



**T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



YÜKSEK LİSANS TEZİ

**TÜRKİYE'DE YETİŞTİRİLEN FARKLI GIDA ÜRÜNLERİNDEKİ
RADYOAKTİVİTE SEVİYELERİNİN GAMA SPEKTROSKOPİ
SİSTEMİ İLE ÖLÇÜLMESİ**

Berna GÜNDOĞDU

Fizik Anabilim Dalı

Nükleer Fizik Programı

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

Ocak, 2019

İSTANBUL

Bu çalışma, 3.01.2019 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. Baki AKKUŞ
İstanbul Üniversitesi
Fen Fakültesi



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



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.

ÖNSÖZ

Tez çalışmam boyunca bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım bana destek olan, rehberlik eden sevgili danışman hocam Prof. Dr. Latife ŞAHİN YALÇIN'a içten teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Tezimin hazırlanma sürecinde bilgi ve tecrübeleri ile bana yardımcı olan Araş. Gör. Nurgül HAFIZOĞLU ALKAN'a, yüksek lisans eğitimim süresince yardımlarıyla hep yanımda olduklarını hissettiren ablalarım olarak gördüğüm Dr. Öğretim Üyesi Gülfem SÜSOY DOĞAN, Araş. Gör. Dr. Fatma Çağla ÖZTÜRK, Araş. Gör. Dr. Ayşegül ERTOPRAK ve çalışma arkadaşlarım Yüksek Lisans öğrencisi Pınar İSEL'e ve Müzeyyen Gökçe SÜTLAŞ'a teşekkürü bir borç bilirim.

Hayatımın her anında, attığım her adımda bana güvenen, maddi manevi desteğini ve sevgisini asla esirgemeyen evlatlarına çalışmayı, umudu, inanmayı öğreten canım aileme sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Hayatta çıktığım her yolda yorulduğum, sendelediğim, düştüğüm her anda her başarımda 'yaparsın abla', 'işte benim ablam' diyen evimizin yakışıklı mühendisi kardeşim Berkan GÜNDOĞDU'ya özel olarak teşekkür ediyorum.

Ve son olarak okul, dersane, sınav kapılarında dualarıyla hep beni bekleyen, evladı olmaktan gurur duyduğum ve daima da duyacağım, hayatımda onun gibi bir kadın ve anne olmak istediğim sevgili anneme "kızın galiba başaracak" diyerek tezimi ithaf etmek istiyorum.

Ocak 2019

Berna GÜNDOĞDU

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ŞEKİL LİSTESİ	viii
TABLO LİSTESİ.....	xii
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ	xiv
ÖZET	xvi
SUMMARY	xviii
1. GİRİŞ	1
2. GENEL KISIMLAR.....	6
2.1. RADYASYON.....	6
2.2. RADYASYONUN SINIFLANDIRILMASI	7
2.2.1. İyonlaştırıcı Radyasyon	7
2.2.2. İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyon	13
2.3. RADYOAKTİVİTE VE RADYASYON DOZ BİRİMLERİ.....	14
2.3.1. Radyoaktif Bozunum Kanunu	14
2.3.2. Yarı Ömür.....	16
2.3.3. Ortalama Ömür	16
2.3.4. Ardışık Bozunma Kanunu	16
2.3.5. Radyoaktif Denge	17
2.3.6. Radyoaktivite ve Radyasyon Doz Birimleri.....	20
2.3.6.1. Aktivite Birimi	20
2.3.6.2. Işınlama Birimi	21
2.3.6.3. Soğurulmuş Doz Birimi.....	21
2.3.6.4. Eşdeğer Doz Birimi.....	21
2.3.6.5. Yıllık Etkin Doz Birimi.....	22
2.4. RADYASYON KAYNAKLARI	22
2.3.1. Doğal Radyasyon Kaynakları.....	23
2.3.1.1. Kozmik Radyasyon.....	24
2.3.1.2. Karasal Radyasyon.....	25
2.3.1.3. Dahili Radyasyon.....	26

2.3.2. Yapay Radyasyon Kaynakları	26
2.7. RADYASYONUN ETKİLERİ	27
2.7.1. Radyasyonun Biyolojik Etkileri	27
2.7.2. Radyasyonun Sağlık Etkileri	28
2.7.3. Gıdalarda Radyoaktif Çekirdekler.....	29
2.5. RADYOAKTİF SERİLER.....	31
2.5.1. Doğal Seriler.....	31
2.5.1.1. <i>Uranyum Serisi</i>	32
2.5.1.2. <i>Toryum Serisi</i>	34
2.5.1.3. <i>Aktinyum Serisi</i>	36
2.5.2. Yapay Seriler	38
2.5.2.1. <i>Neptinyum Serisi</i>	39
2.6. GAMA SPEKTROSKOPİ SİSTEMLERİ VE ÇALIŞMA PRENSİPLERİ.....	40
2.6.1. Gama Işınlarnın Madde ile Etkileşimi.....	40
2.6.1.1. <i>Fotoelektrik Olay</i>	42
2.6.1.2. <i>Compton Saçılması</i>	43
2.6.1.3. <i>Çift Oluşumu</i>	45
2.6.2. Gama Spektroskopisi ve Dedektör Çeşitleri.....	46
2.6.3. HPGe Dedektörü ve Çalışma Prensibi	46
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	49
3.1. ÖRNEK TEMİNİ VE HAZIRLAMA İŞLEMİ	49
3.2. DENEYSEL İŞLEMLER.....	54
3.2.1. Analizde Kullanılan Dedektör Sistemi	54
3.2.2. Enerji ve Verim Kalibrasyonu	55
3.3. ANALİZ İŞLEMİ.....	58
3.3.1. Aktivite Hesabı.....	58
3.3.2. MDA Hesabı.....	59
3.3.3. Yıllık Etkin Doz	60
3.3.4. Örnek Bir Spektrumun İncelenmesi	60
3.3.5. Yaşam Boyu Kanseri Riski.....	63
4. BULGULAR.....	64
4.1. GIDA ÖRNEKLERİNDEKİ AKTİVİTE KONSANTRASYONLARI	64
4.1.1. Hububat Ürünlerindeki Aktivite Konsantrasyonları	65
4.1.2. Undaki Aktivite Konsantrasyonları	65

4.1.3. Unlu Mamüllerdeki Aktivite Konsantrasyonları	66
4.1.4. Bakliyat Ürünlerindeki Aktivite Konsantrasyonları.....	67
4.1.5. Sebzelerdeki Aktivite Konsantrasyonları	68
4.1.6. Meyvelerdeki Aktivite Konsantrasyonları	69
4.1.7. Baharatlardaki Aktivite Konsantrasyonları	70
4.1.8. Tuzdaki Aktivite Konsantrasyonları.....	71
4.1.9. Kuruyemişlerdeki Aktivite Konsantrasyonları.....	72
4.1.10. Gıda Örneklerinin Yetiştirildiği İllere Göre Belirlenen ¹³⁷ Cs Aktivite Konsantrasyonları	73
4.2. AYNI İLLERDE YETİŞTİRİLEN GIDA ÜRÜNLERİNDEKİ AKTİVİTE KONSANTRASYONLARININ KARŞILAŞTIRILMASI	74
4.3. GIDA ÖRNEKLERİNDEKİ YILLIK ETKİN DOZLAR	77
4.3.1. Hububat Ürünlerindeki Yıllık Etkin Dozlar	79
4.3.2. Un Örneklerindeki Yıllık Etkin Dozlar	81
4.3.3. Unlu Mamüllerdeki Yıllık Etkin Dozlar.....	83
4.3.4. Bakliyat Ürünlerindeki Yıllık Etkin Dozlar	84
4.3.5. Sebzelerde Yıllık Etkin Dozlar.....	86
4.3.6. Meyvelerde Yıllık Etkin Dozlar	88
4.3.7. Baharatlarda Yıllık Etkin Dozlar.....	90
4.3.8. Tuzlarda Yıllık Etkin Dozlar	91
4.3.9. Kuruyemiş Yıllık Etkin Dozlar	93
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	96
KAYNAKLAR.....	100
ÖZGEÇMİŞ	104

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa No
Şekil 2.1: Atom Yapısı [17].	6
Şekil 2.2: Alfa Bozunum Örneği [15].	8
Şekil 2.3: Negatron Bozunum Örneği [15].	9
Şekil 2.4: Pozitron Bozunum Örneği [15].	10
Şekil 2.5: Elektron Yakalama Örneği [15].	11
Şekil 2.6: Gama Bozunum Örneği [15].	12
Şekil 2.7: Elektromanyetik Spektrum [26].	13
Şekil 2.8: Üstel Radyoaktif Bozunum [29].	15
Şekil 2.9: ^{226}Ra ve ürünü ^{222}Rn arasındaki kalıcı denge durumu [30].	18
Şekil 2.10: ^{140}Ba ve ürünü ^{140}La arasındaki geçici denge durumu [30].	19
Şekil 2.11: ^{146}Ce ve ürünü ^{146}Pr arasında dengenin olmaması durumu [30].	20
Şekil 2.12: Radyasyon Kaynaklarının Sınıflandırılması [1].	22
Şekil 2.13: Radyasyon Dozunun Kaynakları [30].	23
Şekil 2.14: Kozmik Işınlardan Alınan Radyasyon [35].	24
Şekil 2.15: Yapay Radyasyon Kaynakları [38].	26
Şekil 2.16: Gıdalarda Doğal Radyoaktivite [42].	29
Şekil 2.17: Yapay Radyasyonun Doğada Dağılımı [43].	30
Şekil 2.18: Radyoaktif Çekirdeklerin Bitkilere Aktarımı [44].	30
Şekil 2.19: Uranyum Serisi [48].	33
Şekil 2.20: Toryum Serisi [50].	35
Şekil 2.21: Aktinyum Serisi [51].	37
Şekil 2.22: Neptinyum Serisi [52].	39
Şekil 2.23: Temel 3 Etkileşimin Baskın Olduğu Bölgeler [54].	41

Şekil 2.24: Fotoelektrik Olay [1].	42
Şekil 2.25: Compton Saçılması [27].	43
Şekil 2.26: Çift Oluşum [27].	45
Şekil 2.27: Yarı İletken Dedektör Şeması [2].	47
Şekil 2.28: Gama Spektroskopi Sisteminin Elektroniği [2].	48
Şekil 3.1: Gıda örnekleri.	49
Şekil 3.2: Gıda Örneklerinin Yetiştirildiği İller	51
Şekil 3.3: Gıda Örneklerinin Kurutulması	52
Şekil 3.4: Kullanılan Fırın.	52
Şekil 3.5: Kullanılan Öğütücü	53
Şekil 3.6: Paketlenen Marinelli Beaker Kaplar	53
Şekil 3.7: İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi Nükleer Fizik Anabilim Dalı Nükleer Fizik Gama Spektroskopi Laboratuvarı'nda bulunan dedektör sistemi.	54
Şekil 3.8: Karışık Kaynak (Mixed Source).	55
Şekil 3.9: 86400 saniye için Enerji Kalibrasyonu.	56
Şekil 3.10: 86400 saniye için Verim Kalibrasyonu Eğrisi ve Verim Değeri	57
Şekil 3.11: Örnek Spektrum	61
Şekil 4.1: Hububat Ürünlerindeki Aktivite Konsantrasyonları (Bq/kg)	65
Şekil 4.2: Unlardaki Aktivite Konsantrasyonları (Bq/kg)	66
Şekil 4.3: Unlu Mamüllerdeki Aktivite Konsantrasyonları (Bq/kg)	67
Şekil 4.4: Bakliyat Ürünlerindeki Aktivite Konsantrasyonları (Bq/kg)	68
Şekil 4.5: Sebzelerdeki Aktivite Konsantrasyonları (Bq/kg)	69
Şekil 4.6: Meyve Örneklerindeki Aktivite Konsantrasyonları (Bq/kg)	70
Şekil 4.7: Baharatlardaki Aktivite Konsantrasyonları (Bq/kg)	71
Şekil 4.8: Tuzlardaki Aktivite Konsantrasyonları (Bq/kg)	72
Şekil 4.9: Unlu Mamüllerdeki Aktivite Konsantrasyonları (Bq/kg)	73
Şekil 4.10: Gıdaların Yetiştigi İllerde ¹³⁷ Cs Aktivite Konsantrasyonları (Bq/kg)	74

Şekil 4.11: Erzurum’da Yetişen Gıda Örneklerinin Aktivite Konsantrasyonları (Bq/kg).....	75
Şekil 4.12: İzmir’de Yetişen Gıda Örneklerinin Aktivite Konsantrasyonları (Bq/kg).	76
Şekil 4.13: Şanlıurfa’da Yetişen Gıda Örneklerinin Aktivite Konsantrasyonları (Bq/kg).	77
Şekil 4.14: ²³⁸ U, ²³² Th ve ⁴⁰ K Doğal Radyoaktif Çekirdekler için Hesaplanan Yıllık Etkin Dozlar (µSv /yıl).	80
Şekil 4.15: ¹³⁷ Cs Yapay Radyoaktif Çekirdekler için Hesaplanan Yıllık Etkin Dozlar (nSv /yıl).	80
Şekil 4.16: ²³⁸ U, ²³² Th ve ⁴⁰ K Doğal Radyoaktif Çekirdekler için Hesaplanan Yıllık Etkin Dozlar (µSv /yıl).	81
Şekil 4.17: ¹³⁷ Cs Yapay Radyoaktif Çekirdekler için Hesaplanan Yıllık Etkin Dozlar (nSv /yıl).	82
Şekil 4.18: ²³⁸ U, ²³² Th ve ⁴⁰ K Doğal Radyoaktif Çekirdekler için Hesaplanan Yıllık Etkin Dozlar (µSv /yıl).	83
Şekil 4.19: ¹³⁷ Cs Yapay Radyoaktif Çekirdekler için Hesaplanan Yıllık Etkin Dozlar (nSv /yıl).	84
Şekil 4.20: ²³⁸ U, ²³² Th ve ⁴⁰ K Doğal Radyoaktif Çekirdekler için Hesaplanan Yıllık Etkin Dozlar (µSv /yıl).	85
Şekil 4.21: ¹³⁷ Cs Yapay Radyoaktif Çekirdekler için Hesaplanan Yıllık Etkin Dozlar (nSv /yıl).	86
Şekil 4.22: ²³⁸ U, ²³² Th ve ⁴⁰ K Doğal Radyoaktif Çekirdekler için Hesaplanan Yıllık Etkin Dozlar (µSv /yıl).	87
Şekil 4.23: ¹³⁷ Cs Yapay Radyoaktif Çekirdekler için Hesaplanan Yıllık Etkin Dozlar (nSv /yıl).	87
Şekil 4.24: ²³⁸ U, ²³² Th ve ⁴⁰ K Doğal Radyoaktif Çekirdekler için Hesaplanan Yıllık Etkin Dozlar (µSv /yıl).	88
Şekil 4.25: ¹³⁷ Cs Yapay Radyoaktif Çekirdekler için Hesaplanan Yıllık Etkin Dozlar (nSv /yıl).	89
Şekil 4.26: ²³⁸ U, ²³² Th ve ⁴⁰ K Doğal Radyoaktif Çekirdekler için Hesaplanan Yıllık Etkin Dozlar (µSv /yıl).	90
Şekil 4.27: ¹³⁷ Cs Yapay Radyoaktif Çekirdekler için Hesaplanan Yıllık Etkin Dozlar (nSv /yıl).	91
Şekil 4.28: ²³⁸ U, ²³² Th ve ⁴⁰ K Doğal Radyoaktif Çekirdekler için Hesaplanan Yıllık Etkin Dozlar (µSv /yıl).	92

Şekil 4.29: ^{137}Cs Yapay Radyoaktif Çekirdekler için Hesaplanan Yıllık Etkin Dozlar (nSv /yıl).....	93
Şekil 4.30: ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K Doğal Radyoaktif Çekirdekler için Hesaplanan Yıllık Etkin Dozlar (μSv /yıl).....	94
Şekil 4.31: ^{137}Cs Yapay Radyoaktif Çekirdekler için Hesaplanan Yıllık Etkin Dozlar (nSv /yıl).....	95



TABLO LİSTESİ

	Sayfa No
Tablo 2.1: Radyoaktif Seriler ve Özellikleri [46].	31
Tablo 2.2: Uranyum Serisi Özellikleri [49].	33
Tablo 2.3: Toryum Serisi Özellikleri [49].	35
Tablo 2.4: Aktinyum Serisi Özellikleri [49].	37
Tablo 2.5: Neptinyum Serisi Özellikleri [49].	40
Tablo 3.1: Gıdaların Yetiştigi İller ve Ürün Türlerine Göre Gruplandırılması	50
Tablo 3.2: Dedektör Özellikleri [2].	54
Tablo 3.3: Karışık Kaynak Standartının Özellikleri	55
Tablo 4.1: Gıda Numunelerindeki Aktivite Konsantrasyonları (Bq/kg).	64
Tablo 4.2: Hububat Ürünlerine Genel Bakış	65
Tablo 4.3: Un Örneklerine Genel Bakış	66
Tablo 4.4: Unlu Mamüllere Genel Bakış	67
Tablo 4.5: Bakliyat Ürünlerine Genel Bakış	68
Tablo 4.6: Sebze Ürünlerine Genel Bakış	69
Tablo 4.7: Meyve Ürünlerine Genel Bakış	70
Tablo 4.8: Baharat Örneklerine Genel Bakış	71
Tablo 4.9: Tuz Örneklerine Genel Bakış	72
Tablo 4.10: Kuruyemiş Örneklerine Genel Bakış.	73
Tablo 4.11: Erzurum'da Yetişen Ürünlere Genel Bakış	75
Tablo 4.12: İzmir'de Yetişen Ürünlere Genel Bakış.	76
Tablo 4.13: Şanlıurfa'da Yetişen Ürünlere Genel Bakış	77
Tablo 4.14: Gıda Numuneleri için Hesaplanan Yıllık Etkin Dozlar.	78
Tablo 4.15: Hububat Ürünlerine Genel Bakış	81

Tablo 4.16: Un Örneklerine Genel Bakış.....	82
Tablo 4.17: Unlu Mamüllere Genel Bakış.....	84
Tablo 4.18: Bakliyat Ürünlerine Genel Bakış	86
Tablo 4.19: Sebze Örneklerine Genel Bakış.....	88
Tablo 4.20: Meyve Örneklerine Genel Bakış.....	89
Tablo 4.21: Baharat Örneklerine Genel Bakış.....	91
Tablo 4.22: Tuz Örneklerine Genel Bakış.....	93
Tablo 4.23: Kuruyemiş Örneklerine Genel Bakış	95
Tablo 5.1: Aktivite Konsantrasyonu Ve Yıllık Etkin Doz Değerlerinin Diğer Ülkelerle Kıyaslanması	98

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler Açıklama

α	: Alfa
β	: Beta
β^-	: Beta-Eksi Bozunması
β^+	: Beta-Artı Bozunması
e^+	: Pozitron
e^-	: Elektron
ϵ	: Elektron Yakalama
γ	: Gama
n	: Nötron
ν	: Nötrino
$\bar{\nu}$: Antinötrino
p^+	: Proton

Kısaltmalar Açıklama

Bq	: Becquerel
Bi	: Bizmut
C	: Coulomb
Ci	: Curie
cm	: Santimetre
Cs	: Sezyum
gr	: Gram
Gy	: Grey
HPGe	: High Purity Germanium Detector (Yüksek Saflıkta Germanyum Dedektörü)
ICRP	: International Commission on Radiological Protection
J	: Joule
K	: Potasyum
KeV	: Kilo Elektron Volt
kg	: Kilogram
MDA	: Minimum Dedekte Edilebilir Aktivite

MeV	: Mega Elektron Volt
mm	: Milimetre
μSv	: Mikro Sievert
nSv	: Nano Sievert
Pb	: Kurşun
Ra	: Radyun
Rn	: Radon
R	: Röntgen
SI	: Uluslararası Birim Sistemi
sn	: Saniye
sa	: Saat
Sv	: Sievert
TAEK	: Türkiye Atom Enerjisi Kurumu
Th	: Toryum
U	: Uranyum
UNCEAR	: The United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (Birleşmiş Milletler Atomik Radyasyonun Etkileri Bilimsel Komitesi)
WKM	: Norwegian Scientific Committee for Food Safety

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TÜRKİYE'DE YETİŞTİRİLEN FARKLI GIDA ÜRÜNLERİNDEKİ RADYOAKTİVİTE SEVİYELERİNİN GAMA SPEKTROSKOPİ SİSTEMİ İLE ÖLÇÜLMESİ

Berna GÜNDOĞDU

İstanbul Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Danışman : Prof. Dr. Latife ŞAHİN YALÇIN

Tüm canlı ve cansız varlıklar yaşamları süresince doğal ve yapay radyasyona maruz kalmaları kaçınılmaz bir gerçektir. Maruz kalınan radyasyonun büyük bir kısmı doğal radyasyondan kaynaklanmaktadır. Karasal kökenli doğal gama radyasyonu ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K gibi gama yayımlayan toprakta bulunan radyoaktif çekirdeklerden gelmektedir. İnsanlar hayatlarını sürdürebilmek için besin ihtiyacı içindedir ve ihtiyacın büyük kısmı toprağa ekilerek yetiştirilen bitki, sebze, meyve, tahıl gibi gıda ürünleri ile karşılanmaktadır. Toprağa ekilen ürünler kökleri aracılığıyla toprakta doğal olarak bulunan radyoaktif çekirdekleri bünyelerine alırlar. Bu tez çalışması kapsamında Türkiye'de yetiştirilen 9 farklı türdeki 37 gıda örneği temin edilmiştir ve gıda örneklerindeki doğal ve yapay radyoaktif çekirdeklerin aktivite konsantrasyonları belirlenmiştir. Besin zincirine karışan radyoaktif çekirdekler bu ürünleri tüketen insanlara kadar ulaşmaktadır. Bu sebeple insan sağlığı açısından gıda ürünlerindeki doğal ve yapay radyoaktif çekirdeklerin aktivite konsantrasyonlarının belirlenmesi oldukça önemlidir. Yaptığımız çalışmada gıda örneklerinde p-tipi koaksiyel yüksek saflıkta germanyum dedektörü (HPGe) kullanılarak ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K ve ^{137}Cs gama aktivite konsantrasyonları ölçülmüştür. Gıda ürünlerini tüketen insanların maruz kaldıkları yıllık etkin doz miktarı hesaplanmış,

UNSCEAR'ın raporlarında verilen sınır değerler ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca yaşam boyu kansere yakalanma riski belirlenmiştir.

Ocak 2019, 123 sayfa.

Anahtar kelimeler: Radyoaktivite, Gıda, Yaşam Boyu Kanser Riski, Sezyum



SUMMARY

M.Sc. THESIS

MEASUREMENT OF RADIOACTIVITY LEVELS BY GAMMA SPECTROSCOPY SYSTEM IN DIFFERENT FOOD PRODUCTS GROWN IN TURKEY

Berna GÜNDOĞDU

İstanbul University

Institute of Graduate Studies in Science and Engineering

Department of Physics

Supervisor : Prof. Dr. Latife ŞAHİN YALÇIN

It is unavoidable for all living and non-living beings to be exposed to natural and artificial radiation during their lives. The majority of radiation exposure is due to natural radiation. Natural terrestrial gamma radiation comes from the gamma-emitting radioactive nuclei found in soil, such as ^{238}U , ^{232}Th and ^{40}K . People are in need of food to sustain their lives and the most of need is met by food products such as plants, vegetables, fruits and cereals grown in the soil. The products planted in the soil take the radioactive nuclei found naturally in the soil through their roots. Within the scope of this study, nine different types of 37 food samples grown in Turkey were provided and the activity concentrations of natural and artificial radionuclides in food samples were determined. Radioactive substances in the food chain reach those who consume these products. Therefore, it is very important to determine the activity concentrations of natural and artificial radioactivity nuclei in food products for human health. In our study, the ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K and ^{137}Cs gamma activity concentrations in food samples were measured by using p-type coaxial high purity germanium detector (HPGe). The amount of annual effective dose that people are exposed by food consuming was calculated and compared with the limit values given in the reports of the UNSCEAR. In addition, the lifetime cancer risk has been determined.

January 2019, 123 pages.

Keywords: Radioactivity, Food, Lifetime Cancer Risk, Cesium



1. GİRİŞ

Evrende yaşamın başlangıcından itibaren, tüm canlı ve cansız varlıkların radyasyona maruz kalması kaçınılmaz bir durumdur. Maruz kalınan radyasyonun büyük bir kısmı doğal radyasyondan kaynaklanırken doğada mevcut olmayan insanoğlu tarafından üretilen yapay radyasyondan kaynaklanmaktadır [1].

Doğal radyasyonun temelini karasal, kozmik kökenli radyasyon ve radon oluşturur. Doğal karasal radyasyonu kayalarda kendiliğinden var olan radyoaktif elementler, havada ve suda bulunan radyoaktif elementler oluştururken kozmik kökenli radyasyonu uzaydan gelen kozmik ışınlar oluşturur. Doğal karasal radyasyon Uranyum, Toryum ve Aktinyum gibi doğal radyoaktif seriler ile Potasyuma bağlıdır [2]. Radon elementi bir gaz elementi olup Uranyum serisinin bir bozunum ürünüdür.

Radyasyona iç ışınlama ve dış ışınlama şeklinde maruz kalmaktayız. Dış ışınlamaları bu serilerde bulunan radyoaktif çekirdeklerden yayınlanan gama radyasyonu oluştururken, radyoaktif çekirdeklerin sindirim ya da solunum yolu ile vücudumuza alınması neticesinde yayınladıkları alfa ve beta radyasyonu iç ışınlamaları oluşturmaktadır [3].

Maruz kalınan doğal karasal radyasyonun doz miktarı ^{238}U , ^{232}Th , onların bozunum ürünleri ve ^{40}K doğal radyoaktif çekirdeklerin konsantrasyonları ile belirlenebilmektedir. Bu doğal radyoaktif çekirdeklerin konsantrasyonları da coğrafi ve jeolojik yapı, iklim ve yapılan çeşitli tarım uygulamaları gibi etkenlerden ötürü bölgeden bölgeye değişkenlik göstermektedir.

Yapay radyasyon kaynaklarına ise nükleer bomba denemeleri ve reaktör kazaları sonucu etrafa yayılan radyoaktif serpintiler, nükleer güç santrallerinden radyoaktif çekirdek salınımı ve hastalıkların tanı ve tedavisi amacıyla tıbbi uygulamalar sonucu maruz kalınmaktadır.

1945 ile 1981 yılları arasında 461 nükleer bomba testi yapılmıştır. Bilhassa 1954 ile 1958 ve 1961 ile 1962 yılları arasındaki iki dönem süresince testler daha yoğundu. Testlerin iptalinden sonra yapay radyoaktif izotop miktarı atmosferde azalmıştı ancak 26 Nisan 1986 yılında Ukrayna'da gerçekleşen Çernobil Nükleer Reaktör Kazası sonrası olay bölgesi ve civarında radyoaktif izotop serpintisi yayılmıştır [4].

Maalesef son olarak 11 Mart 2011 yılında Japonya’da tsunami sonucu nükleer santral tarihinin en büyük ikinci kazası olan Fukushima Nükleer Santral kazası meydana gelmiş ve ^{137}Cs ile ^{131}I izotopları ortama salınmıştır.

Testler ve kazalar sırasındaki meydana gelen patlamalar çok yüksek sıcaklıktadır. Patlama sonucu ortaya çıkan radyoaktif maddeler atmosferde dağılır ve serpinti rüzgâr ile olay bölgesinin civarından taşınır. Çok sayıda radyoaktif izotoptan oluşan serpintide özellikle ^{137}Cs ve ^{90}Sr izotopları baskındır. Bu izotoplar serpinti ile havaya, suya, toprağa karışmıştır. Filyon ürünü ^{137}Cs yapay radyoaktif çekirdeğinin konsantrasyonu serpinti ile taşınması sebebiyle bazı bölgelerde belirlenmiştir [4].

İnsanlar hayatta kalabilme içgüdüğü ile ilk çağlardan beri sürekli besin ihtiyacı içindedir ve bu ihtiyacın da önemli bir kısmını bitkilerden sağlamaktadır. Toprağa ekilerek yetiştirilen bitki, sebze, meyve, tahıl gibi gıda ürünleri toprakta doğal olarak kendiliğinden var olan radyoaktif elementleri ve çeşitli nükleer olaylar sonucunda oluşarak serpinti ile toprağa sızan filyon ürünlerini kökleri aracılığıyla bünyelerine almaktadır. Besin zincirine karışan serpinti en sonunda insanoğluna kadar ulaşmıştır. Bu sebeple toprakta yetiştirilen gıda ürünlerindeki uranyum, toryum ve potasyum aktivite derişimlerinin belirlenmesi gıdaları tüketen canlıların sağlığı için oldukça önemlidir.

Gıdalarda ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K ve ^{137}Cs gama konsantrasyonlarının belirlenmesi amacıyla Türkiye ve Dünya’da yapılan çalışmaların bazıları aşağıda verilmiştir.

Canbazoğlu ve Doğru tarafından yapılan çalışmada 2" x 2" NaI(TI) gama spektroskopi sistemi kullanılarak Elazığ bölgesinde üretilen sebze ve meyvelerde ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K ve ^{137}Cs aktivite konsantrasyonları ölçülmüştür. Sebzelerin ortalama aktivite konsantrasyonları sırasıyla ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K ve ^{137}Cs için 0.64 ± 0.26 , 0.65 ± 0.14 , 13.98 ± 1.22 , 0.54 ± 0.04 Bq kg⁻¹ olarak hesaplanmıştır. Meyvelerin ortalama aktivite konsantrasyonları sırasıyla ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K ve ^{137}Cs için 1.52 ± 0.34 , 0.98 ± 0.23 , 18.66 ± 1.13 ve 0.59 ± 0.16 Bq kg⁻¹ olarak hesaplanmıştır. Sebze ve meyveler için toplam etkin doz değerleri sırasıyla 20 ve 30.55 µSv y⁻¹ olarak belirlenmiştir [5].

Keser ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada Rize’de farklı bölgelerden toplanan çay, lahana, portakal, kivi ve toprak örneklerinde ^{232}Th , ^{238}U , ^{40}K ve ^{137}Cs aktivite konsantrasyonları HPGe dedektörü ile ölçülmüştür. Gıda örneklerinde ^{232}Th , ^{238}U , ^{40}K ve ^{137}Cs aktivite

konsantrasyonları sırasıyla 8.2 ± 1.8 , 17.3 ± 3.3 , 465.8 ± 11.8 ve 20.9 ± 3.8 Bq kg⁻¹ toprak örneklerinde ise sırasıyla 72.4 ± 9.8 , 51.1 ± 8.3 , 229.3 ± 14.7 ve 312.9 ± 11.5 Bq kg⁻¹ olarak ölçülmüştür [6].

Rize’de yapılan çalışmada K. Görür ve arkadaşları tarafından 2008, 2009 ve 2010 yıllarında bölgede en sık tüketilen dört gıda grubunda (sebze, meyve, tahıl ve diğer) HPGe dedektörü kullanılarak radyoaktivite konsantrasyonunun belirlenmesinin yanı sıra ağır metal konsantrasyonu da belirlenmiştir. ²³⁸U aktivite konsantrasyonu için en yüksek değer 9.43 ± 0.128 Bq kg⁻¹ ile domates, en düşük değer 0.20 ± 0.02 Bq kg⁻¹ ile patlıcan, ²³²Th aktivite konsantrasyonu için en yüksek değer 3.22 ± 0.29 Bq kg⁻¹ ile üzüm, en düşük değer 0.18 ± 0.04 Bq kg⁻¹ ile mandalina, ⁴⁰K aktivite konsantrasyonu için en yüksek değer 1014.72 ± 42.64 Bq kg⁻¹ ile maydanoz, en düşük değer 40.39 ± 0.74 Bq kg⁻¹ ile armut ve ¹³⁷Cs aktivite konsantrasyonu için en yüksek değer 10.20 ± 4.19 Bq kg⁻¹ ile maydanoz örneğinde ölçülmüştür [7].

Nijerya’da Onoja ve arkadaşları Kaduna Eyaleti Chikun Yerel Yönetim Bölgesi’nin Unguwar Shaho Pamadaki Kujima’da bulunan Balsa Çiftliklerinden toplanan beş farklı meyve türü ve toprak örneklerinde aktivite konsantrasyonu NaI(Tl) dedektörü ile ölçülmüştür. ⁴⁰K aktivite konsantrasyonu $147.43 - 465.94$ Bq kg⁻¹, ²²⁶Ra aktivite konsantrasyonu $1.84 - 4.14$ Bq kg⁻¹ ve ²³²Th aktivite konsantrasyonu $51.88 - 119.04$ Bq kg⁻¹ arasında değişmiştir. Yıllık etkin doz değerleri sırasıyla domates, portakal, ananas, mango ve muz için sırasıyla 0.2487 , 0.3489 , 0.2361 , 0.2308 ve 0.2547 mSv y⁻¹ olarak ölçülmüştür [8].

Çevik ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada Türkiye’nin Doğu Karadeniz Bölgesi’ndeki Ordu, Giresun ve Trabzon illerinde 2007 yılında hasat zamanında toplanan fındıklarda bölge 1986 yılında Çernobil kazasıyla kirlendiğinden, fındık yetiştirme bölgesinde HPGe dedektörü ile radyoaktivite düzeyi ve ağır metal konsantrasyonu belirlenmiştir. Fındık çekirdeğinde ⁴⁰K, ²²⁶Ra, ²³²Th ve ¹³⁷Cs aktivite konsantrasyonları sırasıyla 118.6 , 6.33 , 9.33 ve 4 Bq kg⁻¹ olarak ölçülmüştür. Yıllık etkin doz ortalama olarak $9 \mu\text{Sv y}^{-1}$ olarak belirlenmiştir [9].

İtalya’da Desideri ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada farklı şehirlerden toplanan genel olarak ilaç olarak kullanılan bazı şifalı bitkilerde n-tipi germanyum dedektörü ve alfa spektroskopisi kullanılarak doğal ve yapay radyoaktivite belirlenmiştir. ²³⁸U aktivite

konsantrasyonu 0.22 ve 7.3 Bq kg⁻¹, ⁴⁰K aktivite konsantrasyonu 66.2 ve 3582.0 Bq kg⁻¹, ¹³⁷Cs aktivite konsantrasyonu 0.3 ve 10.7 Bq kg⁻¹ arasında değiştiği belirlenmiştir [10].

Harb tarafından yapılan çalışmada Mısır'ın Quena kentinde yerel pazarlardan toplanan 22 adet sebze ve meyve rneği p tipi HPGe koaksiyel dedektör kullanılarak doğal radyoaktivite konsantrasyonu ve yıllık etkin doz değeri belirlenmiştir. ²²⁶Ra, ²¹⁰Pb, ²³²Th ve ⁴⁰K aktivite konsantrasyonları sırasıyla 0.01 ± 0.02 – 2.56 ± 1.11, 0.01 ± 0.06 – 0.39 ± 0.21, 0.01 ± 0.05 – 1.22 ± 0.56 ve 26.65 ± 1.24 – 536.6 ± 23.03 Bq kg⁻¹ arasında değiştiği belirlenmiştir. Yıllık etkin doz değeri ise 0.033 ile 17.525 μSv y⁻¹ arasında olduğu belirlenmiştir [11].

Hindistan'ın Yeni Delhi kentinde Kant ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada sebze, tahıl ve meyvelerde HPGe dedektörü kullanılarak doğal radyoaktivite konsantrasyonu ve yıllık etkin doz değeri belirlenmiştir. Sebze ve tahıl rneklelerinde ²³⁸U, ²³²Th ve ⁴⁰K aktivite konsantrasyonları sırasıyla 10.25 ± 0.94 - 29.13 ± 0.69, 22.20 ± 2.46 - 58.21 ± 1.15 ve 1158.4 ± 26.05 - 1962.2 ± 18.17 meyve rneklelerinde ²³⁸U, ²³²Th ve ⁴⁰K aktivite konsantrasyonları sırasıyla 2.5 ± 0.16 - 9.8 ± 0.15, 7.4 ± 1.24 - 18.4 ± 1.39 ve 287.13 ± 11.23 - 815.72 ± 12.50 Bq kg⁻¹ olarak belirlenmiştir [12].

Karataşlı ve zer tarafından yapılan çalışmada HPGe dedektörü kullanılarak Osmaniye ili ve çevresindeki farklı yerlerden yer fıstığı rnekleleri temin edilerek ²²⁶Ra, ²³²Th, ⁴⁰K ve ¹³⁷Cs aktivite konsantrasyonu llmştir. Fıstık rneklelerinde ²²⁶Ra, ²³²Th, ⁴⁰K ve ¹³⁷Cs aktivite konsantrasyonları Bq kg⁻¹ olarak sırasıyla 3.1 ± 1.0 - 7.6 ± 1.0, 3.2 ± 1.0 - 6.6 ± 1.8, 256 ± 2.9 - 304.5 ± 7.2 arasında değişmektedir [13].

Eke tarafından yapılan çalışmada HPGe dedektörü kullanılarak 5 rafine edilmiş, 5 rafine edilmemiş, 1 bulaşık makinesi tuzu olarak toplamda 11 adet ticari tuz rneği içindeki doğal ve yapay radyoaktif çekirdeklerin aktivite konsantrasyonları llmştir. Ortalama aktivite konsantrasyonları ²³²Th ve ⁴⁰K için sırasıyla 2.04 ± 0.71 Bq kg⁻¹ ve 25.77 ± 5.62 Bq kg⁻¹ olarak llmştir ancak ²²⁶Ra ve ¹³⁷Cs aktivite konsantrasyonları minimum dedekte edilebilir aktivite değerinin altında llmştir. Radyum eşdeğer aktivitesi ortalama değeri 8.12 Bq kg⁻¹'dir. Tuz rnekleleri için yıllık etkin doz eşdeğeri ortalama değeri ise 4.70 mSv y⁻¹ olarak hesaplanmıştır [14].

Brezilya'da Santos ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada Rio de Janeiro kentinde tüketilen 26 farklı sebze ve türevleri (mısır unu, buğday unu, makarna vb.) gıda ürününden toplam 88 adet örnekte ^{232}Th , ^{238}U , ^{210}Pb , ^{226}Ra ve ^{228}Ra konsantrasyonları belirlenmiştir. ^{232}Th , ^{238}U , ^{226}Ra , ^{210}Pb ve ^{228}Ra aktivite konsantrasyonları sırasıyla <0.003 ile 393, <0.01 ile 58, <2.2 ile 805, <3.0 ile 980 ve 5.1 ile 2880 mBq kg⁻¹ aralığında belirlenmiştir. Yıllık etkin doz değeri ise 14.5 μSv olarak belirlenmiştir [15].

