T.C.
KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANA BİLİM DALI

TÜRKİYE'DE TİCARİ OLARAK SATILAN TIBBİ VE AROMATİK BİTKİLERİN RADYONÜKLİT İÇERİKLERİNİN BELİRLENMESİ VE RADYOLOJİK SAĞLIK RİSKLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

FATMA MOHAMED NAJEEB SULAYMAN ALZARIDI

DOKTORA TEZİ

PROF. DR. ASLI KURNAZ

ŞUBAT - 2026
KASTAMONU

TEZ ONAYI

Fatma Mohamed Najeeb Suleyman ALZARIDI tarafından hazırlanan "**TÜRKİYE'DE TİCARİ OLARAK SATILAN TIBBİ VE AROMATİK BİTKİLERİN RADYONÜKLİT İÇERİKLERİNİN BELİRLENMESİ VE RADYOLOJİK SAĞLIK RİSKLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ**" adlı tez çalışmasının savunma sınavı **17.02.2026** tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği ile Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Fizik Ana Bilim Dalı Doktora Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Danışman	Prof. Dr. Aslı KURNAZ Kastamonu Üniversitesi	.....
Jüri Üyesi	Prof. Dr. Şeref TURHAN Kastamonu Üniversitesi	.....
Jüri Üyesi	Prof. Dr. Sebahaddin ALPTEKİN Çankırı Karatekin Üniversitesi	.....
Jüri Üyesi	Prof. Dr. Celal Tuğrul ZEYREK Çankırı Karatekin Üniversitesi	.....
Jüri Üyesi	Doç. Dr. Nezahat TURFAN Kastamonu Üniversitesi	.....

Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Enstitü Müdürü Prof. Dr. Selahattin KAYMAKCI .....

TAAHHÜTNAME

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu; ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını, bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini bildirir ve taahhüt ederim.

Fatma Mohamed Najeeb Sulayman ALZARIDI

ÖZET

DOKTORA TEZİ

TÜRKİYE'DE TİCARİ OLARAK SATILAN TIBBİ VE AROMATİK BİTKİLERİN RADYONÜKLİT İÇERİKLERİNİN BELİRLENMESİ VE RADYOLOJİK SAĞLIK RİSKLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

FATMA MOHAMED NAJEEB SULAYMAN ALZARIDI

KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANA BİLİM DALI
DANIŞMAN: PROF. DR. ASLI KURNAZ

Tıbbi ve aromatik bitki türlerinin ham kısımları (kökler, yapraklar, tohumlar, çiçekler vb.) ve özleri, geleneksel ve modern tıpta hastalıkları tedavi etmek ve/veya önlemek amacıyla ilaç olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Tıbbi ve aromatik bitki türleri, kökleri aracılığı ile topraktan besin ve minerallerin yanı sıra çevreye dağılmış toksik elementler ve radyonüklitleri de alabilmektedir. Tıbbi ve aromatik bitki türlerinin tüketilmesi sonucunda sindirim sistemi ile insan vücuda alınan ve farklı oranlara yerleşebilen bu radyonüklitlerden yayınlanan iyonlaştırıcı radyasyon, iç ışınlamaya sebep olabilmektedir. Dolayısıyla iç ışınlamaya maruz kalma olasılığı, insanlarda endişeye yol açabilir. Bu yüzden tez kapsamında yapılan çalışma, Türkiye'de tüketilen popüler tıbbi ve aromatik bitki türlerindeki doğal ve yapay radyonüklitlerin aktivite konsantrasyonları ve bu radyonüklitlerin sindirilmesinden kaynaklanan radyolojik sağlık riskleri ile ilgili ayrıntılı bir veri tabanı oluşturmayı amaçlamaktadır. Çalışma kapsamında, Türkiye'de ticari olarak satılan 39 familyaya ait 91 tıbbi ve aromatik bitki türünün 98 örneği, yüksek saflıkta germanyum dedektörlü bir gama-ışını spektrometri sistem kullanılarak radyoaktivite analizine tabi tutuldu. Tıbbi ve aromatik bitki örneklerinde analiz edilen doğal radyonüklitlerin ortalama aktivite konsantrasyonları; 6,9 Bq/kg (^{228}Ra); 8,6 Bq/kg (^{226}Ra) ve 357,7 Bq/kg (^{40}K) olarak belirlendi. Yapay radyonüklit ^{137}Cs'nin aktivite konsantrasyonları, ölçülebilir minimum aktivite değerinin (0,3 Bq/kg) altında bulundu. Yetişkin tüketiciler için radyolojik sağlık riskleri değerlendirmek amacıyla radyoaktivite analiz sonuçları temel alınarak hesaplanan toplam yıllık etkin radyasyon dozu, mortalite ve morbidite yaşam boyu kanser riskinin ortalama değerleri, sırasıyla 16,5 μSv/y; $6{,}0 \times 10^{-5}$ ve $8{,}9 \times 10^{-5}$ olarak bulundu. Çalışma sonucunda elde edilen bulgular, incelenen bitki örneklerinin çok düşük seviyede bir radyolojik risk içerdiğini ve bu yüzden bitkilerin tıbbi ve aromatik amaçlarla kullanılmasının, halk sağlığı açısından güvenli olduğunu gösterdi.

