



T.C.  
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**Yüksek Lisans Tezi**

**ÇEŞİTLİ GIDA ÜRÜNLERİNDE  $^{210}\text{Po}$  AKTİVİTE  
KONSANTRASYONLARININ ALFA SPEKTROMETRESİ  
KULLANILARAK BELİRLENMESİ**

**Esra KAYA**

**Fizik Anabilim Dalı**

**Nükleer Fizik Programı**

**DANIŞMAN  
Prof. Dr. Latife ŞAHİN YALÇIN**

**Ağustos, 2020**

**İSTANBUL**

Bu çalışma, 14.08.2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Fizik Anabilim Dalı, Nükleer Fizik Programında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

### Tez Jürisi

Prof. Dr. Latife ŞAHİN YALÇIN(Danışman)  
İstanbul Üniversitesi  
Fen Fakültesi

Prof. Dr. Ela GANİOĞLU NUTKU  
İstanbul Üniversitesi  
Fen Fakültesi

Doç. Dr. Arzu ÇİLLİ  
Yıldız Teknik Üniversitesi  
Fen-Edebiyat Fakültesi

## **İntihal Programı Beyanı**

20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi’nin aboneli olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

## **Proje Destekleri**

--

## **Tezden Üretilmiş Yayınların Künye Bilgileri**

--

## ÖNSÖZ

Lisans dönemimden bu yana her konu ve koşulda desteğini gördüğüm, bilgi ve tecrübelerinden istifade ettiğim, yol göstericiliği ile yolumu aydınlatan, çok büyük saygı ve sevgi duyduğum, öğrencisi olduğum için kendimi şanslı hissettiğim, değerli danışman hocam sayın Prof. Dr. Latife ŞAHİN YALÇIN'a en içten dileklerle minnet ve teşekkürlerimi sunarım.

Lisans dönemimden bu güne kadar desteğini hiçbir zaman esirgemeyen sayın hocam Prof. Dr. Ela GANİOĞLU NUTKU'ya bana kattıkları için çok teşekkür ederim.

Tez çalışmamın deneysel sürecinde laboratuvarlarını kullanmama olanak tanıyan Moleküler Biyoloji ve Genetik Bölümü öğretim üyelerinden sayın Prof. Dr. Sabriye PERÇİN ÖZKORUCUKLU hocama çok teşekkür ederim.

Bilgi ve tecrübelerini her daim paylaşan, birçok konuda desteğini gördüğüm Araş. Gör. Dr. Nurgül HAFIZOĞLU ALKAN'a her şey için teşekkür ederim.

Tez çalışmamın deneysel sürecinde olan yardımları için Öğr. Gör. Gizem YILDIRIM BAŞTEMUR'a teşekkür ederim.

Hayatımın her alanında maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, aldığım her kararda yanımda olan canım aileme bu süreçte olan desteklerinden dolayı çok teşekkür ederim.

Ağustos 2020

Esra KAYA

# İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ .....	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ŞEKİL LİSTESİ .....	vii
TABLO LİSTESİ.....	ix
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ.....	x
ÖZET .....	xiii
SUMMARY .....	xiv
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
<b>2. GENEL KISIMLAR.....</b>	<b>6</b>
2.1 RADYASYON.....	6
2.2. RADYASYON ÇEŞİTLERİ.....	8
2.2.1. İyonlaştırıcı Radyasyon .....	8
2.2.2. İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyon .....	15
2.3. RADYOAKTİVİTE .....	16
2.3.1. Radyoaktif Bozunma Kanunu .....	17
2.3.2. Radyoaktif Bozunma Zinciri .....	19
2.3.3. Radyoaktif Denge .....	21
2.3.4. Radyoaktivite ve Radyasyon Doz Birimleri.....	25
2.4. RADYASYON KAYNAKLARI .....	27
2.4.1. Doğal Radyasyon Kaynakları.....	28
2.4.2. Yapay Radyasyon Kaynakları .....	29
2.5. RADYOAKTİF SERİLER.....	30
2.5.1. Toryum Serisi .....	31
2.5.2. Uranyum Serisi .....	32
2.5.3. Aktinyum Serisi.....	33
2.5.4. Neptünyum Serisi .....	34
2.6. RADYASYONUN BİYOLOJİK ETKİLERİ .....	35
2.7. <sup>210</sup> Po'UN GENEL ÖZELLİKLERİ.....	36
2.7.1. <sup>210</sup> Po'un Kaynakları.....	37
2.7.2. <sup>210</sup> Po'un İnsan Vücuduna Giriş Yolları .....	38

2.7.3. Bitkilerde ve Gıdalarda $^{210}\text{Po}$ .....	39
2.7.4. $^{210}\text{Po}$ 'un Biyolojik Etkileri .....	40
2.8. ALFA BOZUNMASI.....	41
2.9. ALFA SPEKTROSKOPİ.....	42
2.9.1 İyon İmplantı Edilmiş Detektörler.....	44
<b>3. MALZEME VE YÖNTEM.....</b>	<b>45</b>
3.1. GIDA ÖRNEKLERİNİN TOPLANMASI .....	45
3.2. ÖRNEKLERİN ANALİZ İÇİN HAZIRLANMASI.....	47
3.2.1. Kimyasal Ayırma İşlemi.....	48
3.3. ÇALIŞMADA KULLANILAN ALFA SPEKTROSKOPİ SİSTEMİ.....	53
3.3.1 Kullanılan Cihaz.....	53
3.3.2 Detektör Kalibrasyonu.....	56
3.3.3. Gıda Örneklerinde $^{210}\text{Po}$ Aktivite Konsantrasyon Hesabı.....	58
<b>4. BULGULAR.....</b>	<b>61</b>
4.1. GIDA ÖRNEKLERİNDE ELDE EDİLEN AKTİVİTE KONSANTRASYON DEĞERLERİ.....	61
4.2. GIDA ÖRNEKLERİNDE HESAPLANAN YILLIK ETKİN İÇSEL DOZ DEĞERLERİ.....	64
<b>5. TARTIŞMA VE SONUÇ .....</b>	<b>67</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>71</b>
<b>EKLER .....</b>	<b>76</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>77</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa No
Şekil 2.1: Nükleer kararlılık eğrisi [11].	7
Şekil 2.2: Radyasyon çeşitleri.	8
Şekil 2.3: RBE ile LET değeri arasındaki ilişki [10].	10
Şekil 2.4: Alfa bozunması [15].	11
Şekil 2.5: Beta-eksi bozunması [17].	12
Şekil 2.6: Beta-artı bozunması [17].	13
Şekil 2.7: Elektron yakalama [17].	13
Şekil 2.8: Gama bozunumu [15].	14
Şekil 2.9: İyonlaştırıcı radyasyonun giricilikleri [19].	15
Şekil 2.10: Elektromanyetik spektrum [20].	16
Şekil 2.11: $^{32}\text{P}$ çekirdeğinin dakika başına bozunumunun lineer olarak değişimi [21].	19
Şekil 2.12: C çekirdeğinin kararlı olduğu durumda çekirdek sayılarının değişimi [10].	21
Şekil 2.13: Anne çekirdek ve kız çekirdeği arasında kalıcı denge durumu [23].	22
Şekil 2.14: Anne çekirdeği ve kız çekirdeği arasındaki geçici denge durumu [23].	24
Şekil 2.15: Anne çekirdek ve kız çekirdek arasında denge olmaması durumu [23].	25
Şekil 2.16: Radyasyon kaynakları ve yüzdeleri [25].	28
Şekil 2.17: Toryum ( $^{232}\text{Th}$ ) Serisi [14].	31
Şekil 2.18: Uranyum ( $^{238}\text{U}$ ) Serisi [14].	32
Şekil 2.19: Aktinyum ( $^{235}\text{U}$ ) Serisi [14].	33
Şekil 2.20: Neptünyum ( $^{237}\text{Np}$ ) Serisi [14].	34
Şekil 2.21: $^{210}\text{Po}$ çekirdeğinin bozunum şeması [35].	37
Şekil 2.22: Alfa Bozunumu [43].	41
Şekil 2.23: Tipik bir alfa spektrometre sistemi [46].	43

Şekil 3.1: Gıda örneklerinin temin edildiği iller. ....	46
Şekil 3.2: Gıda örneklerinin kurutulması. ....	48
Şekil 3.3: Kimyasal süreç için hazır hale getirilen gıda örnekleri. ....	48
Şekil 3.4: (a) Kullanılan çeker ocak,(b) sindirme işlemi, (c) H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> eklenmiş durum.....	50
Şekil 3.5: Kullanılan gümüş disk ve disk tutacağı (holder). ....	51
Şekil 3.6: (a) ve (b) Gümüş disk ve baklanın behere yerleştirilmesi, (c) Diskin döndürülmesi. ....	52
Şekil 3.7: Depozisyon işlemi sonrası sayım için hazır hale getirilen gümüş disk. ....	52
Şekil 3.8: İstanbul Üniversitesi Nükleer Fizik Araştırma Laboratuvarı'ndaki Alfa Spektroskopi Sistemi. ....	53
Şekil 3.9: Alpha Duo-Ortec iyon implante edilmiş yarı iletken detektör. ....	54
Şekil 3.10: Diskin detektöre yerleştirilmesi. ....	55
Şekil 3.11: Alfa spektrometre sisteminde bulunan vakum sistemi. ....	56
Şekil 3.12: Kalibrasyon için kullanılan karışık alfa kaynağı. ....	57
Şekil 3.13: Kalibrasyon için kullanılan çekirdeklere ait pikler. ....	58
Şekil 3.14: Elde edilen bir spektrum ve gözlenen pikler. ....	59
Şekil 4.1: Gıda örneklerinde elde edilen <sup>210</sup> Po aktivite konsantrasyon değerleri. ....	63
Şekil 4.2: Elde edilen <sup>210</sup> Po aktivite konsantrasyon değerlerinin illere göre dağılımı. ....	63
Şekil 4.3: Gıda örneklerinin yıllık etkin içsel doz değerleri. ....	66
Şekil 4.4: Yıllık etkin içsel doz değerlerinin illere göre dağılımı. ....	66

## TABLO LİSTESİ

	Sayfa No
<b>Tablo 2.1:</b> Atomik bileşenlerin temel özellikleri ( $e = 1.6022 \times 10^{-19}$ C, $1 u = 1.6605 \times 10^{-27}$ kg ) [10].	6
<b>Tablo 2.2:</b> Radyasyon türlerinin ağırlık faktörleri [14].	10
<b>Tablo 2.3:</b> Radyasyon doz birimleri.	27
<b>Tablo 3.1:</b> Gıda örneklerinin gruplandırılması.	47
<b>Tablo 4.1:</b> Gıda örneklerindeki $^{210}\text{Po}$ aktivite konsantrasyon değerleri.	62
<b>Tablo 4.2:</b> Elde edilen yıllık etkin içsel doz oranları.	65
<b>Tablo 5.1:</b> Elde edilen ortalama aktivite konsantrasyon değerinin diğer çalışmalar ile karşılaştırılması.	68
<b>Tablo 5.2:</b> Elde edilen ortalama yıllık etkin içsel doz oranının diğer çalışmalar ile karşılaştırılması.	68

## SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
$\alpha$	: Alfa
$\beta$	: Beta
$\gamma$	: Gama
$\beta^-$	: Beta-Eksi Bozunması
$\beta^+$	: Beta-Artı Bozunması
$e^+$	: Pozitron
$e^-$	: Elektron
$\epsilon$	: Elektron Yakalama
$\gamma$	: Gama
$n$	: Nötron
$\nu$	: Nötrino
$^{210}\text{Po}$	: Polonyum-210 çekirdeği
$^{209}\text{Po}$	: Polonyum-209 çekirdeği
$^{238}\text{U}$	: Uranyum-238 çekirdeği
$^{232}\text{Th}$	: Toryum-232 çekirdeği
$^{206}\text{Pb}$	: Kurşun-206 çekirdeği
$^{210}\text{Pb}$	: Kurşun-210 çekirdeği
$Z$	: Atom numarası
$N$	: Nötron sayısı
$t_{1/2}$	: Yarı ömür
$\tau$	: Ortalama yaşam süresi
$\lambda$	: Bozunma sabiti
$\lambda_A$	: A çekirdeklerinin bozunma sabiti
$\lambda_B$	: B çekirdeklerinin bozunma sabiti
$A_A$	: A çekirdeklerinin aktivitesi
$A_B$	: B çekirdeklerinin aktivitesi
$\text{HNO}_3$	: Nitrik asit
$\text{HCl}$	: Hidroklorik asit
$\text{H}_2\text{O}_2$	: Hidrojen peroksit

$A_{O_S}$	: $^{210}\text{Po}$ 'un aktivitesi
$A_{O_T}$	: $^{209}\text{Po}$ 'un başlangıç aktivitesi
$K_T$	: $^{209}\text{Po}$ çekirdeği için bozunma düzeltme faktörü
$K_S$	: $^{210}\text{Po}$ çekirdeği için bozunma düzeltme faktörü
$N_S$	: $^{210}\text{Po}$ çekirdeğinin foto piki altında kalan alan
$N_T$	: $^{209}\text{Po}$ çekirdeğinin fotopiki altında kalan alan

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
<b>Bq</b>	: Becquerel
<b>mBq</b>	: Milibecquerel
<b>Ci</b>	: Curie
<b>Gy</b>	: Grey
<b>J</b>	: Joule
$^{\circ}\text{C}$	: Santigrat derece
<b>MeV</b>	: Mega Elektron Volt
<b>kV</b>	: Kilovolt
<b>eV</b>	: Elektronvolt
<b>V</b>	: Volt
<b>Sv</b>	: Sievert
$\mu\text{Sv}$	: Mikro Sievert
$\mu\text{Sv y}^{-1}$	: Yıl başına mikrosievert
$\text{kg y}^{-1}$	: Yıl başına kilogram
$^{\circ}\text{C}$	: Santigrat derece
<b>K</b>	: Kelvin
<b>m</b>	: Metre
$\mu\text{m}$	: Mikrometre
<b>cm</b>	: Santimetre
<b>FWHM</b>	: Yarı Yükseklikteki Tam Genişlik (Full Width at Half Maximum)
<b>AED</b>	: Yıllık Etkin Doz (Annual Effective Dose)
<b>preamp</b>	: Ön yükselteç (preamplifier)
<b>amp</b>	: Yükselteç (amplifier)
<b>ADC</b>	: Analog Dijital Dönüştürücü (Analog Digital Converter)
<b>MCA</b>	: Çok Kanallı Analizör (Multi Channel Analyzer)
<b>Pb</b>	: Kurşun

<b>Po</b>	: Polonyum
<b>Ra</b>	: Radyum
<b>Rn</b>	: Radon
<b>SI</b>	: Uluslararası Birim Sistemi
<b>TAEK</b>	: Türkiye Atom Enerjisi Kurumu
<b>U</b>	: Uranyum
<b>LET</b>	: Lineer Enerji Transferi
<b>RBE</b>	: Bağıl biyolojik etkinlik
<b>UNCEAR</b>	: Birleşmiş Milletler Atomik Radyasyonun Etkileri Bilimsel Komitesi (The United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation)
<b>dpm</b>	: Dakikada meydana gelen bozunma
<b>dps</b>	: Saniye meydana gelen bozunma

## ÖZET

# ÇEŞİTLİ GIDA ÜRÜNLERİNDE $^{210}\text{Po}$ AKTİVİTE KONSANTRASYONLARININ ALFA SPEKTROMETRESİ KULLANILARAK BELİRLENMESİ

## YÜKSEK LİSANS TEZİ

Esra KAYA

İstanbul Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Danışman : Prof. Dr. Latife ŞAHİN YALÇIN

$^{238}\text{U}$  bozunum serisi ürünlerinden olan radyoaktif  $^{210}\text{Po}$  çekirdeği alfa ışınları yaparak kararlı  $^{206}\text{Pb}$  çekirdeğine bozunmaktadır. Radyoaktif zehirlenmesi oldukça yüksek olan  $^{210}\text{Po}$ , çeşitli yollardan ve gıda ürünlerinden insanlara geçmektedir. Vücuda alındığı takdirde organizmaları ışınlayabilmekte ve ciddi sağlık sorunlarına neden olmaktadır.

Bu çalışmada günlük tüketilen gıdalarda bulunan  $^{210}\text{Po}$  çekirdeğinin aktivite konsantrasyonlarının ve yıllık etkin içsel doz oranlarının hesaplanması amaçlanmıştır. Günlük beslenme rutinleri göz önünde bulundurularak çeşitli illerden, farklı koşullarda yetişen farklı gıda rnemleri toplanmıştır. Her bir gıda rneği radyo kimyasal yöntemler kullanılarak hazırlandıktan sonra alfa spektrometre sistemi kullanılarak  $^{210}\text{Po}$  çekirdeğinin aktivite konsantrasyonları ölçülmüş ve yıllık etkin içsel doz oranları hesaplanmıştır.

Çalışmadan elde edilen değerler, literatürde yer alan benzer çalışma sonuçları ve UNSCEAR tarafından belirlenmiş olan sınır değerleri ile karşılaştırılmıştır.

Ağustos 2020, 91 sayfa.

**Anahtar kelimeler:** Polonyum-210, Alfa spektroskopi, Radyoaktivite, Gıda.

## SUMMARY

### DETERMINATION OF $^{210}\text{Po}$ ACTIVITY CONCENTRATIONS BY USING ALPHA SPECTROMETER IN VARIOUS FOOD PRODUCTS

#### M.Sc. THESIS

Esra KAYA

İstanbul University

Institute of Graduate Studies in Sciences

Department of Physics

**Supervisor : Prof. Dr. Latife ŞAHİN YALÇIN**

The radioactive  $^{210}\text{Po}$  which is from products of  $^{238}\text{U}$  decay series decays to stable  $^{206}\text{Pb}$  by alpha radiation.  $^{210}\text{Po}$ , which has very high radioactive poisoning, passes through to people from various ways and food products. If it is taken into the body, it can irradiate organisms and cause serious health problems.

In this study, it is aimed to calculate activity concentrations and annual effective dose rates of  $^{210}\text{Po}$  element in daily consumed foods. Taking into consideration the daily feeding routines, food samples were collected from different provinces and provinces in different conditions. After each food sample was prepared by radiochemical methods, activity concentrations of  $^{210}\text{Po}$  nucleus were measured using alpha spectrometer system and annual effective dose rates were calculated. The values obtained from the study were compared with the results of similar studies in the literature and the limit values determined by UNSCEAR.

August 2020, 91 pages.

**Keywords:** Polonium-210, Alpha spectroscopy, Radioactivity, Food.

## 1. GİRİŞ

Tüm canlı ve cansız varlıklar direkt ya da dolaylı yollardan radyasyona maruz kalmaktadır. Radyasyon hayatımızın her alanında yer almaktadır. Maruz kalınan radyasyonun kaynakları genel olarak bilinse de birçoğunun farkında bile olunmamaktadır. Günümüzde radyasyon tıbbi ve teknolojik olarak kullanımda fayda ve kolaylık sağlamakla birlikte, sağlık açısından olumsuz etkilere de neden olabilmektedir. Maruz kalınan radyasyon çeşidine ve maruz kalınan süreye bağlı olarak oluşabilecek etkiler farklılık göstermektedir.

Evrenin oluşumundan itibaren doğada var olan doğal radyonüklidler, vücudumuzda doğuştan itibaren var olan dâhili radyasyon ve atmosferden yeryüzüne ulaşan kozmik ışınlar doğal radyasyona sebep olurken, tıbbi uygulamalarda ve tüm nükleer çalışma ve denemelerde kullanılan radyoizotoplar, bu çalışmalardan etrafa sızan radyoaktif serpintiler ise yapay radyasyonu oluşturmaktadır.

Doğal ve yapay radyoaktif çekirdekler, atmosferde, kara ve su ortamlarında çevresel radyasyonun kaynağını oluşturmaktadır. Radyoaktif çekirdekler ve bunların bozunma ürünleri ise toprak, kayalar, gıda maddeleri, su ve hava gibi çevresel ortamlarda bulunmakta, alfa, beta ve gama radyasyonları ile organizmaları ışınlamaktadır. Dolayısıyla bizler de sindirim ve solunum yoluyla radyasyona maruz kalmaktayız. Radyasyon, madde üzerinde meydana getirdiği etkilere bağlı olarak iyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan şekilde çeşitlendirilmektedir. İyonlaştırıcı radyasyon hücrelere nüfuz etme, DNA ve canlı dokuyu değiştirebilecek enerjiye sahiptir. Bu da ciddi sağlık sorunlarına neden olabilmektedir.

U-238, U-235 ve Th-232 doğal radyoaktif çekirdeklerdir. Yarılanma ömürleri çok fazla olan bu çekirdekler kararsız yapıdadırlar. Çeşitli ışımalar yaparak kararsız radyoaktif çekirdeklere bozunurlar. Bu bozunma seri olarak devam etmektedir. Bu çekirdekler ve bozunum ürünleri olan çekirdekler bozunum serilerini oluşturmaktadır. Radyoaktif serilerde yer alan bozunma ürünleri doğal radyonüklidlerdir. Radyoaktif serilerdeki tüm ürünler alfa, beta ve gama ışınları yaparak kararlı radyoizotoplara ulaşana kadar bozunmalar yapmaktadır.

$^{210}\text{Po}$  (Polonyum-210),  $^{238}\text{U}$  (Uranyum-238) bozunum serisi ürünlerindedir. Doğal radyoaktif çekirdektir.  $^{210}\text{Po}$  5,3 MeV enerjili alfa parçacıkları yayınlarak iyonlaştırıcı radyasyona

neden olmaktadır.<sup>210</sup>Po çekirdeği yüksek bozunma hızına sahiptir ve radyoaktivitesi oldukça yüksektir. Bu nedenle <sup>210</sup>Po'un mg hatta µg gibi küçük miktarları bile sağlık açısından çok ciddi olumsuz etkiler oluşturmaya yeterlidir [1].

<sup>210</sup>Po birçok yiyecek ve bitkide de bulunmaktadır. <sup>210</sup>Po insan vücudunda doğuştan doğal bir şekilde bulunmakla birlikte, gıdaların tüketimi ile de vücuda geçebilmektedir. Yapılan çalışmaya göre ise, yetişkin bir insanın vücudunda bulunan <sup>210</sup>Po'un %77,3'lük kısmı yiyeceklerden, %4,7'si sudan, %0,6'sı havadan ve %17,4'lük kısmı da sigaradan vücuda geçmektedir [2]. Bu çalışmaya da istinaden insan vücuduna alınan <sup>210</sup>Po'nun ana kaynağı tüketilen gıdalardır.

Bitkilere radyonüklidler yağış ile birlikte yüzeysel depozisyon, topraktan kökler ile alım veya topraktan bitkiye direkt geçiş şeklinde gerçekleşebilmektedir. [3].Radyonüklidlerin insanlara geçişi bitkilerin tüketilmesi ile direkt olarak, bitkileri tüketen hayvanlardan elde edilen ürünlerin tüketilmesi ile dolaylı olarak gerçekleşebilmektedir. Aynı zamanda havadaki radyonüklidlerin solunumu şeklinde de olmaktadır.

Ülkemizde ve dünyada günlük olarak tüketilen gıda ürünlerinde <sup>210</sup>Po konsantrasyon oranları ve aktivitesi belirlenmiş, bu yolla insanların maruz kaldığı yıllık etkin doz oranları hesaplanmıştır. Bu konuda yapılan bazı çalışmalar ve sonuçları aşağıda yer almaktadır.

İtalya'da yerel gıda pazarından alınan ve ithal edilen toplam 25 bebek maması analiz edilerek <sup>210</sup>Po aktivite konsantrasyonları hesaplanmıştır. Ürünler pirinç/tahıl kreması (3 adet), homojen olarak karıştırılarak elde edilmiş mamalar (3 adet meyve,3 adet balık, 4 adet et, 2 adet peynir içeren) ve süt tozu (10 adet) şeklinde üç gruba ayrılmıştır. <sup>210</sup>Po aktivitelerini belirlemek için alfa spektrometre sistemi kullanılmıştır. Elde edilen değerler karışık gıdalardan oluşan mamada  $0.02 \pm 0.02$  Bq/kg, süt tozunda  $0.09 \pm 0.05$  Bq/kg ve tahıl grubunda  $0.05 \pm 0.01$  Bq/kg şeklindedir [4].

Polonya'da yapılan bir çalışmada, ekolojik ve geleneksel tarım yöntemleri olmak üzere iki farklı şekilde yetişen sebze-meyvelerde ve tahıl ürünlerinde <sup>210</sup>Po aktivite konsantrasyonları belirlenmiştir. Çalışmada aktivite değerleri kimyasal depozisyon işleminin ardından alfa spektrometresi kullanılarak belirlenmiştir. Sebze-meyve grubunda en yüksek değerler frenk üzümünde gözlenmiştir. Ekolojik tarımla yetişen üzümde  $0,66 \pm 0,02$  Bq/kg, geleneksel tarımla elde edilen üzüm de ise  $1,72 \pm 0,07$  Bq/kg değerleri elde edilirken, en düşük değerler

ise tatlı patates ve lahanada gözlenmiştir. Tahıl grubunda en yüksek değerler buğday makarnasında  $0,31 \pm 0,01$  Bq/kg, çavdar makarnasında ise  $0,20 \pm 0,01$  Bq/kg olarak elde edilirken, en düşük değerler mısır unu ve kırmızı mercimekte saptanmıştır [5].

Yeni Zelanda'da 103 gıda ürünü üzerinde kapsamlı bir çalışma yapılarak ürünlerdeki  $^{210}\text{Po}$  aktivite konsantrasyonları hesaplanmıştır. Aktivite değerleri kimyasal depozisyonun ardından alfa spektrometresi kullanılarak belirlenmiştir. Genel olarak karasal ürünlerden elde edilen sonuçlar  $0,04 - 0,05$  Bq/kg aralığındadır. Örnek vermek gerekirse sebze ve meyvelerdeki değerler  $0,02 - 0,08$  Bq/kg aralığında, unda  $0,02$  Bq/kg, makarnada  $0,04$  Bq/kg, yumurtada  $0,040$  Bq/kg olarak belirlenirken analiz edilen 53 numunede  $^{210}\text{Po}$  aktivite değerleri gözlenememiştir. En yüksek aktivite değeri ise baharat karışımından oluşan bir örnekte  $2,486$  Bq/kg olarak hesaplanmıştır [6].

Hindistan'da deniz ürünleri, sedimentler ve karada yetişen gıdalardan numuneler toplanarak  $^{210}\text{Po}$  aktivite konsantrasyonları ve yıllık etkin doz oranları hesaplanmıştır. Çalışma 60 midye, 24 deniz ürünü ve 72 karasal gıda örneği üzerinde gerçekleştirilmiştir. Elektrokimyasal depozisyon yöntemi ile alfa spektrometre sistemi kullanılarak aktivite konsantrasyonları belirlenmiştir. Çalışmada elde edilen aktivite konsantrasyon değerleri muzda  $0,04 \pm 0,01$  Bq/kg, domateste  $0,06 \pm 0,02$  Bq/kg, pirinçte  $0,21 \pm 0,04$ , hindistan cevizinde  $0,04 \pm 0,01$  Bq/kg, balıkta  $1,20 \pm 0,10$ , midyede  $320,00 \pm 18,1$  Bq/kg, karideste  $53,97 \pm 3,7$  Bq/kg şeklinde hesaplanmıştır. Çalışmada halkın günlük beslenme rutini göz önünde bulundurularak numuneler bu doğrultuda seçilmiştir. Çalışma sonucunda öngörülen toplam yıllık etkin doz oranı  $2245,34 \times 10^{-3}$  mSv/yıl olarak belirlenmiştir [7].

