

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

FİZİK ANABİLİM DALI

**TÜRKİYE'DE SATILAN BAZI TÜTÜN ÜRÜNLERİNDE RADYOAKTİVİTE
SEVİYELERİNİN BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İlkay YILMAZ

ŞUBAT 2019

TRABZON



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

FİZİK ANABİLİM DALI

**TÜRKİYE'DE SATILAN BAZI TÜTÜN ÜRÜNLERİNDE RADYOAKTİVİTE
SEVİYELERİNİN BELİRLENMESİ**

İlkay YILMAZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde

"YÜKSEK LİSANS (FİZİK)"

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 02 / 01 / 2019

Tezin Savunma Tarihi : 01 / 02 / 2019

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Uğur ÇEVİK

Trabzon 2019

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Fizik Anabilim Dalında
İlkay YILMAZ Tarafından Hazırlanan**

**TÜRKİYE 'DE SATILAN BAZI TÜTÜN ÜRÜNLERİNDE RADYOAKTİVİTE
SEVİYELERİNİN BELİRLENMESİ**


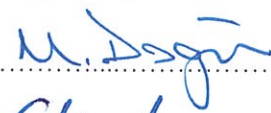

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 15 / 01 / 2019 gün ve 1787 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Uğur ÇEVİK

Üye : Prof. Dr. Mahmut DOĞRU

Üye : Prof. Dr. Gökhan APAYDIN


.....

.....

.....

**Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ
Enstitü Müdürü**

ÖNSÖZ

Türkiye’de satılan bazı tütün ürünlerinde radyoaktivite seviyelerinin belirlenmesi için yapılan bu çalışma, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır.

Tez konusundaki çalışmamın her aşamasında beni yönlendiren ve hiç bir zaman yardımını esirgemeyen saygıdeğer danışman hocam Prof. Dr. Uğur ÇEVİK’e teşekkürlerimi sunuyorum.

Ayrıca, tez çalışmamda yapmış olduğu katkı ve yardımlar için değerli hocam, Dr. Öğr. Üyesi Ahmet ÇELİK ve Araştırma görevlisi Ali KİRİŞ’e ve Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesinden Dr. Arş. Gör. Murat ŞİRİN’e çok teşekkür ederim.

İlkay YILMAZ
Trabzon 2019

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum "Türkiye’de Satılan Bazı Tütün Ürünlerinde Radyoaktivite Seviyelerinin Belirlenmesi" başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Uğur ÇEVİK’ in sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim, 01.02.2019.

İlkay YILMAZ

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLOLAR DİZİNİ.....	X
KISALTMALAR VE SEMBOLLER DİZİNİ	XI
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Tütün Nedir?	3
1.2.1. Tütünün Tarihçesi	4
1.2.2. Tütünün Kullanıldığı Yerler.....	4
1.3. Radyasyon ve Elektromanyetik Spektrum	5
1.4. Radyoaktivite	8
1.4.1. Doğal Radyoaktivite.	9
1.4.2. Yapay Radyoaktivite.....	12
1.5. Radyoaktif Bozunum Mekanizmaları	12
1.5.1. Alfa Bozunumu	13
1.5.2. Beta Bozunumu.....	13
1.5.2.1. Elektron (β^-) Bozunumu.....	14
1.5.2.2. Pozitron (β^+) Bozunumu	15
1.5.2.3. Elektron Yakalama.....	15
1.5.3. İç Dönüşüm Olayı	16
1.5.4. Gama Bozunumu.....	17
1.6. Bozunum Dinamikleri.....	17
1.6.1. Yarı ve Ortalama Ömür.....	18
1.6.2. Enerji ve Birimler.....	19
1.7. Gama Spektroskopisi	20

1.7.1.	Yarıiletken Detektörler	21
1.7.2.	Gama Işınlarının Enerji Depolama Mekanizmaları	22
1.7.2.1.	Fotoelektrik Olay	22
1.7.2.2.	Compton Saçılması	24
1.7.2.3.	Çift Oluşum Olayı	25
1.7.3.	Yük Toplama ve Puls İşleme	26
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR	29
2.1.	Radyoaktivite Ölçümleri	29
2.1.1.	Örneklerin Toplanması ve Ölçüme Hazırlanması	29
2.1.2.	Deney Sistemi	30
2.1.3.	Enerji ve Verim Kalibrasyonu	30
2.1.4.	Spektrum Analizi	33
2.1.5.	Hesaplamalar	35
2.1.5.1.	Aktivite (A)	35
2.1.5.2.	Radyum Eşdeğer Aktivitesi (R_{eq})	36
2.1.5.3.	Absorbe Edilen Doz (D)	36
2.1.5.4.	Yıllık Etkin Doz (AED)	36
2.1.5.5.	Tahmini Kanser Riski (ELRC)	37
2.2.	Ağır Metal Analizi	37
3.	BULGULAR	39
3.1.	Radyoaktivite Sonuçları	39
3.2.	Ağır Metal Analiz Sonuçları	42
4.	TARTIŞMA VE SONUÇLAR	43
5.	ÖNERİLER	47
6.	KAYNAKLAR	48
	ÖZGEÇMİŞ	

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

TÜRKİYE’DE SATILAN BAZI TÜTÜN ÜRÜNLERİNDE RADYOAKTİVİTE
SEVİYELERİNİN BELİRLENMESİ

İlkay YILMAZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Uğur ÇEVİK
2019, 50 Sayfa

Bu çalışmanın amacı tütün ürünlerindeki radyoizotopların tayini ile sigara içilmesi sonucunda içicinin fazladan almış olduğu radyasyonu tespit etmektir. Bu amaçla; Trabzon’da 100 kişi ile anket yapılmış ve Türkiye’deki marketlerde satılan ve ankete katılan 100 kişi tarafından en çok içilen 9 sigara markası tespit edilmiştir. Buna ek olarak iki ayrı tütün örneği de bu çalışmaya dâhil edilmiştir. Bu çalışmada 2 tütün, 9 sigara tütünü ve bu 9 sigara tütünün içinden 2 tanesi seçilerek bunların izmariti ve külü ayrı ayrı incelenmiştir. Alınan bu örneklerin doğal (^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K) radyonüklid aktivite konsantrasyonları HPGe gama spektrometresi kullanılarak belirlenmiştir. Sigara ve tütün örnekleri için ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K ’ın ortalama aktivite konsantrasyonları sırasıyla; 14,57, 22,22 ve 223,85 Bq.kg⁻¹ olarak bulunmuştur. İki sigara tütününün izmariti için ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K ’ın ortalama aktivite konsantrasyonları sırasıyla 15,76, 13,05 ve 136,15 Bqkg⁻¹ ve külleri için de sırasıyla; 16,61, 21,75 ve 338,55 Bq.kg⁻¹ olarak bulunmuştur. Numunelerin elemental analizi EDXRF cihazı ile belirlenmiştir. EDXRF ile yapılan analizlerde Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Fe, Ti, Cr, Mn, Cu, Zn, As, Br, Rb, Sr, Zr, Sb, I, Ba, Hf ve Pb elementleri belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sigara, Tütün, Radyoaktivite, HPGe Gama Detektörü, EDXRF.

Master Thesis

SUMMARY

DETERMINATION OF RADIOACTIVITY LEVELS IN CERTAIN TOBACCO
PRODUCTS SOLD IN TURKEY

İlkay YILMAZ

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Physics Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Uğur ÇEVİK
2019, 50 Pages

The aim of this study was to determine the radioisotopes in tobacco products and to detect the radiation that the drinker received as a result of smoking. For this purpose; 100 people were interviewed in Trabzon in Turkey and sold in markets and surveyed 100 people by most smoking cigarette brands have been identified 9. In addition, two separate tobacco samples were included in this study. In this study, 2 tobacco, 9 cigarette tobacco and 2 of these 9 cigarette tobacco were selected and their butts and ash were examined separately. Natural (^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K) radionuclide activity concentrations of these samples were determined using HPGe gamma spectrometry. The average activity concentrations of ^{238}U , ^{232}Th and ^{40}K were found to be 14,57, 22,22 and 223,85 Bq.kg⁻¹, respectively. The average activity concentrations of ^{238}U , ^{232}Th and ^{40}K for two cigarette tobacco butts were 15,76, 13,05 and 136,15 Bq.kg⁻¹ and 16,61, 21,75 ve 338,55 Bq.kg⁻¹ for their ashes, respectively. The elemental analysis of the samples was determined by EDXRF. In the analysis with EDXRF, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Fe, Ti, Cr, Mn, Cu, Zn, As, Br, Rb, Sr, Zr, Sb, I, Ba, Hf and Pb elements were determined.

Key Words: Cigarette, Tobacco, Radioactivity, HPGe Gamma Detector, EDXRF.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1.	a) Sürekli x ışınlarının oluşumu, b) Karakteristik x ışınlarının oluşumu	7
Şekil 1.2.	Kararlılık eğrisi	9
Şekil 1.3.	^{238}U bozunma serisi	10
Şekil 1.4.	^{232}Th bozunma serisi	10
Şekil 1.5.	^{235}U bozunma serisi	11
Şekil 1.6.	^{237}Np bozunma serisi	11
Şekil 1.7.	^{36}Cl çekirdeğinin bozunum şeması ve oluşan beta parçacığı enerji dağılımı ..	15
Şekil 1.8.	$^{22}_{11}\text{Na}$ çekirdeğinin $^{22}_{10}\text{Ne}$ çekirdeğine bozunumu.....	16
Şekil 1.9.	$^{57}_{27}\text{Co}$ çekirdeğinin $^{57}_{26}\text{Fe}$ çekirdeğine bozunumu	17
Şekil 1.10.	Yarıiletken detektörün şeması	22
Şekil 1.11.	Compton saçılmasının şematik gösterimi	24
Şekil 1.12.	Çift oluşum olayının şematik gösterimi.....	25
Şekil 1.13.	Gama spektroskopisindeki elektronik bileşenlerin blok diyagramı.....	26
Şekil 1.14.	Önyükseltici ve yükseltici çıkışlarında pulsların şekillenimi	27
Şekil 2.1.	a) Tütün örneği, b) İzmarit örneği, c) Kül örneği	29
Şekil 2.2.	ORTEC marka GEM-SP7025P4-B model HPGe gama detektörü.....	30
Şekil 2.3.	a) HPGe detektörünün verim kalibrasyonu eğrisi (kaynak detektör mesafesi 5 cm iken), b) Detektör kaynak mesafesi ile koincidans-summing olasılığının değişimi.....	32
Şekil 2.4.	HPGe gama detektörüne ait enerji kalibrasyon eğrisi	33
Şekil 2.5.	HPGe gama detektörüne ait verim kalibrasyon eğrisi	33
Şekil 2.6.	S6 kodlu sigara örneğine ait gama spektrumu	34
Şekil 2.7.	Epsilon5, PANalytical EDXRF cihazı.....	38
Şekil 3.1.	Örneklerin ^{238}U aktivite konsantrasyonlarının dağılımı	40
Şekil 3.2.	Örneklerin ^{232}Th aktivite konsantrasyonlarının dağılımı.....	40
Şekil 3.3.	Örneklerin ^{40}K aktivite konsantrasyonlarının dağılımı.....	41

TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Elektromanyetik spektrum	6
Tablo 1.2. Bozunma serilerinde olmayan bazı doğal radyoaktif çekirdekler.....	12
Tablo 1.3. Radyasyon birimleri ve dönüşümler	20
Tablo 2.1. Standart kaynaklar ve özellikleri.....	32
Tablo 2.2. Aktivitesi hesaplanan radyoaktif çekirdekler.....	35
Tablo 3.1. Radyoaktivite konsantrasyonları (Bq/kg)	39
Tablo 3.2. Doz değerleri ve kansere yakalanma risk oranları	41
Tablo 3.3. Sigara ve tütün örneklerinin ağır metal analiz sonuçları.....	42

KISALTMALAR VE SEMBOLLER DİZİNİ

A	: Kütle numarası
c	: Işık hızı
e	: Temel elektrik yükü
E	: Foton (ışık) enerjisi
E_b	: Elektronun bağlanma enerjisi
E_{fe}	: Foto elektronun kinetik enerjisi
h	: Planck sabiti
m_e	: Elektronun kütlesi
N	: Radyoaktif çekirdek sayısı
N_A	: Avagadro sayısı
Q	: Radyoaktif bozunma sonucu açığa çıkan enerji
$T_{1/2}$: Yarı ömür
Z	: Atom numarası
λ_f	: Dalga boyu
λ	: Radyoaktif bozunma sabiti
ν	: Frekans
σ	: Compton tesir kesiti
τ	: Ortalama ömür
τ_p	: Fotoelektrik tesir kesiti
κ	: Çift oluşum tesir kesiti

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Tüm canlılar evrenden dünyaya ulaşan kozmik ışınlar ve yerkürede var olan doğal radyoaktif maddelerin yayınladığı radyasyonla milyonlarca yıldır ışınlanmaktadır. İnsan vücudu, bitkisel ve hayvansal gıdalarda, havada ve suda bulunan doğal radyoaktif elementler yoluyla iç ve dış radyasyona maruz kalmaktadır (TAEK, 2018).

İnsanoğlu yıllık ortalama 2,8 mSv'lik radyasyon dozuna maruz kalmaktadır. Bu durum, yaşanan ortamın fiziksel özelliklerine ve kişilerin yeme içme alışkanlıklarına göre değişiklik göstermekle beraber alınan radyasyon dozunun yaklaşık %15'i yapay radyasyon kaynaklarından, %85'i de doğal radyasyon kaynaklarındandır (UNSCEAR, 2000).

Radyasyon düzeylerini etkileyen en önemli faktör, yer kabuğunun kimyasal ve jeolojik yapısındaki değişikliğe bağlı olarak, radyoaktif çekirdeklerin miktarlarının farklılık göstermesidir. Örneğin; tortul kayaların sahip olduğu radyoaktivite konsantrasyonu volkanik kayaların sahip olduğu radyoaktivite konsantrasyonuna oranla daha düşüktür. Buna ek olarak kozmik ışınların şiddeti de deniz seviyesinden yukarılara doğru çıktığında ve ekvatoran güney veya kuzey kutuplarına doğru gidildiğinde artış göstermektedir. Topraktaki doğal radyoaktivite konsantrasyonu ortalama olarak 500 Bq/kg düzeyindedir. Bu konsantrasyona en önemli katkıları ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K radyoizotopları yapmaktadır.

Tütün ve tütün dumanı 8000'in üzerinde farklı madde ihtiva eden %5'i parçacık ve %95'i gaz olan karmaşık bir yapıya sahiptir. Tütün bitkisi kökleri vasıtasıyla yetiştiği toprakta bulunan radyoaktif maddeleri emip yapraklarına depolayarak toprağı radyasyondan arındırır (Evcı, 2001). Depolanan radyasyon da sigara içen ve pasif içici olan insanların vücutlarına solunum yoluyla transfer olur (IARC, 2004). Tütünün sahip olduğu radyoizotoplar, uranyum dizisinden yarılanma süresi 22,3 yıl olan ^{210}Pb 'dan türeyen ^{210}Bi ve ^{210}Bi 'den türeyen yarılanma süresi 138,4 gün olan ^{210}Po 'dur. Ayrıca tarım arazilerinde kullanılan kimyasal gübrelerden toprağı ve topraktan da tütüne ^{238}U ve ^{226}Ra geçişi olmaktadır. Tütünün tüylü yaprakları da havada bulunan kurşun ve polonyum taneciklerini tutup yaprak içindeki kurşun ve polonyum miktarını artırır (Atakan, 2006).

Bu amaçla literatürde yapılmış çok sayıda çalışma mevcuttur. Yapılan çalışmalarda ^{210}Pb ve ^{210}Po konsantrasyonlarının yüksek olduğu görülmüştür. Bir sigaranın içimi esnasında yaklaşık olarak ^{210}Po 'un %22'si, ^{228}Th 'in %0,6'sı, ^{230}Th 'un %24'ü ve ^{232}Th 'nin %31'i sigara içen kişinin vücuduna transfer olduğu ve vücutta tutulduğu tespit edilmiştir. Sigara içenler için tahmini yıllık efektif doz ^{210}Po 'dan 61 $\mu\text{Sv/yıl}$; ^{210}Pb 'dan 9 $\mu\text{Sv/yıl}$; ^{228}Th 'den 6 $\mu\text{Sv/yıl}$; ^{230}Th 'dan 47 $\mu\text{Sv/yıl}$ ve ^{232}Th 'den 37 $\mu\text{Sv/yıl}$ 'dır. Bu sonuçlar, toryum izotoplarının yıllık efektif doza katkıda bulunma konusundaki önemini göstermektedir (Kubalek vd., 2016).

Papastefanou, yaptığı bir çalışmada Yunanistan'daki tütünlerde ^{226}Ra radyoaktivite konsantrasyonunu 3,83 Bq/kg olarak, ^{210}Pb radyoaktivite konsantrasyonunu 14,12 Bq/kg olarak ve ^{40}K radyoaktivite konsantrasyonunu da 822,76 Bq/kg olarak bulmuştur (Papastefanou, 2001). Papastefanou 2009'da yaptığı başka bir çalışmada farklı 15 tütündeki ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Pb miktarları ölçmüş, yıllık etkin radyasyon dozlarını hesaplayarak ortalama radyasyon dozunu 0,25 mSv/yıl olarak belirlemiştir (Papastefanou, 2009).

Katsanevakis ve arkadaşları yine Yunanistan'daki tütünlerde ^{226}Ra radyoaktivite konsantrasyonunu 8,4 Bq/kg olarak, ^{232}Th radyoaktivite konsantrasyonunu 11,4 Bq/kg olarak ve ^{40}K radyoaktivite konsantrasyonunu da 1073 Bq/kg olarak belirlemiştir (Katsanevakis vd.,1996).

Mandic ve arkadaşları Sırbistan'da yaptıkları bir çalışmada ^{226}Ra radyoaktivite konsantrasyonunu 9,4 Bq/kg olarak, ^{210}Pb radyoaktivite konsantrasyonunu 32,2 Bq/kg olarak ve ^{40}K radyoaktivite konsantrasyonunu da 1160 Bq/kg olarak belirlemiştir (Mandic vd., 2016).

