen ve argon) daha hafif olan nükleer türlerin tümü yüksek enerjili parçalanma etkileşimleriyle üretilir. Bu üretim üst stratosferde en üst seviyededir fakat bazı enerjetik kozmik ışın nötronları ve protonları daha alt atmosferde de hayatta kalır ve kozmojenik radyonüklit üretmeye devam ederler. Bu üretim sadece rakıma değil aynı zamanda enleme bağlıdır ve Dünya'nın manyetik alanı boyunca kozmik ışın girişini değiştiren 11 yıllık solar döngü ile de değişir.

İnsan vücudunda metabolizmayla ilgili görevleri bulunan ^3H , ^{14}C ve ^{22}Na elementleri dışında kozmojenik radyonüklitler alınan radyasyon dozlarına küçük bir katkı yaparlar. Kozmojenik radyonüklitlerden dolayı sahip olunan yıllık etkin doz eşdeğerleri ^{14}C için $12 \mu\text{Sv}$, ^{22}Na için $0.15 \mu\text{Sv}$, ^3H için $0.01 \mu\text{Sv}$, ^7Be için $0.03 \mu\text{Sv}$ belirlenmiştir [3].

2.4.2. Karasal radyasyon

Yerkabuğu kaynaklı doğal olarak oluşan radyonüklitler çevresel ortamlarda değişik derecelerde bulunurlar. Sadece yarı ömürleri dünyanın yaşıyla kıyaslanabilenler ve onların bozunma ürünleri materyaller içerisinde önemli miktarlarda bulunurlar. Dış kaynaklardan insan vücudunun ışınlanması başlıca ^{238}U ve ^{232}Th serileri ve ^{40}K radyonüklitlerinden yayınlanan gama radyasyonları nedeniyledir. Bu radyonüklitler aynı zamanda insan vücudunda da bulunurlar ve gama ışınları kadar alfa ve beta parçacıklarıyla da çeşitli organları ışınlarlar. ^{235}U serisinden ^{87}Rb , ^{138}La , ^{147}Sm ve ^{176}Lu gibi bazı diğer karasal radyonüklitler de doğada bulunurlar fakat insanların aldığı dozlara katkıları oldukça düşüktür [3].

Tablo 2.1. Karasal radyonüklitler

	Karasal Radyonüklitler
Element	Izotop
Potasyum	K-40
Rubidyum	Rb-87
Lanthanum	La-138
Samarium	Sm-147
Lutecium	Lu-176
U-238 Serisi	
Uranyum	U-238
Toryum	Th-234
Protactinium	Pa-234m
Uranyum	U-234
Toryum	Th-230
Radyum	Ra-226
Radon	Rn-222
Polonyum	Po-218
Kurşun	Pb-214
Bizmuth	Bi-214
Polonyum	Po-214
Kurşun	Pb-210
Bizmuth	Bi-210
Polonyum	Po-210
Kurşun	Pb-206
Th Serisi	
Toryum	Th-232
Radyum	Ra-228
Aktinyum	Ac-228
Toryum	Th-228
Radyum	Ra-224
Radon	Rn-220
Polonyum	Po-216
Kurşun	Pb-212
Bizmuth	Bi-212
Polonyum	Po-212
Thalium	Tl-208
Kurşun	Pb-208
U-235 Serisi	
Uranyum	U-235
Toryum	Th-231
Protactinium	Pa-231
Actinium	Ac-227
Toryum	Th-227
Francium	Fr-223
Radium	Ra-223
Radon	Rn-219
Polonyum	Po-215
Kurşun	Pb-211
Bizmuth	Bi-211
Thalium	Tl-207
Kurşun	Pb-207

Ev dışı maruziyete neden olan karasal radyonüklitler iz seviyesinde tüm topraklarda bulunur. Bu seviyeler toprağın olduğu kaya tipine bağlıdır. Yüksek radyasyon seviyeleri granit gibi volkanik kayalardan ve düşük seviyeler ise tortul kayalardan kaynaklanmaktadır. Fakat bazı istisnalar vardır. Bazı killi toprak ve fosfat kayaları nispeten yüksek radyonüklit içeriğine sahiptir. Tüm araştırmalar göstermiştir ki ^{238}U , ^{232}Th serilerindeki ve ^{40}K 'daki gama yayıcı radyonüklitlerden kaynaklı dış radyasyon alanının bu üç elemanı, eşit olarak ev içi ve ev dışı durumlarının her ikisinde de bireylerin dıştan gelen gama radyasyon dozlarına eşit katkıda bulunurlar.

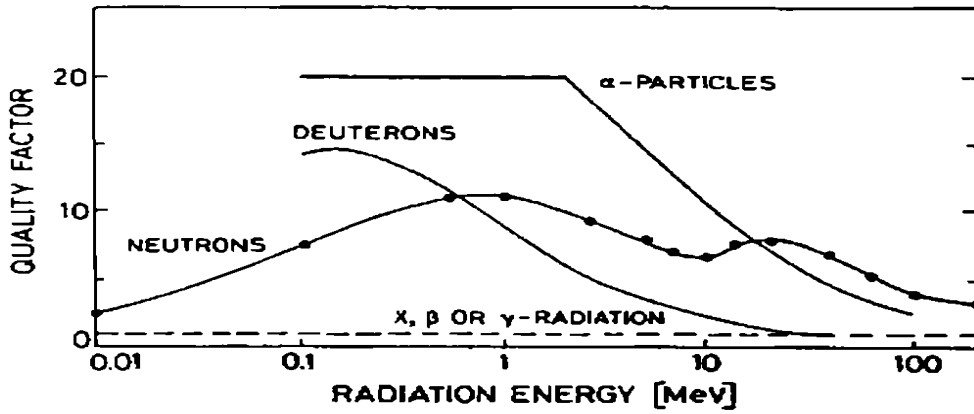
^{238}U ve ^{234}U izotopları ^{234}Th ve ^{234}Pa şeklinde iki kısa ömürlü nüklite ayrıldığından yaklaşık olarak dengededir. Fakat kendisinin bozunma işlemi kaynak materyalden bozunum radyonüklitinin bazı çözümlerine izin verir ve bu radyonüklit kolay bir şekilde çevreye transfer olur. Böylece ^{234}U topraklarda ^{238}U den daha eksik olabilir. Bu zincirdeki ^{226}Ra radyonüklidi ^{238}U 'den biraz farklı konsantrasyonlara sahiptir. Bunun nedeni ^{230}Th ve uranyum ana çekirdekleri arasında oluşabilmesi ve çevreye kolaylıkla hareket edebilmesidir. Gaz element radonu içeren ^{226}Ra 'nın bozunma ürünleri ^{238}U 'den kaynaklı maruz kalma oranını azaltır. Bu serilerdeki radon (^{222}Rn) radyonükliti sadece birkaç gün yarı ömre sahiptir fakat önemli doz katkıları olan ^{210}Pb ve ^{210}Po olan iki uzun ömürlü bozunum ürününe sahiptir. ^{232}Th serisi için benzer yaklaşımlar mevcuttur. ^{228}Ra radyonükliti yeteri kadar uzun yarı ömre sahiptir. ^{232}Th ana çekirdeğinden bazı ayrılımlara izin verebilir. ^{230}Rn zincirin gaz elementidir ve çok kısa yarı ömre sahiptir ve uzun ömürlü bozunma ürünleri yoktur [3].

2.5. Radyasyonun Biyolojik Etkileri

2.5.1. Bağlı biyolojik etkenlik (RBE)

Biyolojik etkileri tartışmak için soğurulan radyasyon dozlarını belirtmemek uygun olmaz. Gerçekte çalışmalar radyasyon tarafından oluşturulan biyolojik zararların özel radyasyon çeşidine bağlı olduğunu göstermektedir. Örneğin alfa parçacıklarından alınan bir doz eşit dozdaki protondan daha fazla hasar üretir ve bu da gama ışını ya da elektronunun eşit dozlarından daha fazla zarar vermektedir. Bunun nedenifarklı parçacıkların lineer enerji transferidir. Enerji her bir birim uzunluk için sınırlı olarak

depolanmıştır. Böylece daha fazla iyonizasyona neden olan parçacıklar yolları boyunca molekülleri daha fazla uyarma ve iyonize etmektedirler ve daha fazla bölgesel hasara neden olmaktadır. Bu etkinin hesaplanması için her bir radyasyon tipi için belirlenen bağıl biyolojik etkenliğin (RBE) ölçülmesiyle bir kalite faktörü belirlenir. Şekil 2.6 farklı çeşitteki parçacıklar için enerjinin fonksiyonu olarak bu niceliği göstermektedir. Enerji bilinmediği ya da parçacığın bir spektruma sahip olması durumunda tablo 2.2’ de gösterilen değerler kullanılır. Genellikle alfa parçacıkları protondan iki kat daha fazla ve gama ve elektrondan ise on kat daha fazla radyasyon hasarı verdikleri düşünülmüştür [1].