İtalya'da ise kırmızı ve beyaz şarapta  $^{210}\text{Po}$  aktivite konsantrasyonları belirlenerek efektif doz değeri hesaplanmıştır. Çalışmada kimyasal depozisyon ve alfa spektrometre sistemi kullanılmıştır. Aktivite değerleri kırmızı şarapta  $0,06 \pm 0,03$  Bq/L, beyaz şarapta  $0,03 \pm 0,02$  Bq/L olarak hesaplanmıştır. Yıllık etkin doz değeri ise  $2,68 \times 10^{-2} - 4,91 \times 10^{-2}$  mSv/yıl olarak hesaplanmıştır [8].

Ege Bölgesi'nin Küçük Menderes Havzası'nda tarım yapılan ve yapılmayan 8 farklı tarladan bitki ve 9 farklı tarladan toprak örneği alınarak  $^{210}\text{Po}$  ve  $^{210}\text{Pb}$  aktivite konsantrasyonları belirlenmiştir. Ayrıca çalışmada gübre kullanımının konsantrasyonlara olan etkileri de incelenmiştir. Tarım yapılmayan bölgelerden alınan örneklerdeki konsantrasyon değerleri

daha yüksektir. Tarım yapılan alanlarda, yapılan sulama ve toprağın sürülmesi işlemleri nedeniyle toprakta var olan radyonüklidlerin derinlere indiği için bu alanlarda aktivite konsantrasyon değerlerinin daha düşük olduğu düşünülmektedir. Çalışmada en yüksek değer semizotunda gözlenirken, turpta dedekte edilebilir  $^{210}\text{Po}$  çekirdeğine ait değerlere rastlanamamıştır. Elde edilen değerler başlıca semizotunda 9,40 Bq/kg, 6,85 Bq/kg ve 5,66 Bq/kg, ısırgan otunda 7,12 Bq/kg, 4,33 Bq/kg ve 2,87 Bq/kg, brokolide 5,16 Bq/kg, marulda 4,42 Bq/kg, 3,69 Bq/kg, 1,27 Bq/kg ve 0,27 Bq/kg, lahanada 0,25 Bq/kg, pırasada 0,18 Bq/kg şeklindedir [3].

Karalı'nın yaptığı çalışmada yerli ve ithal sigaraların tütün, izmarit ve kül içeriklerinde bulunan  $^{210}\text{Po}$  aktivite konsantrasyonları belirlenmiştir. Çalışmada elektrodpozisyon yöntemi uygulanmış ve sintilasyon alfa detektörü olan ZnS(Ag) detektörü kullanılmıştır. Çalışma sonucunda ise, artan sanayileşmenin etkisi ile tarım topraklarında daha fazla kullanılmaya başlanan fosfat içerikli gübrelerin, tütün yetiştiriciliğinde de kullanılmasının sigarada bulunan  $^{210}\text{Po}$  aktivitesine etkisinin olduğu düşünülmektedir [1].

Marshall Adaları'ndaki farklı atollerde yaşayan toplumlar tarafından tüketilen birçok yerel gıdada  $^{210}\text{Po}$  ve  $^{210}\text{Pb}$  aktivite konsantrasyonları belirlenmiştir. Çalışma deniz ve karasal gıda örneklerini içermektedir.  $^{210}\text{Po}$  aktivite konsantrasyonları kimyasal işlemlerin ardından alfa spektrometre yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. İthal gıda örneklerinde  $^{210}\text{Po}$  aktivitesi 0,03 -1,50 Bq/kg arasında değişirken, yöresel gıdalarda (genellikle hayvansal gıda ve deniz ürünleri) 0,30 - 55,70 Bq/kg arasındadır. Adada  $^{210}\text{Po}$  aktivitesi ithal ve lokal olmak üzere toplamda günlük 2,18 Bq/gün olurken, yıllık 796 Bq/yıl olarak belirlenmiştir. Çalışmada  $^{210}\text{Po}$  ve  $^{210}\text{Pb}$  alımına bağlı olarak öngörülen yıllık etkin doz oranı  $\sim 2\text{mSv/yıl}$  olarak hesaplanmıştır. Bu değerler halkın aldığı arka plan radyasyon değerinin %83'üne tekabül etmektedir [9].

Yapılan çalışmalar ve araştırmalar göstermektedir ki insanlar, tükettikleri gıdalar aracılığıyla bir miktar  $^{210}\text{Po}$ 'a maruz kalmaktadır. Gıdalarda bulunan  $^{210}\text{Po}$  miktarı, ürünün yetiştirme şekli, yeri ve iklime bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Beslenme şekli, yüksek oranda  $^{210}\text{Po}$  içeren ürünlerin tüketim miktarı ve sıklığına bağlı olarak maruz kalınan doz oranı ve yıllık etkin içsel doz oranları değişmektedir.

Değişen iklimler, kirlenen doğa ve artan kanser oranları nedeniyle insan sağlığı üzerinde yapılan ve yapılacak olan çalışmalar daha da önemli hale gelmiştir. İnsan sağlığını tehdit eden her durum hassasiyetle araştırılmalı, elde edilen hiçbir sonuç göz ardı edilmemelidir.

Bu tez çalışmasında Türkiye'nin farklı bölgelerinden ve farklı gıda türlerinden toplam 30 gıda örneği toplanmıştır. Toplanan gıda örnekleri gerekli ön hazırlıklar gerçekleştirildikten sonra örneklerde bulunan  $^{210}\text{Po}$  aktivite konsantrasyonları alfa spektroskopi yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Ardından insanların maruz kaldıkları yıllık etkin içsel doz oranları hesaplanmıştır. Sonuçlar yapılmış olan diğer çalışma sonuçları ve UNSCEAR raporunda yer alan sınır değerleri karşılaştırılmıştır.



## 2. GENEL KISIMLAR

### 2.1 RADYASYON

Maddenin en küçük yapı taşı olan atom, merkezinde bir çekirdek ve çekirdeğin etrafındaki yörüngelerde dizili olan elektronlardan oluşmaktadır. Çekirdek ise nükleon adı verilen proton ve nötronlardan meydana gelmektedir. Proton sayısı  $Z$  ile gösterilmekte ve çekirdeğin küle numarasını oluşturmaktadır. Nötron sayısı  $N$  ile ifade edilmektedir. Proton ve nötronların toplamı olan nükleon sayısı ise  $A$  ile ifade edilmektedir. Atom, elektron ve proton sayısı birbirine eşit olduğu için yüksüzdür. Elektron sayısı da  $Z$  ile verilmektedir. Yüksüz bir atom  ${}^A_ZX_N$  şeklinde gösterilmektedir.

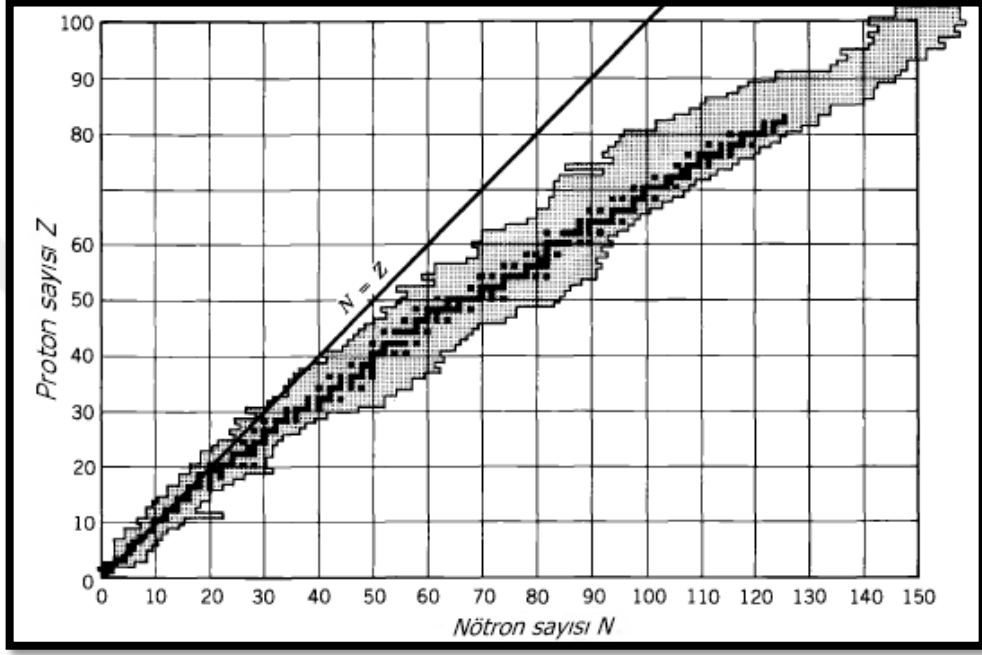
**Tablo 2.1:** Atomik bileşenlerin temel özellikleri ( $e = 1.6022 \times 10^{-19}$  C,  $1 u = 1.6605 \times 10^{-27}$  kg ) [10].

	Yük	Kütle (u)	Spin	Manyetik moment (J/K)
proton	e	1.007276	$\frac{1}{2}$	$1.411 \times 10^{-26}$
nötron	0	1.008665	$\frac{1}{2}$	$-9.66 \times 10^{-27}$
elektron	-e	0.000549	$\frac{1}{2}$	$9.28 \times 10^{-24}$

Kararlı bir çekirdekte proton ve nötron belli bir oranda bulunmaktadır. Bu proton/nötron oranı herhangi birinin azlığı ya da çokluğu durumunda bozulduğunda çekirdek kararsız yapıya geçmektedir. Kararsız durumda olan çekirdek çok fazla enerjiye sahiptir. Bir takım ışımlar yaparak, daha düşük enerji seviyelerine geçip daha kararlı hale gelme eğilimindedir. Çekirdeğin yapmış olduğu radyoaktif ışımlar 'radyasyon' olarak adlandırılır. Kararsız durumda olan çekirdeklere ise 'radyoaktif çekirdek' olarak tanımlanmaktadır. Çekirdek kararlı yapıya ulaşana kadar ışıma yapmaya devam etmektedir.

Çekirdeğin kararsız yapısı proton ya da nötron fazlalığından kaynaklanmaktadır. Şekil 2.1 'de yer alan kararsızlık eğrisinde çekirdekler proton ve nötron sayılarına göre gösterilmiştir. Çekirdek içerisinde bulunan nükleonlar bir takım kuvvetler ile etkileşmektedirler. Aynı zamanda çekirdek içerisinde nükleonlar belirli bir bağlanma enerjisi ile bir arada

bulunmaktadırlar. Kararsız çekirdekte ise nükleonların bağlanma enerjisi olması gereken minimum değerden çok daha fazladır. Bu fazla enerji çekirdekteki kararsızlık hangi nükleon fazlalığından kaynaklanıyorsa ışınlar yoluyla az sayıda olana dönüştürülmektedir. Protonu nötrona ya da nötronu protona dönüştürerek fazla enerjiden kurtulan çekirdek kararlı yapıya geçmektedir [10].



**Şekil 2.1:** Nükleer kararlılık eğrisi [11].

Şekil 2.1'de koyu renk kararlı çekirdekleri, açık renk ise bilinen radyoaktif çekirdekleri göstermektedir.

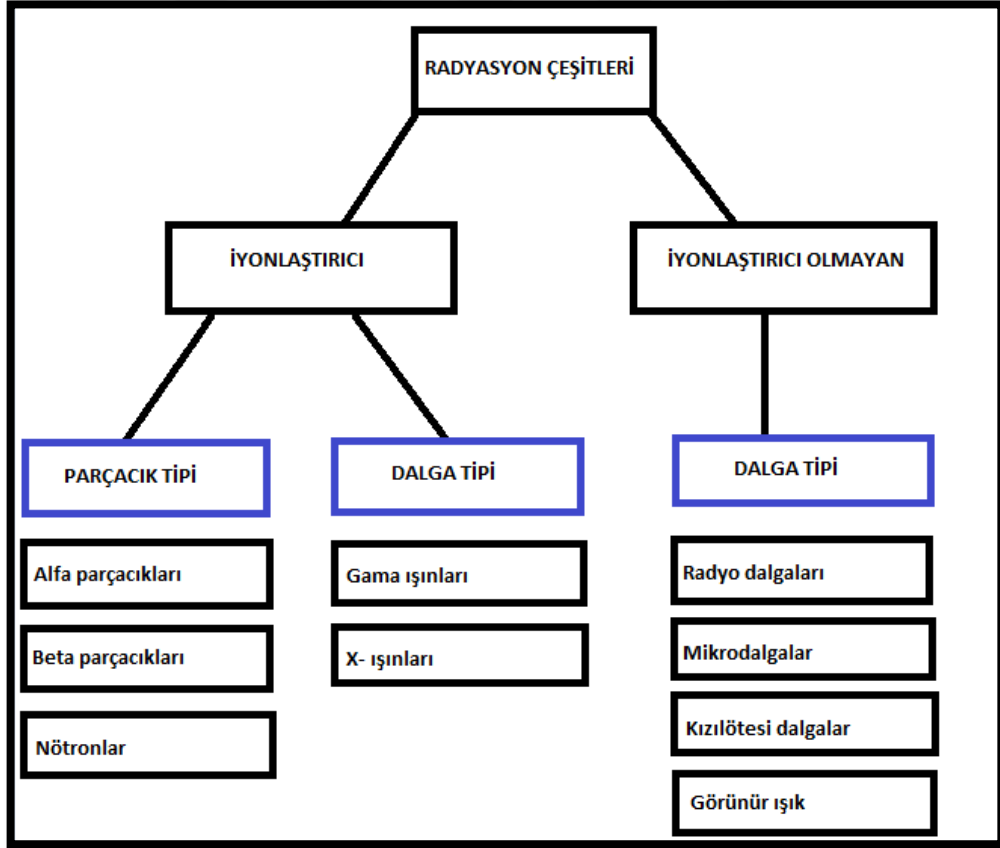
Radyasyonun keşif süreci 1895 yılında Wilhelm Röntgen'in X-ışınlarını bulması ile başlamaktadır. 1896 yılında Henri Becquerel'in uranyum tuzları ve fotoğraf plakaları kullanarak yaptığı çalışma ile devam etmektedir. Becquerel yaptığı çalışmada uranyum tuzlarının X-ışınlarına benzer şekilde ışınlar yayınladığını gözlemlemiştir. Böylece 'iyonize radyasyon' keşfedilmiştir. Devam eden süreçte ise Pierre ve Marie Curie uranyum kullanarak yaptıkları çalışmalarda, uranyumun kendiliğinden ışımaya yaptığını gözlemleyerek Polonyum ve Radyum elementlerini keşfetmişlerdir. Böylece 'radyoaktivite' de ortaya çıkmıştır.

## 2.2. RADYASYON ÇEŞİTLERİ

Radyasyon, etkileşime girdiği maddenin atomlarını iyonize ederek, enerjisini atomlara aktarabilmektedir. Bu durumda etkileştiği maddenin yapısını bozarak, zarar verebilmektedir.

Radyasyon etkileştiği madde üzerinde meydana getirdiği etkiler radyasyonun türüne ve sahip olduğu enerjiye bağlı olarak 'iyonlaştırıcı' ya da 'iyonlaştırıcı olmayan' radyasyon şeklinde sınıflandırılmaktadır.

Temel olarak ise radyasyon 'parçacık' ve 'dalga' tipi olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Parçacık tipi radyasyon kütle, enerjiye ve yüksek hıza sahip olan küçük parçacıklardır. Dalga tipi ise bir enerjiye sahiptir fakat kütleye sahip olmayan radyasyon çeşididir [12].



Şekil 2.2: Radyasyon çeşitleri.

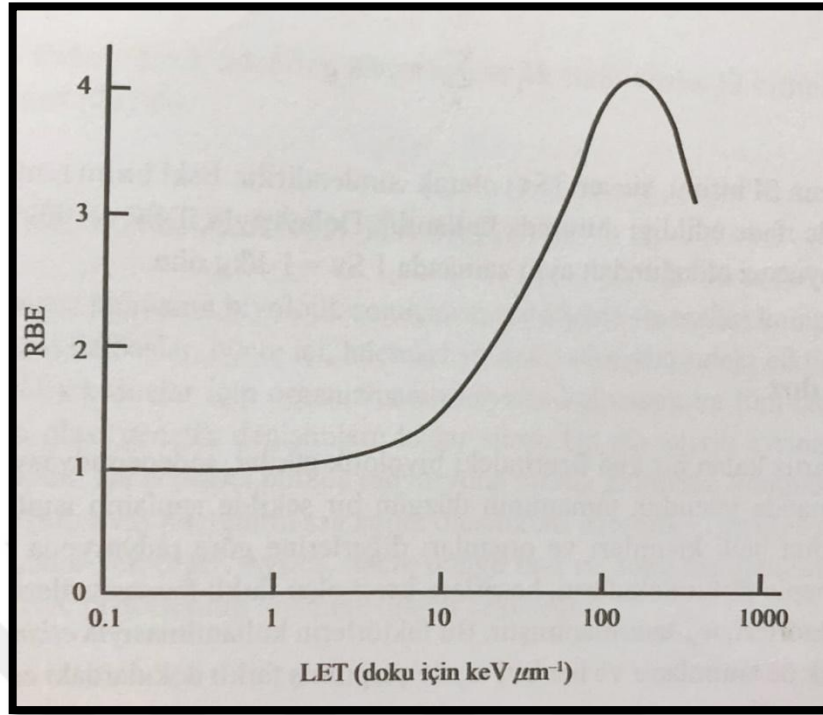
### 2.2.1. İyonlaştırıcı Radyasyon

Kararlı yapıda olan (yüksüz ) bir atomdan bir elektron kopması durumunda, atom iyonize olarak yüklü duruma geçmektedir. Aynı şekilde iyonize radyasyon da yeterli enerjiye sahipse

etkileştiği doku ve moleküllerin yapısını bozarak enerjisini bu yapılara aktarabilmektedir. Bu durum ise canlılarda biyolojik, fiziksel, kimyasal olarak geçici veya kalıcı olarak birçok değişikliğe yol açabilmektedir.

Alfa bozunması ( $\alpha$ ), beta bozunması ( $\beta$ ), gama bozunması, X-ışınları ve nötronlar iyonize radyasyona sebebiyet vermektedir.

Yüklü parçacıkların aldıkları her birim uzaklıkta, enerji salınımı meydana gelmektedir. Birim uzunluk başına salınan enerji değerlerine lineer enerji transferi (LET) denilmektedir. Yani lineer enerji transferi parçacığın aktardığı enerji yoğunluğunu ifade etmektedir. LET keV/ $\mu$ m cinsinden ifade edilmektedir. Lineer enerji transferi parçacığın yük ve hızın fonksiyonudur. İyonize radyasyonun hızı azalırsa aldığı yol azalacaktır. Hız azalırsa yükü artırılırsa Lineer enerji transferi değeri artacaktır. Bu da birim uzaklık başına daha fazla enerji salınımı olacağı anlamına gelmektedir. X-ışınları ve gama ışınları düşük LET değerine sahiptirler. Alfa parçacığı ise, ağır bir parçacıktır bu nedenle hızı düşüktür ve (+2) yüklüdür. Bu nedenle lineer enerji transferi değeri yüksektir. LET değerinin artması demek radyasyonun zarar verme oranının artması anlamına gelmektedir. Radyasyonun organizma ile etkileşmesi durumunda ortaya çıkacak etkiler radyasyon türüne bağlı olarak değişmektedir. Her radyasyon türü aynı etkiyi oluşturmamaktadır. Radyasyon türüne bağlı olarak oluşabilecek etkiler bağlı biyolojik etkinlik (RBE) olarak adlandırılmaktadır. Bu bağlılık Şekil 2.3'te görüldüğü gibi LET değeri ile değişmektedir. Meydana gelebilecek etkilerin belirlenmesinde kullanılan olan diğer ifade ağırlık faktörüdür. Ağırlık faktörü, radyasyon türünün belirlenen enerji aralığındaki bağlı biyolojik etki değerinin ortalaması olarak ifade edilmektedir [13,10].



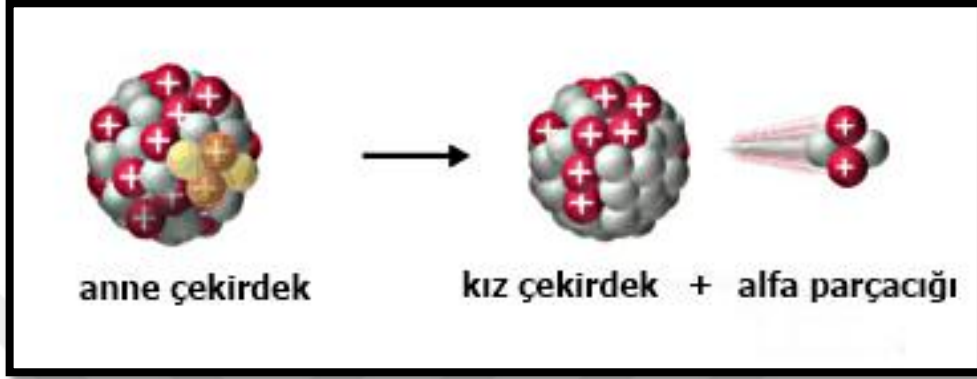
Şekil 2.3: RBE ile LET değeri arasındaki ilişki [10].

Tablo 2.2: Radyasyon türlerinin ağırlık faktörleri [14].

Radyasyon Türü	Ağırlık Faktörü
X-ışını, gama veya beta radyasyonu	1
Alfa parçacıkları	20
Enerjisi bilinmeyen nötron	10
<b>Nötronlar</b>	
E < 10 keV	5
10 keV < E < 100 keV	10
100 keV < E < 2 MeV	20
2 MeV < E < 20 MeV	10
E > 20 MeV	5

**Alfa Bozunması:** Atom numaraları  $82 < Z < 92$  ve  $Z > 92$  değerlerine sahip olan çekirdekler ağır çekirdekler olarak kabul edilmektedir. Kararsız durumda bulunan ağır radyoaktif çekirdekler kararlı hale gelebilmek için genellikle alfa bozunması yapmaktadırlar. Ana

çekirdek bir alfa parçacığı yayımlayarak daha kararlı olan bir yapıya geçerken, bir ürün çekirdek (kız çekirdek) oluşmaktadır. Çekirdek kararlı duruma ulaşmaya kadar bozunma yapmaya devam etmektedir. Alfa bozunması yapan çekirdek hem yük hem kütle kaybetmektedir [10].



Şekil 2.4: Alfa bozunması [15].

Alfa bozunması:



Şeklin de gerçekleşir. Anne çekirdek olan  ${}^A_ZX$ ,  ${}^{A-4}_{Z-2}Y$  olan kız çekirdeğe bozunur. Alfa bozunması sonucunda alfa parçacığı oluşmaktadır. Oluşan alfa parçacığı helyum ( ${}^4_2He$ ) çekirdeğidir. Alfa parçacıklarının enerji değerleri 4 MeV ve 10 MeV aralığındadır.

Ağır çekirdeklere elektrostatik itici kuvvetler kütleleri nedeniyle nükleer kuvvetten daha hızlı bir şekilde artmaktadır. Bu nedenle yüksek atom numarasına sahip, proton bakımından zengin olan çekirdeklere alfa bozunması diğer çekirdeklere oranla daha fazla görülmektedir [16].

Alfa parçacığı bir elektrik yüküne sahiptir. Bu durum nedeniyle alfa parçacığı madde ile etkileşime girdiğinde maddeyi iyonize ederek, sahip olduğu enerjiyi kaybetmektedir. Alfa parçacığının giriciliği düşük, erişim mesafesi kısadır. Bu nedenle aslında bir kâğıt ile bile durdurulabilmektedir. Fakat lineer enerji transfer değerinin yüksek olması nedeniyle solunum ve sindirim ile vücuda alındığı takdirde ise biyolojik olarak ciddi zararlara neden olabilmektedir.

**Beta Bozunması:** Çekirdekdeki kararsızlık nükleon fazlalığından kaynaklı olarak, proton ve nötron oranının olması gereken değerden sapmasıyla oluşmaktadır. Çekirdeğin kararlı yapıya geçmesi, proton ve nötronun birbirine dönüşmesi ile gerçekleşmektedir. Bu olay beta bozunmasıdır.

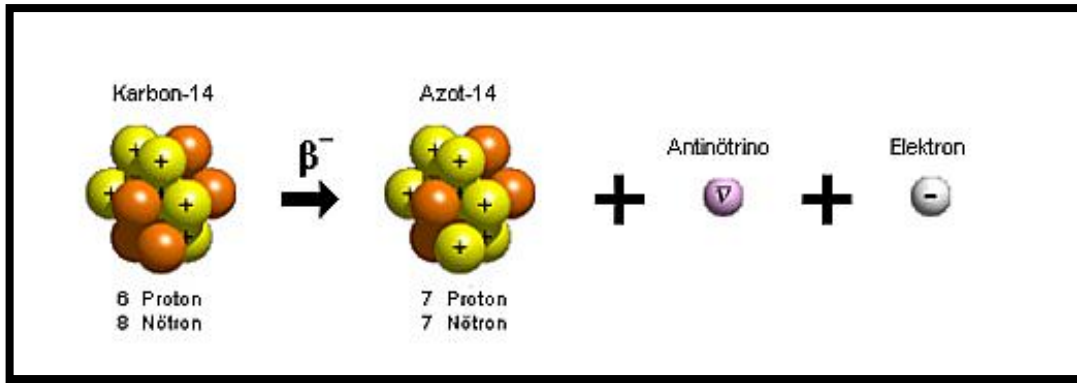
Beta parçacıklarının enerji spektrumu sürekli bir yapıdır. Enerji spektumu sıfır ile maksimum enerji değeri aralığındadır. Maksimum enerji değeri çekirdeğin kütle-kütle enerji bağıntısına bağlı olarak beklenen olası değerdir [10].

Beta parçacıklarının girciliği alfa parçacıklarına kıyasla daha fazladır. Alüminyum levha ile durdurulabilmektedir. 3 şekilde gerçekleşebilmektedir.

**$\beta^-$  Bozunması:** Çekirdekdeki kararsızlık nötron fazlalığından kaynaklanıyorsa, bir nötronun bir protona dönüşmesi ile çekirdek daha kararlı yapıya ulaşabilir. Bozunma sonucunda bir elektron meydana geldiği için, bu süreç 'beta-eksi bozunması' olarak adlandırılır. Bozunma süreci:



şeklindedir. Şekil 2.5'te olduğu gibi bozunma sonucunda bir elektron ve bir anti nötrino oluşmaktadır.

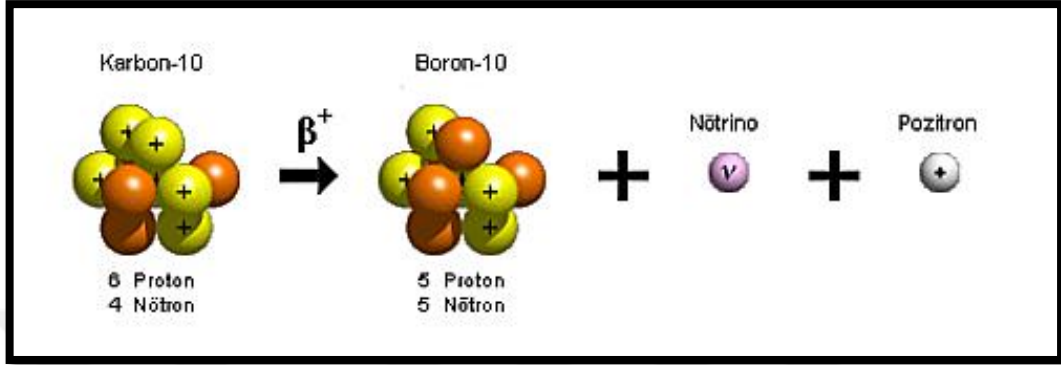


Şekil 2.5: Beta-eksi bozunması [17].