Abd El Aziz ve arkadaşları Mısır ve Suudi Arabistan'da yapmış oldukları bir çalışmada ^{226}Ra radyoaktivite konsantrasyonunu 6,98 Bq/kg olarak, ^{210}Pb radyoaktivite konsantrasyonunu 15,62 Bq/kg olarak ve ^{40}K radyoaktivite konsantrasyonunu da 685,4 Bq/kg olarak belirlemiştir (Abd El-Aziz vd., 2005).

Türkiye'de Yusuf Ağuş 'un 14 farklı sigara tütününü kullanarak yaptığı çalışmada, ortalama radyoaktivite konsantrasyonu değerlerini ^{226}Ra için 11,9 Bq/kg, ^{232}Th için 11,7 Bq/kg, ^{210}Pb için 24,9 Bq/kg ve ^{40}K için de 1197,48 Bq/kg olarak belirlemiştir (Ağuş, 2016)

Brezilya'da yapılan bir çalışmada, ^{210}Pb radyoaktivite konsantrasyonu değeri 21,3 Bq/kg olarak bulunmuştur (Peres, 2002).

Macaristan'da yapılan bir araştırmaya göre, günde 1 paket sigara içen bir kişinin vücudunda oluşabilecek yıllık etkin dozun ^{210}Pb için 0,06 mSv, ^{210}Po için de 0,18 mSv kadar olabileceği saptanmıştır (Karalı ve Yener, 1996).

Japonya'da yapılan bir çalışmaya göre, tütün örneklerindeki ^{210}Po radyoaktivite konsantrasyon değeri ortalama olarak 15 Bq/kg olarak belirlenmiştir. Bu değerin yaklaşık %50'sinin tütün dumanına aktarıldığı geri kalanının külde ve filtrede kaldığı belirlenmiştir. Günde bir paket sigara tüketen kişinin akciğerlerine ulaşan radyoaktivite konsantrasyonu, bir günde 24 mBq ve bir yılda 8,8 Bq olarak belirlenmiştir. Bu değerler kullanılarak yapılan hesaplamalar göre akciğer kanserinden dolayı ölüm risk oranı milyonda 18 dir (Takizawa vd., 1994).

Brezilya'da yapılan bir çalışmaya göre tütün örneklerindeki ^{210}Po ve ^{210}Pb radyoaktivite konsantrasyonları ortalama olarak 20 Bq/kg kadar bulunmuş ve alınan yıllık etkin dozunda yaklaşık 0,16 mSv kadar olacağı belirtilmiştir (Peres, 2002).

Arjantin'de yapılan bir çalışmada tütün numunelerinde ^{210}Po radyoaktivite konsantrasyon değerinin 10 ile 80 Bq/kg arasında değiştiği bulunmuş ve bunun sonucunda yıllık alınan akciğer dozunun 0,075 ile 0,6 mSv arasında olabileceği hesaplanmıştır (Colangelo vd.,1992).

Mısır'da yapılan bir çalışmaya göre 20 adet sigara içen kişinin ortalama olarak ^{210}Po ve ^{210}Pb 'nin her birinden 123 Bq'lık radyoaktivite değerinin akciğerlere ulaştığı ve bu değerlerden dolayı oluşabilecek yıllık radyasyon dozlarının sırasıyla 0,19 ve 0,25 mSv olabileceği belirtilmiştir (Khater, 2004).

^{210}Po ve ^{210}Pb 'un kanserojen etkisi nedeniyle Polonya'da yüksek miktarda sigara tüketimine bağlı olarak bu radyonüklidlerin alımı incelenmiş ve günde 20 adet sigara içen bir kişinin 20-215 mBq ^{210}Po ve ^{210}Pb aldıkları belirtilmiştir. Sigara içimi yoluyla alınan ^{210}Po 'un, atmosferde bulunan ^{210}Po 'a göre akciğerlere verdiği zarar yaklaşık 30 kat daha yüksektir (Skwarzec vd., 2001).

Bu çalışmada Türkiye'deki marketlerde satılan dokuz farklı sigara ve iki tütün örneği için doğal radyonüklid aktivite konsantrasyonları araştırıldı.

1.2. Tütün Nedir

Tütün, patlıcangiller familyasına ait Nicotiana Rustica cinsinden olan otsu bitkidir. Boyları 0,75 ile 1,5 m civarında olan pembe çiçekleri Haziran ve Ağustos aylarında açan

dik gövdeli bir bitkidir. Yaprakları acı, kokulu, yapışkan ve tüylüdür. Sigara için yaprakları kullanılır (URL-1, 2018).

Tütün bitkisi, diğer bitkilerde olduğu gibi pek çok eser element içerir. Bunlardan bazıları Al, As, Ba, V, Zn, Th, Si, Sr, Se, Sb, Sc, Rb, Na, Ni, Ce, Br, Co, Cl, Cs, Cr, Eu, Mg, K, Hf, Pb, I, Cu, Ca, Mn, Fe, Ti 'dur. Zn, Cu, I, Br, Ca, Fe gibi bazı elementler insan vücudu için faydalı iken; K, Pb, Hg, Th, U, As, Cd ve Po gibi elementler ise radyoaktif ve kanserojendir (URL-2, 2018).

1.2.1. Tütünün Tarihçesi

Kızılderililerin dini gerekçelerle ayinlerde kullandıkları tütünün popülaritesi, Avrupalıların Amerika kıtasına gelip tütünü Avrupa ülkelerine götürmesiyle artmıştır. Tütün, 1605 yılında Venedikli tacirlerin Anadolu topraklarına getirmesiyle yayılmış ve keyif verici olarak tüketilmiştir.

Tütün bitkisi, kurutulmuş yaprakların yakılması ile ortaya çıkan dumanın içe çekilmesi, tozlarının enfiye halinde buruna çekilmesi veya özel işlem görmüş yapraklarının çiğnenmesi suretiyle kullanılır. Dumanı teneffüs eden yerliler zamanla bu bitkinin keyif verici etkisini fark etmişler ve bambudan yapılmış Y şeklinde bir borunun çatal kısmını burunlarına sokarak veya ağızdan üfleyerek dumanı içe çekmeye başlamışlardır. Böylece piponun en eski şekli ortaya çıkmıştır (URL-1, 2018).

1.2.2. Tütünün Kullanıldığı Yerler

Tütün yapraklarında alkaloitler, nişasta, zambak, reçine ve tanen mevcuttur. Nikotin alkaloidi tütün yapraklarında en fazla olanıdır. Tütün yaprağı kullanılarak hazırlanmış infüzyonlar vücuttaki parazitlere karşı sürülebilir. Nikotinin sülfat tuzları zararlı böcekleri öldürmekte kullanılır. Tütünün yaprakları da sigara üretiminde kullanılır. Ayrıca tütünün yaprakları fermente edilip kokulandırılarak toz haline getirilip keyif veren, aksırtan ve enfiye denen ürün elde edilir. Türkiye'de üretilen tütünün tohumu yağ oranı olarak zengindir. Tütünden elde edilen yağlar sabun ve boya sanayinde kullanılır (URL-1, 2018).

1.3. Radyasyon ve Elektromanyetik Spektrum

Radyasyon için “elektromanyetik dalgalar ve parçacıklar tarafından ortamda taşınan enerjidir” ifadesi kullanılabilir.

Elektromanyetik dalgalar, birbirine dik elektrik ve manyetik alanların aynı fazda titreşmesiyle oluşan ve skaler bir dalga denkleminde uyan, boşlukta ışık hızı ile yayılan enine dalgalardır.

Elektromanyetik spektrum Tablo 1.1’ de görüldüğü gibi, dalga boylarına göre elektromanyetik dalgaları sınıflandırır ve süreklidir. Örneğin, mikrodalgadan radyo dalgalarına geçerken dalgaların özellikleri birdenbire değişmez.

Radyo dalgaları, iletken tellerden geçen ivmeli yükler tarafından oluşturulur. Dalga boyları 1 mm’den uzun elektromanyetik dalgalardır. Radyo dalgaları dalga boylarına göre; kısa dalga, orta dalga ve uzun dalga gibi çeşitli bölgelere ayrılırlar. Frekansları çok düşük olduğu için etkileşime girdiği maddenin atomlarını uyaramaz, bu sebepten birçok maddenin içinden rahatlıkla geçebilir. Radyo dalgalarının enerjileri çok küçüktür. Canlılar üzerinde zararlı bir etkiye sahip değildir.

Mikrodalgalar, elektrik devrelerinde magnetron ve klystron gibi vakum tüpleri kullanılarak üretilirler. Dalga boyları 1 mm ile 1 m arasında değişir. Mikrodalgalar uzun mesafeli bilgi aktarımında kullanılabilen elektromanyetik dalgalardır.

Kızılötesi bölgesini oluşturan dalgalar, belli bir sıcaklığa sahip tüm cisimler tarafından üretilirler. Dalga boyları 1 mm ile 700 nm arasında değişir. Madde tarafından soğurulduğunda, enerjileri elektronların enerjilerini değiştirmek için çok küçük olduğundan maddedeki atomların titreşim ve öteleme hareketini artırır ve böylece maddede ısı artışı meydana getirir.

Tablo 1.1. Elektromanyetik spektrum

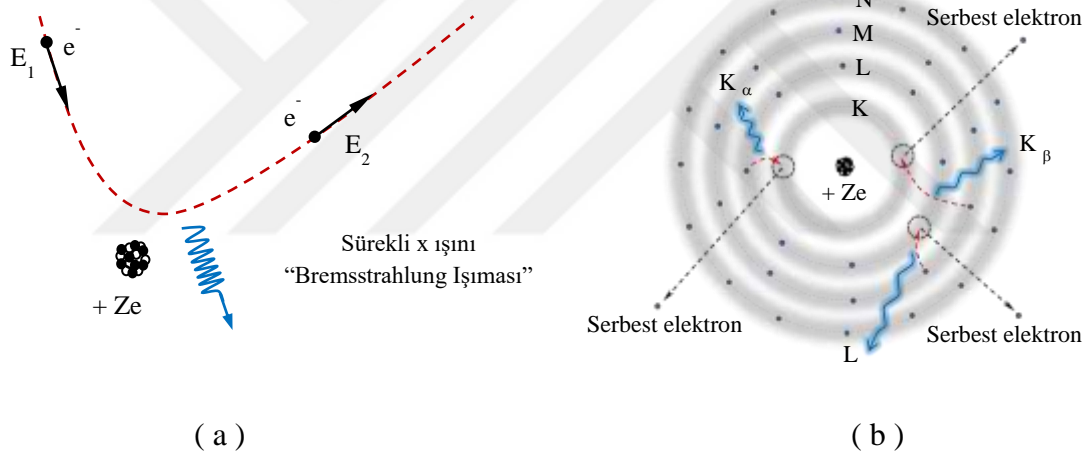
Oluşum mekanizması	Elektromanyetik Radyasyon	Dalgaboyu	Frekans
Elektrik akımının ossilasyonu	Uzun Radyo Dalgaları	km	10^0 s^{-1}
	AM Radyo Dalgaları	↑	↓
		m	10^5 s^{-1}
	FM Radyo Dalgaları	↑	↓
		cm	
		↑	
	TV Dalgaları	mm	10^{11} s^{-1}
Mikrodalgalar	↑		
Moleküllerin titreşimi	Kızılötesi Bölge	μm	↓
		↑	
Dış yörünge elektronlarının hareketi	Görünür Bölge	nm	10^{14} s^{-1}
İç yörünge elektronlarının geçişi ve titreşimi	UV – Işınlr	↑	↓
		Å	
Nükleer reaksiyonlar	X – Işınları	↑	10^{16} s^{-1}
			↓
	Gama Işınları	↑	10^{20} s^{-1}
Kozmik Işınlr	10^{-14} m		↓
			10^{22} s^{-1}
			↓

Görünür ışık dalgalarının kaynağı güneştir. Dalga boyları 400 ile 700 nm arasındaki elektromanyetik dalgalar görünür ışık dalgalarıdır. Görünür ışık fotonu bir maddeye çarpıp o maddeyi uyardığında maddenin molekül yapısına göre değişiklik gösteren başka bir ışık fotonu şeklinde yansıtılır.

Ultraviyole dalgaların kaynağı güneştir. Dalga boyları 400 nm ile 100 nm aralığındadır. Güneşten yayılan ultraviyole ışınlarının çoğu stratosferdeki atomlar tarafından yutulur ve oksijenle tepkimeye girmesi sonucunda oluşan ozon tabakası enerjiyi ısıya dönüştürür.

X ışınları yüksek enerjiye sahip olduklarından iyonlaştırıcı özelliği olan elektromanyetik dalgalardır. Oluşum şekillerine ve karakteristik özelliklerine bağlı olarak iki başlık altında toplanır.

Sürekli x ışınları, alfa parçacıkları, elektron, proton gibi yüksek enerjiye sahip parçacıkların ağır çekirdeklerin Coulomb alanından etkilenerek ivmeli hareket yapmaları sonucunda enerji kaybetmeleriyle oluşur. Şekil 1.1.a.)’ da görülen etkileşimdeki ışımaya sürekli x ışını ya da Bremsstrahlung ışınması olarak adlandırılır.



Şekil 1.1. a) Sürekli x ışınlarının oluşumu b) Karakteristik x ışınlarının oluşumu

Bir atomun orbital elektronlarının yeri herhangi bir uyarılmayla değişirse, atom bu uyarılma seviyesinde çok kısa bir süre için kalacaktır. Atomda doğal olarak kendini tekrar en düşük enerji seviyesine veya taban durumuna getirme eğilimi vardır ve nano saniye gibi çok kısa bir sürede atom elektronik konfigürasyonunu tekrar düzenler. Bunun sonucunda son enerji seviyesiyle ilk enerji seviyesi arasındaki fark kadar bir enerji, karakteristik x ışını olarak yayınlanır (Şekil 1.1.b). Eğer bu geçici boşluk atomun K tabakasında meydana getirilirse bunun sonucunda yayınlanan x ışını karakteristik Kx ışını adını alır. Yayınlanan karakteristik x ışınlarının enerjileri elektronik seviyeler arasındaki enerji farkı kadar olduğu için verilen herhangi bir elementten oluşan x ışınları o elementin karakterini belirtir.

Bundan dolayı madde element analizinde karakteristik x ışınları, bilinmeyen maddeyi tanımlamak için kullanılır.

Gama ışınları, radyoaktif olan çekirdeklerin (^{60}Co , ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{192}Ir gibi) bozunumu sürecinde çekirdekten yayınlanan elektromanyetik dalgalardır. Dalga boyu 10^{-11} ile 10^{-14} m arasındadır. Giricilikleri çok yüksek olduğundan pek çok maddenin içinden kolayca geçebilir.

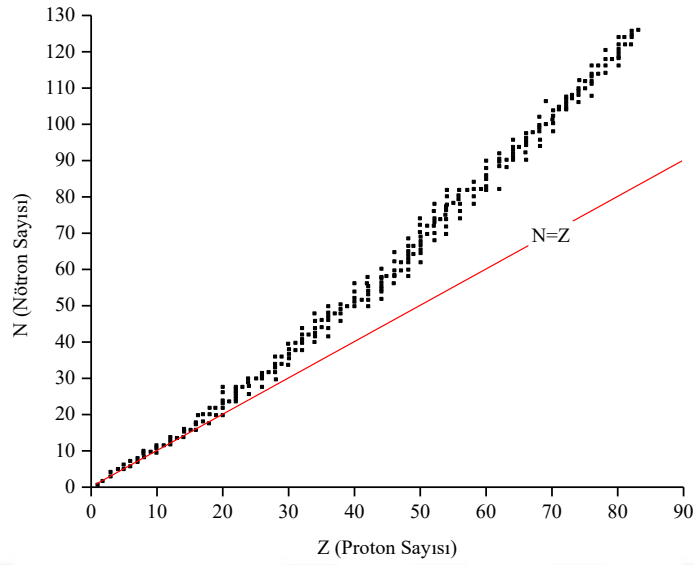
1.4. Radyoaktivite

Doğal ya da yapay nedenlerle kararsız olan çekirdeklerin elektromanyetik ışınım veya nötron, alfa ve beta gibi parçacıklar yayınlamak bozunması olayına radyoaktivite denir. Kararsız olan çekirdekler kararlı haline gelinceye kadar bu bozunma süreci devam eder.

Hidrojen dışındaki çekirdekler, nükleon adı verilen, temel yük birimine sahip proton ve net yüke sahip olmayan nötronlardan oluşur. Coulomb ve çekirdek etkileşmelerinin etkisi ile çekirdekte nükleonlar bir arada bulunurlar. Coulomb etkileşmesi hesaba katılmadığında kararlı bir çekirdekte proton ve nötronlar hemen hemen eşit sayıdadır. Coulomb kuvvetinin etkisi nükleer kuvvetlere göre çok küçük olduğundan, bu durum atom numarası 20'den daha küçük olan hafif çekirdeklere geçerlidir. Atom numarası büyüdükçe çekirdekteki nükleonların sayısı arttığından Coulomb etkileşmesi önemli hale gelir. Çekirdek içindeki kararsızlığı olumsuz yönde etkileyen itme kuvvetindeki artıştır. Nötron sayısı proton sayısından fazla ise çekirdekler kararsızdır. Kararsız olan çekirdekler kararlı duruma gelmek için ışınım yaparlar.

Şekil 1.2' de, literatürdeki çekirdeklerin nötron ve proton sayılarının dağılımını gösteren kararlılık eğrisi verilmektedir. Proton ve nötron sayıları eşit, atom numarası 20'ye kadar olan hafif çekirdekler dar bir dağılıma sahiptir. Bu bölge kararlılık bölgesi olarak tarif edilir. Atom numarası büyüdükçe çekirdekler kararlılık bölgesinden uzaklaşır ve nötron proton oranı 1,5 ve üzeri olan çekirdekler kararsız hale gelir (Krane, 2001).