Şekil 2.6. Enerji fonksiyonu olarak farklı radyasyon çeşitleri için kalite faktörü

Tablo 2.2. Çeşitli radyasyonlar için kalite faktörü

	γ	β	proton	α	Hızlı nötron	Termal nötron
Q- Faktör	1	1	10	20	10	3

Bağıl biyolojik etkenlik (RBE) belli biyolojik etkilere bağlı olarak değişebilir.

2.5.2. Doz eşitliği

RBE kalite faktörü tarafından (rad ya da Gray) soğurulan dozun çarpılmasıyla biyolojik etkinin normalize edilmiş ölçümü bulunabilir. Bu doz eşitliğidir ve ölçümün birimi rem (röntgen-man-equivalent) ya da Sievert'dir.

rem = Kalite Faktörü x rad

Sievert (Sv) = Kalite Faktörü x Gray

1 Sv = 100 rem

Doz eşitliği en yaygın kullanılan birimdir [1].

2.5.3. Çevresel kaynaklardan alınan dozlar

Bilindiği gibi sürekli olarak yapay ve doğal kaynaklardan gelen radyasyon dozlarına maruz kalırız. Bu kaynaklar arasında kozmik ışınlar, doğada (toprak, su ve inşaat malzemeleri gibi) doğal olarak bulunan radyoaktif izotoplar, nükleer atık ve serpintiler, tüketici ürünleri ve endüstride kullanılan radyoaktif kaynaklar sayılabilir. Tablo 2.3 doğal ve yapay kaynakların bazılarında bir yılda alınan doz miktarlarını göstermektedir.

Tablo 2.3. Doğal ve yapay kaynakların bazılarında bir yılda alınan doz miktarları

Doğal Kaynaklar	mrem/yıl
Kozmik Işınlar	28
Doğal Fon (^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra)	26
Vücuttaki içsel radyasyon kaynakları (^{40}K , ^{14}C)	26
Çevresel Kaynaklar	
Gelişmiş Teknoloji	4
Küresel Serpinti	4
Nükleer Santral	0.3
Tıp	
Teşhis	78
X- Işını	100-200
Eczacılık	14
Mesleki	1
Tüketici Ürünleri (TV, Duman Dedektörü vb.)	5

Tablo 2.3’de gösterilen bu değerler yaşanılan bölgelere göre 2 ya da 3 faktörü kadar değişiklik gösterebilir. Örneğin 2000 metre yükseklikte kozmik ışın dozları deniz seviyesindeki dozların yaklaşık iki katıdır. Benzer olarak doğal fon radyasyon dozları bölgenin jeolojik ve mineral yapısına bağlı olarak daha büyük ya da daha düşük olabilir.

Yine de en büyük radyasyon kaynakları doğal fon ve tıbbi teşhis radyasyon kaynaklarıdır [1].

2.5.4. Biyolojik etkiler

Maddeyi iyonlaştırma gücü nedeniyle radyasyon canlı dokular için oldukça zararlıdır. Bu iyonizasyon doğrudan DNA gibi biyolojik moleküllerin kimyasal bağlarını kırmasıyla ya da kimyasal olarak biyolojik moleküllere saldırabilen hücrelerdeki su moleküllerinden kimyasal radikaller oluşturarak indirekt olarak zarar verebilir. Doğal biyolojik işlemlerle bu zararlar vücut tarafından tamir edilebilir fakat zararın boyutuna bağlı olarak bu tamirin etkinliği değişmektedir. Açık bir şekilde bu tamir başarılı olursa ve sonrasında da yeni bir radyasyon maruziyeti olmazsa herhangi bir radyasyon zararı söz konusu olmaz. Eğer vücut radyasyonun verdiği zararı tamir edemezse hücre üç muhtemel şekilde zarar görebilir.

1) Hücre ölümü

2) Kanser gibi somatik etkilere önderlik eden hücrenin doğal fonksiyonundaki bozulma

3) Genetik etkiler gibi gelecek nesillere aktarılan hücrenin kalıcı değişikliği

Alınan dozlara bağlı olarak hücre hasarları hemen gerçekleşebilir ya da yıllarca ertelenebilir[1].

2.5.5. Kısa zamanda alınan yüksek dozlar

Radyasyonun yüksek doz etkisi olarak kısa zamanda (birkaç saat ve daha az) alınan 100 rad ve daha fazla radyasyon dozunun verdiği etkilerden bahsedilmektedir. Anlık etki olarak mitotik hücrelerde kendini yenileme mekanizmalarındaki bozulmadır. Bunların arasında en önemlileri beyaz kan hücreleri, kemik iliği ve bağırsak bağ hücrelerindeki bozulmalardır. Yüksek radyasyon dozunun ilk sonucu bireylerin kanında görülür. Eğer alınan doz 200 – 300 rem'den daha fazla ise radyasyonun kendisi ya da mitotik hücrelerdeki bozulmalardan kaynaklanan komplikasyonlardan dolayı ölüm gerçekleşebilir. Eğer hasta hayatta kalırsa bir süre sonra cilt kızarması, katarakt, doğum

kusurları gibi bir dolu etki gözlenebilir. Bu etkilerin tümü karakteristik bir eşik dozdan sonraki alımlarda görülür. Güvenli minimum bir doz değerinin altında bu etkiler görülmemektedir. Bu eşik dozun üzerinde artan dozla artan olasılıklarda bir ya da daha fazla etkinin görülme olasılığı artar [1].

Tablo 2.4. Bazı radyasyon etkileri için eşik dozları

Birey	Etki	Eşik Doz (rem)
Embriyo	Küçük baş çevresi	4
Cenin	Küçülmüş vücut gelişimi artan ölüm riski	20
Çocuk	Hipotiroidizm	500
Yetişkin	Göz lensi opaklığı	250
Yetişkin	Ölüm	200-300
Yetişkin	Yaşlanma	300
Yetişkin	Kızarıklık	300-1000
Erkek Yetişkin	Geçici sterillik	50-100
	Kalıcı sabitlik	>500
Kadın Yetişkin	Kalıcı Sterillik	300-400

2.5.6. Düşük seviyedeki dozlar

20 rad ya da daha düşük dozlar ya da maksimum izin verilen oranlarda alınan dozlar düşük seviyeli dozlar olarak adlandırılır. Düşük doz alımlarında kanser ve genetik etkiler olmak üzere iki temel etkiden söz edilebilir. Fakat yüksek doz alımlarının tersi olarak bu iki durumun oluşmasıyla alınan radyasyon dozları arasında bilinen çok az bir ilişki vardır. Kanser için radyasyona maruz kalma ve hastalığın oluşması arasında uzun bir gecikme olduğundan kanser oluşumunun ilaçlar, sigara yada kimyasallar gibi diğer muhtemel nedenlerden radyasyon maruziyetini çıkarmak çok zordur. Genetik etkiler durumunda ise laboratuvarlarda fareler ve diğer hayvanlar üzerinde yapılan deneylerde görülmesine rağmen insanlarda ki buna Hiroshima- Nagasaki'de hayatta kalanlarda dahil, radyasyon nedenli genetik bozulmaların olduğu görülmemiştir. Aslında insan üzerinde radyasyonun genetik etkisi hakkındaki güncel bilgiler tamamıyla bu deneylere dayanan tahminlerdir. Yine de genel olarak kabul edilenler şunlardır:

- 1) Bu etkilerin gözlenmediği güvenli bir radyasyon seviyesi ve alt değeri yoktur
- 2) Bu etkiler doz oranına bağlı değildir fakat toplam biriken doz miktarına bağlıdır.

Gerçekte verilen toplam doz için bu etkilerin biri ya da daha fazlasının oluşması bir olasılıktır. Genellikle yüksek dozlarda bu modelden sapmalar olmasına rağmen gelişen kanser riski ya da genetik bozulma ve alınan toplam doz arasındaki lineer ilişki tahmin edilebilir. Bu risk hakkındaki tahminler Uluslararası Radyasyon Korunması Komisyonu (ICRP) tarafından tablo 2.5 de verilmiştir. Bu tahminler kaynağa bağlı olarak değişmektedir. Burada normal ömür beklentisi 73 yıl olarak alınmıştır [1].