**$\beta^+$  Bozunması:** Çekirdekdeki kararsızlık proton fazlalığından kaynaklanıyorsa, bir proton bir nötrona dönüşmektedir. Bozunma sonucunda artı yüklü bir elektron (pozitron) oluşması nedeniyle bu olay 'beta-artı bozunması' olarak adlandırılmaktadır. Bozunma süreci:



Şeklin de gerçekleşmektedir.Bozunma sonucunda enerji korunumu gereği bir pozitron ve bir nötrino meydana gelmektedir.

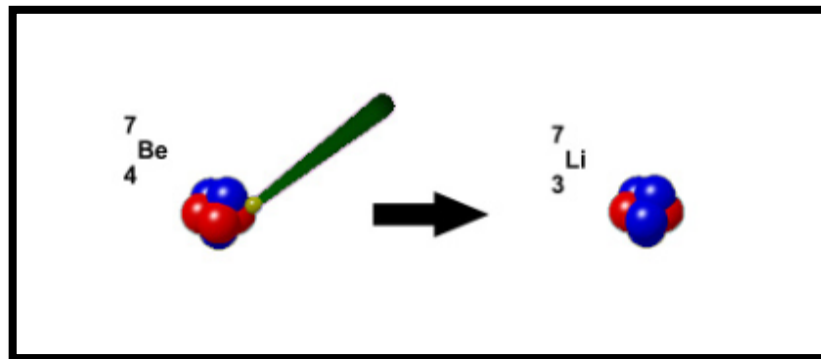


Şekil 2.6: Beta-artı bozunması [17].

**Elektron Yakalama:** Kararsız yapıdaki çekirdek, etrafında bulunan yörüngelerden bir elektron yakalar. Bu elektron ise çekirdekteki protonlarla etkileşime girerek, bir nötron ve bir nötrino meydana getirir. Böylece bir proton bir nötrona dönüşmüş olur. Çekirdek bu şekilde daha düşük enerji seviyesine geçerek, daha kararlı duruma gelir. Elektron yakalama olayı :



Şeklin de gerçekleşmektedir.



Şekil 2.7: Elektron yakalama [17].

**Gama Bozunması:** Kararsız çekirdekler bazı durumlarda, alfa veya beta bozunması yapmalarına rağmen kararlı yapıya ulaşamazlar. Uyarılmış durumda bulunan bu çekirdekler,

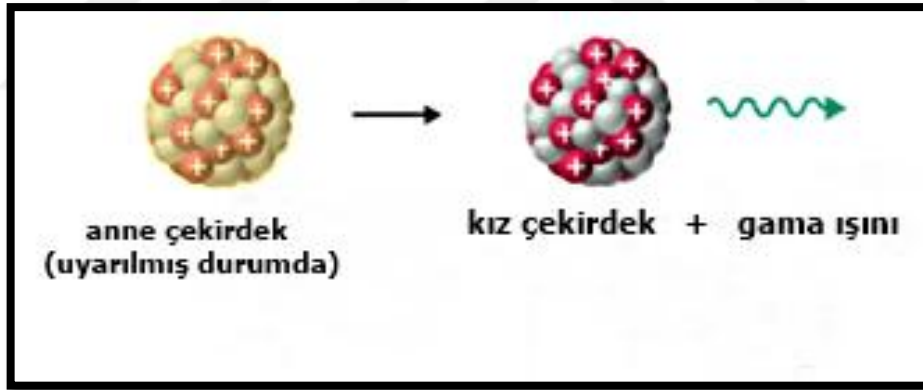
daha düşük enerji seviyelerine geçebilmek için elektromanyetik ışıma yapar,yani gama ışını yayımlar. Böylece kararlı yapıya ulaşarak,temel enerji seviyelerine inmektedirler.

Gama ışıması, çekirdek alfa veya beta bozunması yaptıktan sonra gerçekleşmektedir.Çekirdeğin ilk yaptığı bozunma değildir,direkt olarak gerçekleşmez. Gama ışıması çekirdeğin proton ve nötron sayısını değiştirmez.Gama bozunması:

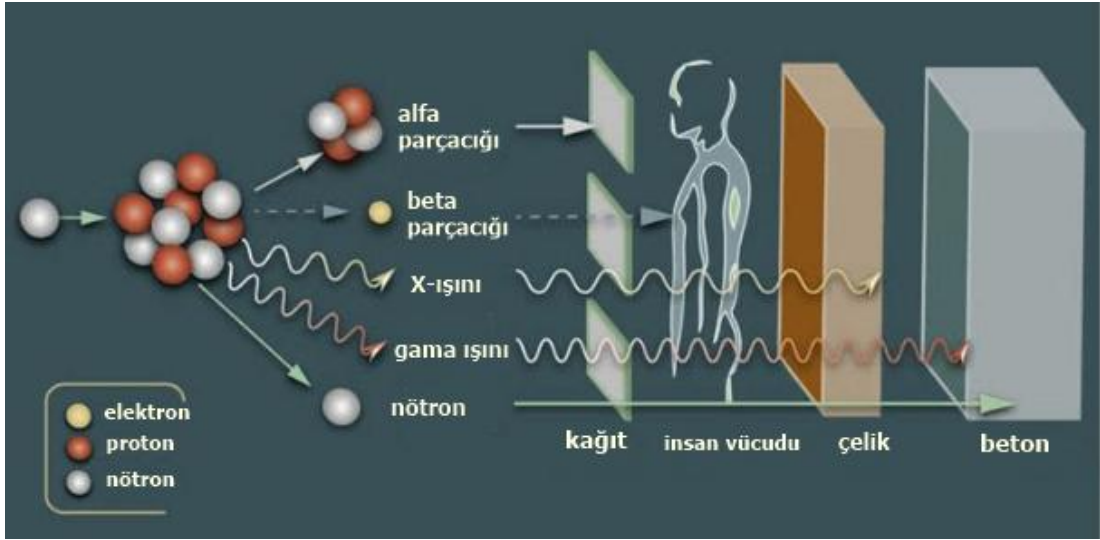


Şeklin de gerçekleşir.Gama bozunması yapan çekirdeğin yapısı değişmemekte,sadece enerji değeri değişmektedir.

Gama ışınımı yüksek enerjiye sahip olan elektromanyetik dalgadır. Madde ile etkileşime girdiğinde ise girciliği alfa ve betaya göre en yüksek olan türdür. Gama radyasyonunu durdurmak için çok kalın ve yoğun bir madde ortamına ihtiyaç vardır. Gama ışınları kurşun yapılar ile durdurulabilmektedir [18].



Şekil 2.8: Gama bozunumu [15].



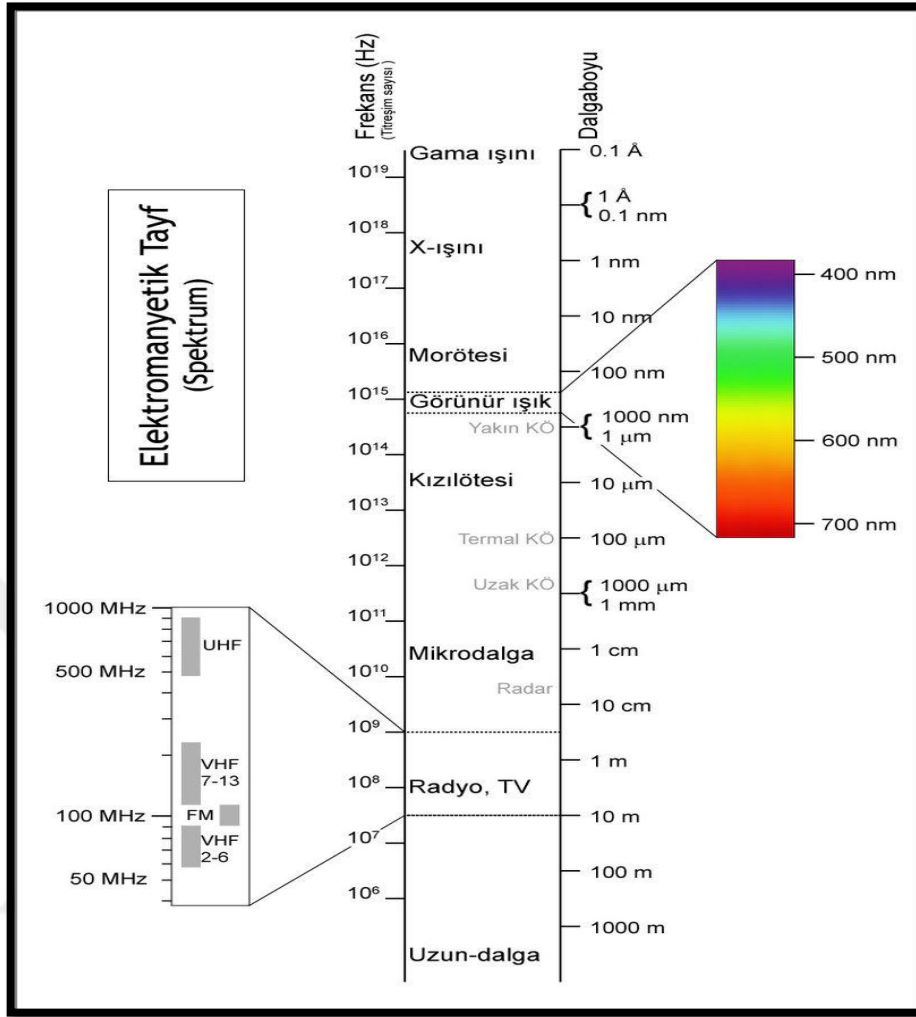
Şekil 2.9: İyonlaştırıcı radyasyonun giricilikleri [19].

### 2.2.2. İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyon

Bir maddeyi iyonize edebilecek kadar yeterli enerjiye sahip olmayan, düşük frekans ve uzun dalgaboyuna sahip olan radyasyon türleri iyonlaştırıcı olmayan radyasyon olarak sınıflandırılmaktadır.

İyonlaştırıcı olmayan radyasyonların enerjisi, iyonlaştırıcı radyasyonların enerjisinden daha azdır. Bu nedenle madde ile etkileşime girdiğinde atomları iyonize edemezler. Maddenin yapısında dögüsel veya titreşimsel uyarımlar ya da elektron dizilimlerinin uyarılması gibi daha küçük etkiler meydana getirmektedirler. Bu etkiler termal etkilerdir. Sağlık açısından iyonize olmayan radyasyonun canlı dokularda oluşturabileceği etkiler tam anlamıyla bilinmemekte olup araştırma çalışmaları devam etmektedir. İyonlaşmanın gerçekleşip gerçekleşmemesi parçacık veya dalgaların sayı ya da çokluğuna değil tamamen enerjilerine bağlıdır. Yeterli enerjiye sahip olmadıkları durumda iyonlaşmanın gerçekleşebilmesi mümkün değildir [20].

Radyo dalgaları, mikrodalgalar, kızılötesi radyasyon, görülebilir ışık ve mor ötesi radyasyon iyonlaştırıcı olmayan radyasyon çeşitleridir.



Şekil 2.10: Elektromanyetik spektrum [20].

### 2.3. RADYOAKTİVİTE

Kararsız halde olan radyoaktif çekirdek kararlı yapıya ulaşabilmek için radyoaktif bozunmalar yapmaktadır. Bu olaya radyoaktivite olarak denmektedir. Kararsız çekirdek, anne çekirdek, bozunma sonrası oluşan çekirdek ise kız çekirdek olarak adlandırılmaktadır. Oluşan kız çekirdek kararsız ise o da kararlı yapıya ulaşana kadar bozunma yapmaya devam etmektedir. Radyoaktivite doğal ve yapay olmak üzere iki çeşittir. Bozunmayı gerçekleştiren çekirdek doğada var olan doğal radyoaktif çekirdek ise doğal radyoaktivite, yapay olarak üretilmiş çekirdek ise yapay radyoaktivite olarak çeşitlendirilmektedir. Çekirdeklerin birim zamanda bozunma olasılıkları denklemler yardımıyla belirlenebilmektedir [10].

### 2.3.1. Radyoaktif Bozunma Kanunu

Radyoaktif elementler kararlı yapıya ulaşana kadar birden fazla bozunum yapmaktadırlar. Birim zamanda bozunan çekirdek sayısı çekirdeğin aktivitesi olarak ifade edilmektedir. Çekirdekler her bozunma yaptıklarında ve farklı çekirdeklere dönüştükçe aktivitelerini kaybederler. Yani çekirdeklerin aktiviteleri zamanla azalmaktadır. Çekirdeklerin bozunma süreleri birbirlerinden çok farklıdır. Bazıları saniyede bozunum yaparken, bazı çekirdeklerin bozunması yıllar sonra olabilmektedir. Doğal radyoaktif çekirdeklerin evrenin varoluşundan bu güne kadar hala mevcut olmalarının nedeni bozunma sürelerinin çok uzun olmasıdır [21].

Radyoaktif bozunma rastgele gerçekleşen bir süreçtir. Bu nedenle bozunma kesin ifadelerle değil olasılıklarla ifade edilmektedir.  $N$  başlangıçta var olan radyoaktif çekirdek sayısı,  $\lambda$  bozunma sabiti olmak üzere,  $dt$  zaman aralığındaki bozunan çekirdek sayısı  $dN$  olsun. Bu durumda belirli bir zaman aralığında bozunan çekirdeklerin sayısı [22];

$$dN = -\lambda N dt \quad (2.6)$$

şeklinde ifade edilir. Eksi işareti  $N$  çekirdek sayısının artan  $t$  zamanı süresince bozunum nedeniyle azaldığını göstermektedir. Denklem düzenlenirse;

$$dN/dt = -\lambda N \quad (2.7)$$

şeklinde elde edilir. Denklem her iki tarafı integre edilirse, herhangi bir  $t$  anındaki bozunan çekirdek sayısı ise;

$$\int_{N_0}^N dN/dt = -\lambda \int_{t_0}^t dt \quad (2.8)$$

$$\ln N/N_0 = -\lambda t \quad (2.9)$$

Denklem düzenlenirse;

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2.10)$$

şeklinde üstel olarak elde edilmektedir.

Bir radyoaktif çekirdeğin herhangi bir  $t$  anındaki aktivite değeri ise;

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (2.11)$$

olarak ifade edilir.  $A_0$  ,çekirdeğin başlangıçtaki ( $t=0$  anında) aktivitesidir.

Başlangıçtaki çekirdek sayısının tam olarak yarıya düştüğü zaman, yani çekirdeğin aktivitesinin yarıya indiği süre 'çekirdeğin yarı ömrü' olarak ifade edilmektedir.

Denklem (2.10) herhangi bir zaman aralığında bozunan çekirdek sayısını ifade etmektedir.Bu denklemde yer alan  $\lambda$  bozunma sabiti her çekirdek için yarılanma süresine bağlı olarak değişmektedir.Bozunma sabiti çekirdeğin yarılanma süresi ters orantılıdır. Başlangıçtaki aktivitenin yarıya düşmesi çekirdeğin belirlenen yarılanma süresinde gerçekleşmektedir . Bu durumda denklem [22] ;

$$\ln 1 / (1/2) = \lambda t_{1/2} \quad (2.12)$$

şeklinde yazılabilmektedir.

Bozunma sabiti ise;

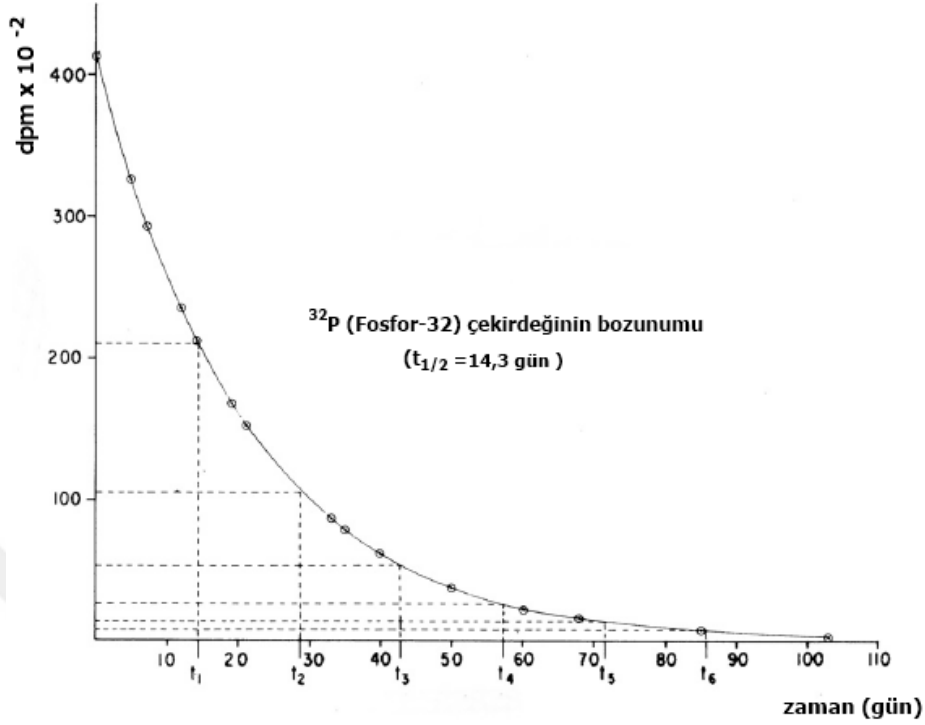
$$\lambda = 0,693 / t_{1/2} \quad (2.13)$$

şeklinde hesaplanabilmektedir.

Radyoaktif çekirdeğin yaşam süresi de ;

$$\tau = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} \quad (2.14)$$

şeklinde ifade edilmektedir.



**Şekil 2.11:** <sup>32</sup>P çekirdeğinin dakika başına bozunumunun lineer olarak değişimi [21].

Şekil 2.11 <sup>32</sup>P çekirdeğinin yarılanma zamanına bağlı olarak dakikada meydana gelen bozunumunu göstermektedir. <sup>32</sup>P çekirdeğinin yarılanma zamanı 14,3 gündür. Grafikte yer alan  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ ,  $t_4$ ,  $t_5$ ,  $t_6$  ifadeleri her bir yarılanma sonrası çekirdeğin aktivitesini ifade etmektedir. Her bir yarılanma zamanından (14,3 gün ) sonra çekirdeğin aktivitesi tam olarak yarıya inmektedir [21].

### 2.3.2. Radyoaktif Bozunma Zinciri

Kararsız yapıdaki radyoaktif anne çekirdek ardı ardına bozunmalar gerçekleştirerek bir bozunma zinciri oluşturmaktadır. Meydana gelen kız çekirdek ve onun meydana getirdiği torun çekirdekler bu zincirin üyelerini oluşturmaktadır. Her bir ürünün bozunma sabiti farklıdır ve çekirdeklerin kendi yarılanma sürelerine bağlıdır.

A anne çekirdek , B kız çekirdek , C torun çekirdek olmak üzere  $A \rightarrow B \rightarrow C \dots$  şeklinde olan bir bozunma zinciri dikkate alındığında (2.10) eşitliği aşağıda gibi düzenlenir [10];

$$N_A(t) = N_A(0) e^{-\lambda A t} \quad (2.15)$$

B çekirdeği için;

$$dN_B / dt = -\lambda_B N_B + \lambda_A N_A \quad (2.16)$$

şeklinde denklem yazılır. B kız çekirdeğin bozunma olasılığı anne çekirdeğin bozunma oranına bağlıdır [21].

(2.16) denkleminde (2.15) denklemi yerine yazılır ve  $e^{-\lambda_B t}$  ile çarpılarak düzenlenirse [10,21];

$$(dN_B/dt) e^{-\lambda_B t} + \lambda_B N_B e^{-\lambda_B t} = \frac{d}{dt}(N_B e^{-\lambda_B t}) = \lambda_A N_A (e^{-\lambda_B t}) = \lambda_A N_A(0) e^{(\lambda_B - \lambda_A)t} \quad (2.17)$$

A çekirdeklerinin sayısını ifade eden  $N_A$ 'ya göre (2.16) denkleminin integrali alınırsa;

$$N_B e^{-\lambda_B t} = \lambda_A N_A(0) \int e^{(\lambda_B - \lambda_A)t} dt = \frac{\lambda_A}{\lambda_B - \lambda_A} N_A(0) e^{(\lambda_B - \lambda_A)t} + K \quad (2.18)$$

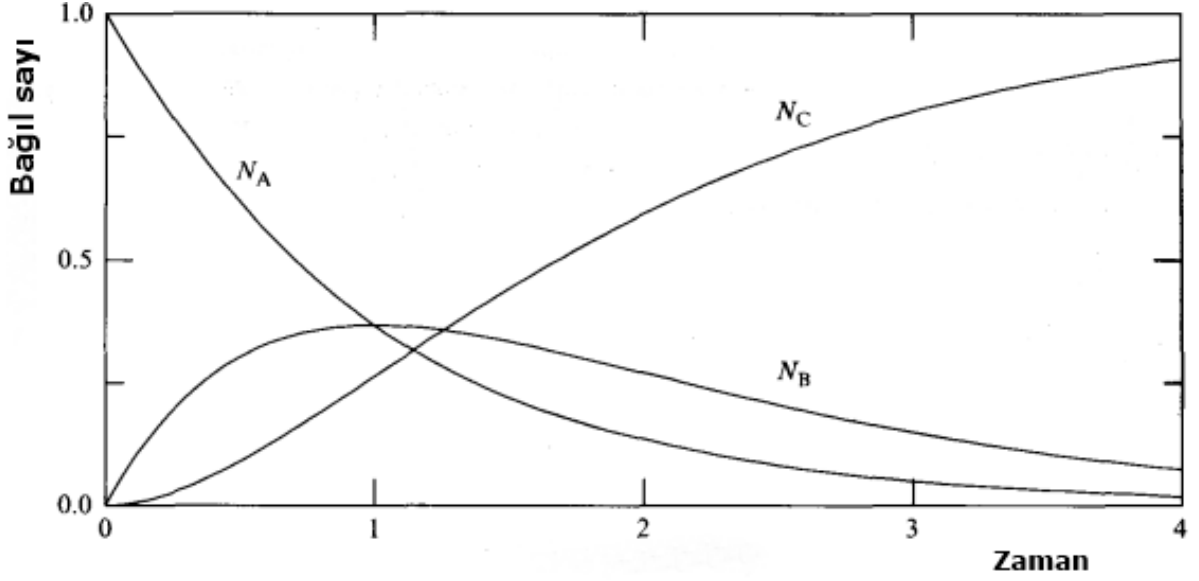
Denklemden K integral sabitidir. Başlangıç zamanı için ( $t = 0$ ) B çekirdeklerinin sayısı  $N_B(0) = 0$  alınırsa  $K = \frac{\lambda_A}{\lambda_B - \lambda_A} N_A(0)$  şeklinde yazılır [10]. Bu durumda;

$$N_B(t) = \frac{\lambda_A}{\lambda_B - \lambda_A} N_A(0) (e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t}) \quad (2.19)$$

Denklemini elde edilmektedir.

Meydana gelen C çekirdeği kararlı ya da kararsız yapıda olabilmektedir. Kararsız yapıda ise bozunma yapmaya devam etmektedir.

C çekirdeğinin kararlı yapıda olması ise  $\lambda_A = \lambda_B$  durumunda gerçekleşmektedir [10].



Şekil 2.12: C çekirdeğinin kararlı olduğu durumda çekirdek sayılarının değişimi[10].

### 2.3.3. Radyoaktif Denge

A → B → C şeklinde olan bozunma zinciri ele alınırsa, A anne çekirdek B kız çekirdeğe, B kız çekirdekte zamanla C çekirdeğine bozunmaktadır. B çekirdeğinin zamana bağlı olarak bozunma olasılık denklemi (2.18) ile ifade edildiği şekildedir. Radyoaktif dengeye ulaşma süresi anne çekirdeğin ve kız çekirdeğin yarı ömrüne bağlı olarak değişmektedir. Çekirdeklerin yarılanma ve yaşam sürelerine bağlı olarak olası 3 durum söz konusudur [10].

1.  $\tau_A \gg \tau_B$  durumu, anne çekirdeğin yaşam süresinin kız çekirdeğin yarılanma ömründen çok büyük olmasıdır.
2.  $\tau_A > \tau_B$  durumu, anne çekirdeğin yaşam süresinin kız çekirdeğin yarılanma ömründen büyük olmasıdır.
3.  $\tau_A < \tau_B$  durumu, ise diğer durumların aksine kız çekirdeğin ömrünün anne çekirdeğin yarılanma ömründen büyük olması durumudur [14].

Bu durumların her birinde farklı bir denge durumu söz konusudur.

**Kalıcı ( Sürekli ) Denge Durumu:** Anne çekirdeğin çok daha uzun ömürlü olduğu durumdur. Kalıcı denge durumunda iki çekirdeğin de aktiviteleri eşittir.  $\tau_A \gg \tau_B$  durumu söz konusudur ve  $\lambda_A \sim 0$  kabul edilebilir. Bu durumda  $e^{-\lambda_A t}$  değeri de 1 olarak alınabilir [21].

Bu durumda (2.19)'de verilen denklem;

$$N_B(t) = \frac{\lambda_A}{\lambda_B} N_A(0) (1 - e^{-\lambda_B t}) \quad (2.20)$$

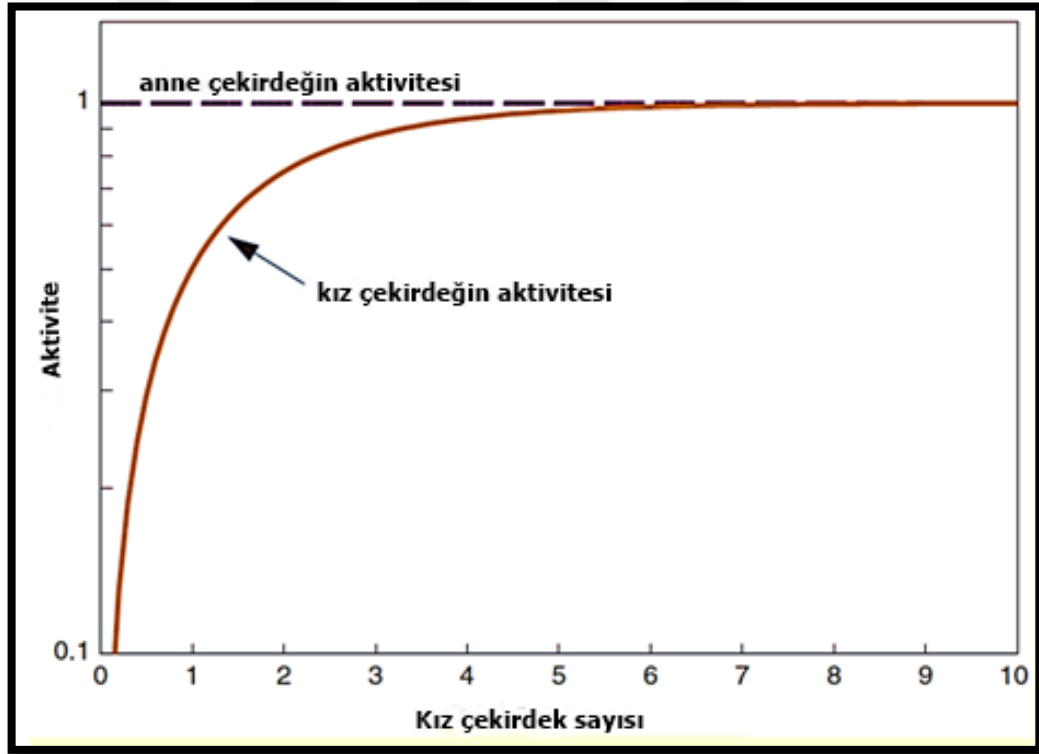
olarak yazılabilir.