Fransız fizikçi Henry Becquerel tarafından 1896 yılında uranyum tuzları ile yapılan deneyler esnasında keşfedilen radyoaktivite, oluşum biçimlerine göre doğal ve yapay radyoaktivite olarak sınıflandırılabilir.

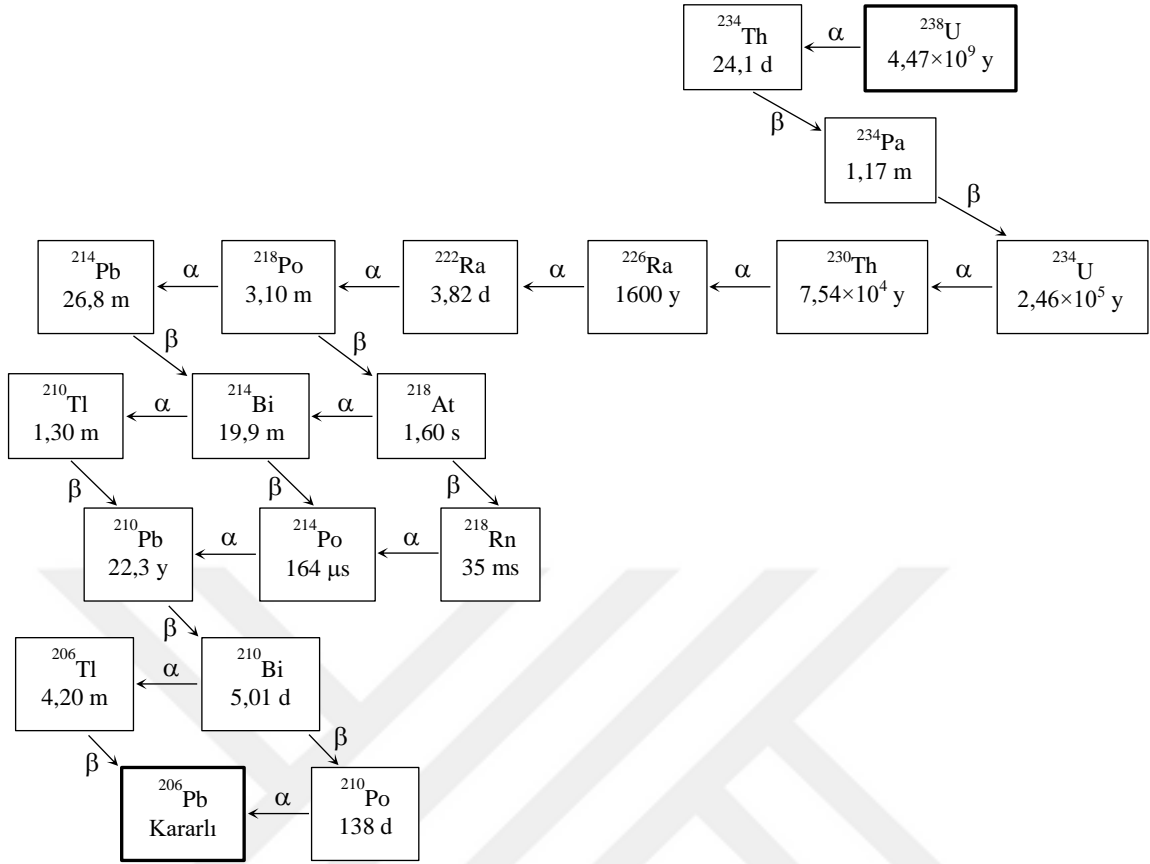


Şekil 1.2. Kararlılık eğrisi

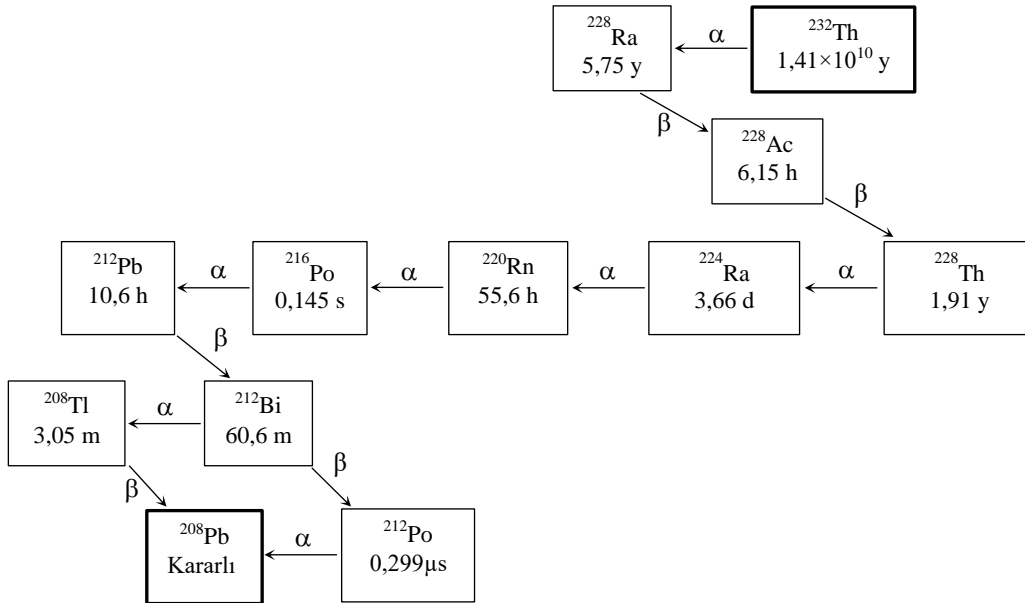
1.4.1. Doğal Radyoaktivite

Doğada bulunan her şey taban durumunda olmak ister. Buna doğada var olan kararsız çekirdekler de dâhildir. Bu çekirdekler hiçbir dış müdahale olmadan enerji yayımlayarak kararlı hale geçerler. Bu olaya doğal radyoaktivite denir.

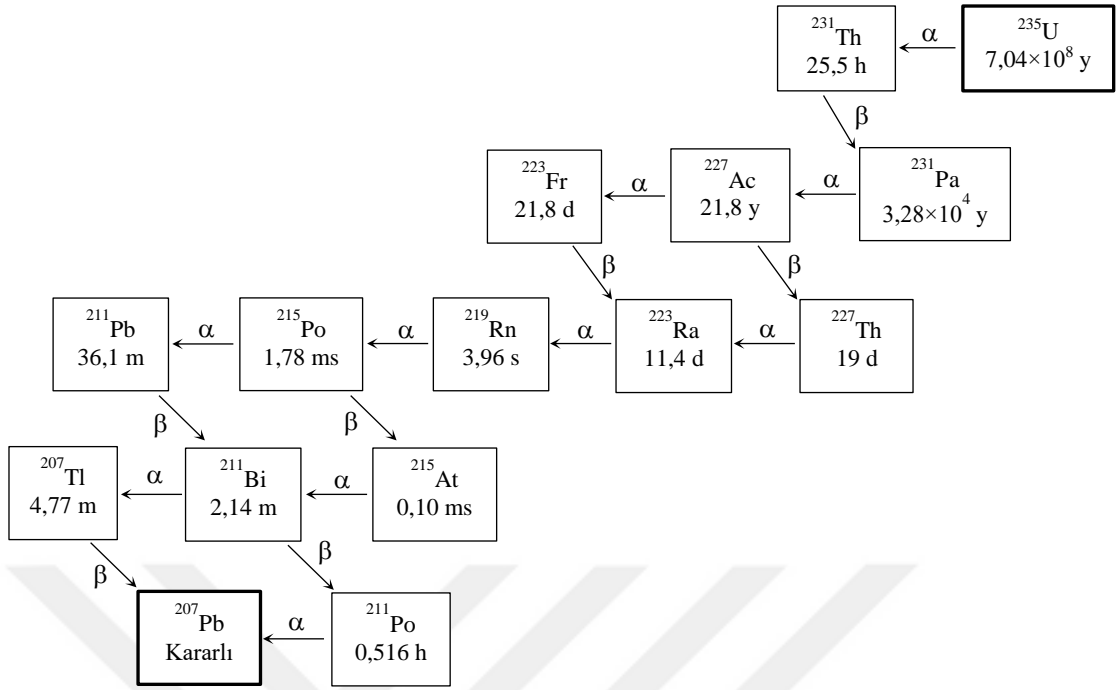
Doğal radyoaktivitenin kaynağı doğadır. Doğal radyoaktivite, yıldızlardan ve güneşten dünyaya gelen kozmik ışıklardan, topraktan, sudan, havadan, bitkilerden, besinlerden ve bütün canlı varlıkların yapısında var olan doğal radyoaktif maddelerden yayımlanan radyasyonlardır. Doğal olarak radyoaktif olan elementler dört grupta ele alınır. Bunlar; Uranyum serisi (^{238}U), Toryum serisi (^{232}Th), Aktinyum serisi (^{235}U) ve Neptünyum serisi (^{237}Np). Uranyum serisi; ^{238}U radyoaktif çekirdeği ile başlar ve ardından parçalanmalarla kararlı olan ^{206}Pb çekirdeğiyle son bulur. Toryum serisi; ^{232}Th ile başlar ve ^{208}Pb ile biter. Aktinyum serisi ^{235}U ile başlar ve ^{207}Pb ile sona erer. Neptünyum serisi de ^{237}Np ile başlayıp ^{209}Bi 'a dönüşerek kararlı bir çekirdek halini alır (Şekil 1.3-6).



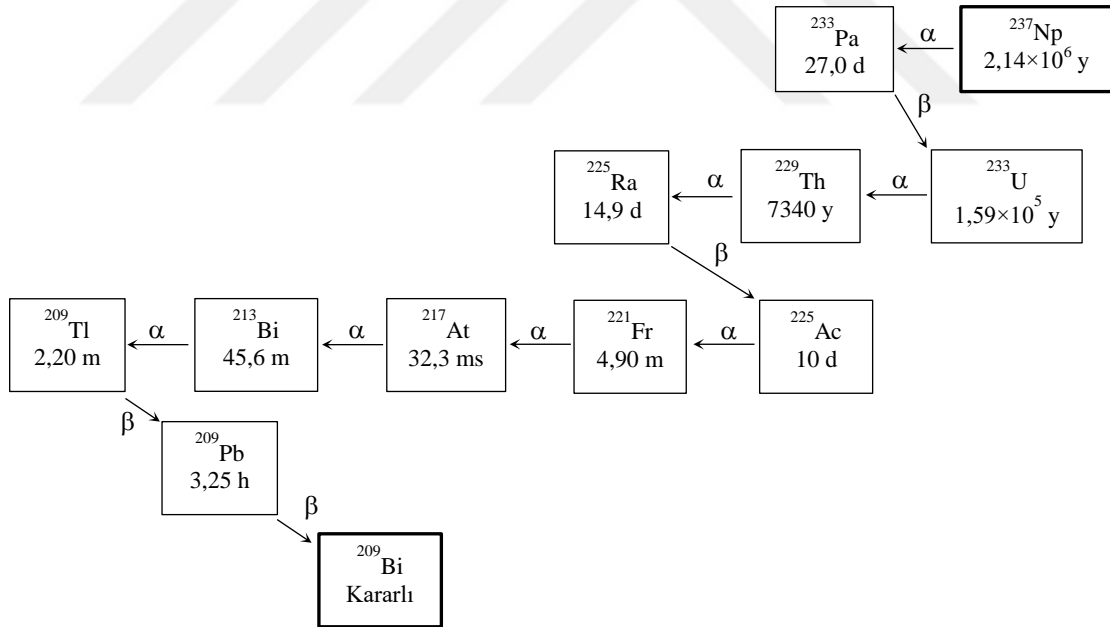
Şekil 1.3. ^{238}U bozunma serisi (Solmaz, 2008)



Şekil 1.4. ^{232}Th bozunma serisi (Solmaz, 2008)



Şekil 1.5. ^{235}U bozunma serisi (Solmaz, 2008)



Şekil 1.6. ^{237}Np bozunma serisi (Solmaz, 2008)

Doğadaki doğal radyoaktif elementlerin kaynağı yalnızca bu serilerde bulunan ağır elementler değildir. Doğada tek başına bulunan bazı doğal radyoizotoplar da vardır. Tablo 1.2' de doğal olarak bulunan bazı izotoplar ve yarılanma süreleri verilmiştir (Krane, 2001).

Tablo 1.2. Bozunma serilerinde olmayan bazı doğal radyoaktif çekirdekler

Çekirdek	Yarıömür (yıl)	Bozunma şekli	Konsantrasyon (Bq/kg)
⁴⁰ K	$1,28 \times 10^9$	β, γ	630
⁵⁰ V	$1,40 \times 10^{17}$	γ	2×10^{-5}
⁸⁷ Rb	$4,75 \times 10^{10}$	β	70
¹¹³ Cd	$9,00 \times 10^{15}$	β	$< 2 \times 10^{-6}$
¹¹⁵ In	$6,00 \times 10^{14}$	β	2×10^{-5}
¹²³ Te	$1,24 \times 10^{13}$	x ışınları	2×10^{-7}
¹³⁸ La	$1,05 \times 10^{11}$	β, γ	2×10^{-2}
¹⁴² Ce	$> 5,00 \times 10^{16}$	β	$> 1 \times 10^{-5}$
¹⁴⁴ Nd	$2,29 \times 10^{15}$	α	3×10^{-4}
¹⁴⁷ Sm	$1,06 \times 10^{11}$	α	0,7
¹⁵² Gd	$1,08 \times 10^{14}$	α	7×10^{-6}
¹⁷⁴ Hf	$2,00 \times 10^{15}$	α	2×10^{-7}
¹⁷⁶ Lu	$3,73 \times 10^{10}$	β, γ	0,04

1.4.2. Yapay Radyoaktivite

Radyoaktif olmayan bir atom çekirdeğinin, proton, nötron gibi temel taneciklerle bombardıman edilerek radyoaktif çekirdek haline dönüştürülmesi ve bu kararsız çekirdeğin parçalanması olayına yapay radyoaktivite denir. Nötron, bombardıman için kullanılacak en uygun taneciktir. Çünkü nötron yüksüz bir parçacıktır. Bu yüzden çekirdeğin Coulomb alanından etkilenmeden nükleer reaksiyona girebilir. Tıpta, ziraatta ve endüstride kullanılan x ışınları ve yapay olarak üretilmiş radyoaktif maddeler, nükleer bomba denemelerinden sonra oluşan nükleer serpintiler ile bazı tüketici ürünlerinde koruyucu olarak kullanılan radyoaktif maddeler başlıca yapay radyasyon kaynaklarıdır.

1.5. Radyoaktif Bozunum Mekanizmaları

Radyoaktif bozunum, alfa, beta, pozitron bozunumu ve yörünge elektronu yakalama da dâhil olmak üzere birkaç farklı mekanizma ile karakterize edilir. Bu mekanizmaların her

birinin ardı sıra gama ve x ışını yayınlanabilir. Tüm radyoaktif bozunmalar aşağıda verilen kategorilerden birine aittir.

1.5.1. Alfa Bozunumu

Hem proton hem de nötron fazlalığından dolayı kararsız olan radyoaktif ağır çekirdekler, 2 proton ve 2 nötrona sahip bir alfa parçacığı yayımlayarak bozunabilirler. Alfa parçacıklarının enerjisi 3-6 MeV arasında değişir ve +2 yüklü parçacıklardır. Alfa bozunumu, 190'dan büyük kütle numaralı çekirdeklerde daha sık görülür. Bir ortamdan geçerken yoğun iyonizasyona sebep olarak enerjilerini çabucak kaybederler. Bu sebeplerden dolayı da madde içinde uzun mesafe kat edemezler. İnce bir kâğıtla bile kolayca durdurulabilirler. Bir alfa parçacığının kendiliğinden yayımlanması aşağıdaki gibidir.



Burada X ana çekirdeği, Y ürün çekirdeğini, A çekirdeğin kütle numarasını, Z de atom numarasını temsil eder. Q, ana ve ürün çekirdekler arasındaki kütle farkına denk gelen enerjidir. Bozunum nedeniyle ortaya çıkan enerjinin büyük kısmını, momentumun korunumu gereğince küçük kütleyle sahip olan alfa parçacığı alır. Bu yüzden alfa parçacıkları karakteristik bir enerjiye sahip olup spektrumları da keskin bir yapıya sahiptir.

1.5.2. Beta Bozunumu

Beta parçacıkları kararsız çekirdeklerden yayımlanan ve enerjileri 0,8-3,0 MeV arasında değişen yüksek enerjili elektronlardır. Beta parçacıkları yüklü parçacıklar olduğundan geçtikleri ortamda yoğun olmasa da iyonizasyona sebep olurlar. Hafif kütleli oldukları için giricilikleri enerjilerine ve etkileştikleri maddenin özelliklerine bağlı olarak değişiklik gösterir. Beta bozunumu sonrasında yayımlanan elektronların enerjileri sürekli bir spektruma sahiptir.

Radyoaktif bir çekirdek fazla olan protonundan veya nötronundan bir protonu nötrona veya bir nötronu protona dönüştürerek kararlı hale geçebilir. Bu olaylar β^- bozunumu, β^+ bozunumu ve elektron yakalama şeklinde gerçekleşir.