Tablo 2.5. Gelişen kanser ya da genetik bozulma riski

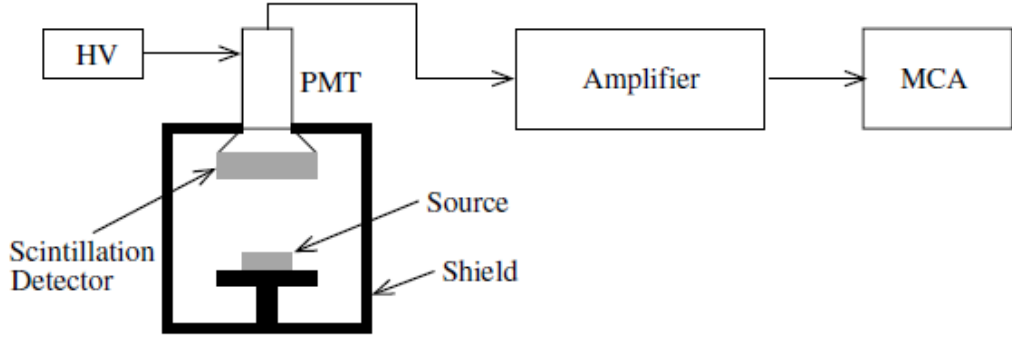
	Risk/Sv – 10 ⁴ kişi
Ölümcül Kanser	125
Tedavi edilebilir kanser	125
Sonradan ortaya çıkan toplam genetik Hastalıklar	80

3. BÖLÜM

MATERYAL VE METOD

3.1. Gama Spektrometri Sistemi

Gama ışınları derin giricilik güçleri nedeniyle nükleer spektrometrede çok sık kullanılırlar. Gama ışın spektrometresi için kullanılan standart sistem NaI(Tl) içeren bir sintilatör ve foto çoğaltıcı tüpten oluşur. Sintilatör, gama ışın fotonlarını foto çoğaltıcı tüp tarafından algılanan görünür ışık fotonlarına dönüştürür.



Şekil 3.1. Sintilasyon detektörlü tipik bir gama ışın spektrometri sistemi

Buradaki zırhlamanın iki nedeni vardır. Bunlardan bir tanesi radyasyon yayılımından çevreyi korumak diğer nedeni ise detektörün bulunduğu ortamdan gelen fon radyasyonunu minimize etmektir. Kaynaktan gelen tüm gamaları algılayabilmek için kaynak sintilatörün önüne yerleştirilmiştir. Foto çoğaltıcı tüp boyunca ışık fotonlarına rehberlik edebilmek için sintilatör ışık yansıtıcıyla çevrelenmiştir. Işık fotonları, foto çoğaltıcı tüpün foto elektron yayınlayan foto katodu tarafından soğurulur. Bu foto elektronlar foto çoğaltıcı tüpün dinotları tarafından çoğaltılır ve sonuç olarak ölçülebilir bir puls meydana gelir [2].

Gama spektrometrik sistemle örnekleri analiz etmenin bir çok avantajı vardır. Bu yöntemle aynı örnek içindeki farklı radyoaktif nüklitler eş zamanlı olarak analiz edilebilirler. Analiz öncesinde herhangi bir kimyasal ön hazırlık işlemine gerek duyulmaz.

Yozgat İli, ilçe ve köylerini kapsayan bölgede önceden belirlenmiş tarım arazisi olarak kullanılmayan ve halkın yoğun olarak yaşadığı yerlere yakın örnekleme noktalarından yaklaşık 30 cm kadar derinlikten iki kilogram kadar toprak örneği toplanmıştır. Toplanan bu örnekler 10 gün kadar oda sıcaklığında kurutulmuştur. Daha sonra 2 mm gözenekli eleklerde elenmiş ve önceden boş olarak tartılan marinelli kaplarına yerleştirilmiştir. Toprak örnekleriyle dolu olan marinelli kapları tekrar tartılmış ve bu kapların ağızları hava geçirmeyecek şekilde kapatılmıştır. Toprak örnekleri sayım öncesinde radyoaktif dengeye ulaşmaları için 1 ay kadar süreyle bekletilmiştir.

1 aylık bekleme süresi sonunda örnekler Canberra marka saf germanyum HpGe gama spektrometrik sistemde sayımları yapılmıştır. İstatistiki verilere ulaşmak için her bir örnek 50 000 saniye detektörde sayılmıştır.

HpGe gama spektrometrik sistemin kalibrasyonu için standart marinelli kaplarına yerleştirilmiş ^{241}Am , ^{109}Cd , ^{57}Co , $^{123\text{m}}\text{Te}$, ^{51}Cr , ^{113}Sn , ^{85}Sr , ^{137}Cs , ^{88}Y , ^{60}Co içeren kaynaklar kullanılmıştır.



Şekil 3.2. Canberra marka HpGe gama spektrometrik analiz sistemi

4. BÖLÜM

BULGULAR VE SONUÇLAR

Bu çalışmada Yozgat İli sınırları içerisindeki halkın yoğun olarak yaşadığı il merkezi, kasaba ve köyleri kapsayan bölgedeki toprak yapısındaki doğal radyasyon seviyelerini belirlemek amacıyla 24 farklı yerden toprak örnekleri toplanmıştır. Bu örnekler gama spektrometrik analizleri yapılarak incelenmiştir. Bu analizler sonucunda toprak örneklerindeki ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K ve ^{137}Cs izotoplarının aktivite konsantrasyonları belirlenmiştir.

Gama spektrometrik analizler için kullanılan Canberra 85 serisi (4096 kanallı) gama spektrometre cihazı 0,33 MeV'de %15-16'lık relatif verime sahip yüksek saflıktaki koaksiyel germanyum detektöründen yapılmıştır. Kozmik ışınlardan ve ortamdan kaynaklanan doğal radyasyonun detektöre ulaşmasını engellemek için 2 mm bakır ve 2 mm kadmiyum tabakayla 10 cm derinlikte içten zırhlanmıştır.

Gama spektrometresinin enerji kalibrasyonu ve kısmi verim kalibrasyonu 80 keV ve 2500 keV arasında değişen enerjilerde ^{109}Cd , ^{57}Co , ^{113}Sn , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{188}Y ve ^{60}Co içeren 1000 ml hacimli marinelli kalibrasyon kaynakları kullanılarak yapılmıştır.

Her bir örnek 50 000 saniye sürede sayılmıştır.

Gama spektrometre sayım sisteminden kaynaklanan sayım hataları yaklaşık olarak %0,25 – 30 arasındadır.

Tablo 4.1.'de Yozgat İli, ilçe ve köylerini kapsayan 24 farklı örnekleme noktasından alınan toprak örneklerinin gama spektrometrik analizleri sonucunda bulunan ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K ve ^{137}Cs radyonüklitlerinin radyoaktivite konsantrasyon değerleri verilmiştir.

Şekil 4.1'de 186 keV'de pik oluşturan ^{238}U 'in bozunum ürünü olan ^{226}Ra 'nın aktivite konsantrasyonları gösterilmiştir. Bu değerler 12 Bq/kg ile 55,3 Bq/kg değerleri arasında değişmektedir. Şekil 4.1 de toprak örnekleri için ölçülen ^{226}Ra değerleri grafik halinde gösterilmiştir.

Tablo 4.1. Toprak örneklerinin ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K ve ^{137}Cs aktivite konsantrasyonları (Bq/kg)