ANAHTAR KELİMELER: Tıbbi Bitkiler, Aromatik Bitkiler Radyoaktivite, Radyum İzotopları, Radyolojik Sağlık Riski, Yıllık Etkin Radyasyon Dozu, Yaşam Boyu Kanser Riski, Gama-Işını Spektrometresi

Şubat 2026, 88 Sayfa

ABSTRACT

PH.D THESIS

DETERMINATION OF RADIONUCLIDE CONTENTS OF MEDICINAL AND AROMATIC PLANTS COMMERCIALLY SOLD IN TÜRKİYE AND ASSESSMENT OF RADIOLOGICAL HEALTH RISKS

FATMA MOHAMED NAJEEB SULAYMAN ALZARIDI

KASTAMONU UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
DEPARTMENT OF PHYSICS
SUPERVISOR: PROF. DR. ASLI KURNAZ

The raw parts (roots, leaves, seeds, flowers, etc.) and extracts of medicinal and aromatic herb (MAH) species are widely used as medicines in traditional and modern medicine to treat and/or prevent diseases. Medicinal and aromatic herb species can absorb nutrients and minerals from the soil through their roots, as well as toxic elements and radionuclides dispersed in the environment. Ionizing radiation emitted from these radionuclides, which are absorbed into the human body through the digestive system and accumulate in varying organs as a result of consuming medicinal and aromatic herb species, can cause internal irradiation. Therefore, the possibility of exposure to internal irradiation can raise concerns in humans. Therefore, this thesis aims to create a detailed database on the activity concentrations of natural and artificial radionuclides in popular medicinal and aromatic herb species consumed in Türkiye and the radiological health risks arising from the ingestion of these radionuclides. Within the scope of the study, 98 samples of 91 medicinal and aromatic herb species belonging to 39 families commercially sold in Turkey were subjected to radioactivity analysis using a gamma-ray spectrometry system with a high-purity germanium detector. The average activity concentrations of natural radionuclides analyzed in the medicinal and aromatic herb samples were determined as 6.9 Bq/kg (^{228}Ra), 8.6 Bq/kg (^{226}Ra), and 357.7 Bq/kg (^{40}K). The activity concentrations of the artificial radionuclide ^{137}Cs were found below the minimum detectable activity (0.3 Bq/kg). Based on the results of radioactivity analyses to assess radiological health risks for adult consumers, the average values of total annual effective radiation dose, mortality, and morbidity lifetime cancer risk were found to be 16.5 μSv/y, 6.0×10^{-5} and 8.9×10^{-5}, respectively. The findings of the study revealed that the examined plant samples contained a very low level of radiological risk and therefore the use of plants for medicinal and aromatic purposes was safe for public health.

KEYWORDS: Medicinal Herbs, Aromatic Herbs, Radioactivity, Radium Isotopes, Radiological Health Risk, Annual Effective Radiation Dose, Lifetime Cancer Risk, Gamma-Ray Spectrometry

February 2026, 88 Page

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca bilgi ve tecrübelerinden istifade ettiğim, her zaman hoşgörü ve sabırla yardım ve desteğini esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. Aslı KURNAZ′a en kalbi duygularımla müteşekkir olduğumu içtenlikle ifade ederim.