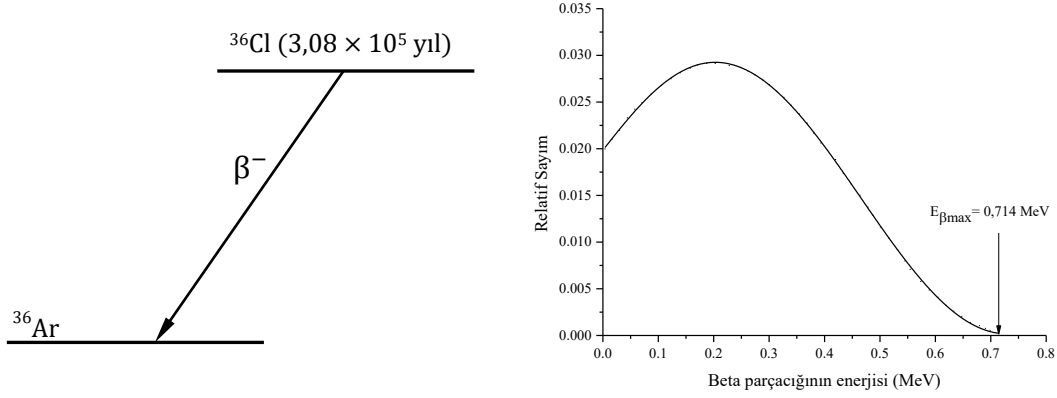
1.5.2.1. Elektron (β^-) Bozunumu

β^- bozunumu, nötron fazlalığı olan çekirdeklerden elektron yayınlanması olayıdır. Beta bozunumu olayı sonucunda çekirdekteki zayıf bağlı olan bir nötron bir protona, bir elektrona ve madde ile etkileşme olasılıkları çok düşük olduğu için ancak çok özel deneysel düzeneklerle gözlemlenebilen bir anti-nötrinoya ($\bar{\nu}_e$) dönüşmüş olur. Böylece çekirdeğin atom numarası artar. Bozunum denklemi;



şeklindedir. Beta bozunumu sonucunda kütle farkından açığa çıkan enerji, momentumun korunumu gereği ürünler arasında kütleleri ile ters orantılı olarak paylaşılır. Ürün çekirdeğin kütlesi beta ve anti-nötrino parçacıklarına oranla çok büyük olduğundan açığa çıkan enerjinin küçük bir kısmını aldığı için doğrudan dedekte edilemez. Arta kalan enerjiyi beta ve anti-nötrino değişik oranlarda paylaşır. Beta bozunumu sonucunda açığa çıkan beta parçacıkları sürekli bir spektruma sahiptir. Beta parçacıkları alabilecekleri maksimum enerji ($E_{\beta_{max}}$) ile tanımlanırlar. Bu süreçle elde edilen beta parçacıklarını diğer süreçlerle elde edilen elektronlardan ayıran en belirgin özellikleri sürekli bir enerji spektrumuna sahip olmalarıdır (Şekil 1.7). Diğer özellikleri ile dikkate alındığında elektronlarla aynı karaktere sahip, yani elektronun kendisidir.

Genellikle beta bozunumu olayında ürün çekirdek uyarılmış bir seviyede kalır ve beta parçacığıyla beraber gama ışını yayınlanır. Bazen de beta bozunumu yapan çekirdekler doğrudan ürün çekirdeğin taban seviyesine iner. Bu tip çekirdekler saf beta yayıcıları olarak adlandırılırlar.



Şekil 1.7. ^{36}Cl çekirdeğinin bozunum şeması ve oluşan beta parçacığının enerji dağılımı

1.5.2.2. Pozitron (β^+) Bozunumu

β^+ bozunumu, radyoaktif bir çekirdekteki fazla protonun bir nötrona, pozitif yüklü bir elektrona ve korunum yasaları gereğince bir nötrinoya dönüşerek, atom numarası bir azalmış kararlı bir çekirdeğin oluşmasını sağlar. Bu bozunum;

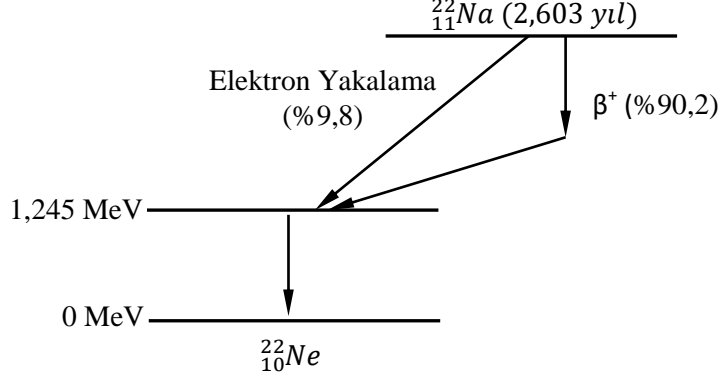


şeklinde. Pozitif yüklü olmaları dışında tüm özellikleri aynı olan bu parçacıklar anti-elektron olarak adlandırılır. Pozitronlar maksimum bir değere kadar uzanan sürekli bir spektruma sahiptir.

1.5.2.3. Elektron Yakalama

Çekirdek proton fazlalığından dolayı kararsız ise kararlılık farklı bir bozunum olayı ile de gerçekleşir. Burada protonu nötrona dönüştürmek için ihtiyaç duyulan elektron çekirdeğe yakın orbitallerden sağlanır. Orbital elektronlarından birinin çekirdek tarafından yakalanmasına “Elektron Yakalama” olayı adı verilir. Bu olay, çekirdeğe en yakın elektron kabuğu olan K kabuğunda baskın olarak görülür. Elektron yakalama olayının sonucunda atomik yörüngelerde boşluk oluşur ve üst yörünge elektronları tarafından bu boşluk çok kısa bir zaman aralığında doldurulur. Bu olayın sonunda ise karakteristik x ışınları oluşur.

Oluşan bu karakteristik x ışınları her zaman atomu terk etmez, bazen dış yörünge elektronlarını uyararak Auger olayına sebep olur.



Şekil 1.8. $^{22}_{11}\text{Na}$ çekirdeğinin $^{22}_{10}\text{Ne}$ çekirdeğine bozunumu

Kütle farkı 1,022 MeV' tan büyük olan çekirdekte hem elektron yakalama olayı hem de pozitron bozunumu gerçekleşebilir. Şekil 1,8'de ^{22}Na radyoaktif çekirdeğinin ^{22}Ne çekirdeğine bozunum şeması gösterilmiştir.

1.5.3. İç Dönüşüm Olayı

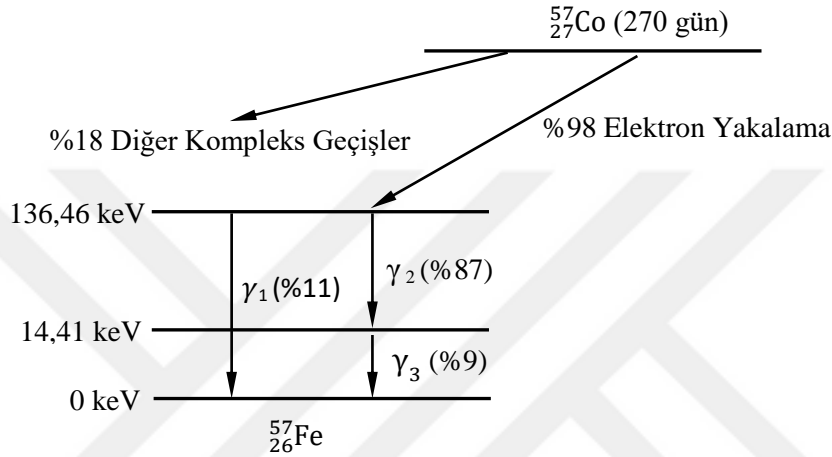
İç dönüşüm olayı, beta bozunumu sonunda ürün çekirdeğin uyarılmış bir seviyede kalması ve kararlı hale gelmek için gama ışını yayınlamasıdır. Bazı durumlarda uyarılmış seviyede bulunan çekirdek gama ışınlanmaz, atomik orbitallerde bulunan elektronlar ile elektromanyetik etkileşime girerek taban durumuna iner. Bu süreçte yayınlanan elektronların serbest hale geçmesi için gereken enerji (E_u), geçişin olduğu nükleer enerji seviyeleri arasındaki enerji farkından karşılanır. Bu olay sonrasında yayınlanan elektronun enerjisi (E_e) aşağıdaki gibidir.

$$E_e = E_u - E_b \quad (5)$$

Burada E_b elektronun bağlanma enerjisidir. Bu süreç sonunda nükleon sayısı değişmediği için çekirdek başka bir çekirdeğe dönüşmez. Bu süreç sonunda oluşan serbest elektronlar kesikli bir spektruma sahiptir.

1.5.4. Gama Bozunumu

Radyoaktif çekirdekler alfa ve beta gibi parçacıklar yayınladıktan sonra genellikle uyarılmış olarak kalır. Çekirdek, arta kalan enerjisini bir veya birkaç gama ışınması yayınlayarak kararlı hale geçer. Şekil 1.9'da görüldüğü gibi yarı kararlı olan çekirdekte nötron ve proton sayıları değişmez.



Şekil 1.9. $^{57}_{27}\text{Co}$ çekirdeğinin $^{57}_{26}\text{Fe}$ çekirdeğine bozunumu

1.6. Bozunum Dinamikleri

Radyoaktif bozunum olayı, gelişigüzel ve rastgele olarak zamana göre değişen bir süreç olduğundan, bir radyoaktif numune içindeki herhangi bir atomun ne zaman bozunacağını bilmek olanaksızdır. Olasılık ve istatistik kuramlar çerçevesinde bazı özellikleri belirlenebilir. Birim zamanda çekirdeklerin bozunma olasılığını incelemek daha önemlidir. Bu olasılık, λ radyoaktif bozunma sabiti olarak adlandırılır. Çekirdeğin yaşı ne olursa olsun bozunma olasılığı radyoaktif bozunma yasasına göre sabittir. Radyoaktif bozunma sabiti radyoaktif çekirdekler için ayırt edici bir özelliktir.

Radyoaktif olan bir çekirdekte birim zamandaki bozunma sayısı çekirdeğin aktivitesi ya da çekirdeğin bozunma hızı olarak ifade edilir. Herhangi bir t anında bir numunede N tane radyoaktif çekirdek mevcutsa ve yeni çekirdek eklenmiyorsa dt gibi bir zaman aralığında bozunan çekirdeklerin sayısı olan dN , N ile aşağıdaki gibi orantılıdır.

$$\frac{dN(t)}{dt} = -\lambda N(t) \quad (6)$$

Radyoaktif atomların sayısındaki zamanla oluşan azalmayı eksi işareti gösterir. Burada $N(t)$, t zaman sonra bozunmamış çekirdeklerin sayısını ifade eder. Denklem (6) çözümlerse,

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (7)$$

radyoaktif bozunma kanunu elde edilmiş olur. Burada N_0 , $t = 0$ anındaki henüz bozunmamış çekirdek sayısıdır (Krane,2001).

1.6.1. Yarı ve Ortalama Ömür

Radyoaktif bozunma kanunu, herhangi bir t anında bozunmadan kalan çekirdek sayısını ifade eder. Teorik olarak baktığımızda numune içindeki bütün çekirdeklerin bozunması için sonsuz zaman geçmelidir. Yani, $t \rightarrow \infty$ olduğunda $N(t) = 0$ olacaktır. Bundan dolayı radyoaktif maddelerin ayırt edici özelliği olan yarı ömür kavramını kullanmak daha yararlıdır. Bir radyoaktif maddenin başlangıçta var olan çekirdek sayısının yarıya düşmesi için geçen zamana yarı ömür denir. Denklem (7)'de, $N(t) = N_0/2$ yazılarak çözümlerse radyoaktif bir çekirdeğin yarı ömrü,

$$T_{1/2} = \frac{0,693}{\lambda} \quad (8)$$

olarak elde edilir.

Radyoaktif bir atomun ömrü ise radyoaktivitenin istatistiksel karakterinden dolayı, sıfırla sonsuz arasında herhangi bir değerde olabilir. Dolayısıyla bir radyoaktif atomun ne kadar ömrü olduğunu bilmekten ziyade, bir grup atomun ömrünü göz önüne almak daha doğru olur. Radyoaktif çekirdeğin bozununcaya kadarki ortalama zamanı ortalama ömür (τ) olarak adlandırılır. Ömürleri t_1, t_2, \dots olan atomların sayıları sırayla $dN_1(t), dN_2(t), \dots$ ise ortalama ömür için

$$\tau = \frac{t_1 dN_1(t) + t_2 dN_2(t) + \dots}{dN_1(t) + dN_2(t) + \dots} = \frac{t dN(t)}{dN(t)} \quad (9)$$

ifadesi yazılabilir (Krane, 1998). Burada $dN \rightarrow 0$ için,

$$\tau = \frac{\int_0^{N_0} t dN(t)}{\int_0^{N_0} dN(t)} = \frac{1}{\lambda} \quad (10)$$

elde edilir.

1.6.2. Enerji ve Birimler

Geleneksel olarak radyasyon enerjisi, elektron volt (eV) birimi ile ifade edilir. Bir elektronun 1 V potansiyel altında hızlandırılması ile oluşan enerji 1 eV 'dur. İyonlaştırıcı radyasyonlar için eV küçük bir değer olduğundan keV ya da MeV daha fazla kullanılır. SI birim sisteminde ise, enerjinin birimi Joule (J) olarak verilir. İyonlaştırıcı radyasyonların en enerjikleri olan x veya gama ışınının enerjisi,

$$E = h\nu \quad (11)$$

bağıntısı ile verilir. Burada, $h = 6,625 \times 10^{-34}$ J.s değerindeki Planck sabiti ve ν radyasyonun frekansıdır.

Herhangi bir numunedeki radyoaktif çekirdeklerin sayılarını bilmektense, birim zaman aralığında bozunmuş çekirdeklerin sayısı olan aktiviteyi bilmek çok daha önem arz eder. Bir gram radyumla denge halinde olan radonun aktivitesi olarak ifade edilen Curie (Ci), aktiviteyi tanımlamak için kullanılmış ilk birimdir. SI birim sisteminde ise saniyede oluşan bozunumu ifade eden Becquerel (Bq), aktiviteyi tanımlamakta kullanılır.

SI birim sisteminde ışınlama birimi olarak Coulomb/kg (C/kg) kullanılır ve 0°C ve 1 atmosfer basınçta 1 kg havada $2,58 \cdot 10^{-4}$ Coulomb değerinde elektrik yüküne sahip olan x ve gama ışını miktarıdır. Röntgen geleneksel sistemde kullanılan ışınlama birimidir ($1\text{C/kg} = 3876 \text{ R}$).

Soğurulan doz, radyasyon ile ışınlanan maddenin birim miktarındaki soğurulan enerji eşdeğeridir. SI' da soğurulan doz birimi Gray (Gy) dir. Gy, maddenin 1 kg'ına 1 J' lük enerji veren iyonize radyasyonun miktarıdır. Geleneksel sistemde, 1 gr maddenin 100 erg' lik enerji soğurma eşdeğeri olan rad kullanılır.

Doku ve organlarda birim kütlede soğurulan enerji miktarı ile orantılı bir değer olan eşdeğer doz, radyasyonun oluşturacağı biyolojik etkileri tanımlar. SI birim sisteminde eşdeğer doz birimi Sievert (Sv), geleneksel sistemde ise rem dir.

Radyasyon birimleri, doz hesaplarında kullanılan birimler ve aralarındaki dönüşümler Tablo 1.3' de verilmektedir.

Tablo 1.3. Radyasyon birimleri ve dönüşümler

Terimler	Birimler		Dönüşümler
	Geleneksel	SI	
Aktivite (A)	Curie (Ci)	Becquerel (Bq)	1 Bq = 1 parçalanma/saniye 1 Ci = 3,7x10 ¹⁰ Bq
Doz (D)	Röntgen (R)	C/kg	1 C/kg = 3876 R 1 R = 2,58x10 ⁻⁴ C/kg
Soğurulan Doz (D)	rad	Gray (Gy)	1 Gy = 1 J/kg 1 rad = 100 erg/gr 1 Gy = 100 rad
Doz Eşdeğeri (DE)	rem	Sievert (Sv)	1 Sv = 1 J/kg 1 Sv = 100 rem

1.7. Gama Spektroskopisi

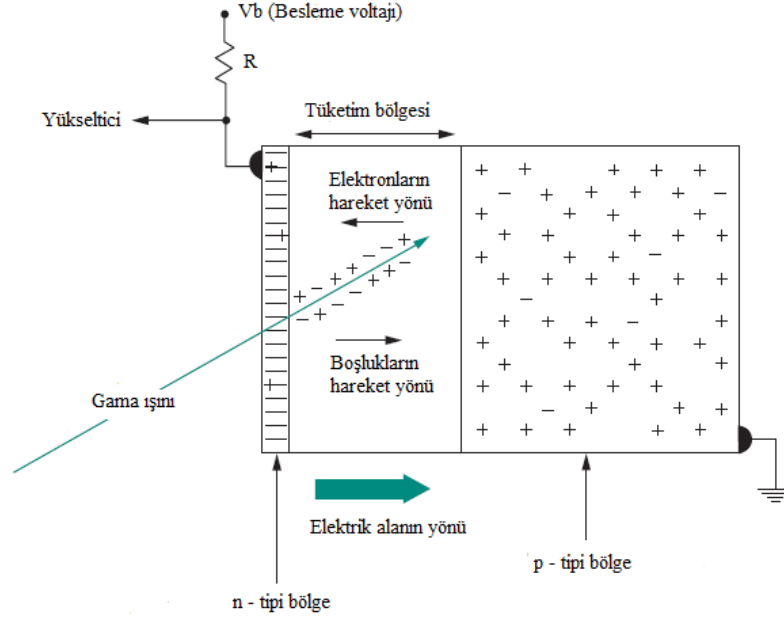
Radyoaktivitenin kaynağını belirlemek için, 1896 yılından bu yana birçok teknik geliştirilmiştir. Sintilasyon detektörleri ilk keşfedilmiş detektördür. William Crookes, 1903 yılında alfa parçacıklarını ZnS ekrana çarptırarak ve sintilasyonlar (parıldamalar) gözlemlemiştir. Rutherford ise 1910 yılında alfa parçacıklarını ZnS ekrana çarptırarak, oluşan sintilasyonları saymıştır. Gama ışınlarına karşı hassas olan detektörler iyonizasyon odalarının keşfiyle birlikte geliştirilmiştir. Enerji ayırımı yapan detektörler 1940'lı yılların sonlarına kadar yapılamamış, sintilasyon kristaline eklenen foto çoğaltıcı tüplerin geliştirilmesinden sonra sorun ortadan kalkmıştır. Robert Hofstadter 1948 yılında, NaI(Tl) kristalini kullanmış ve gama ışınlarını ölçmüştür.