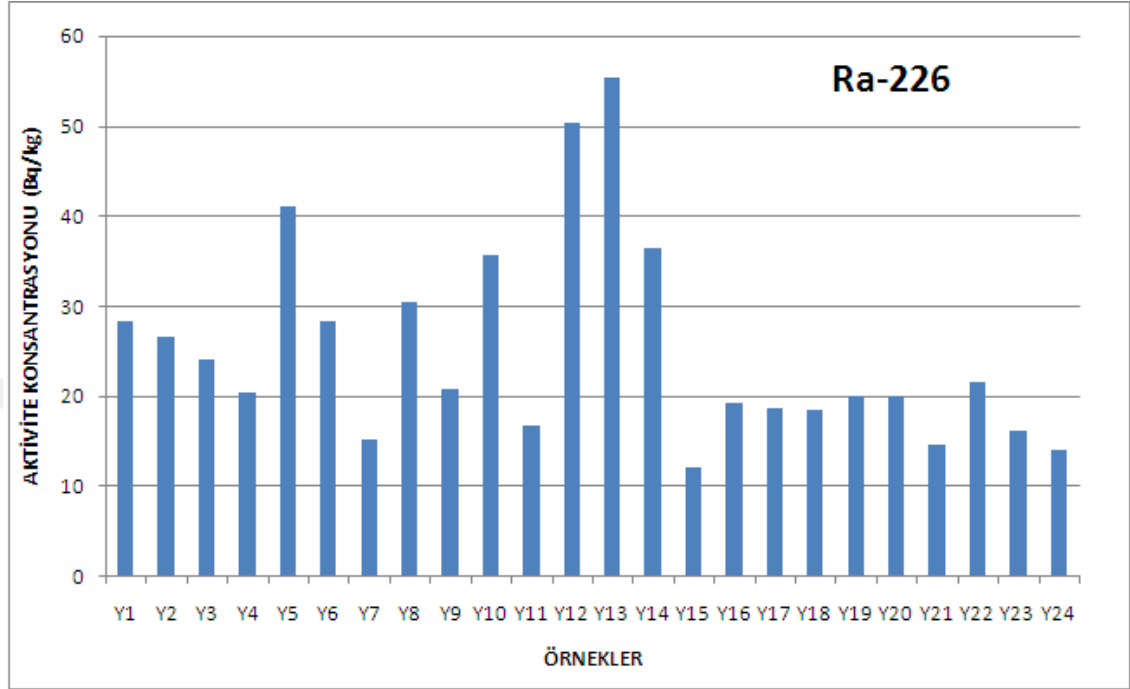
		^{137}Cs (Bq/kg)	^{40}K (Bq/kg)	^{226}Ra (Bq/kg)	^{232}Th (Bq/kg)
Y1	Yerköy1	1.0±0.3	1056.8±83.8	28.3±1.7	49.6±3.0
Y2	Akdağmadeni	<5.8	894.5±75.4	26.5±1.6	35.0±2.1
Y3	Sırçalı	12.4±1.0	578.0±44.1	24.0±1.5	31.6±2.0
Y4	Çandır Çıkış	12.0±0.7	259.0±22.6	20.4±1.0	17.0±1.0
Y5	Yerköy2	<0.6	630.0±53.0	41.0±2.3	41.5±2.6
Y6	Boğazlıyan1	6.6±0.6	375.2±31.7	28.3±1.6	23.0±1.4
Y7	Yozgat Üniversite Yanı	6.0±0.2	265.0±7.2	15.0±0.2	13.4±0.2
Y8	Sorgun	1.7±0.4	827.0±68.2	30.4±1.8	57.6±3.3
Y9	Yoğunhisar	1.2±0.2	228.0±19.0	20.7±1.2	13.0±1.0
Y10	Temlik	3.7±0.3	804.0±60.0	35.7±1.2	58.0±2.7
Y11	Özler1	6.0±0.4	348.0±28.4	16.7±1.0	20.2±1.2
Y12	Yozgata 20 km Yerköy	4.5±0.4	316.6±26.7	50.3±2.6	23.1±1.4
Y13	Şefaati Giriş	<0.8	1187.0±95.2	55.3±5.0	98.3±6.6
Y14	Karacahasanlıyı Geçince	8.0±0.6	867.7±70.0	36.3±2.0	36.5±2.0
Y15	Çiğdemli	1.6±0.2	335.3±24.0	12.0±0.8	18.3±1.1
Y16	Çekerek2-Baraj Yakını	3.3±0.5	306.0±23.6	19.1±1.4	20.1±1.4
Y17	Boğazlıyan Yakını	5.5±0.4	381.0±24.4	18.5±1.0	27.1±1.3
Y18	Özükevâk	5.4±0.5	422.7±30.2	18.4±1.2	25.8±1.6
Y19	YeniFakılı Yanı	9.5±0.8	425.0±31.0	20.0±1.3	22.6±1.5
Y20	Çekerek	5.5±0.6	454.6±33.0	20.0±1.3	27.0±1.6
Y21	Sarıkaya Mermer Fab Yanı	1.0±0.1	542.2±34.3	14.5±0.8	28.3±1.4
Y22	Yeni Fakılı Şehir İçi	6.0±0.5	517.0±35.0	21.4±1.3	33.0±2.0
Y23	2 Numara Alaca	0.8±0.2	298.0±21.5	16.0±1.0	21.0±1.3
Y24	Kadışehir	3.3±0.2	403.0±25.6	14.0±0.7	24.0±1.2

Şekil 4.2. toprak örneklerindeki ^{232}Th aktivite konsantrasyonlarını göstermektedir. Bu değerler 13 Bq/kg ile 98,3 Bq/kg değerleri arasında değişmektedir.

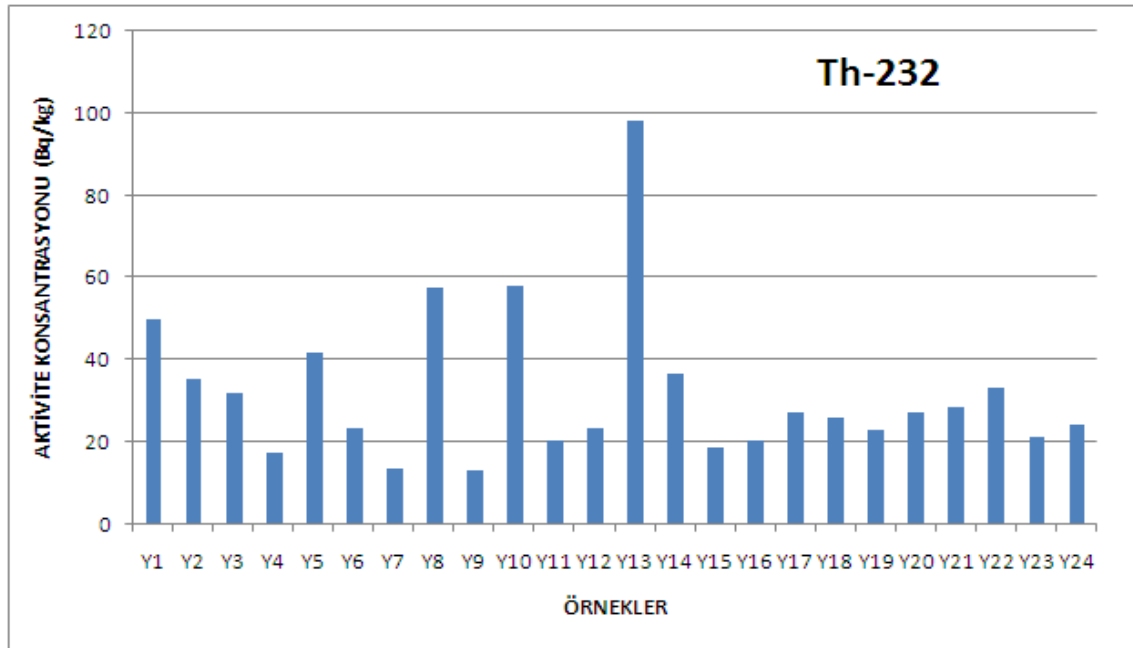
Gama spektrometik analizinde ^{40}K 1460 keV'de pik oluşturmaktadır. Şekil 4.3'de ^{40}K aktivite konsantrasyon değerlerini göstermektedir. ^{40}K aktivite konsantrasyon değerleri 228 Bq/kg ile 1187 Bq/kg arasında değişmektedir.

^{137}Cs doğada doğal olarak bulunmayan fisyon ürünü olan bir radyo izotoptur. Nükleer denemeler ya da nükleer santral kazaları sonucunda çevreye yayılırlar ve meteorolojik olaylar sonucu hareket ederek yağışlarla yeryüzüne inerler. Şekil 4.4. ^{137}Cs aktivite

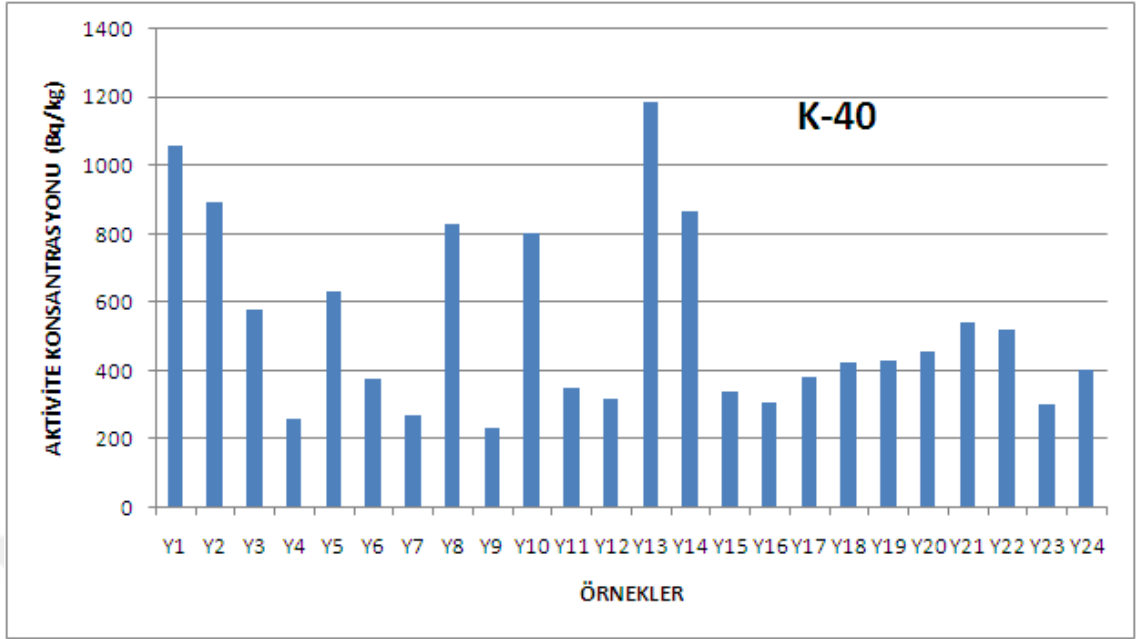
konsantrasyon değerlerini göstermektedir. Bu değerler 0,6 Bq/kg ile 12,4 Bq/kg değerleri arasında değişmektedir.