Örneklerin analizleri ve sağlık risk değerlendirme konusunda yardımcı olan Fizik Bölümü Başkanı Prof. Dr. Şeref TURHAN′a içtenlikle teşekkür ederim.

Tez kapsamında yapılan bu çalışma, Kastamonu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından KÜBAP-01/2024-39 kodlu proje ile desteklenmiştir. Bu bağlamda, BAP Koordinatörlüğüne teşekkür ederim.

Çalışmanın ilerleyişi sırasında gösterdiği nazik denetim ve rehberlik için Fizik Bölüm Başkanlığına, öğretim üyelerine ve Tez İzleme Komitesi üyelerine teşekkür ederim.

Bu çalışmayı, benim için çok kıymetli olan annem, babam, eşim ve çocuklarıma ithaf ediyorum.

FATMA MOHAMED NAJEEB SULAYMAN ALZARIDI

Kastamonu, 2026

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEZ ONAYI ... **ii**
TAAHHÜTNAME ... **iii**
ÖZET ... **iv**
ABSTRACT ... **v**
TEŞEKKÜR ... **vi**
İÇİNDEKİLER ... **vii**
ŞEKİLLER DİZİNİ ... **ix**
TABLOLAR DİZİNİ ... **x**
GRAFİKLER DİZİNİ ... **xi**
FOTOĞRAFLAR DİZİNİ ... **xii**
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ... **xiii**
1. GİRİŞ ... **1**
1.1 Tıbbi ve Aromatik Bitkilerde Radyoaktivite ... 4
1.2 Radyoaktiviteden Kaynaklanan Olası Radyolojik Sağlık Riski ... 5
1.3 Tezin Kapsamı ... 7
1.4 Tezin Hedef ve Amacı ... 7
1.5 Tezin Yapısı ... 8
2. LİTERATÜREL ARAŞTIRMA VE DEĞERLENDİRME ... **13**
2.1 Uluslararası Ölçekte Yapılan Çalışmalar ... 13
2.2 Ulusal Ölçekte Yapılan Çalışmalar ... 27
2.3 Literatürdeki Çalışmaların Genel Değerlendirilmesi ... 30
2.4 Çalışmanın Özgün Değeri ve Literatüre Katkısı ... 31
3. ÇALIŞMA İLE İLGİLİ KURAMSAL BİLGİ ... **32**
3.1 Radyasyon ve Etkileşim Süreçleri ... 32
3.1.1 Radyasyon ... 32
3.1.2 Radyasyon Etkileşim Süreçleri ... 33
3.2 İyonlaştırıcı Radyasyon Kaynakları ... 38
3.3 İyonlaştırıcı Radyasyon Birimleri ... 40
3.4 İyonlaştırıcı Radyasyonun Biyolojik Etkileri ... 42
3.5 Radyoaktivite ... 44
3.6 Radyoaktif Bozunma Süreci ... 45
3.7 Radyoaktivite Analiz Yöntemleri ... 47
4. MALZEME VE YÖNTEM ... **52**
4.1 Örneklerin Toplanması ... 52
4.2 TAB Örneklerin Analiz için Hazırlanması ... 52
4.3 TAB Örneklerinin Radyoaktivite Analizi ... 52
4.4 Olası Radyolojik Sağlık Risk Değerlendirmesi ... 60
4.4.1 Yıllık Ekin Radyasyon Dozu ... 61
4.4.2 Yaşam Boyu Kanser Riski ... 61
4.4.3 İstatistiksel Analiz ... 62
5. BULGULAR, TARTIŞMA, SONUÇ ve ÖNERİLER ... **63**
5.1 Tıbbi ve Aromatik Bitki Örneklerinin Doğal Radyonüklit İçeriği ... 63
5.2 Olası Radyolojik Sağlık Risklerinin Değerlendirilmesi ... 74
5.2.1 Yıllık Etkin Radyasyon Dozu (YERD) Değerleri ... 74