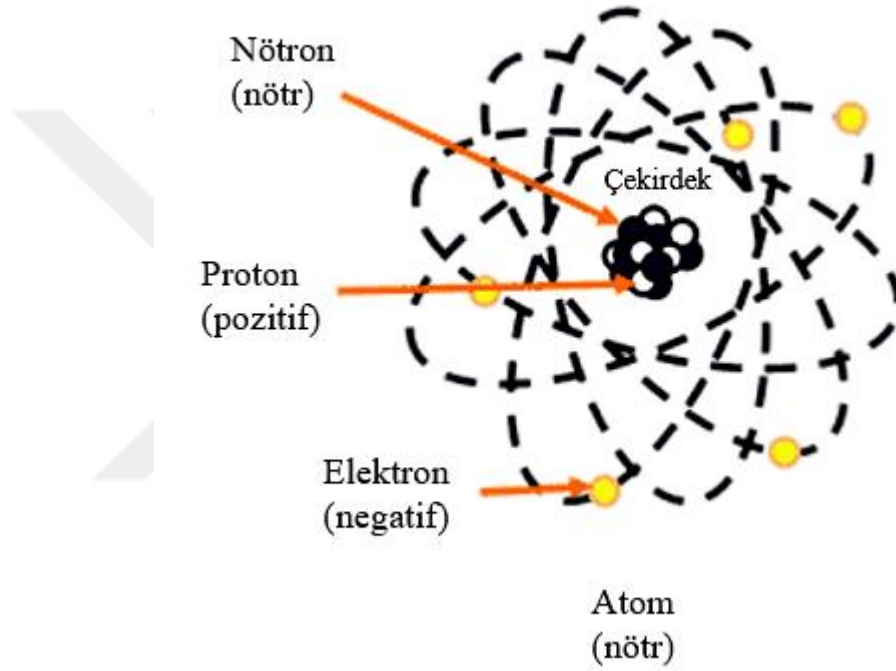
Harb tarafından Mısır'da yapılan bir çalışmada Quena kentinde yerel pazarlardan toplanan tıbbi bitki  rneklelerinde HPGe dedektörü kullanılarak ^{226}Ra , ^{228}Ra ve ^{40}K aktivite konsantrasyonları belirlenmiştir. Aktivite konsantrasyonları ^{226}Ra için $0.4 \pm 0.2 - 21.0 \pm 1.2$, ^{228}Ra için $<0.3 - 42.3 \pm 5.9$ ve ^{40}K için $140 \pm 6 - 1538 \pm 54$ Bq kg⁻¹ arasında değişmiştir. Yıllık etkin doz için ortalama değer 0.02 mSv y^{-1} olarak belirlenmiştir [16].

Yapılan bu tez çalışmasında ise Türkiye'de yetiştirilen 9 farklı türdeki 37 gıda örneğinde p tipi HPGe dedektörü kullanılarak ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K ve ^{137}Cs gama aktivite konsantrasyonları İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi Nükleer Fizik Anabilim Dalı Nükleer Fizik Gama Spektroskopi Laboratuvarı'nda ölçülmüştür. Gıda  rneklelerinde ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K ve ^{137}Cs aktivite konsantrasyonları belirlenmiştir. UNSCEAR raporlarında verilen sınır değerler ile karşılaştırılmış, gıda ürünlerini tüketen insanların maruz kaldıkları yıllık etkin doz miktarı ve yaşam boyu kansere yakalanma riski belirlenmiştir.

2. GENEL KISIMLAR

2.1. RADYASYON

Atom maddeyi oluşturan en küçük temel birimdir ve yarıçapı yaklaşık 10^{-10} cm mertebesindedir. Yüksüz parçacık nötron ve pozitif yüklü protondan oluşan atom çekirdeğinin etrafındaki yörüngelerde negatif yüklü elektronlar bulunur.



Şekil 2.1: Atom Yapısı [17].

Dünya'da bulunan her şeyin yapıtaşı atomdur ve doğadaki elementlerin atomları kararlı veya kararsız yapıdadırlar. Atom çekirdeğindeki nötron, proton sayılarının oranı kararlılığı belirler ve n/p oranının 1 – 1.50 civarı bir değerde olması kararlı bir çekirdek olduğunu gösterir. Bazı atomlar ise yapıları gereği kararsızdır ancak kararlı hale geçme eğilimindedir. Proton ve nötron arası nükleer kuvvet kararlı çekirdeklerde dengede bulunurken kararsız çekirdeklerde durum böyle değildir. Kararlı yapıya geçmeye çalışan kararsız çekirdeklerin yayınladığı elektromanyetik dalga veya nükleer parçacıklara radyasyon denir [18].

2.2. RADYASYONUN SINIFLANDIRILMASI

Radyasyonu, etkileşime girdiği ortamdaki atom ve molekülleri iyonize edip etmemesine göre iki şekilde sınıflandırırız.

2.2.1. İyonlaştırıcı Radyasyon

Kararlı haldeki atomun yörüngesinde bulunan elektronlardan biri koparıldığında, proton sayısı elektronların sayısından fazla olacaktır ve atom bir elektrik yükü kazanacaktır. Atomdan kopan elektronunun ardından atom iyon durumundadır. Atom ya da molekülün iyonla dönüştürülmesi esnasında elektron alıp vermesi olayına iyonlaşma denir.

İyonlaştırıcı radyasyon atomla etkileşimi sırasında, atomun yörüngesinden sıkıca bağlı elektronları kopararak atomun yüklü veya iyonize olması için yeterli enerjiye sahip radyasyon türüdür [19].

İyonlaştırıcı radyasyon türlerine örnek olarak alfa parçacıkları, beta parçacıkları (Negatron ve Pozitron), gama ışınları, X ışınları, kozmik ışınlar ve nötronlar verilebilir.

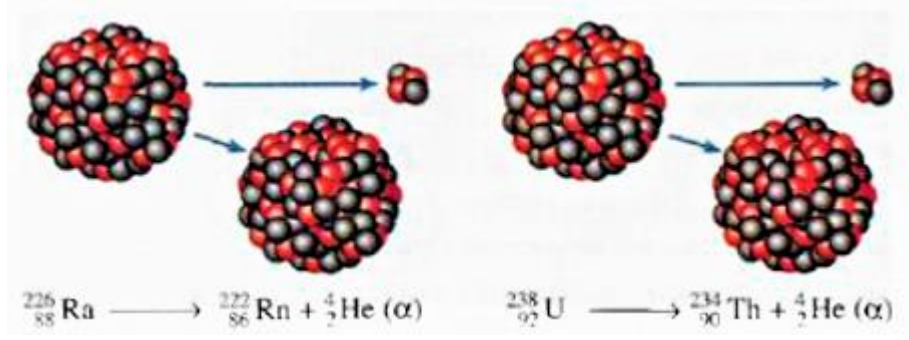
Alfa parçacıkları (α) : Kararsız halde bulunan çekirdek alfa parçacığı yayınlamak kararlı hale geçmeye çalışır. Yayınlanan alfa parçacığı da helyum çekirdeğidir. Pozitif yüklü helyum çekirdeği (${}^4\text{He}$), iki proton ve iki nötrondan oluşur.

Alfa parçacıkları, büyük kütleleri ve elektrik yükleri nedeniyle uzun mesafede yol alamazlar. Bu parçacıklar insan derisinin ölü katmanlarına nüfuz edemeyen oldukça düşük menzile sahiptirler [20]. Böylelikle vücuda dışsal temas ile radyasyon tehlikesi yaratmayan alfa parçacıkları soluma, yeme, içme veya yaralanma durumlarında vücuda girdiklerinde risk teşkil edebilirler.

Başlangıçtaki çekirdeklerin alfa bozunumu yapması, hem kütledeki azalmaya hem de ürün çekirdek üzerinde yüke yol açar ve aşağıdaki bozunum süreci ile temsil edilebilir [20].



Burada, X ana çekirdek ve Y ürün çekirdek olarak ifade edilir.



Şekil 2.2: Alfa Bozunum Örneği [15].

Yayımlanan parçacık, çekirdekte bulunan ve yüksekliği yaklaşık 25 MeV olan potansiyel engelini aşmak için gereken enerjiye sahip olmalıdır [21].

Beta parçacıkları (β) : Beta ışınları çekirdekteki enerji fazlalığından dolayı çekirdeğin yayınladığı yüksek enerjili elektronlardır. Beta ışınları parçacık özelliği gösterirler. Beta parçacıklarını birkaç mm kalınlığındaki metal levha ile durdurmak mümkündür [22].

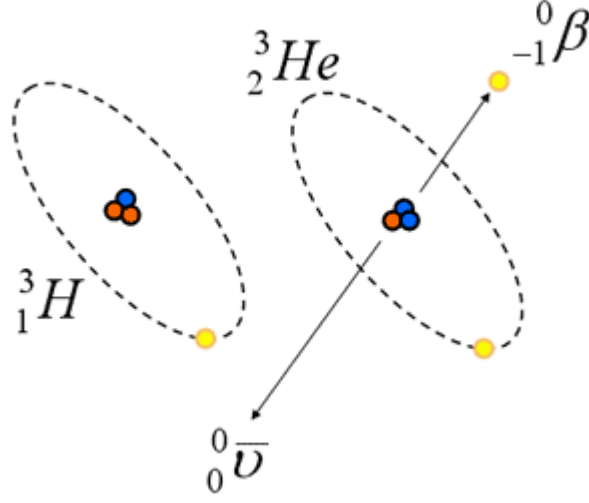
- β^- Bozunumu: Çekirdekteki enerji fazlalığı nötron fazlalığından ötürü ise β^- ışını (negatron) ortaya çıkar. Bir nötronun bir protona dönüşmesi ile çekirdek bir elektron yayınlar. Yayımlanan yüksek enerjili elektron diğer elektronlardan ayırt edilmesi amacıyla β^- şeklinde ifade edilmiştir [21].

β^- bozunum süreci Denklem 2.3 ile ifade edilmiştir.

$$n \rightarrow p + \beta^- + \bar{\nu} \quad (2.2)$$

$${}^A_Z X_N \rightarrow {}^A_{Z+1} Y_{N-1} + \beta^- + \bar{\nu} \quad (2.3)$$

Burada, $\bar{\nu}$ ifadesi anti elektron nötrinodur.



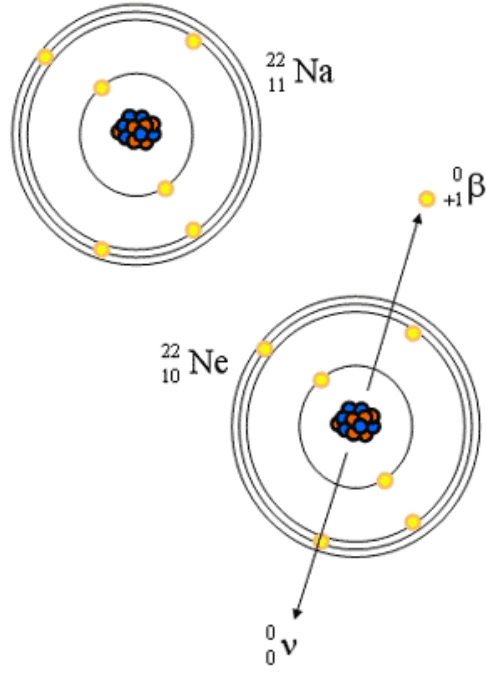
Şekil 2.3: Negatron Bozunum Örneği [15].

- β^+ Bozunumu: Çekirdekdeki enerji fazlalığı proton fazlalığından ötürü ise β^+ ışını (pozitron) ortaya çıkar. Nötron ile proton oranı düşük olan çekirdekler, enerji bakımından alfa parçacığı yayınlamayacağı için çekirdek pozitron yayınlayarak kararlı duruma geçmektedir. Çekirdekdeki bir proton bir nötrona dönüşürken pozitron ve elektron nötrino çekirdekten yayınlanmaktadır [21].

β^+ bozunum süreci Denklem 2.5 ile tanımlanmıştır.

$$p \rightarrow n + \beta^+ + \nu \quad (2.4)$$

$${}^A_Z X_N \rightarrow {}^A_{Z-1} Y_{N+1} + \beta^+ + \nu \quad (2.5)$$

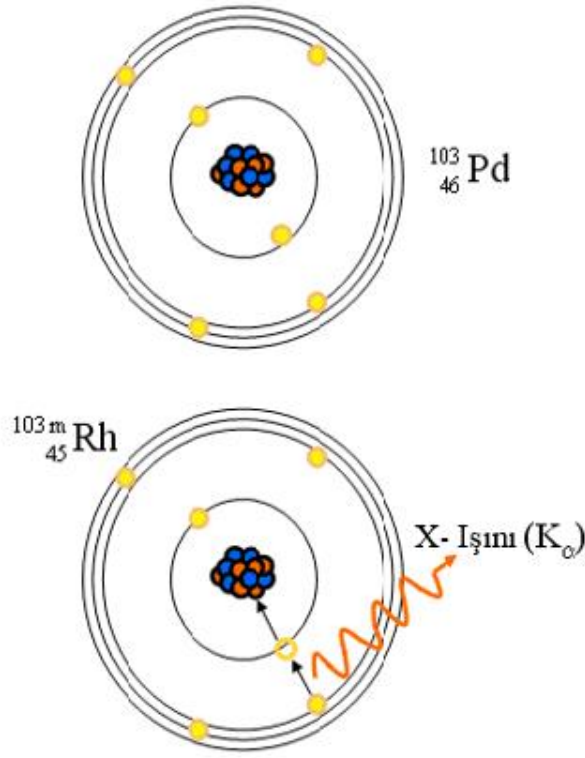


Şekil 2.4: Pozitron Bozunum Örneği [15].

- Elektron Yakalama Olayı: β^+ bozunmasına benzer olarak elektron yakalama, enerji fazlalığının proton fazlalığından kaynaklandığı durumda gerçekleşir. Atom yörüngesindeki K, L içsel kabuklarında bulunan bir elektronun yakalanarak bir nötrino salınması durumudur [21].

Elektron yakalama işlemi aşağıdaki şekilde tanımlanabilir.





Şekil 2.5: Elektron Yakalama Örneği [15].

Burada, yayımlanan ν ile elektron nötrino, $\bar{\nu}$ ile anti elektron nötrino ifade edilirken yüksüz olup, kütleleri neredeyse sıfır olarak kabul edilir.

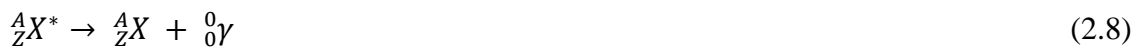
β^+ ve β^- bozunumlarında bir parçacık yaratıldığı görülmekte ve yaratılan elektron veya pozitron bozunmadan önce çekirdek içerisinde bulunmamaktadır [23].

Gama ışınları (γ) : Karasız çekirdeğin alfa veya beta bozunması yapması sonucu ortaya çıkan ürün çekirdek tam kararlı halde değildir. Temel bozunma süreci olmayan gama salınımı uyarılmış durum söz konusu iken meydana gelmektedir. Hızlı bir şekilde ($< 10^{-9}$ s) gama fotonu yayımlayarak uyarılmış durum taban durumuna geri dönmektedir [21].

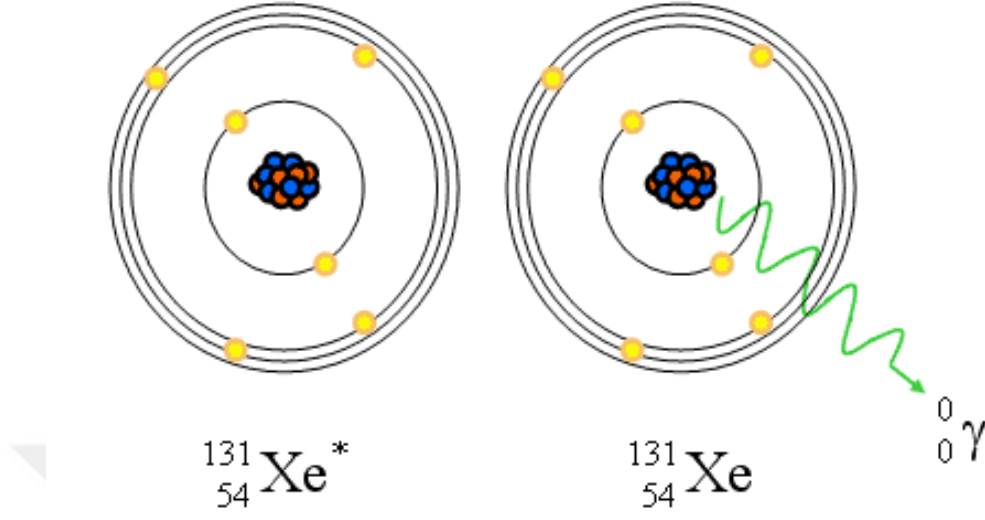
Ayrıca bu geçişe kütle ve atom numarası değişmemesi sebebiyle izomerik geçiş denilmektedir.

Gama ışınları yüksek enerjili fotonlardan oluştuğu için giriciliği fazladır ve kurşun levha ile durdurulabilirler.

Gama bozunum süreci Denklem 2.8 ile verilmiştir.



Burada yıldız simgesi uyarılmış durumu belirtmektedir.



Şekil 2.6: Gama Bozunum Örneği [15].

X ışınları: X ışınları elektromanyetik dalga şeklinde olan ve röntgen ışınları da denilen ışınlardır. Alman Fizikçi Wilhelm Conrad Röntgen tarafından 1895 yılında keşfedilmiştir.

Atoma dışarıdan gelen ya da gönderilen yüksek enerjili elektronlar, atom yörüngesinden elektron koparır. Kopan elektronun yerine üst seviyelerden elektron gelerek kopan elektronun boşluğunu doldurur ve çıkan enerji fazlalığı X ışını şeklinde dışarı salınır [1].

İlaveten yapay olarak X ışını tüplerinden de X ışını elde edilir. Tüp içerisinde ısıtılmış katottan yayılan elektronlar on binlerce voltluk gerilim ile hızlandırılır ve anota çarptırılır. Elektronlar durdurulurken elektronların kaybettiği enerji X ışını olarak çıkar ve bu olaya Bremsstrahlung (Frenleme Işınımı) olayı denilir [24].

Nötronlar: Nötronlar radyoaktif bozunmalar sonucu oluşmazlar. Ağır çekirdeğin nötron bombardımanı ile birden fazla nötron ve büyük bir enerjinin açığa çıkması ile oluşur. Yüksüz parçacıklar olan nötronlar madde içine kolaylıkla girebilir [24].

Nötronlar 3 temel kaynaktan elde edilmektedir. Bunlar;

İzotopik nötron kaynakları; ^{241}Am , ^{238}Pu ve ^{239}Pu gibi ağır çekirdeklerden yayınlanan alfa parçacıklarının hafif elementlerle etkileşimi sonucunda nötron meydana gelmektedir [25].

Hızlandırıcı tabanlı nötron kaynakları; döteryum ya da trityum hedeflere nötron jeneratörlerinde bulunan döteryum iyonları hızlandırılarak çarptırılır ve tek enerjili nötronlar meydana gelir [25].

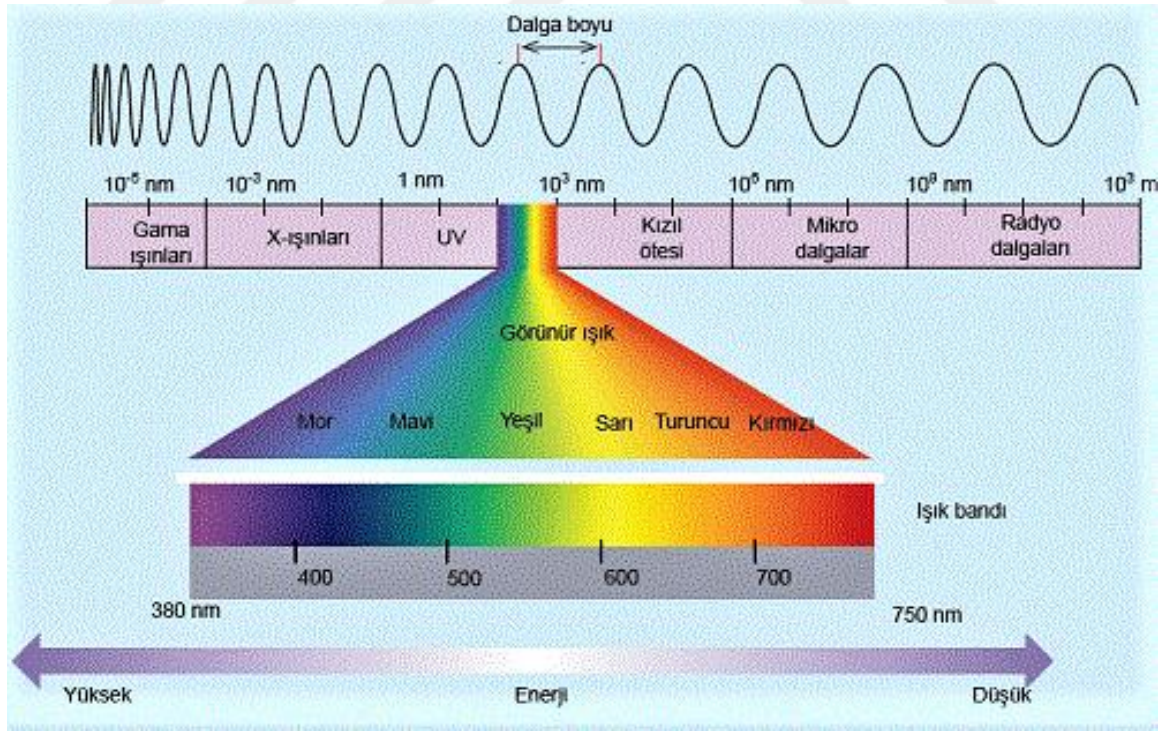
Nükleer reaktörler; ^{235}U ve ^{239}Pu gibi çekirdeklerin bölünmesi ile nötronlar meydana gelmektedir [25].

2.2.2. İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyon

İyonlaştırıcı olmayan radyasyon elektron kopararak atomun yüklü veya iyonize olması için yeterli enerjiye sahip değildir [19].

Düşük frekanslı ve uzun dalga boylu ışınlarda enerji değeri düşük olduğundan atom ya da molekülleri iyonize edemezler. İyonlaştırıcı olmayan radyasyon, düşük enerjili ve düşük frekanslı radyasyon türlerini ifade eder.

İyonlaştırıcı olmayan radyasyon türlerine örnek olarak görünür ışık, kızıl ötesi ışınlar, radyo dalgaları, mikrodalgalar ve ultraviyole ışınlar verilebilir.



Şekil 2.7: Elektromanyetik Spektrum [26].

2.3. RADYOAKTİVİTE VE RADYASYON DOZ BİRİMLERİ

Çekirdeğin yapısı itibari ile doğal bir süreç olan radyoaktivite, kararsız atom çekirdeğinin elektromanyetik radyasyon veya nükleer parçacıklar yayınlarak kararlı hale geçmesi olayıdır [27].

Radyoaktivite 1896 yılında Fransız Fizikçi H. Becquerel tarafından keşfedilmiştir.

X-ışınlarının keşfinden etkilenen H. Becquerel uranyum tuzunun X-ışını üretebileceğine inanıyordu. Bir miktar Uranyum tuzunu üzeri siyah kağıt ile kaplı fotoğraf camlarının üzerine koydu ve güneşe bıraktı. Güneş ışığı sayesinde tuzdan X-ışınları çıkmasını bekliyordu. Havanın bulutlu olması ile tuzu ve fotoğraf camlarını çekmeceye koydu ve birkaç gün sonra filmleri banyo etti. Uranyum tuzu fotoğraf camlarını yeterince güneş görmediği halde karartmıştı. Deneyle tekrarlayan Becquerel, güneşe gerek kalmadığını, uranyum tuzlarının kendiliğinden ışın yaydığını ve uranyumun radyoaktif bir element olduğunu keşfetti. Kısa süre sonrasında Madam Curie toryum tuzlarının da bu ışınları yaydığını ve ardından polonyum elementinin de bu ışınları yaydığını keşfetti [28].

Marie ve Pierre Curie 20. Yüzyılın başlarında radyumu kanser tedavisinde kullanmaya başlamıştır. Nükleer enerji uygulamaları ile nükleer tıbbın başlangıcı olan bu çalışmalar özellikle birçok hastalığın ve kanserin teşhisi ve tedavisi için oldukça önemlidir [27].

Daha sonra alfa parçacıkları ile ^{14}N çekirdeklerini bombardıman ederek ilk yapay ^{17}O kararlı izotopu 1919 yılında Rutherford tarafından üretilmiştir. Rutherford'un ardından 1934 yılında Frederik Joliet ve Irene Joleit - Curie polonyum alfa parçacıkları ile örneğin Be, B ve Mg gibi çeşitli elementlere bombardıman ederek yapay radyoizotop üretimini gerçekleştirmiştir [27].

2.3.1. Radyoaktif Bozunum Kanunu

Bir t anında sistemde N tane radyoaktif çekirdek mevcut olsun, yeni çekirdek ilave edilmediği takdirde dt zamanı boyunca bozunan dN çekirdek sayısı ve N orantılıdır [23].

$$dN = -\lambda N dt \quad (2.9)$$

Çok küçük bir süre zarfında bu orantı Denklem 2.10'da verildiği gibi ifade edilir.

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (2.10)$$

λ bozunma sabiti olmak üzere eksi işareti azalmayı ifade etmektedir.

Denklem 2.10'u düzenleyip zamana göre integre edersek herhangi bir t anındaki radyoaktif çekirdek sayısını bulabiliriz.

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

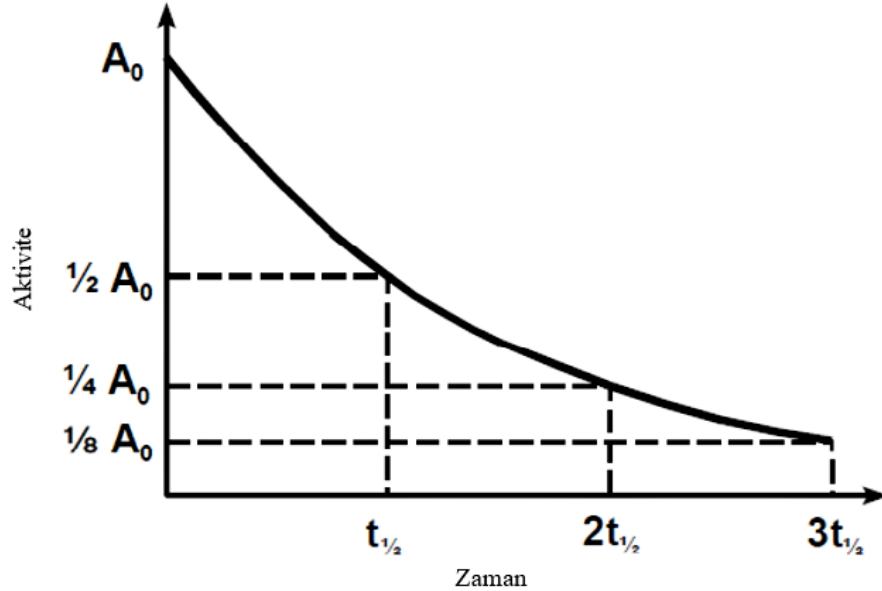
$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt \quad (2.12)$$

$$\ln\left(\frac{N}{N_0}\right) = -\lambda t \quad (2.13)$$

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2.14)$$

Denklem 2.14 'Üstel Radyoaktif Bozunum Kanunu' olarak ifade edilir.

Denkleminde N_0 ile $t = 0$ anındaki radyoaktif çekirdek sayısı verilmiştir. Belli bir zaman sonrasında radyoaktif çekirdek sayısı üstel olarak azalacaktır.



Şekil 2.8: Üstel Radyoaktif Bozunum [29].

Radyoaktif bir kaynağın aktivitesinin zamanla nasıl değiştiği Şekil 2.7’de gösterilmiştir. Radyoaktif bir kaynaktan gelen radyasyon, şekilde gösterildiği gibi zamanla azalır ve bir eğri gözlenir. Böyle bir eğrinin şeklinin üstel olduğu söylenir [4].

2.3.2. Yarı Ömür

Yarı ömür, radyasyon yoğunluğunun gerçek değerinin yarıya düştüğü zamana kadar geçen süreyi ifade etmektedir. Radyoaktif bir kaynaktan gelen radyasyon giderek azalacaktır. Bu bozunma oranı yarı ömür tarafından verilir ve yarı ömür genellikle $t_{1/2}$ olarak ifade edilir [4].

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \approx \frac{0,693}{\lambda} \quad (2.15)$$

Denklem 2.15 ile yarı ömür ve bozunma sabiti arasındaki ilişki belirtilmiştir.

2.3.3. Ortalama Ömür

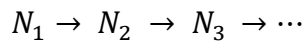
Ortalama ömür, bozununcaya kadar radyoaktif bir çekirdeğin geçirdiği ortalama süredir. Denklem 2.16 ile de ifade edildiği gibi bozunma sabitinin tersidir [23].

$$\tau = \frac{1}{\lambda} = \frac{t_{1/2}}{0,693} \quad (2.16)$$

$$\tau = 1,44 * t_{1/2} \quad (2.17)$$

2.3.4. Ardışık Bozunma Kanunu

Radyoaktif bir çekirdeğin bozunum sonucu oluşan ürün çekirdeği de radyoaktif olabilir. Bu durumda bozunmalar kararlı bir çekirdeğe ulaşıncaya kadar sürer ve radyoaktif bozunma zinciri oluşur.



Başlangıçtaki çekirdek N_1 “ana”, onun oluşturduğu çekirdek N_2 “kız” ve kız çekirdeğin oluşturduğu çekirdek N_3 ise “torun” olarak adlandırılır [23].

Aktivitenin birim zamandaki bozunma sayısından yola çıkarak dt zaman aralığında bu çekirdeklerin sayıları aşağıdaki diferansiyel bozunma denklemleri ile verilebilir.

$$\frac{dN_1(t)}{dt} = -\lambda_1 N_1(t) \quad (2.18)$$

$$\frac{dN_2(t)}{dt} = \lambda_1 N_1(t) - \lambda_2 N_2(t) \quad (2.19)$$

$$\frac{dN_3(t)}{dt} = \lambda_2 N_2(t) - \lambda_3 N_3(t) \quad (2.20)$$

2.3.5. Radyoaktif Denge

Basitçe bir radyoaktif bozunma süreci yazalım ve N_1 , N_2 , N_3 şeklinde üç tane çekirdeği ele alalım. N_1 ana çekirdektir. Çekirdek 1 çekirdek 2'ye ve çekirdek 2 çekirdek 3'e bozunur [21].

Yukarıda verilen ilişkilerden, çekirdek 2'nin atom sayısı Denklem 2.21 ile verilir.

$$\begin{aligned} N_2 &= \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1(0) (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \\ &= \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1 (1 - e^{-(\lambda_1 - \lambda_2)t}) \end{aligned} \quad (2.21)$$

Radyoaktif dengeye ulaşmak için gerekli olan zaman, Denklem 2.21'e göre ana ve kız çekirdeklerin yarı ömrüne bağlı olmaktadır.

2.3.5.1. Kalıcı Denge ($\tau_1 \gg \tau_2$)

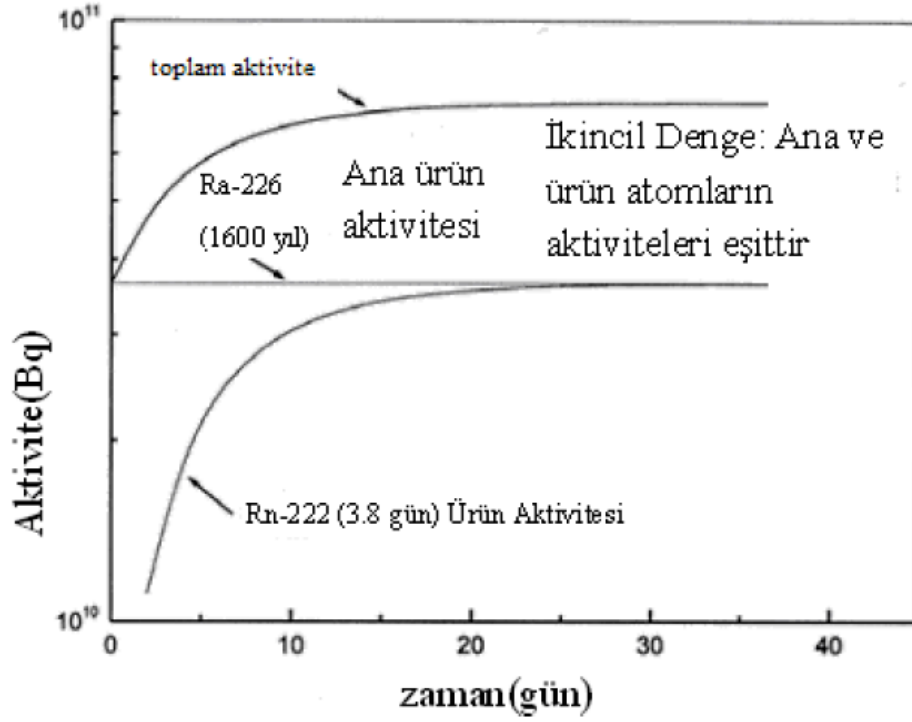
Kalıcı denge, ana çekirdeğin yarı ömrünün ürün çekirdeğin yarı ömründen çok daha büyük olması durumudur, $\tau_1 \gg \tau_2$ ($\lambda_1 \ll \lambda_2$) [21].

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} N_1(0) (1 - e^{-\lambda_2 t}) \quad (2.22)$$

$t \gg \frac{1}{\lambda_1}$ zamanları için radyoaktif denge kurularak aşağıdaki bağıntı yazılabilir:

$$\text{Kalıcı denge: } \frac{N_1}{N_2} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{\tau_1}{\tau_2} \text{ ve } A_1 = A_2 \quad (2.23)$$

Burada λ bozunma sabiti olmak üzere, A , $\lambda.N$ ile belirlenen aktivitedir. Böylelikle kalıcı radyoaktif denge durumunda sayıların ve kütlelerin oranı sabit ve ayrıca aktiviteleri de Şekil 2.9'de gösterildiği gibi eşittir [21].



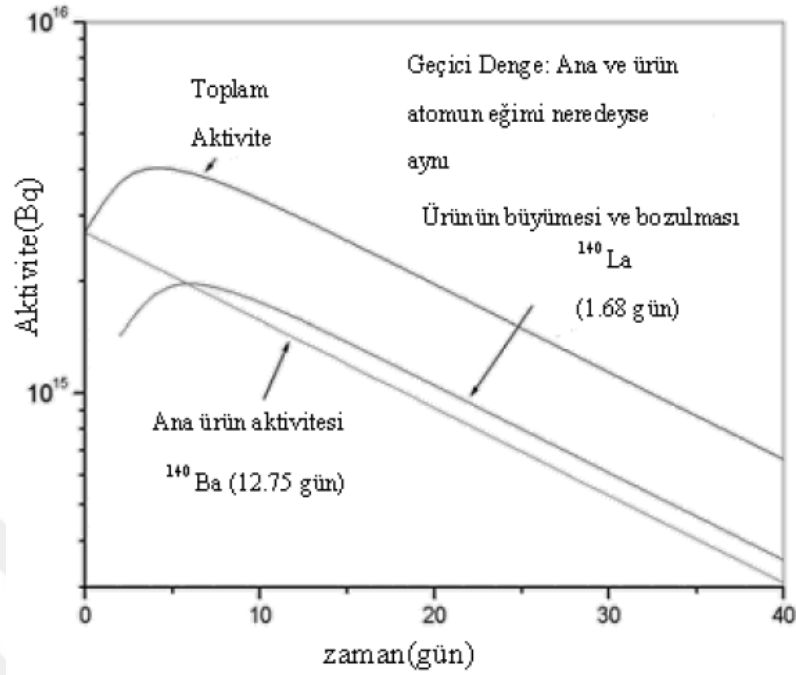
Şekil 2.9: ^{226}Ra ve ürünü ^{222}Rn arasındaki kalıcı denge durumu [30].

2.3.5.2. Geçici Denge ($\tau_1 \geq \tau_2$)

Geçici denge, bozunma ürününün yarı ömrünün ana çekirdekle aynı derecede ancak ondan daha küçük olması durumudur, $\tau_1 > \tau_2$ ($\lambda_1 < \lambda_2$) [21].

Bozunma ürünü için Denklem 2.24 yazılabilir:

$$N_2 = \frac{\tau_2}{\tau_2 - \tau_1} = N_1(0) (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \quad (2.24)$$



Şekil 2.10: ^{140}Ba ve ürünü ^{140}La arasındaki geçici denge durumu [30].

Denklem 2.23'de $e^{-\lambda_2 t}$ terimi $e^{-\lambda_1 t}$ teriminden daha hızlı şekilde sifira gider ve bu yüzden bu terim ihmal edilebilir. Buna göre Denklem 2.25'i yazabiliriz:

$$\text{Geçici denge: } \frac{N_2}{N_1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (2.25)$$

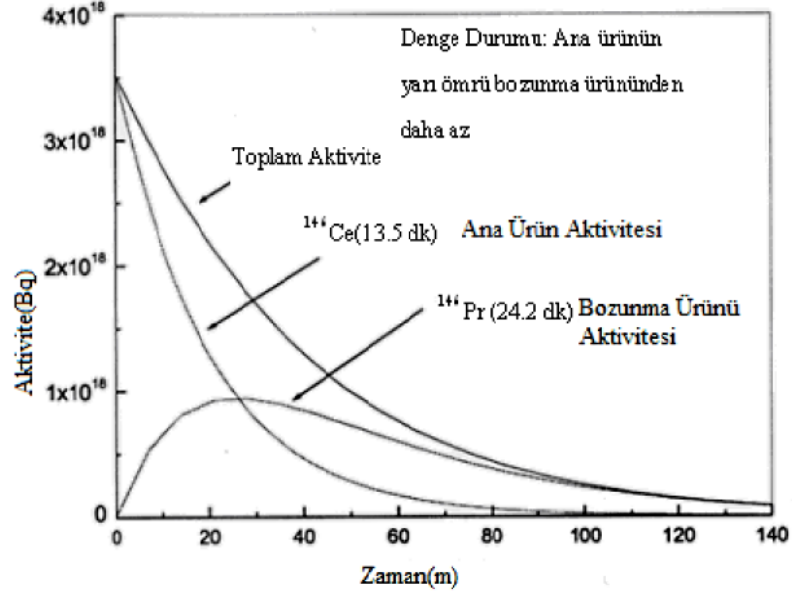
Burada $N_1 = N_1(0) (e^{-\lambda_1 t})$ denklemi kullanılmıştır ve bu geçici denge için şarttır.