$\frac{\lambda_A}{\lambda_B} N_A(0)$  değeri labaeieceği maksimum büyüklüğe yaklaşır. Bu durumda denklem [21] ;

$$N_B(t) = (N_B)_{\max} (1 - e^{-\lambda_B t}) \quad (2.21)$$

durumuna gelir. Çekirdek sayısı ve aktivite orantılı şekilde değişmektedir.

$$A_B(t) = (A_B)_{\max} (1 - e^{-\lambda_B t}) \quad (2.22)$$



**Şekil 2.13:** Anne çekirdek ve kız çekirdeği arasında kalıcı denge durumu [23].

**Geçici Denge Durumu :**  $\tau_A > \tau_B$  durumunda anne çekirdeğin ömrü kız çekirdeğin yarılanma süresinden ilk durumdaki kadar olmasa da yine de büyüktür. Bu durumda çekirdeklerin aktiviteleri eşit olmamaktadır.

(2.19) ile verilmekte olan kız çekirdeğin bozunma olasılık denklemi ele alınırsa,  $\lambda_A < \lambda_B$  durumu öz konusu olduğu için  $e^{-\lambda_B t}$  terimi ihmal edilebilir. Bu durumda denklem [21];

$$\frac{N_B}{N_A} = \frac{\lambda_A}{\lambda_B - \lambda_A} \quad (2.23)$$

Şeklinde yazılabilir.

Aktivite ise;

$$\frac{A_B}{A_A} = \frac{\lambda_A}{\lambda_B - \lambda_A} \quad (2.24)$$

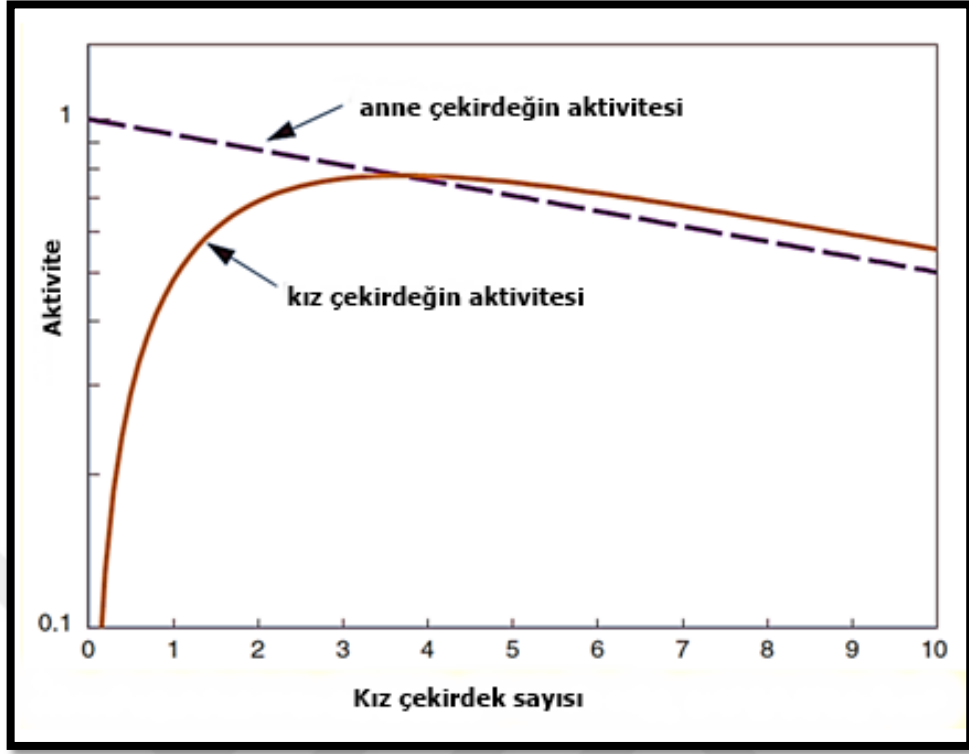
Olarak ifade edilebilir. Bu durumda çekirdeklerin aktivite değerleri eşit değildir. Kız çekirdeğin bu durumda bozunma olasılık denklemi;

$$N_B(t) = (N_B)_{\max} (e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t}) \quad (2.25)$$

Aktivitesi ise [21];

$$A_B(t) = (A_B)_{\max} (e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t}) \quad (2.26)$$

olarak yazılır.



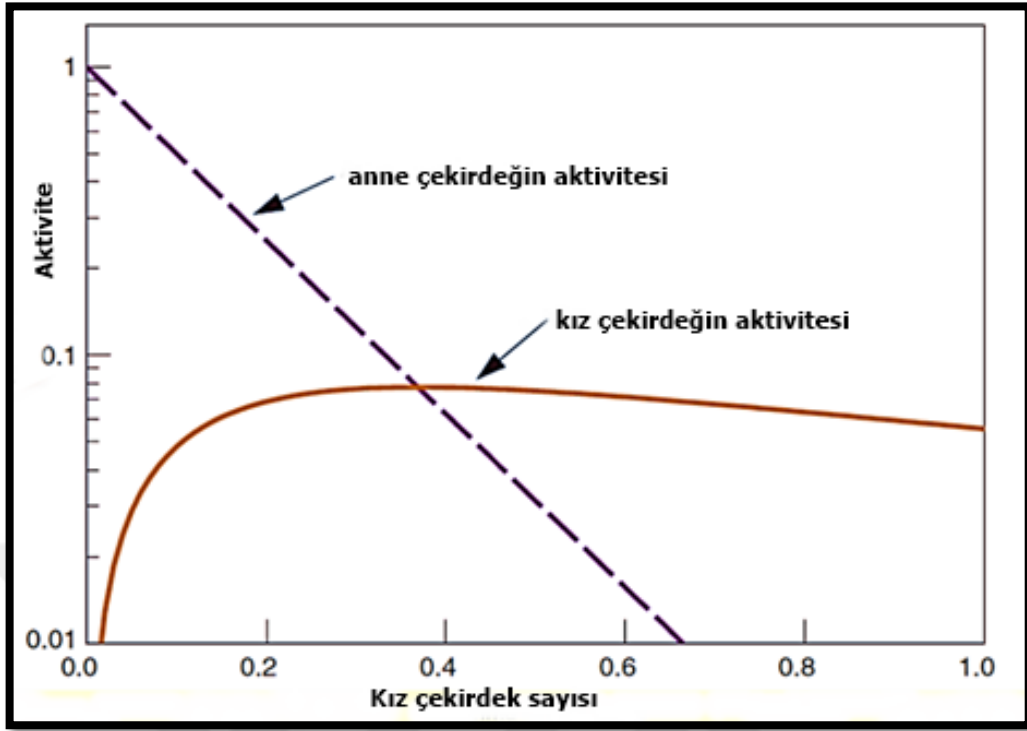
Şekil 2.14: Anne çekirdeği ve kız çekirdeği arasındaki geçici denge durumu [23].

**Denge Durumunun Olmaması:**  $\tau_A < \tau_B$  olması durumunda kız çekirdeğin ömrü daha fazladır. Bozunma sabitleri ise  $\lambda_A > \lambda_B$  şeklindedir. Kız çekirdek daha kararlı yapıdadır. Şekil 2.15'te görüldüğü gibi anne çekirdeğin aktivite değeri maksimum duruma ulaşır, daha sonra ise aktivite değeri gittikçe azalır. Bu durumda da denge durumu sağlanamamaktadır. Yarılanma süresine bağlı olarak çekirdek bozunma yapmaktadır [21].

Dengenin sağlanamadığı durumda kız çekirdeklerin sayısı;

$$N_B = N_A \frac{\lambda_A}{\lambda_B - \lambda_A} (e^{-\lambda_B t}) \quad (2.27)$$

Şeklinde değişmektedir.



Şekil 2.15: Anne çekirdek ve kız çekirdek arasında denge olmaması durumu [23].

### 2.3.4. Radyoaktivite ve Radyasyon Doz Birimleri

#### Aktivite Birimi:

Birim zamanda bozulan çekirdek sayısı aktivite olarak adlandırılmaktadır. Aktivitenin birimi Becquerel'dir. Bq simgesi ile ifade edilmektedir.

1Bequerel = 1 saniyede bozulan çekirdek sayısı

1 gram radyum elementinin (Ra-226) 1 saniyedeki bozunma miktarı 1 Curie olarak ifade edilmektedir [24].

$1 \text{ Ci} = 1 \text{ saniyede } 3.7 \times 10^{10} \text{ bozunma} = 3.7 \times 10^{10} \text{ bozunma /saniye} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$

$1 \text{ Bq} = 0,27 \times 10^{-10} \text{ Ci}$

#### Işınlama Doz Birimi:

Radyasyonun havada oluşturduğu iyonizasyonu tanımlar. Aynı radyasyon türünü oluşturan farklı kaynakları kıyaslamak için elverişlidir [24].

Eski birimi ‘Röntgen’, SI sisteminde yeni kullanılan birimi ise kilogram başına Coulomb (C/kg)’dır. Röntgen R simgesi ile ifade edilmektedir.

$$1 \text{ C/kg} = 3876 \text{ R (SI birim sisteminde)}$$

$$1 \text{ R} = 2,58 \times 10^{-4} \text{ C/kg (eski birim sisteminde)}$$

### **Soğurulan Doz Birimi:**

Yayınlanan radyasyon enerjisinin, etkileştiği ortam ya da madde tarafından depolandığı miktar soğurulan doz olarak ifade edilmektedir. Birim zamanda soğurulan enerji ise soğurulan doz hızı olarak tanımlanmaktadır [25].

Soğurulan doz birimi SI birim sisteminde Gray (Gy)’dir. Aynı zamanda soğurulan doz birimi ‘rad ( Radiation Absorbed Dose)’ ile de tanımlanır. 1 Gray, etkileştiği 1 kg maddede 1 Joule enerji soğurulmasına sebep olan radyasyon miktarıdır [24].

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

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

### **Eşdeğer Doz Birimi:**

Vücudun maruz kaldığı ışınlama nedeniyle meydana gelebilecek biyolojik etkidir. Eşdeğer doz ‘Rem’ birimi ifade edilebilmektedir. SI birim sisteminde tanımlanan yeni birimi ise Sievert (Sv)’tir. 1 Rem, 1 röntgenlik radyasyon miktarının meydana getirdiği biyolojik etkileri, aynı oranda oluşturabilecek farklı bir radyasyon türünün miktarı olarak tanımlanmaktadır. Farklı radyasyon türleri aynı etkileri farklı dozlarda gerçekleştirebilmektedir. Her radyasyon aynı dozda aynı etkiyi oluşturmamaktadır. Aynı zamanda vücut içerisinde farklı doku ve organlarda oluşabilecek etkiler de farklıdır. Radyasyonun etkileştiği canlıda meydana getirebileceği etki soğurulan doz ile kalite faktörünün çarpılması ile hesaplanmaktadır. Kalite faktörü radyasyonun cinsine göre çeşitlilik göstermektedir [24, 14].

$$\text{Rem} = (\text{Soğurulan Doz}) \times (\text{Kalite Faktörü})$$

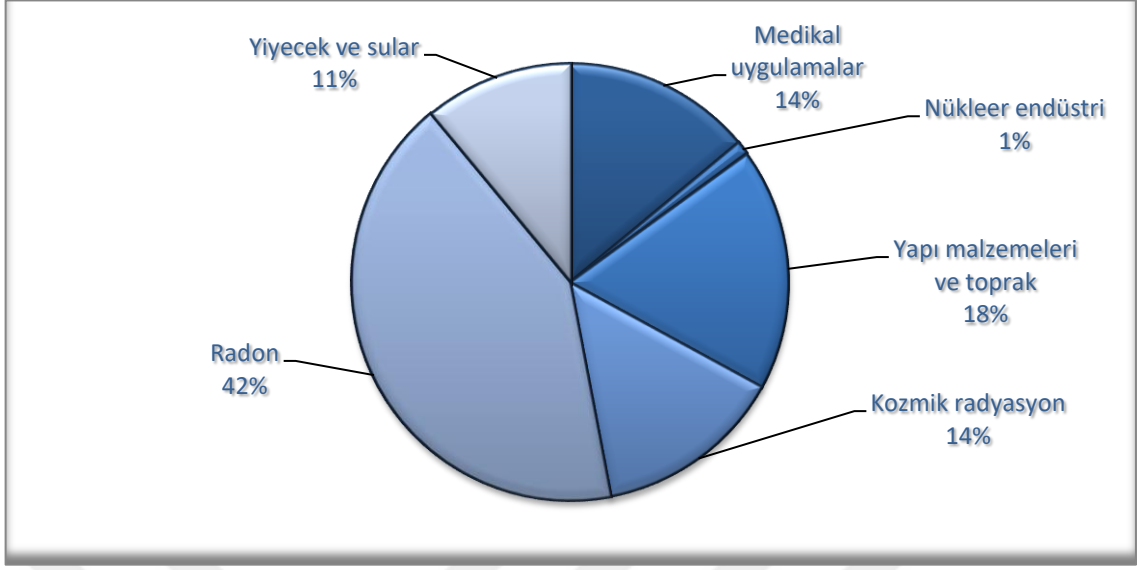
$$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$$

**Tablo 2.3:** Radyasyon doz birimleri.

<b>Doz Birimi</b>	<b>SI Birimi</b>	<b>Diğer Birim</b>	<b>Dönüştürülmesi</b>
Aktivite	Bq	Ci	1 Ci = $3,7 \times 10^{10}$ Bq 1 Bq = $2,703 \times 10^{-11}$ Ci
Işınlama	C/kg	R	1 R = $2,58 \times 10^{-4}$ C/kg 1 C/kg = 3876 R
Soğurulma	Gy	Rad	1 Gy = 100 rad
Eşdeğer	Sv	rem	1 Sv = 100 rem

#### 2.4. RADYASYON KAYNAKLARI

Dünyanın varoluşundan bu yana dolaylı ya da direkt olarak tüm varlıklar radyasyona maruz kalmaktadır. Radyasyon kendisini oluşturan kaynağa bağlı olarak doğal ve yapay olarak iki çeşide ayrılmaktadır. Maruz kalınan radyasyonun büyük çoğunluğunu doğal radyasyon kaynakları oluşturmaktadır. Yaşanılan bölge, yaşam şartları gibi özelliklere bağlı olarak maruz kalınan radyasyon oranı farklılık göstermektedir. Yapay radyasyon ise göz ardı edilemeyecek düzeydedir. Birçok yapay radyasyon kaynağının farkında bile olmamaktayız. Maruz kalınan yıllık radyasyon dozu yaklaşık 2,5 mSv olarak belirtilmektedir. Bu miktarın % 85'ini doğal, %15'ini ise yapay kaynaklar oluşturmaktadır [26, 27].



**Şekil 2.16:** Radyasyon kaynakları ve yüzdeleri [25].

#### 2.4.1. Doğal Radyasyon Kaynakları

Yıllık 2600  $\mu\text{Sv}$ 'lik toplam dozun %85'ini doğal radyasyon oluşturmaktadır. Doğal radyasyon kaynağının büyük oranı ise yerkürenin kabuğunda bulunmakta olan doğal radyoaktif çekirdeklerdir [10].

Doğal radyasyonun temeli uzaydan atmosfere ulaşan kozmik ışınlarla ve yeryüzünde doğal olarak bulunan uranyum, toryum, aktinyum çekirdekleri ve bu çekirdek serilerinde yer alan bozunum ürünleri olan radyoaktif çekirdeklere dayanmaktadır. Doğal radyasyon nedeniyle canlılar iç ve dış ışınlamaya maruz kalmaktadır.

Dünyaya ulaşan kozmik ışınların atmosfer tabakası ile etkileşmesi sonucunda meydana gelen radyasyon insan sağlığına olumsuz şekilde etki etmektedir. Kozmik radyasyon, maruz kalınan radyasyona % 8 gibi bir oranla katkı yapmaktadır. Kozmik radyasyon oranı, yeryüzünden yukarılara doğru çıkıldıkça artmaktadır. Maruz kalınan süreye bağlı olarak bu etki daha da artmaktadır. Uçuş seviyelerinde fazla süre geçirenlerin maruz kalacağı kozmik radyasyon oranı diğer kişilere kıyasla daha fazla olmaktadır. Bu da sağlık açısından olumsuz bir etki oluşturmaktadır. Deniz seviyesinden yükseklik, enlem, boylam, dünyanın manyetik alanı kozmik radyasyon doz oranına etki etmektedir [28].

Dünyanın oluşumundan bu yana doğal bir şekilde varlığını sürdürmekte olan radyoaktif çekirdekler doğal radyasyonun diğer önemli kaynağını oluşturmaktadır. Radyoizotoplar,

toprak, su, hava, kayalar, inŒaatlarda kullanılan yapı malzemeleri, bitkiler, hayvanlar, yediğimiz içtiğimiz gıda ürünlerinde bulunabilmektedir. Vücudumuzda yapısal olarak zaten var olan bir miktar radyoizotopa ek olarak, sindirim ve solunum yolu ile de harici Œekilde de alınabilmektedir. Yüksek düzeyde uranyum ve toryum bulunan bölgelerde doz seviyelerinde artış gözlenmektedir [12, 14].

Doğal radyasyonun en önemli kaynağı doğal radyoaktif çekirdek olan uranyum ve bozunum ürünleridir.

Diğer önemli katkı ise radon gazından gelmektedir. Radon uranyum serisi ürünüdür. Hava, su, toprak, kayalar, yapı malzemelerinde yüksek miktarlarda bulunmaktadır. Yeterince havalandırılmayan bina içlerinde ve kapalı mekânlarda birikmesi nedeniyle, buralarda radyasyon doz miktarını artırmaktadır. Bina dışındaki çatlaklardan içeri sızan radon, solunması durumunda vücutta iç ışınlamaya neden olmaktadır. Radon alfa bozunması yapmaktadır. Bozunma yaparak oluşturduğu bizmut, polonyum ve kararlı kurŒun çekirdekleri de radyoaktif çekirdeklerdir. Bu çekirdekler havada bulunmakta olan parçacıklara tutunabilmektedir. Havanın solunması durumunda da akciğerlere tutunarak ciddi sağlık sorunlarına neden olabilmektedir [10].

#### **2.4.2. Yapay Radyasyon Kaynakları**

İnsan kaynaklı olarak meydana gelen radyasyon çeŒidir. Maruz kalınan doz oranı doğal radyasyona göre daha az olmakla birlikte, kontrol edilebilmektedir.

Hastalıkların tanı ve tedavisinde kullanılan radyoizotoplar, nükleer santraller, endüstriyel uygulamalar, güvenlik amaçlı kullanımlar, nükleer çalıŒmalardan sızan serpintiler, kullanılan teknolojik aletler yapay radyasyon doz oranını artırmaktadır.

Yapay radyasyon kaynaklı olarak maruz kalınan doza katkı X-Ray grafiler gibi medikal uygulamalardan gelmektedir. Aynı zamanda endüstriyel alanda X ve gama ışınlarından faydalanılmaktadır Fayda sağlamak için kullanılan radyasyon, kontrolsüz kullanıldığı takdirde yarar yerine zarar da verebilmektedir [29].

Kullanılan birçok teknolojik ürün de (televizyon v.b.) yapay radyasyon kaynağıdır [14].

Göz ardı edilen birçok tüketici ürünü de yapay radyasyona neden olmaktadır. Boyalarda parlaklık amacı nedeniyle kullanılan  $^3\text{H}$  ve  $^{147}\text{Pm}$  çekirdekleri beta yayınlamaktadır. Beyazlık ve parlaklık amacıyla dişçilerin kullandığı ürünler az miktarda da olsa radyoizotop içerebilmektedir. Aynı şekilde üretilen bazı optik cam ve gözlüklerde de bulunabilmektedir [10].

Alınan katkı az da olsa yapay kaynaklı radyasyon dozunu azaltmak ya da alımını engellemek mümkündür. Günümüzde tıbbi ve teknolojik olarak kullanımı artmış olan radyasyon, dikkat edilmediği ya da fazla kullanıldığı takdirde maruz kalınan doz oranlarını artarak sağlık sorunları oluşturabilmektedir. Bu nedenle kullanılan ürünlerin ne gibi malzemeler içerdiği araştırılarak bilgi sahibi olunmalıdır.

## 2.5. RADYOAKTİF SERİLER

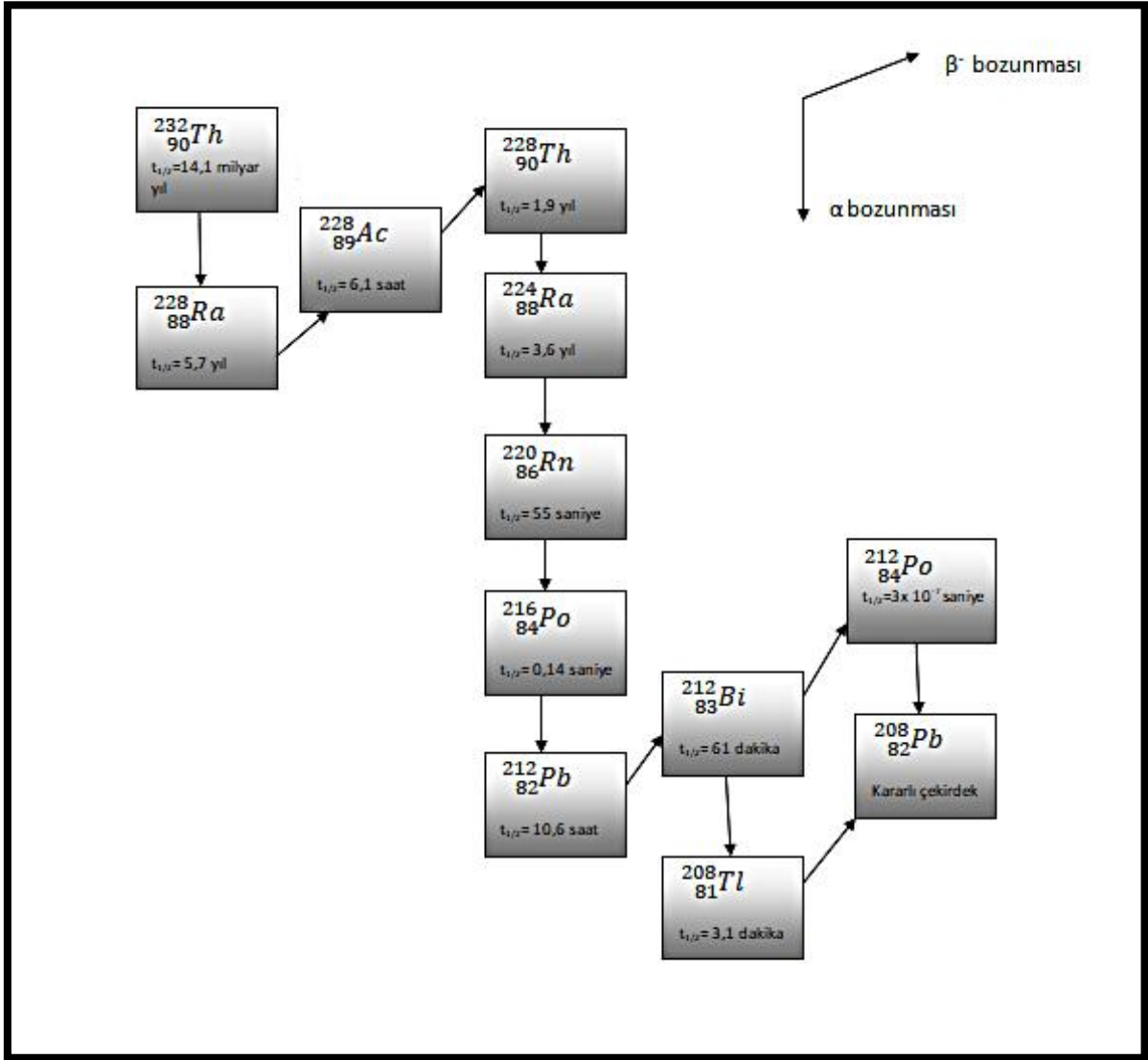
Çok kararsız yani aktivitesi fazla olan radyoaktif çekirdek tek bir bozunmayla kararlı hale gelememektedir. Kararlı duruma ulaşana kadar çok sayıda alfa, beta ve gama bozunmaları yaparak farklı çekirdeklere dönüşmektedir. Bozunma kararlı olan çekirdeğe ulaşana kadar devam etmektedir. Yeni oluşan çekirdeklerin de hepsi radyoaktiftir. Bu bozunma sürecindeki tüm bozunmalar ve oluşan çekirdekler ‘radyoaktif seriler’ olarak adlandırılır. Serinin başlangıcındaki çekirdek ana çekirdektir ve seri bu çekirdekle adlandırılmaktadır. Ana çekirdeğin bozunduğu çekirdekler de sırasıyla kız çekirdek ve torun çekirdekler adını almaktadır.

Oluşan her bir çekirdeğin yarı ömrü, dengeye ulaşma süresi, bozunma çeşidi farklıdır. Ana çekirdek ve bozunum ürünlerinin tamamı radyoaktiftir. Çekirdek bozunmaya uğradıkça aktivitesi azalsa da son kararlı çekirdek dahi radyoaktiftir.

Üç doğal ve bir yapay olmak üzere toplam dört seri bulunmaktadır. Doğal radyoaktif seriler, toryum ( $^{232}\text{Th}$ ) serisi, radyum serisi (uranyum ( $^{238}\text{U}$ ) serisi), ve aktinyum ( $^{235}\text{U}$ ) serisidir. Bu seriler dünyanın başlangıcından bu yana var olan uzun ömürlü izotoplar ile başlamaktadır. Neptünyum ( $^{237}\text{Np}$ ) serisi ise doğada tükenmiş olan yapay bir radyoaktif seridir. Serilerin ürünlerinin kütle numarası sabit bir sayının (n) 4 katı olarak (4n) değişmektedir.