5.2.2 Yaşam Boyu Kanser Risk Değerleri 75
5.3 Sonuç ve Öneriler 78
KAYNAKLAR 80
ÖZGEÇMİŞ..... 87

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1 İyonlaştırıcı radyasyon türleri ve maddeyle etkileşimleri..... 34
Şekil 3.2 Farklı iyonlaştırıcı radyasyon türlerinin nüfuz etme güçleri..... 34
Şekil 3.3 Bağıl durdurma gücündeki protonlar için Bragg eğrisi 35
Şekil 3.4 Fotoelektrik etki ile gama etkileşimi 36
Şekil 3.5 Compton saçılmasıyla gama etkileşimi 37
Şekil 3.6 Çift oluşumu yoluyla gama etkileşimi 37
Şekil 3.7 Uranyum, torum ve aktinyum doğal radyoaktif seriler..... 40
Şekil 3.8 Bir gama-ışını spektroskopisi 49
Şekil 3.9 Gama-ışının dedektör kristali ile etkileşmesi ve fotopik oluşumu..... 50

TABLOLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 1.1 Tez kapsamında incelenen tıbbi ve aromatik bitkiler ve etkileri 9
Tablo 4.1 Tıbbi ve aromatik bitki örneklerin kullanılan kısımlara göre dağılımı..... 53
Tablo 4.2 HPGe dedektörünün özellikleri 56
Tablo 4.3 Radyonüklit konsantrasyonunun analizinde kullanılan spektroskopik parametreler..... 57
Tablo 5.1 TAB örneklerinin doğal radyonüklit içerikleri ile ilgili bazı istatistiki bilgi..... 64
Tablo 5.2 Yaprak hâlindeki TAB örneklerinin doğal radyonüklit içerikleri 69
Tablo 5.3 Çiçek ve tohum hâlindeki TAB örneklerinin doğal radyonüklit içerikleri 70
Tablo 5.4 Meyve, kök, bitki, kabuk hâlindeki TAB örneklerinin doğal radyonüklit içerikleri 71
Tablo 5.5 TAB örneklerinin radyonüklit içeriklerinin literatür ile karşılaştırılması 72
Tablo 5.6 İncelenen TAB örneklerinin tüketilmesine eşlik eden yıllık etkin doz değerleri..... 74
Tablo 5.7 Kullanılan kısımlar için hesaplanan ortalama yıllık etkin doz değerleri..... 75
Tablo 5.8 TAB örneklerinin tüketilmesine eşlik eden yaşam boyu kanser risk değerleri..... 77
Tablo 5.9 Kullanılan kısımlar için hesaplanan ortalama yaşam boyu kanser risk değerleri..... 77

GRAFİKLER DİZİNİ

Sayfa

Grafik 3.1 Foton etkileşmesinin bağıl önemi 49
Grafik 4.1 Bir TAB örneği gama-ışını spektrumu 57
Grafik 4.2 Deneysel olarak elde edilen verim değerlerinin enerjiye göre değişimi 59
Grafik 5.1 TAB örneklerinin doğal radyonüklit içeriklerinin birbirleriyle karşılaştırılması 65
Grafik 5.2 Radyonüklitlerin aktivite konsantrasyonlarının frekans dağılımı 66
Grafik 5.3 Karekök dönüşümünden sonraki aktivite konsantrasyonlarının frekans dağılımı 67
Grafik 5.4 Karekök dönüştürülmüş veriler için kutu grafiği 68
Grafik 5.5 TAB'ların kullanılan kısımlarının karşılaştırmalı aktivite konsantrasyon değerleri 73
Grafik 5.6 Radyonüklitlerin toplam yıllık doza katkıları 75

FOTOĞRAFLAR DİZİNİ

Sayfa

Fotoğraf 4.1 Radyoaktivite analiz için hazırlanan tıbbi ve aromatik bitki örnekleri 55
Fotoğraf 4.2 Yüksek çözünürlüklü gama-ışını spektrometresi 55