2.3.5.3. Denge Durumunu Olmaması ($\tau_1 < \tau_2$)

Denge durumunun olmaması, ana çekirdeğin yarı ömrünün ürün çekirdeğin yarı ömründen daha kısa olması durumudur [21].

Ana çekirdeğin yarı ömrü ürün çekirdeğin yarı ömründen daha kısa olduğu zaman, ürün çekirdeğin aktivitesi maksimuma ulaşarak kendine has karakteristik yarı ömrü ile bozunur [21].

^{146}Ce için bunun örneği Şekil 2.11'de verilmiştir.



Şekil 2.11: ^{146}Ce ve ürünü ^{146}Pr arasında dengenin olmaması durumu [30].

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1(0) (e^{-\lambda_2 t}) \quad (2.26)$$

Belirli bir süre sonunda λ_2 bozunma sabiti ile ürün çekirdek bozunacaktır. Ana çekirdek bitecek ancak ürün çekirdek kendi bozunma hızı ile bozunmasına devam edecektir.

2.3.6. Radyoaktivite ve Radyasyon Doz Birimleri

2.3.6.1. Aktivite Birimi

Birim zamanda bozunan çekirdek sayısına aktivite denilmektedir [3].

Radyoaktif bir kaynağın radyoaktivite birimi Becquerel'dir ve Bq ile gösterilir [4].

1 Bq = Saniyedeki bozunma sayısı

Eski radyoaktivite birimi Ci ile temsil edilen Curie'dir ve bir gram Radium-226'nın aktivitesi olarak ifade edilir. Bir gram radyumda saniyede parçalanma sayısı 37 milyardır [4].

Becquerel ve Curie arasındaki ilişki şu şekilde verilir:

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

2.3.6.2. Işınlama Birimi

Işınlama birimi olarak eski radyasyon birimi röntgen verilmektedir.

Normal hava şartlarında (0°C ve 760 mm basınçta) havanın 1 kg'ında $2,58 \times 10^{-4}$ Coulomb değerinde pozitif ve negatif iyon oluşturan radyasyon miktarı olarak tanımlanmaktadır [3].

Belirlenen yeni radyasyon birimi de Coulomb/kg 'dır.

“R” ve “C/kg” arasındaki ilişki aşağıda verilmektedir:

$$1 \text{ C/kg} = 3876 \text{ R veya}$$

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

2.3.6.3. Soğurulmuş Doz Birimi

Soğurulmuş doz, ışınlanan maddenin 1 kg'ında 1J'lük enerji absorpsiyonu oluşturan radyasyon miktarıdır. Eski birimi Rad olan soğurulmuş dozun yeni birimi Gray olarak belirlenmiştir. “Gy” ile temsil edilir [3].

Gray vücutta dokularda biriken radyasyon miktarıdır.

“Rad” ile “Gy” arasındaki ilişki şöyledir:

$$1 \text{ rad} = 100 \text{ erg/gr}$$

$$1 \text{ rad} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg'dır.}$$

2.3.6.4. Eşdeğer Doz Birimi

Radyasyon canlı maddede emildiğinde, biyolojik bir etki gözlemlenebilir. Ancak eşit emilen dozlar vücutta eşit biyolojik etkiler üretmeyecektir. Oluşacak etki, radyasyon tipine (alfa, beta veya gama) ve iyonlaşma yoğunluğuna bağlıdır [31].

Diğer bir deyişle, eşdeğer doz, farklı tipte radyasyonların aynı dokuya verebileceği zararın derecesini açıklayan tek bir birim sağlamaktadır [31].

Eşdeğer dozun eski birimi Rem'dir. SI birim sisteminde eşdeğer doz birimi Sievert'dir ve "Sv" ile sembolize edilir.

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

2.3.6.5. Yıllık Etkin Doz Birimi

Yıllık etkin doz birimi, çeşitli radyasyon kaynaklarından yayılan ışınlarla dış ışınlama ile maruz kalmanın yanında yediğimiz gıdalarda, içtiğimiz sularda ve soluduğumuz havada bulunan radyoaktif çekirdeklerden yayınlanan ışınlarla iç ışınlama yolu ile maruz kalmamız neticesinde bir yıl boyunca kişinin alacağı toplam doz miktarı olarak ifade edilir [3].

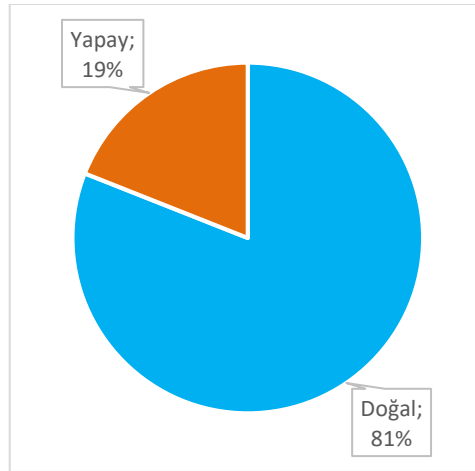
SI birim sisteminde yıllık etkin doz birimi Sievert'dir.

Her radyoaktif çekirdek için birim aktivitede yayınladığı radyasyonun doz dönüşüm faktörleri belirlenerek birim hacim başına bulunan aktivite konsantrasyonu ile çarpılarak yıllık etkin doz birimi hesaplanabilir [3].

2.4. RADYASYON KAYNAKLARI

Radyasyon kaynaklarını doğal ve yapay radyasyon kaynakları olarak sınıflandırabiliriz.

Yıllık aldığımız radyasyon dozunun %81'ini doğal radyasyon kaynaklarından ve kalan %19'luk kısmını ise yapay radyasyon kaynaklarından almaktayız (Şekil 2.11).



Şekil 2.12: Radyasyon Kaynaklarının Sınıflandırılması [1].

Milyonlarca yıldan beri yeryüzündeki tüm canlılar doğal radyasyon ile iç içe yaşamışlardır.

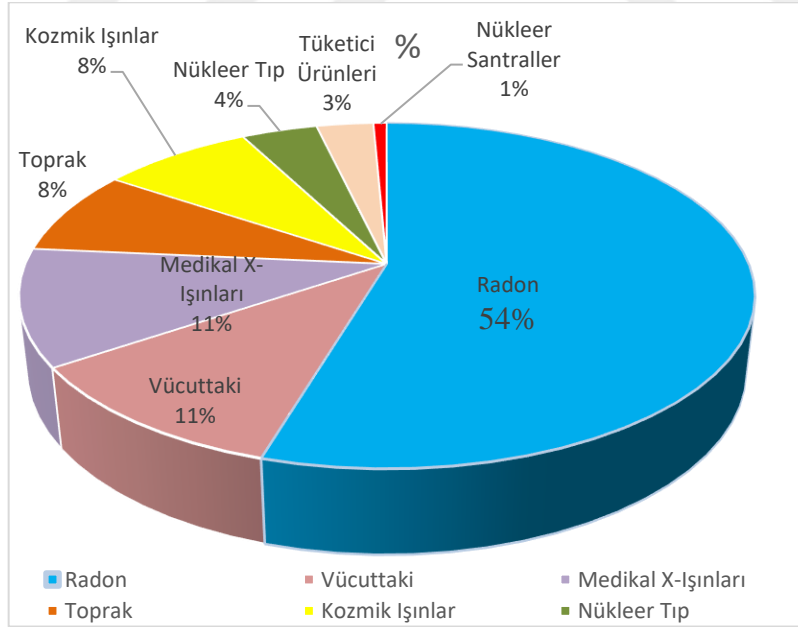
Doğal kaynaklardan meydana gelen radyasyon her yerde bulunabilir. Doğal olarak meydana geldiğinden radyoaktif çekirdekler toprakta, soluduğumuz havada, yediğimiz yiyeceklerde, içtiğimiz suda ve hatta içimizde bulunabilir [32].

İnsanlar sindirim ve solunum yoluyla, hava, su ve besinler aracılığıyla alınan radyoaktif maddelerin organlarında birikmesi sonucu iç ışınlamaya maruz kalırken bunun yanı sıra uzaydan gelen kozmik ışınlar ile dış ışınlamaya maruz kalmaktadır [33].

İnsanoğlu tarafından üretilen yapay radyasyon kaynaklarından meydana gelen radyasyonu tıbbi, zirai ve endüstriyel amaçla kullanılan X ışınları ve yapay radyoaktif maddelerden alabiliriz [1].

2.3.1. Doğal Radyasyon Kaynakları

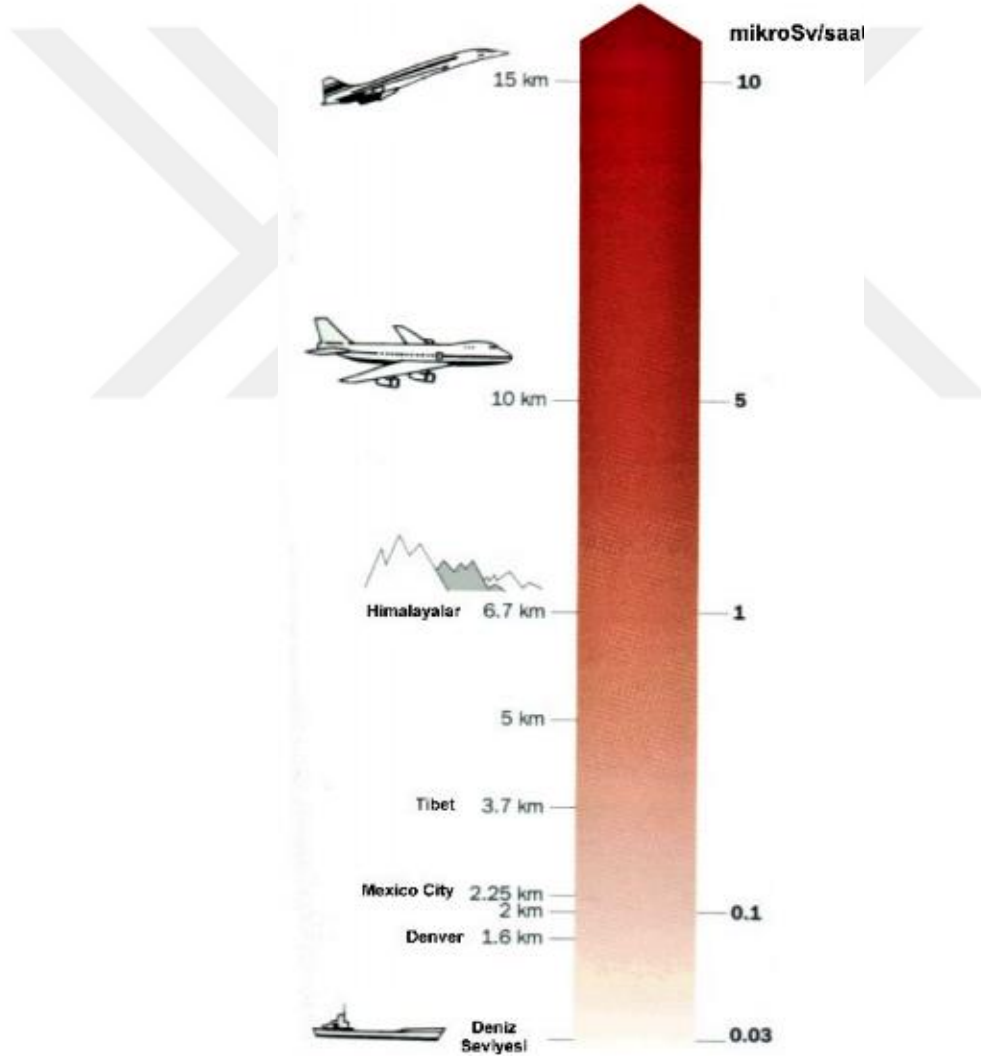
UNCEAR 2000 verilerine göre doğal radyasyon açısından alınan ortalama yıllık etkin doz 2,4 mSv'dir [34].



Şekil 2.13: Radyasyon Dozunun Kaynakları [30].

2.3.1.1. Kozmik Radyasyon

Uzaydan Dünya'mıza gelen yüksek enerjili parçacıklara kozmik radyasyon denir. Bu parçacıklarının çoğunluğunu atmosfere gelen protonlar oluşturmaktadır. Elektrik yüklü olan protonlar atmosfere ulaştığında Dünya'nın manyetik alanının etkisine girerler ve bu sebeple ekvatorдан kutuplara gidildikçe kozmik ışın yoğunluğu artar. Yani enlem arttıkça maruz kalınan kozmik radyasyon miktarı artmaktadır. Atmosfer kısmi şekilde radyasyonu zırhlar ve kozmik ışınlar atmosferden geçerken tutulurlar. Böylece kozmik ışın yoğunluğu deniz seviyesine yaklaştıkça azalır [33].



Şekil 2.14: Kozmik Işınlardan Alınan Radyasyon [35].

UNSCEAR verilerine göre, yükseklik ve enleme bağı olarak farklılık gösterse de kozmik radyasyon yer seviyesindeki yıllık etkin doz değeri 0,4 mSv olarak belirtilmiştir [34].

2.3.1.2. Karasal Radyasyon

Dünya'nın kendisi karasal radyasyon kaynağıdır [36]. Karasal kökenli radyasyon yeryüzünde doğal olarak kendiliğinden mevcuttur. Havada, suda, toprakta, yediğimiz besinlerde, evlerimizin yapı malzemelerinde kısacası her yerde karşımıza çıkmaktadır.

UNCEAR 2000 verilerine göre doğal karasal radyasyon açısından alınan ortalama yıllık etkin doz 0,5 mSv'dir [34].

Uzun yarı ömre sahip ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K gibi çekirdekler ve bu çekirdeklerin bozunum ürünleri karasal radyasyon kaynaklarıdır. Bu radyasyon türünün esas kaynağı toprak ve toprak tabakasının altındaki kayaç yapısıdır. Bu sebeple bu radyoaktif çekirdekler ağırlıklı olarak toprak, volkanik kayalar ve deniz diplerinde biriken çamurlarda bulunmaktadır [36].

İlaveten insanlar yaşamlarının büyük çoğunluğunu evlerinde geçirirler ve evlerin yapımında kullanılan yapı malzemeleri de yeryüzünden çıkarıldığı için radyoaktif maddeler içermektedir.

Maruz kalınan karasal radyasyon konsantrasyonu bölgenin jeolojik yapısı, iklim ve çeşitli tarım uygulamaları gibi etkenlere bağlı olarak bölgeden bölgeye değişkenlik göstermektedir.

Radon

Maruz kalınan karasal radyasyon miktarında toprakta ve ana kayaçta bulunan radyoaktif maddeler tarafından üretilen radyoaktif gazların solunması oldukça önemli bir faktördür. Radon, uranyumun bozunumu sonucu oluşan kokusuz ve renksiz radyoaktif bir gazdır. Toron ise toryum bozunma süresinde üretilen bir radyoaktif gazdır. Dünya atmosferinin doğal bir parçası olmuşlardır. Radon ve toron seviyeleri, toprak ve kayaç yapısına bağlı olarak önemli ölçüde değişir. Bu gazlar havaya salındıktan sonra bina içinde hapsolarak birikir ve içeride bulunan insanlar tarafından solunurlar. Biriken radon gazı sağlık riski oluşturmaktadır [37].

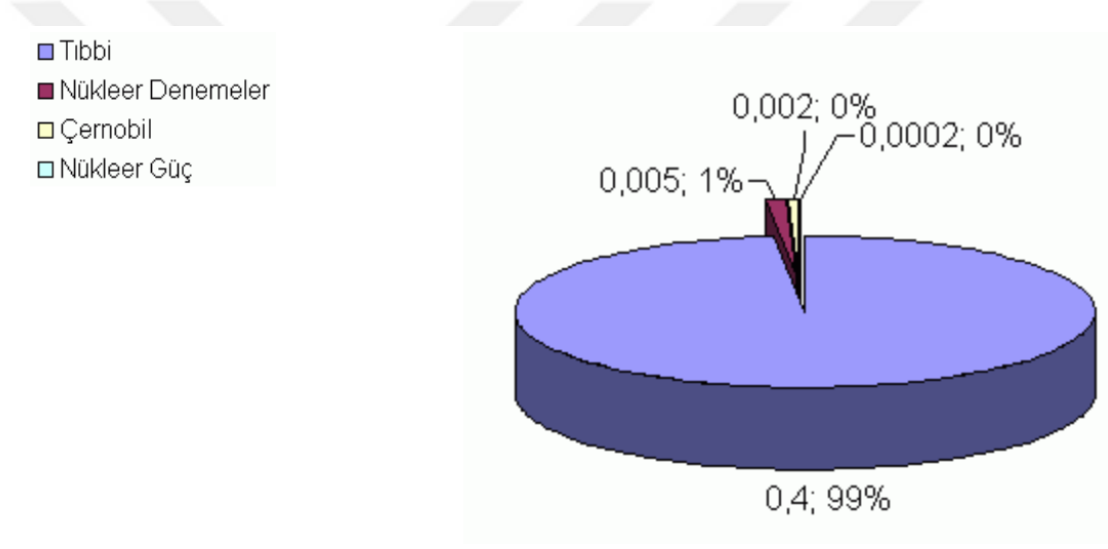
Ayrıca yaşam kaynağımız olan sular da eser miktarda radon gazı ve çeşitli radyoaktif çekirdekler mevcuttur. İçtiğimiz sular ile de karasal radyasyon kaynaklarına maruz kalmaktayız.

2.3.1.3. Dahili Radyasyon

Radyoaktif madde içeren besin ve suların sindirimi ve radon gazının solunumu radyasyonun insan vücuduna alınmasını sağlamakta böylelikle dahili radyasyonu oluşturmaktadır.

Bu sebeple tüm insanlar doğuştan içsel radyasyona sahip doğarlar. Dahili radyasyonu insan vücudunda doğuştan mevcut olan ^{40}K , ^{14}C ve ^{210}Pb radyoaktif elementleri oluşturur. Kozmik ve karasal radyasyona kıyasla dahili radyasyon sebepli kişinin maruz kaldığı doz miktarı kadar büyük değildir [36].

2.3.2. Yapay Radyasyon Kaynakları



Şekil 2.15: Yapay Radyasyon Kaynakları [38].

UNCEAR 2000 verilerine göre yapay radyasyon açısından alınan ortalama yıllık etkin doz 0,6 mSv'dir [34]. Radyasyonun tıpta birçok kullanımı vardır. En çok bilinen kullanım, hastalığı teşhisi amacıyla kullanılan X-ışını makineleridir. Aynı şekilde diğer önemli bir kullanımı da kanser vb. hastalıkların tanı ve tedavisi için radyoaktif izotopları kullanan nükleer tıptır [39].

İkinci Dünya Savaşının sona ermesinden 1980 yılına kadar yapılan atomik silahların testi serpinti denilen radyoaktif maddeyi havaya bırakmıştır ve serpinti toprağa yerleşerek çevreye dahil olmuştur. Serpinti ile yayılan radyoaktif çekirdeklerin çoğu kısa yarı ömürlü ve halen mevcut değil ancak bazıları bu güne kadar bozunmaya devam etmektedir [39]. Benzer şekilde çevreye nükleer serpinti ile radyoaktif madde yayılması konusunda 1986 yılında Çernobil Reaktör Kazası ve 2011 yılında Fukuşhima Nükleer Santrali Kazası da örnek verilebilir.

Nükleer enerji santralleri, düşük dozda radyasyona maruz bırakacak şekilde düzenlenmiş radyoaktif maddeleri yayınlamaktadır. Aynı şekilde radyoaktif yakıt tesisleri, yakıt fabrikasyon tesisleri ve uranyum mayınları radyoaktif madde salmaktadırlar [39].

Tıbbi, zirai ve endüstriyel amaçla kullanılan X ışınları ve yapay radyoaktif maddeler, nükleer bomba denemeleri sonucu meydana gelen nükleer serpintiler, çok az da olsa nükleer güç üretiminden salınan radyoaktif maddeler ile bazı tüketici ürünlerinde kullanılan radyoaktif maddeler bilinen başlıca yapay radyasyon kaynaklarıdır [39].

2.7. RADYASYONUN ETKİLERİ

Radyasyonun yaşayan canlılar üzerinde ciddi etkileri olabilmektedir. Bu etkiler kişide radyasyona maruz kalımdan hemen sonra ortaya çıkabileceği gibi hücrede belli bir süre sonrasında veya kuşaklar sonraki hücrelerde görülebilmektedir.

Radyasyonun etkilerini eşik değerinde radyasyon ve eşik değerinde olmayan radyasyon etkileri olarak 2 şekilde inceleyebiliriz.

Eşik Değerinde Radyasyon Etkileri; Maruz kalınan radyasyon dozunun belli bir sınır seviyeye ulaşması halinde eşik etkileri meydana gelmektedir. Hücrelerin zarar görmesi ile etkiler bariz şekilde gözlenebilmektedir. Radyasyon dozunun eşik değerinden düşük olması durumunda kişide bu etkiler gözlenmemektedir [31].

Eşik Değerinde Olmayan Radyasyon Etkileri; Belirli bir sınırı olmayan, çok düşük bir dozda radyasyona maruz kalınması halinde bile ortaya çıkabilmektedir. En bilinen eşiksiz etki kanserdir. Çoğu kanser radyasyondan kaynaklanmamaktadır. Belirli bir doz radyasyona maruz kalmak bir kişide kansere sebep olabilirken bir diğerinde olmayabilir ve genellikle maruz kalımdan uzun yıllar sonrasında ortaya çıkmamaktadır. Ayrıca kişide kanser gözlenmesi radyasyona maruz kalan kişinin yaşına, cinsiyetine ve maruz kaldığı bölge gibi etmenlere de bağlı olmaktadır. Radyasyonun sebep olduğu kansere yakalanma eğilimi, meme ve tiroid gibi hücrelerin hızla büyüdüğü ve çoğaldığı bölgelerde daha yüksek iken böbrek ve sinir hücrelerinde daha düşüktür [31].

2.7.1. Radyasyonun Biyolojik Etkileri

İyonlaştırıcı radyasyon doğrudan ve dolaylı etki şeklinde hücre ile etkileşmektedir.

Doğrudan etkide radyasyon hücrenin DNA zincirinde kırılmalar oluşturur ve yüksek LET'li radyasyon tiplerinde sıklıkla rastlanır. Etkileşim sırasında yüklü olan parçacığın etkileştiği maddeye uyarma ya da iyonizasyon ile aktardığı enerji miktarı Lineer Enerji Transferi (LET) olarak adlandırılır. Alfa, beta, nötron yüksek LET'e sahiptir ve kısa mesafede daha fazla hasar meydana getirirler. X ve gama radyasyonu ise düşük LET'e sahiptir ve uzun mesafede daha az hasar oluştururlar [40].

Dolaylı etki ise iyonizasyon şeklinde olmaktadır. Hücre içeriğinin büyük bir kısmı sudur ve radyasyon hücre içerisindeki su moleküllerini iyonlaştırarak Oksil(O) ve Hidroksil(OH) gibi radikallerin oluşmasını sağlamaktadır. Oluşan serbest oksijen radikalleri hücrenin yapısını bozarak hücrenin en duyarlı bölümü olan çekirdeğe zarar verir ve DNA bileşenleri etkileşerek tek ya da çift zincir kırılmalarına sebep olmaktadır. Oluşan kromozom kırıklarının küçük olması hücrenin ölümüne sebep olmaz ancak kırık büyük ise daha sonraki kuşaklar için tamir edilse dahi ölümcül olmaktadır [40].

2.7.2. Radyasyonun Sağlık Etkileri

İnsan sağlığı açısından yüksek dozda radyasyona maruz kalma sebebiyle oluşabilecek etkilerin başında kanser gelmektedir. Kanser türü ve görüleceği organ maruz kalınan radyoaktif çekirdeklere ve maruziyet süresine bağlıdır [41].

IAEA, doğal kaynaklara bağlı maruz kalınan radyasyonun yılda ortalama 2.4 mSv olduğunu belirlemiştir. Ancak belirlenen bu limit coğrafi konuma göre değişebilmektedir [41].

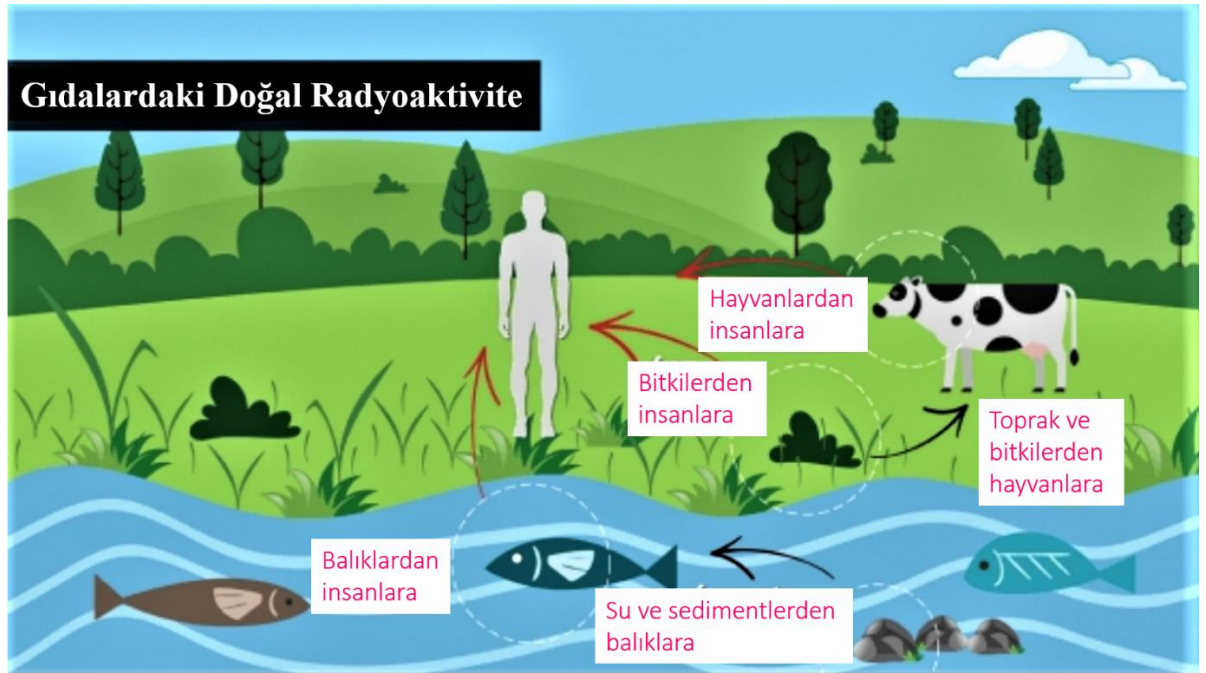
Görülen diğer belirgin etkiler ise aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Deri ve deri altı dokularda tahribat
- Anemi-Lösemi
- Kısırlık
- Ömür Kısalması
- Genetik Etkiler

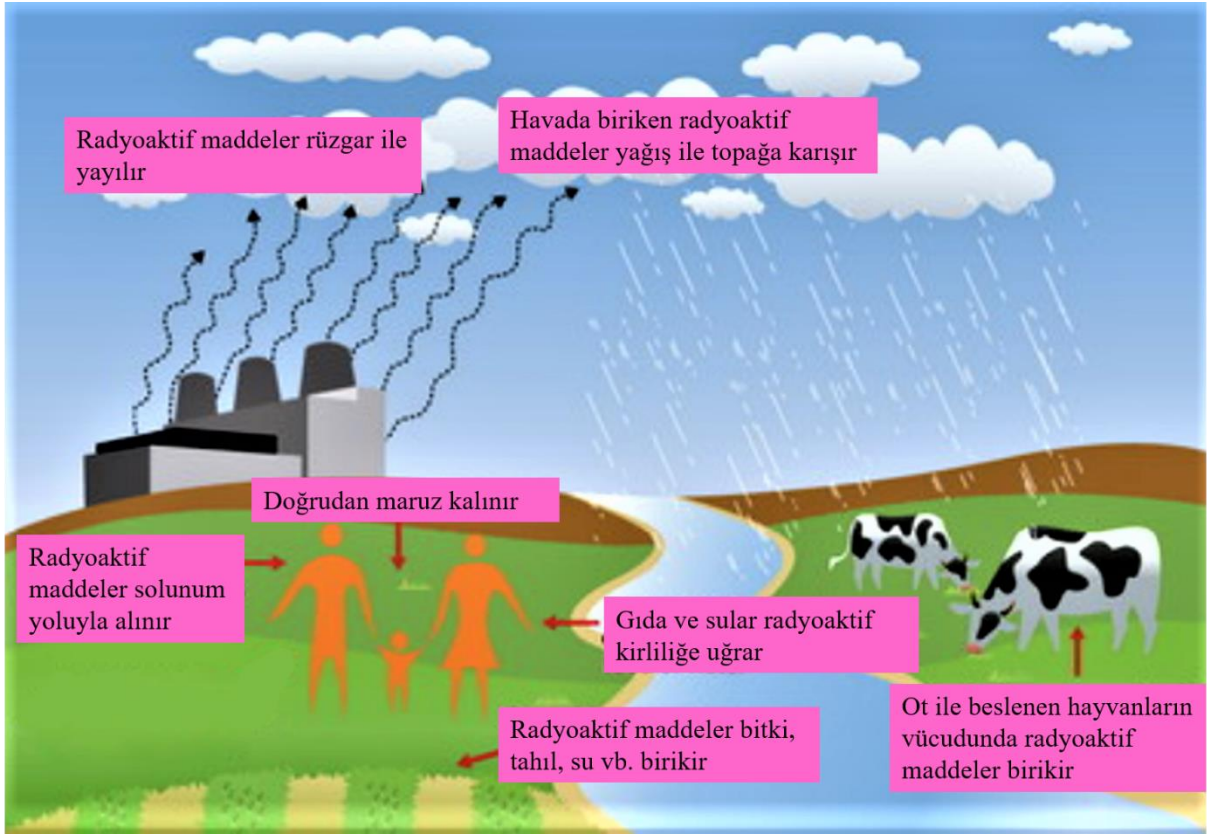
2.7.3. Gıdalarda Radyoaktif Çekirdekler

Gıdalardaki radyoaktif çekirdek konsantrasyonu gıda türü ve gıdaların üretildiği coğrafi bölge gibi etkenlere bağlıdır. Yaygın olarak gözlenen radyoaktif çekirdekler ^{226}Ra , ^{238}U , ^{40}K ve bozunum ürünleridir. Uranyum ve Toryum bozunumdan gelen diğer doğal radyoaktif çekirdekler daha düşük konsantrasyonlarda bulunur [41].

Ayrıca Çernobil Nükleer Kazası sebebiyle serpinti halinde gelen ^{137}Cs yapay radyoaktif çekirdeği de belli konsantrasyonlarda bulunur.

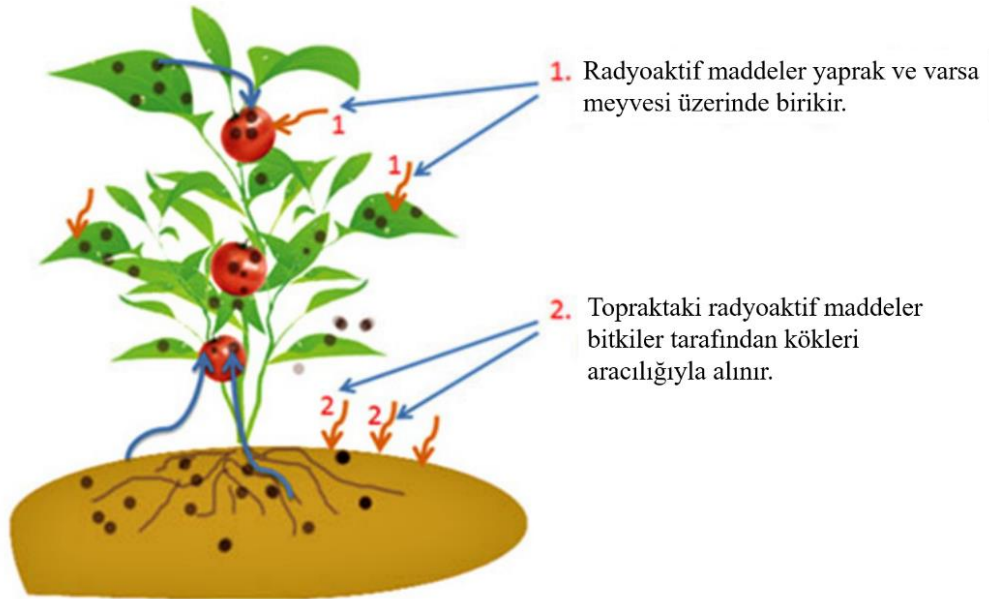


Şekil 2.16: Gıdalarda Doğal Radyoaktivite [42].



Şekil 2.17: Yapay Radyasyonun Doğada Dağılımı [43].

Radyoaktif Çekirdeklerin Bitkilere Aktarımı



Şekil 2.18: Radyoaktif Çekirdeklerin Bitkilere Aktarımı [44].

2.5. RADYOAKTİF SERİLER

Radyoaktif bir atom kararsızdır ve sonunda daha kararlı duruma ulaşmak için bir parçacık veya bir foton yayınlar. Radyoaktif kaynak çok sayıda kararsız atomdan oluşur. Parçalanma kararlı(radyoaktif olmayan) bir izotop oluşana kadar devam eder. Ürünleri de radyoaktif olan, bir atomun diğerine dönüştüğü bir dizi kararsız atomun oluşturduğu gruba radyoaktif seri denir [4].

Dünya'nın yaşı ile kıyasladığımızda çok daha uzun yarı ömre sahip radyoaktif çekirdekler bugün hala mevcuttur. Bunlar ^{238}U ($4,468 \times 10^9$ yıl), ^{235}U ($7,038 \times 10^8$ yıl) ve ^{232}Th ($14,05 \times 10^9$ yıl) gibi çok uzun yarı ömürlü çekirdeklerin torunlarıdır [45].

Toplamda evrende 3 doğal 1 yapay olmak üzere 4 radyoaktif seri vardır. Doğal seriler; Uranyum, Toryum ve aktinyum serileri, yapay seri Neptinyum serisidir.

Atom numarası 81 ile 92 arasındaki çekirdekler radyoaktiftir ve bu tür çekirdekler seri oluştururlar.

Tablo 2.1: Radyoaktif Seriler ve Özellikleri [46].

Seri Adı		Ana Çekirdek	Son (Kararlı) Çekirdek	Ana Çekirdeğin Yarı Ömrü	Doğada Mevcut
Uranyum	$4n + 2$	$^{238}_{92}\text{U}$	$^{206}_{82}\text{Pb}$	$4,468 \times 10^9$	Evet
Toryum	$4n$	$^{232}_{90}\text{Th}$	$^{208}_{82}\text{Pb}$	$1,405 \times 10^{10}$	Evet
Aktinyum	$4n + 3$	$^{235}_{92}\text{U}$	$^{207}_{82}\text{Pb}$	$7,038 \times 10^8$	Evet
Neptinyum	$4n + 1$	$^{237}_{93}\text{Np}$	$^{209}_{83}\text{Pb}$	$2,14 \times 10^6$	Hayır

2.5.1. Doğal Seriler

Doğada bulunan tüm ağır elementler ($Z > 83$), radyoaktiftir ve alfa ya da beta bozunumu yaparlar. En ağır elementler, ardışık radyoaktif ürün çekirdeklere dönüşerek, kararlı hale gelene kadar radyoaktif serileri oluşturur. Doğal olarak oluşan ağır radyoaktif çekirdeklerin hepsinin üç seriden birine ait olduğu bulunmuştur [47].

Uranyum, toryum ve aktinyum serileri doğal serileri oluşturur.

Atomik kütle sayısı sadece dört birim ile değişebileceğinden, verilen bir çekirdek kütle numarası dörde bölünürken elde edilen geri kalan kısmına göre bir seriye veya diğerine ait olarak kolayca tanımlanabilir [47].

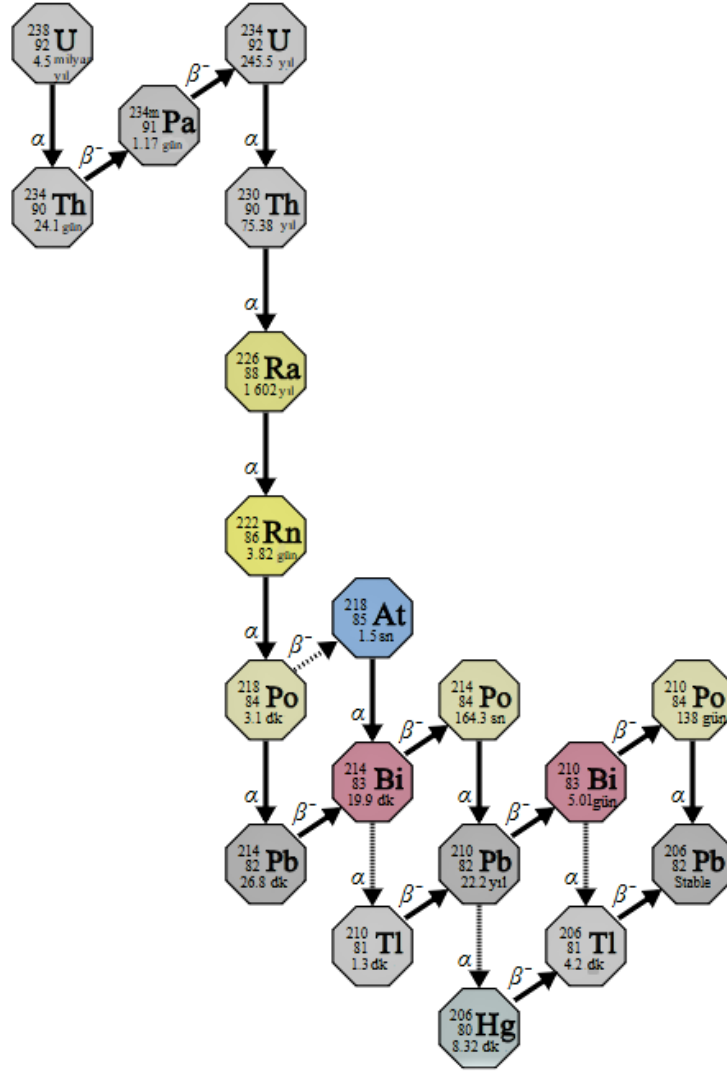
Doğal seride yer alan her bir izotopun kütle numarası n bir tam sayı olmak üzere; toryum serisi $4n$, uranyum serisi $4n+2$ ve aktinyum serisi $4n+3$ ile orantılı olacak şekilde tanımlanabilir

Uranyum, toryum ve aktinyum serilerinin her biri radonun bir ara gazlı izotopuna sahiptir ve kararlı bir kurşun izotopu ile sonlanmaktadır [47].