### 2.5.1. Toryum Serisi

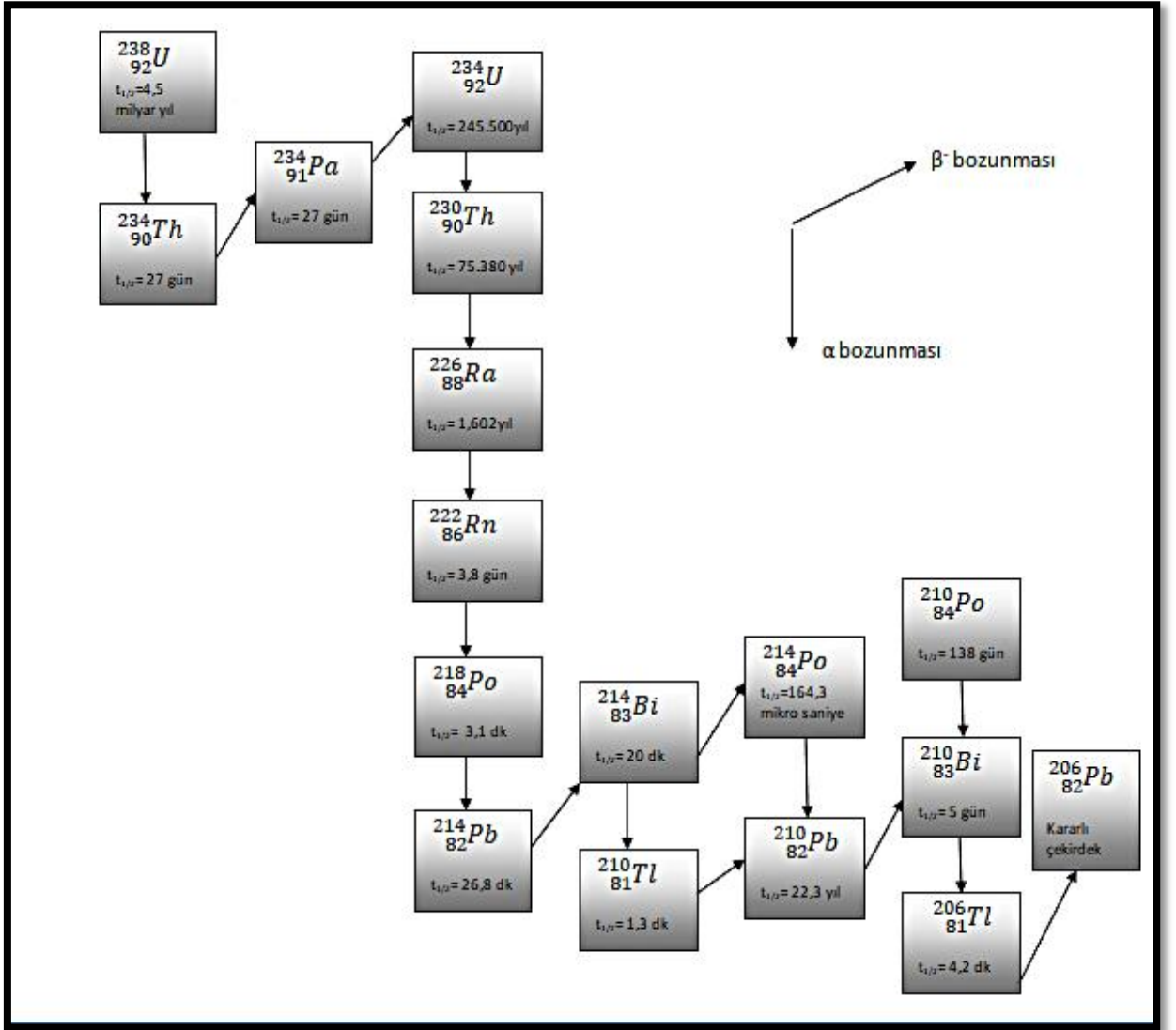
$^{232}\text{Th}$  çekirdeği ile başlayıp kararlı  $^{208}\text{Pb}$  çekirdeği ile son bulan doğal radyoaktif seridir. Toryum serisi 4n zinciri olarak bilinmektedir. Nötrinolar nedeniyle kaybedilen enerji de dahil olmak üzere Toryum-232'den Kurşun-208'e salınan toplam enerji 42.6 MeV'dir [30].



Şekil 2.17: Toryum ( $^{232}\text{Th}$ ) Serisi [14].

### 2.5.2. Uranyum Serisi

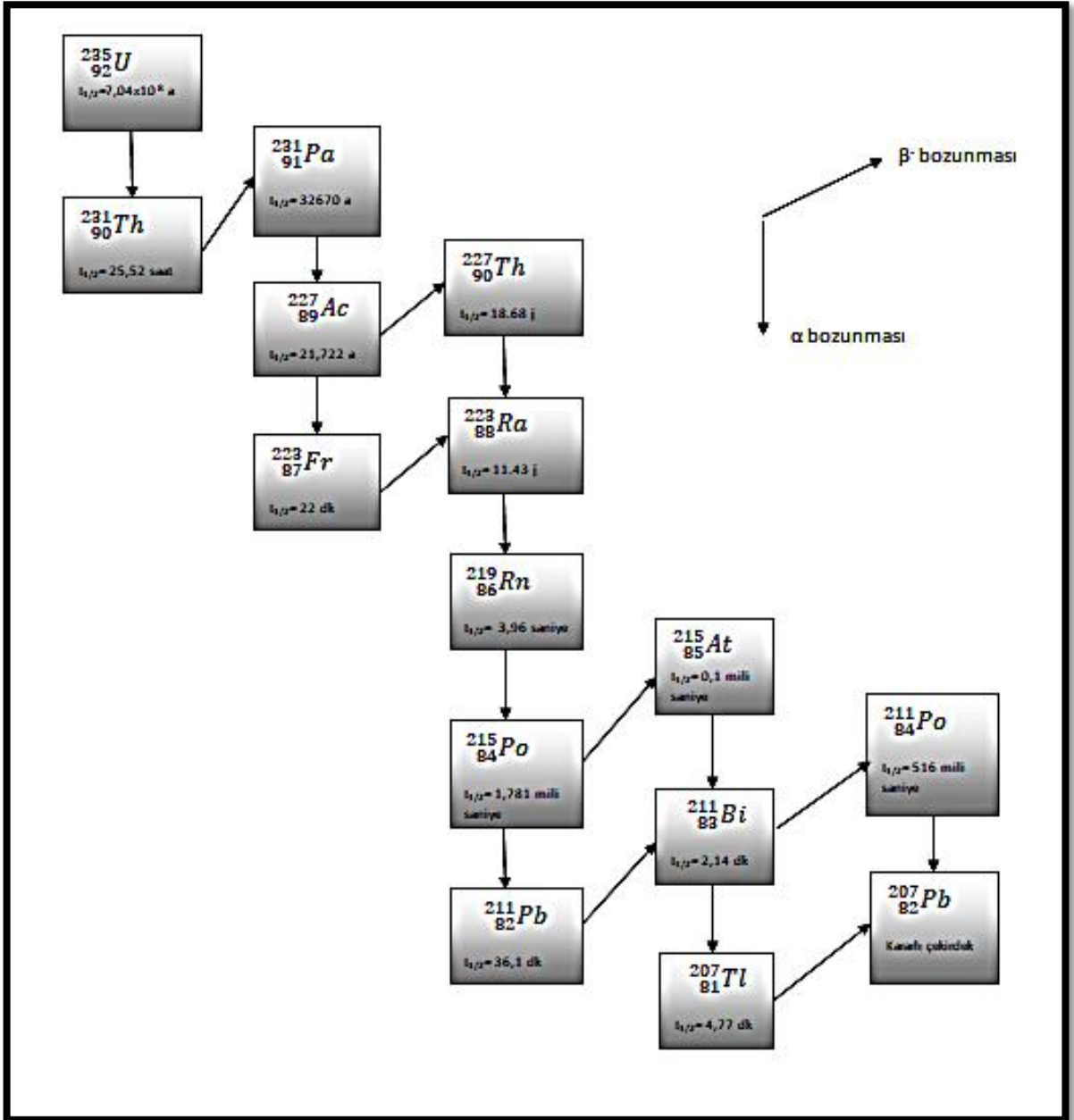
Seri  $^{238}\text{U}$  ile başlayıp ve kararlı  $^{206}\text{Pb}$  çekirdeği ile devam etmektedir. Uranyum serisi  $4n+2$  zinciri olarak bilinmektedir. Nötrinolar nedeniyle kaybedilen enerji de dahil olmak üzere Uranyum-238'den Kurşun-206'ya salınan toplam enerji 51.7 MeV'dir [30].



Şekil 2.18: Uranyum ( $^{238}\text{U}$ ) Serisi [14].

### 2.5.3. Aktinyum Serisi

$^{235}\text{U}$  çekirdeği ile başlayan kararlı  $^{207}\text{Pb}$  çekirdeği ile son bulan doğal radyoaktif seridir. Seri  $4n+3$  zinciri olarak bilinmektedir. Nötrinolar nedeniyle kaybedilen enerji de dahil olmak üzere Uranyum-235'ten Kurşun-207'ye salınan toplam enerji, 46.4 MeV'dir [30].

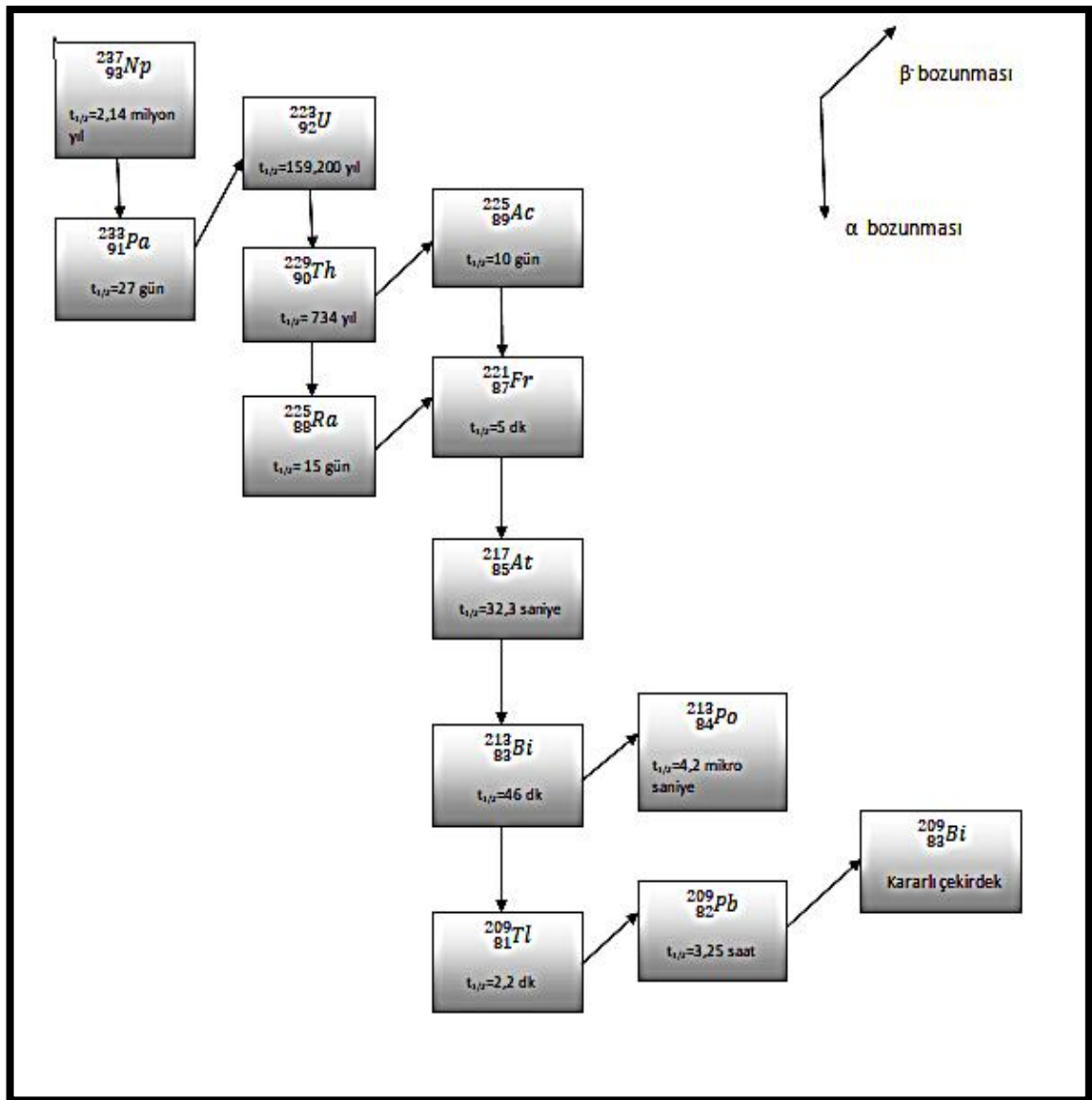


Şekil 2.19: Aktinyum ( $^{235}\text{U}$ ) Serisi [14].

### 2.5.4. Neptünyum Serisi

$^{237}\text{Np}$  çekirdeği ile başlayan  $^{209}\text{Bi}$  çekirdeği ile sonlanan yapay radyoaktif seridir.  $4n+1$  zinciri olarak bilinmektedir. Seriden sadece Bizmut ve Talyum çekirdekleri doğada bulunmaktadır.

Bazı duman detektörlerinde serideki radyonüklidler bulunabilmektedir. Duman detektörlerinde havanın iyonlaşması sağlanarak dumanın tespit edilmesi için serinin ürünleri kullanılmaktadır. Nötrinolar nedeniyle kaybedilen enerji de dahil olmak üzere seriden salınan toplam enerji 50.0 MeV'dir [30].



Şekil 2.20: Neptünyum ( $^{237}\text{Np}$ ) Serisi [14].

## 2.6. RADYASYONUN BİYOLOJİK ETKİLERİ

Radyasyonun ortaya çıkması ile birlikte bir takım çalışmalar da yapılmaya başlanmıştır. 1928 yılında Londra'da 1.Uluslararası Radyoloji Kongresi düzenlenerek radyasyonun nasıl ölçülebileceği ile ilgili bir komite kurulmuştur. Kurulan bu komite 1950 yılında Uluslararası Radyolojik Korunma Komisyonu (ICRP) olarak çalışmalarına devam etmiştir. Komite radyasyonun etkilerini araştırarak, ne gibi etkiler olduğunu saptayıp meydana gelen etkileri gruplandırmıştır. Oluşan etkiler stokastik etkiler (doz bağımsız) ve deterministik (doz bağımlı) etkiler olarak ilk kez komite tarafından sınıflandırılmıştır [31].

Deterministik etkiler belirli bir doz oranına maruz kalındığında ortaya çıkmaktadır. Düşük dozlara maruz kalındığında herhangi bir etki ortaya çıkmayabilmektedir. Stokastik etkilerde ise belirli bir doz değeri yoktur, olasılık söz konusudur. Her organın, her dokunun etkilenme oranı farklılık göstermektedir [10].

Radyasyonun meydana getirdiği etkiler maruz kalınan radyasyon çeşidine ve süreye bağlı olarak değişmektedir. Alınan doza bağlı olarak biyolojik etkileri hücresel ve moleküler düzeyde şeklinde farklılık göstermektedir.

Radyasyon ile direkt şekilde etkileşen molekül iyonize olarak uyarılmış duruma geçmektedir. Molekülün yapısındaki dolaylı olarak değişim ise, radyasyonun oluşturduğu iyonize radyasyonun oluşturduğu ara ürünlerin sebep olduğu kimyasal etkileşmeler sonucu molekülün yapısında değişiklikler meydana gelmesi ile olmaktadır. Bu durumda hücrenin çekirdeği ve çekirdekte bulunan kromozomlar olumsuz bir şekilde etkilenmektedir. Bu da hücrede hasara yol açmaktadır [13].

Radyasyon DNA üzerinde ciddi zararlar oluşturarak mutasyona neden olabilmektedir. DNA yapısında oluşan hasarlar genlerde kalıcı hasarlar meydana getirerek, nesilden nesile aktarılmasına da neden olabilmektedir. Aynı zamanda meydana gelen hasarlar hücrede gelişme bozuklukları oluşturmakta ve hücrenin kanserleşme riskini artırmaktadır. Solunum ve sindirim sistemi hastalıkları, kemik iliği rahatsızlıkları ve kansızlık, zekâ geriliği gibi birçok sağlık sorununa yol açmaktadır [31].

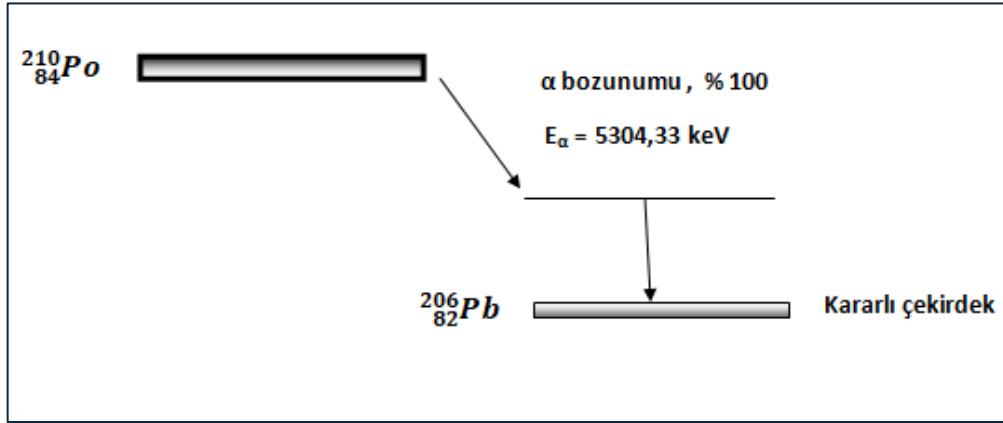
Radyasyona en duyarlı yapılar kemik iliği, lenf bezleridir. Beyaz kan hücreleri, özellikle lökositler çok fazla etkilenmektedirler. Kansereleşme olasılığı ve oranı, doku hassasiyeti, yaş, cinsiyet ve maruz kalınan radyasyon türü ve miktarına göre farklılık göstermektedir [13].

## 2.7. $^{210}\text{Po}$ 'UN GENEL ÖZELLİKLERİ

Marie ve Pierre Curie tarafından yapılan, Uranyum kullanılarak yaptıkları çalışmalar sonucunda Polonyum elementi 1898 yılında keşfedilmiştir.  $^{210}\text{Po}$ ,  $^{238}\text{U}$  bozunum serisi ürünlerinden ve olan radyoaktif bir çekirdektir. Periyodik cetvelin 6A grubunda bulunmaktadır. Atom numarası 84 ve yarılanma ömrü 138,376 gündür. Atom ağırlığı 210, kaynama noktası  $962^\circ\text{C}$ , erime noktası  $254^\circ\text{C}$ , atom yoğunluğu  $9,4 \text{ g/cm}^3$  tür. Kütle numarası 192-218 arasında değişen ve tamamı radyoaktif olan 27 tane izotopu vardır.  $^{210}\text{Po}$  5,3 MeV enerjili alfa parçacığı yayınlamaktadır. Bu nedenle iyonize radyasyona sebebiyet vermektedir [32].

$^{210}\text{Po}$ 'un doğadaki varlığı ve miktarı,  $^{238}\text{U}$  bozunum serisi ürünü olan  $^{210}\text{Pb}$ 'a (Kurşun-210) bağlıdır.  $^{210}\text{Pb}$  çekirdeği de radyoaktiftir. Yarılanma ömrü 22 yıldır.  $^{210}\text{Pb}$  çekirdeğine kıyasla  $^{210}\text{Po}$  çekirdeğinin radyotoksitesi çok daha yüksektir.  $^{210}\text{Po}$ 'un alfa bozunması yapması sonucu açığa çıkan eşdeğer doz oranı,  $^{210}\text{Pb}$  çekirdeğinin bozunumu sonucu açığa çıkan eşdeğer doz oranından binlerce kat daha yüksektir. Bu nedenle sebebiyet verdiği biyolojik zarar çok fazla olmaktadır [33].

27 tane izotopa sahip olan polonyum elementinden  $^{208}\text{Po}$  (~103 yıl),  $^{209}\text{Po}$  (~ 2,9 yıl) ve  $^{210}\text{Po}$  çekirdekleri, diğer izotoplara kıyasla daha uzun yarılanma ömrüne sahiptir. Bu nedenle nükleer çalışma ve araştırmalarda kullanılmaya elverişlidirler. Çalışmalarda en çok kullanılan izotop ise  $^{210}\text{Po}$  çekirdeğidir. Bunun nedeni ise yaptığı bozunmalar sonucu alfa parçacığı oluşturmasıdır.  $^{210}\text{Po}$  çekirdeği aynı zamanda radon ürünüdür. Aynı zamanda alfa bozunması yaparak  $^{238}\text{U}$  bozunum serisinin son ürünü olan kararlı kurşun ( $^{206}\text{Pb}$ ) çekirdeğine bozunmaktadır [34].



Şekil 2.21:  $^{210}\text{Po}$  çekirdeğinin bozunum şeması [35].

### 2.7.1. $^{210}\text{Po}$ 'un Kaynakları

$^{210}\text{Po}$ 'un ana kaynağı  $^{238}\text{U}$  çekirdeği ve bozunum ürünleridir. En önemli kaynağı ise yeryüzü katmanlarından atmosfere salınan radon gazının yayılımıdır.  $^{222}\text{Rn}$  çekirdeğinin bozunumu sonucu  $^{210}\text{Pb}$  (Kurşun-210) ve  $^{210}\text{Bi}$  (Bizmut-210) çekirdekleri oluşmaktadır. Bu çekirdekler havada bulunmakta olan partiküllere tutunarak absorbe olabilmektedirler. Bu çekirdeklerin atmosferde bulunabilme süreleri katman seviyelerine göre farklılık göstermekle birlikte yıllarca olabilmektedir. Yeryüzünde çok geniş kesimlere yayılabilen bu çekirdeklerin bozunumu ile  $^{210}\text{Po}$  oluşmaktadır.  $^{210}\text{Po}$  çekirdeğinin dağılımı ve yayılımı bu nedenle çok geniştir [33].

Kömür, içerisinde yer alan Uranyum ve Toryum nedeniyle,  $^{210}\text{Po}$ 'un bir diğer kaynağıdır. Zamanla oluşan  $^{210}\text{Po}$ , kömürün yanması ile birlikte serbest kalarak atmosfere dağılmaktadır. Termik santraller civarında yapılan çalışmalarda doğal radyoaktivite düzeylerinin arttığı gözlemlenmiştir [36,37].

Uranyum madenleri de  $^{210}\text{Po}$ 'un doğal kaynaklarından biridir. Atmosferde tungsten, molibden, demir ve fosfatlı gübrelerin bulunduğu arazilerde de  $^{210}\text{Po}$  düzeyinin yüksek olduğu saptanmıştır. Neden olarak ise bunlar ve benzeri minerallerin yapılarında uranyumun yer alması gösterilmiştir [33].

Petrol kuyuları da bir diğer  $^{210}\text{Po}$  kaynağıdır. Yapılan çalışmalarda petrol kuyuları civarında yer alan su rezervlerinde  $^{210}\text{Po}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Bi}$  ve  $^{226}\text{Ra}$  çekirdeklerinin aktivite konsantrasyon değerlerinin fazla olduğu bulunmuştur. Dağılımı çok geniş olan radon gazı da sulara bulunan aktivite değerlerine katkı sağlamaktadır [34].

Genellikle doğal kaynaklı olarak oluşmakta olan  $^{210}\text{Po}$ , aynı zamanda yapay olarak da üretilmektedir. Nükleer silah denemelerinde oluşan reaksiyonlar sonucu ya da nükleer reaktörlerde kullanılan  $^{210}\text{Bi}$  çekirdeğinin nötron aktivasyonu sonucunda oluşabilmektedir. Bu sistemler genellikle kontrol altında tutulmaktadır. Olası bir kaza, sızıntı ya da ihmal sonucu çevreye yayılım gerçekleşebilmektedir [33].

### 2.7.2. $^{210}\text{Po}$ 'un İnsan Vücuduna Giriş Yolları

Radyotoksitesi oldukça yüksek olan  $^{210}\text{Po}$  çeşitli yollardan vücudumuza girerek sağlığımızı olumsuz şekilde etkilemektedir. Vücuda girişi ise sindirim ve solunum ile gerçekleşmektedir.

Değişen iklim şartları, artan nüfus nedeniyle tüketilen gıda ürünlerinin yetiştirilme şekillerinde gün geçtikçe değişiklikler yapılmaktadır. Daha fazla ve daha hızlı şekilde ürün elde etmek için tarımda kullanılan yapay gübreler, ambalajlı gıdalarda kullanılan yapay maddeler, hayvansal gıdalarda ise hayvanlara verilen yemler alınan radyasyon dozlarına katkı sağlamaktadır.

Yapılan çalışmalarda özellikle Fosfat içeren gübrelerin tarımda kullanılmasının aktivite konsantrasyonlarına katkı yaptığı elde edilmiştir. Kullanılan gübreler ile yetiştirilen ürünler  $^{210}\text{Pb}$  ve  $^{210}\text{Po}$  alımına büyük bir katkı sağlamaktadır [1].

Meyve ve sebzelerin doğrudan tüketilmesinin yanı sıra, bu bitkilerle beslenen hayvanlardan da ek bir polonyum dozuna maruz kalabilmektedir [3].

Yetiştirilen meyve ve sebzelerin tüketilmesi ile direkt olarak alınmasının yanı sıra bunlarla beslenen hayvanlardan elde edilen hayvansal gıdaların tüketilmesi de aktivite değerlerine katkı sağlamaktadır [3].

Sindirim yolu ile maruz kalınan doz oranları beslenme şekillerine göre farklılık göstermektedir. Gıdaların çeşitleri ve tüketim sıklıkları önemli etkenlerdir. Tüketilen gıdaların yetiştirildiği bölge, arazi şartları, toprak yapısı, iklim, doğal radyasyon fon seviyeleri ve en önemli kullanılan tarım uygulamaları gıdalardan alınan doz oranlarına etki etmektedir [38].

Havada serbest şekilde dolaşan parçacıklar ile taşınan radyoaktif çekirdeklerin solunması da alınan doz oranlarında rol oynamaktadır.

Diğer büyük bir etken ise, bilinmesine rağmen göz ardı edilen sigaradır. Sigarada bulunan  $^{210}\text{Po}$ , aktivite değerlerine oldukça kayda değer oranda etki etmektedir [1].

Yapılan çalışmalarda deniz ürünleri, sedimentler ve sularda da önemli ölçüde  $^{210}\text{Po}$  yer almaktadır. Bu ürünlerin tüketilmesi ile maruz kalınan doz oranları oldukça yüksektir [33].

Tıbbi amaçlı veya nükleer çalışmalarda kullanılan malzemeler nedeniyle oluşan atıklar da yeterli ve gerekli önlemler alınmadığı takdirde içerdikleri gerek  $^{210}\text{Po}$  gerekse diğer çeşitli radyoaktif çekirdekler açısından tehlike oluşturmaktadır. Buralarda çalışanların atıklara teması ya da soluması sağlık açısından risk oluşturabilmektedir [33].

Vücudumuzda yapısal olarak doğuştan itibaren var olan radyoaktif materyaller bulunmaktadır. Başlıca bulunan elementler  $^{40}\text{K}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  ve  $^{14}\text{C}$ 'tür.  $^{210}\text{Pb}$  çekirdeği vücuttaki  $^{210}\text{Po}$  çekirdeğinin kaynağıdır. Vücutta bulunan radyasyon dâhili radyasyon olarak adlandırılmaktadır. Dâhili radyasyondan dolayı maruz kalınan doz oranı 0,4 milisievert/yıl'dır [39].

### 2.7.3. Bitkilerde ve Gıdalarda $^{210}\text{Po}$

Doğal radyoaktif çekirdekler toprak ve sularda bulunabilmektedir. Tarım yapılan arazilerde yapılan sulama ve gübre uygulamaları da radyoaktiviteyi artırmaktadır [3].

Ürünlerden yüksek verim elde etmek için kullanılan gübreler de radyoaktiviteye büyük katkı sağlamaktadır. En yaygın olarak kullanılan çeşidi fosfat içerikli gübrelerdir. Fosfat kayaçları uranyum serisi radyonüklidlerin bozunum ürünlerini içerdiğinden, radyoaktivite oranına büyük katkı sağlamaktadır.