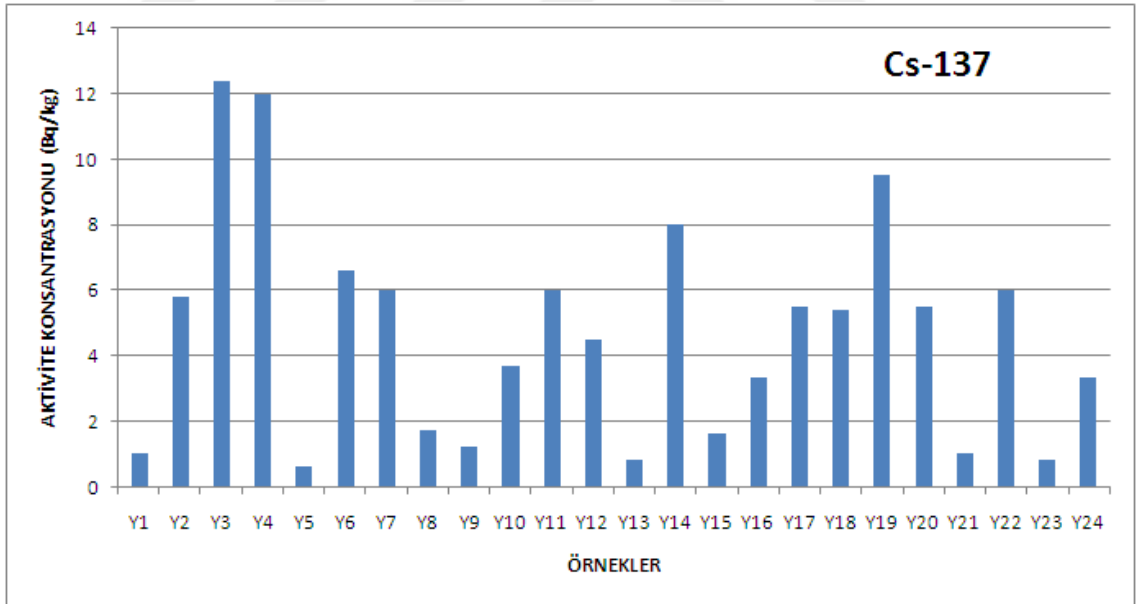
şekil 4.1. Toprak rneklerindeki²²⁶Ra aktivite konsantrasyonlarıdeğerleri



şekil 4.2. Toprak rneklerindeki²³²Th aktivite konsantrasyonlarıdeğerleri



Şekil 4.3. Toprak örneklerindeki⁴⁰K aktivite konsantrasyonları değerleri



Şekil 4.4. Toprak örneklerindeki¹³⁷Cs aktivite konsantrasyonları değerleri

Tablo 4.2. Yozgat İlini kapsayan bölgeden alınan 24 toprak örneğinin istatistiki değerlerini göstermektedir.

Radyonüklit	Th-232 (Bq/kg)	Ra-226 (Bq/kg)	K-40 (Bq/kg)
Ortalama	31,875	25,12	530,03
Medyan (Ortanca)	25,8 – 27	20,4 – 20,7	422,7 – 425
Geometrik Ortalama	28,20	23,09	473,8
Standart Sapma	18,36	11,15	264,35
Standart Hata	3,83	2,3248	55,12
En Küçük Değer	13	12	228
En Büyük Değer	98,3	55,3	1187

Tablo 4.2. toprak örneklerinde ölçülen ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K değerleri için yapılan istatistiki çalışmaları göstermektedir.

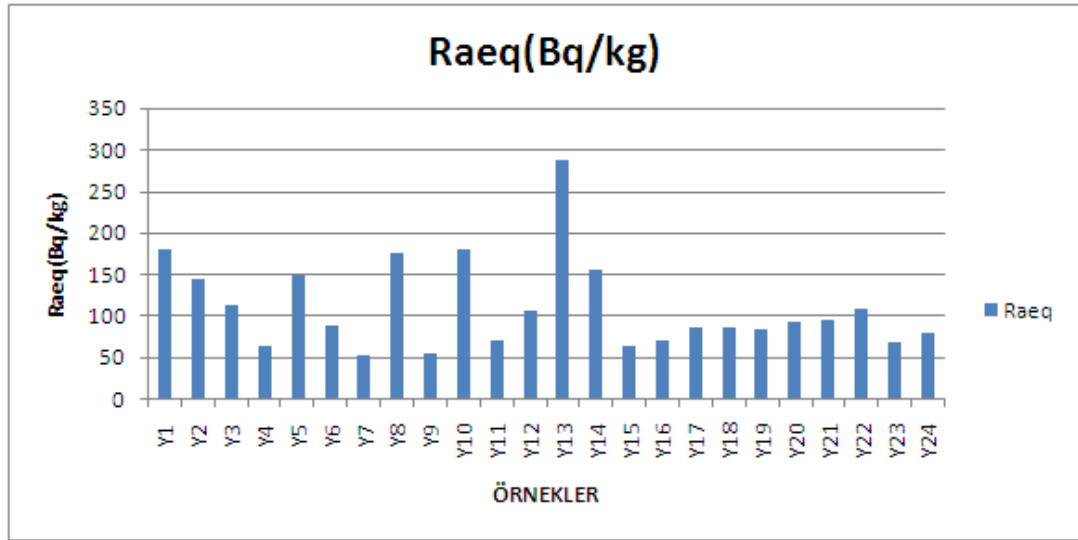
Radyum Eşdeğer Aktivite İndisi (Ra_{eq})

Radyum eşdeğer aktivite indisi (Bq/kg) ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın farklı konsantrasyonlarını içeren örneklerinin özel aktiviteilerini kıyaslamak için uygun bir indekstir. 10 Bq/kg ^{226}Ra , 7 Bq/kg ^{232}Th ve 130 Bq/kg ^{40}K ürettiği aynı gama doz oranına dayandırılan bir tanımlamadır. Böylece radyum eşdeğer aktivite indisi ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K radyonüklit aktiviteilerine bağlıdır. Radyum eşdeğer aktivite indisi şu şekilde hesaplanır: [4]

$$Ra_{eq} \left(\frac{Bq}{kg} \right) = A_{Ra} + 1,43A_{Th} + 0,077A_K$$

Burada A_{Ra} ^{226}Ra aktivitesini (Bq/kg), A_{Th} ^{232}Th aktivitesini (Bq/kg) ve A_K ^{40}K (Bq/kg) aktivite değerlerini göstermektedir.

Radyum eşdeğer aktivite indisi değerleri tablo 4.2'de verilmiştir. Toprak örneklerinde radyum eşdeğer aktivite indisleri en düşük 54,6 Bq/kg ile 287,3 Bq/kg arasında değişmektedir.



Şekil 4.5. Toprak örnekleri için hesaplanan radyum eşdeğer aktivite indisleri (Bq/kg)

Dış ve İç Işınlama İndisleri

Dış ışınlama indisi (H_{ex}) yayınlanan gama radyasyonu nedeniyle dış zararların ölçülmesinde kullanılmıştır [4].