2.5.1.1. Uranyum Serisi

Radyoaktif bir element olan Uranyumun atom numarası 92 ve atom ağırlığı 238,09'dur. Kendiliğinden doğada mevcut olan ^{238}U serinin ana izotopudur. Uranyum serisi temel olarak 14 tane ürün radyoaktif çekirdek içerir ve bu ürün çekirdeklerin 8 tanesi alfa bozunumu, 6 tanesi beta bozunumu yapmaktadır [3]. Ürün çekirdekler uyarılmış durumda iken gama radyasyonunda yayınlanmaktadır.

^{238}U 'in $4n + 2$ zinciri uranyum serisi olarak adlandırılırken bazı yerlerde de radyum serisi olarak adlandırılır. Astatin, Bizmut, Kurşun, Polonyum, Protaktinyum, Radium, Radon, Talyum Ve Toryum elementlerini içeren Uranyum serisi ^{206}Pb elementi ile sonlanmaktadır [30].



Şekil 2.19: Uranyum Serisi [48].

Tablo 2.2: Uranyum Serisi Özellikleri [49].

Çekirdek	Bozunma modu	Yarı Ömrü ($t_{1/2}$)	Yayınlanan Parçacık Enerjisi (MeV)	Ürün Çekirdek
^{238}U	α	$4,468 \times 10^9$ y	4,270	^{234}Th
^{234}Th	β^-	24,10 g	0,273	^{234}Pa
^{234}Pa	β^-	6,70 s	2,197	^{234}U
^{234}U	α γ	245500 y	4,859 0,053 (%0,123)	^{230}Th
^{230}Th	α γ	75380 y	4,770 0,067 (%0,373)	^{226}Ra
^{226}Ra	α γ	1602 y	4,871 0,186 (%3,50)	^{222}Rn
^{222}Rn	α γ	3,8235 g	5,590 0,510 (%0,076)	^{218}Po
^{218}Po	α β^-	3,10 dk	6,115 (%99,98) 0,265(%0,02)	^{214}Pb ^{218}At

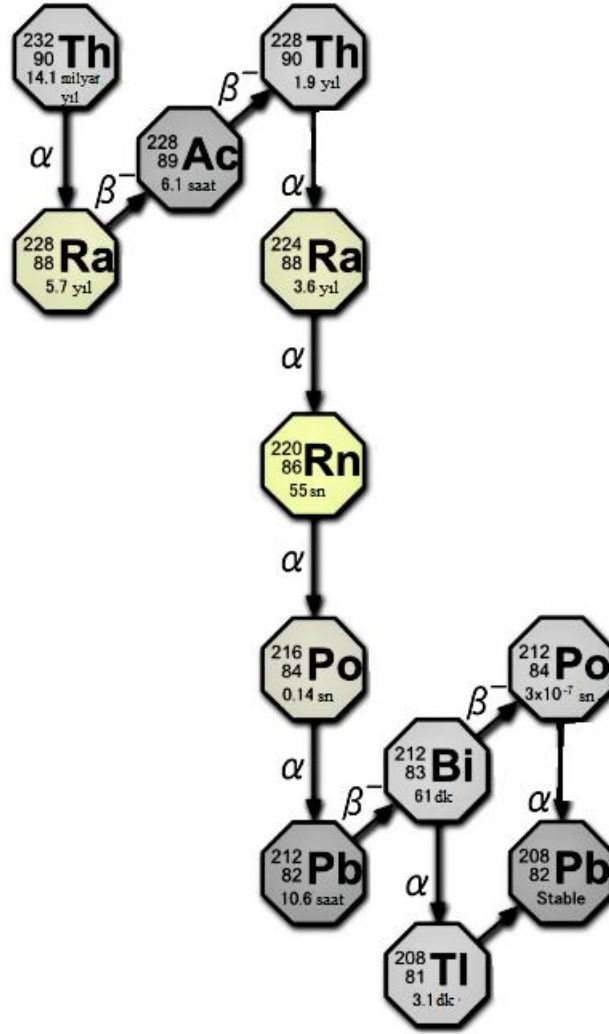
Tablo 2.3 devamı: Uranyum Serisi Özellikleri [49].

Çekirdek	Bozunma modu	Yarı Ömrü ($t_{1/2}$)	Yayınlanan Parçacık Enerjisi (MeV)	Ürün Çekirdek
^{218}At	α β^-	1,5 sn	6,874 (%99,90) 2,883 (% 0,10)	^{214}Bi ^{218}Rn
^{218}Rn	α	35 m.sn	7,263	^{214}Po
^{214}Pb	β^- γ	26,8 dk	1,024 0,053 (%1,1) 0,242 (%7,46) 0,295 (%19,2) 0,351 (%37,1) 0,785 (%1,09)	^{214}Bi
^{214}Bi	β^- α γ	19,9 dk	3,272 (%99,98) 5,617 (%0,02) 0,609 (%46,1) 0,768 (%4,89) 0,806 (%1,23) 0,934 (%3,16) 1,120 (%15,0) 1,238 (%5,92) 1,377 (%4,02) 1,408 (%2,48) 1,509 (%2,19) 1,764 (%15,9)	^{214}Po ^{210}Tl
^{214}Po	α γ	0,1643 m.sn	7,883 0,799 (%0,014)	^{210}Pb
^{210}Tl	β^- γ	1,30 dk	5,484 0,296 (%80) 0,795 (%100) 1,310 (%21)	^{210}Pb
^{210}Pb	β^- γ	22,3 y	0,064 0,046 (%4,05)	^{210}Bi
^{210}Bi	β^- α	5,013 g	1,426(%99,99987) 5,982 (%0,00013)	^{210}Po ^{206}Tl
^{210}Po	α γ	138,376 g	5,407 0,803(%0,0011)	^{206}Pb
^{206}Tl	β^-	4,199 dk	1,533	^{206}Pb
^{206}Pb	-	Kararlı	-	-

2.5.1.2. Toryum Serisi

Doğal toryumun sadece tek izotopu ^{232}Th bulunmaktadır ve yarı ömrü 1.39×10^{10} yıl, spesifik aktivitesi 4.1 Bq/mg'dır [3].

^{232}Th 'nin 4n zinciri Toryum serisi olarak adlandırılır ve serinin ana izotopu kendiliğinden doğada mevcut olan ^{232}Th elementidir. Aktinyum, Bizmut, Kurşun, Polonyum, Radyum ve Radon elementlerini içeren Toryum serisi kararlı haldeki ^{208}Pb elementi ile sonlanmaktadır [30]. Bazı çekirdekler gama ışını da yayınlamaktadır.



Şekil 2.20: Toryum Serisi [50].

Tablo 2.4: Toryum Serisi Özellikleri [49].

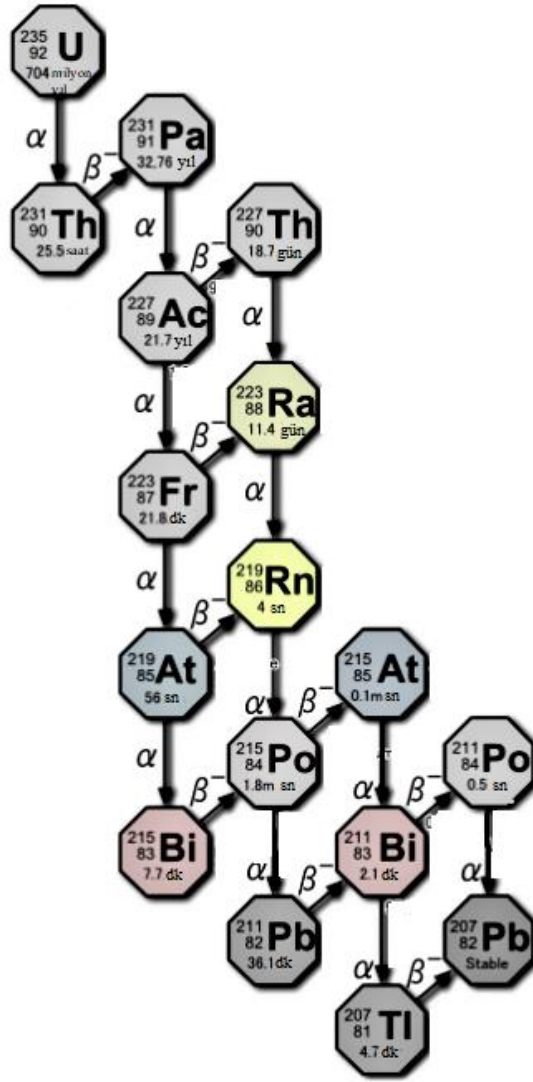
Çekirdek	Bozunma modu	Yarı Ömrü ($t_{1/2}$)	Yayınlanan Parçacık Enerjisi (MeV)	Ürün Çekirdek
^{252}Cf	α	2,645 y	6,1181	^{248}Cm
^{248}Cm	α	$3,4 \times 10^5$ y	6,260	^{244}Pu
^{244}Pu	α	8×10^7 y	4,589	^{240}U
^{240}U	β^-	14,1 s	0,39	^{240}Np
^{240}Np	β^-	1,32 s	2,2	^{240}Pu
^{240}Pu	α	6561 y	5,1683	^{236}U
^{236}U	α	$2,3 \times 10^7$ y	4,494	^{232}Th
^{232}Th	α γ	$1,405 \times 10^{10}$ y	4,081 63,8 (%0,267)	^{228}Ra
^{228}R	β^-	5,75 y	0,046	^{228}Ac

Tablo 2.5 devamı: Toryum Serisi Özellikleri [49].

Çekirdek	Bozunma modu	Yarı Ömrü (t1/2)	Yayınlanan Parçacık Enerjisi (MeV)	Ürün Çekirdek
²²⁸ Ac	β^- γ	6,25 s	2,124 57,7 (%0,487) 99,5 (%1,28) 129,0 (%2,42) 154,0 (%0,737) 209,3 (%3,88) 270,2 (%3,43) 328,0 (%2,95) 338,3 (%11,3) 409,5 (%1,94) 463,0 (%4,44) 772 (%1,50) 794,9 (%4,36) 835,7 (%1,61) 911,2 (%26,6) 964,8 (5,11%) 969,0 (%16,2) 1588,2 (%3,27)	²²⁸ Th
²²⁸ Th	α γ	1,9116 y	5,520 84,4 (%1,22)	²²⁴ Ra
²²⁴ Ra	α γ	3,6319 g	5,789 241,0 (%3,97)	²²⁰ Rn
²²⁰ Rn	α γ	55,6 sn	6,404 550 (%0,07)	²¹⁶ Po
²¹⁶ Po	α	0,145 sn	6,906	²¹² Pb
²¹² Pb	β^- γ	10,64 s	0,570 238,6 (%43,6) 300 (%3,34)	²¹² Bi
²¹² Bi	β^- α γ	60,55 dk	2,252 (%64,06) 6,208 (%35,94) 39,9 (%1,1) 727,3 (%6,65)	²¹² Po ²⁰⁸ Tl
²¹² Po	α	299 n.sn	8,955	²⁰⁸ Pb
²⁰⁸ Tl	β^-	3,053 dk	4,999 277,4 (%6,31) 510,77 (%22,6) 583,2 (%84,5) 763,1 (%1,81) 860,6 (%12,4)	²⁰⁸ Pb
²⁰⁸ Pb	Kararlı		-	-

2.5.1.3. Aktinyum Serisi

²³⁵U'in 4n +3 zinciri aktinyum serisi olarak isimlendirilir ve doğada kendiliğinden mevcut olan ²³⁵U elementi ile başlamaktadır. Aktinyum, Astatin, Bizmut, Fransiyum, Kurşun, Polonyum, Protaktinyum, Radyum, Talyum ve Toryum elementlerini içeren toryum serisi ²⁰⁷Pb elementi ile sonlanır [30].



Şekil 2.21: Aktinyum Serisi [51].

Tablo 2.6: Aktinyum Serisi Özellikleri [49].

Çekirdek	Bozunma modu	Yarı Ömrü ($t_{1/2}$)	Yayınlanan Parçacık Enerjisi (MeV)	Ürün Çekirdek
^{239}Pu	α	$2,41 \times 10^4$ y	5,244	^{235}U
^{235}U	α γ	$7,04 \times 10^8$ y	4,678 0,1438(%10,96) 0,16333(%5,08) 0,1857(%57,2) 0,2053(%5,01)	^{231}Th
^{231}Th	β^- γ	25,52 s	0,391 0,2564(%14,6) 0,842(%6,71)	^{231}Pa
^{231}Pa	α γ	32760 y	5,150 0,274(%11,1) 0,300(%2,41) 0,3027(%2,47)	^{227}Ac

Tablo 2.7 devamı: Aktinyum Serisi Özellikleri [49].

Çekirdek	Bozunma modu	Yarı Ömrü ($t_{1/2}$)	Yayınlanan Parçacık Enerjisi (MeV)	Ürün Çekirdek
^{227}Ac	β^- α γ	21,772 y	0,045 (%98,62) 0,42 (%1,38) 0,070(%0,08)	^{227}Th ^{223}Fr
^{227}Th	α γ	18,68 g	6,147 0,501 (%8,5) 0,236 (%11,2) 0,2563 (%6,8) 0,300 (%2,0) 0,3299 (%2,75)	^{223}Ra
^{223}Fr	β^- γ	22,00 dk	1,149 0,0501 (%36) 0,0797 (%9,1) 0,2348 (%3)	^{223}Ra
^{223}Ra	α γ	11,43 g	5,979 0,144 (%3,26) 0,154 (%5,59) 0,158 (%0,69) 0,269 (%13,6) 0,323 (%3,90) 0,338 (%2,78)	^{219}Rn
^{219}Rn	α γ	3,96 sn	6,946 0,271 (%9,9) 0,401 (%6,64)	^{215}Po
^{215}Po	α β^-	1,781 m.sn	7,527 (%99,99977) 0,715 (%0,00023)	^{211}Pb ^{215}At
^{215}At	α	0,1 m.sn	8,178	^{211}Bi
^{211}Pb	β^- γ	36,1 dk	1,367 0,404 (%3,83) 0,427 (%1,72) 0,832 (%3,81)	^{211}Bi
^{211}Bi	α β^- γ	2,14 dk	6,751 (%99,724) 0,575 (%0,276) 0,351 (%12,8)	^{207}Tl ^{211}Po
^{211}Po	α γ	516 m.sn	7,595 0,569 (%0,0016) 0,897 (%0,26)	^{207}Pb
^{207}Tl	β^- γ	4,77 dk	1,418 0,897 (%0,16)	^{207}Pb
^{207}Pb		Kararlı	-	-

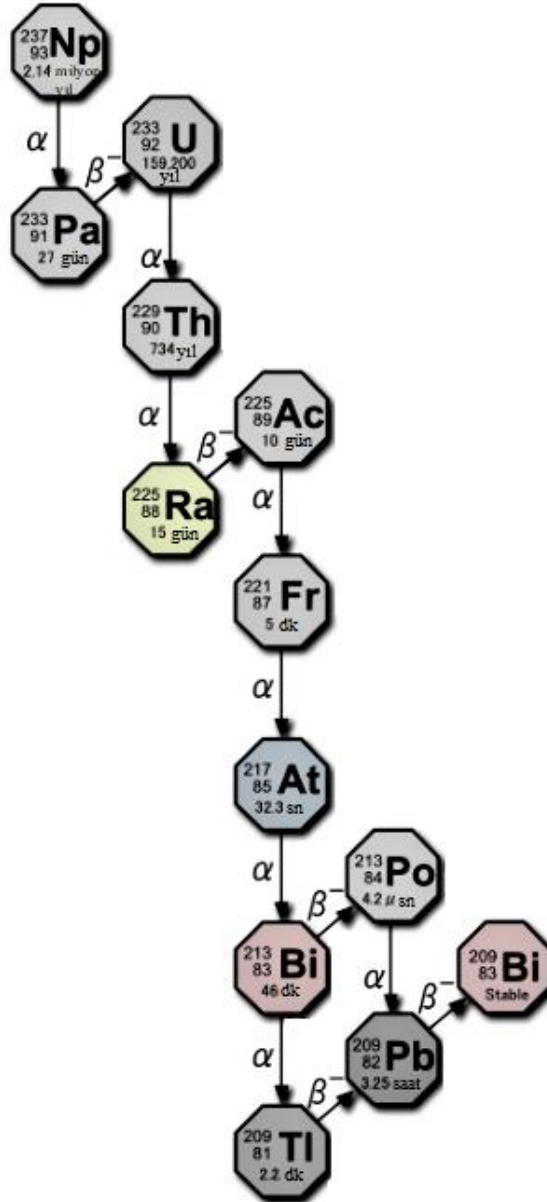
2.5.2. Yapay Seriler

Yapay serileri doğada kendiliğinden var olmayan, yapay yolla elde edilen Neptünyum radyoaktif kaynağı ve bozunma ürünleri oluşturmaktadır. Başlangıç izotopu ^{237}Np 'dir ve yarı ömrü sadece 2,1 milyon yıl olduğu için hâlihazırda doğada tükenmiştir

Doğal serilerin aksine neptünyum serisinde gaz halinde ürün yoktur ve kararlı son ürünü kurşun izotopu yerine ^{209}Bi 'dir [47].

2.5.2.1. Neptinyum Serisi

^{237}Np 'nin $4n+1$ zinciri Neptinyum serisi olarak adlandırılır ve ^{237}Np elementi ile başlamaktadır. Neptinyum serisinde Bizmut ve Talyum elementleri dışında element doğada bulunmamaktadır. Aktinyum, Astatin, Bizmut, Fransiyum, Kurşun, Protaktinyum, Radyum, Talyum, Toryum ve Uranyum elementlerini içeren seri ^{209}Bi elementi ile sonlanır [30].



Şekil 2.22: Neptinyum Serisi [52].

Tablo 2.8: Neptinyum Serisi Özellikleri [49].

Çekirdek	Bozunma modu	Yarı Ömrü ($t_{1/2}$)	Yayınlanan Parçacık Enerjisi (MeV)	Ürün Çekirdek
²⁴⁹ Cf	α	351 y	5,813+0,388	⁴⁵ Cm
²⁴⁵ Cm	α	8500 y	5,362+0,175	²⁴¹ Pu
²⁴¹ Pu	β^-	14,4 y	0,021	²⁴¹ Am
²⁴¹ Am	α	432,7 y	5,638	²³⁷ Np
²³⁷ Np	α	$2,14 \cdot 10^6$ y	4,959	²³³ Pa
²³³ Pa	β^-	27,0 g	0,571	²³³ U
²³³ U	α	$1,592 \cdot 10^5$ y	4,909	²²⁹ Th
²²⁹ Th	α	$7,34 \cdot 10^4$ y	5,168	²²⁵ Ra
²²⁵ Ra	β^-	14,9 g	0,36	²²⁵ Ac
²²⁵ Ac	α	10,0 g	5,935	²²¹ Fr
²²¹ Fr	α	4,8 dk	6,3	²¹⁷ At
²¹⁷ At	α	32 m.sn	7,0	²¹³ Bi
²¹³ Bi	α	46,5 dk	5,87	²⁰⁹ Tl
²⁰⁹ Tl	β^-	2,2 dk	3,99	²⁰⁹ Pb
²⁰⁹ Pb	β^-	3,25 s	0,644	²⁰⁹ Bi
²⁰⁹ Bi	α	$1,9 \cdot 10^{19}$ y	3,14	²⁰⁵ Tl
²⁰⁵ Tl	-	Kararlı	-	-

2.6. GAMA SPEKTROSKOPİ SİSTEMLERİ VE ÇALIŞMA PRENSİPLERİ

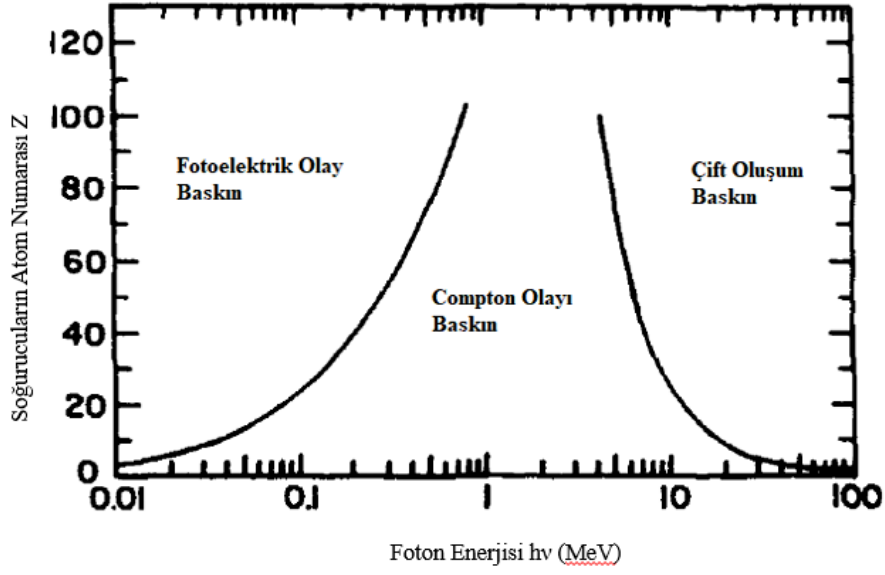
2.6.1. Gama Işınlarnın Madde ile Etkileşimi

Gama ışınları fotonlardan meydana gelmektedir. Gama ışınları yani fotonlar çok kısa dalga boyları ile yüksek enerjili ve yüksek frekanslı elektromanyetik dalgalardır. Bu nedenle elektriksel olarak nötrdür ve elektrik, manyetik alanlar tarafından sapdırılmazlar.

Radyasyon ölçümlerinde gama ışınlarının madde ile etkileşiminde üç temel tip önemli rol almaktadır:

- Fotoelektrik olay
- Compton saçılması
- Çift oluşumu

Bütün bu süreçler, gama ışını foton enerjisinin elektron enerjisine kısmen veya tamamen aktarılmasını sağlamaktadır. Sonuç olarak gama ışınında ani değişimler meydana gelmektedir. Çünkü foton ya tamamen kaybolur ya da belirgin bir açı ile saçılmaktadır [53].



Şekil 2.23: Temel 3 Etkileşimin Baskın Olduğu Bölgeler [54].

Şekil 2.23’de verilen eğriler, iki tür etkileşimin eşit derecede olası olduğu Z ve E_γ değerlerini göstermektedir. Düşük enerjilerde fotoelektrik etkinin baskın olduğu, Compton etkisinin orta enerjilerde devraldığı ve yüksek enerjilerde çift oluşumun baskın olduğu görülmektedir. Z atom numarasının küçük olduğu soğurucular (örneğin, karbon, hava, su, insan dokusu) için Compton baskınlık bölgesi çok geniştir. Bu bölge $\cong 20$ keV’den $\cong 30$ MeV’e kadar yayılmıştır ve Z atom numarasının artması ile giderek daralmaktadır [54].

Denklem 2.27’de verildiği gibi madde ile etkileşiminde gama ışını şiddeti eksponansiyel dağılım göstermektedir.

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (2.27.)$$

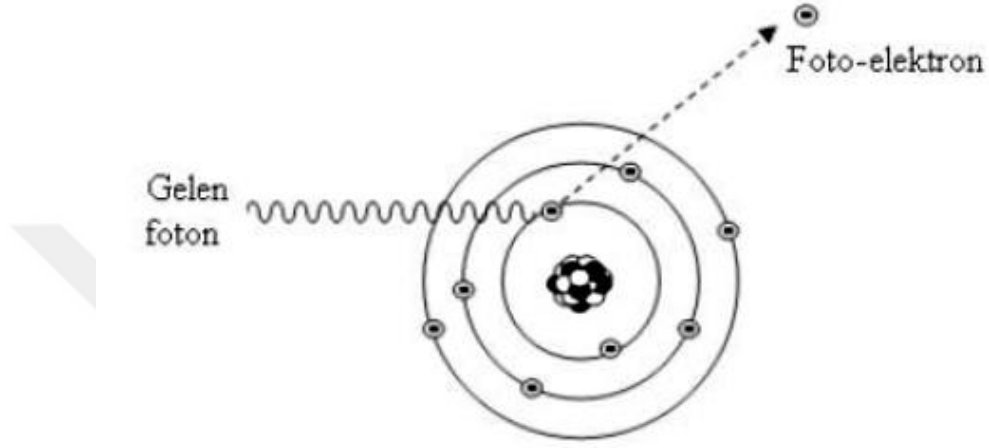
Denklemden I_0 soğurucu maddeye gelen gama ışını şiddeti, I soğurucu maddeden geçen gama ışını şiddeti, x soğurucu madde kalınlığı ve μ lineer soğurma katsayısı olarak tanımlanmaktadır.

$$\mu = \tau + \sigma + \kappa \quad (2.28)$$

μ lineer soğurma katsayısı Denklem 2.28 ile verilmektedir ve denklemde verilen τ , σ , κ sırası ile fotoelektrik soğurma, compton saçılması ve çift oluşumu olma olasılıklarını temsil etmektedir.

2.6.1.1. Fotoelektrik Olay

Bir atom tarafından bir fotonun enerjisi tamamen soğurulabilir. Bu durumda foton enerjisinin tamamını atoma düşük enerji ile bağlı durumdaki elektrona aktarır ve kendisi kaybolur. Elektron serbest bırakılır ve serbest haldeki bu elektron fotoelektron olarak adlandırılır.



Şekil 2.24: Fotoelektrik Olay [1].

Sonuç olarak fotonun enerjisi elektronun atoma bağlanma enerjisine eşittir ya da daha küçüktür. Bu durum Einstein'ın fotoelektrik olay için tanımladığı aşağıdaki denklem ile açıklanmıştır:

$$E_e = h\nu - \phi \quad (2.29)$$

Denklem 2.29'da verilen,

E_e : fotoelektronun enerjisi,

$h\nu$: foton enerjisi,

ϕ : elektronun bağlanma enerjisi veya elektronu atomdan uzaklaştırmak için gereken enerji olarak ifade edilir.

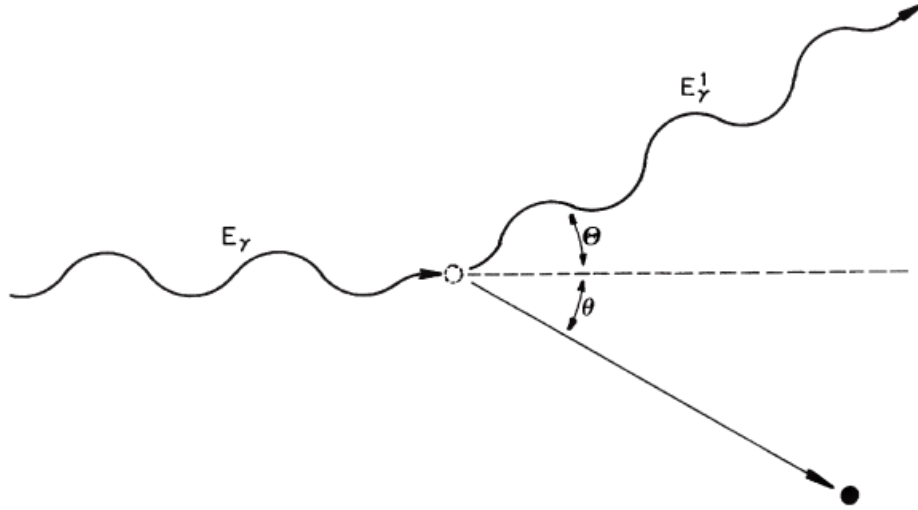
Genellikle fotoelektrik olay düşük enerjili foton ve atom numarası büyük atom arasında görülür. Yani doğrudan etkileşime girdiği malzemenin atom numarası ile bağlantılıdır [18].

Atomun iç yörüngesindeki K veya L kabuğundan bir elektron atıldığında, ortaya çıkan boşluğu dış kabuklardan gelen elektronların doldurması ile karakteristik x-ışınları açığa çıkar [27].

2.6.1.2. Compton Saçılması

Compton saçılması, fotonun atomun dış yörüngesinde bulunan zayıf bağlı veya serbest bir elektron ile esnek çarpışmasıdır.

Fotonun enerjisi elektronun bağlanma enerjisinden önemli ölçüde daha büyüktür. Etkileşimin ardından foton elektronu yörüngesinden koparır ve enerjisinin azalması ile yeni bir yönde devam eder. Compton saçılması, gelen fotonun yaklaşık 100 keV ile 10 MeV arasındaki enerjiye sahip olması durumunda muhtemeldir [4].



Şekil 2.25: Compton Saçılması [27].

Gelen ve saçılan fotonlar arasındaki dalga boyu kaymalarını ve saçılma açılarını açıklayan aşağıdaki Compton denklemini türetilmiştir;

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0c} (1 - \cos \theta) \quad (2.30)$$

Denkleme verilen,

λ' : gelen fotonun dalga boyu,

λ : saçılan fotonun dalga boyu,

h : Planck sabiti,

m_0 : durgun elektron kütlesi,

c : ışık hızı,

Θ : asıl doğrultusunda hareket eden görelî fotonun saçılma açısı

olarak ifade edilir.

Compton formülüne göre dalga boyu kayması, saçılma açısı ile artmıştır.

Elektron ile çarpışmada kaybettiği enerjiden dolayı saçılmaya uğrayan foton gelen fotondan daha uzun dalga boylu (enerjisi daha düşük) olacaktır [27].

Enerji ve momentum korunumu kanunu kullanılarak saçılan fotonun enerjisi Denklem 2.31 ile belirtilmiştir;

$$E_{\gamma'} = \frac{E_{\gamma}}{1 + \left(\frac{E_{\gamma}}{mc^2}\right)(1 - \cos \theta)} \quad (2.31)$$

Burada,

$E_{\gamma'}$: saçılan fotonun enerjisi,

E_{γ} : gelen fotonun enerjisi,

mc^2 : durgun elektronun enerjisi (511 keV ya da 0.511 MeV),

Θ : fotonun saçılma açısı

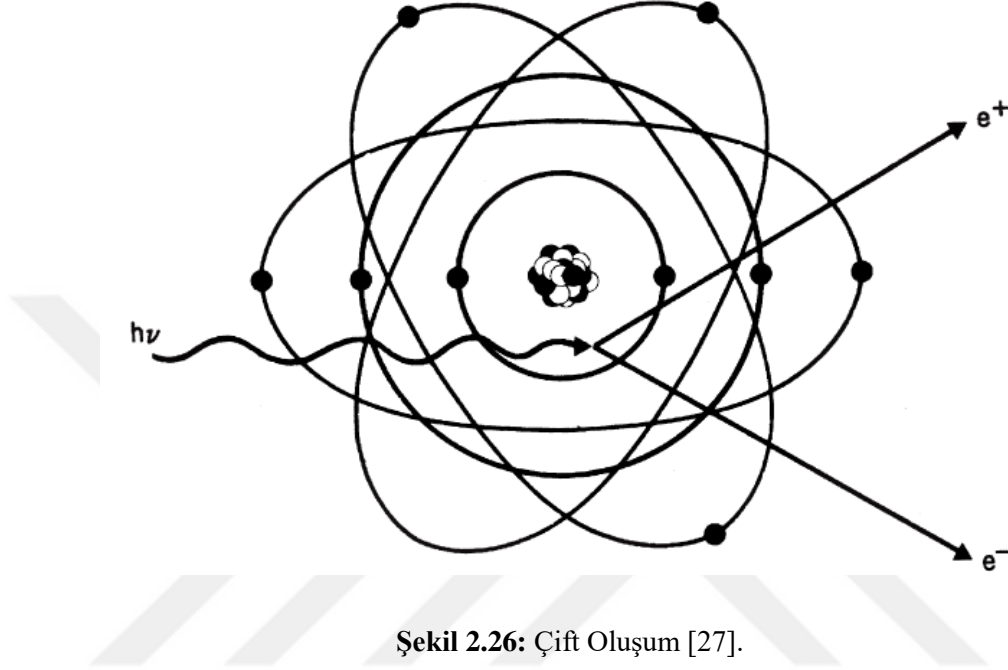
olarak belirtilmiştir.

Saçılan foton, enerjisine göre madde ile etkileşimine Compton saçılması ya da fotoelektrik olay ile devam eder [18].

Compton saçılması etkileşime girdiği atomun atom numarası ve foton enerjisine bağlıdır [18].

2.6.1.3. Çift Oluşumu

Çift oluşumda etkileşim çekirdeğin coulomb alanında gerçekleşir. Bu süreçte gelen foton tüm enerjisini kaybederek gözden kaybolur ve elektron-pozitron çiftine dönüşür.



Şekil 2.26: Çift Oluşum [27].

Elektron ve pozitronun durgun kütleleri 0.511 MeV değerinde olması sebebiyle, çift oluşumun gerçekleşebilmesi için foton enerjisi eşik enerjisi olan 1.02 MeV'in (elektron pozitron kütle değeri ($2m_0c^2$)) üzerinde olmalıdır [3].

Dışarıdan gelen foton enerjisi Denklem 2.32 ile verilmiştir.

$$E_\gamma = T_+ = mc^2 + T_- + mc^2 \quad (2.32)$$

Burada;

E_γ : gelen gama ışınının enerjisi,

mc^2 : elektron ve pozitronun durgun kütle enerjisi,

T_+ : pozitronun kinetik enerjisi,

T_- : elektronun kinetik enerjisi

olarak belirtilmiştir.

2.6.2. Gama Spektroskopisi ve Dedektör Çeşitleri

Gama spektroskopisinde kullanılan dedektörler şu şekildedir;

Sintilasyon Dedektörleri: Sintilasyon dedektörleri, sintilatör maddesi ve fotoçoğaltıcı tüpten oluşmaktadır. Temelde organik ve inorganik materyaller içeren iki tip sintilatör vardır. Alfa parçacıkları için gümüşle aktive edilmiş ZnS kristali, Beta parçacıkları için naftalin ile stilben ve gama ışınları için NaI kristali kullanılmaktadır [55].

Işığın görünür bölgede olmasını sağlamak ve foton yayınlanma olasılığını arttırması amacıyla Sintilatöre aktivatör madde eklenmektedir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan inorganik sintilatör Talyumla aktive edilmiş NaI'dür. NaI dedektörlerinin verimi yüksek ancak enerji çözme gücü düşüktür [2].

Yarıiletken Dedektörler: Yarıiletken dedektörler Silisyum (Si) ve Germanyum(Ge) gibi yarı iletken maddelerden yapılmaktadır ve en yaygın kullanılan yarıiletken detektörler Lityum katkılı Ge(Li) ve Si(Li) detektörleridir [55, 2].

Ge dedektörlerinin verimi düşük ancak enerji çözme gücü yüksektir [2].

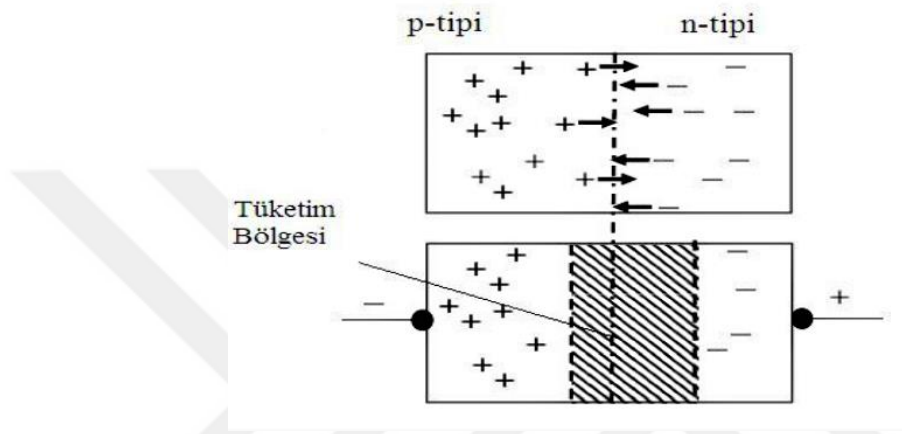
2.6.3. HPGe Dedektörü ve Çalışma Prensibi

Gama ışınlarının ölçümünde genellikle yarı iletken dedektörler kullanılır. HPGe dedektörü de yarı iletken bir detektördür. Yarı iletken dedektörler yük taşıyıcılarına göre n tipi ve p tipi olmak üzere 2 şekilde gruplandırılırlar. n tipi yarı iletkenler yük taşıyıcıları elektron ve p tipi yarı iletkenler ise yük taşıyıcıları boşluk olanlardır.

Bir kısım elektron "deşik" adı verilen bir boşluk bırakarak değerlik bandından iletim bandına geçer. Boşluk komşu elektronlardan biriyle dolar ve bu da yeni bir boşluk meydana getirir. Bu durum meydana gelen boşlukların kristal içinde hareket ediyor gibi görünmesini sağlar. Pozitif yüklü atomlar aslında hareket etmezler [23].

İletimi kontrol edebilmek için bir miktar katkı yarı iletkene eklenir. Ekleme işleminde üç ya da beş değerlikli atomlar örgü içine girerler. Beş değerlikli katkı ilavesinde dört elektron komşu Si veya Ge ile kovalent bağ yaparlar ve beşinci elektron örgü içerisinde hareket ederse n tipi yarı iletken olduğu söylenir. Bu durumlar tam olarak iletim bandının hemen altındadır. Üç değerlikli katkı ilavesinde ise üç elektron kovalent bağ yapar bir boşluk kalırsa p tipi yarı iletken olduğu söylenir. Bunlar değerlik bandının hemen üstündedir [23].

p tipi ve n tipi yarı iletkenlerin birbiriyle temas ettirilmesi durumunda, n tipinden çıkan elektronlar p tipine yayılarak buradaki boşluklarla birleşir. Nötr hale geldikleri bölgeye “tükenme bölgesi” denir. Tükenme bölgesine radyasyon girerek elektron boşluk çiftleri meydana getirir. Voltaj uygulandığında elektron-boşluk çiftlerinin sürüklenmesine sebep olur, elektron ve boşluklar farklı yönlerde hareket eder. Böylece sayılabilen bir puls oluşur ve oluşan puls’un genliği radyasyonun enerjisi ile orantılıdır [23].