Yüksek enerji çözünürlüğüne sahip yarıiletken detektörlerin (Ge(Li), Si(Li), HPGe, vs.) geliştirilmiş olması sintilasyon detektörlerinin gama spektroskopisindeki önemini azaltmıştır. Son zamanlarda yapılan çalışmalarda, gama spektroskopisinde yüksek verime

sahip olan sistemlere yoğunlaşmıştır (Gilmore, 2008; L'Annunziata, 2012; Tsoulfanidis ve Landsberger, 2015).

1.7.1. Yarıiletken Detektörler

Yük taşıyıcılarının cinsine bağlı olarak yarıiletkenler iki grupta sınıflandırılmıştır. Yük taşıyıcıları elektron olanlar n tipi, boşluk olanlar ise p tipi yarıiletkenlerdir. Yarıiletkenlerin band teorisine göre, elektronlar iletim bandına geçerken boşluklar bırakırlar. Değerlik bandında oluşmuş olan bu boşluklar komşu elektronlar tarafından doldurulur ve ardından yeni boşluklar oluşur. Böylece oluşan boşluklar sanki kristal içinde hareket ediyormuş gibi davranır. Aslında hareket eden elektronlardır. Yarıiletkenlerde katkı maddeleri iletimi kontrol etmek için kullanılırlar. Katkı maddesinin cinsine göre yarıiletken n-tipi veya p-tipi olarak sınıflandırılır. n-tipi yarıiletkende, beş değerlikli katkı maddesinin dört elektronu kovalent bağ yapar ve beşinci elektron ise kristal örgüsü içinde serbest hareket eder. p-tipi yarıiletkende ise, üç değerlikli katkı maddesinin üç elektronu diğer maddenin üç elektronu ile kovalent bağ yapar ve kovalent bağ yapamayan bir boşluk meydana gelir. p- tipi ve n-tipi materyallerin birbirleriyle temas ettirilmesi sonucunda oluşan yarıiletken detektörlerde, n-tipi materyalden kopan elektronlar p-tipi materyale yönelirler. Yük taşıyıcılar temas bölgesinde nötr hale gelir ve böylece arınma (tüketim) bölgesi oluşur. Oluşan tüketim bölgesine gama radyasyonu girer ve elektron-boşluk çifti oluşur. Tüketim bölgesinde elektronlar ve boşluklar uygulanan gerilim ile birbirlerine zıt yönde olacak şekilde hareket ederler. Kontaklarda biriken bu elektronlar genliği gelen gama radyasyonunun enerjisiyle orantılı olan bir puls oluşturur. Yüksek verimli yarıiletken detektörler için saf germanyum gibi maddelerin kullanılması ile elde edilen derin tükenme bölgesine ihtiyaç vardır (Gilmore, 2008). Şekil 1.10'da yarıiletken bir detektörün şeması verilmektedir.



Şekil 1.10. Yarıiletken detektörünün şeması (Tsoulfanidis ve Landsberger, 2015).

1.7.2. Gama Işınlarnın Enerjilerinin Depolanma Mekanizmaları

Gama spektroskopisi, radyoaktif olan yani, belirli oranlarda doğal ve yapay radyonüklide sahip numunelerden yayımlanan gama ışınlarını enerjilerine göre ölçebilen sistemlerdir. Böyle sistemler verimlerine ve enerji çözünürlüğüne göre değerlendirilir. Verim ve enerji çözünürlüğü, detektör materyalinin yük taşıyıcı oluşturma ve bu yük taşıyıcıları toplama kabiliyeti ile ilişkilidir. Kristaldeki yük taşıyıcılarının oluşmasında, kristal atomları ile gelen foton arasındaki etkileşme en büyük faktördür. Baskın olan etkileşme mekanizmaları fotoelektrik, Compton ve çift oluşum olaylarıdır.

1.7.2.1. Fotoelektrik Olay

1887 yılında H. Hertz tarafından gözlenen fotoelektrik soğurma olayı, yeterince enerjik olan fotonların diğer atomun bağlı elektronlarından biriyle etkileşime girmesi sonucunda meydana gelir. Etkileşme sonucunda foton, enerjisinin tamamını elektrona aktarır ve elektronu atomdan koparır. Atomdan kopan elektron artık serbest bir elektrondur. Bu olayda fotonların elektronlarla etkileşme olasılığı atomun K kabuğundaki

elektronlar için daha yüksektir. Fotoelektrik olayın sonunda serbest halde olan elektronun enerjisi,

$$E_{fe} = h\nu - E_b \quad (12)$$

ile ifade edilir. Burada E_b elektronun yörüngeye bağlanma enerjisidir. Momentum ve enerjinin korunumuna göre elektronun bağlı olması gereklidir. Çünkü elektron bağlı ise atom geri teper ve bu durumda momentum korunur.

Fotoelektrik soğurma olayı sonucunda serbest halde bulunan elektron yörüngede boşluğa sebep olur. Oluşan boşluk, bağlanma enerjileri daha düşük olan bir yörüngeden gelen bir elektron ile çok kısa bir zamanda doldurulur. Böylece iki yörünge arasındaki bağlanma enerjilerinin farkı kadar enerjiye sahip bir foton yayımlanır ve bu foton karakteristik x ışını olarak adlandırılır. Yayınlanan karakteristik x ışını atomu terk etmeden atomun dış yörüngelerinden birisiyle etkileşip onu atomdan koparır ve yok olursa bu olaya Auger olayı, koparılan elektrona da Auger elektronu denir

Fotoelektrik soğurma olayının olasılığı, düşük enerjili gama ışınlarında daha yüksektir. Maddeyi oluşturan elementlerin atom numarasındaki artış fotoelektrik soğurma olayının olasılığını arttırır. Bu olasılık için aşağıdaki gibi yaklaşık bir ifade yazılabilir.

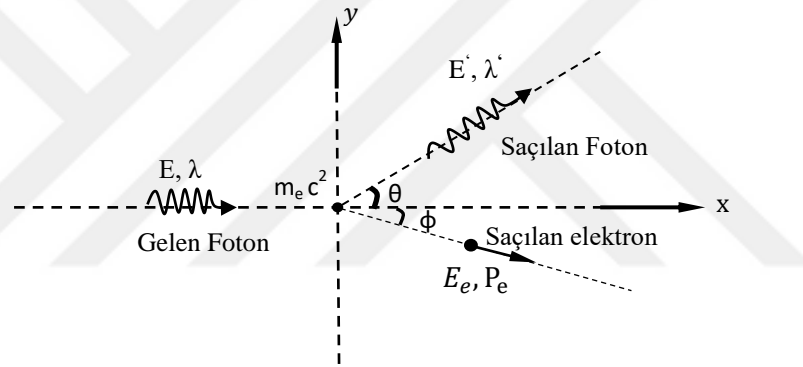
$$\tau_p = a \frac{Z^n}{E^m} \quad (13)$$

Burada, τ_p fotoelektrik tesir kesitidir. Z maddeyi oluşturan elementlerin atom numarasıdır. a atom numarası ve gelen fotonun enerjisinden bağımsız bir katsayıdır. E gelen fotonun enerjisidir. n ve m gelen fotonun enerjisine bağlı olarak 3 ile 5 arasında değerler alan katsayılarıdır. Gama ışınlarının soğurulması atom numarasına bağlı olduğundan gama detektörlerinin yüksek atom numaralı elementlerden üretilmesini gerektirir.

1.7.2.2. Compton Saçılması

Işığın kuantum teorisine göre, fotonların durgun kütlelerinin yokluğunun haricinde parçacık gibi davrandığını kabul eder. Bu durumda elektron ve foton arasında iki parçacığın çarpışması olayı gerçekleşebilir.

Compton olayı, atom çekirdeğine zayıf bağlı bir elektron ile bir fotonun etkileşmesi sonucunda gerçekleşir. Fotoelektrik olay atomun iç tabakalarındaki elektronlarla ilgili iken, Compton olayı dış yörüngelerdeki elektronlarla ilgilidir. Yani Compton olayı, gelen fotonun enerjisinin elektronun bağlanma enerjisinden çok yüksek olduğu durumlarda baskındır. Şekil 1.11'de görüldüğü gibi gelen foton tüm açılarda saçılabilir. Bu durumda farklı enerji değerlerine sahip foton ve elektron gözlenebilir.



Şekil 1.11. Compton saçılmasının şematik gösterimi

Enerji ve momentum korunumu yasaları kullanılarak elde edilen fotonun dalga boyundaki değişim aşağıdaki ifadedeki gibidir.

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos\theta) \quad (14)$$

Burada, m_e elektronun kütlesi, h Planck sabiti, c ışık hızı, λ gelen fotonun dalga boyu, λ' saçılan fotonun dalga boyu ve θ fotonun başlangıçtaki konumuna göre saçılma açısını ifade eder.

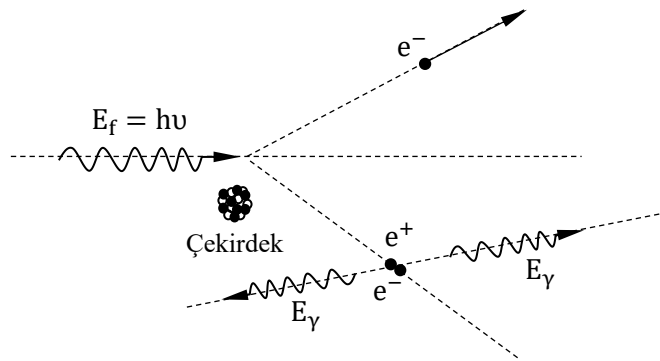
Compton olayının meydana gelme olasılığı (σ), ortamdaki elektron sayısı ile orantılı olduğu için atom numarası ile de orantılıdır. Bu durum aşağıdaki bağıntı ile ifade edilir.

$$\sigma = B Z f(E) \quad (15)$$

Burada, B sabit bir katsayı, Z atom numarası ve f(E) de gelen fotonun enerjisine bağlı bir fonksiyondur.

1.7.2.3. Çift Oluşum Olayı

Çift oluşum olayı, yeterli enerjiye sahip bir gama fotonunun atom çekirdeğinin yakınından geçmesiyle onun Coulomb alanından etkilenerek her biri 0,511 MeV enerjilere sahip elektron-pozitron çifti oluşturmasıyla gerçekleşir. Şekil 1.12’de çift oluşum olayının şematik gösterimi verilmiştir. Çift oluşumu sonucunda fotonun enerjisi elektron-pozitron çiftine aktarılmış olur. Bu olayın sonunda foton yok olur. Çift oluşum olayının gerçekleşmesi için gerekli olan enerji elektron-pozitron çiftinin durgun kütle enerjileri toplamı olan 1,022 MeV’ den daha büyük olmalıdır. Bu olayın sonucunda oluşan pozitron ortamda bulunan diğer bir elektrona yakalar ve birbirlerine zıt yönde hareket eden 0,511 MeV’ lik iki gama ışını yayınlamaya başlar. Oluşan bu gama ışınlarına yok olma radyasyonu denir. Elektronlar ise serbest elektrolar gibi davranarak ortamda bulunan başka elektronlarla etkileşirler. Çift oluşum olayının gerçekleşmesi için gerekli olan eşik enerjisi değeri 1,022 MeV olsa da 3 MeV’ den daha yüksek enerji değerine sahip fotonlarda baskın olarak görülür.



Şekil 1.12. Çift oluşum olayının şematik gösterimi

Çift oluşum olayının meydana gelme olasılığı olan κ' nın atom numarasına olan bağımlılığı aşağıdaki bağıntı ile ifade edilir.

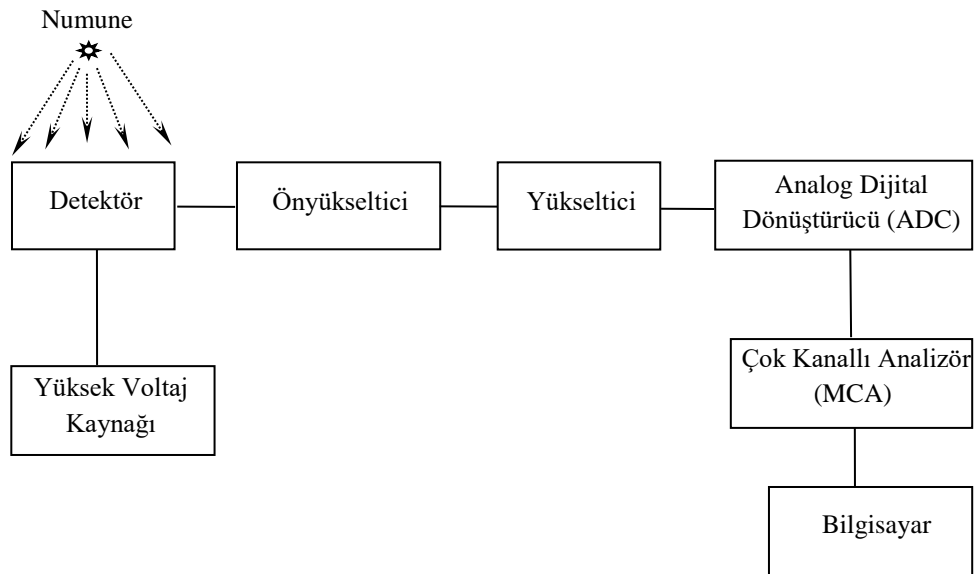
$$\kappa = C Z^2 f(E, Z) \quad (16)$$

Burada, C sabit bir katsayı, Z atom numarası ve f(E, Z) gelen fotonun enerjisine ve hedef çekirdeğin atom numarasına bağlı olan bir fonksiyondur.

1.7.3. Yük Toplama ve Puls İşleme

Gama spektroskopisinde, fotonlar detektör kristaline ulaştığında meydana gelen etkileşmeler sonucunda oluşan yük taşıyıcılarını işleyerek, gelen fotonların özelliklerini tanımlayan bilgileri ortaya koyacak elektronik sistemlere ihtiyaç vardır. Bir gama spektroskopi sisteminde detektör ile birlikte yüksek gerilim kaynağı, ön yükselteç, yükselteç, analog dijital dönüştürücü (ADC) ve çok kanallı analizör (MCA) gibi elektronik sistemler bulunur (Şekil 1.13).

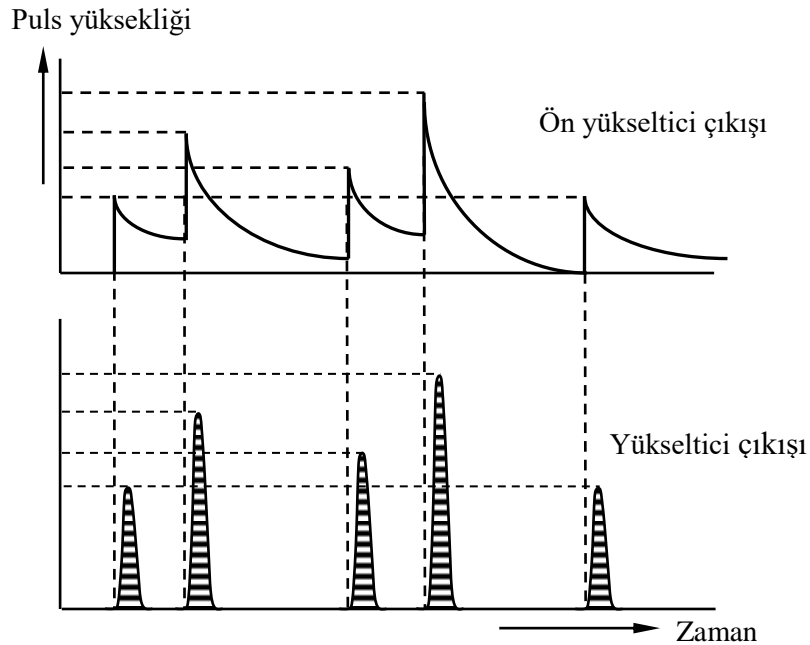
Yüksek gerilim kaynağı, kristalde oluşturulan yük taşıyıcılarını elektrotlara taşıyan elektrik alanının kristal boyunca oluşmasını sağlar. Detektöre uygulanan bu gerilime besleme voltajı da denir.



Şekil 1.13. Gama spektroskopisindeki elektronik bileşenlerin blok diyagramı

Önyükseltici, detektörden gelen akım sinyallerini depolanan enerji ile orantılı olacak biçimde voltaj sinyaline dönüştürür. Elektronik hatlar arasındaki empedans uyumunu gerçekleştirmek amacıyla sinyalleri şekillendirip büyüten önyükseltici, detektöre monte edilmiş olan alan etkili transistördür (FET). Önyükselticiler, elektronik gürültüyü minimum seviyeye indirmek için detektör ile beraber soğutulmalıdır.

Yükselticiler, öncelikle önyükselticiden gelen sinyalleri analiz edilebilecek seviyelere çıkarır ve daha sonra enerji ayırımını sağlayacak olan sinyal şekillenimini oluşturur (Şekil 1.14). Yükselticilerin çoğu hem bipolar (sinyal hem pozitif hem de negatif bileşenli) hem de unipolar (sinyalin tamamı ya pozitif ya da negatif) çıkışa sahiptir. En iyi sinyal gürültü oranını sağlamak için yükselticilerin unipolar çıkışı seçilir. Sinyal genişliğini belirleyen şekillenme zamanı, yükselticinin ayarlanması gereken bir başka fonksiyonudur. Bir spektrumdaki pikler için çözünürlüğün daha iyi olması daha uzun bir zaman sabitiyle elde edilir. Daha uzun zaman sabitlerinin seçilmesiyle yükselticinin çıkışında daha uzun sinyallerin oluşması sağlanır. Yani, yükseltici çıkışında birim zamanda gözlenecek sinyal sayısında azalma meydana gelir. Bu durum yüksek sayım oranlı ölçümlerde karışıklığa sebep olur.