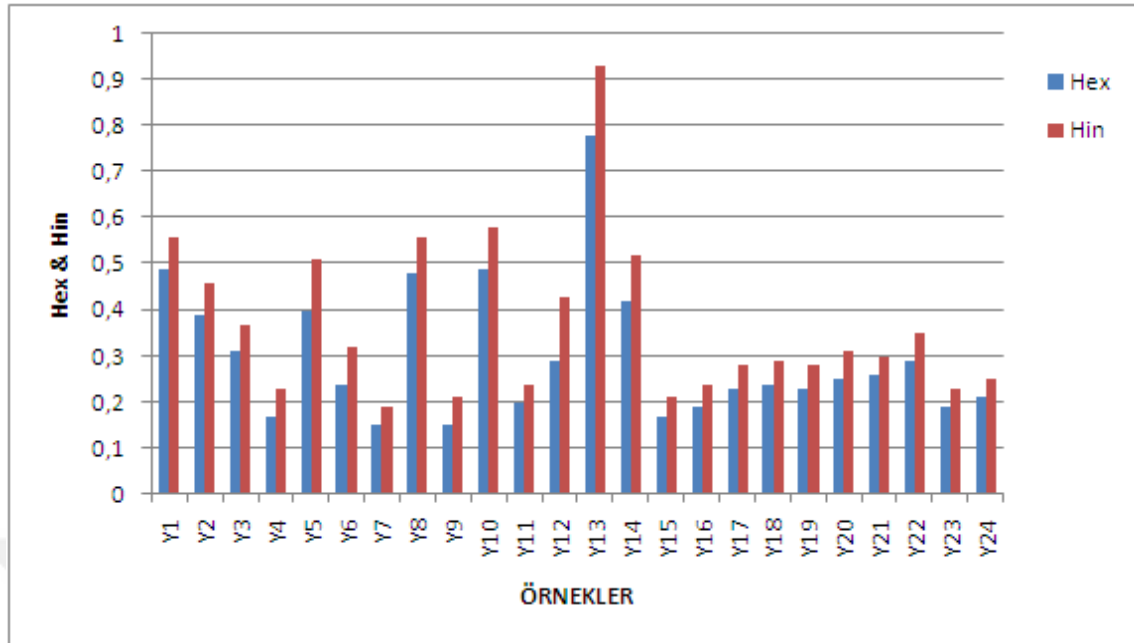
$$H_{ex} = \frac{A_{Ra}}{370} + \frac{A_{Th}}{259} + \frac{A_K}{4810}$$

Dış ışınlama indisine ek olarak radon ve onun kısa ömürlü ürünleri de solunum organlarına zarar vermektedir. Bu yüzden radon ve onun kız ürünlerinin verdikleri iç zararlar H_{in} iç ışınlama indisleri ile belirlenmektedir [4].

$$H_{in} = \frac{A_{Ra}}{185} + \frac{A_{Th}}{259} + \frac{A_K}{4810}$$

Burada A_{Ra} , ^{226}Ra aktivitesini (Bq/kg), A_{Th} , ^{232}Th aktivitesini (Bq/kg) ve A_K , ^{40}K (Bq/kg) aktivite değerlerini göstermektedir.

Dış ve iç ışınlama indis değerleri tablo 4.2'de gösterilmiştir. Dış ışınlama indisleri 0,2 ile 0,8 değerleri arasında değişmektedir. İç ışınlama indisleri ise 0,2 ile 0,9 değerleri arasında değişmektedir. Şekil 4.6. toprak örnekleri için hesaplanan iç ve dış zarar indekslerini göstermektedir.



Şekil 4.6. Toprak örnekleri için hesaplanan iç ve dış zarar indeksleri

Temsili Gama Seviye İndisi

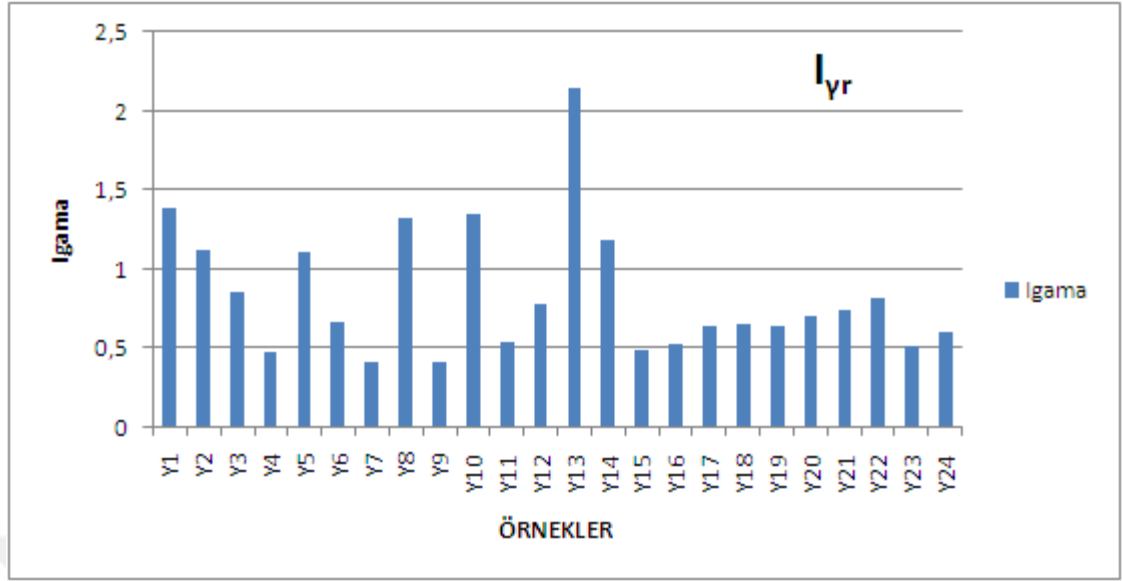
Temsili seviye indeksi (I_{yr}) toprak örneklerindeki doğal gamma yayıcılarının neden olduğu gama radyasyon zararının seviyesini tahmin etmekte kullanılır. Bu indeks yıllık etkin doz eşdeğeriyle karşılaştırmada kullanılabilir. Ayrıca bu örneklerin yapı materyali olarak kullanıldığında sağlıklı olup olmadığını belirlemede kullanılacak önemli bir araçtır.

Temsili gama seviye indisi şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$I_{yr} = \frac{A_{Ra}}{150} + \frac{A_{Th}}{100} + \frac{A_K}{1500}$$

Burada A_{Ra} , ^{226}Ra aktivitesini (Bq/kg), A_{Th} , ^{232}Th aktivitesini (Bq/kg) ve A_K , ^{40}K (Bq/kg) aktivite değerlerini göstermektedir.

Temsili gama seviye indisi değerleri tablo 4.2’de gösterilmiştir. Hesaplanan değerler 0,4 ile 2,1 arasında değişmektedir. Şekil 4.7. toprak örnekleri için hesaplanan temsili gama seviye indislerini göstermektedir.



Şekil 4.7. Toprak örnekleri için hesaplanan temsili gama seviye indisleri

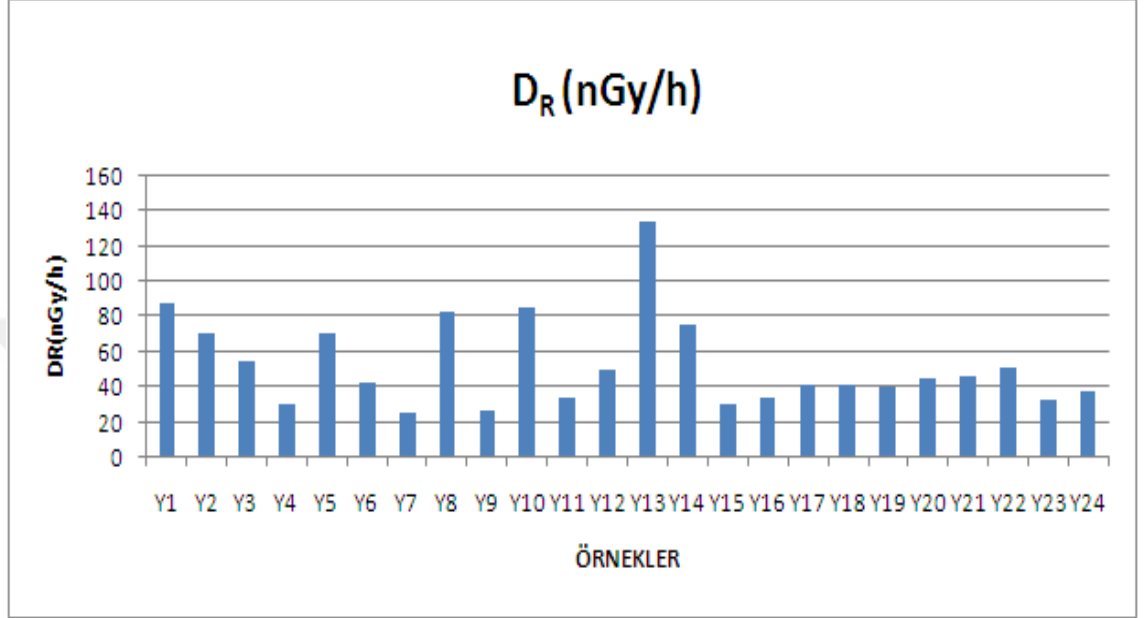
Havada Soğurulan Gama Doz Oranı

Karasal dış gama radyasyonunun karakteristiğini belirlemek için yer seviyesinden 1 m yükseklikteki bir seviyede dış havada soğurulan dozu hesaplayabiliriz (nGy h^{-1}). Havada soğurulan gama doz oranı maddenin birim zamanda birim kütle için soğurulan iyonize radyasyondan kaynaklı enerji miktarıdır. Gray ile gösterilir. Havada soğurulan doz oranlarına doğal radyonüklitlerin katkısı ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K aktivite konsantrasyonlarına bağlıdır. Gama radyasyonunun en büyük kısmı karasal radyonüklitlerden kaynaklanmaktadır. Karasal gama radyasyonu ile radyonüklit konsantrasyonları arasında doğrudan bir ilişki vardır. Eğer radyonüklit aktivitesi bilinirse yerden 1 m üsteki havadaki maruz kalınan doz oranı hesaplanabilir [5].