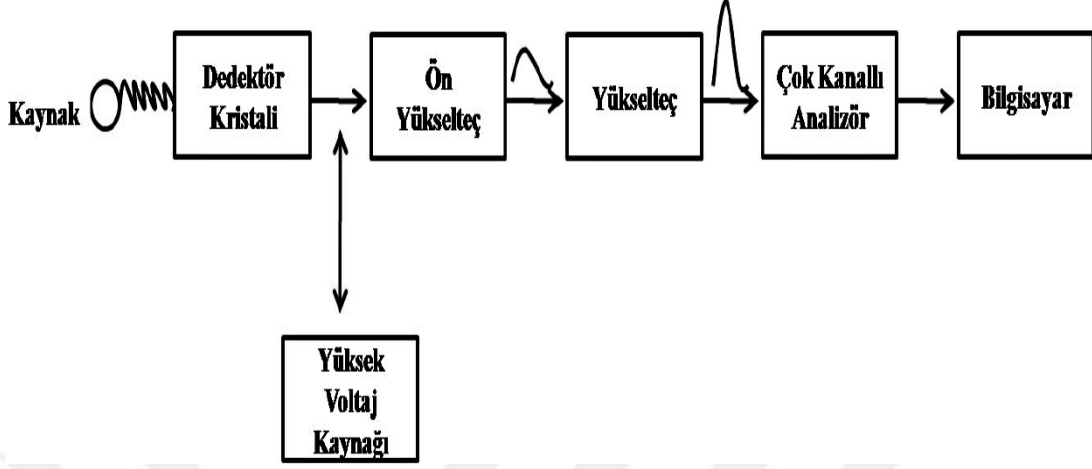
Şekil 2.27: Yarı İletken Dedektör Şeması [2].

Ge(Li) ve Si(Li) en yaygın yarı iletken dedektörlerdir.

Yüksek dedektör verimi için derin tükenme bölgesi elde etmek gerekir ve bunun içinde oldukça saf madde kullanılmalıdır. En iyi örnek çok saf germanyum (Hyper-pure Germanium) dedektörleridir [2].

Bu dedektörlerin avantajlı yönleri safsızlığının az olması, yüksek dirençli ve yüksek çözünürlüklü olması iken sıvı azot sıcaklığında düşük verime sahip olması dezavantajlı kısımdır [2].

Gama Spektroskopi Sisteminin Elektroniği



Şekil 2.28: Gama Spektroskopi Sisteminin Elektroniği [2].

Dedektör kristaline gelen gama ışını dedektör materyali ile etkileşerek enerjisini dedektör kristalinin atomlarına bırakarak kaybeder. Böylece dedektör kristalindeki atom yörüngelerinden gama ışınından daha düşük enerjiye sahip elektronların salınmasına sebep olur. Yüksek bir voltaj uygulanması ile oluşan elektrik alan sayesinde yüksek voltaj kaynağı oluşan yükleri toplayarak elektrik pulsu oluşturur. Oluşan yük pulslarını ön yükselteç voltaj pulsuna dönüştürür. Ön yükselteçte mili volt mertebesindeki pulslar yükselteç ile birkaç volt mertebesine çıkartılır. Yükseltecten gelen analog pulslar çok kanallı analizör MCA/ADC ile dijital hale çevrilir ve puls genliğine göre hafıza kanallarında depolanır. Her bir kanal belli bir enerjiye karşılık gelir ve böylece pulsların birikmesi ile spektrum gözlenir. Spektrum analiz için bilgisayara aktarılır [2,23].

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. ÖRNEK TEMİNİ VE HAZIRLAMA İŞLEMİ

Bu tez çalışması için Türkiye'nin çeşitli illerinde yetiştirilen 37 adet farklı gıda numunesi tüketime hazır şekilde 28 Haziran 2017 ve 15 Kasım 2017 tarihleri arasında marketlerden ve yerel bölgelerden temin edilmiştir.

Gıda numunelerinin bazıları Şekil 3.1 ile gösterilmiştir.



Şekil 3.1: Gıda örnekleri.

Seçilen gıda numuneleri ve bu gıdaların yetiştirildiği iller Tablo 3.1’de gösterilmiştir.

Tablo 3.1: Gıdaların Yetiştigi İller ve Ürün Türlerine Göre Gruplandırılması.

Tür	Gıda Numunesi	Yetiştirildiği İl
Hububat Ürünleri	Yulaf	Ankara
	Buğday	Konya
	Yarma	Tekirdağ
	Mısır	Osmaniye
	Pirinç	Balıkesir
Un	Tam Buğday Unu	Konya
	Beyaz Un	Sivas
	Mısır Unu	Trabzon
Unlu Mamüller	Makarna	Gaziantep
	Şehriye	Sakarya
Bakliyat	Kuru Fasulye	Erzincan
	Kuru Fasulye	Yozgat
	Kırmızı Mercimek	Şanlıurfa
	Yeşil Mercimek	Çorum
	Nohut	Karaman
	Barbunya	İzmir
	Maş Fasulye	Adıyaman
Sebze	Patlıcan	Kilis
	Biber	Kilis
	Karalahana	Samsun
	Asma Yaprağı	Kırlareli
Meyve	Elma	Ardahan
	Erik	Muş
	Armut	Muş

Tablo 3.2 devamı: Gıdaların Yetiştirildiği İller ve Ürün Türlerine Göre Gruplandırılması.

Tür	Gıda Numunesi	Yetiştirildiği İl
Baharat	Kekik	Adana
	Kekik	Yalova
	Nane	Hatay
	Pulbiber	Kahramanmaraş
	Pulbiber	Şanlıurfa
	Biberiye	Kırklareli
Tuz	Sofra Tuzu	İzmir
	Kaya Tuzu	Çankırı
	Limon Tuzu	Kars
	Köy Tuzu	Erzurum
Kuruyemiş	Fındık	Giresun
	Fıstık	Aydın
	Leblebi	Kütahya

37 farklı gıda numunesinin Türkiye’de yetiştirildiği iller Şekil 3.2’de harita üzerinde belirtilmiştir.



Şekil 3.2: Gıda Örneklerinin Yetiştirildiği İller.

Gıda numunelerinden asma yaprağı, karalahana, elma kuruşu, erik kuruşu, armut kuruşu patlıcan kuruşu ve biber kuruşu bir bıçak yardımıyla küçük parçalara bölünecek şekilde ayrılmış, nemini atması için nemli olmayan bir ortamda serilerek yaklaşık 5 gün bekletilmiştir.



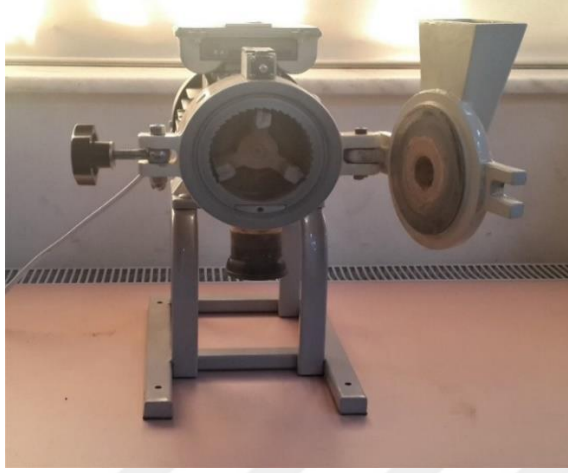
şekil 3.3: Gıda Örneklerinin Kurutulması.

Daha sonra şekil 3.4' de gösterilen fırında gıdalara göre yaklaşık 10-16 saat arasında tamamen kurutulmuştur.



şekil 3.4: Kullanılan Fırın.

Fırında kurutulan gıda numuneleri ile marketten alınan diğer gıda numunelerinin hepsi Şekil 3.5’de gösterilen öğütücü yardımıyla öğütülmüş ve toz haline getirilmiştir.



Şekil 3.5: Kullanılan Öğütücü.

Homojen vaziyete getirilen numuneler darası alınmış 500 Mililitrelik Marinelli Beaker kap geometrisine sahip kaplara koyulmuştur ve kapların hava almaması için kapakları sıkıca kapatılmıştır. Her bir numunenin kütlesi yaklaşık olarak 250 ile 500 gr arasında bir değere sahiptir. Kap üzerine örnek adı, örnek numarası, paketleme tarihi ve ölçüm tarihi not edilerek muhafaza edilmiştir. Marinelli Beaker kaplarda hazırlanan gıda numuneleri 30 gün boyunca içindeki bozunma ürünlerinin radyoaktif dengeye ulaşması için bekletilmiştir. Bekleme süresinin sonunda ölçüme hazır olan numuneler HPGe dedektörü kullanılarak 28800 saniyelik süreler ile ölçüm alınmıştır.



Şekil 3.6: Paketlenen Marinelli Beaker Kaplar.

3.2. DENEYSEL İŞLEMLER

3.2.1. Analizde Kullanılan Dedektör Sistemi

Hazırlanan gıda numunelerinin analiz işlemleri, İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi Nükleer Fizik Anabilim Dalı Nükleer Fizik Gama Spektroskopi Laboratuvarı'nda yapılmıştır.



Şekil 3.7: İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi Nükleer Fizik Anabilim Dalı Nükleer Fizik Gama Spektroskopi Laboratuvarı'nda bulunan dedektör sistemi.

Tez çalışmasında kullanılan gıda örneklerindeki radyoaktif çekirdeklerin aktivite konsantrasyonunu ölçmek için kullanılan dedektörün özellikleri aşağıdaki Tablo 3.2 ile gösterilmiştir.

Tablo 3.3: Dedektör Özellikleri [2].

Dedektör Modeli	ORTEC GEM35P4-70
Verim	%35 (1.33 MeV, ⁶⁰ Co için)
Pik / Compton Oranı	62 / 1 (⁶⁰ Co için)
Çözünürlük (FWHM)	1.85 keV (1.33 MeV, ⁶⁰ Co için)
Çözünürlük (FWHM)	935 eV (122 keV, ⁵⁷ Co için)

3.2.2. Enerji ve Verim Kalibrasyonu

Gama spektroskopisi ile ölçümü yapılan numuneden elde edilen spektrumda belli enerjilerde pikler gözlenmektedir. Enerji ve verim kalibrasyonu yapılarak bu piklerin hangi radyoaktif çekirdeklere ait olduğu belirlenebilmektedir.

Kullandığımız HPGe dedektörünün kalibrasyon işlemi, 19 Aralık 2016 tarihinde 500 ml marinelli beaker kap hacminde farklı enerjilerde gama radyasyonu yayınlayan karışık kaynak(Mixed Source) kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 3.8: Karışık Kaynak (Mixed Source).

Tablo 3.3 ile karışık toprak standartının özellikleri verilmiştir.

Tablo 3.4: Karışık Kaynak Standartının Özellikleri.

Gama Işını Enerjisi(keV)	Çekirdek	Aktivite (Bq)	Bozunma Oranı (s ⁻¹)
88	Kadmiyum-109	1,35 x 10 ⁴	4,88 x 10 ²
122	Kobalt-57	5,06 x 10 ²	4,33 x 10 ²
166	Seryum-139	5,69 x 10 ²	4,55 x 10 ²
279	Civa-203	8,59 x 10 ²	6,99 x 10 ²
392	Kalay-113	1,96 x 10 ³	1,27 x 10 ³
514	Stronsiyum-85	1,92 x 10 ³	1,89 x 10 ³

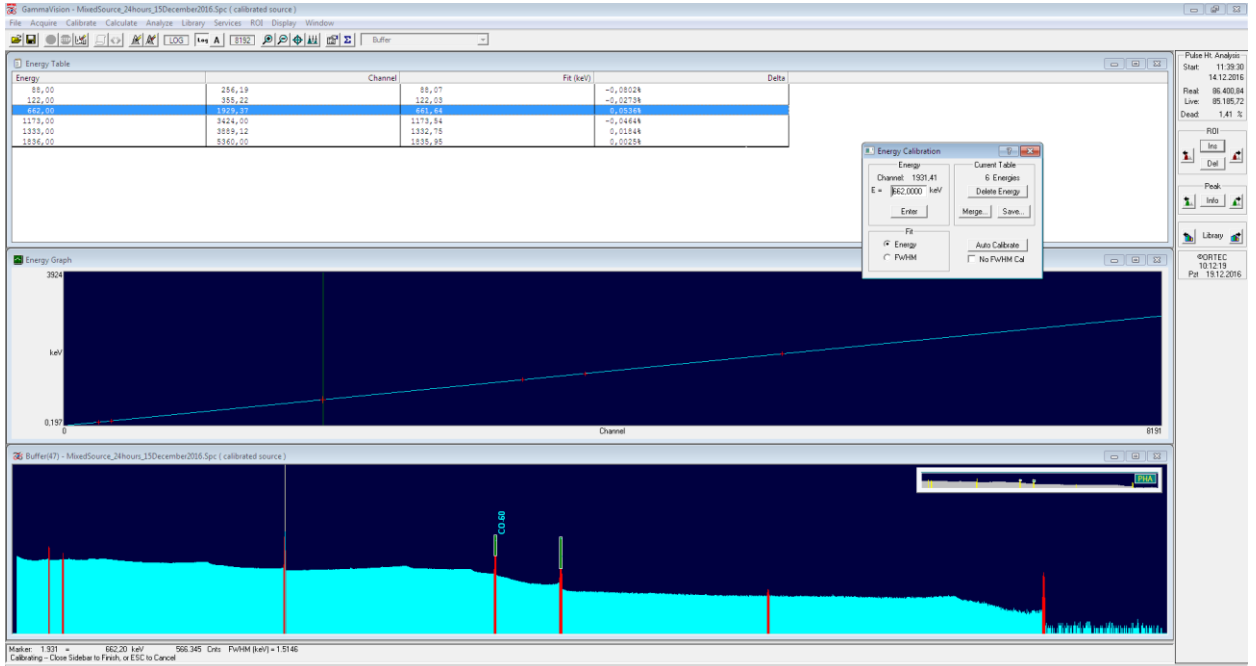
Tablo 3.5 devamı: Karışık Kaynak Standartının Özellikleri.

Gama Işını Enerjisi(keV)	Çekirdek	Aktivite (Bq)	Bozunma Oranı (s ⁻¹)
662	Sezyum-137	2,65 x 10 ³	2,25 x 10 ³
898	Yitriyum-88	4,04 x 10 ³	3,80 x 10 ³
1173	Kobalt-60	3,03 x 10 ³	3,03 x 10 ³
1333	Kobalt-60	3,03 x 10 ³	3,03 x 10 ³
1836	Yitriyum-88	4,04 x 10 ³	4,01 x 10 ³

Kalibrasyonda net pik elde etmek için Mixed Source ile 86400 saniye ölçüm alınmıştır.

Enerji ve verim kalibrasyonu işlemi 88 keV, 122 keV, 662 keV, 1173 keV, 1333 keV ve 1836 keV enerji değerlerinde bulunan Kadmiyum- 109, Kobalt-57, Sezyum-137, Kobalt-60 ve Yitriyum-88 radyoaktif çekirdekleri ile yapılmıştır.

Kullanılan bu enerji değerlerine ait enerji kalibrasyonu için gama radyasyonu pikleri Şekil 3.9'da gösterilmiştir.

**Şekil 3.9:** 86400 saniye için Enerji Kalibrasyonu.

Dedektörde enerji kalibrasyonu yapılarak gama spektroskopisi ile elde edilen spektrumda gözlenen piklere ait kanal numaralarının hangi enerjilere karşılık geldiği belirlenebilmektedir. Bu sebeple enerjilerini bildiğimiz piklere sahip karışık kaynağın(Mixed Source) spektrumunda oluşturduğu piklere bakılarak o enerjideki piklerin hangi kanallara karşılık geldiği belirlenmektedir. Kalibrasyon eğrisinin denklemi piklerdeki enerji değerleri bir fonksiyona fit edilerek belirlenir [2].

Kalibrasyon eğrisinin denklemi Denklem 3.1 ile belirtilmiştir.

$$E = a_1 + (a_2 \times C) + (a_3 \times C^2) \quad (3.1)$$

Burada;

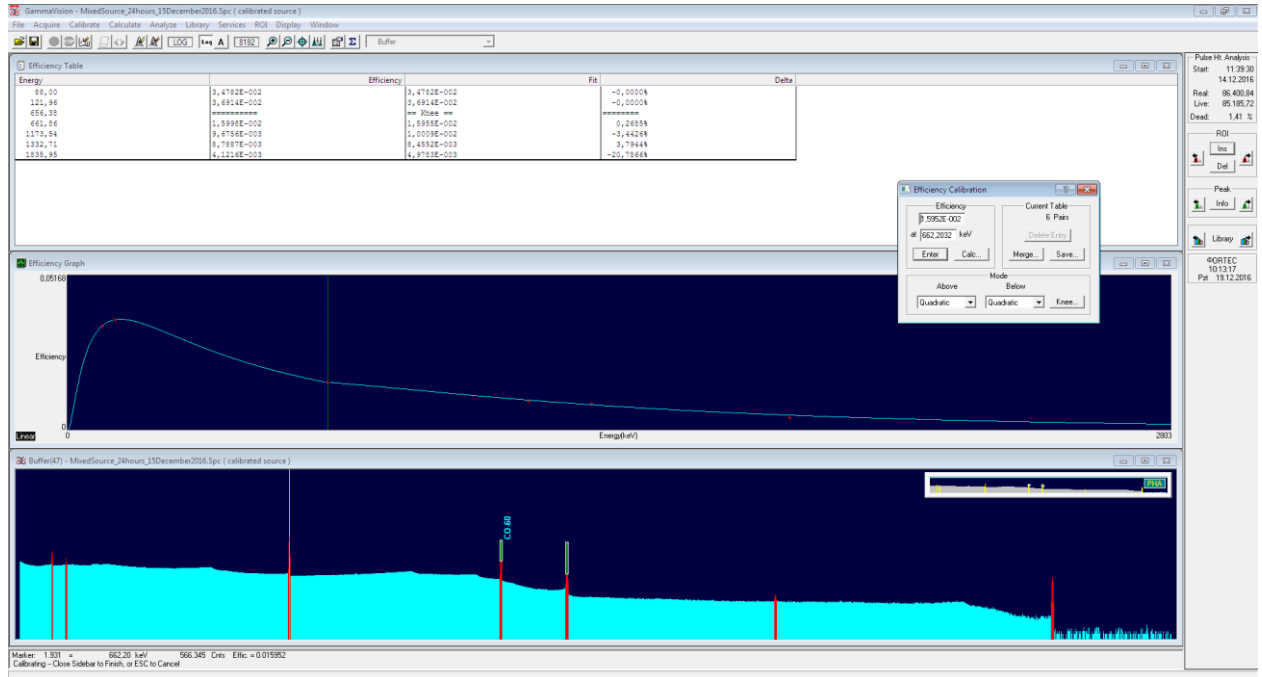
E: İlgilenilen pikinin enerjisi,

C: kanal numarası,

a_i : Fonksiyon katsayıları, $i=1,2,3$

olarak ifade edilmiştir.

Dedektörün verim kalibrasyonu için verim eğrisi ve verim değeri Şekil 3.10'da gösterilmiştir.



Şekil 3.10: 86400 saniye için Verim Kalibrasyonu Eğrisi ve Verim Değeri.

Kaynaktan yayınlanan gama ışınlarının sayısı ile gama spektroskopi sistemi ile belirlenen sayım arasında farklılıklar gözlenmektedir. Verim, dedektör sisteminin kaynaktan yayınlanan ışınların ne kadarını algılayabildiğinin bir ölçüsüdür [2].

Analiz işlemlerinde kullanılan GamaVision programında lineer, polinomal, kuadratik ve interpolative olarak dört tane fit tipi vardır. Verim değerleri kuadratik olarak fit edilmiştir ve verim denklemi Denklem 3.2 ile gösterilmiştir.

$$\varepsilon = e^{(a_1 + a_2 \ln(E) + a_3 (\ln(E))^2)} \quad (3.2)$$

Burada;

ε : E enejisindeki verim değeri,

a_i : Fit katsayıları, $i=1,2,3$

E: enerji

olarak ifade edilmiştir.

3.3. ANALİZ İŞLEMİ

Gıda numunelerinin her biri için HPGe dedektörü ile 28800 saniyelik sayım alınmış ve ölçümlerin analiz aşaması Ortec GammaVision 6.2 programı ile yapılmıştır.

3.3.1. Aktivite Hesabı

Sayım sonucunda elde edilen spektrumda ilgilendiğimiz gama piklerin burada ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K ve ^{137}Cs 'a ait piklerinin aktivite analizleri yapılmıştır. Piklerdeki net sayım background (arka fon) sayımı çıkarılarak hesaplanır.

Aktivite hesabı Denklem 3.3 ile verilmiştir.

$$A = \frac{N}{\varepsilon \times m \times t \times \gamma} \quad (3.3)$$

A: Aktivite (Bq/kg)

N: Net Sayım

ε : İlgilenilen Pik İçin Dedektör Verimi

m: Numune Kütlesi (kg)

t: Ölçüm Süresi (sn)

γ : Gama Bozunma Olasılığı

Bozunma ürünlerine göre radyoaktif bir çekirdeğin birden fazla fotopiki olabilir ve bu durumda pik aktivitelerinin ortalaması alınarak çekirdek aktivitelerinin ağırlıklı ortalaması hesaplanmaktadır [30].

Yani örnek spektrumda da görüldüğü gibi ^{238}U radyoaktif çekirdeğine ait ^{226}Ra , ^{214}Pb ve ^{214}Bi için sırasıyla 186 keV, 352keV ve 609 keV gibi üç farklı enerji değeri, ^{232}Th radyoaktif çekirdeğine ait ^{208}Tl ve ^{228}Ac için sırasıyla 583 keV ve 911keV gibi iki farklı enerji değeri olduğundan ağırlıklı ortalama alınarak aktivite hesabı yapılmaktadır.

Ağırlıklı ortalama hesabı Denklem 3.4 ile verilmiştir.

$$A = \frac{(A_1 \times \gamma_1) + (A_2 \times \gamma_2) + \dots}{\gamma_1 + \gamma_2 + \dots} \quad (3.4)$$

A_1 : 1. çekirdeğin aktivitesi (Bq/kg)

A_2 : 2. çekirdeğin aktivitesi (Bq/kg)

γ_1 : 1. Çekirdeğin bozunma olasılığı

γ_2 : 2. Çekirdeğin bozunma olasılığı

3.3.2. MDA Hesabı

Ölçüm sisteminin belirli koşullar altında ölçebileceği kapasite ölçülebilir en düşük aktivite terimi açıklanabilir [3].

Curie kriterlerine göre belirlenen MDA hesabı Denklem 3.5 ile verilmiştir.

$$MDA = \frac{2,71 + 4,65 \sqrt{\text{Background}}}{\epsilon \times m \times t \times \gamma} \quad (3.5)$$

3.3.3. Yıllık Etkin Doz

Yıllık etkin doz radyoaktif çekirdeklerin vücuda alınması ile insan sağlığı için olası risk değerinin belirlenmesini sağlamaktadır.

UNSCEAR 2000 ve ICRP-119 verilerine göre yetişkin bir birey için yıllık etkin doz hesabı Denklem 3.6 ile verilmiştir.

$$H_{T,r} = \sum(U_i C^r) g_{T,r} \quad (3.6)$$

H : Etkin doz değeri ($\mu\text{Sv/yıl}$)

U_i : Yıllık kişi başı tüketim miktarı (kg)

C^r : Aktivite miktarı (Bq/kg)

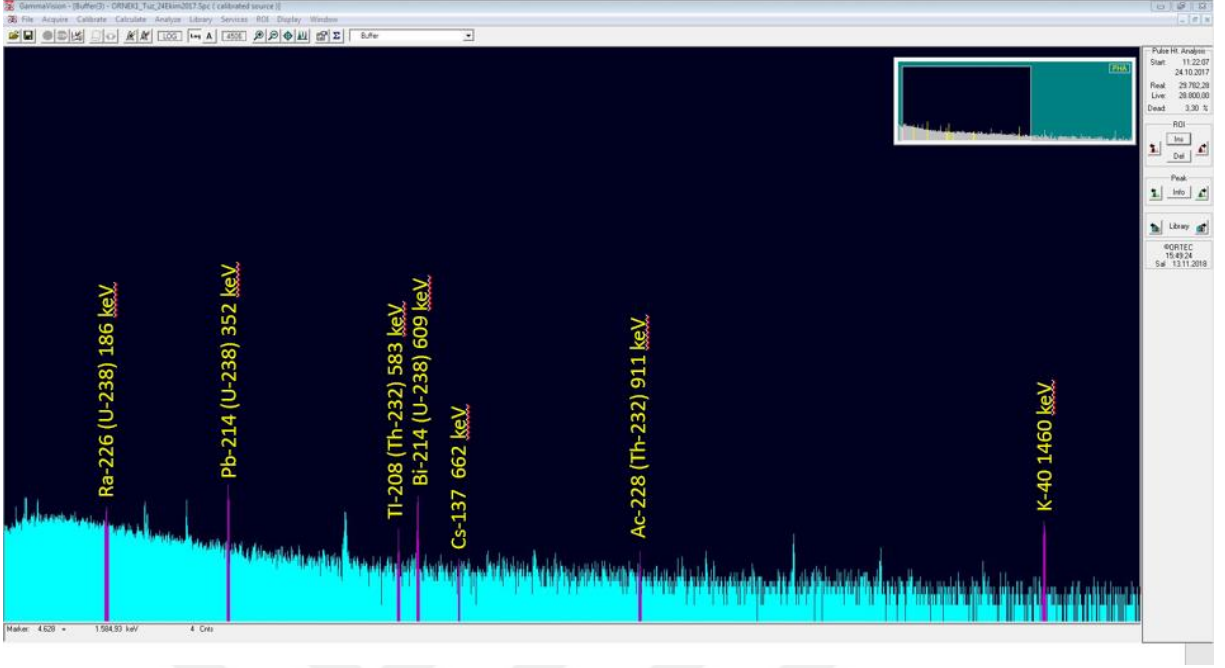
$g_{T,r}$: İlgili çekirdeğin doz dönüşüm katsayısı (Sv/Bq)

Yetişkinlerde yeme yoluyla ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K ve ^{137}Cs radyoaktif çekirdeklerinin doz dönüşüm katsayıları sırası ile 4.5×10^{-8} Sv/Bq, 2.3×10^{-7} Sv/Bq, 6.2×10^{-9} Sv/Bq ve 1.3×10^{-8} Sv/Bq olarak belirlenmiştir [34,53].

Yapılan hesaplamalarda, seçilen gıda ürünleri için yıllık tüketim miktarları TÜİK verileri ve TAEK tarafından 2007 yılında yayınlanan 20.yılında Çernobil Serisi Türkiye için Doz Değerlendirmeleri içerisinde verilen Türkiye geneli yıllık gıda tüketim miktarı kabulleri esas alınmıştır [57,58].

3.3.4. Örnek Bir Spektrumun İncelenmesi

Ölçüm sonucunda elde edilen spektrumda seçilen pikler ve enerjileri Şekil 3.11'de gösterilmiştir.



Şekil 3.11: Örnek Spektrum.

Yukarıda gösterilen örnek spektrum için ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın aktiviteleri ve yıllık etkin dozlarının ayrıntılı hesabı aşağıda verilmiştir.

186 keV enerjili ^{238}U (^{226}Ra) fotopiki için aktivite denklemi Denklem 3.7 şu şekildedir:

$$A_{226\text{Ra}} = \frac{N_{226\text{Ra}}}{\varepsilon \times m \times \gamma \times t} \quad (3.7)$$

$$N_{226\text{Ra}} = N_{\text{Toplam}} - N_{\text{Background}} = 201 - 91 = 110 \quad (3.8)$$

186 keV enerjisine sahip ^{226}Ra fotopiki için net sayım değeri Denklem 3.8 ile bulunmuştur.

^{226}Ra fotopiki için gama bozunma olasılığı $\gamma = 0,035$ 'dir.

Enerji verimi $\varepsilon = 0,041$ olarak Ortec Gamma Vision 6.2 programı kullanılarak hesaplanmıştır.

Örnek kütlesi $m = 0,5$ kg ve sayım süresi $t = 28800$ sn'dir.

Böylece aktivite hesabı;

$$A_{226\text{Ra}} = \frac{110}{0,035 \times 0,041 \times 0,5 \times 28800} = 5,253 \text{ Bq/kg} \quad (3.9)$$

olarak hesaplanmıştır.

^{238}U çekirdeğinin ^{226}Ra , ^{214}Pb ve ^{214}Bi için sırasıyla 186 keV, 352keV ve 609 keV olmak üzere üç fotopik enerjisi vardır. Bu üç fotopikin aktivite konsantrasyonları sırasıyla 5,253 Bq/kg, 2,246 Bq/kg, ve 2,487 Bq/kg'dır.

^{232}Th çekirdeği için de ^{208}Tl ve ^{228}Ac için sırasıyla 583 keV ve 911 keV olmak üzere iki fotopiki vardır. Bu iki fotopikin aktivite konsantrasyonları sırasıyla 0,335 Bq/kg ve 0,833 Bq/kg'dır.

Birden çok fotopik enerjisi ve aktivite konsantrasyonuna sahip olan ^{238}U ve ^{232}Th çekirdeklerinin ağırlıklı aktiviteleri hesaplanmalıdır.

^{238}U çekirdeği için ağırlıklı aktivite ;

$$A_{238U} = \frac{A_{U_1} \gamma_{U_1} + A_{U_2} \gamma_{U_2} + A_{U_3} \gamma_{U_3}}{\gamma_{U_1} + \gamma_{U_2} + \gamma_{U_3}}$$

$$A_{238U} = \frac{5,253 \times 0,035 + 2,246 \times 0,371 + 2,487 \times 0,461}{0,035 + 0,371 + 0,461} = 2,496 \text{ Bq/kg} \quad (3.10)$$

olarak hesaplanmıştır.

^{232}Th çekirdeği için ağırlıklı aktivite ;

$$A_{232Th} = \frac{0,833 \times 0,266 + 0,335 \times 0,845}{0,266 + 0,845} = 0,454 \text{ Bq/kg} \quad (3.11)$$

olarak hesaplanmıştır.

Örnek spektrumda verilen ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K ve ^{137}Cs için aktivite konsantrasyonları sırasıyla 2,496 Bq/kg, 0,454 Bq/kg, 5,220 Bq/kg ve 0,104 Bq/kg olarak hesaplanmıştır.

Hesaplanan aktivite değerlerine göre seçilen bu gıdaları tüketen insanların maruz kaldığı yıllık etkin doz ayrıntılı hesabı aşağıda verilmiştir.

Tuz örneği için ^{238}U yıllık etkin doz hesabı denklemi Denklem 3.12 şu şekildedir;

$$H_{238U} = \sum U_{238U} C_{238U} g_{238U} \quad (3.12)$$

Seçilen sofraya tuzu örneği için yıllık kişi başı tüketim miktarı $U_{238U} = 5,475 \text{ kg}$ olarak alınmıştır.

^{238}U çekirdeğinin doz dönüşüm katsayısı $g_{238U} = 0,045 \mu\text{Sv/yıl}$ olarak bilinmektedir.

$$H_{238U} = 5,475 \times 2,496 \times 0,045 = 0,614 \mu Sv/yıl \quad (3.13)$$

Sofra tuzu örneği için ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K ve ^{137}Cs yıllık etkin doz değerleri sırasıyla 0,614 $\mu Sv/yıl$, 0,572 $\mu Sv/yıl$, 0,177 $\mu Sv/yıl$ ve 0,007 $\mu Sv/yıl$ olarak hesaplanmıştır.

3.3.5. Yaşam Boyu Kanser Riski

Hesaplanan yıllık etkin doz değerlerine göre yaşam boyu kanser riski (ELCR) Denklem 3.14 ile belirlenmiştir.

$$ELCR = H \times DL \times RF \quad (3.14)$$

H: Yıllık Etkin Doz (Sv/yıl)

DL: Yaşam Süresi (yıl)

RF: Risk faktörü (Sv⁻¹)

Yaşam süresi ortalama 70 yıl olarak alınmaktadır. ICRP düşük dozlarda stokastik etkiler için risk faktörünü 0.05 Sv⁻¹ olarak belirlemiştir [59].

4. BULGULAR

4.1. GIDA ÖRNEKLERİNDEKİ AKTİVİTE KONSANTRASYONLARI

Türkiye’de farklı bölgelerde yetiştirilmiş seçilen 9 türdeki 37 adet gıda örneğinin analizi yapılarak her bir örnek için aktivite konsantrasyonu hesaplanmış ve aşağıda Tablo 4.1 ile verilmiştir.

Tablo 4.1: Gıda Numunelerindeki Aktivite Konsantrasyonları (Bq/kg).

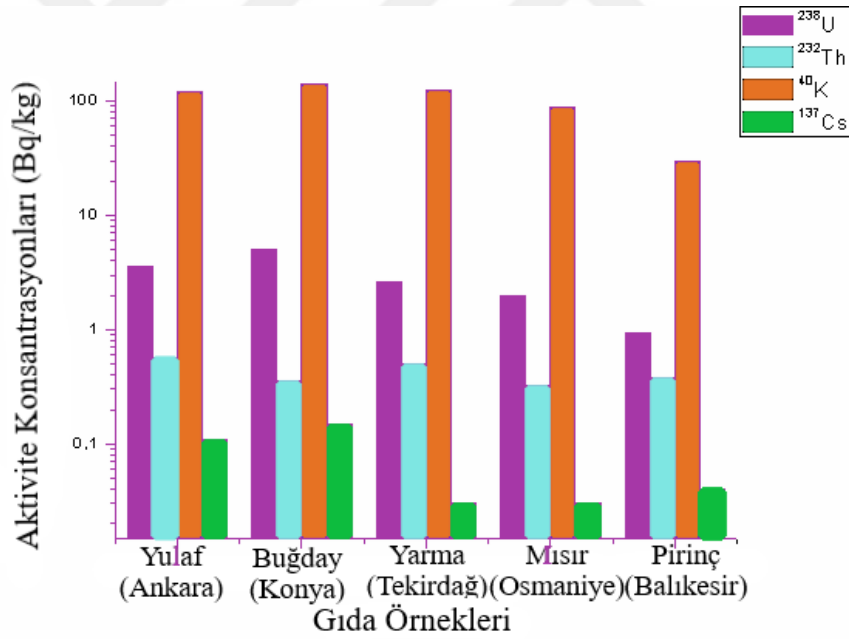
TÜR	GIDA NUMUNESİ	²³⁸ U (Bq/kg)	²³² Th (Bq/kg)	⁴⁰ K (Bq/kg)	¹³⁷ Cs (Bq/kg)
Hububat Ürünleri	Yulaf	3,57 ± 0,37	0,57 ± 0,12	118,92 ± 4,65	0,11 ± 0,04
	Buğday	5,06 ± 0,31	0,36 ± 0,09	138,94 ± 4,01	0,15 ± 0,03
	Yarma	2,59 ± 0,22	0,50 ± 0,08	123,55 ± 3,36	<MDA
	Mısır	1,97 ± 0,20	0,32 ± 0,07	87,79 ± 2,90	<MDA
	Pirinç	0,93 ± 0,17	0,38 ± 0,07	29,96 ± 1,81	<MDA
Un	Tam Buğday Unu	2,78 ± 0,29	0,42 ± 0,10	85,38 ± 3,52	0,12 ± 0,03
	Beyaz Un	1,47 ± 0,22	0,25 ± 0,07	55,97 ± 2,70	<MDA
	Mısır Unu	2,05 ± 0,22	<MDA	39,71 ± 2,25	0,23 ± 0,04
Unlu Mamüller	Makarna	2,90 ± 0,22	0,35 ± 0,07	93,86 ± 2,91	0,06 ± 0,02
	Şehriye	1,57 ± 0,21	0,67 ± 0,09	96,22 ± 3,23	<MDA
Bakliyat	Kuru Fasulye-1	3,54 ± 0,27	<MDA	501,33 ± 7,11	0,06 ± 0,02
	Kuru Fasulye-2	3,35 ± 0,29	0,62 ± 0,11	531,12 ± 7,78	0,12 ± 0,03
	Kırmızı Mercimek	0,76 ± 0,16	0,35 ± 0,07	273,49 ± 4,66	<MDA
	Yeşil Mercimek	1,63 ± 0,21	0,43 ± 0,08	315,57 ± 5,52	<MDA
	Nohut	1,34 ± 0,23	0,38 ± 0,09	317,14 ± 5,89	0,11 ± 0,03
	Barbunya	1,72 ± 0,24	0,54 ± 0,09	497,01 ± 7,33	0,08 ± 0,03
	Maş Fasulye	3,24 ± 0,28	0,58 ± 0,10	498,24 ± 7,46	0,23 ± 0,04
Sebze	Patlıcan	13,65 ± 1,00	2,42 ± 0,35	1560,22 ± 24,11	0,31 ± 0,10
	Biber	12,77 ± 1,09	1,50 ± 0,33	946,68 ± 20,33	0,27 ± 0,10
	Karalahana	12,81 ± 1,06	1,80 ± 0,35	1034,21 ± 20,94	0,65 ± 0,14
	Asma Yaprağı	3,87 ± 0,73	1,28 ± 0,29	456,79 ± 13,14	0,20 ± 0,08
Meyve	Elma	7,39 ± 0,47	0,78 ± 0,14	350,63 ± 7,75	<MDA
	Erik	4,05 ± 0,42	1,34 ± 0,18	365,20 ± 8,16	0,21 ± 0,05
	Armut	6,55 ± 0,39	0,76 ± 0,12	230,98 ± 5,69	0,11 ± 0,03
Baharat	Kekik-1	12,15 ± 0,59	1,55 ± 0,20	301,70 ± 7,65	0,36 ± 0,07
	Kekik-2	8,11 ± 0,88	0,87 ± 0,27	368,98 ± 12,48	<MDA
	Nane	4,42 ± 0,35	0,81 ± 0,13	523,52 ± 8,36	0,09 ± 0,03
	Pul Biber-1	7,41 ± 0,41	1,06 ± 0,14	483,40 ± 8,12	0,11 ± 0,04
	Pul Biber-2	4,73 ± 0,46	1,20 ± 0,18	570,77 ± 10,48	0,22 ± 0,06
	Biberiye	4,12 ± 1,22	3,85 ± 0,59	714,97 ± 22,26	0,24 ± 0,13
Tuz	Sofra Tuzu	2,50 ± 0,20	0,45 ± 0,07	5,22 ± 1,19	0,10 ± 0,02
	Kaya Tuzu	1,16 ± 0,17	0,31 ± 0,07	<MDA	<MDA
	Limon Tuzu	<MDA	0,33 ± 0,07	<MDA	<MDA
	Köy Tuzu	2,65 ± 0,20	<MDA	5,30 ± 1,19	<MDA
Kuruyemiş	Fındık	4,47 ± 0,50	0,41 ± 0,15	260,76 ± 7,74	3,20 ± 0,21
	Fıstık	1,39 ± 0,23	0,45 ± 0,09	246,30 ± 5,26	0,12 ± 0,03
	Leblebi	3,97 ± 0,28	<MDA	284,05 ± 5,46	0,07 ± 0,03

4.1.1. Hububat Ürünlerindeki Aktivite Konsantrasyonları

Analiz edilen 5 farklı hububat türünden elde edilen en düşük, en yüksek ve ortalama ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K ve ^{137}Cs aktivite konsantrasyonları Tablo 4.2 ile verilmiş olup aktivite konsantrasyonlarını gösteren grafik Şekil 4.1 ile verilmiştir.