$^{210}\text{Po}$  ve  $^{210}\text{Pb}$  gibi radyoaktif çekirdeklerin bitkilerin yapısına geçişi kökler ile olabilmektedir. Aynı zamanda radyoaktif çekirdekler bitki yüzeylerine havadaki partiküller aracılığıyla da tutunabilmektedir. Bitkilerin yapısına geçerek birikime sebep olmaktadır [1].

Bitkilerin yapısı radyoaktif çekirdeklerin alımını etkilemektedir. Yapılan çalışmalarda bitkinin tüylülük ve yüzey/kütle oranının etkili bir faktör olduğu gösterilmiştir. Sigarada bulunan polonyumun fazla olmasının nedeninin, tütün yapraklarının yapısı olabileceği söylenmektedir. Protein de yapısının polonyum tutulumuna elverişli olması nedeniyle, besinler aracılığı ile

polonyum alımında önemli rol oynamaktadır. Gıdalarda uygulanan endüstriyel işlemlerde radyoaktiviteye az da olsa katkı sağlamaktadır [3].

Volkanik, fosfat, granit ve tuz kayaçlarının yapısında doğal radyoaktif çekirdekler yüksek konsantrasyonlarında bulunurlar. Zamanla aşınıp ufalanan kayaçlar yağmur ve akıntı suları ile birlikte toprağa karışarak ürünlerde radyoaktivite birikimine neden olabilmektedir [35].

Yaşamın başlangıcından itibaren var olan doğal radyoaktiviteye yapay kaynakların eklenmesi maruz kalınan doz miktarlarını artırmaktadır. Miktar yaşam koşullarına göre farklılık gösterse de tamamen yok olması söz konusu değildir. Günümüzde artan nüfus nedeniyle, artan gıda ihtiyacı üretimde farklılıkları artırmaktadır.

#### **2.7.4. $^{210}\text{Po}$ 'un Biyolojik Etkileri**

$^{210}\text{Po}$  radyoaktif çekirdeğinin vücuda çeşitli yollardan girerek birikmesi sonucunda ciddi sağlık sorunları meydana gelmektedir. Vücutta biriken polonyum çeşitli organ ve dokulara yerleşerek içsel ışımaya neden olmaktadır. Bozunuma uğraması sonucunda alfa yayınlamaktadır. Alfa ağır ve yüklü bir parçacık olması nedeniyle gama ve betalara kıyasla etkileştiği dokulara daha fazla zarar vermektedir [3].

Manhattan Projesi'nde polonyum kullanılarak yapılan çalışmalarda, polonyuma maruz kalan beş hastada lenf kanseri ve lösemi saptanmıştır. Bu da polonyumun zarar verici etkisinin fazlalığını göstermektedir [40].

$^{210}\text{Po}$  en ölümcül toksinlerden biri olarak kabul edilmektedir. Sağlık açısından zararlı olduğu bilinen hidrojen siyenitten yaklaşık 250 milyar kat daha toksik bir yapıya sahiptir [41].

Polonyum tarafından yayımlanan alfa parçacıklarının organ ve doku tarafından absorbe edilmesi ciddi fizyolojik zararlara neden olmaktadır. Birkaç mikrogram polonyuma maruz kalmak bile çeşitli semptomların başlamasına neden olmaktadır. Etkiler gastrointestinal (sindirim sistemi) semptomlarla başlamaktadır. Bunlar mide bulantısı ve ağrısı, kusma, ishal ve yorgunluk şeklindedir. Ardından saçlarda dökülme başlamaktadır. En çok etkilenen yapı ise kan hücreleridir. Semptomlarla birlikte beyaz kan hücrelerinde azalma meydana gelmektedir. Bağırsak dokuları da en çok etkilenen yapılardır. Maruz kalınan doz miktarına göre görülen etkiler değişmektedir. Maruz kalınan 5 Gy doz miktarında kemik iliği rahatsızlıkları ve gastrointestinal sendromlar görülmeye başlanmaktadır. 40-50 Gy dozlarda

ise doku ölümleri ve mide rahatsızlıkları görülmektedir.  $^{210}\text{Po}$  çekirdeğinin vücuttaki varlığını ve miktarını belirlemek için idrar ve dışkı testleri yapılmaktadır [42].

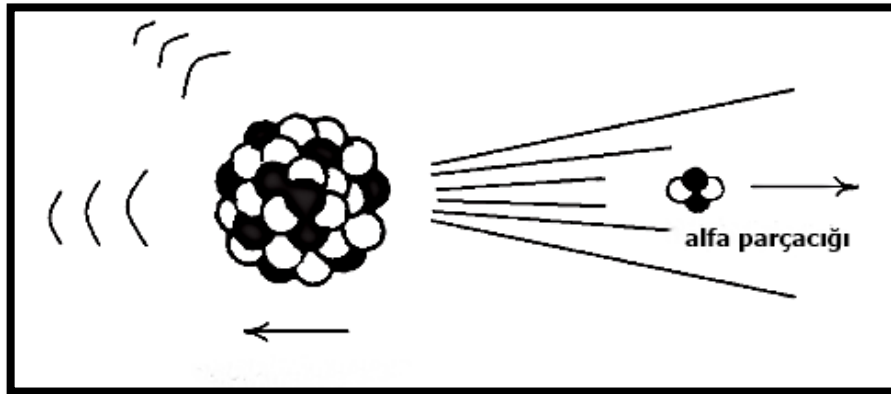
Vücuda alınan radyoaktif çekirdeklerden kaynaklanan radyasyon etkileri ciddi etkilerdir ve zamanla ortaya çıkmaktadır. Aynı zamanda etkiler görülme bile kalıtsal olarak nesilden nesile aktarımı da mümkündür. Bilinen en yaygın etki ise kansere neden olması ya da kansere yakalanma riskini artırmasıdır [3].

## 2.8. ALFA BOZUNMASI

Alfa bozunması Coulomb itme kuvvetinin bir etkisi olarak ortaya çıkmaktadır. Ağır çekirdekler daha önemli hale gelmektedir. Çünkü yıkıcı Coulomb kuvveti  $Z^2$  ile orantılı olarak hızla artarken, çekirdeğin spesifik nükleer bağlanma enerjisi A ile orantılı şekilde artmaktadır. Ağır çekirdeklerin çoğu alfa bozunumuna karşı kararsız yapıdadır. Alfa bozunumu yaparak kararlı yapıya geçmektedirler. Bozunma sonucunda, atom numarası Z olan çekirdek alfa parçacığı yayınlamaya Z-2 atom numarasına sahip olan çekirdeğe dönüşmektedir [11].

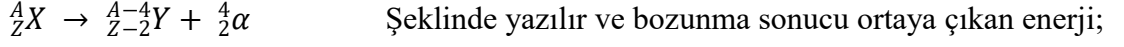
Alfa bozunması proton açısından zengin ve atom numarası fazla olan çekirdeklerde başlıca görülen bozunma çeşididir. Ağır çekirdekler ( $Z > 83$ ) için karakteristiktir [21].

Ağır çekirdeklerde elektrostatik itici kuvvet, nükleer kuvvetten daha hızlı olarak artmaktadır. Bu nedenle genellikle atom numarası fazla olan, protonca zengin çekirdeklerde alfa bozunması görülmektedir [16].



Şekil 2.22: Alfa Bozunumu [43].

Alfa bozunma denklemi;



$$Q=M(A,Z)c^2-[M(A-4,Z-2)c^2+M(4,2)c^2] \quad (2.28)$$

$$Q=T_Y+T_\alpha \quad (2.29)$$

Bozunma sonucu ortaya çıkan enerji kız çekirdek (Y) ve alfa parçacığı ( ${}^4_2He$  çekirdeği) arasında paylaşılmaktadır. Bu enerjinin %98'i oluşan alfa parçacığının enerjisidir. Bu enerji kütle farkından dolayı meydana gelmektedir [11].

Açığa çıkan alfa parçacığının kinetik enerjisi;

$$T_\alpha=KE_\alpha=\frac{Q}{1+M_\alpha/M_Y} \text{ olur.} \quad (2.30)$$

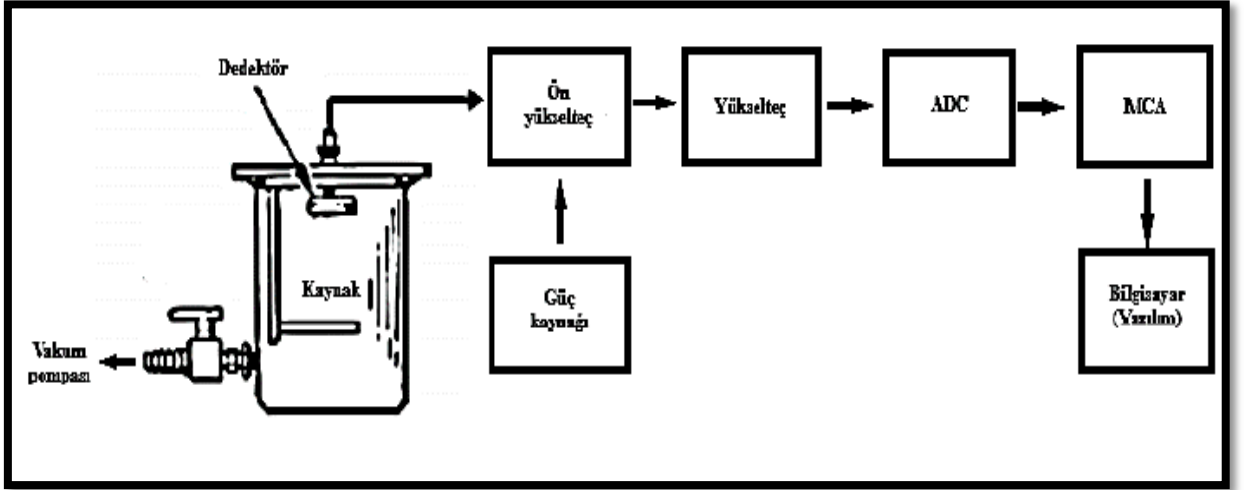
Alfa parçacıkları teorik olarak ulaşılamayan enerji değerlerinde ortaya çıkmaktadır. ;Meydana gelen alfa parçacığı kuantum tünelleme yolu ile yaklaşık olarak 25 MeV olan Coulomb engelini aşmaktadır. Alfa parçacıklarının menzilleri oldukça kısadır. Sıvı ve katı malzemelerde mikrometre, havada ise birkaç santimetre menzile sahiptir [10, 14].

## 2.9. ALFA SPEKTROSKOPİ

Alfa spektroskopi sistemi detektör ve elektronik yapılardan oluşmaktadır. Alfa spektroskopi yüksek hassasiyete sahip ve spesifik bir sistemdir. Numunelerdeki ağır elementlerin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Alfa spektroskopi sistemi ile analiz için bir takım kimyasal hazırlıklar gerekmektedir. Doğru bir analiz için sistemde kullanılacak detektörün uygunluğu oldukça önemlidir [44].

Alfa spektroskopi düşük arka plan radyasyonu, iyi enerji çözünürlüğü ve kompakt olmayan yapısı nedeni ile oldukça elverişli bir sistemdir. Sistemde genellikle yarı iletken detektörler kullanılmaktadır. Alfa spektroskop sistemi, detektör, ön yükselteç, yükselteç, analog dijital dönüştürücü (ADC), çok kanallı analizör, güç kaynağı ve bilgisayardan oluşmaktadır. Numunelerde  ${}^{210}Po$  analizi için düşük arka plan radyasyonu, hazırlık aşamasında yapılan kimyasal işlemler, detektörün geometrisi ve verimi, ölçüm alınan süre önemli etkenlerdir [45].

Çevresel numunelerde alfa spektroskopi ile alınan ölçümler mBq ila bir miktar Bq arasında düşük aktivitedir. Bu nedenle yüksek verimliliğe sahip, hassas ölçüm alabilecek sistemler gerekmektedir. Alfa radyasyonunun ölçülmesi için, alfa parçacıklarının direkt iyonlaştırıcı özelliği kullanılmaktadır. Kullanılan detektörler yarı iletken detektörler olan pasifleştirilmiş implante edilmiş düzlemsel silikon (PIPS) detektör, silikon yüzey bariyeri (SSB) detektörleri ve dağınk bağlantı (DJ) detektörleri olabilmektedir. Aynı zamanda sıvı sintilasyon sayım sistemleri de (LSC) kullanılmaktadır. Alfa spektrometre yöntemi, çeşitli materyallerde alfa yayıcı nüklitlerin tespiti için çok faydalı ve hassas bir yöntemdir. Tekniğin bu kadar hassas olmasının ana nedenlerinden biri, düşük arka plan radyasyona sahip olmasıdır [42].



Şekil 2.23: Tipik bir alfa spektrometre sistemi [46].

Alfa spektroskopi sistemi Şekil 2.12 'de görülen yapılardan oluşmaktadır. Daha hassas ölçümler alınması nedeniyle ölçümler vakum altında yapılmaktadır. Bu nedenle sistemde vakum pompası da yer almaktadır.

Alfa spektroskopi yöntemi ile  $^{210}\text{Po}$  analizi için uygulanan kimyasal yöntemlerle birlikte enerjisi bilinen bir izleyici çekirdek eklenmektedir. Bu çekirdek genellikle  $^{209}\text{Po}$  veya  $^{208}\text{Po}$  olmaktadır. Bu izleyici çekirdeğin bilinen enerjisi ve aktivitesi yoluyla  $^{210}\text{Po}$  çekirdeğinin aktivite konsantrasyonları hesaplanmaktadır. Bu nedenle oldukça güvenli bir yöntemdir. Hazırlık aşaması olarak uygulanan kimyasal ayırma işlemi alfa yayınlı diğer radyonüklidlerin ayrılması için uygulanmaktadır. Sistemin dezavantajı ise bu kimyasal sürecin biraz zaman almasıdır. Sistemin duyarlılığının bir avantajı ise numunelerin az bir

miktarının analiz için yeterli olmasıdır. Alfa spektroskopi sistemleri gün geçtikçe geliştirilmektedir [21].

### 2.9.1 İyon İmplantı Edilmiş Detektörler

İyon implantı edilmiş detektörler bir yarı iletken detektör çeşididir. Yarı iletken malzeme, hızlandırıcı ile hızlandırılmış safsızlık seviyesi yüksek olan iyon demeti ile bombardıman edilmektedir. Bu işlem iyon implantasyonu olarak adlandırılmaktadır. Bu işlem ile n ya da p tipi tabakalar oluşmaktadır. Genellikle fosfor veya bor atomlarının iyonları hızlandırılarak kullanılmaktadır. Yarı iletken malzeme için iyon demeti enerjisi belli aralığa ayarlanabilmektedir. Bu değer genellikle 10 keV'dir. İyon demetinin enerjisinin değiştirilmesi ile safsızlık konsantrasyonu kontrol edilebilmektedir. Yarı iletken malzemeyi, radyasyon ile etkileşmesi durumunda meydana gelebilecek hasara karşı korumak amacıyla yarı iletken implantasyon işleminden sonra yaklaşık 500 °C derecede tavlama yapılmaktadır. Bu işlem yarı iletken malzemenin yapısını korumakta ve taşıyıcılar daha fazla süre kalabilmektedir. İyon implantasyonu ile birlikte oksit pasivasyonu yönteminin uygulanması da kaçak akımı azaltarak gürültünün azalmasını sağlamaktadır. İyon implantı edilmiş detektörler yüzey bariyeri detektörlerden daha kararlıdır [47,48].

### 3. MALZEME VE YÖNTEM

#### 3.1. GIDA ÖRNEKLERİNİN TOPLANMASI

Çalışmada analiz işlemleri için Türkiye'nin farklı illerinde yetiştirilen gıda ürünleri toplanmıştır. Toplanan örnekler günlük beslenme rutinleri göz önünde bulundurularak sıklıkla tüketilen ürünlerden seçilmiştir.

Toplanan ürünler tür olarak da farklı seçilerek gruplandırılmıştır. Böylece elde edilen sonuçların gıda türlerine göre farklılık gösterip göstermediği, hangi gıda türünde aktivite konsantrasyon değerlerinin ve yıllık etkin içsel doz oranlarını fazla olduğunu gözlemlemek amaçlanmıştır.

Ürünler seçilirken yetiştirilme şekilleri de dikkate alınmıştır.

Direkt toprakta yetişen ya da toprağa yakın seviyede yetişen ürünler seçilerek, hava bulunmakta olan radyonüklidlerin geçişinin yanı sıra toprakta yer alan radyonüklidlerin geçişinin hem kökler ile hem de bitki yüzeyine direkt absorpsiyon şeklinde olacağı için elde edilecek aktivite değerlerine katkı sağlayacağı düşünülmüştür.

Yüzey oranları geniş olan yeşil yapraklı sebzelerde, bitki yüzeylerinin hava ile temasının fazla olması absorpsiyon miktarını artıracığı için kökler yardımıyla geçişin yanı sıra havadan geçişin de fazla olacağı düşünülmüştür. Bu sayede bitkilerde biriken  $^{210}\text{Po}$  miktarının artacağı ve aktivite konsantrasyon değerlerine etki edebileceği dikkate alınmıştır. Bu nedenle yeşil yapraklı sebzeler bir diğer gıda türünü oluşturmaktadır.

Sindirim yoluyla vücuda alınan  $^{210}\text{Po}$  miktarını artırabilecek bir diğer grup hayvansal gıdalardır. Yetiştirilen bitkileri tüketmelerinin yanı sıra yedirilen yemlere bağlı olarak hayvanların vücuduna da radyoizotop geçişlerinin olabileceği dikkate alınmıştır. Bu hayvanlardan elde edilen gıdaların tüketimi ile de dolaylı olarak insan vücuduna geçişlerin olabileceği düşünülerek hayvansal gıdalar türünden de örnekler seçilmiştir. Bunun yanı sıra işlenmiş hayvansal gıdalardan da örnekler yer almaktadır.



**Tablo 3.1:** Gıda örneklerinin gruplandırılması.

Gıda Türü	Gıda örneği	Yetiştirildiği il
<b>Yeşil Yapraklılar</b>	Ispanak	İzmir
	Roka	Eskişehir
	Maydanoz	Antalya
	Karalahana	Trabzon
<b>Diğer Sebzeler</b>	Bamya	Kilis
	Patates	Nevşehir
	Brokoli	Samsun
	Domates	Çanakkale
	Biber	Gaziantep
	Havuç	Ankara
	Turp	Ankara
<b>Meyveler</b>	Kayısı	Malatya
	Muz	Mersin
	Elma	Karaman
	Çilek	Mersin
<b>Hayvansal gıdalar</b>	Peynir-1	Kars
	Peynir-2	Edirne
	Peynir-3	Erzincan
	Pastırma	Kayseri
	Sucuk	Kayseri
	Tavuk	Sakarya
	Kırmızı et	Balıkesir
<b>Hububatlar ve Tahıllar</b>	Buğday	Denizli
	Un	Yozgat
	Mısır	Trabzon
	Mercimek	Yozgat
	Kuru fasulye	Erzincan
<b>Kuruyemişler</b>	Ceviz	Denizli
	Fındık	Giresun
	Yer fıstığı	Adana

### 3.2. ÖRNEKLERİN ANALİZ İÇİN HAZIRLANMASI

Toplanan gıda örneklerinin yaş ağırlıkları ve temin edilme tarihleri belirlenmiştir. Temin edilme tarihleri aktivite konsantrasyonlarını hesaplama işlemi önem arz etmektedir. Ürünler herhangi bir yıkama ve temizleme işlemi yapılmadan Şekil 3.2’de görüldüğü gibi gün

işığında kurumaya bırakılmıştır. Örnekler herhangi bir ısı işlem kullanılmadan güneşte kurulmuştur.



**Şekil 3.2:** Gıda örneklerinin kurutulması.

Kurutulan örnekler havan yardımıyla homojen olacak şekilde iyice öğütülerek toz kıvamına getirilmiştir. Ardından kuru ağırlıkları belirlenerek Şekil 3.3'te olduğu gibi paketlenmiştir. Böylece numuneler analiz işleminin kimyasal süreci için hazır hale getirilmiştir.



**Şekil 3.3:** Kimyasal süreç için hazır hale getirilen gıda örnekleri.

### 3.2.1. Kimyasal Ayırma İşlemi

Alfa spektroskopi ile analiz işleminin ilk aşaması hazırlık süreci olan kimyasal ayırma işlemidir. Kimyasal işlem numunelerde bulunan diğer radyoizotopları eleyerek sadece analiz

edilmek istenen radyoaktif çekirdeğin kalmasını sağlar. Bu işlem en önemli aşamadır. Hangi kimyasal maddenin hangi oranda kullanılması gerektiği kullanılacak numune ağırlığı dikkate alınarak hesaplanmıştır. Bu aşamada tüm işlemlerin dikkatli bir şekilde ve sırasıyla yapılması oldukça önemlidir.

Çalışmada numunelerdeki  $^{210}\text{Po}$  aktivite konsantrasyonları hesaplanmak amaçlanmıştır. Kullanılan kimyasallarda bu amaca yöneliktir.

Radyokimyasal sürece ilk olarak 1 Molar HCl (Hidroklorik asit) çözeltisi hazırlanarak başlanmıştır. 1 Molar HCl çözeltisi için molarite hesabı yapılarak oran ve kullanılacak miktarlar belirlenmiştir. Ardından 250 ml beher içerisinde çözelti hazırlanmıştır.

Kimyasal malzemelerin kullanılması nedeniyle işlemler çeker ocak altında yapılmıştır. Isıtıcı manyetik karıştırıcı çeker ocağa alınarak kimyasal işlemlere devam edilmiştir.

Kurutularak homojen bir şekilde öğütülen gıda örneğinden hassas terazi yardımı ile 1 gr numune tartılarak erlen içerisine konulmuştur. Üzerine 3:1 oranda  $\text{HNO}_3$  (Nitrik asit ) ve HCl eklemiştir. Ardından erlen içerisine, izleyici çekirdek olan  $^{209}\text{Po}$  (Polonyum-209) ilave edilmiştir. Erlen çeker ocak altında bulunmakta olan manyetik karıştırıcıya alınarak  $80\text{ }^\circ\text{C}$  'de sindirme işlemi yapılmıştır. Başlangıçta oluşan köpürme işlemi durduktan sonra üzeri saat camı ile kapatılarak 30 dakika boyunca sindirme işlemine devam edilmiştir.



(a)

(b)

(c)

**Şekil 3.4:** (a) Kullanılan çeker ocak,(b) sindirme işlemi, (c)  $H_2O_2$  eklenmiş durum.

30 dakika sonra erlene  $H_2O_2$  (Hidrojen peroksit) eklenerek 10 dakika daha örneğin sindirilmesi işlemine devam edilmiştir. Bu aşamadan sonra örnek tamamen sindirilmiş duruma gelmiştir.

Sonraki aşamalar ise buharlaştırma işlemleri ile devam etmektedir. Manyetik karıştırıcı üzerinden alınan erlenin oda sıcaklığına gelmesi beklenmiştir. Çözelti içerisinde sindirilemeyen yağ dokusu gibi çökeltiler çözelti içerisinde alınmıştır. Erlende bulunan çözelti behere alınarak buharlaştırma sürecine geçilmiştir.

Behere çeker ocakta bulunan ısıtıcı manyetik karıştırıcı üzerine alınarak,  $80\text{ }^\circ\text{C}$  derecede çözeltinin tamamı buharlaştırılmıştır. Ardından behere HCl eklenerek, çözeltinin tamamı tekrar buharlaştırılmıştır. Buharlaştırma kısmı oldukça dikkatli şekilde yapılması gereken aşamadır.

Buharlaştırma sürecinden sonra numunelerde bulunan  $^{210}\text{Po}$  biriktirme işlemi gerçekleştirilmiştir.  $^{210}\text{Po}$ ,  $26 \times 0,5\text{ mm}$  boyutunda, % 99 saflıkta olan gümüş disk üzerinde biriktirilmiştir.

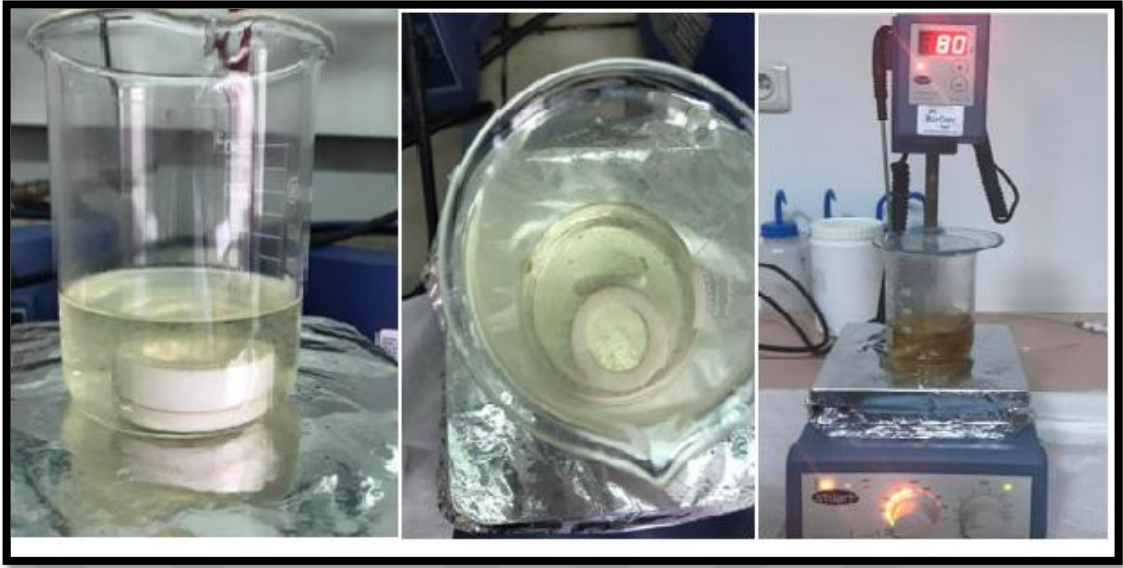
İçerisindeki çözelti tamamen buharlaşan behere başlangıçta hazırlanmış olan 1M HCl çözeltisinden 75 ml eklenmiştir. Gümüş disk üzerinde oluşabilecek demir ( $Fe^{+3}$  ve  $Fe^{+2}$ ) iyonlarının birikimini engellemek için 250 gr askorbik asit ( C vitamini) eklenmiştir.

Şekil 3.5’de görülmekte olan gümüş disk ve teflon malzemedan yapılmış olan disk tutacağı (holder) distile su ile yıkanmıştır. Gümüş diskin polonyumun biriktirileceği yüzey üstte kalacak şekilde disk tutacağına yerleştirilmiştir.



**Şekil 3.5:** Kullanılan gümüş disk ve disk tutacağı (holder).

Diski döndürmek için kullanılan bakla (balık) ile birlikte tutacağına yerleştirilmiş olan gümüş disk, içerisinde çözelti bulunan behere konulmuştur. Manyetik karıştırıcı üzerine alınan beher 4 saat boyunca 80 °C Şekil 3.6 (c)’de görüldüğü şekilde döndürme bırakılarak, gümüş disk üzerinde  $^{210}Po$  birikmesi (kendiliğinden depozisyon ) sağlanmıştır.