Yer seviyesinin 1 m üstündeki karasal gama radyasyonu nedeniyle dış havada soğurulan doz oranı ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K doğal aktivite konsantrasyonlarına bağlı olarak hesaplanmıştır. ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktivite konsantrasyonlarını dönüştürmek için doz dönüşüm faktörleri sırasıyla 0.462, 0.604 ve 0.042 olarak kullanılmıştır [3].

$$D_R \left(\frac{\text{nGy}}{\text{h}} \right) = 0,462 A_{Ra} + 0,604 A_{Th} + 0,042 A_K$$

Havada soğurulan gama doz oranları tablo 4.2’de verilmiştir. Bu değerler 134,78 nGy/h ile 26,15 nGy/h arasında değişmektedir. Şekil 4.8. Örnekleme yerlerine göre havada soğurulan gama doz oranlarını göstermektedir.



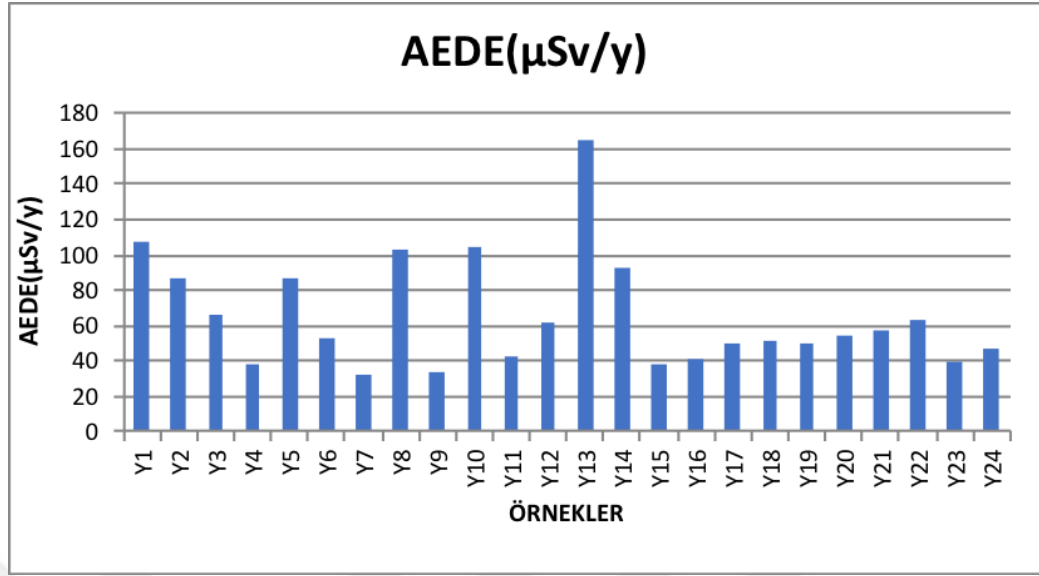
Şekil 4.8. Örnekleme yerlerine göre havada soğurulan gama doz oranları

Yıllık Etkin Doz Eşdeğeri

İnsanların 1 yıl süresince maruz kaldığı radyasyon dozları yıllık etkin doz eşdeğerleri hesaplanarak bulunur. Etkin doz eşdeğerinin havadaki soğurulmuş doza oranı, orta enerjilere dönüştürülmüş çevresel gama ışınları için 0,7 Sv/Gy olarak tanımlanır [3]. Bu hesaplamalar yapılırken insanların bu ışınlar ne kadar süre maruz kaldıkları önem taşımaktadır. Meşguliyet faktörü zamanın ne kadarının ev içi ne kadarının ev dışında geçirildiğinin bir ölçüsüdür. İnsanlarının zamanlarının %20’si ev dışında geçirildiği düşünülmüştür. Yıllık etkin doz eşdeğeri şu şekilde hesaplanır:

$$AEDE \left(\frac{Sv}{y} \right) = D_R \left(\frac{nGy}{h} \right) \times 0,7 \left(\frac{Sv}{Gy} \right) \times 0,2 \times 8760 \left(\frac{h}{y} \right) \times 10^{-9}$$

Hesaplanan yıllık etkin doz eşdeğerleri tablo 4.2’de gösterilmiştir. Bu değerler 165,3 µSv/y ile 32,1 µSv/y değerleri arasında değişmektedir. Şekil 4.9. Örnekleme yerlerine göre yıllık etkin doz eşdeğerlerini göstermektedir.



Şekil 4.9. Örnekleme yerlerine göre yıllık etkin doz eşdeğerleri

Tablo 4.3. R_{aeq} , H_{ex} , H_{in} , I_{yr} , D_R ve AEDE değerlerini göstermektedir

		R_a (Bq/kg)	D_r (nGy/h)	AEDE (μ Sv/y)	H_{ex}	H_{in}	I_{yr}
Y1	Yerköy1	180,5	87,39	107,2	0,5	0,6	1,4
Y2	Akdağmadeni	145,4	70,95	87,0	0,4	0,5	1,1
Y3	Sırçalı	113,7	54,45	66,8	0,3	0,4	0,9
Y4	Çandır Çıkış	64,7	30,57	37,5	0,2	0,2	0,5
Y5	Yerköy2	148,9	70,47	86,4	0,4	0,5	1,1
Y6	Boğazlıyan1	90,1	42,725	52,4	0,2	0,3	0,7
Y7	Yozgat Üniversite Yanı	54,6	26,15	32,1	0,2	0,2	0,4
Y8	Sorgun	176,5	83,57	102,5	0,5	0,6	1,3
Y9	Yoğunhisar	56,9	26,99	33,1	0,2	0,2	0,4
Y10	Temlik	180,6	85,29	104,6	0,5	0,6	1,4
Y11	Özler1	72,4	34,53	42,4	0,2	0,2	0,6
Y12	Yozgata 20 km Yerköy	107,7	50,49	61,9	0,3	0,4	0,8
Y13	Şefaatlî Giriş	287,3	134,78	165,3	0,8	0,9	2,1
Y14	Karacahasanlıyî Geçince	155,3	75,26	92,3	0,4	0,5	1,2
Y15	Çiğdemli	63,9	30,68	37,6	0,2	0,2	0,5
Y16	Çekerek2-Baraj Yakını	71,4	33,82	41,5	0,2	0,2	0,5
Y17	Boğazlıyan Yakını	86,6	40,92	50,2	0,2	0,3	0,7
Y18	Özükevâk	87,8	41,84	51,3	0,2	0,3	0,7
Y19	YeniFakılı Yanı	85,0	40,74	50,0	0,2	0,3	0,6
Y20	Çekerek	93,6	44,64	54,8	0,3	0,3	0,7
Y21	Sarıkaya Mermer Fab Yanı	96,7	46,57	57,1	0,3	0,3	0,7
Y22	Yeni Fakılı Şehir İçi	108,4	51,53	63,2	0,292735	0,34	0,8
Y23	2 Numara Alaca	68,9	32,59	40,0	0,186279	0,2	0,5
Y24	Kadışehri	79,4	37,89	46,5	0,2	0,3	0,6

5. BÖLÜM

TARTIŞMA SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma Türkiye'nin Yozgat İl sınırları içerisinde yer alan bölgenin toprak yapısının sahip olduğu doğal fon seviye radyasyonunu belirlemek amacıyla yapılmış literatürdeki ilk çalışmadır.

Bu tezi oluşturan konunun çalışılması sonucunda bir çok sonuca ulaşılmıştır.

- Yozgat il merkezi, ilçe ve köylerini kapsayan bölgenin toprağının radyolojik yapısı hakkında bir veri tabanı oluşturulmuştur. Böylelikle bölgede ileride oluşabilecek herhangi bir radyolojik kirlenme sonucunda kirlilik miktarının belirlenmesi hakkında kıyaslama yapılması mümkün hale gelmiştir.
- Bu bölgede yaşayan insanların yüzey toprağının radyolojik yapısı nedeniyle maruz kaldıkları radyasyon dozları ile ilgili bir veri tabanı oluşturulmuştur.
- Alınan radyasyon dozları ile ilgili ulusal ve uluslar arası sınırlamalar tartışılmıştır.