Tablo 4.2: Hububat Ürünlerine Genel Bakış.

Gıda Türü	Radyoaktivite Seviyesi	^{238}U (Bq/kg)	^{232}Th (Bq/kg)	^{40}K (Bq/kg)	^{137}Cs (Bq/kg)
Hububat	En Düşük	0,93 ± 0,17 (Pirinç)	0,32 ± 0,07 (Mısır)	29,96 ± 1,81 (Pirinç)	<MDA
	En Yüksek	5,06 ± 0,31 (Buğday)	0,57 ± 0,12 (Yulaf)	138,94 ± 4,01 (Buğday)	0,15 ± 0,03 (Buğday)
	Ortalama	2,82±0,25	0,42±0,08	99,83±3,34	0,07±0,02



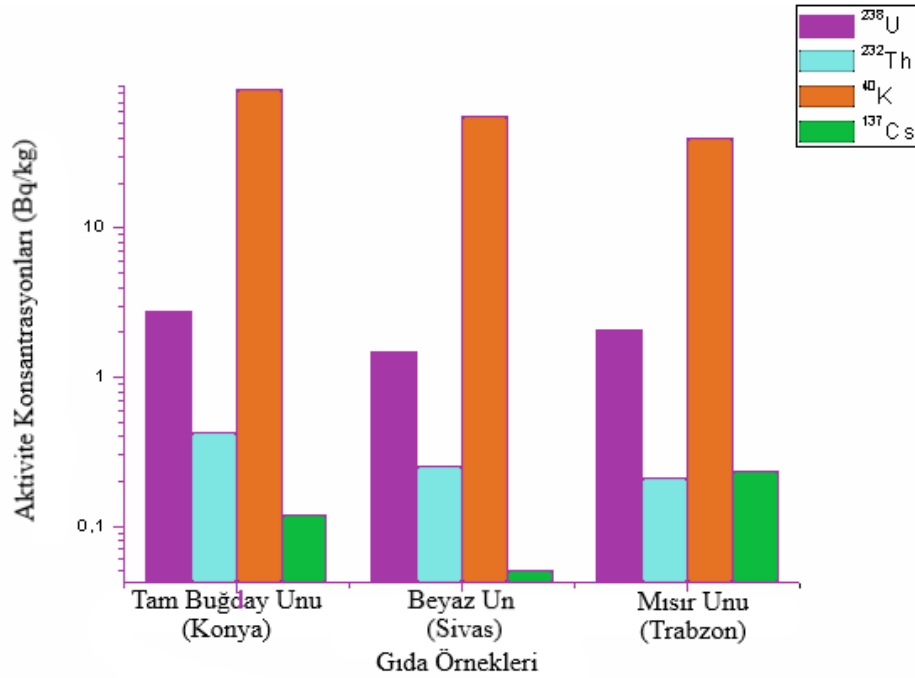
Şekil 4.1: Hububat Ürünlerindeki Aktivite Konsantrasyonları (Bq/kg).

4.1.2. Undaki Aktivite Konsantrasyonları

Analiz edilen 3 farklı un örneğinden elde edilen en düşük, en yüksek ve ortalama ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K ve ^{137}Cs aktivite konsantrasyonları Tablo 4.3 ile verilmiş olup aktivite konsantrasyonlarını gösteren grafik Şekil 4.2 ile verilmiştir.

Tablo 4.3: Un Örneklerine Genel Bakış.

Gıda Türü	Radyoaktivite Seviyesi	²³⁸ U (Bq/kg)	²³² Th (Bq/kg)	⁴⁰ K (Bq/kg)	¹³⁷ Cs (Bq/kg)
Un	En Düşük	1,47 ± 0,22 (Beyaz Un)	<MDA (Mısır Unu)	39,71 ± 2,25 (Mısır Unu)	<MDA (Beyaz Un)
	En Yüksek	2,78 ± 0,29 (Tam Buğday Unu)	0,42 ± 0,10 (Tam Buğday Unu)	85,38 ± 3,52 (Tam Buğday Unu)	0,23 ± 0,04 (Mısır Unu)
	Ortalama	2,1±0,24	0,29±0,08	60,35±2,82	0,13±0,03

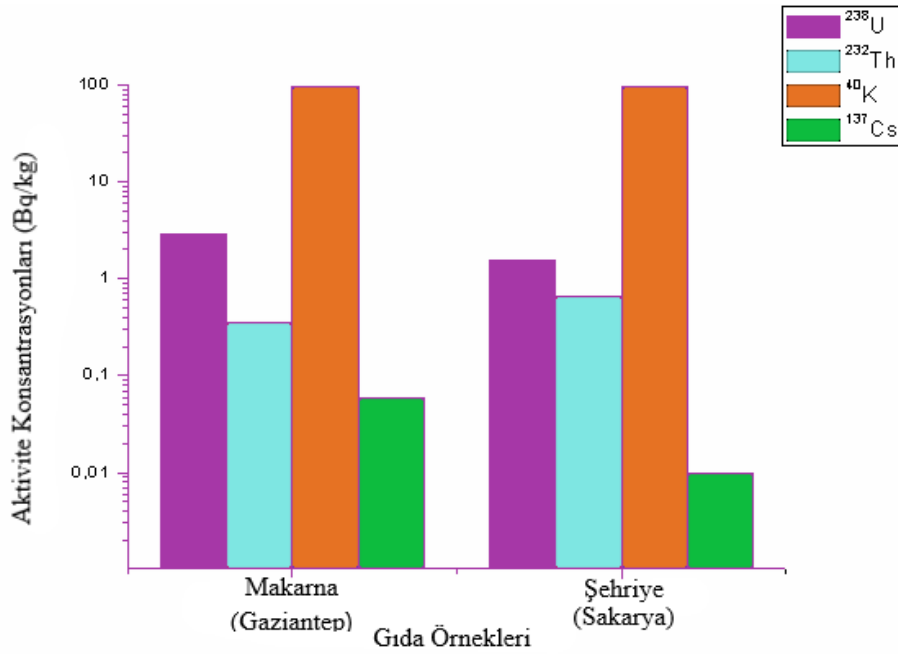
**Şekil 4.2:** Unlardaki Aktivite Konsantrasyonları (Bq/kg).

4.1.3. Unlu Mamüllerdeki Aktivite Konsantrasyonları

Analiz edilen 2 farklı unlu mamulden elde edilen en düşük, en yüksek ve ortalama ²³⁸U, ²³²Th, ⁴⁰K ve ¹³⁷Cs aktivite konsantrasyonları Tablo 4.4 ile verilmiş olup aktivite konsantrasyonlarını gösteren grafik Şekil 4.3 ile verilmiştir.

Tablo 4.4: Unlu Mamüllere Genel Bakış.

Gıda Türü	Radyoaktivite Seviyesi	²³⁸ U (Bq/kg)	²³² Th (Bq/kg)	⁴⁰ K (Bq/kg)	¹³⁷ Cs (Bq/kg)
Unlu Mamüller	En Düşük	1,57 ± 0,21 (Şehriye)	0,35 ± 0,07 (Makarna)	93,86 ± 2,91 (Makarna)	<MDA (Şehriye)
	En Yüksek	2,90 ± 0,22 (Makarna)	0,67 ± 0,09 (Şehriye)	96,22 ± 3,23 (Şehriye)	0,06 ± 0,02 (Makarna)
	Ortalama	2,23±0,21	0,51±0,08	95,04±3,07	0,035±0,01

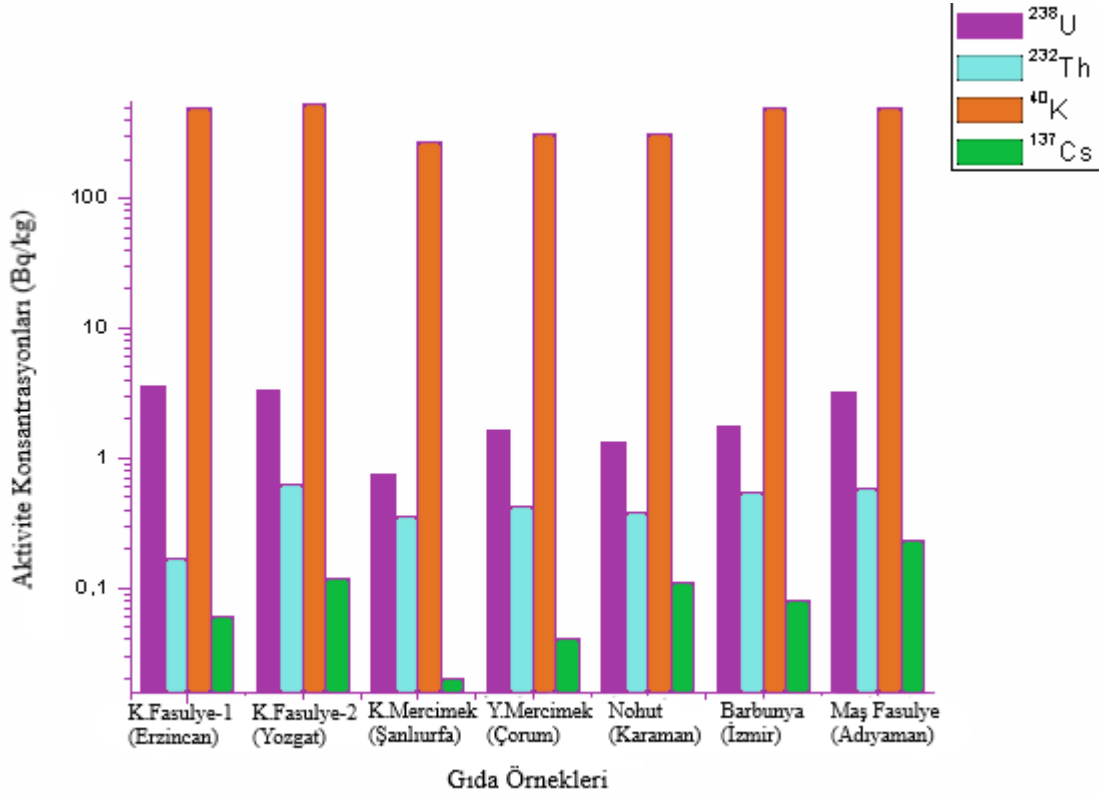
**Şekil 4.3:** Unlu Mamüllerdeki Aktivite Konsantrasyonları (Bq/kg).

4.1.4. Bakliyat Ürünlerindeki Aktivite Konsantrasyonları

Analiz edilen 7 farklı bakliyat ürününden elde edilen en düşük, en yüksek ve ortalama ²³⁸U, ²³²Th, ⁴⁰K ve ¹³⁷Cs aktivite konsantrasyonları Tablo 4.5 ile verilmiş olup aktivite konsantrasyonlarını gösteren grafik Şekil 4.4 ile verilmiştir.

Tablo 4.5: Bakliyat Ürünlerine Genel Bakış.

Gıda Türü	Radyoaktivite Seviyesi	^{238}U (Bq/kg)	^{232}Th (Bq/kg)	^{40}K (Bq/kg)	^{137}Cs (Bq/kg)
Bakliyat	En Düşük	$0,76 \pm 0,16$ (Kırmızı Mercimek)	<MDA (Kuru Fasulye-1)	$273,49 \pm 4,66$ (Kuru Fasulye-1)	<MDA (Kuru Fasulye-1)
	En Yüksek	$3,54 \pm 0,27$ (Kuru Fasulye-1)	$0,62 \pm 0,11$ (Kuru Fasulye-2)	$498,24 \pm 7,46$ (Maş Fasulye)	$0,23 \pm 0,04$ (Maş Fasulye)
	Ortalama	$2,22 \pm 0,24$	$0,43 \pm 0,08$	$419,12 \pm 6,53$	$0,09 \pm 0,02$

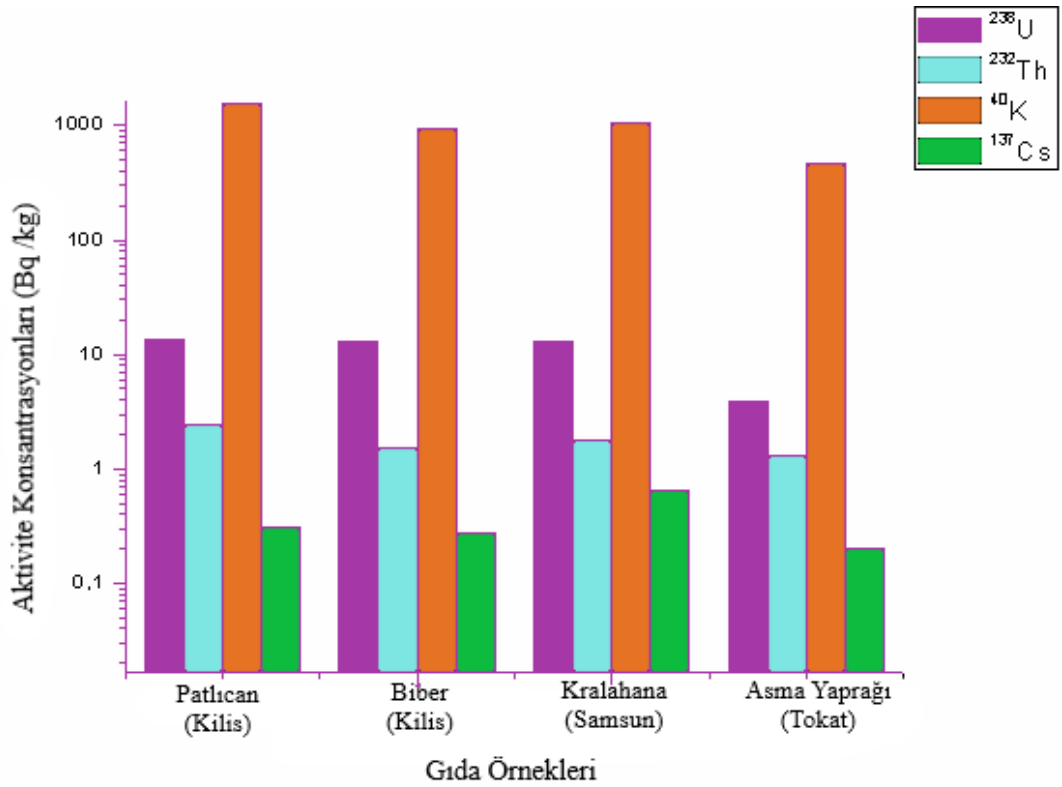
**Şekil 4.4:** Bakliyat Ürünlerindeki Aktivite Konsantrasyonları (Bq/kg).

4.1.5. Sebzelerdeki Aktivite Konsantrasyonları

Analiz edilen 4 farklı sebze ürününden elde edilen en düşük, en yüksek ve ortalama ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K ve ^{137}Cs aktivite konsantrasyonları Tablo 4.6 ile verilmiş olup aktivite konsantrasyonlarını gösteren grafik Şekil 4.5 ile verilmiştir.

Tablo 4.6: Sebze Ürünlerine Genel Bakış.

Gıda Türü	Radyoaktivite Seviyesi	^{238}U (Bq/kg)	^{232}Th (Bq/kg)	^{40}K (Bq/kg)	^{137}Cs (Bq/kg)
Sebze	En Düşük	$3,87 \pm 0,73$ (Asma Yaprağı)	$1,28 \pm 0,29$ (Asma Yaprağı)	$456,79 \pm 13,14$ (Asma Yaprağı)	$0,20 \pm 0,08$ (Asma Yaprağı)
	En Yüksek	$13,65 \pm 1,00$ (Patlıcan)	$2,42 \pm 0,35$ (Patlıcan)	$1560,22 \pm 24,11$ (Patlıcan)	$0,65 \pm 0,14$ (Karalahana)
	Ortalama	$10,77 \pm 0,97$	$1,75 \pm 0,33$	$999,475 \pm 19,63$	$0,35 \pm 0,10$

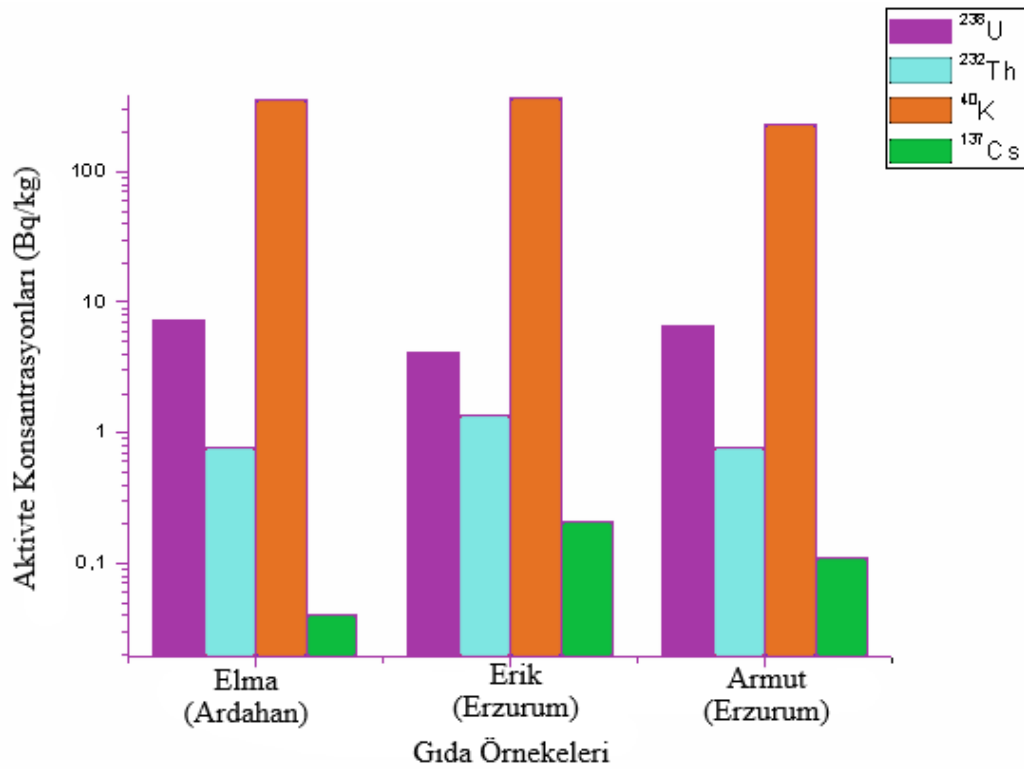
**Şekil 4.5:** Sebzelerdeki Aktivite Konsantrasyonları (Bq/kg).

4.1.6. Meyvelerdeki Aktivite Konsantrasyonları

Analiz edilen 3 farklı meyve ürününden elde edilen en düşük, en yüksek ve ortalama ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K ve ^{137}Cs aktivite konsantrasyonları Tablo 4.7 ile verilmiş olup aktivite konsantrasyonlarını gösteren grafik Şekil 4.6 ile verilmiştir.

Tablo 4.7: Meyve Ürünlerine Genel Bakış.

Gıda Türü	Radyoaktivite Seviyesi	^{238}U (Bq/kg)	^{232}Th (Bq/kg)	^{40}K (Bq/kg)	^{137}Cs (Bq/kg)
Meyve	En Düşük	4,05 ± 0,42 (Erik)	0,76 ± 0,12 (Armut)	230,98 ± 5,69 (Armut)	<MDA (Elma)
	En Yüksek	7,39 ± 0,47 (Elma)	1,34 ± 0,18 (Erik)	365,20 ± 8,16 (Erik)	0,21 ± 0,05 (Erik)
	Ortalama	5,99±0,42	0,96±0,14	315,60±7,2	0,12±0,03

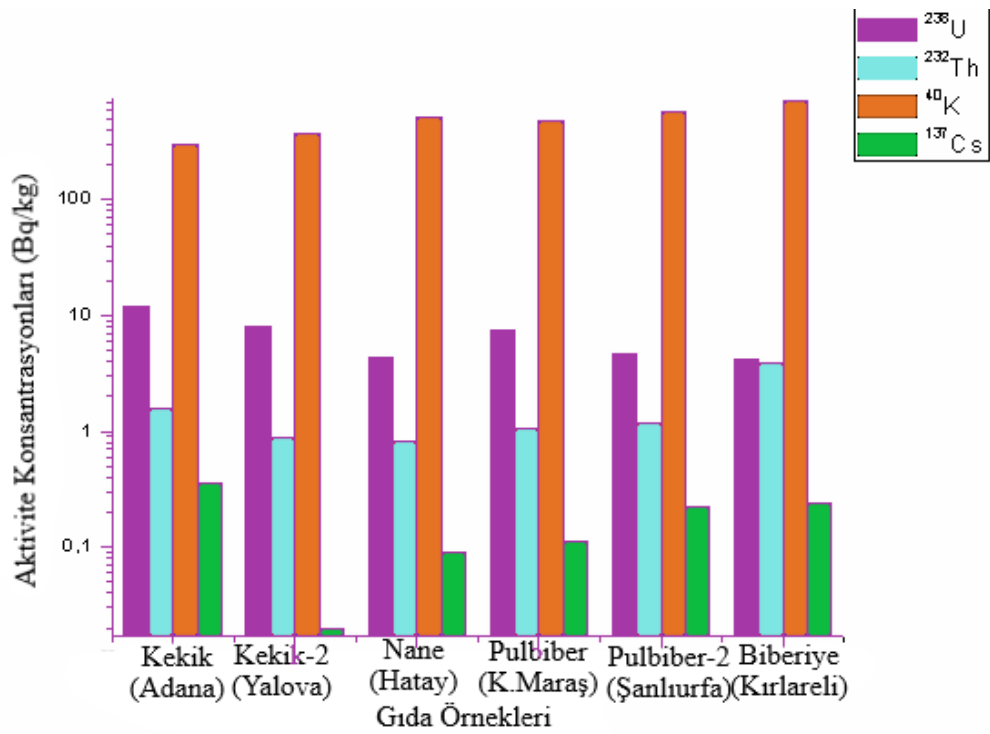
**Şekil 4.6:** Meyve Örneklerindeki Aktivite Konsantrasyonları (Bq/kg).

4.1.7. Baharatlardaki Aktivite Konsantrasyonları

Analiz edilen 6 farklı baharat örneğinden elde edilen en düşük, en yüksek ve ortalama ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K ve ^{137}Cs aktivite konsantrasyonları Tablo 4.8 ile verilmiş olup aktivite konsantrasyonlarını gösteren grafik Şekil 4.7 ile verilmiştir.

Tablo 4.8: Baharat Örneklerine Genel Bakış.

Gıda Türü	Radyoaktivite Seviyesi	²³⁸ U (Bq/kg)	²³² Th (Bq/kg)	⁴⁰ K (Bq/kg)	¹³⁷ Cs (Bq/kg)
Baharat	En Düşük	4,12 ± 1,22 (Biberiye)	0,81 ± 0,13 (Nane)	301,70 ± 7,65 (Kekik-1)	<MDA (Kekik-2)
	En Yüksek	12,15 ± 0,59 (Kekik-1)	3,85 ± 0,59 (Biberiye)	714,97 ± 22,26 (Biberiye)	0,24 ± 0,13 (Biberiye)
	Ortalama	6,82±0,65	1,55±0,25	493,89±11,55	0,17±0,06

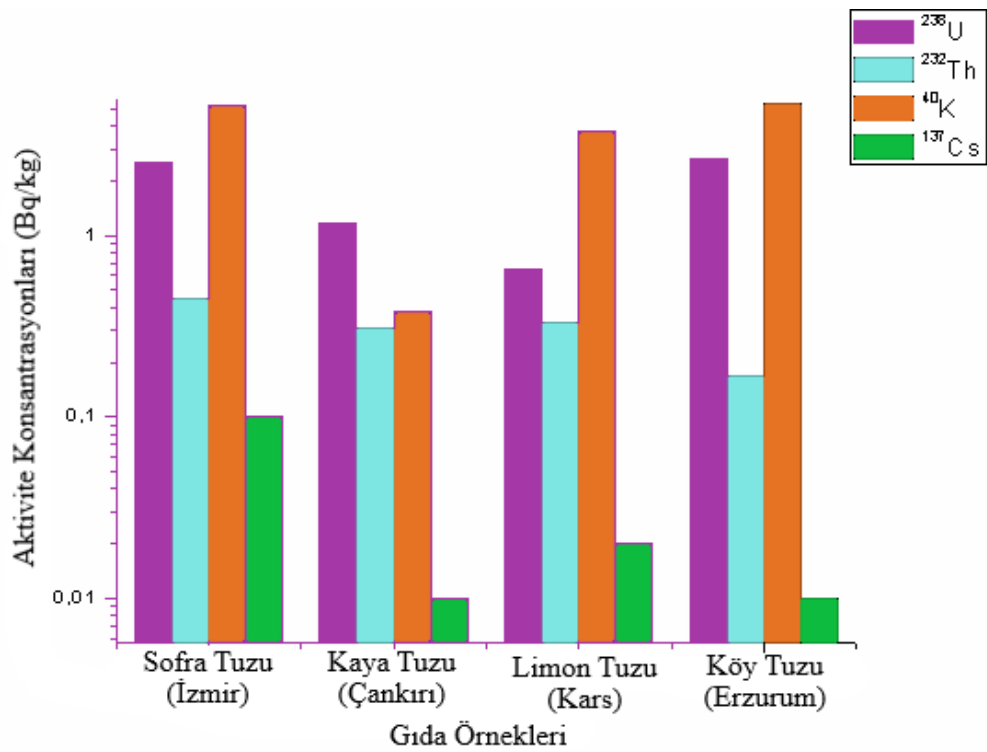
**Şekil 4.7:** Baharatlardaki Aktivite Konsantrasyonları (Bq/kg).

4.1.8. Tuzdaki Aktivite Konsantrasyonları

Analiz edilen 4 farklı tuz örneğinden elde edilen en düşük, en yüksek ve ortalama ²³⁸U, ²³²Th, ⁴⁰K ve ¹³⁷Cs aktivite konsantrasyonları Tablo 4.9 ile verilmiş olup aktivite konsantrasyonlarını gösteren grafik Şekil 4.8 ile verilmiştir.

Tablo 4.9: Tuz Örneklerine Genel Bakış.

Gıda Türü	Radyoaktivite Seviyesi	^{238}U (Bq/kg)	^{232}Th (Bq/kg)	^{40}K (Bq/kg)	^{137}Cs (Bq/kg)
Tuz	En Düşük	<MDA (Limon Tuzu)	<MDA (Köy Tuzu)	<MDA (Kaya Tuzu)	<MDA (Kaya Tuzu)
	En Yüksek	2,65 ± 0,20 (Köy Tuzu)	0,45 ± 0,07 (Sofra Tuzu)	5,30 ± 1,19 (Köy Tuzu)	0,10 ± 0,02 (Sofra Tuzu)
	Ortalama	1,74±0,18	0,31±0,06	3,66±1,14	0,03±0,01

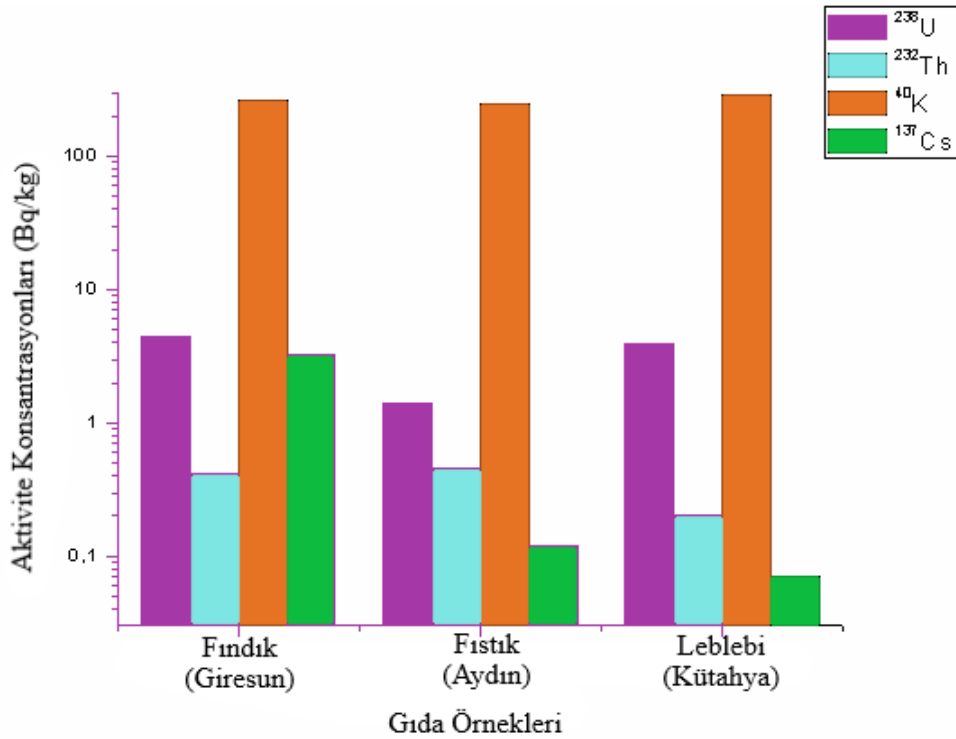
**Şekil 4.8:** Tuzlardaki Aktivite Konsantrasyonları (Bq/kg).

4.1.9. Kuruyemişlerdeki Aktivite Konsantrasyonları

Analiz edilen 3 farklı kuruyemiş örneğinden elde edilen en düşük, en yüksek ve ortalama ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K ve ^{137}Cs aktivite konsantrasyonları Tablo 4.10 ile verilmiş olup aktivite konsantrasyonlarını gösteren grafik Şekil 4.9 ile verilmiştir.

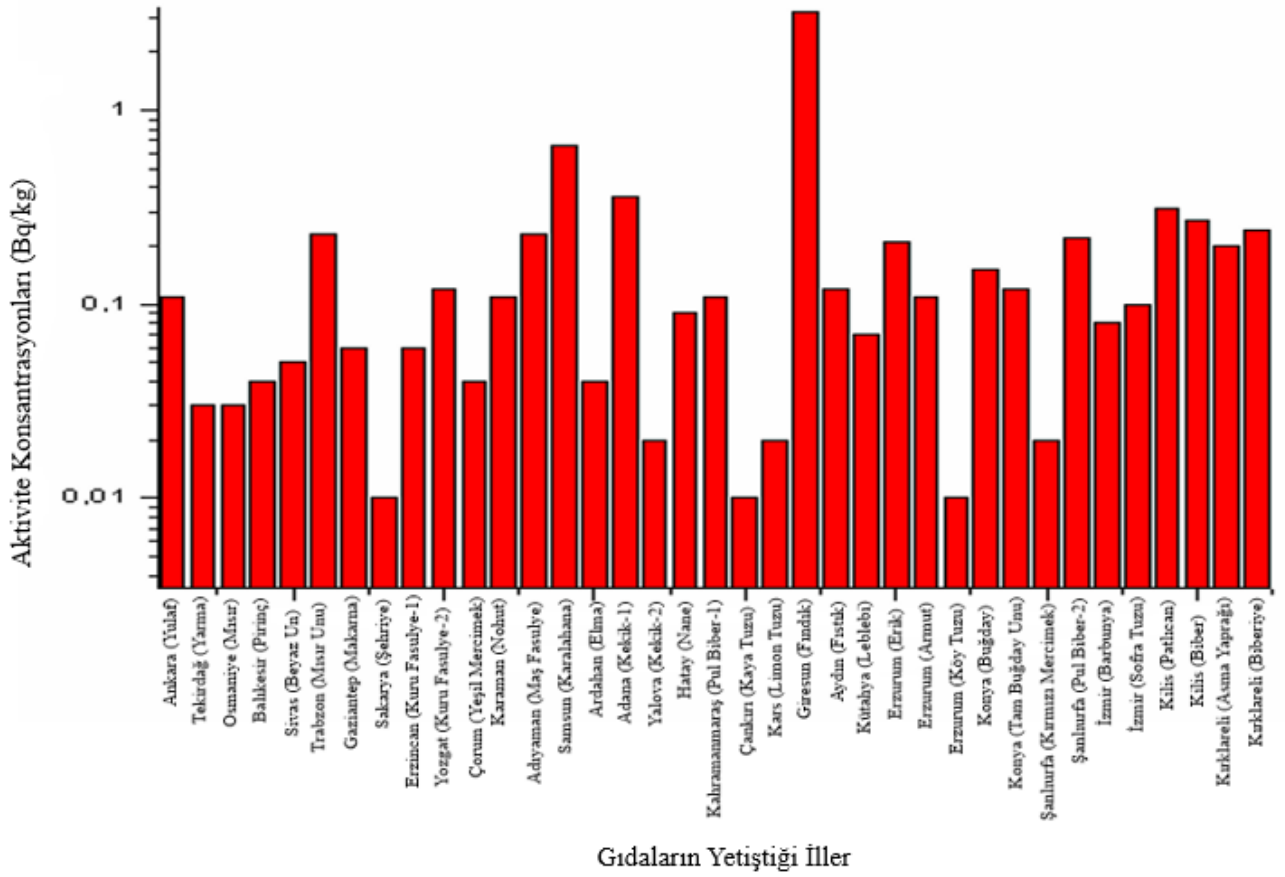
Tablo 4.10: Kuruyemiş Örneklerine Genel Bakış.

Gıda Türü	Radyoaktivite Seviyesi	^{238}U (Bq/kg)	^{232}Th (Bq/kg)	^{40}K (Bq/kg)	^{137}Cs (Bq/kg)
Kuruyemiş	En Düşük	1,39 ± 0,23 (Fıstık)	<MDA (Leblebi)	246,30 ± 5,26 (Fıstık)	0,07 ± 0,03 (Leblebi)
	En Yüksek	4,47 ± 0,50 (Fındık)	0,45 ± 0,09 (Fıstık)	284,05 ± 5,46 (Leblebi)	3,20 ± 0,21
	Ortalama	3,27±0,33	0,35±0,10	263,70±6,15	1.13±0,09

**Şekil 4.9:** Kuruyemişlerdeki Aktivite Konsantrasyonları (Bq/kg).

4.1.10. Gıda Örneklerinin Yetiştirildiği İllere Göre Belirlenen ^{137}Cs Aktivite Konsantrasyonları

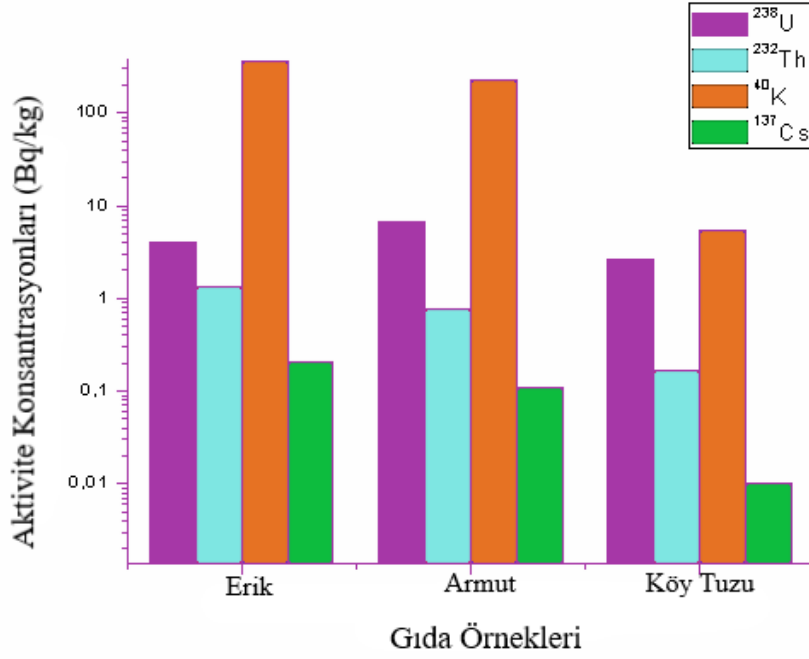
Türkiye’de farklı bölgelerde yetiştirilmiş seçilen 9 türdeki 37 adet gıda örneğinin yetiştiği illerdeki ^{137}Cs aktivite konsantrasyonlarını gösteren grafik Şekil 4.13 ile gösterilmiştir.



Şekil 4.10: Gıdaların Yetiştigi İllerde ^{137}Cs Aktivite Konsantrasyonları (Bq/kg).

4.2. AYNI İLLERDE YETİŞTİRİLEN GIDA ÜRÜNLERİNDEKİ AKTİVİTE KONSANTRASYONLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Erzurum ilinde yetişen erik, armut ve bölgeden çıkarılan tuzun ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K ve ^{137}Cs aktivite konsantrasyonlarını gösteren grafik Şekil 4.11 ile verilmiştir.



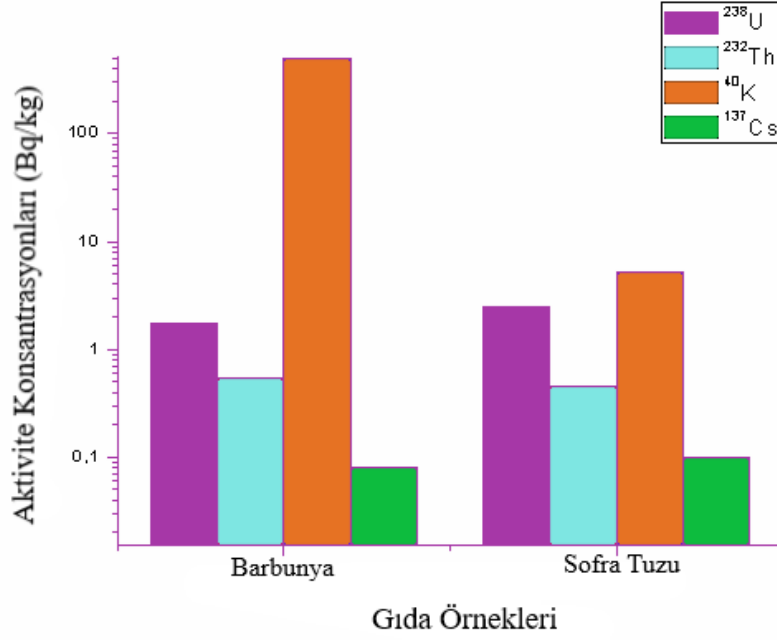
Şekil 4.11: Erzurum’da Yetişen Gıda Örneklerinin Aktivite Konsantrasyonları (Bq/kg).