(a)

(b)

(c)

**Şekil 3.6:** (a) ve (b) Gümüş disk ve baklanın behere yerleştirilmesi, (c) Diskin döndürülmesi.

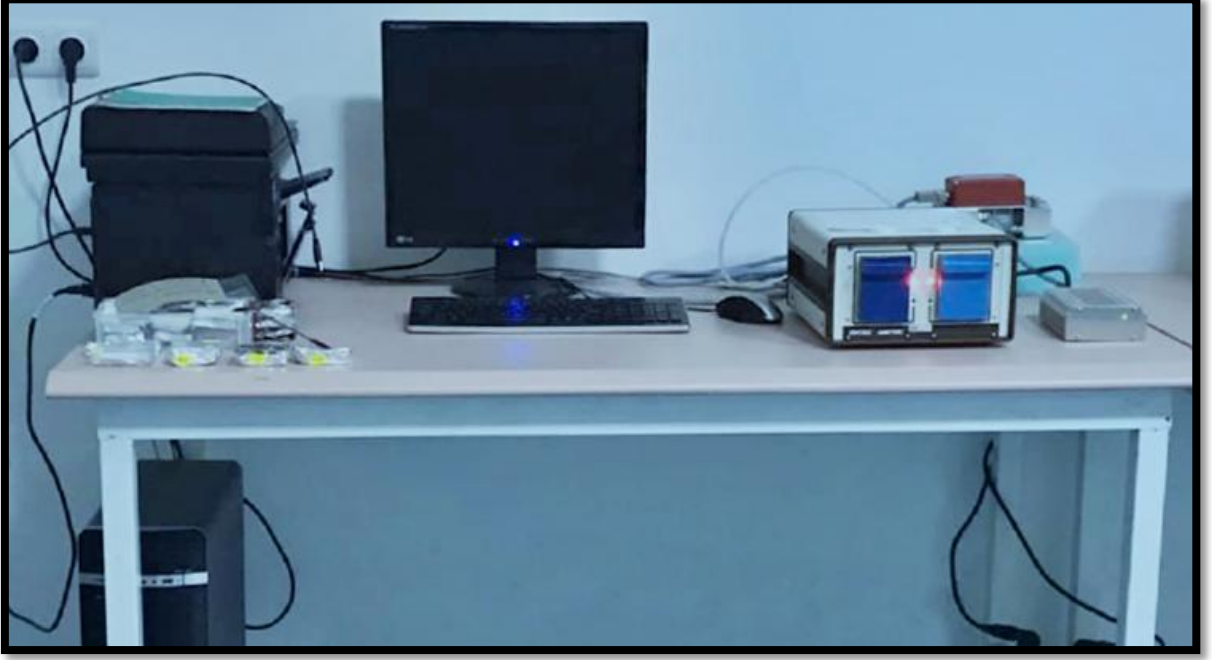
Döndürme işleminden sonra gümüş disk çözelti içerisinde alınmış, polonyumun biriktiği yüzeye zarar vermeyecek şekilde saf su ile yıkanıp kurutularak bir kutu içerisine alınmıştır. Şekil 3.7’de görünmekte olan gümüş diskin polonyum biriken kısmının rengi değişmiştir. Böylece disk detektöre yerleştirilme ve analiz işlemleri için hazır hale getirilmiştir.



**Şekil 3.7:** Depozisyon işlemi sonrası sayım için hazır hale getirilen gümüş disk.

### 3.3. ÇALIŞMADA KULLANILAN ALFA SPEKTROSKOPİ SİSTEMİ

Gıda numunelerindeki  $^{210}\text{Po}$  aktivite konsantrasyonlarının tespiti çalışmaları için İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü Nükleer Fizik Araştırma Laboratuvarı'nda bulunan Şekil 3.8'de görülmekte olan alfa spektroskopi sistemi kullanılmıştır.



Şekil 3.8: İstanbul Üniversitesi Nükleer Fizik Araştırma Laboratuvarı'ndaki Alfa Spektroskopi Sistemi.

#### 3.3.1 Kullanılan Cihaz

Alfa spektroskopi sistemi bir adet bilgisayar, alfa detektörü ve vakum sisteminden oluşmaktadır. Detektör sistemlerinde genelde açıkta olan önyükselteç, yükselteç, analog dijital çevirici (ADC) ve çok kanallı analizör (MCA) bu sistemde detektörün arka kısmına gömülü bir şekilde bulunmakta ve kapalı durumdadır

Alfa spektrometre sisteminde bulunan detektör Şekil 3.9'da görülmekte olan Alpha Duo-Ortec marka iyon implante edilmiş yarı iletken detektördür.



**Şekil 3.9:** Alpha Duo-Ortec iyon implante edilmiş yarı iletken detektör.

Kullanılan detektörde, iki tane sayım odası bulunmaktadır. Sayım odalarında iki adet ULTRA AS serisi, BU-020-450-AS model iyon implante edilmiş silikon detektör bulunmaktadır. Bu sayede detektörden aynı anda iki farklı numune için ölçüm alınabilmektedir. Detektörün aktif sayım alanı  $450 \text{ mm}^2$ 'dir. Detektör 0-10 MeV enerji aralığında sonuç vermektedir. Alfa spektroskopi sisteminde ALPHA-MINI-PPS model vakum pompası bulunmaktadır [49].

Enerji çözünürlüğü, numunelerde kullanılan gümüş disk ile aynı boyuttaki kaynak için  $\leq 20$  keV olarak bulunmuştur.

Detektör en iyi verimi kaynağın detektöre yakın olduğu mesafede vermektedir. Verim bu seviyede  $\geq \%25$ 'dir [47].

Kullanılan sistem 3 MeV'in altındaki enerjilerde arka plan değeri vermektedir. Arka plan değeri 3 MeV üzerindeki enerjilerde  $\leq 1$  sayım/saat şeklinde yok denecek kadar azdır. Bu nedenle kullanılan detektör, ölçüm almak için oldukça elverişli bir detektördür.

Detektörün her iki odasında da diskin yerleştirilebileceği 10 seviye bulunmaktadır. 1. Seviyede ölçüm alındığında radyoaktif çekirdek kullanıldığı için detektör bu radyoaktif çekirdek ile çok çabuk kontamine olabilmektedir. Bu nedenle çalışmadaki tüm ölçümler en iyi verimliliğin elde edildiği 2. seviyede alınmıştır.



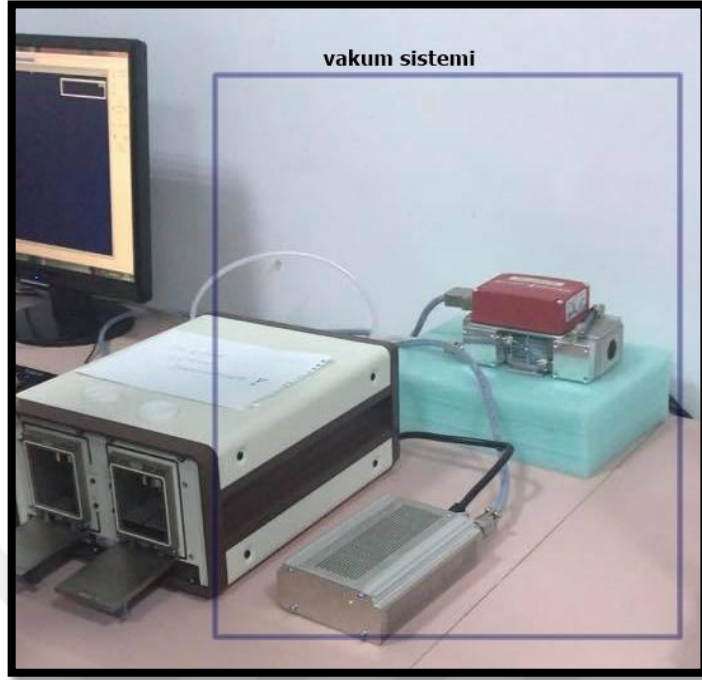
**Şekil 3.10:** Diskin detektöre yerleştirilmesi.

Alfa spektroskopi sisteminde alınan ölçümler vakum sistemi altında alınmıştır. Sistemde bulunan vakum sistemi Şekil 3.11’de görülmektedir.

Vakum sistemi kullanılmasının amacı, numunelerde bulunmakta olan  $^{210}\text{Po}$  çekirdeklerinin detektör içerisinde, hava ile etkileşimini önlemektir. Alfa parçacıkları ağır parçacıklardır, madde ile etkileştiği takdirde enerjisi azalmaktadır. Bu durumda da diske ulaşarak birikmeleri zorlaşmaktadır. Bu durumda disk üzerinde olması gerekenden daha az sayıda birikme meydana gelebilmektedir.

Disk üzerinde yalnızca numunelerden gelen  $^{210}\text{Po}$  birikiminin sağlanması ve numunelerden açığa çıkan tüm polonyumların disk üzerinde biriktirilmesi için vakum sistemi kullanılmaktadır.

Vakum sisteminin kullanılması yapılan çalışmalardaki hassasiyeti artırarak verimliliğe katkı sağlamaktadır. Böylece daha doğru sonuçlar elde edilmektedir.



**Şekil 3.11:** Alfa spektrometre sisteminde bulunan vakum sistemi.

Alfa spektroskopi sisteminde yer alan vakum ortamı 1 Torr-13 Torr arasındadır.

Çalışmada her bir ölçümden önce sistemin vakum değeri 8000 mTorr altına düşürülüp, 50 Volt voltaj uygulanmıştır.

Alfa spektrometre sisteminde ölçümler ve elde edilen spektrumların analizi için Ortec Maestro programı kullanılmıştır.

### 3.3.2 Detektör Kalibrasyonu

Ölçümler alınmadan önce numunelerden elde edilen spektrumlarda enerji değerlerinin doğruluğunu görebilmek amacıyla detektör kalibrasyonu yapılmıştır. Kalibrasyon için gıda örneklerinde kullanılan gümüş disklerle aynı boyut ve geometriye sahip olan Şekil 3.12’de görünmekte olan karışık alfa kaynağı kullanılmıştır.



**Şekil 3.12:** Kalibrasyon için kullanılan karışık alfa kaynağı.

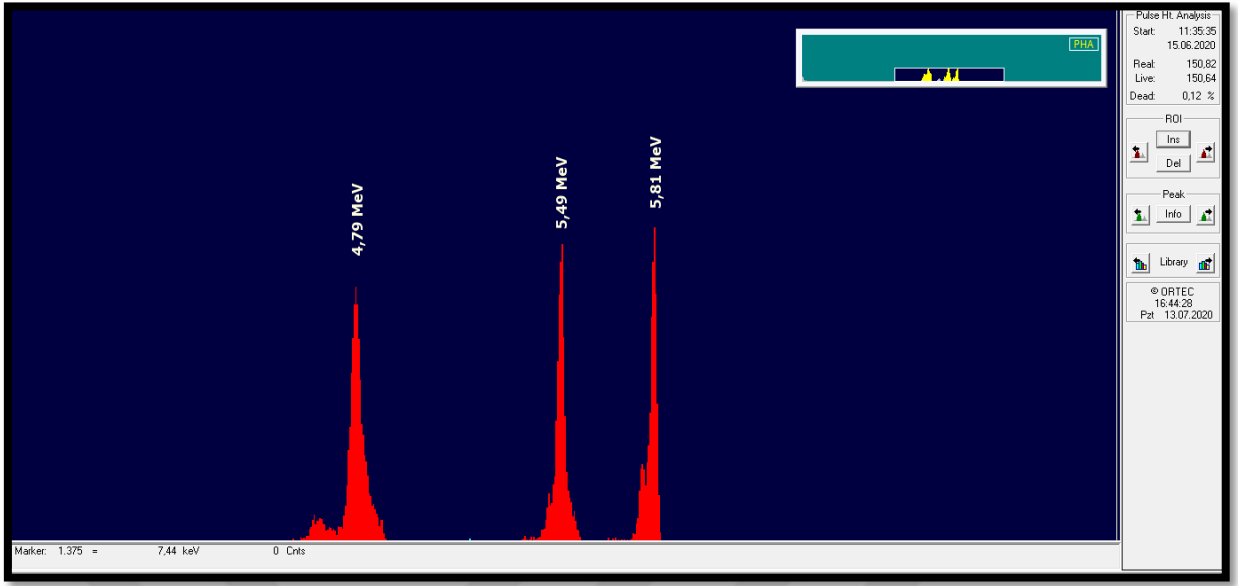
Kullanılan kaynağın boyut ve geometrisinin numunelerde kullanılan gümüş disk ile aynı olması enerji kalibrasyonunun doğruluğu açısından önemlidir.

Kalibrasyon için kullanılan kaynak karışık kaynaktır. Enerjileri bilinen üç çekirdekten oluşmaktadır. Kullanılan kaynak  $^{237}\text{Np}$  (Neptünyum-237),  $^{241}\text{Am}$  (Amerikyum-241) ve  $^{244}\text{Cm}$  (Küriyum-244) çekirdeklerini içermektedir. Enerjileri sırasıyla 4,79 MeV, 5,49 MeV ve 5,81 MeV'dir.

Kalibrasyon için detektörün ikinci seviyesinde 150 saniye süre ile ölçüm alınmıştır. Elde edilen spektrum Şekil 3.13' te olduğu gibidir.

Kalibrasyon sonucu elde edilen spektrumlar kullanılarak enerji çözünürlüğü hesaplanmıştır.

Enerji çözünürlüğü, spektrumlardaki FWHM (Full width at half maximum) değerleri hesaplanarak bulunmuştur.



Şekil 3.13: Kalibrasyon için kullanılan çekirdeklere ait pikler.

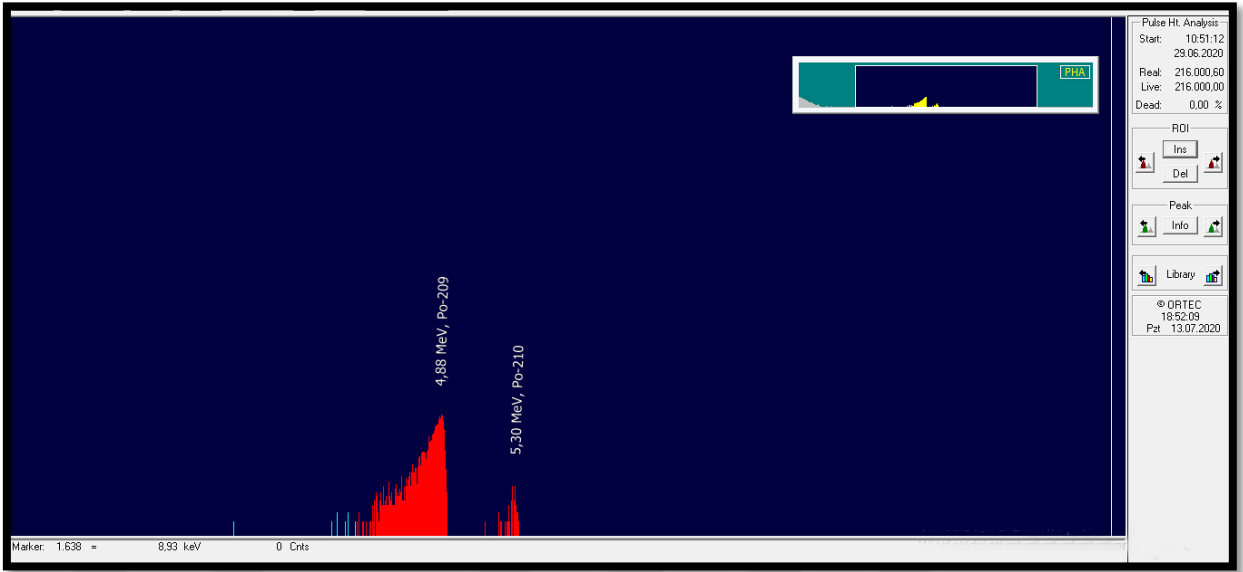
### 3.3.3. Gıda Örneklerinde $^{210}\text{Po}$ Aktivite Konsantrasyon Hesabı

Kimyasal süreç sonrası sayım işlemi için hazır hale gelen diskler, iyon implante edilmiş detektör kullanılarak analiz edilmiştir.

Diskler detektöre yerleştirildikten sonra, gerekli ayarlamalar yapılarak her bir gıda örneği için 216 000 saniye süre ile ölçüm alınmıştır. Ölçüm sonucunda spektrumlar elde edilerek aktivite konsantrasyon ve yıllık etkin doz değeri hesaplamaları yapılmıştır.

Aktivite konsantrasyon değerleri, numunelerin üretim tarihleri, temin edilme tarihleri, analiz edilme tarihleri dikkate alınarak hesaplanmıştır.

Yıllık etkin doz değerleri hesaplanırken, gıda örneklerinin kişi başı tüketim miktarları dikkate alınmıştır.



**Şekil 3.14:** Elde edilen bir spektrum ve gözlenen pikler.

Numunelerin analizleri sonucunda elde edilen spektrumlarda, izleyici olan  $^{209}\text{Po}$  çekirdeği ve  $^{210}\text{Po}$  çekirdeğine ait iki adet pik elde edilmiştir. Sırasıyla 4,88 MeV, 5,30 MeV enerji değerlerinde elde edilen pikler kullanılarak aktivite konsantrasyon ve yıllık etkin doz değerleri hesaplanmıştır.

Gıda örneklerinin  $^{210}\text{Po}$  aktivite konsantrasyonları Becquerel/ kilogram cinsinden;

$$A_{0S} = \frac{A_{0T} K_T N_S}{K_S N_T m} \quad (3.1)$$

Formülünden hesaplanmıştır.

$A_{0S}$  =  $^{210}\text{Po}$  çekirdeğinin aktivitesi (Bq)

$A_{0T}$  =  $^{209}\text{Po}$  (izleyici) çekirdeğinin başlangıç aktivitesi (Bq)

$N_S$  =  $^{210}\text{Po}$  foto piki altında kalan alan (net sayım)

$N_T$  =  $^{209}\text{Po}$  foto piki altında kalan alan (net sayım)

$K_T$  =  $^{209}\text{Po}$  çekirdeği için düzeltme faktörü

$K_S$  =  $^{210}\text{Po}$  çekirdeği için düzeltme faktörü

$m$  = Gıda örneğinin kütlesi (kg)

Gıda ürünlerinin yıllık etkin doz değerleri, her ürünün yıllık kişi başı tüketim miktarı dikkate alınarak hesaplanmıştır.

Tüketilen gıdaların  $^{210}\text{Po}$  aktivite konsantrasyon değerine ve yıllık tüketim miktarına bağlı olarak oluşan yıllık etkin içsel radyasyon doz değeri ise Sievert / yıl cinsinden;

$$E_{210\text{Po}} = \text{CF} \times m \times A_{210\text{Po}} \quad (3.2)$$

Formülünden hesaplanmıştır.

CF =İçsel doz dönüşüm faktörü

$$\text{CF} = 1,2 \times 10^{-6} \text{ Sievert / yıl}$$

m = gıdanın yıllık tüketim miktarı (kilogram)

$A_{210\text{Po}} = ^{210}\text{Po}$  çekirdeğinin aktivite konsantrasyonu (Bq/ kg)

Yıllık etkin doz değerleri hesaplanırken gıdaların yıllık tüketim değerleri TÜİK verilerinden alınmıştır. TÜİK verilerinden ulaşılamayan gıda örnekleri için yıllık tüketim miktarı 1 kg/yıl olarak alınmıştır.

## 4. BULGULAR

### 4.1. GIDA ÖRNEKLERİNDE ELDE EDİLEN AKTİVİTE KONSANTRASYON DEĞERLERİ

Yapılan çalışmada 30 adet gıda örneği için alfa spektroskopi sistemi kullanılarak 216 000 saniye süreli sayımlar alınmış, her bir örnek için spektrum elde edilmiştir. Elde edilen spektrumlar analiz edilip, (3.1) eşitliği kullanılarak  $^{210}\text{Po}$  aktivite konsantrasyon değerleri hesaplanmıştır.

Elde edilen aktivite konsantrasyon değerleri hesaplanmış ve standart hata değerleri ile birlikte Tablo 4.1’de verilmiştir.

Analiz sonucunda elde edilen en büyük  $^{210}\text{Po}$  aktivite konsantrasyon değeri  $4,14 \pm 1,1$  Bq/kg olarak hesaplanmıştır. Elde edilen en büyük değer roka gıda örneğinde saptanmıştır.

Elde edilen en küçük  $^{210}\text{Po}$  konsantrasyon değeri ise  $0,02 \pm 0,1$  Bq / kg olarak, ceviz gıda örneğinde elde edilmiştir.

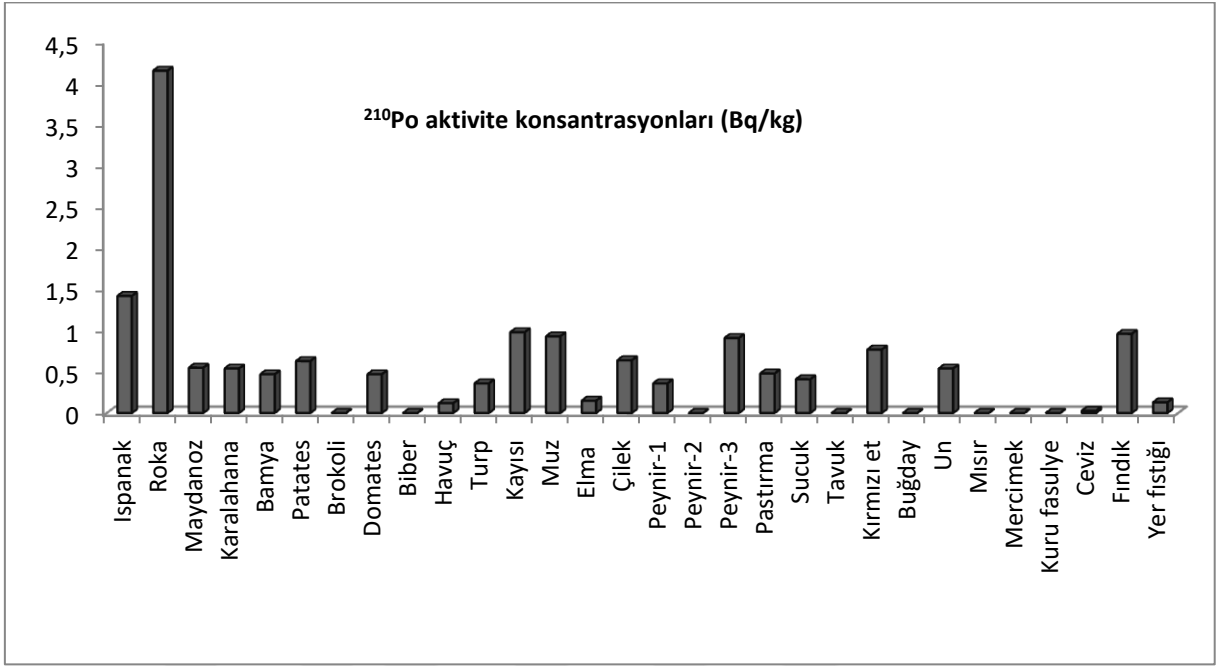
Analiz sonucunda ise tavuk, peynir-2,mısır, mercimek, buğday, brokoli, biber, kuru fasulye gıda örneklerinde elde edilen aktivite değerleri  $< 0$  olup detekte edilebilir limitlerin altındadır. Bu gıda örnekleri için spektrumda  $^{210}\text{Po}$  çekirdeği için pik değerleri gözlenmemiştir.

İllere göre elde edilen değerlere bakılırsa en büyük aktivite konsantrasyon değeri Eskişehir, ilinde, en küçük aktivite değeri ise Denizli ilinde saptanmıştır.

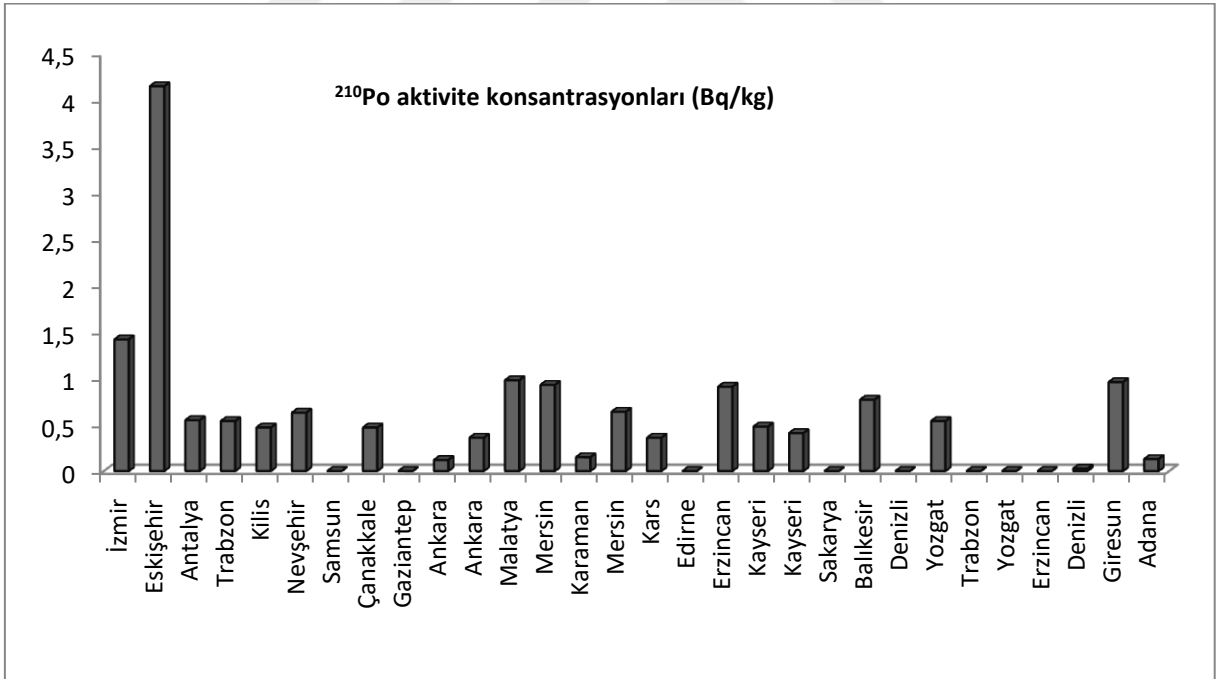
**Tablo 4.1:** Gıda örneklerindeki  $^{210}\text{Po}$  aktivite konsantrasyon değerleri.

Gıda Türü	Gıda örneği	$^{210}\text{Po}$ Aktivite Konsantrasyonu (Bq/Kg)
<b>Yeşil Yapraklılar</b>	Ispanak	1,41 ± 0,4
	Roka	4,14 ± 1,1
	Maydanoz	0,54 ± 0,7
	Karalahana	0,53 ± 0,7
<b>Diğer Sebzeler</b>	Bamya	0,46 ± 0,4
	Patates	0,62 ± 0,3
	Brokoli	< 0
	Domates	0,46 ± 0,4
	Biber	< 0
	Havuç	0,11 ± 0,2
	Turp	0,35 ± 0,2
<b>Meyveler</b>	Kayısı	0,97 ± 0,5
	Muz	0,92 ± 0,3
	Elma	0,14 ± 0,2
	Çilek	0,63 ± 0,5
<b>Hayvansal gıdalar</b>	Peynir-1	0,35 ± 0,5
	Peynir-2	< 0
	Peynir-3	0,90 ± 0,3
	Pastırma	0,47 ± 0,3
	Sucuk	0,40 ± 0,2
	Tavuk	< 0
	Kırmızı et	0,76 ± 0,2
<b>Hububatlar ve Tahıllar</b>	Buğday	< 0
	Un	0,53 ± 0,4
	Mısır	< 0
	Mercimek	< 0
	Kuru fasulye	< 0
<b>Kuruyemişler</b>	Ceviz	0,02 ± 0,1
	Fındık	0,95 ± 0,3
	Yer fıstığı	0,12 ± 0,2

Elde edilen aktivite konsantrasyon değerlerinin gıda ürünlerine ve illere göre değişim grafikleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.1: Gıda örneklerinde elde edilen  $^{210}\text{Po}$  aktivite konsantrasyon değerleri.