Şekil 1.14. Önyükseltici ve yükseltici çıkışlarında pulsların şekillenimi

Çok kanallı analizörler, yükselticiden gelen sinyalleri enerjilerine göre orantılı olacak biçimde farklı kanallara yerleştiren elektronik sistemdir. Çok kanallı analizörün en önemli devre elemanlarından biri analog dijital dönüştürücüdür (ADC). ADC, yükselticiden gelen analog sinyali onun genliğiyle orantılı bir tamsayıya çevirir. Analizör sayılmış olan sinyal yüksekliği kadar sayıyı hafızasında biriktirir. Sayıların biriktirildiği kanallar farklı enerjileri temsil eder. Böylece sayım süresince sinyallerin birikmesiyle pikler oluşur. Analog dijital dönüştürücünün bir sinyali hafızasına kaydedebilmesi için belirli bir zamana ihtiyaç duyar. Detektöre ulaşan fotonlar arasında çok kısa bir zaman geçer. Bu durumda analog sinyal dönüştürücü gelen tüm sinyalleri aynı hızda işleyemez. Böylelikle ardı ardına gelen fotonların detektöre ulaşma zamanı ile ardışık sinyallerin işlenmesinde bir zaman farkı oluşur. Bu durum ölü zaman kavramıyla adlandırılır. Ölü zaman aslında analog dijital dönüştürücünün meşgul olduğu zamandır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Radyoaktivite Ölçümleri

2.1.1. Örneklerin Toplanması ve Ölçüme Hazırlanması

Bu çalışmada, yapılan anket sonucuna göre TAPDK bandrollü ve Türkiye’de marketlerde en çok satılan dokuz farklı sigara tütününü ve iki farklı yöreden açık tütün satın alınarak örnek toplama işlemi gerçekleştirildi. Toplanan sigara örneklerinden ikisi seçilerek izmarit ve sigara külü örnekleri de hazırlandı. 556 sayılı markaların korunması hakkındaki kanun hükmünde kararname gereğince toplanan örnekler için; sigara örneklerine S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8 ve S9; tütün örneklerine T1 ve T2, izmarit örneklerine I1 ve I2; ve kül örneklerine de K1 ve K2 şeklinde kodlar verilerek çalışmalar gerçekleştirildi. Tütün örnekleri öğütülerek toz haline getirildi. Örnekler radyoaktivite ölçümü için çapı 6 cm ve yüksekliği 5 cm olan silindirik şekle sahip plastik kaplara konuldu. Plastik kapların ağızları, radon gazı kaçışını engellemek amacıyla bant ile sarıldı ve ^{226}Ra bozunum ürünlerinin dengeye gelmesi için otuz gün bekletildi (Şekil 2.1. a-c).



Şekil 2.1. a) Tütün örneği, b) İzmarit örneği, c) Kül örneği

2.1.2. Deney Sistemi

Radyoaktivite ölçümleri, çalışma voltajı 2600 V olan, %20'lik rölatif verime ve 1,33 MeV' de 1,60 keV' lik ayırma gücüne sahip ORTEC marka GEM-SP7025P4-B model HPGe gama detektörü (Şekil 2.2) ile Giresun Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde yapıldı.

Gama spektroskopisinde gelen fotonun işlenip kullanılabilir veriler haline dönüştürülmesi için bir dizi elektronik sistem kullanılır. Bu çalışmada HPGe detektörü, Ortec marka DSPEC jr 2,0 model olan bir dijital sinyal işleyiciye bağlanarak kullanıldı.

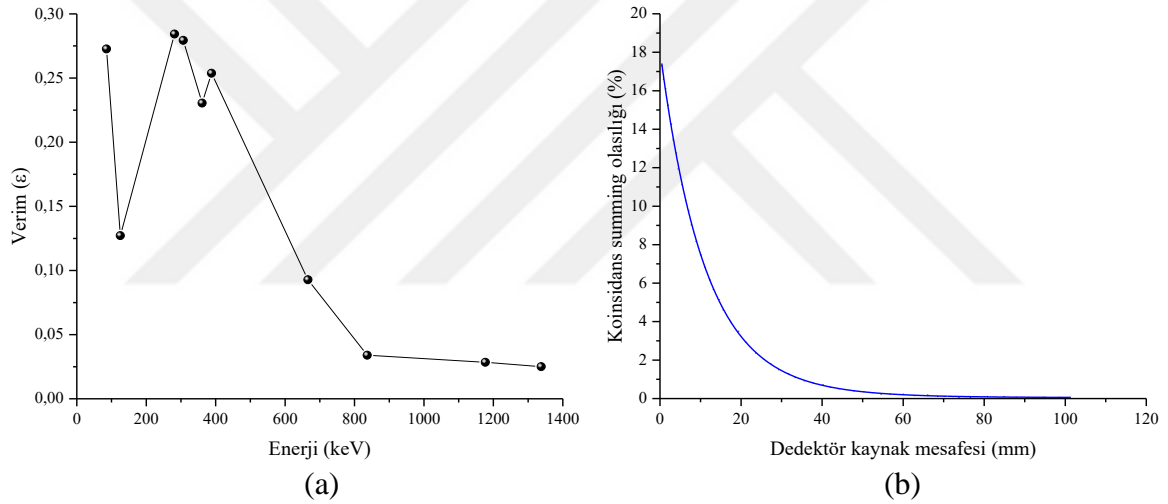


Şekil 2.2. ORTEC marka GEM-SP7025P4-B model HPGe gama detektörü

2.1.3. Enerji ve Verim Kalibrasyonu

Gama spektroskopisi kullanılarak yapılan ölçümlerde detektöre gelen her bir foton elektronik devrede işlendikten sonra enerjisiyle alakalı bir kanala atanır. Böylece pik oluşumu yani, spektrum oluşumu gerçekleşir. Ama öncelikle hangi enerjinin hangi kanala yerleştirileceği sisteme tanıtılmalıdır. Enerji kalibrasyonunu yapabilmek için yayımladığı fotonun enerjileri tam olarak bilinen standart kaynaklar gereklidir. Standart kaynakların spektrumunu oluşturulduktan sonra hangi enerjinin hangi kanala karşılık geldiği belirlenir. Bu piklere ait enerji değerleri bir fonksiyonla denkleştirilip kalibrasyon eğrisinin denklemi elde edilir. Böylece numunelere ait spektrumda bulunan radyoaktif çekirdeklerin türleri enerjileri göz önüne alınarak belirlenebilir.

Verim kalibrasyonu, bir örnekteki radyoizotopların aktivitesinin belirlenmesi için kullanılan en önemli parametrelerden biridir. Verim kalibrasyonunda kullanılan standart kaynaklar ölçümü gerçekleştirecek numune ile aynı kimyasal yapıya ve aynı geometriye sahip olmalıdır. Kullanılacak standart kaynakların üretim tarihleri, enerjileri ve üretim tarihindeki aktiviteleri bilinmelidir. Verim eğrisi oluşturulurken özellikle yüksek sayımlarda ve çoklu enerjilerde gama ışını yayınlayan kaynaklarla çalışıldığında gözlemlenen koinsidans-summing olayına dikkat edilmesi gerekir. Bu süreçte yüksek enerjili fotonlar detektöre çok kısa bir zamanda ulaştıklarından detektörün ayırma zamanı fotonları ayırt edemez. Ardı ardına gelen fotonları aynı zaman aralığında kaydedilmesiyle tam enerji pikinde (FEP) sayım kayıpları meydana gelir. Bunu gözlemlemek için sistemin verim kalibrasyonu kaynak detektör arası 5 cm olarak ayarlandı (Şekil 2.3.a).



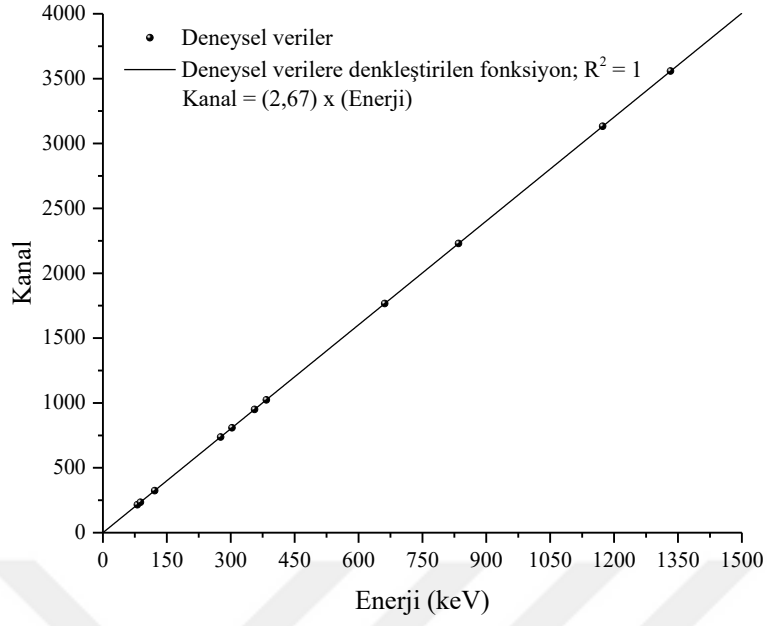
Şekil 2.3. a) HPGe detektörünün verim kalibrasyon eğrisi (kaynak detektör mesafesi 5 cm iken), b) Detektör kaynak mesafesi ile koinsidans-summing olasılığının değişimi (Gilmore, 2008).

Sonuçlara bakıldığında kısa olan kaynak detektör mesafesinde koinsidans summing etki epeyce baskındır. Şekil 2.3.b'de katı açığa bağlı olan koinsidans summing olasılığının mesafe ile değişimi görülür. Yaptığımız deneysel çalışmada mesafeye dayalı verim ölçümleri ve Şekil 2.3.b dikkate alınarak, gama spektroskopisindeki bütün ölçümler için kaynak detektör mesafesi 15 cm olarak belirlendi.

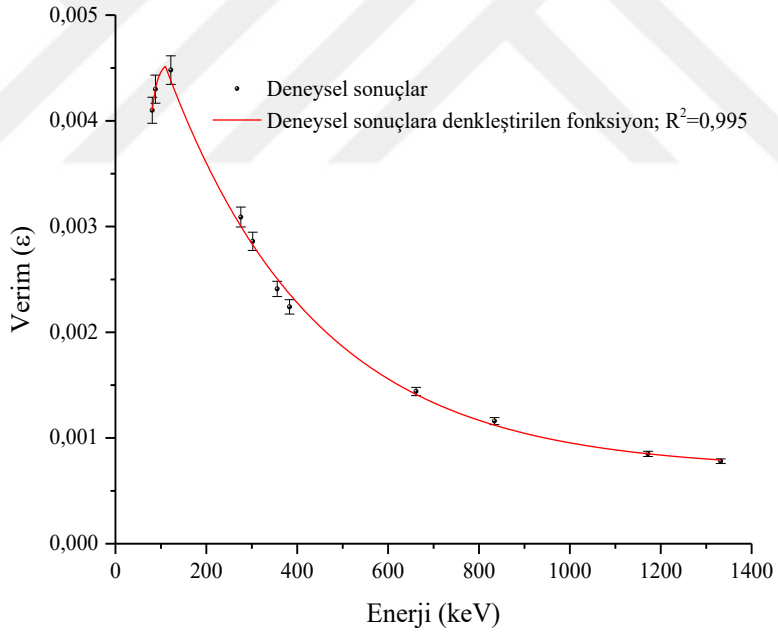
Tablo 2.1. Standart kaynaklar ve özellikleri

Radyoaktif çekirdek	Enerjisi (keV)	Salma hızı (%)	Yarı ömrü	Aktivitesi (kBq)	Ürün çekirdek
^{109}Cd	88,00	3,60	461,40 gün	372,20	^{109}Ag
^{57}Co	122,00	85,51	271,80 gün	387,40	^{57}Fe
	136,50	10,71	271,80 gün	387,40	
^{133}Ba	81,00	32,90	10,54 yıl	360,60	^{133}Cs
	276,40	7,16	10,54 yıl	360,60	
	302,80	18,39	10,54 yıl	360,60	
	356,00	62,05	10,54 yıl	360,60	
	383,80	8,94	10,54 yıl	360,60	
^{137}Cs	661,60	85,0	30,05 yıl	345,00	^{137}Ba
^{54}Mn	834,80	99,97	312,13 gün	351,40	^{54}Cr
					^{54}Fe
^{60}Co	1173,00	99,85	5,27 yıl	372,20	^{60}Ni
	1332,00	99,98	5,27 yıl	372,20	

Enerji ve verim kalibrasyonu için 81-1332 keV arasında değişen enerjilerde ^{109}Cd , ^{57}Co , ^{133}Ba , ^{54}Mn , ^{137}Cs ve ^{60}Co ' ın piklerini içeren standart disk kaynaklar kullanıldı. An Eckert & Ziegler Company firmasından satın alınan standart kaynaklar kullanılmıştır. Standart kaynaklara ait bilgiler Tablo 2,1'de verilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan HPGe gama detektörüne ait enerji ve verim kalibrasyon eğrileri Şekil 2.4 ve de Şekil 2.5'de verilmiştir.



Şekil 2.4. HPGe gama detektörüne ait enerji kalibrasyon eğrisi

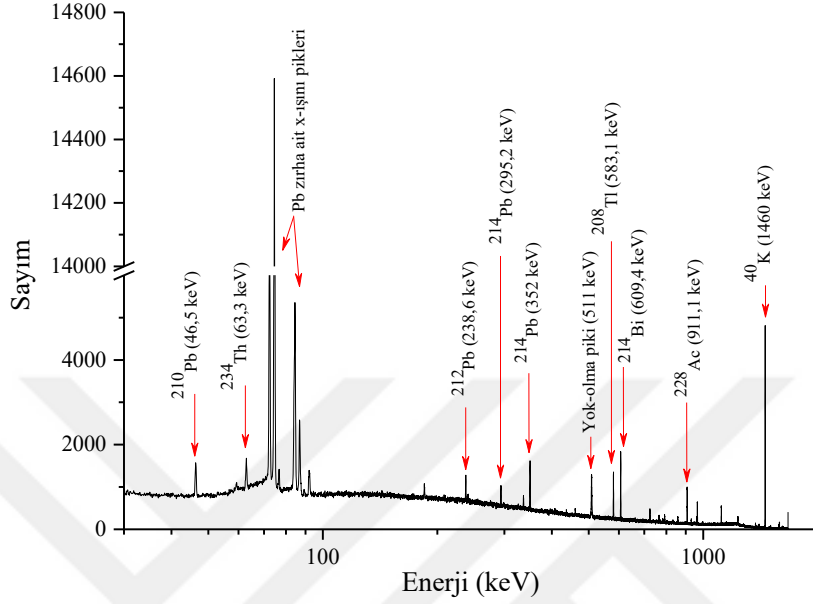


Şekil 2.5. HPGe gama detektörüne ait verim kalibrasyon eğrisi

2.1.4. Spektrum Analizi

HPGe detektörünün verim ve enerji kalibrasyonları yapıp ölçümlere hazır hale getirildikten sonra radyoaktivite ölçümleri yapıldı. Tek tek her bir örnek için 80.000 saniye

sürede ölçümler yapılarak spektrumlar elde edildi. S6 nolu sigara örneğine ait spektrum Şekil 2,6'da görülmektedir.



Şekil 2.6. S6 kodlu sigara örneğine ait gama spektrumu

Ölçümler sonucunda elde edilen spektrumlar Ortec firmasının geliştirdiği Gama Vision-32 V6.07 spektroskopi yazılımı kullanılarak analiz edildi. Spektrumların analizi sonunda ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K radyoizotoplarının aktivite konsantrasyonları tespit edildi.

^{238}U ve ^{232}Th çekirdekleri alfa parçacıkları yayınlamaya başlayarak bozunurlar ve çok uzun yarı ömre sahiptirler. Bundan dolayı gama spektroskopisi kullanılarak iki çekirdeğin numune içindeki aktivite konsantrasyonu doğrudan belirlenemez. Bu sebeple Uranyum ve Toryum aktivitelerini belirlemek için bozunma zincirleri içindeki radyoaktif ürünlerin bozunumları dikkate alınır. Zincir içindeki radyoaktif dengenin sağlanmasıyla ürün çekirdeğin aktivitesi ana çekirdeğin aktivitesine eşitlenir. Uranyum ve Toryum serisine ait birden fazla ürün çekirdeğinin bozunumu dikkate alınarak belirlenmiş olan aktivite değerlerinin doğruluğu kontrol edilir. ^{40}K çekirdeği Uranyum ve Toryum çekirdeklerine nazaran daha küçük yarı ömürlüdür ve beta bozunumunu takip eden gama ışını yayınladığından aktivite konsantrasyonu doğrudan belirlenebilir. Buna dayanarak, ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K aktivite konsantrasyonlarını belirlemek için oluşmuş olan spektrumlarda, Tablo 2,2'de verilen enerjilerde meydana gelen pikler kullanıldı.

Tablo 2.2. Aktivitesi hesaplanan radyoaktif çekirdekler

İzotop		Gama enerjisi (keV)	Salma hızı (%)
²³⁸ U	²¹⁰ Pb	46,5	4,25
	²¹⁴ Pb	295,2	18,50
	²¹⁴ Pb	352,0	35,10
	²¹⁴ Bi	609,4	43,49
²³² Th	²¹² Pb	238,6	43,60
	²⁰⁸ Tl	583,1	30,60
	²²⁸ Ac	911,1	25,80
⁴⁰ K	-	1460	10,66

2.1.5. Hesaplamalar

2.1.5.1. Aktivite (A)

Spektrumların analizi sonucunda elde edilen bilgiler ve literatürde mevcut yarı-deneysel model kullanılarak ²³⁸U, ²³²Th ve ⁴⁰K aktivite konsantrasyonları hesaplandı. Bu modele göre aktivite konsantrasyonu,

$$A = \frac{N}{\varepsilon_{\gamma} p_{\gamma} m t} \quad (17)$$

denklemini kullanılarak hesaplanır. Burada, N ilgili gama pikinin net pik alanıdır ve toplam pik alanından arka-plan alanının çıkarılması ile elde edilir. ε_{γ} ilgili gama enerjisinde detektörün verimi, p_{γ} radyoaktif çekirdeğin ilgili enerjide foton salma hızı ya da yayınlama olasılığı, t sayım süresi ve m ise numune kütlesidir. Aktivite konsantrasyonundaki belirsizlikler,

$$\Delta A = A \left[\left(\frac{\Delta N_t}{N_t} \right)^2 + \left(\frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} \right)^2 + \left(\frac{\Delta p_{\gamma}}{p_{\gamma}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta m}{m} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (18)$$

eşitliği ile belirlenir. Burada, ΔA aktivitedeki belirsizlik, ΔN_t sayım hızındaki, $\Delta \varepsilon$ verimdeki, Δp_{γ} gama ışını salma hızındaki ve Δm numune miktarındaki belirsizliktir (Mohery vd.,2014).