Erzurum yetişen 3 farklı örneğin analizi sonucunda elde edilen en düşük, en yüksek ve ortalama ²³⁸U, ²³²Th, ⁴⁰K ve ¹³⁷Cs aktivite konsantrasyonları Tablo 4.11 ile verilmiştir.

Tablo 4.11: Erzurum’da Yetişen Ürünlere Genel Bakış.

Radyoaktivite Seviyesi	²³⁸ U (Bq/kg)	²³² Th (Bq/kg)	⁴⁰ K (Bq/kg)	¹³⁷ Cs (Bq/kg)
En Düşük	2,65±0,20 (Köy Tuzu)	<MDA (Köy Tuzu)	5,30±1,19 (Köy Tuzu)	<MDA (Köy Tuzu)
En Yüksek	6,55±0,39 (Armut)	1,34±0,18 (Erik)	365,20±8,16 (Erik)	0,21±0,05 (Erik)

İzmir ilinde yetişen Barbunya ve bölgeden çıkarılan tuzun aktivite konsantrasyonlarını gösteren grafik Şekil 4.12 ile verilmiştir



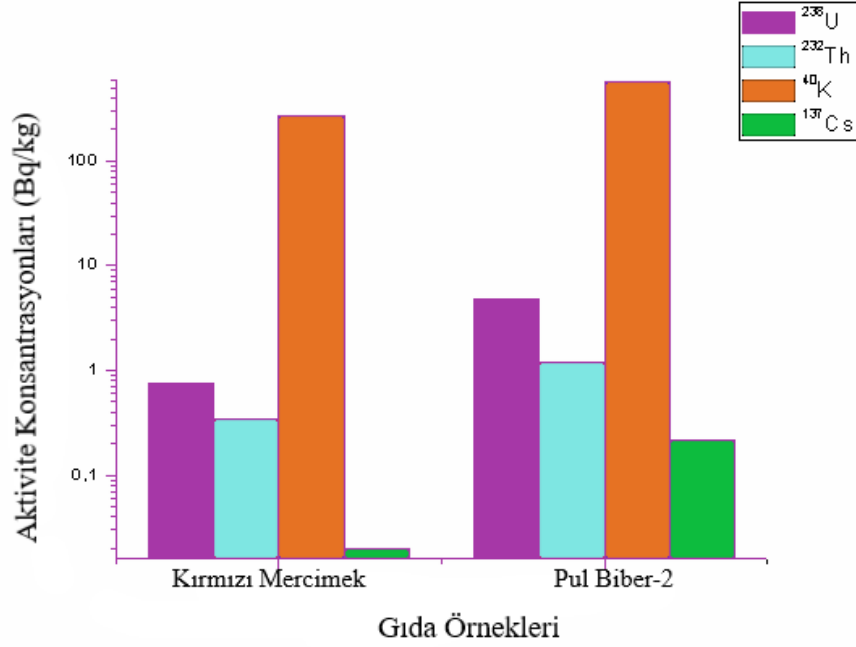
Şekil 4.12: İzmir’de Yetişen Gıda Örneklerinin Aktivite Konsantrasyonları (Bq/kg).

İzmir ilinde yetişen 2 farklı örneğin analizi sonucunda elde edilen en düşük, en yüksek ve ortalama ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K ve ^{137}Cs aktivite konsantrasyonları Tablo 4.12 ile verilmiştir.

Tablo 4.12: İzmir’de Yetişen Ürünlere Genel Bakış.

Radyoaktivite Seviyesi	^{238}U (Bq/kg)	^{232}Th (Bq/kg)	^{40}K (Bq/kg)	^{137}Cs (Bq/kg)
En Düşük	1,72±0,24 (Barbunya)	0,54±0,09 (Barbunya)	497,01±7,33 (Barbunya)	0,08±0,03 (Barbunya)
En Yüksek	2,50±0,20 (Sofra Tuzu)	0,45±0,07 (Sofra Tuzu)	5,22±1,19 (Sofra Tuzu)	0,10±0,02 (Sofra Tuzu)

Şanlıurfa ilinde yetişen kırmızı mercimek ve pul biberin aktivite konsantrasyonlarını gösteren grafik Şekil 4.13 ile verilmiştir.



Şekil 4.13: Şanlıurfa'da Yetişen Gıda Örneklerinin Aktivite Konsantrasyonları (Bq/kg).

Tablo 4.13: Şanlıurfa'da Yetişen Ürünlere Genel Bakış.

Radyoaktivite Seviyesi	²³⁸ U (Bq/kg)	²³² Th (Bq/kg)	⁴⁰ K (Bq/kg)	¹³⁷ Cs (Bq/kg)
En Düşük	0,76±0,16 (Kırmızı Mercimek)	0,35±0,07 (Kırmızı Mercimek)	273,49±4,66 (Kırmızı Mercimek)	<MDA (Kırmızı Mercimek)
En Yüksek	4,73±0,46 (Pul Biber-2)	1,20±0,18 (Pul Biber-2)	570,77±10,48 (Pul Biber-2)	0,22±0,06 (Pul Biber-2)

4.3. GIDA ÖRNEKLERİNDEKİ YILLIK ETKİN DOZLAR

Türkiye'de farklı bölgelerde yetiştirilmiş seçilen 9 türdeki 37 adet gıda örneğinin analizi yapılarak her bir örnek için yıllık etkin dozlar hesaplanmış ve aşağıda Tablo 4.14 ile verilmiştir.

Tablo 4.14: Gıda Numuneleri için Hesaplanan Yıllık Etkin Dozlar.

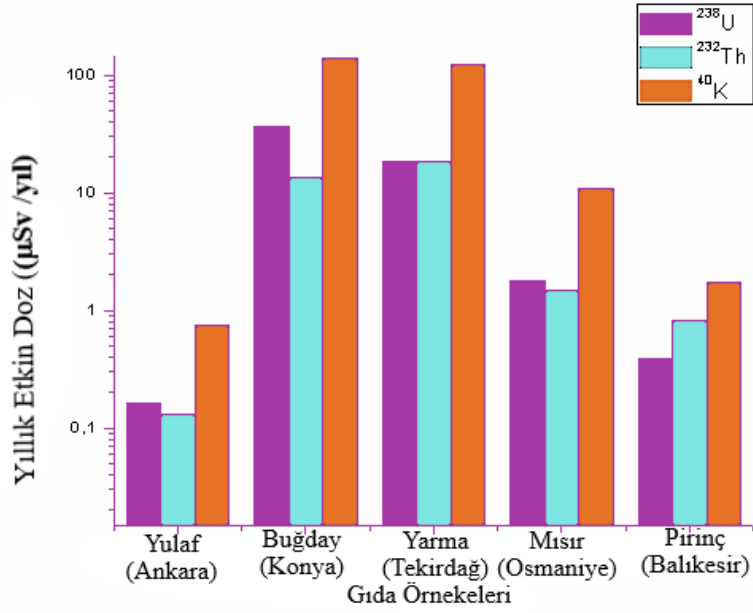
TÜR	GIDA NUMUNESİ	²³⁸ U (μ Sv/yıl)	²³² Th (μ Sv/yıl)	⁴⁰ K (μ Sv/yıl)	¹³⁷ Cs (nSv/yıl)	ELCR ($\times 10^{-4}$)
Hububat	Yulaf	0,16	0,13	0,74	1,40	0,04
	Buğday	36,52	13,40	138,08	308,69	7,25
	Yarma	18,67	18,52	122,79	56,00	6,16
	Mısır	1,77	1,49	10,89	8,50	0,54
	Pirinç	0,39	0,82	1,75	5,48	0,11
Un	Tam Buğday Unu	0,25	0,20	1,06	3,20	0,05
	Beyaz Un	0,13	0,12	0,69	1,36	0,03
	Mısır Unu	0,12	0,06	0,32	3,83	0,02
Unlu Mamüller	Makarna	1,11	0,68	4,95	6,28	0,25
	Şehriye	0,14	0,31	1,19	0,32	0,06
Bakliyat	Kuru Fasulye-1	0,54	0,13	10,57	2,84	0,43
	Kuru Fasulye-2	0,51	0,49	11,20	5,12	0,46
	Kırmızı Mercimek	0,18	0,41	8,65	1,65	0,35
	Yeşil Mercimek	0,04	0,05	0,98	0,23	0,04
	Nohut	0,32	0,47	10,62	7,65	0,43
	Barbunya	1,83	2,94	73,11	23,23	2,99
	Maş Fasulye	3,46	3,15	73,29	69,74	3,07
Sebze	Patlıcan	5,65	5,12	88,99	36,68	3,84
	Biber	14,37	8,61	146,74	86,86	6,53
	Karalahana	4,90	3,51	54,50	72,18	2,42
	Asma Yaprağı	6,36	10,75	103,37	94,11	4,64
Meyve	Elma	7,82	4,21	51,09	12,72	2,43
	Erik	0,44	0,74	5,43	6,58	0,25
	Armut	1,44	0,86	7,02	6,95	0,35

Tablo 4.15 devamı: Gıda Numuneleri için Hesaplanan Yıllık Etkin Dozlar.

TÜR	GIDA NUMUNESİ	²³⁸U (μSv/yıl)	²³²Th (μSv/yıl)	⁴⁰K (μSv/yıl)	¹³⁷Cs (nSv/yıl)	ELCR ($\times 10^{-4}$)
Baharat	Kekik-1	0,21	0,14	0,73	0,00	0,04
	Kekik-2	0,14	0,08	0,89	0,12	0,04
	Nane	0,10	0,10	1,69	0,63	0,07
	Pul Biber-1	0,22	0,16	1,95	0,95	0,08
	Pul Biber-2	0,14	0,18	2,30	1,82	0,10
	Biberiye	0,01	0,06	0,29	0,20	0,01
Tuz	Sofra Tuzu	0,61	0,57	0,18	7,45	0,05
	Kaya Tuzu	0,29	0,39	0,01	1,06	0,02
	Limon Tuzu	0,16	0,41	0,13	1,10	0,02
	Köy Tuzu	0,65	0,22	0,18	1,06	0,04
Kuruyemiş	Fındık	0,73	0,34	5,90	151,74	0,27
	Fıstık	0,50	0,83	12,22	12,89	0,52
	Leblebi	1,74	0,44	17,17	9,06	0,74

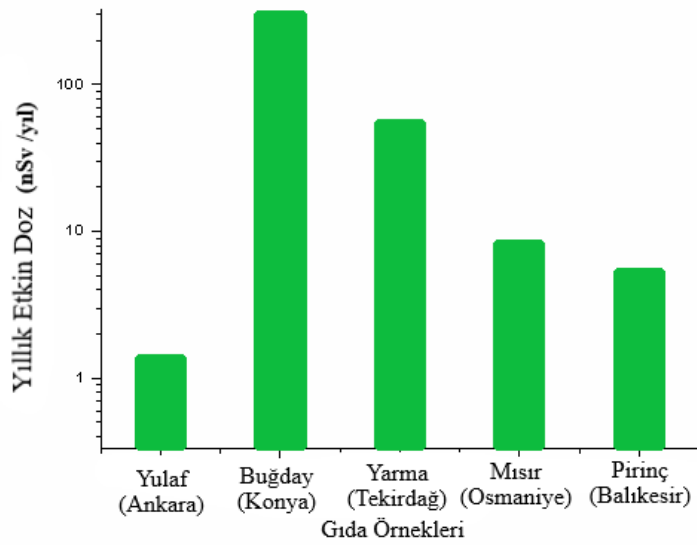
4.3.1. Hububat Ürünlerindeki Yıllık Etkin Dozlar

Seçilen 5 farklı hububat ürününün analizi sonucunda ²³⁸U, ²³²Th ve ⁴⁰K aktivite konsantrasyonları belirlenmiştir. Belirlenen aktiviteye bağlı olarak doğal radyoaktif çekirdeklere hesaplanan yıllık etkin dozlar Şekil 4.14 ile verilmiştir.



Şekil 4.14: ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K Doğal Radyoaktif Çekirdekler için Hesaplanan Yıllık Etkin Dozlar (μSv /yıl).

Seçilen 5 farklı hububat ürününün analizi sonucunda belirlenen ^{137}Cs aktivite konsantrasyonundan kaynaklanan yapay radyoaktif çekirdeklerde hesaplanan yıllık etkin dozlar Şekil 4.15 ile gösterilmiştir.



Şekil 4.15: ^{137}Cs Yapay Radyoaktif Çekirdekler için Hesaplanan Yıllık Etkin Dozlar (nSv /yıl).

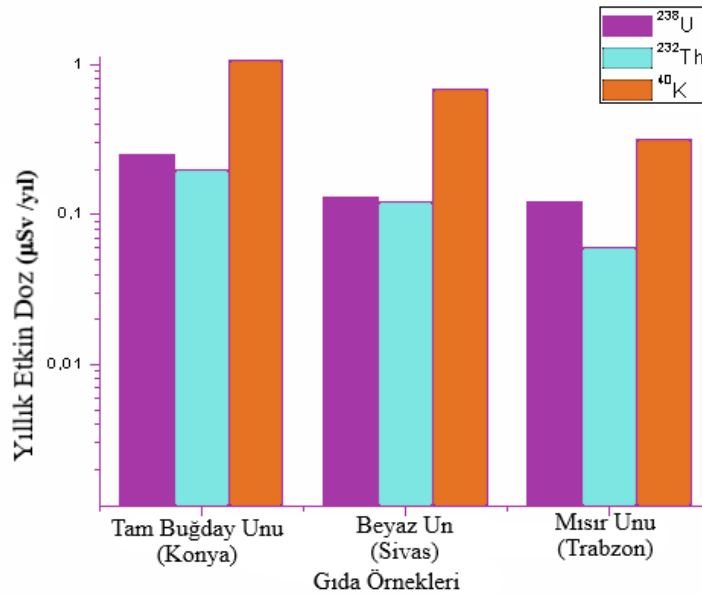
Tablo 4.15 ile hesaplanan en düşük, en yüksek ve ortalama yıllık etkin dozlar gösterilmiştir.

Tablo 4.16: Hububat Ürünlerine Genel Bakış.

Gıda Türü	Radyoaktivite Seviyesi	^{238}U ($\mu\text{Sv}/\text{yıl}$)	^{232}Th ($\mu\text{Sv}/\text{yıl}$)	^{40}K ($\mu\text{Sv}/\text{yıl}$)	^{137}Cs ($\text{nSv}/\text{yıl}$)
Hububat	En Düşük	0,16 (Yulaf)	0,13 (Yulaf)	0,74 (Yulaf)	1,40 (Yulaf)
	En Yüksek	36,52 (Buğday)	18,52 (Yarma)	138,08 (Buğday)	308,69 (Buğday)
	Ortalama	11,50	6,87	54,85	76,01

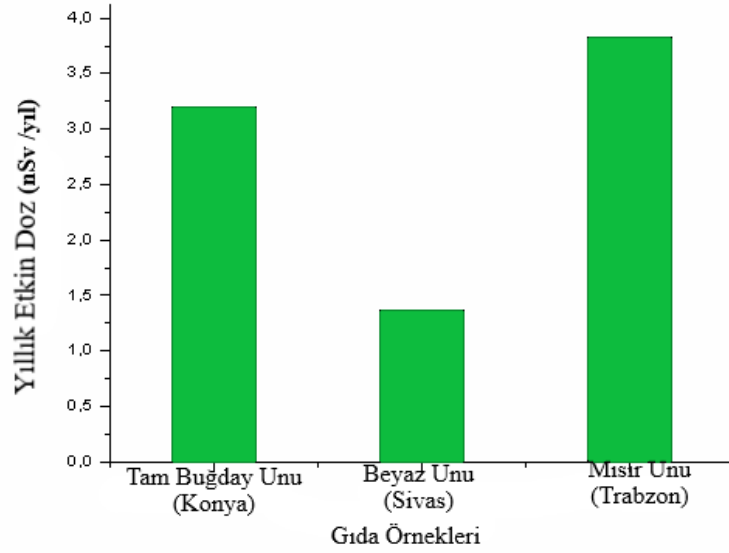
4.3.2. Un Örneklerindeki Yıllık Etkin Dozlar

Seçilen 3 farklı un örneğinin analizi sonucunda ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K aktivite konsantrasyonları belirlenmiştir. Belirlenen aktiviteye bağlı olarak doğal radyoaktif çekirdeklere hesaplanan yıllık etkin dozlar Şekil 4.16 ile gösterilmiştir.



Şekil 4.16: ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K Doğal Radyoaktif Çekirdekler için Hesaplanan Yıllık Etkin Dozlar ($\mu\text{Sv}/\text{yıl}$).

Seçilen 3 farklı un örneğinin analizi sonucunda belirlenen ^{137}Cs aktivite konsantrasyonundan kaynaklanan yapay radyoaktif çekirdeklerde hesaplanan yıllık etkin dozlar Şekil 4.17 ile gösterilmiştir.



Şekil 4.17: ^{137}Cs Yapay Radyoaktif Çekirdekler için Hesaplanan Yıllık Etkin Dozlar (nSv /yıl).

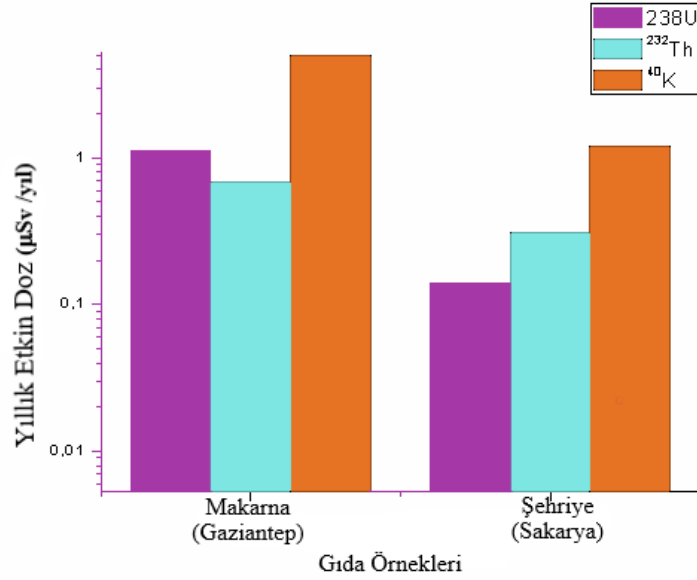
Tablo 4.16 ile hesaplanan en düşük, en yüksek ve ortalama yıllık etkin dozlar gösterilmiştir.

Tablo 4.17: Un Örneklerine Genel Bakış.

Gıda Türü	Radyoaktivite Seviyesi	^{238}U ($\mu\text{Sv}/\text{yıl}$)	^{232}Th ($\mu\text{Sv}/\text{yıl}$)	^{40}K ($\mu\text{Sv}/\text{yıl}$)	^{137}Cs (nSv/yıl)
Un	En Düşük	0,12 (Mısır Unu)	0,06 (Mısır Unu)	0,32 (Mısır Unu)	1,36 (Beyaz Un)
	En Yüksek	0,25 (Tam Buğday Unu)	0,20 (Tam Buğday Unu)	1,06 (Tam Buğday Unu)	3,83 (Mısır Unu)
	Ortalama	0,16	0,12	0,69	2,79

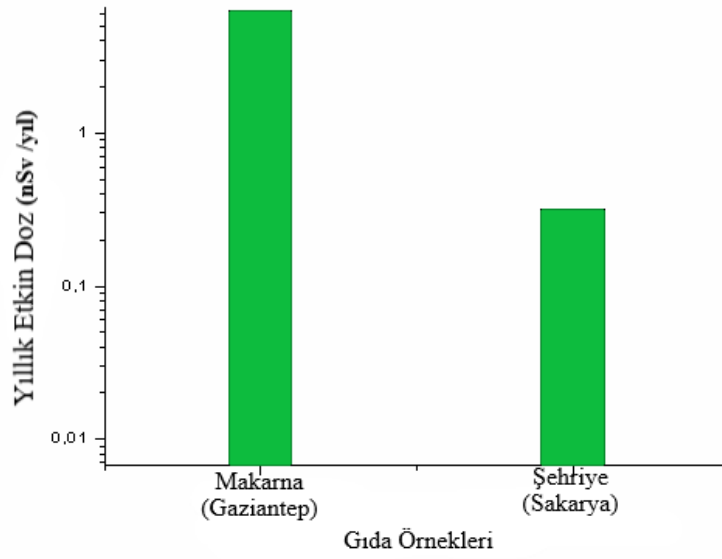
4.3.3. Unlu Mamüllerdeki Yıllık Etkin Dozlar

Seçilen 2 farklı unlu mamülün analizi sonucunda ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K aktivite konsantrasyonları belirlenmiştir. Belirlenen aktiviteye bağlı olarak doğal radyoaktif çekirdeklerde hesaplanan yıllık etkin dozlar Şekil 4.18 ile gösterilmiştir.



Şekil 4.18: ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K Doğal Radyoaktif Çekirdekler için Hesaplanan Yıllık Etkin Dozlar (μSv /yıl).

Seçilen 2 farklı unlu mamülün analizi sonucunda belirlenen ^{137}Cs aktivite konsantrasyonundan kaynaklanan yapay radyoaktif çekirdeklerde hesaplanan yıllık etkin dozlar Şekil 4.19 ile gösterilmiştir.



Şekil 4.19: ¹³⁷Cs Yapay Radyoaktif Çekirdekler için Hesaplanan Yıllık Etkin Dozlar (nSv /yıl).

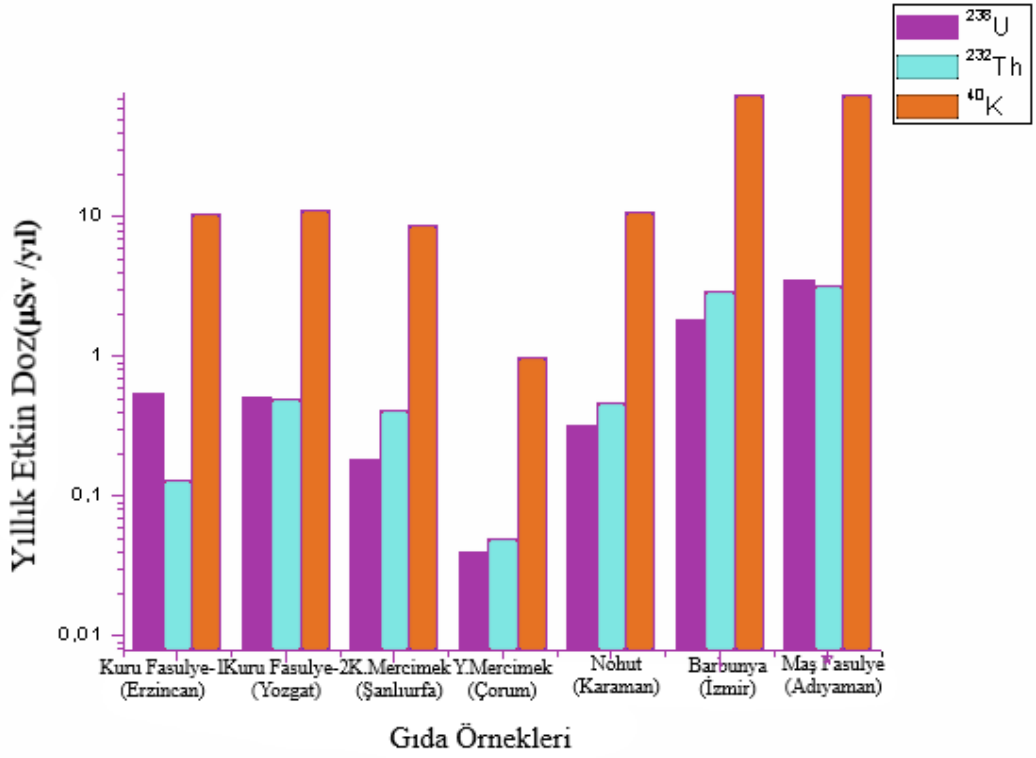
Tablo 4.17 ile hesaplanan en düşük, en yüksek ve ortalama yıllık etkin dozlar gösterilmiştir.

Tablo 4.18: Unlu Mamüllere Genel Bakış.

Gıda Türü	Radyoaktivite Seviyesi	²³⁸ U (µSv/yıl)	²³² Th (µSv/yıl)	⁴⁰ K (µSv/yıl)	¹³⁷ Cs (nSv/yıl)
Unlu Mamüller	En Düşük	0,14 (Şehriye)	0,31 (Şehriye)	0,19 (Şehriye)	1,32 (Şehriye)
	En Yüksek	1,11 (Makarna)	0,68 (Makarna)	4,95 (Makarna)	6,28 (Makarna)
	Ortalama	0,62	0,49	3,07	3,30

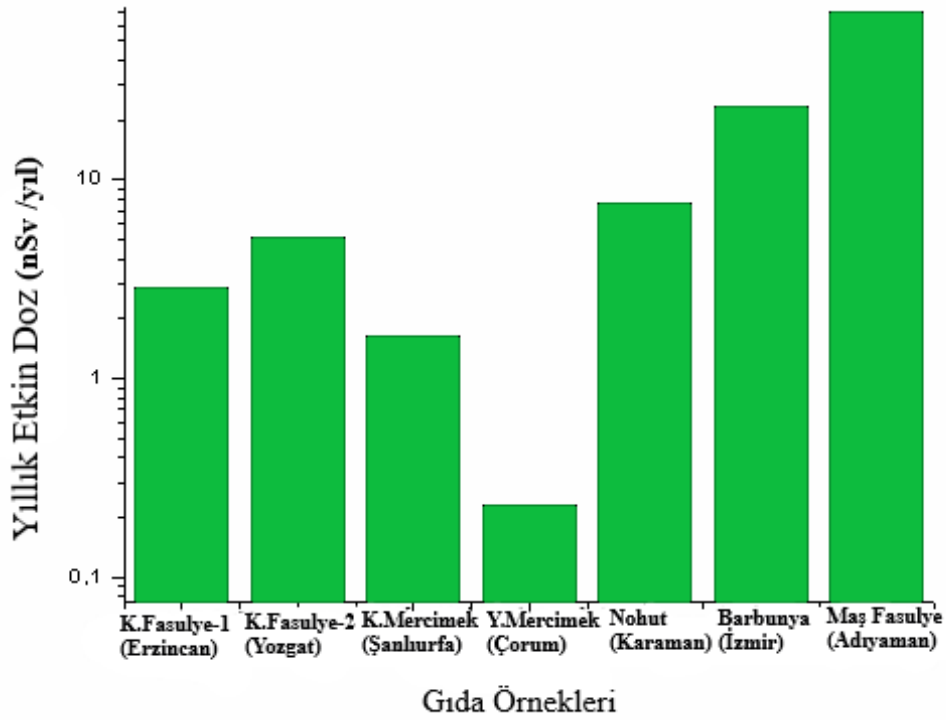
4.3.4. Bakliyat Ürünlerindeki Yıllık Etkin Dozlar

Seçilen 7 farklı bakliyat ürününün analizi sonucunda ²³⁸U, ²³²Th ve ⁴⁰K aktivite konsantrasyonları belirlenmiştir. Belirlenen aktiviteye bağlı olarak doğal radyoaktif çekirdeklerde hesaplanan yıllık etkin dozlar Şekil 4.20 ile gösterilmiştir.



Şekil 4.20: ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K Doğal Radyoaktif Çekirdekler için Hesaplanan Yıllık Etkin Dozlar (μSv /yıl).

Seçilen 7 farklı bakliyat örneğinin analizi sonucunda belirlenen ^{137}Cs aktivite konsantrasyonundan kaynaklanan yapay radyoaktif çekirdeklerde hesaplanan yıllık etkin dozlar Şekil 4.21 ile gösterilmiştir.



Şekil 4.21: ¹³⁷Cs Yapay Radyoaktif Çekirdekler için Hesaplanan Yıllık Etkin Dozlar (nSv /yıl).

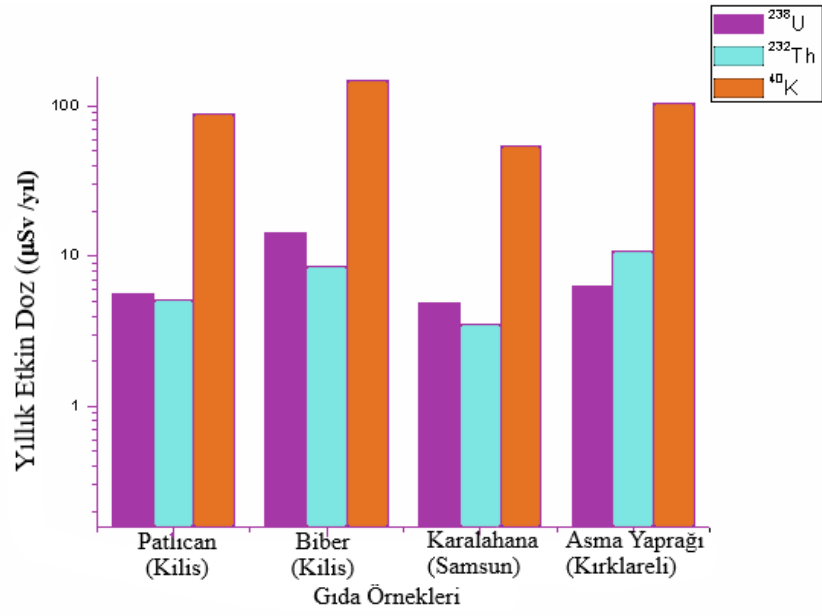
Tablo 4.18 ile hesaplanan en düşük, en yüksek ve ortalama yıllık etkin dozlar gösterilmiştir.

Tablo 4.19: Bakliyat Ürünlerine Genel Bakış.

Gıda Türü	Radyoaktivite Seviyesi	²³⁸ U (µSv/yıl)	²³² Th (µSv/yıl)	⁴⁰ K (µSv/yıl)	¹³⁷ Cs (nSv/yıl)
Bakliyat	En Düşük	0,04 (Yeşil Mercimek)	0,05 (Yeşil Mercimek)	0,98 (Yeşil Mercimek)	0,23 (Yeşil Mercimek)
	En Yüksek	3,46 (Maş Fasulye)	3,15 (Maş Fasulye)	73,29 (Maş Fasulye)	69,74 (Maş Fasulye)
	Ortalama	0,98	1,09	26,91	15,78

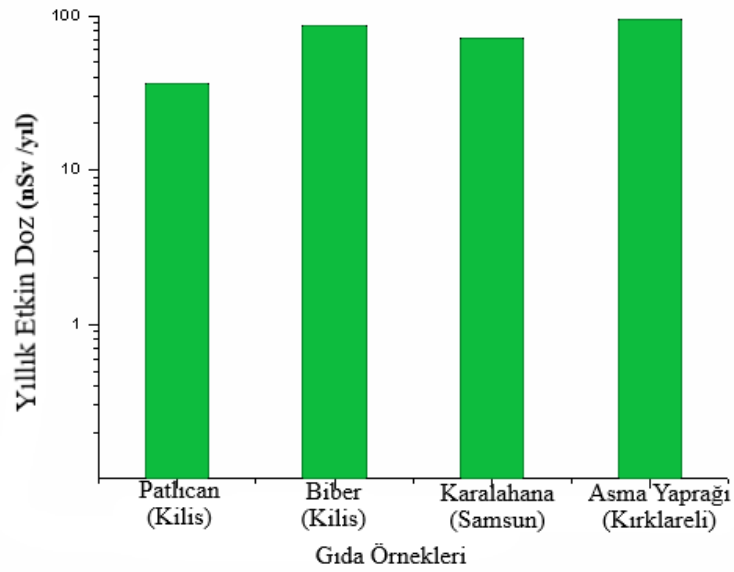
4.3.5. Sebzelerde Yıllık Etkin Dozlar

Seçilen 4 farklı sebze örneğinin analizi sonucunda ²³⁸U, ²³²Th ve ⁴⁰K aktivite konsantrasyonları belirlenmiştir. Belirlenen aktiviteye bağlı olarak doğal radyoaktif çekirdeklerde hesaplanan yıllık etkin dozlar Şekil 4.22 ile gösterilmiştir.



Şekil 4.22: ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K Doğal Radyoaktif Çekirdekler için Hesaplanan Yıllık Etkin Dozlar ($\mu\text{Sv}/\text{yıl}$).

Seçilen 4 farklı sebze örneğinin analizi sonucunda belirlenen ^{137}Cs aktivite konsantrasyonundan kaynaklanan yapay radyoaktif çekirdeklerde hesaplanan yıllık etkin dozlar Şekil 4.23 ile gösterilmiştir.



Şekil 4.23: ^{137}Cs Yapay Radyoaktif Çekirdekler için Hesaplanan Yıllık Etkin Dozlar ($\text{nSv}/\text{yıl}$).

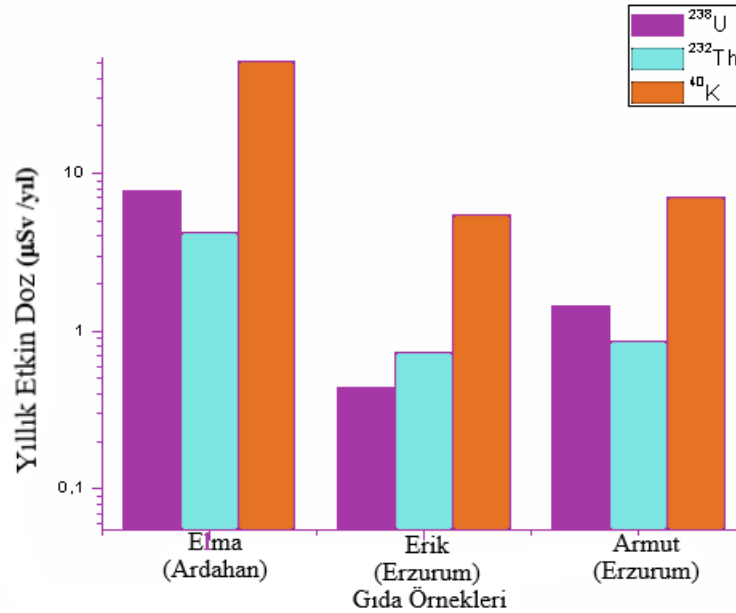
Tablo 4.19 ile hesaplanan en düşük, en yüksek ve ortalama yıllık etkin dozlar gösterilmiştir.

Tablo 4.20: Sebze Örneklerine Genel Bakış.

Gıda Türü	Radyoaktivite Seviyesi	^{238}U ($\mu\text{Sv/yıl}$)	^{232}Th ($\mu\text{Sv/yıl}$)	^{40}K ($\mu\text{Sv/yıl}$)	^{137}Cs (nSv/yıl)
Sebze	En Düşük	4,90 (Karalahana)	3,51 (Karalahana)	54,50 (Karalahana)	36,68 (Patlıcan)
	En Yüksek	14,37 (Biber)	10,75 (Asma Yaprağı)	146,74 (Biber)	94,11 (Asma Yaprağı)
	Ortalama	7,82	6,99	98,40	72,45

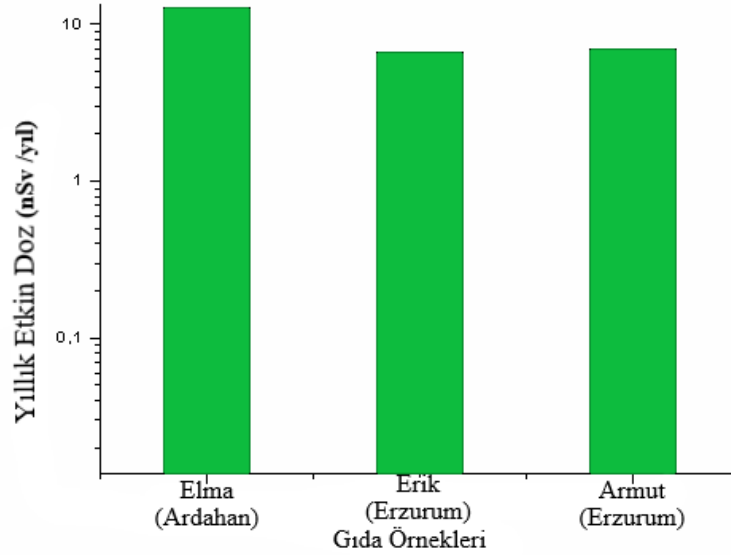
4.3.6. Meyvelerde Yıllık Etkin Dozlar

Seçilen 3 farklı meyve örneğinin analizi sonucunda ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K aktivite konsantrasyonları belirlenmiştir. Belirlenen aktiviteye bağlı olarak doğal radyoaktif çekirdeklere hesaplanan yıllık etkin dozlar Şekil 4.24 ile gösterilmiştir.



Şekil 4.24: ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K Doğal Radyoaktif Çekirdekler için Hesaplanan Yıllık Etkin Dozlar ($\mu\text{Sv}/\text{yıl}$).

Seçilen 3 farklı meyve örneğinin analizi sonucunda belirlenen ^{137}Cs aktivite konsantrasyonundan kaynaklanan yapay radyoaktif çekirdeklerde hesaplanan yıllık etkin dozlar Şekil 4.25 ile gösterilmiştir.



Şekil 4.25: ^{137}Cs Yapay Radyoaktif Çekirdekler için Hesaplanan Yıllık Etkin Dozlar (nSv /yıl).

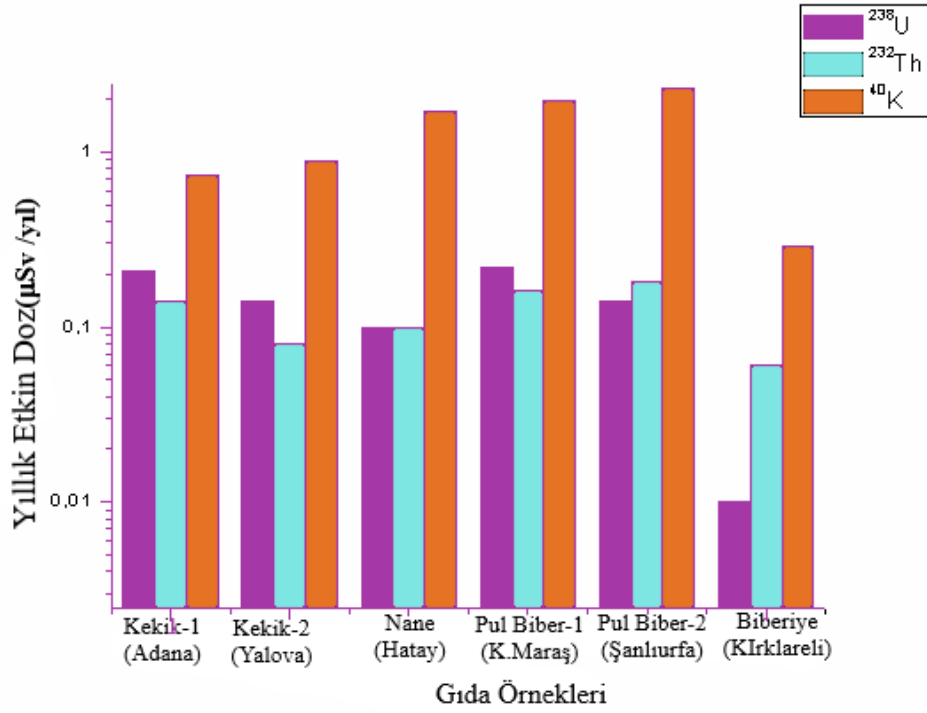
Tablo 4.20 ile hesaplanan en düşük, en yüksek ve ortalama yıllık etkin dozlar gösterilmiştir.