Şekil 4.2: Elde edilen  $^{210}\text{Po}$  aktivite konsantrasyon değerlerinin illere göre dağılımı.

#### 4.2. GIDA ÖRNEKLERİNDE HESAPLANAN YILLIK ETKİN İÇSEL DOZ DEĞERLERİ

Çalışmada 30 adet gıda örneği için yıllık kişi başı tüketim miktarları dikkate alınarak yıllık etkin içsel doz değerleri hesaplanmıştır. Hesaplamalarda (3.2) eşitliği kullanılmıştır.

Yapılan çalışmada hesaplanan yıllık etkin içsel doz değerleri Tablo 4.2’de verilmiştir.

Çalışmada en fazla yıllık etkin içsel doz değeri 147,92  $\mu\text{Sv}/\text{yıl}$  olarak hesaplanmıştır. Elde edilen en büyük değer un gıda örneğinde saptanmıştır.

Hesaplanan en küçük yıllık etkin içsel doz değeri ise 0,09  $\mu\text{Sv}/\text{yıl}$  olup, ceviz gıda örneğinde görülmüştür.

En büyük yıllık etkin içsel doz değeri Yozgat ilinden, en küçük değer ise Denizli ilinden temin edilen gıda örneklerinde bulunmuştur.

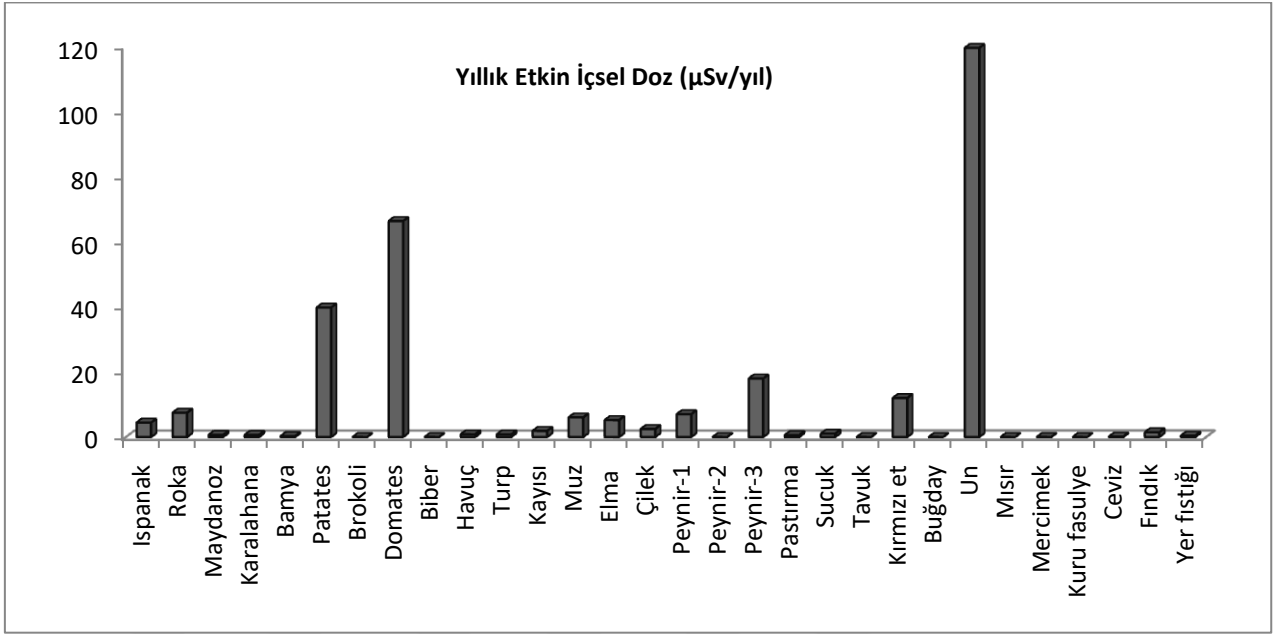
Çalışma sonucunda hesaplanan ortalama yıllık etkin içsel doz değeri ise 11,05  $\mu\text{Sv}/\text{yıl}$ ’dır.

Yıllık etkin içsel doz değeri hesaplanırken gıda örneği için bulunan aktivite konsantrasyon değeri kullanılmıştır. Hesaplanan en büyük yıllık etkin içsel doz değerinin saptandığı gıda örneği ile, aktivite konsantrasyon değerinin en fazla bulunduğu gıda örneği aynı değildir. Bu sonuç gıdaların yıllık tüketim miktarlarının maruz kalınan yıllık etkin içsel doz oranına büyük katkı sağladığını göstermektedir.

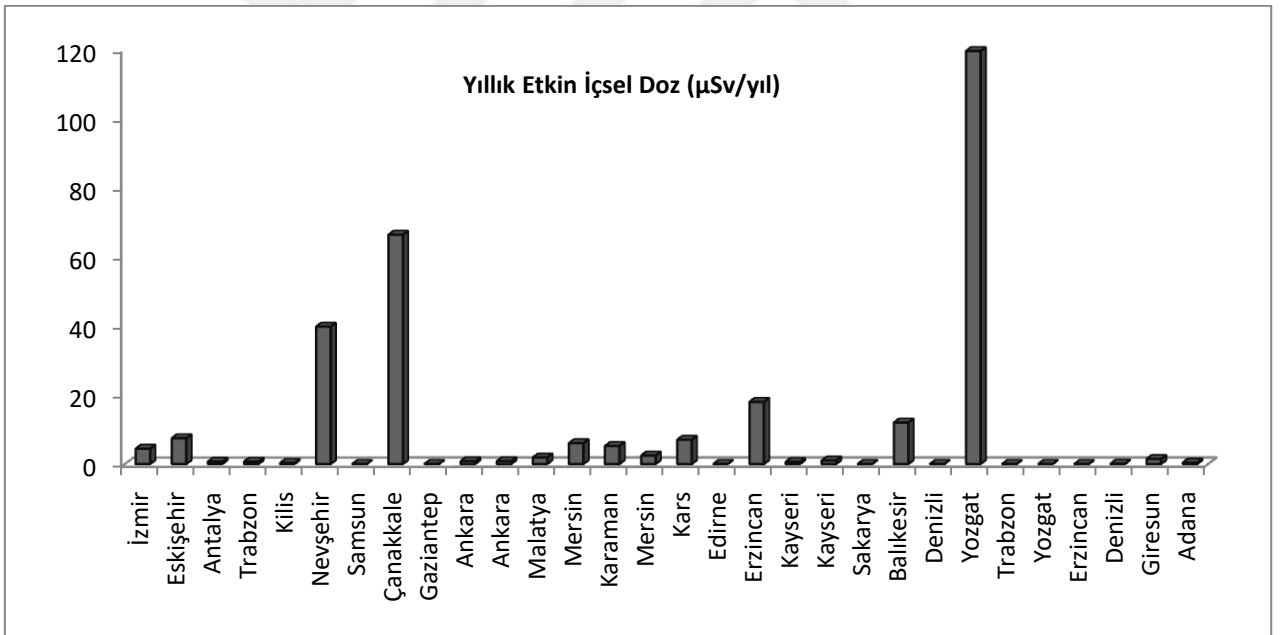
**Tablo 4.2:** Elde edilen yıllık etkin içsel doz oranları.

<b>Gıda Türü</b>	<b>Gıda örneği</b>	<b>Yıllık Etkin Doz Değerleri</b> ( $\mu\text{Sv y}^{-1}$ )
<b>Yeşil Yapraklılar</b>	Ispanak	4,42
	Roka	7,46
	Maydanoz	0,65
	Karalahana	0,64
<b>Diğer Sebzeler</b>	Bamya	0,28
	Patates	39,80
	Brokoli	0
	Domates	66,41
	Biber	0
	Havuç	0,81
	Turp	0,80
<b>Meyveler</b>	Kayısı	1,87
	Muz	6,03
	Elma	5,21
	Çilek	2,45
<b>Hayvansal gıdalar</b>	Peynir-1	7,02
	Peynir-2	0
	Peynir-3	17,99
	Pastırma	0,57
	Sucuk	1,06
	Tavuk	0
	Kırmızı et	11,99
<b>Hububatlar ve Tahıllar</b>	Buğday	0
	Un	147,92
	Mısır	0
	Mercimek	0
	Kuru fasulye	0
<b>Kuruyemişler</b>	Ceviz	0,09
	Fındık	1,45
	Yer fıstığı	0,38

Elde edilen değer yıllık etkin içsel doz değerlerine ait grafikler, gıda ürünleri ve iller bazında aşağıda verilmiştir.



**Şekil 4.3:** Gıda örneklerinin yıllık etkin içsel doz değerleri.



**Şekil 4.4:** Yıllık etkin içsel doz değerlerinin illere göre dağılımı.

## 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu yüksek lisans tez çalışmasında çeşitli gıda türlerine ait toplam 30 adet örnek farklı illerden olmak üzere toplanmıştır. Toplanan örnekler, ön hazırlık olarak kimyasal ayırma işlemlerine tabi tutulmuştur. Örneklerde bulunan  $^{210}\text{Po}$  çekirdeği kendiliğinden depozisyon yöntemi kullanılarak gümüş disk üzerinde biriktirilmiştir. Ardından alfa spektroskopi sistemi kullanılarak, iyon implante edilmiş yarı iletken detektör kullanılarak sayım yapılmıştır. Her bir gıda örneği için 216 000 saniye süreli sayımlar gerçekleştirilmiştir. Sayım işlemi sonrası her bir gıda örneği için spektrum elde edilmiştir. Elde edilen spektrum analiz edilerek, izleyici  $^{209}\text{Po}$  çekirdeğinin bilinen enerji ve aktivite değerleri de kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır.

Her bir gıda örneği için,  $^{210}\text{Po}$  çekirdeğinin aktivite konsantrasyon ve yıllık etkin içsel doz değerleri hesaplanmıştır.

Çalışmada aktivite konsantrasyon değeri en fazla roka gıda örneğinde,  $4,14 \pm 1,1$  Bq/ kg olarak bulunmuştur.

Aktivite konsantrasyon değerinin en az olduğu gıda örneği ise cevizdir. Bu örnekte  $0,02 \pm 0,1$  Bq/ kg olarak hesaplanmıştır.

Tavuk, peynir-2,mısır, mercimek, buğday, brokoli, biber, kuru fasulye gıda örneklerinde ise aktivite konsantrasyon değerleri hesaplanamamıştır. Bu örneklerde detekte edilebilir limitlerde bir değere rastlanmamıştır.

Yıllık etkin içsel doz değerleri hesaplandığında ise, en fazla değer  $147,92$   $\mu\text{Sv/yıl}$  olarak un gıda örneğinde bulunmuştur.

En az yıllık etkin içsel doz değeri ise ceviz gıda örneğinde saptanmış olup  $0,09$   $\mu\text{Sv/yıl}$ 'dır.

**Tablo 5.1:** Elde edilen ortalama aktivite konsantrasyon değerinin diğer çalışmalar ile karşılaştırılması.

Yer	<sup>210</sup> Po Aktivite Konsantrasyon Değerleri (Bq/kg)	Kaynak
İtalya	0,07 ± 2,65	[4]
Polonya	1,12 ± 0,07	[5]
Yeni Zelanda	0,09 – 3,65	[6]
Birleşik Krallık	0,082	[50]
Hindistan	0,05 ± 0,01	[7]
Marshall Adaları	0,06 – 1,50	[9]
İzmir	0 – 9,40	[3]
Bu alışma	0,49 ± 0,32	

**Tablo 5.2:** Elde edilen ortalama yıllık etkin içsel doz oranının diğer çalışmalar ile karşılaştırılması.

Yer	Yıllık Etkin İçsel Doz Değerleri ( $\mu\text{Sv yıl}^{-1}$ )	Kaynak
İtalya	54,6	[4]
Polonya	1,12 ± 0,07	[5]
Birleşik Krallık	54	[50]
Hindistan	2,24x10 <sup>3</sup>	[7]
Marshall Adaları	2x10 <sup>3</sup>	[9]
Bu alışma	11,05	

Çalışmada elde edilen sonuçlar yapılan diğer çalışmalarla karşılaştırıldığında ortalama değerler bulunmuştur.

Çalışmaların karşılaştırılması yukarıdaki tablolarda yer almaktadır.

UNCEAR 2000 [51] raporuna göre radyoaktif maddelerin yeme-içme yoluyla vücuda alınması sonucu maruz kalınan ortalama yıllık etkin doz değeri 300  $\mu\text{Sv/yıl}$ 'dır. Bu çalışmada incelenen gıda örneklerinin tüketimine bağlı olarak hesaplanan yıllık etkin doz değeri en fazla 147,92  $\mu\text{Sv/yıl}$  olarak un örneğinde bulunmuş olup, UNSCEAR tarafından belirlenen sınır değerinin altındadır.

Tek bir gıda ürünü ya da sadece  $^{210}\text{Po}$  çekirdeğine ait veriler değerlendirildiğinde elde edilen sonuçlar, belirlenen değerlerin altında olup sorun teşkil etmemektedir. Fakat her bir üründen gelen tüm değerler ve gıdalarda bulunan diğer radyoaktif çekirdekler nedeniyle maruz kalınan doz oranları da düşünüldüğünde risk artabilmektedir.

Gıda örneklerinde bulunan  $^{210}\text{Po}$  çekirdeğinin başlıca kaynağı aynı radyoaktif seriye ait olan radyoaktif çekirdeklerdir. Ürünlerin yetiştirilme şekilleri, tarımda kullanılan gübre gibi uygulamalar ürünlerdeki radyasyon doz seviyelerini artırmaktadır. Ürünlerin yetiştirildiği toprak yapısı, iklim koşulları da etki edebilecek faktörlerdir. Yıllık etkin içsel doz oranı ise büyük ölçüde ürünlerin tüketim miktarlarına bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

Yaşanılan bölge, rutin beslenme alışkanlıkları ve miktarları alınan radyasyon doz oranına katkı sağlamaktadır.

Radyasyon organ ve dokularla etkileştiğinde sağlık açısından ciddi sorunlara neden olmaktadır. Bu etkilerin büyük çoğunluğu ise hemen belirti vermeyip zaman içerisinde görülmekte ya da kalıtsal olarak gelecek nesillere aktarılmaktadır.

Radyoaktif  $^{210}\text{Po}$  çekirdeği bozunum yaparak alfa parçacığı yayınlamaktadır. Bu da vücut içerisinde iç ışınlamaya sebep olmaktadır. $^{238}\text{U}$  serisi ürünü olan  $^{210}\text{Po}$  serinin son ürünü olan  $^{206}\text{Pb}$  (Kurşun-206) çekirdeğine bozunmaktadır. Kararlı yapıda olan  $^{206}\text{Pb}$  çekirdeği ise vücutta çeşitli organlarda, özellikle kemiklerde birikmektedir. Bu da ciddi sağlık problemlerine neden olmaktadır.

Radyasyonun meydana getirebileceği deterministik ve stokastik etkiler iyice araştırılarak, radyasyondan korunma yolları halka açık bir şekilde anlatılmalıdır.

Gıda üretimleri ise ciddi şekilde denetlenmelidir. Fazla ürün elde etmek adına yapılan bir takım uygulamaların olası zararları bildirilmeli ve engellenmelidir.

Sonuç olarak gıda ürün türleri ve tedarik edilen bölgeler genişletilerek daha kapsamlı çalışmalar yapıp, bölgesel haritalar çıkarılabilir.

İnsan sağlığı konusunda yapılan her çalışma dikkatle incelenmeli, hiçbir sonuç göz ardı edilmemelidir.



## KAYNAKLAR

- [1]. Karalı, T., 1994, *Türkiye'de Tüketilen Yerli ve Yabancı Sigaralardaki Radyoaktif Polonyum Düzeyinin Elektrodepozisyon ve Alfa Spektroskopisi ile ölçülmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [2]. Spencer, H., Holtzman, R.B., Kramer, L., & Ilcewicz, F. H.,1977, Metabolic Balances of  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{210}\text{Po}$  at Natural Levels, *Radiation Research*, Vol.69, No.1,166 -184.
- [3]. Ekdal, E., 2003, *Tarım Toprakları ve Ürünlerinde Fosfatlı Gübre Kullanımına Bağlı  $^{210}\text{Po}$  ve  $^{210}\text{Pb}$  Radyonüklidlerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [4]. Desideri, D., Battisti, P., Gniardina, I., Roselli, C., Feduzi, L., Goriotti, 2018, Assessment of radioactivity in Italian baby food, *Food Chemistry*, Vol.279, 408-415.
- [5]. Strumińska-Parulska, D., Olszewski, G., 2018, Is ecological food also radioecological? –  $^{210}\text{Po}$  and  $^{210}\text{Pb}$  studies, *Chemosphere*, Vol.191, 190-195.
- [6]. Pearson, A. J., Gaw, S., Hermanspahn, N., Glover, C. N., 2015, Natural and anthropogenic radionuclide activity concentrations in the New Zealand diet, *Journal of Environmental Radioactivity*, 151 (2016), 601-608.
- [7]. Macklin Rani, L., Jeevanram, R. K., Kannan, V., Govindaraju, M., 2014, Estimation of Polonium-210 activity in marine and terrestrial samples and computation of ingestion dose to the public in and around Kanyakumari coast, India, *Journal of Radiation Research and Applied*, 7 (2014), 207-213.
- [8]. Desideri, D., Roselli, C., Meli, M., 2009, Intake of  $\text{Po-210}$ ,  $\text{U-234}$  and  $\text{U-238}$  radionuclides with wine in Italy, *Food and Chemical Toxicology*, 48 (2010), 650-657.
- [9]. Noshkin, V. E., Robison, W. L., Wong, K. M., 1993, Concentration of  $\text{Po-210}$  and  $\text{Pb-210}$  in the diet at the Marshall Islands, *The Science of the Total Environment*, 155(1994), 87-104.

- [10]. Lilley, J., 2001, *Nuclear Physics: Principles and Applications*, John Wiley & Sons Inc., England, ISBN: 978-0471979364.
- [11]. Krane, K. S., *Introductory Nuclear Physics*, Oregon State University, United States of America, ISBN 0-471- 80553-X.
- [12]. <https://www.taek.gov.tr/tr/2016-06-09-00-43-46.html> [Ziyaret Tarihi: 15 Eylül 2019].
- [13]. Anon., 2011, T.C. Milli Eğitim Bakanlığı, *Radyasyonun Zararlı Etkileri*, Ankara, 6-4-12.
- [14]. Çetinkaya, H., 2009, *Kütahya İli İçme Sularında Radon ve Radyum Miktarlarının Belirlenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [15]. <https://www.radiation-dosimetry.org/what-is-alpha-decay-vs-gamma-decayradioactivity-definition/> [Ziyaret Tarihi: 20 Haziran 2020].
- [16]. Hafizoğlu, N., 2012, *Kütahya İli ve İlçelerinde Çevresel Gama Radyasyonu Ölçümü*, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [17]. Seyrek, E., 2007, *Radyoizotopların Üretimi ve Radyoterapide Kullanılması*, Gazi Üniversitesi Eğitim Fakültesi Fizik Eğitim Ana Bilim Dalı.
- [18]. Türkdoğan, S., 2017, *Kastamonu İnebolu İlçesinin Doğal Radyasyon Seviyesinin Belirlenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [19]. United Nations Environment Programme, 2016, *Radiation effects and sources: What is radiation? What does radiation do to us? Where does radiation come from?*, United Nations, Austria, ISBN: 978-92-807-3517-8.
- [20]. [https://en.wikipedia.org/wiki/Ionizing\\_radiation](https://en.wikipedia.org/wiki/Ionizing_radiation) [Ziyaret Tarihi:3 Mayıs 2020].
- [21]. L' Annunziata, M., 1998, *Handbook of radioactivity analysis*, 1<sup>st</sup> ed., Academic press, California, USA, ISBN: 0-12-436255-9.
- [22]. Güven, H., 2001, *Nükleer Fizik*, İ.T.Ü Fizik Bölümü, 247-128-127-207.

- [23]. İsel,P.,2019, *İstanbul Boğazı'ndan Toplanan Toprak ve Sedeiment Örneklerinin Gama Spektroskopisi Sistemi ile Radyoaktivite Analizi*,Yüksek Lisans, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [24]. Demir, B., *Radyasyon ve Sağlık Fiziği Ders Notları*,2013.
- [25]. <https://www.afad.gov.tr/kbrn/radyasyon-kaynaklari> [Ziyaret Tarihi: 13 Ağustos 2019].
- [26]. <https://www.nrc.gov/about-nrc/radiation/around-us/sources.html> [Ziyaret Tarihi:15 Haziran 2020]
- [27]. <https://www.taek.gov.tr/tr/2016-06-09-00-43-46/1087-dogal-radyasyon-kaynaklari.html> [Ziyaret Tarihi: 13 Nisan 2020].
- [28]. Seçkin, C., 2018, *İç Anadolu Bölgesi Yer Seviyesi Kozmik Radyasyon Dozunun Simülasyon Yoluyla Hesaplanması*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü.
- [29]. Hacıosmanoğlu, T., 2017, *Doğal ve Yapay Radyasyon Kaynakları*, *Gülhane Tıp Fakültesi Nükleer Tıp Anabilim Dalı*, DOI:10.4274/3,166-171.
- [30]. <https://www.nuclear-power.net/nuclear-power/reactor-physics/atomic-nuclear-physics/radioactive-decay/radioactive-decay-chain/> [Ziyaret Tarihi : 7 Ekim 2019].
- [31]. Bozbıyık, A., Özdemir, Ç., Hancı, İ.H., 2002, *Radyasyon Yaralanmaları ve Korunma Yöntemleri*, *Ankara Üniversitesi Tıp Fakültesi Adli Tıp Anabilim Dalı*, cilt:11, sayı: 7, 272-274.
- [32]. <https://tr.wikipedia.org/wiki/Polonyum> [Ziyaret Tarihi: 6 Nisan 2020].
- [33]. Uğur, A., 1998, *Gökova Körfezi Deniz Sediment Korlarında Radyoaktif Pb, Po, Ra, Cs, Am ve Pu İzotoplarının Dağılımının İncelenmesi, Sedimentasyon Hızı ve Tarihleme, Çalışmalarında Kullanılması*, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Fakültesi.

- [34]. Çatal, E. M., 2006, *Ege Bölgesi'nde En Çok Tüketilen Balıklarda Radyoaktif Polonyum Düzeyinin ve Yıllık Gıda Dozuna Katkısının Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Fakültesi.
- [35]. Erdurmuş, B., 2007, *İzmit Körfezi'nde Cs-137 ve Po-210 Radyonüklidlerinin Seviyelerine ve Ürünlere Toprakdan Transfer Faktörlerini Saptamak*, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- [36]. Gençler, Ç., 2003, Termik Santral Çevresinde Otomatik Olarak Çalışabilen Radyasyon Kontrol Sisteminin Modellenmesi, *Politeknik Dergisi*, 6 (4) , 645-649.
- [37]. Özden, B., 2003, *Bazı Liken ve Karayosunu Türlerinin Po-210 ve Pb-210 Atmosferik Akısının Değerlendirilmesinde Biyomonitör Olarak Kullanılması*, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [38]. <https://www.taek.gov.tr/tr/kullanma-bulundurma-lisans%C4%B1/158-egitim-arastirma-bilgi-kosesi/radyasyondan-korunma/1052-iyonlastirici-radyasyonun-biyolojik-etkileri.html> [Ziyaret Bilgileri: 7 Haziran 2020].
- [39]. <https://www.nrc.gov/about-nrc/radiation.html> [Ziyaret Tarihi: 19 Haziran 2020].
- [40]. UNSCEAR, 1998, 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, New York.
- [41]. [https://www.medicalnewstoday.com/articles/58088.php#what\\_is\\_polonium210](https://www.medicalnewstoday.com/articles/58088.php#what_is_polonium210) [Ziyaret Tarihi: 5 Aralık 2019].
- [42]. Johansson, L. Y., 2008, *Determination of Pb-210 and Po-210 in Aqueous Environmental Samples*, Doktora Tezi, Leibniz Universität Hannover.
- [43]. L' Annunziata, M., 2007, *Radioactivity: Introduction and history*, 1<sup>st</sup> ed., Elsevier science, Amsterdam, The Netherlands, ISBN: 978-0-444-52715-8.
- [44]. Ali, S. K., 2006, *Polonium-210 in Food and Tobacco*, Yüksek Lisans Tezi, Sudan Academy of Sciences.

- [45]. Matthews, K. M., Kim, C.-K., & Martin, P., 2007, Determination of  $^{210}\text{Po}$  in materials: A review of analytical methodology, *Applied Radiation and Isotopes*, 65 (3), 267–279.
- [46]. Hafizoğlu Alkan, N., 2019, *Alfa ve Gama Spektroskopisi ile Çevresel Örneklerde Radyoaktivite Ölçümü ve Analizi*, Doktora Tezi, İstanbul üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,
- [47]. Knoll, G., 2000, *Radiation detection and measurement*, 3<sup>rd</sup> ed., John Wiley & Sons Inc., New York, USA.
- [48]. Leo, W., 1994, *Techniques for nuclear and particle physics experiments*, 2<sup>nd</sup> ed., Springer -Verlag, Germany, ISBN: 3-540-57280-5.
- [49]. Ortec, 2014, *Alpha Duo, Alpha Mega and Alpha Ensemble Integrated Alpha Hardware User's Manual*, U.S.A., 932505.
- [50]. Smith-Briggs, J. L., Bradley, E. J., 1984, Measurement of natural radionuclides in U.K. diet, *The Science of the Total Environment*, 35 431-440.
- [51]. UNSCEAR, 2000, 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, New York.

**EKLER**



## ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Esra KAYA
Doğum Yeri	Çayırılı/ERZİNCAN
Doğum Tarihi	07.06.1991
Uyruğu	<input checked="" type="checkbox"/> T.C. <input type="checkbox"/> Diğer:
Telefon	
E-Posta Adresi	esrakaya3424@gmail.com
Web Adresi	-



Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Fakülte	Fen Fakültesi
Bölümü	Fizik
Mezuniyet Yılı	Tarih girmek için tıklayın veya dokununuz.

Yüksek Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı	Fizik
Programı	Nükleer Fizik Tezli Yüksek Lisans

Makale ve Bildiriler
<p><b>Kaya E.,</b>Demir B., <i>Health Effects of Polonium</i>, Balkan Fizik Birliği 10. Uluslararası Fizik Konferansı, 2013, İstanbul, Türkiye.</p> <p>Gundogdu B., <b>Kaya E</b>, Sahin Yalcın L., Hafizoğlu N., Kurt A., Ozturk F. C., <i>Measurement of Indoor Radon Concentration at Science Faculty of Istanbul University</i> ,Türk Fizik Derneği 31. Uluslararası Fizik Kongresi – TFD 31, 21 – 24 Temmuz 2014, Bodrum, Türkiye.</p> <p><b>Kaya E.,</b>Sahin Yalcın L., <i>Simple Geiger-Müller Detector Design and Test Measurements</i>, Türk Fizik Derneği 31. Uluslararası Fizik Kongresi – TFD 31, 21-24 Temmuz 2014, Bodrum, Türkiye.</p>