2.1.5.2. Radyum Eşdeğer Aktivitesi (Ra_{eq})

^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın spesifik konsantrasyonlarını belirlemek için radyasyon riskini hesaba katan ortak bir radyolojik indeks tanımlanmıştır. Bu indeks radyum eşdeğer aktivitesi olarak adlandırılır ve aşağıdaki gibi yazılır (UNSCEAR, 2000).

$$Ra_{eq} = A_U + (1,43)A_{Th} + (0,077)A_K \quad (19)$$

2.1.5.3. Absorbe Edilen Doz Oranı (D)

Tütün ve sigara numunelerindeki radyonüklidlerin varlığına bağlı olarak toplam hava emilim doz oranı D (nGy h^{-1}) aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmıştır. Bu denklem tütün örneklerindeki radyonüklidlerin konsantrasyonlarını ölçmek amacıyla yerden 1,0 m yükseklikte havada absorbe edilmiş doz oranını hesaplamak için türetilmiştir (UNSCEAR, 2000).

$$D = (0,462)A_U + (0,604)A_{Th} + (0,042)A_K \quad (20)$$

Burada, A_U , A_{Th} ve A_K sırasıyla ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın aktivite konsantrasyonlarıdır (UNSCEAR, 2000).

2.1.5.4. Yıllık Etkin Doz (AED)

Yıllık etkin doz, bir yıl boyunca her organın veya dokunun doğasını hesaba katarak hem iç hem de dış radyasyonun değişen seviyeleri ve türlerine bağlı olarak hesaplanan doz toplamıdır (Akinyose vd., 2017).

Sigara tütünündeki radyoizotopun yaklaşık %75'i içine çekilerek akciğer dokularına bırakılan sigara dumanında, yaklaşık %25'i de sigara filtresi ve külünde tutulur (Akinyose vd., 2017).

Sigara içen yetişkinler için yıllık etkin doz miktarları, ^{238}U için doz dönüşüm katsayısı $2,9 \times 10^{-6} \text{ Sv.Bq}^{-1}$, ^{232}Th için doz dönüşüm katsayısı $4,5 \times 10^{-5} \text{ Sv.Bq}^{-1}$ ve ^{40}K için

doz dönüşüm katsayısı olan $2,1 \times 10^{-9}$ Sv.Bq⁻¹ göz önüne alınıp aşağıda verilen denklem kullanılarak hesaplandı (ICRP, 2012).

$$AED = (0,75) \times M_T \times A \times F \quad (21)$$

Burada, M_T (kg.y⁻¹) kütle cinsinden yıllık tüketilen tütün miktarı (günde 20 adet sigara içen bir kişinin yıllık tükettiği tütün miktarı yaklaşık 5,110 kg), A (Bq.kg⁻¹) radyonüklid konsantrasyonları ve F (Sv.Bq⁻¹) doz dönüşüm katsayısıdır (Akinyose vd., 2017).

2.1.5.5. Tahmini Kanser Riski (ELRC)

Sigara içen yetişkinler için tahmini kanser riski aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır.

$$ELRC = AED \times DL \times RF \quad (22)$$

Burada, AED yıllık etkin doz, DL ortalama yaşam süresi (tahmini 70 yıl) ve de RF (Sv⁻¹) Sievert başına kanser riskini ifade eder ve ICRP' de genel olarak 0.05 alınmaktadır (Akinyose vd., 2017).

2.2. Ağır Metal Analizi

S1, S2, S3 ve S4 kodlu sigaraların ve T1 kodlu tütün örneklerinin ağır metal analizleri Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Merkezi araştırma Laboratuvarı Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde bulunan EDXRF (Epsilon5, PANalytical, Almelo, the Netherlands) cihazı kullanılarak gerçekleştirildi (Şekil 2.7).



Şekil 2.7. Epsilon5, PANalytical EDXRF cihazı

Epsilon5 EDXRF sistemi, sahip olduğu üç boyutlu polarize optik geometrisi, gelişmiş x ışını tüpü ve Ge detektörü ile diğer sistemlerden farklı olarak periyodik tabloda yer alan orta ağırlıktaki elementlerle beraber tüm ağır elementlerin analizi için yeterli performansa sahiptir.

3. BULGULAR

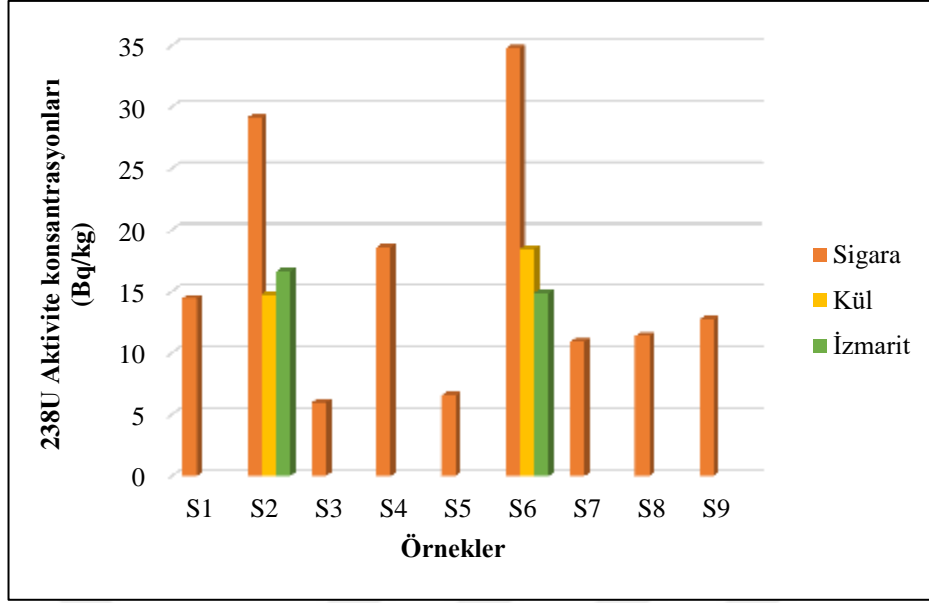
3.1. Radyoaktivite Sonuçları

Sigara, tütün, kül ve izmarit örnekleri için yapılan ölçümler sonucunda ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K çekirdeklerinin aktivite konsantrasyonları Tablo 3.1' de sunulmuştur.

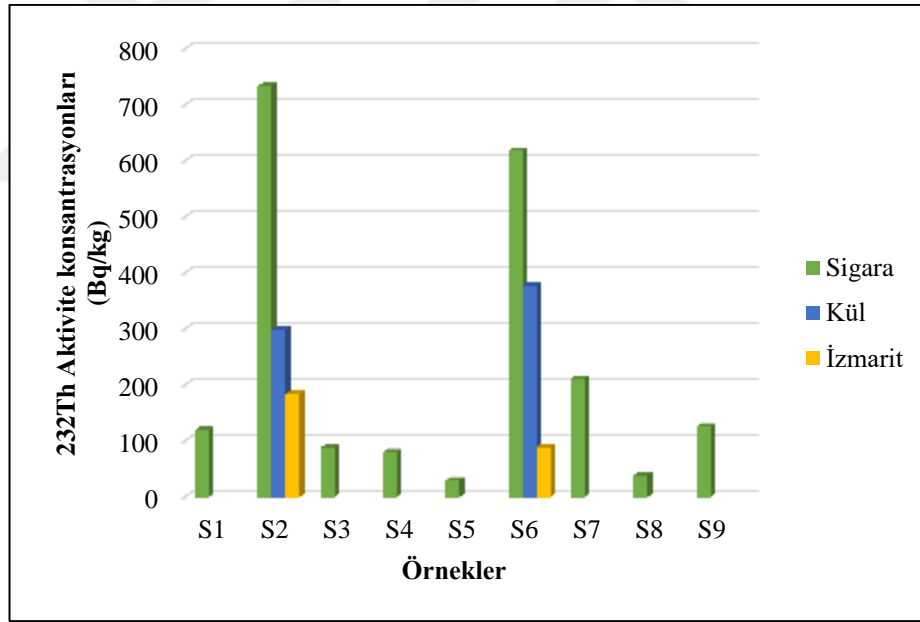
Tablo 3.1. Radyoaktivite konsantrasyonları (Bq/kg)

Örnek Kodu	^{238}U	^{232}Th	^{40}K
S1	14,45 ± 1,15	27,33 ± 1,41	119,30 ± 5,60
S2	29,11 ± 2,42	46,67 ± 2,89	733,90 ± 22,10
S3	5,97 ± 1,02	16,13 ± 1,17	88,10 ± 3,40
S4	18,58 ± 1,22	16,77 ± 1,22	79,60 ± 3,12
S5	6,53 ± 1,00	15,93 ± 1,18	29,40 ± 2,61
S6	34,75 ± 2,03	41,77 ± 2,52	618,70 ± 19,30
S7	10,90 ± 1,05	7,30 ± 1,00	211,10 ± 10,97
S8	11,38 ± 1,01	17,97 ± 1,15	39,30 ± 3,34
S9	12,73 ± 1,02	23,23 ± 1,27	125,90 ± 5,29
T1	7,35 ± 1,00	16,27 ± 1,14	69,40 ± 5,62
T2	8,50 ± 1,00	15,10 ± 1,40	347,60 ± 17,73
K1	14,75 ± 1,13	19,57 ± 1,45	299,80 ± 16,30
K2	18,47 ± 1,15	23,93 ± 1,52	377,30 ± 18,25
I1	16,62 ± 1,12	8,83 ± 1,00	183,80 ± 12,84
I2	14,90 ± 1,03	17,27 ± 1,21	88,50 ± 9,15

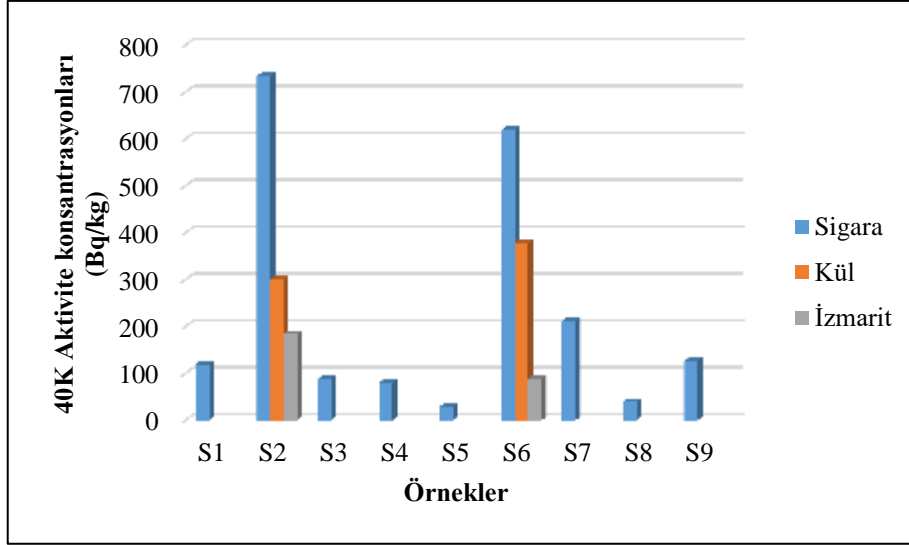
^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K aktivite konsantrasyonlarının sigara örneklerine göre dağılımı Şekil 3.(1-3)'te verilmiştir. Dağılımlarda aynı markaya ait S2-K1-I1 ve S6-K2-I2 kodlu sigara, izmarit ve kül örnekleri grafiklerde beraber gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Örneklerin ^{238}U aktivite konsantrasyonlarının dağılımı



Şekil 3.2. Örneklerin ^{232}Th aktivite konsantrasyonlarının dağılımı



Şekil 3.3. Örneklerin ⁴⁰K aktivite konsantrasyonlarının dağılımı.

²³⁸U, ²³²Th ve ⁴⁰K aktivite konsantrasyonu ölçülen sigara ve tütün örneklerinin içilmesi sonunda hesaplanan doz değerleri ve kansere yakalanma risk oranları Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2. Doz değerleri ve kansere yakalanma risk oranları

Örnek Kodu	Ra _{eq} (Bq/kg)	D (nGy/h)	AED (mSv/y)	ELRC
S1	62,72	28,19	4,87	0,017
S2	152,36	72,46	8,30	0,029
S3	35,82	16,20	2,84	0,009
S4	48,69	22,05	3,10	0,010
S5	31,57	13,87	2,82	0,009
S6	142,12	67,26	7,59	0,026
S7	37,59	18,31	1,38	0,005
S8	40,10	17,76	3,22	0,011
S9	55,64	25,20	4,15	0,014
T1	35,96	16,14	2,88	0,010
T2	56,86	27,65	2,70	0,009

3.2. Ağır Metal Analiz Sonuçları

Epsilon5 EDXRF sistemi ile yapılan, dört farklı markaya ait sigara ve bir tütün örneğinin ağır metal analizinde Mg, Al, Si, P, S, Cl, Ca, K, Fe, Ti, Mn, Cr, Cu, Ni, Zn, As, Br, Rb, Sr, Zr, I, Ba, Hf, Pb gibi bileşikler ve elementler belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 3.3' de sunulmuştur.

Tablo 3.3. Sigara ve tütün örneklerinin ağır metal analiz sonuçları

	Birim	S1	S2	S3	S4	T1
Mg	%	0,85	0,79	0,91	0,87	1,01
Al	%	1,89	1,80	1,93	1,94	3,18
Si	%	0,75	0,84	0,82	0,62	1,24
P	%	0,74	0,85	0,80	0,74	0,35
S	%	1,20	1,19	1,56	1,34	1,34
Cl	%	1,62	1,16	1,35	2,02	4,52
K	%	15,02	17,42	13,77	15,87	14,64
Ca	%	13,71	12,88	14,78	13,52	20,11
Fe	%	0,47	0,48	0,52	0,42	0,52
Ti	ppm	1118,82	1249,13	1095,17	954,28	875,97
Cr	ppm	69,17	83,06	68,94	60,55	50,69
Mn	ppm	1272,56	1220,92	1505,57	1122,34	366,36
Ni	ppm	18,69	22,44	34,05	25,64	20,18
Cu	ppm	137,90	123,91	143,50	135,21	88,05
Zn	ppm	244,16	280,96	281,12	261,91	125,09
As	ppm	1,00	ND	ND	1,38	ND
Br	ppm	614,25	264,33	439,52	422,17	146,34
Rb	ppm	120,86	129,98	132,68	94,78	30,80
Sr	ppm	699,00	678,39	694,60	668,57	589,90
Zr	ppm	97,55	95,45	65,28	56,79	ND
I	ppm	28,77	ND	27,33	24,58	ND
Ba	ppm	187,88	181,98	162,82	153,56	175,91
Hf	ppm	27,76	23,42	34,63	19,38	36,35
Pb	ppm	23,08	96,27	15,45	26,74	17,41

ND: Dedekte edilemedi.

4. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Türkiye'deki marketlerde satılan tütün ve tütün ürünlerindeki radyoizotopların tayini için yapılan bu çalışmada numunelerin elemental konsantrasyonları ve radyonüklid konsantrasyonları ölçülmüştür. Tütünün yetiştiği toprak, sulama suyu, kullanılan gübre çeşitleri gibi birçok faktör elemental konsantrasyonlarını ve radyonüklid konsantrasyonlarını etkilemektedir.

Tablo 3.1'de görüldüğü gibi, T1 ve T2 kodlu tütün örnekleri için ^{238}U konsantrasyonu sırasıyla, $7,35 \pm 1,00 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ve $8,50 \pm 1,00 \text{ Bq.kg}^{-1}$ olarak ölçülmüştür. Yine T1 ve T2 nolu tütün örnekleri için ^{232}Th konsantrasyonu sırasıyla, $16,27 \pm 1,14 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ve $15,10 \pm 1,40 \text{ Bq.kg}^{-1}$ olarak ölçülmüştür. ^{40}K konsantrasyonu ise T1 ve T2 nolu tütün örnekleri için sırasıyla, $69,40 \pm 5,62 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ve $347,6 \pm 17,73 \text{ Bq.kg}^{-1}$ olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlara göre T1 nolu numunede ^{232}Th konsantrasyonu yüksek değerde iken T2 nolu numunede ^{238}U ve ^{40}K konsantrasyonu yüksek değerde ölçülmüştür.

Sigara tütün örneklerinde, en yüksek ^{238}U konsantrasyonu $34,75 \pm 2,03 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ile S6 nolu örnekte, en düşük ^{238}U konsantrasyonu $5,97 \pm 1,02 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ile S3 nolu örnekte belirlenmiştir. En yüksek ^{232}Th konsantrasyonu $46,67 \pm 2,89 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ile S2 nolu örnekte, en düşük ^{232}Th konsantrasyonu ise $7,30 \pm 1,00 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ile S7 nolu örnekte belirlenmiştir. En yüksek ^{40}K konsantrasyonu $733,90 \pm 22,10 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ile S2 nolu örnekte ve en düşük ^{40}K konsantrasyonu $29,4 \pm 2,61 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ile S5 nolu örnekte belirlenmiştir. Sigara örnekleri için bulduğumuz değerlere göre ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K radyoaktivite konsantrasyon değerleri dünyadaki diğer çalışmalarda elde edilen sonuçlarla uyumaktadır.