Tablo 4.21: Meyve Örneklerine Genel Bakış.

Gıda Türü	Radyoaktivite Seviyesi	^{238}U ($\mu\text{Sv}/\text{yıl}$)	^{232}Th ($\mu\text{Sv}/\text{yıl}$)	^{40}K ($\mu\text{Sv}/\text{yıl}$)	^{137}Cs (nSv/yıl)
Meyve	En Düşük	0,44 (Erik)	0,74 (Erik)	5,43 (Erik)	6,68 (Erik)
	En Yüksek	7,82 (Elma)	4,21 (Elma)	51,09 (Elma)	12,72 (Elma)
	Ortalama	3,23	1,93	21,18	8,75

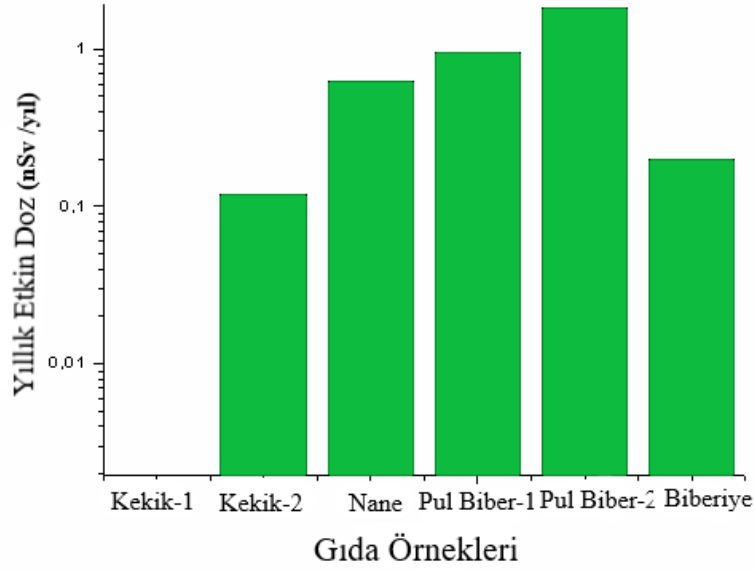
4.3.7. Baharatlarda Yıllık Etkin Dozlar

Seçilen 6 farklı baharat örneğinin analizi sonucunda ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K aktivite konsantrasyonları belirlenmiştir. Belirlenen aktiviteye bağlı olarak doğal radyoaktif çekirdeklerde hesaplanan yıllık etkin dozlar Şekil 4.26 ile gösterilmiştir.



Şekil 4.26: ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K Doğal Radyoaktif Çekirdekler için Hesaplanan Yıllık Etkin Dozlar (μSv /yıl).

Seçilen 6 farklı baharat örneğinin analizi sonucunda belirlenen ^{137}Cs aktivite konsantrasyonundan kaynaklanan yapay radyoaktif çekirdeklerde hesaplanan yıllık etkin dozlar Şekil 4.27 ile gösterilmiştir.



Şekil 4.27: ¹³⁷Cs Yapay Radyoaktif Çekirdekler için Hesaplanan Yıllık Etkin Dozlar (nSv /yıl).

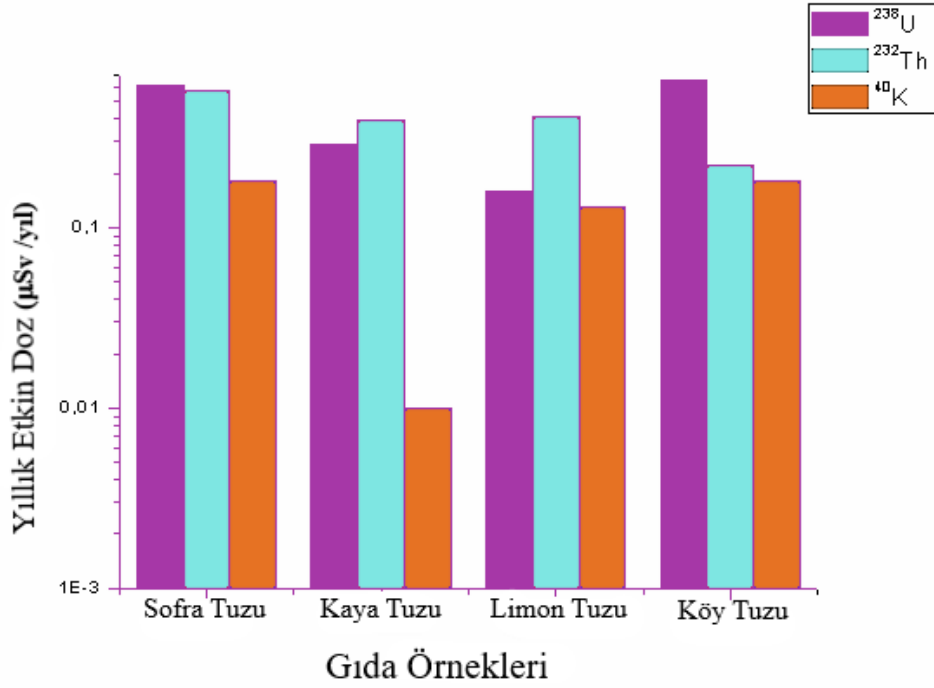
Tablo 4.21 ile hesaplanan en düşük, en yüksek ve ortalama yıllık etkin dozlar gösterilmiştir.

Tablo 4.22: Baharat Örneklerine Genel Bakış.

Gıda Türü	Radyoaktivite Seviyesi	²³⁸ U (µSv/yıl)	²³² Th (µSv/yıl)	⁴⁰ K (µSv/yıl)	¹³⁷ Cs (nSv/yıl)
Baharat	En Düşük	0,01 (Biberiye)	0,06 (Biberiye)	0,29 (Biberiye)	0 (Kekik-1)
	En Yüksek	0,22 (Pul Biber-1)	0,18 (Pul Biber-2)	2,30 (Pul Biber-2)	1,82 (Pul Biber-2)
	Ortalama	0,13	0,12	1,30	0,62

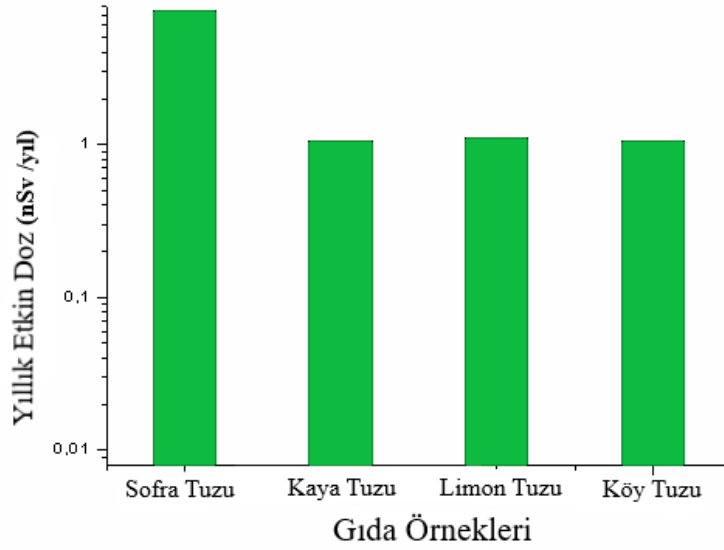
4.3.8. Tuzlarda Yıllık Etkin Dozlar

Seçilen 4 farklı tuz örneğinin analizi sonucunda ²³⁸U, ²³²Th ve ⁴⁰K aktivite konsantrasyonları belirlenmiştir. Belirlenen aktiviteye bağlı olarak doğal radyoaktif çekirdeklerde hesaplanan yıllık etkin dozlar Şekil 4.28 ile gösterilmiştir.



Şekil 4.28: ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K Doğal Radyoaktif Çekirdekler için Hesaplanan Yıllık Etkin Dozlar (μSv /yıl).

Seçilen 4 farklı tuz örneğinin analizi sonucunda belirlenen ^{137}Cs aktivite konsantrasyonundan kaynaklanan yapay radyoaktif çekirdeklerde hesaplanan yıllık etkin dozlar Şekil 4.29 ile gösterilmiştir.



Şekil 4.29: ^{137}Cs Yapay Radyoaktif Çekirdekler için Hesaplanan Yıllık Etkin Dozlar (nSv /yıl).

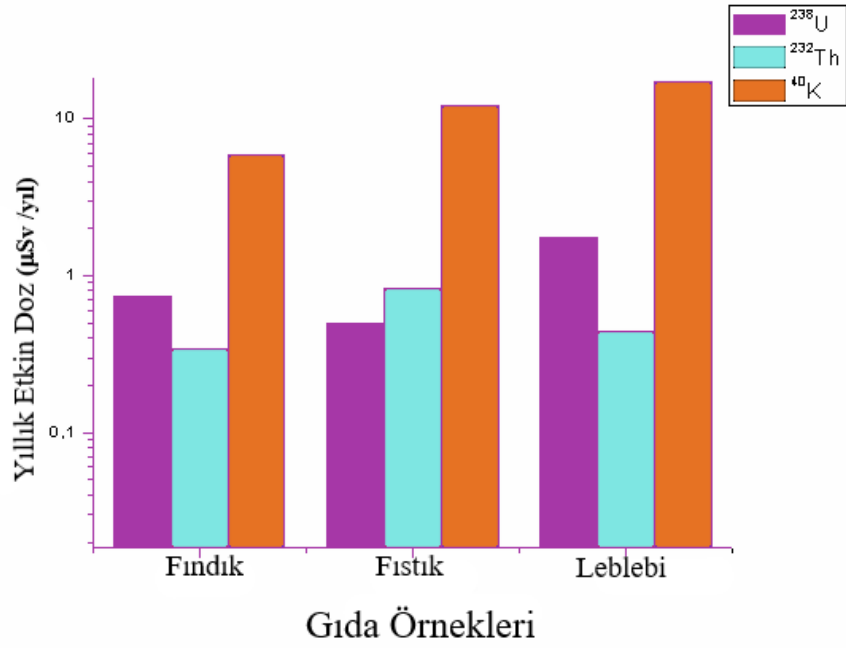
Tablo 4.22 ile hesaplanan en düşük, en yüksek ve ortalama yıllık etkin dozlar gösterilmiştir.

Tablo 4.23: Tuz Örneklerine Genel Bakış.

Gıda Türü	Radyoaktivite Seviyesi	^{238}U ($\mu\text{Sv}/\text{yıl}$)	^{232}Th ($\mu\text{Sv}/\text{yıl}$)	^{40}K ($\mu\text{Sv}/\text{yıl}$)	^{137}Cs (nSv/yıl)
Tuz	En Düşük	0,16 (Limon Tuzu)	0,22 (Köy Tuzu)	0,01 (Kaya Tuzu)	1,06 (Kaya Tuzu Köy Tuzu)
	En Yüksek	0,65 (Köy Tuzu)	0,57 (Sofra Tuzu)	0,18 (Sofra Tuzu Köy Tuzu)	7,45 (Kaya Tuzu Köy Tuzu)
	Ortalama	0,42	0,39	0,12	2,66

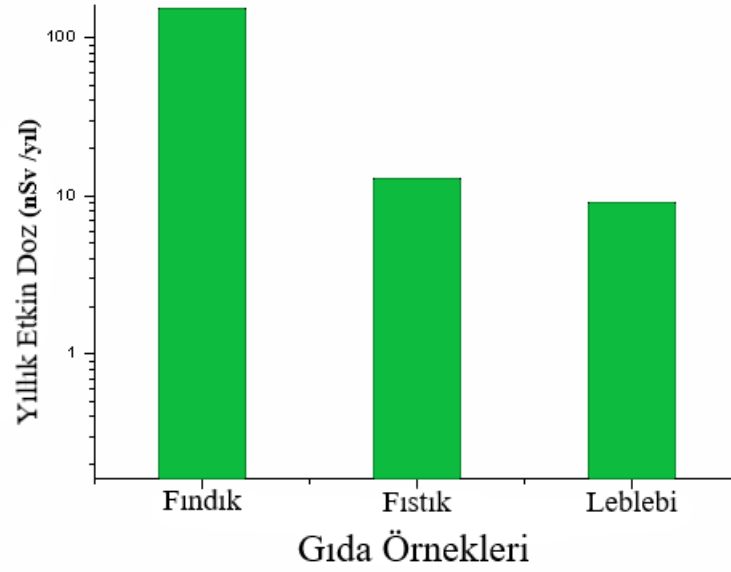
4.3.9. Kuruyemiş Yıllık Etkin Dozlar

Seçilen 3 farklı kuruyemiş örneğinin analizi sonucunda ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K aktivite konsantrasyonları belirlenmiştir. Belirlenen aktivite ile doğal radyoaktif çekirdeklerde hesaplanan yıllık etkin dozlar Şekil 4.30 ile gösterilmiştir.



Şekil 4.30: ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K Doğal Radyoaktif Çekirdekler için Hesaplanan Yıllık Etkin Dozlar (μSv /yıl).

Seçilen 4 farklı tuz örneğinin analizi sonucunda belirlenen ^{137}Cs aktivite konsantrasyonundan kaynaklanan yapay radyoaktif çekirdeklerde hesaplanan yıllık etkin dozlar Şekil 4.31 ile gösterilmiştir.



Şekil 4.31: ^{137}Cs Yapay Radyoaktif Çekirdekler için Hesaplanan Yıllık Etkin Dozlar (nSv /yıl).

Tablo 4.23 ile hesaplanan en düşük, en yüksek ve ortalama yıllık etkin dozlar gösterilmiştir.

Tablo 4.24: Kuruyemiş Örneklerine Genel Bakış.

Gıda Türü	Radyoaktivite Seviyesi	^{238}U ($\mu\text{Sv}/\text{yıl}$)	^{232}Th ($\mu\text{Sv}/\text{yıl}$)	^{40}K ($\mu\text{Sv}/\text{yıl}$)	^{137}Cs (nSv/yıl)
Kuruyemiş	En Düşük	0,50 (Fıstık)	0,34 (Fındık)	5,90 (Fındık)	9,06 (Leblebi)
	En Yüksek	1,74 (Leblebi)	0,83 (Fıstık)	17,17 (Leblebi)	151,74 (Fındık)
	Ortalama	0,99	0,53	11,76	57,89

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Yaptığımız bu çalışmada Türkiye’de farklı bölgelerde yetiştirilen 9 türdeki 37 adet gıda örneği İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi Nükleer Fizik Gama Spektroskopisi Laboratuvarında HPGe dedektörü kullanılarak analiz edilmiştir. Seçilen gıda örneklerinde doğal radyoaktif çekirdekler olan ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K ile yapay radyoaktif çekirdek olan ^{137}Cs aktivite konsantrasyonları belirlenmiş, seçilen bu gıdaları tüketen bireylerin maruz kaldığı yıllık etkin dozlar hesaplanmış ve ulaşılan sonuçlar neticesinde insan sağlığı açısından risk yaratıp yaratmadığı belirlenmek istenmiştir.

Ortalama ^{238}U aktivite konsantrasyonları hububat, un, unlu mamüller, bakliyat, sebze, meyve, baharat, tuz ve kuruyemiş örneklerinde sırası ile 2,82 Bq/kg, 2,10 Bq/kg, 2,23 Bq/kg, 2,22 Bq/kg, 10,77 Bq/kg, 5,99 Bq/kg, 6,82 Bq/kg, 1,74 Bq/kg, ve 3,27 Bq/kg olarak belirlenmiştir.

Ortalama ^{232}Th aktivite konsantrasyonları hububat, un, unlu mamüller, bakliyat, sebze, meyve, baharat, tuz ve kuruyemiş örneklerinde sırası ile 0,42 Bq/kg, 0,29 Bq/kg, 0,51 Bq/kg, 0,43 Bq/kg, 1,75 Bq/kg, 0,96 Bq/kg, 1,55 Bq/kg, 0,31 Bq/kg, ve 0,35 Bq/kg olarak belirlenmiştir.

Ortalama ^{40}K aktivite konsantrasyonları hububat, un, unlu mamüller, bakliyat, sebze, meyve, baharat, tuz ve kuruyemiş örneklerinde sırası ile 99,83 Bq/kg, 60,35 Bq/kg, 95,04 Bq/kg, 419,12 Bq/kg, 999,475 Bq/kg, 315,60 Bq/kg, 493,89 Bq/kg, 3,66 Bq/kg, ve 263,70 Bq/kg olarak belirlenmiştir.

Ortalama ^{137}Cs aktivite konsantrasyonları hububat, un, unlu mamüller, bakliyat, sebze, meyve, baharat, tuz ve kuruyemiş örneklerinde sırası ile 0,07 Bq/kg, 0,13 Bq/kg, 0,03 Bq/kg, 0,09 Bq/kg, 0,35 Bq/kg, 0,12 Bq/kg, 0,17 Bq/kg, 0,03 Bq/kg, ve 1,13 Bq/kg olarak belirlenmiştir.

^{238}U için yıllık etkin doz değerleri hububat, un, unlu mamüller, bakliyat, sebze, meyve, baharat, tuz ve kuruyemiş örneklerinde sırası ile 11,50 $\mu\text{Sv/yıl}$, 0,16 $\mu\text{Sv/yıl}$, 0,62 $\mu\text{Sv/yıl}$, 0,98 $\mu\text{Sv/yıl}$, 7,82 $\mu\text{Sv/yıl}$, 3,23 $\mu\text{Sv/yıl}$, 0,13 $\mu\text{Sv/yıl}$, 0,42 $\mu\text{Sv/yıl}$, 0,99 $\mu\text{Sv/yıl}$ olarak belirlenmiştir.

^{232}Th için yıllık etkin doz değerleri hububat, un, unlu mamüller, bakliyat, sebze, meyve, baharat, tuz ve kuruyemiş örneklerinde sırası ile 6,87 $\mu\text{Sv/yıl}$, 0,12 $\mu\text{Sv/yıl}$, 0,49 $\mu\text{Sv/yıl}$, 1,09 $\mu\text{Sv/yıl}$, 6,99 $\mu\text{Sv/yıl}$, 1,93 $\mu\text{Sv/yıl}$, 0,12 $\mu\text{Sv/yıl}$, 0,39 $\mu\text{Sv/yıl}$, 0,53 $\mu\text{Sv/yıl}$ olarak belirlenmiştir.

^{40}K için yıllık etkin doz değerleri hububat, un, unlu mamüller, bakliyat, sebze, meyve, baharat, tuz ve kuruyemiş örneklerinde sırası ile 54,85 $\mu\text{Sv}/\text{yıl}$, 0,69 $\mu\text{Sv}/\text{yıl}$, 3,07 $\mu\text{Sv}/\text{yıl}$, 26,91 $\mu\text{Sv}/\text{yıl}$, 98,40 $\mu\text{Sv}/\text{yıl}$, 21,18 $\mu\text{Sv}/\text{yıl}$, 1,30 $\mu\text{Sv}/\text{yıl}$, 0,12 $\mu\text{Sv}/\text{yıl}$, 11,76 $\mu\text{Sv}/\text{yıl}$ olarak belirlenmiştir.

^{137}Cs için yıllık etkin doz değerleri hububat, un, unlu mamüller, bakliyat, sebze, meyve, baharat, tuz ve kuruyemiş örneklerinde sırası ile 76,01 nSv/yıl, 2,79 nSv/yıl, 3,30 nSv/yıl, 15,78 nSv/yıl, 72,45 nSv/yıl, 8,75 nSv/yıl, 0,62 nSv/yıl, 2,66 nSv/yıl, 57,89 nSv/yıl olarak belirlenmiştir.

26 Nisan 1986 günü Ukrayna'da meydana gelen Çernobil Reaktör Kazası tarihin en büyük nükleer kazasıdır [58]. Kazada açığa çıkan fisyon ürünü ^{137}Cs serpinti ile olay bölgesi civarında yayılmıştır. Türkiye bu serpintiden etkilenmiştir ve bu sebeple analiz edilen gıda örneklerinde doğal radyoaktif maddeler dışında ^{137}Cs 'a rastlanmıştır.

^{137}Cs 'un atmosferik dağılımı radyoaktif bulut hareketi ile yağış miktarına bağlı olarak bölgeden bölgeye farklılık göstermiştir. Topraktaki radyoaktivite incelemeleri sonucu yağış miktarının yoğun olduğu bölgelerin kazadan en çok etkilenen bölgeler olduğu görülmüştür [58]. Türkiye'de yağış miktarının yoğun olduğu Karadeniz bölgesi kazadan en çok etkilenen bölge olmuştur. Nitekim analiz edilen gıda örneklerinde en yüksek ^{137}Cs aktivite konsantrasyonları fındık, karalahana ve mısır unu örneklerinde sırası ile 3,20 Bq/kg, 0,65 Bq/kg ve 0,23 Bq/kg olarak ölçülmüştür. Bu gıdaların yetiştiği iller sırası ile Giresun, Samsun ve Trabzon'dur.

UNCEAR 2000 raporuna göre Dünya çapında radyoaktif maddelerin yeme yoluyla vücuda alınması sonucu maruz kalınan ortalama yıllık etkin doz değeri 300 μSv 'dir [34]. Bu çalışmada incelenen gıda örneklerinin tüketimine bağlı olarak hesaplanan yıllık etkin doz değerleri 300 μSv 'den küçüktür.

Seçilen gıda örneklerinin tüketilmesi sonucu oluşabilecek ömür boyu kanser riski $0,01 \times 10^{-4}$ ile $7,25 \times 10^{-4}$ değerleri arasında değişmiştir ve ortalama değeri $1,20 \times 10^{-4}$ dür. Gıda güvenliği için Norveç Bilim Komitesi (WKM) 2017 raporuna göre [60] gıdadaki radyoaktiviteye maruz kalma ile ilişkili olarak belirlenen risk seviyeleri ile kıyaslandığında bu tez çalışmasında hesaplanan ortalama ömür boyu kanser risk seviyesinin düşük olduğu belirlenmiştir.

Bu tez çalışması için seçilen sebze ve meyve örneklerindeki ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K ve ^{137}Cs ortalama aktivite konsantrasyonları ile yıllık etkin doz değerlerinin başka şehir ve ülkelerde yapılan çalışmalarla karşılaştırılması Tablo 5.1’de verilmiştir.

Tablo 5.1: Aktivite Konsantrasyonu Ve Yıllık Etkin Doz Değerlerinin Diğer Ülkelerle Kıyaslanması

Gıda Türü	^{238}U (Bq/kg)	^{232}Th (Bq/kg)	^{40}K (Bq/kg)	^{137}Cs (Bq/kg)	H ($\mu\text{Sv/yıl}$)	Yer	Referans
Sebze	0,64 ± 0,26	0,65±0,14	13,98±1,22	0,54±0,04	20	Elazığ	[5]
	2,19±1,38	46,73±0,27	729,85±1,44	-	15,89	Nijerya	[61]
	3,55±0,46	1,22±0,41	469,29±23,45	1,92±0,71	46,15	Rize	[7]
	0,32±0,13	0,14±0,12	131,03±5,22	-	4,11	Mısır	[11]
	10,77±0,97	1,75±0,33	999,475±19,63	0,35±0,10	28,32	Türkiye	Bu Tez Çalışması
Meyve	1,52±0,34	0,98±0,23	18,66±1,13	0,59±0,16	30,55	Elazığ	[5]
	1,39±0,16	0,90±0,13	121,82±2,49	1,08±0,08	7,83	Rize	[7]
	0,11±0,05	0,06±0,05	79,97±3,02		3,46	Mısır	[11]
	5,99±0,42	0,96±0,14	315,60±7,2	0,12±0,03	6,58	Türkiye	Bu Tez Çalışması

^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K toprağın yapısında kendiliğinden doğal olarak bulunmaktadır ve bölgeden bölgeye farklılık göstermektedir. Tablo 5.1’de görüleceği gibi bu tez çalışması için seçilen sebze ve meyve örneklerinde belirlenen ^{238}U ve ^{40}K aktivitesi en yüksektir. ^{40}K aktivitesini fazla olması seçilen sebze ve meyve örneklerinin ekildiği bölgelerde gübre kullanıldığını düşündürmektedir. Çünkü gübrenin doğal yapısında ^{40}K bulunmaktadır. Kullanıldığında toprakta ve toprağa ekildiğinde ürünlerde ^{40}K aktivitesi fazla olabilmektedir.

Diğer çalışmalar ile kıyaslandığında Doğal radyoaktif çekirdeklerin yanı sıra serpinti ile yayılan fisyon ürünlerinden ^{137}Cs aktivitesi, bu tez çalışması kapsamında seçilen sebze ve meyve örneklerinde en düşüktür.

Nihayetinde radyasyonu hayatımızdan tamamen çıkartmamız mümkün değildir. Ancak maruz kalınan radyasyon dozunun belirlenmesi, insan sağlığı açısından risk yaratıp yaratmadığının belirlenmesi ve kontrol edilebilmesi açısından oldukça önemlidir. Radyasyonun insan sağlığı açısından kanser gibi büyük etkileri olabilmektedir. Kişide maruz kalındıktan sonra bu etkiler görüleceği gibi DNA zincirinde hasar bırakarak sonraki kuşaklarda da etkisini gösterebilmektedir.

Bu tez çalışmasının çeşitli bölgelerde yetişen gıdalarda belirlenen radyasyon dozları ile örnek sayıları artırılarak daha kapsamlı bir çalışma yapılabilir.



KAYNAKLAR

- [1]. Erdoğan M.G., 2017, *Muğla İl Merkezindeki Evlerde Radon Konsantrasyonunun ve Denize Kıyısı Olan İlçelerinde Çevresel Gama Radyasyonunun Ölçümü*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi.
- [2]. Mızrak E., 2010, *Çevresel Radyoaktivite Ölçüm Amaçlı Gama Spektroskopi Sisteminin Kalibrasyonu ve Test Ölçümlerinin Yapılması*, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi.
- [3]. Altıkulaç A., 2014, *Samsun ve İlçelerine Ait Çevresel Örneklerdeki (Yüzey Toprağı, Su, Mantar ve Karalahana) Doğal Radyoaktivitenin Ölçülmesi ve Bu Radyoaktiviteden Kaynaklanan Yıllık Etkin Dozun Belirlenmesi*, Doktora Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi.
- [4]. Henriksen T. and Maillie H.D., 2003, *Radiation and Health*, Taylor & Francis, London and New York, ISBN 0-203-16635-3.
- [5]. Cambazoğlu C. and Doğru M., 2012, A Preliminary Study On ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K and ^{137}Cs Activity Concentrations in Vegetables and Fruits Frequently Consumed by Inhabitants of Elazığ Region, Turkey, *J. Radioanal Nucl. Chem.*, 295, 1245–1249.
- [6]. Keser R., Korkmaz Görür F., Akçay N. and Okumuşoğlu N.T., 2011, Radionuclide Concentration in Tea, Cabbage, Orange, Kiwi and Soil and Lifetime Cancer Risk Due to Gamma Radioactivity in Rize, Turkey, *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 91, 969-1154.
- [7]. Korkmaz Görür F., Keser R., Akçay N., Dizman S., As N. and Okumuşoğlu N. T., 2011, Radioactivity and Heavy Metal Concentrations in Food Samples from Rize, Turkey, *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 92, 203-444.
- [8]. Onoja R.A., Onoja R.O., Idoko E.E. and Ogbah E., 2017, Determination of Annual Effective Doses from Radionuclide's Due to Intake of Fruits from Bulsa Farms, Chikun L.G.A Of Kaduna State, Nigeria, *Research Journal of Agriculture and Environmental Management*, 6(4), 067-073.
- [9]. Çevik U., Çelik N., Çelik A., Damla N. and Coşkunçelebi K., 2009, Radioactivity and Heavy Metal Levels in Hazelnut Growing in The Eastern Black Sea Region of Turkey, *Food and Chemical Toxicology*, 47 (2009), 2351–2355.
- [10]. Desideri D., Assunta Meli M. and Roselli C., 2010, Natural and Artificial Radioactivity Determination of Some Medicinal Plants, *Journal of Environmental Radioactivity*, 101 (2010) 751-756.
- [11]. Harb S., 2015, Natural Radioactivity Concentration and Annual Effective Dose in Selected Vegetables and Fruits, *Journal of Nuclear and Particle Physics*, 5(3), 70-73.
- [12]. Kant K., Gupta R., Kumari R., Gupta N. and Garg M., 2015, Natural Radioactivity in Indian Vegetation Samples, *International Journal of Radiation Research*, 13(2), 143-150.

- [13]. Karataşlı M. and Özer T., 2017, Osmaniye’de Yetişen Yer Fıstığının Radyasyon Aktivitesinin İncelenmesi, *Süleyman Demirel University Journal of Natural and Applied Sciences*, 21,3.
- [14]. Eke C., 2017, Bazı Ticari Tuz Örneklerinde Doğal ve Yapay Radyonüklitlerin Aktivite Konsantrasyonlarının Belirlenmesi, *Sakarya University Journal Of Science*, 21 (6), 1422-1433.
- [15]. Santos E.E., Lauria D.C., Amaral E.C.S. and Rochedo E.R., 2002, Daily İngestion of ^{232}Th , ^{238}U , ^{226}Ra , ^{228}Ra and ^{210}Pb in Vegetables by İnhabitants of Rio de Janeiro City, *Journal of Environmental Radioactivity*, 62, 1,75-86.
- [16]. Harb S.R.M., 2015, Natural Radioactivity Concentrations in Some Medicinal Plants and Annual Committed Effective Dose from Their Consumption, *Radiation Protection and Environment*, 38,1, 2.
- [17]. <https://courses.ecampus.oregonstate.edu/ne581/three/index2.htm> [Ziyaret Tarihi: 23 Nisan 2018].
- [18]. Özyurt O., 2015, *Türkiye’de Üretilen Granitlerin Gama Ve Nötronları Zayıflatma Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [19]. http://www.who.int/ionizing_radiation/about/what_is_ir/en/ [Ziyaret Tarihi:18 Nisan 2018].
- [20]. Asaduzzaman K., 2017, *Natural Radioactivity and Heavy Metal Pollutants In Staple Foodstuff and Human Teeth Collected from Selected Areas in Peninsular Malaysia*, Doktora Tezi, Faculty of Science University of Malaya Kuala Lumpur.
- [21]. Magill J., Galy J., 2005, *Radioactivity Radionuclides Radiation*, Springer Berlin Heidelberg NewYork, ISBN 3-540-21116-0.
- [22]. <https://radyasyon17.wordpress.com/tag/parcacikli-radyasyon/> [Ziyaret Tarihi:18 Nisan 2018].
- [23]. Krane K. S., 2001, *Nükleer Fizik*, Basar Sarer, 1. Cilt, Palme Yayıncılık, Ankara.
- [24]. <http://www.taek.gov.tr/ogrenci/r02.htm> [Ziyaret Tarihi: 18 Nisan 2018].
- [25]. <http://www.taek.gov.tr/tr/sik-sorulan-sorular/136-nukleer-enerji-ve-nukleer-reaktorler-sss/936-notron-nedir-ve-nasil-elde-edilir.html> [Ziyaret Tarihi 29 Kasım2018].
- [26]. http://www.zamandayolculuk.com/html-3/em_spektrum.htm [Ziyaret Tarihi: 25 Kasım 2018].
- [27]. L’Annunziata, M.F., 2007, *Radioactivity Introduction and History*, First Edition, Elsevier, 2 p.
- [28]. <http://www.uralakbulut.com.tr/wp-content/uploads/2009/11/radyoaktivite.pdf> [Ziyaret Tarihi: 8 Nisan 2018].

- [29]. Lawson R., 1999, *An Introduction to Radioactivity*, Nuclear Medicine Department Manchester Royal Infirmary.
- [30]. Hafizoğlu N., 2012, *Kütahya İli Ve İlçelerinde Çevresel Gama Radyasyonu Ölçümü*, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi.
- [31]. El-Shaer M.Y., 2015, *Medical Effects of Radiation Interactions*, Yüksek Lisans Tezi, Islamic University of Gaza.
- [32]. <http://www.radiationanswers.org/radiation-sources-uses/natural-radiation.html> [Ziyaret Tarihi: 4 Mayıs 2018].
- [33]. <http://www.taek.gov.tr/tr/2016-06-09-00-43-46/1087-dogal-radyasyon-kaynaklari.html> [Ziyaret Tarihi: 4 Mayıs 2018].
- [34]. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), 2000, *Sources and effects of ionizing radiation*, 2000 Report, New York, USA.
- [35]. http://www.cygm.gov.tr/cygm/files/guncelbelgeler/radyasyon_olcum_sunum.pdf [Ziyaret Tarihi: 17 Kasım 2018].
- [36]. <https://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/glossary/terrestrial-radiation.html> [Ziyaret Tarihi: 7 Mayıs 2018].
- [37]. http://nuclearsafety.gc.ca/eng/resources/radiation/introduction-to-radiation/types-and-sources-of-radiation.cfm#terrestrial_radiation [Ziyaret Tarihi: 8 Mayıs 2018].
- [38]. <http://www.taek.gov.tr/tr/2016-06-09-00-43-46/1084-yapay-radyasyon-kaynaklari.html> [Ziyaret Tarihi: 8 Mayıs 2018].
- [39]. http://nuclearsafety.gc.ca/eng/resources/radiation/introduction-to-radiation/types-and-sources-of-radiation.cfm#terrestrial_radiation [Ziyaret Tarihi: 8 Mayıs 2018].
- [40]. Arslan N., Radyasyonun Biyolojik Sistemler Üzerine Etkileri, 2017, *Nuclear Medicine Seminars*, 3:178-183, DOI:10.4274/nts.2017.019.
- [41]. World Health Organization (WHO), 2011, *Nuclear Accidents and Radioactive Contamination of Foods*, Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- [42]. <https://www.iaea.org/newscenter/news/natural-radioactivity-in-food-experts-discuss-harmonizing-international-standards> [Ziyaret Tarihi: 17 Kasım 2018].
- [43]. www.cfs.gov.hk/english/programme/programme_rafs/programme_rafs_fc_01_30_Q&A_2.html [Ziyaret Tarihi: 17 Kasım 2018].
- [44]. <http://www-naweb.iaea.org/nafa/faqs-food-agriculture.html> [Ziyaret Tarihi: 17 Kasım 2018].
- [45]. http://www.radioactivity.eu.com/site/pages/Radioactive_Series.htm [Ziyaret Tarihi: 8 Mayıs 2018].

- [46]. Podgorsak E. B., 2010, *Radiation Physics for Medical Physicists*, Springer Heidelberg Dordrecht London New York, ISBN 978-3-642-00874-0.
- [47]. Turner J.E., 2007, *Atoms, Radiation and Radiation Protection*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, ISBN 978-3-527-40606-7.
- [48]. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Decay_chain\(4n%2B2,_Uranium_series\).PNG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Decay_chain(4n%2B2,_Uranium_series).PNG) [Ziyaret Tarihi: 14 Mayıs 2018].
- [49]. Çetinkaya H., 2009, *Kütahya İli İçme Sularında Radon ve Radyum Miktarlarının Belirlenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi.
- [50]. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Decay_chain\(4n,Thorium_series\).PNG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Decay_chain(4n,Thorium_series).PNG) [Ziyaret Tarihi: 14 Mayıs 2018].
- [51]. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Decay_chain\(4n%2B3,_Actinium_series\).PNG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Decay_chain(4n%2B3,_Actinium_series).PNG) [Ziyaret Tarihi: 14 Mayıs 2018].
- [52]. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Decaychain\(4n%2B1,Neptunium_series\).PNG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Decaychain(4n%2B1,Neptunium_series).PNG) [Ziyaret Tarihi: 14 Mayıs 2018].
- [53]. Knoll G.F., *Radiation Detection and Measurement*, 3rd ed., John Wiley & Sons, Inc..
- [54]. Attix F.H., 2004, *Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, ISBN-13: 978-0-471-01 146-0.
- [55]. <http://www.taek.gov.tr/ogrenci/sf5.html> [Ziyaret Tarihi: 20 Kasım 2018].
- [56]. International Commission On Radiological Protection (ICRP), 2012, *Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60*, ICRP Publication 119, Elsevier, ISBN 978-1-4557-5430-4.
- [57]. <http://www.tuik.gov.tr> [Ziyaret Tarihi: 20 Kasım 2018].
- [58]. Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK), 2007, *Çernobil Kazasının Ülkeler Üzerindeki Etkileri*, ISBN 975-8898-19-1.
- [59]. International Commission on Radiological Protection (ICRP), 2007, *The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*, ICRP Publication 103, Elsevier, ISBN 978-0-7020-3048-2.
- [60]. Norwegian Scientific Committee for Food Safety (VKM), 2017, *Risk assessment of radioactivity in food*, Report 2017:25, Norway, ISBN: 978-82-8259-282-6.
- [61]. Ononugbo C.P., Avwiri G.O. and Ikhuiwu S.O., 2017, Estimation of Natural Radioactivity Levels in Some Food Spices Commonly Used in Nigeria and Its Radiological Risks, *Journal of Scientific Research & Reports*, 16(3): 1-9, DOI: 10.9734/JSRR/2017/36833.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı Berna GÜNDOĞDU
 Doğum Yeri Gaziosmanpaşa
 Doğum Tarihi 15.10.1993
 Uyruğu T.C. Diğer:
 Telefon
 E-Posta Adresi bernagndd@gmail.com
 Web Adresi -



Eğitim Bilgileri

Lisans

Üniversite İstanbul Üniversitesi
 Fakülte Fen Fakültesi
 Bölümü Fizik Bölümü
 Mezuniyet Yılı 13.06.2014

Yüksek Lisans

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

Makale ve Bildiriler

GUNDOĞDU B., ve ark.,2015, Natural Background Radiation Measurement by Using Portable Dedector at Science Faculty of Istanbul University, 9th International Physics Conference of the Balkan Physical Union, 24-27 August 2015, Istanbul University, Istanbul/Turkey.

GUNDOĞDU B., Indoor Radon Concentration Measurements In The Physics Department at Istanbul University, 9th International Balkan School on Nuclear Physics 2016, 10-17 July 2016, Constanta, Romania.