Yozgat İl merkezi, ilçe, kasaba ve köylerini kapsayan bölgede genellikle halkın yoğun olarak yaşadığı yerlerdeki 24 farklı örnekleme noktasından yüzeyden 0 ile 30 cm derinlikten toprak örnekleri toplanmıştır. Yapılan gama spektrometrik analiz sonucunda elde edilen sonuçlar tablo 4.1.'de gösterilmiştir. Her bir toprak örneği için bulunan sonuçlar ^{216}Ra için şekil 4.1'de, ^{232}Th için şekil 4.2'de, ^{40}K için şekil 4.3'de ve ^{137}Cs için şekil 4.4'de grafik halinde gösterilmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucunda ortalama aktivite değerleri ^{226}Ra için 25,12 Bq/kg, ^{232}Th için 31,9 Bq/kg, ^{40}K için 530,03 Bq/kg ve ^{137}Cs için 4,68 Bq/kg olarak hesaplanmıştır. ^{226}Ra için en yüksek değer 55,3 Bq/kg olarak Şefaati'de en düşük olarak ise 12 Bq/kg olarak Çiğdemli'de ölçülmüştür. ^{232}Th için en yüksek değer 98,3 Bq/kg olarak Şefaati en düşük değer ise 13 Bq/kg olarak Yozgat il merkezinde ölçülmüştür. ^{40}K için en yüksek değer Şefaati'de 1187 Bq/kg olarak Şefaati'de ölçülürken en düşük değer 228 Bq/kg olarak Yoğunhisar'da

ölçülmüştür.¹³⁷Cs için en yüksek değer 12,4 Bq/kg olarak Sırçalı'da ölçülürken en düşük değer 0,6 Bq/kg olarak Yerköy'de ölçülmüştür.

Görüldüğü üzere ²²⁶Ra, ²³²Th ve ⁴⁰K için en yüksek değerler Şefaati ölçüm noktasında ölçülmüştür.

Tablo 5.1. Türkiye'deki diğer iller için Ra²²⁶, Th²³² ve K⁴⁰ aktivite konsantrasyon değerleri (Bq/kg)

	Ra-226 (Bq/kg)	Th-232 (Bq/kg)	K-40 (Bq/kg)	Referanslar
Giresun	33	43	733	[6]
Kayseri	36	37	430	[7]
Kahramanmaraş	34	40	409	[8]
Erzincan	8	11	282	[9]
Ordu	35	27	378	[10]
Adana	22	23	306	[11]
Yozgat	25,12	32,88	530	Bu çalışma

Toprak örneklerindeki radyum eşdeğer aktivite indisi(Ra_{eq}) değerleri şekil 4.5'de grafik olarak verilmiştir. En yüksek değer 287,3 Bq/kg olarak Şefaati'de en düşük değer ise 54,6 Bq/kg olarak Yozgat il merkezinde hesaplanmıştır. Ortalama radyum eşdeğer aktivite indisi (Ra_{eq}) 11,5 Bq/kg olarak hesaplanmıştır. Bu değerler NEA-OECD tarafından tavsiye edilen 370 Bq/kg değerinden daha düşüktür.

Dış ve iç ışınlama indisleri şekil 4.6'da gösterilmiştir. Ortalama dış ışınlama indisi 0,3 ve iç ışınlama indisi 0,4 olarak hesaplanmıştır. Her iki indiste de en yüksek değerler Şefaati için hesaplanmıştır. UNSCEAR 2000 raporuna göre dış ve iç ışınlama indisleri için tavsiye edilen değerler 1'in altında olmalıdır. Yozgat ili ve çevresini kapsayan bölgedeki toprak örneklerinin tümü için hesaplanan değerler tavsiye edilen değeri aşmamaktadır.

Temsili gama seviye indisleri şekil 4.7'de gösterilmiştir. Ortalama temsili gama seviye indisi 0,8 olarak hesaplanmıştır. Tavsiye edilen temsili gama seviye indisi 1'in altında olmalıdır. Toplanan toprak örneklerinden Şefaati dışındakilerin tamamında tavsiye edilen 1 değeri aşılmamaktadır.

Havada soğurulmuş gama doz oranları şekil 4.8’de gösterilmiştir. En yüksek değer 134,78 nGy/h olarak Şefaati’de hesaplanırken en düşük değer 26,15nGy/h olarak Yozgat için hesaplanmıştır. Ortalama havada soğurulan doz oranları 53,12 nGy/h olarak hesaplanmıştır. UNSCEAR 2000 raporunda tavsiye edilen değer 84 nGy/h’dir. Şefaati dışındaki ölçüm noktalarında tavsiye edilen bu değer aşılmamıştır.

Yozgat İli ve çevresi için hesaplanan yıllık etkin doz eşdeğerleri şekil 4.9’da gösterilmiştir. Bu değerler en yüksek 165,3 μ Sv/y olarak Şefaati için hesaplanırken en düşük 32,1 μ Sv/y olarak Yozgat il merkezi için hesaplanmıştır. Yozgat bölgesinde yaşayan popülasyon bölgedeki yüzey toprağı nedeniyle yaklaşık olarak ortalamayıda 65,1 μ Sv lik bir doz almaktadırlar. Karasal radyonüklitler nedeniyle alınan yıllık etkin doz eşdeğeri ortalama 460 μ Sv/y dır (UNSCEAR 1993). Yozgat ili için toprak yapısından kaynaklı alınan yıllık etkin doz eşdeğeri Dünya ortalamasını aşmamaktadır.

Tablo 5.2. Radium eşdeğer aktivite indisi, havada soğurulan gama doz oranı, temsili gama seviye indisi, iç ve dış ışınlama indisleri için tavsiye edilen değerler

Radyasyon İndisleri	Tavsiye Edilen Değerler	Referanslar
Radium Eşdeğer Aktivite İndisi (R_{aeq})	370 Bq/kg	NEA-OECD (1979)
Havada Soğurulan Gama Doz Oranı (D_R)	84 nGy/h	UNSCEAR (2000)
Temsili Gama Seviye İndisi ($I_{\gamma r}$)	<1	
Dış Işınlama İndeksi (H_{ex})	<1	UNSCEAR (2000)
İç Işınlama İndeksi (H_{in})	<1	UNSCEAR (2000)

KAYNAKLAR

- [1] W.R. Leo “Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments”, Springer, Berlin, ISBN 0-387-17386-2, 1987.
- [2] Syed Naeem Ahmed, “Physics & Engineering of Radiation Detection”, Elsevier, Great Britain, ISBN-13:978-0-12-045581-2, 2007.
- [3] UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation),2000. Sources and effects of ionizing radiation. United Nations Scientific Committeeon the Effects of Atomic Radiation, United Nations Publication, New York, USA.
- [4] Tufail M., Ahmet M., Shaib S., Safdar A., Mirza N.M., Ahmet N., Zafar M.S., Zafar F.I., 1992. Investigation of gamma-ray activity and radiological hazards of the bricks fabricated around Lahor, Pakistan. Pak. J.Sci.Ind.Res.34,216-220.
- [5] Kurnaz, A., Gezelge, M., Hançerlioğulları, A., Çetiner, M.A., Turhan,Ş., 2016. Radionuclides content in grape molasses soil samples from central Black sea region of Turkey. Human. Ecol. Risk Asses. 22–6, 1375–1385.
- [6] Cevik, U., Damla, N., Koz, B., Kaya, S., 2008. Radiological characterization around the Afşin-Elbistan coal-fired power plant in Turkey. Energy Fuels 22, 428–432.
- [7] Otansev, P., Karahan, G., Kam, E., Barut,İ., Taskin, H., 2012. Assessment of naturalradioactivity concentrations and gamma dose rate levels in Kayseri, Turkey. Radiat.Prot. Dosim. 148–2, 227–256.
- [8] Çayır, A., Belivermiş, M., Kılıç, Ö., Coşkun, M., Coşkun, M., 2012. Heavy metal andradionuclide levels in soil around Afşin-Elbistan coal-fired thermal power-plant. Environ. Earth Sci. 67, 1183–1190

- [9] Yalcin, P., Taskin, H., Kam, E., Taskin, H., Terzi, M., Varinlioglu, A., Bozkurt, A., Bastug, A., Tasdelen, B., 2012. Investigation of radioactivity level in soil and drinking water samples collected from the city of Erzincan, Turkey. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 292,999–1006.
- [10] Celik, N., Damla, N., Cevik, U., 2010. Gamma ray concentrations in soil and building materials in Ordu, Turkey. *Radiat. Eff. Defects Solids* 165–1, 1–10.
- [11] Degerlier M., Karahan G., Ozger G., 2008. Radioactivity concentrations and dose assessment for soil samples around Adana, Turkey. *Journal of Environmental Radioactivity*, 99, 1018-1025.

ÖZGEÇMİŞ

Nilgün Cansu YILMAZ 1990 yılında Mersin’de doğdu. İlk ve orta öğrenimini Mersin’de tamamladı. 2008 yılında kazandığı Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümünden 2012 yılında mezun oldu. Daha sonra Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Ana Bilim Dalında Yüksek Lisansa başladı. Evli olup 2019 yılında kamu kurumuna memur olarak ataması gerçekleşmiş ve Erzurum ilinde görev yapmaktadır.