K1 ve K2 nolu sigara külü örnekleri için ^{238}U konsantrasyonu sırasıyla, $14,75 \pm 1,13 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ve $18,47 \pm 1,15 \text{ Bq.kg}^{-1}$ olarak ölçülmüştür. K1 ve K2 nolu sigara külü örnekleri için ^{232}Th konsantrasyonu sırasıyla, $19,57 \pm 1,45 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ve $23,93 \pm 1,52 \text{ Bq.kg}^{-1}$ olarak ölçülmüştür. ^{40}K konsantrasyonu ise yine K1 ve K2 nolu sigara külü örnekleri için sırasıyla, $299,8 \pm 16,30 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ve $377,3 \pm 18,25 \text{ Bq.kg}^{-1}$ olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlara göre K2 nolu örnekte ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K konsantrasyonu yüksek değerlerde iken K1 nolu örnekte ise düşük değerlerde ölçülmüştür.

I1 ve I2 nolu sigara izmariti örnekleri için ^{238}U konsantrasyonu sırasıyla, $16,62 \pm 1,12 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ve $14,90 \pm 1,03 \text{ Bq.kg}^{-1}$ olarak ölçülmüştür. I1 ve I2 nolu sigara izmariti örnekleri için ^{232}Th konsantrasyonu sırasıyla, $8,83 \pm 1,00 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ve $17,27 \pm 1,21 \text{ Bq.kg}^{-1}$

olarak ölçülmüştür. ^{40}K konsantrasyonu ise yine I1 ve I2 nolu sigara izmariti örnekleri için sırasıyla, $183,3 \pm 12,84 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ve $88,5 \pm 9,15 \text{ Bq.kg}^{-1}$ olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlara göre I1 nolu örnekte ^{238}U ve ^{40}K konsantrasyonu yüksek değerlerde iken I2 nolu örnekte ^{232}Th konsantrasyonu yüksek değerde ölçülmüştür.

Sigara örneklere ait ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K aktivite konsantrasyonlarının dağılımı Şekil 3.(1-3)'te verilmiştir.

Radyum eşdeğeri aktivite indeksi, sigara ürünleri için ortalama $67,40 \text{ Bq kg}^{-1}$ ' dir. Tütün ürünleri için $46,41 \text{ Bq kg}^{-1}$. Bu değerler önerilen 370 Bq kg^{-1} (UNSCEAR, 2000) sınırından düşüktür. Bu nedenle ciddi bir sağlık riski oluşturmadığı tespit edilmiştir.

Yaptığımız hesaplamalara göre, günde 20 adet sigara içen bir kişinin içtiği sigaradan dolayı yerden 1 m yükseklikteki havada absorbe edilen doz oranı değerleri S2 ve S6 kodlu sigara markalarında, önerilen 57 nGy h^{-1} (UNSCEAR, 2000) limitine kıyasla daha yüksektir. Ölçümü yapılan diğer sigara markaları için absorbe edilen doz oranı limit değerinin altındadır. Bu nedenle, S2 ve S6 kodlu ürünlerin tüketimi sağlık riski oluşturabilirken, diğer ürünlerin tüketimi ciddi bir sağlık riski oluşturmaz.

Yaptığımız hesaplamalara göre, günde 20 adet sigara tüketmek ortalama $4,25 \text{ mSv y}^{-1}$ 'lik yıllık etkin doza neden olmaktadır. Aynı oranda tütün ürünlerini tüketmekse ortalama $2,79 \text{ mSv y}^{-1}$ 'lik yıllık etkin doza neden olmaktadır. Bu değer önerilen $1,260 \text{ mSv y}^{-1}$ (UNSCEAR, 2000) olan sınır değerinden daha yüksektir. Bu nedenle sigara ve tütün tüketimi, ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K radyonüklidlerin solunmasıyla, akciğer dokularında ve vücuttaki diğer kritik organlarda birikir, daha sonra iç radyasyon dozu ve tütün ürünleri tüketicilerinde gözlenen akciğer kanseri ve diğer ilgili radyasyon hastalıkları vakalarının sayısında bir artışa katkıda bulunur.

Yaptığımız hesaplamalara göre, günde 20 adet sigara içenler için ortalama olarak tahmini yaşam boyu kanser riski 0,014 ve aynı miktarda tütün tüketenler için 0,0095 dir. Hesaplanan tüm değerler önerilen 0,004 (UNSCEAR, 2000) sınırından daha yüksektir. Bu durum tütün ürünlerini tüketen ve pasif içici olan kişiler için ciddi bir kanser riski oluşturur.

EDXRF ile yapılan, dört farklı markaya ait sigara ve bir tütün numunesinin analizinde Mg, Si, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Fe, Ti, Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, As, Br, Rb, Sr, Zr, I, Ba, Hf, Pb gibi elementler belirlenmiştir. Analizi yapılan numunelerin tümünde Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Fe, Mn, Ti, Cr, Ni, Zn, Cu, Br, Rb, Sr, Ba, Hf, Pb elementine rastlanmıştır.

Tablo 3.3’de görüldüğü gibi, en yüksek Mg konsantrasyonu %1,01 ile T1 nolu numunede, en düşük Mg konsantrasyonu %0,79 ile S2 nolu numunede ölçülmüştür. En yüksek Al konsantrasyonu %3,18 ile T1 nolu numunede, en düşük Al konsantrasyonu %1,80 ile S2 nolu numunede ölçülmüştür. En yüksek Si konsantrasyonu %1,24 ile T1 nolu numunede, en düşük Si konsantrasyonu %0,62 ile S4 nolu numunede ölçülmüştür. En yüksek P konsantrasyonu %0,85 ile S2 nolu numunede, en düşük P konsantrasyonu %0,35 ile T1 nolu numunede ölçülmüştür. En yüksek S konsantrasyonu %1,56 ile S3 nolu numunede, en düşük S konsantrasyonu %1,19 ile S2 nolu numunede ölçülmüştür. En yüksek Cl konsantrasyonu %4,52 ile T1 nolu numunede, en düşük Cl konsantrasyonu %1,16 ile S2 nolu numunede ölçülmüştür. En yüksek K konsantrasyonu %17,42 ile S2 nolu numunede, en düşük K konsantrasyonu %13,77 ile S3 nolu numunede ölçülmüştür. En yüksek Ca konsantrasyonu %20,11 ile T1 nolu numunede, en düşük Ca konsantrasyonu %12,88 ile S2 nolu numunede ölçülmüştür. En yüksek F konsantrasyonu %0,52 ile T1 nolu numunede, en düşük F konsantrasyonu %0,42 ile S4 nolu numunede ölçülmüştür. En yüksek Ti konsantrasyonu 1249,13 ppm ile S2 nolu numunede, en düşük Ti konsantrasyonu 875,97 ppm ile T1 nolu numunede ölçülmüştür. En yüksek Cr konsantrasyonu 83,06 ppm ile S2 nolu numunede, en düşük Cr konsantrasyonu 50,69 ppm ile T1 nolu numunede ölçülmüştür. En yüksek Mn konsantrasyonu 1505,57 ppm ile S3 nolu numunede, en düşük Mn konsantrasyonu 366,36 ppm ile T1 nolu numunede ölçülmüştür. En yüksek Ni konsantrasyonu 34,05 ppm ile S3 nolu numunede, en düşük Ni konsantrasyonu 18,69 ppm ile S1 nolu numunede ölçülmüştür. En yüksek Cu konsantrasyonu 143,50 ppm ile S3 nolu numunede, en düşük Cu konsantrasyonu 88,05 ppm ile T1 nolu numunede ölçülmüştür. En yüksek Zn konsantrasyonu 281,12 ppm ile S3 nolu numunede, en düşük Zn konsantrasyonu 125,09 ppm ile T1 nolu numunede ölçülmüştür. As ise S1 ve S4 nolu numunelerde tespit edilmiş olup bunların konsantrasyonu sırasıyla, 1 ppm ve 1,38 ppm olarak ölçülmüştür. En yüksek Br konsantrasyonu 614,25 ppm ile S1 nolu numunede, en düşük Br konsantrasyonu 146,34 ppm ile T1 nolu numunede ölçülmüştür. En yüksek Rb konsantrasyonu 132,68 ppm ile S3 nolu numunede, en düşük Rb konsantrasyonu 30,80 ppm ile T1 nolu numunede ölçülmüştür. En yüksek Sr konsantrasyonu 699 ppm ile S1 nolu numunede, en düşük Sr konsantrasyonu 589,90 ppm ile T1 nolu numunede ölçülmüştür. Zr, S1,S2,S3 ve S4 nolu numunelerde tespit edilmiş olup bunların konsantrasyonu sırasıyla, 97,55 ppm, 95,45 ppm, 65,28 ppm, 56,79 ppm olarak ölçülmüş, T1 nolu numunede ise Zr’ a rastlanmamıştır. I, S1,

S3 ve S4 nolu numunelerde tespit edilmiş olup bunların konsantrasyonu sırasıyla, 28,77 ppm, 27,33 ppm ve 24,58 ppm olarak ölçülmüş, S2 ve T1 nolu numunelerde ise tespit edilememiştir. En yüksek Ba konsantrasyonu 187,88 ppm ile S1 nolu numunede, en düşük Ba konsantrasyonu 153,56 ppm ile S4 nolu numunede ölçülmüştür. En yüksek Hf konsantrasyonu 36,35 ppm ile T1 nolu numunede, en düşük Hf konsantrasyonu 19,38 ppm ile S4 nolu numunede ölçülmüştür. Son olarak en yüksek Pb konsantrasyonu 96,27 ppm ile S2 nolu numunede ve en düşük Pb konsantrasyonu 15,45 ppm ile S3 nolu numunede ölçülmüştür.

Sonuç olarak; tütün numunelerindeki ortalama toplam ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K konsantrasyonu sigara numunelerindeki ortalama toplam ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K konsantrasyonuna göre daha düşük değerlere sahiptir. Bunun nedeni sigara tütününe eklenen kimyasallar olabilir.

Hesaplanan tahmini yıllık etkin dozlara göre sigaradan alınan radyasyon dozunun tütünden alınan radyasyon dozuna oranla daha yüksek olduğu görülüyor. Yine hesaplanan tahmini kanser riski sonuçlarına göre sigara içen yetişkinlerin tütün içen yetişkinlere göre kansere yakalanma riski daha yüksektir.

Endüstriyel ürünlerin imalinde kullanılan ağır metaller sebebiyle insanoğlunun ağır metallere maruz kalma oranı son yıllarda ciddi bir biçimde artış göstermiştir. Tarımda, ürünlerin gübrenmesi ve tarım ilaçlarının daha çok kullanımı topraktaki toksik elementlerin oranını arttırmıştır. Kadmiyum, arsenik, nikel, kurşun ve bakır bu toksik elementlerden en önemlileridir. Fosforlu gübrelerin kullanımı ile bu gübrelerin hammaddelerinde olan ağır metaller de toprağa ulaşmaktadır (Köleli ve Kantar, 2006) .

Tütün bitkisi topraktan aldığı besleyici maddelerin miktarı göz önüne alındığında gübrelemeye ihtiyaç duyulan bir bitkidir. Tütünün ihtiyacı olan besin, tabii ya da suni gübrelerle karşılanabilir. Bu yüzden tütün tarımında kullanılan gübrenin çeşidi ve ne kadar kullanılacağına tespiti önemlidir.

5. ÖNERİLER

Çalışma, daha fazla sigara ve tütün marka ve türleri kullanılarak yapılırsa istatistiki açıdan daha kayda değer sonuçlar elde edilebilir. Ayrıca sigara tüketiminden dolayı insana geçen radyonüklid miktarını tahmin etmek amacıyla deneysel modeller oluşturarak tahmini doz ve risk hesaplamaları için yöntemler geliştirilebilir.



6. KAYNAKLAR

- Abd El-Aziz, N., Khater, A. E. M. ve Al-Sewaidan, H. A., 2005. Natural Radioactivity Contens in Tobacco. *International Congress Serriess*, 1276, 407-408.
- Ağuş, Y., 2016. Sigara tütününün doğal ve yapay radyoaktivitesinin belirlenmesi, *SAÜ Fen Bil Der*, 20, 3, 559-563.
- Akinyose, F. C., Tchokossa, P., Orosun M. M., Mark I. B., Ochommadu K. K. ve Oluyide S., 2017. Radiological Impacts of Natural Radioactivity in Locally Produced Tobacco Products in Oyo State, Nigeria. *J. Phys Chemistry & Biophysics*, 7,262.
- Atakan, Y., 2006. Sigara Tiryakilerinin Aldığı Radyasyon Dozu ve Kanser Riski? Tütündeki Radyoaktivite. *Tübitak Bilim ve Teknik Dergisi*, Temmuz.
- Colangelo, C. H., Huguet, M. R., Palacios, M. A. ve Oliveira, A. A.,1992. Levels of 210Po in some beverages and in tobacco. *J. Radioanal. Nucl. Chem. Lett*, 166, 195–202.
- Evcı, M., 2001. Sigaranın İnsan Sağlığı ve Çevre Üzerindeki Etkilerinin Üzerlik Bitkisi ile Azaltılmasının Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Gilmore, G. R., 2008. *Practical Gamma-ray Spectrometry*. John Wiley&Sons.
- IARC, 2004. World Healty Organization International Agency for Research on cancer. IARC Monographs on the Evaluation of Carrinogenic Risk to Humans. Tobacco Smoke and Involuntary Smoking. 83. France, Lyon.
- ICRP, 1977. Recommendations of the ICRP. ICRP Publication 26. Ann. ICRP 1, 3.
- ICRP, 2012. Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60. ICRP Publication 119. Ann. ICRP 41, Suppl.
- Karalı, T., Ölmez Ş. ve Yener G., 1996. Study of spontaneous deposition of 210Po on various metals and application for activity assessment in cigarette smoke, *Appl. Radiat. Isot.* 47, 4, 409-411.
- Katsanevakis, S., Petropoulos, N. P., Hinis, E.P. ve Simopoulos, S.E., 1996. Natural radioactivity content of greek cigarette , *Environment International*, 22, I, 375-377.
- Köleli, N. ve Kantar, Ç., 2006. Fosforlu Gübrelerde Ağır Metal Tehlikesi. *Ekoloji Dergisi*, 9, 1-5.
- Khater, A.E., 2004. Polonium-210 budget in cigarettes. *J. Environ. Radioactivity*, 71.33–41.

- Krane, S., K., 1988. Introductory Nuclear Physics, Canada.
- Krane, S., K., 2001. Nükleer Fizik 1. Cilt Ders Kitabı, Birinci Baskı, Palme Yayın Dağıtım LTD. ŞTİ., (Edit: Şarer, B.),
- Kubalek, D., Sersa, G., Strok, M., Benedik, L. ve Jeran, Z., 2016. Radioactivity of cigarettes and the importance of ^{210}Po and thorium isotopes for radiation dose assessment due to smoking, Slovenia. J. Environmental Radioactivity 155-156, 97-104.
- Lansberger, L' Annunziata, M. F., 2012. Handbook of Radioactivity Analysis. Elsevier Inc.
- Mandic, L. J., Đolic, M., Markovic, D., Todorovic, D., Onjia, A. ve Dragovic, S., 2016. Natural radionuclides in cigarette tobacco from serbian market and effective dose estimate from smoke inhalation, Radiation Protection Dosimetry, 168, 1, 111–115.
- Mohery, M., Baz, S., Kelany A. M. ve Abdullah, A. M., 2014. Environmental radiation levels in soil and sediment samples collected from floating water from a land runway resulting from heavy rains in the Jeddah region, KSA. Radiation Physics and Chemistry, 97, 16-24. DOI: 10. 1016/j.radphyschem.2013.10.007
- Papastefanou, C., 2001. Radioactivity in tobacco leaves, J. Environmental Radioactivity, 53 67-73.
- Papastefanou, C., 2009. Radioactivity of Tobacco Leaves and Radiation Dose Induced from Smoking Int. J. Environ. Res. Public Health.
- Peres, A. C., Hiromoto, G., 2002. Evaluation of ^{210}Pb and ^{210}Po in cigarette tobacco produced in Brazil, J. Environmental Radioactivity, 62 115– 119.
- Skwarzec, B., Ulatowski, J., Struminska, D. I. ve Borylo, A., 2001. Inhalation ^{210}Po and ^{210}Pb from cigarette smoking in Poland, J. Environmental Radioactivity, 57, 221-230.
- Solmaz, A., N., 2008. Düşük Seviyeli Radyoaktivite Ölçümü İçin Kuyu-Tipi Ge Detektörlü Bir Gama Spektrometresinin 40-2000 keV Enerji Aralığında Verim Kalibrasyonunun Yapılması, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü, Ankara.
- TAEK, <http://www.taek.gov.tr/ogrenci/r05.htm> Radyasyon Kaynakları. 26 Şubat 2018.
- Takizawa, Y., Zhang, L. ve Zhao, L., 1994. ^{210}Pb and ^{210}Po in tobacco with a special focus on estimating the doses to man. J. Radioanal. Nucl. Chem, 182, 119–125.
- Tsoufanidis, N., Landsberger, S. 2015. Measurement and Detection of Radiation (4 th Edition) Taylor&Francis Group, New York, 1-543.

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR),
Sources and Effects of Ionizing Radiation, Report of the United Nations
Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation to the General
Assembly, United Nations, NY, USA, 2000.

URL-1, <https://tr.wikipedia.org/wiki/Tütün>, 12 Haziran 2018.

URL-2, <http://www.amatem.org/sigara/sigaranin-icindeki-kimyasal-zararli-maddeler/>, 12
Aralık 2018.



ÖZGEÇMİŞ

19.10.1971 tarihinde Giresun ili Görele ilçesinde doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Giresun Görele ilçesinde tamamladı. 1987 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümünde lisans eğitimine başladı. 2013 yılında lisans eğitimini tamamladıktan sonra, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı. İlkay YILMAZ evli ve bir çocuk annesidir.