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

A : Aktivite
Bq : Becquerel (Bekerel)
^{214}Bi : Bizmut-214
C : Coulomb
Ci : Curie
^{134}Cs : Sezyum-134
^{137}Cs : Sezyum-137
d : Day (Gün)
D : Doz
eyb : Elektrostatik yük birimi
eV : Elektron volt
^{18}F : Flor-18
^{67}Ga : Galyum-67
Gy : Gray
J : Joule
^{111}In : İndiyum-111
^{40}K : Potasyum-40
kg : Kilogram (10^3 g)
keV : Kilolektron volt
Kr : Kripton
^{138}La : Lantan-138
^{176}Lu : Luteryum-176
MeV : Milyon elektron volt
min : Minute (Dakika)
mBq : Milibekerel (10^{-3} Bq)
mSv : Milisievert (10^{-3} Sv)
µSv : Mikrosievert (10^{-6} Sv)
N : Çekirdek sayısı
^{214}Pb : Kurşun-214
^{210}Pb : Kurşun-210
^{210}Po : Polonyum-210
R : Röntgen
rem : Röntgen equivalent man
rad : Radiation absorbed dose
^{87}Rb : Rubidyum
^{226}Ra : Radyum-226
^{219}Rn : Aktinon
^{220}Rn : Toron
^{222}Rn : Radon
s : Saniye
^{147}Sm : Samaryum-147
Sv : Sievert
$T_{1/2}$: Yarılanma süresi veya Yarılanma Ömrü

^{201}Tl	**:** Talyum-201
^{232}Th	**:** Toryum-232
t	**:** zaman
^{235}U	**:** Uranyum-235
^{238}U	**:** Uranyum-238
Xe	**:** Ksenon
y	**:** Yıl
Z	**:** Atom numarası
λ	**:** Bozunma sabiti
α	**:** Alfa parçacığı
β	**:** Beta parçacığı
γ	**:** Gama ışını

Kısaltmalar

B	**:** Background
BBE	**:** Bağıl biyolojik etki
DDK	**:** Doz dönüşüm katsayısı
DFD	**:** Bozunum düzeltme faktörü
DSÖ	**:** Dünya Sağlık Örgütü
HPGe	**:** High purity germanium (Yüksek saflıkta germanyum)
IARC	**:** International Agency for Research on Cancer
ICRP	**:** International Commission on Radiological Protection
KF	**:** Kalite faktörü
MS	**:** Maruz kalma süresi
NS	**:** Net sayım
ÖMA	**:** Ölçülebilir minimum aktivite
RK	**:** Risk katsayısı
TAB	**:** Tıbbi ve aromatik bitki
TF	**:** Transfer faktörü
TYERD	**:** Toplam yıllık etkin radyasyon dozu
UNSCEAR	**:** United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation
USEPA	**:** United States Environmental Protection Agency
WHO	**:** World Health Organization
WHO-BEIR	**:** World Health Organization- Biological Effects of Ionizing Radiation
YERD	**:** Yıllık etkin radyasyon dozu
YRA	**:** Yıllık radyonüklit alımı
YS	**:** Yaşam süresi
YTM	**:** Yıllık tüketim miktarı

1. GİRİŞ

İnsanlar, çağlar boyunca ilaç, barınak, gıda, koku, giyim, aroma, gübre ve ulaşım araçları gibi basit ihtiyaçları için doğaya bağımlı olmuşlardır. Biyoaktif ilaçların ana kaynağı olan tıbbi doğal bitkiler, binlerce yıldır var olan tipik geleneksel tıp sistemlerinin temellerini oluşturmuştur (Dar vd., 2017). Bir ilaç kaynağı olarak, tıbbi bitkiler neredeyse tüm medeniyet kültürlerinde her zaman ön planda olmuş ve bu kültürlerin gelişiminde önemli bir rol oynamıştır (Dar vd., 2017). Tıbbi ve aromatik bitkiler, Çin, Hint ve Arap tıbbı dâhil olmak üzere çeşitli geleneksel tıp sistemlerinde, yüzlerce hatta binlerce yıldan beri hastalıkların önlenmesi veya iyileştirilmesi için ilaç olarak kullanıldığı gibi aynı zamanda bitkisel çay, tat ve çeşni maddesi olarak da besin takviyesinde kullanılmıştır (Achari vd., 2024; Biira vd., 2021; Demir, 2022**)**. Günümüzde tıbbi ve aromatik bitki türleri; tıp, gıda, kozmetik, parfüm, ilaç, aroma verici, kimyasal, boya, pestisit vb. çeşitli endüstrilerde uygulamaları olan temel doğal kaynaklardır ve insanlığa yeni ilaçlar sunmaya devam etmektedir (Zamani vd., 2025). Bu bitkilere olan talep, tıp ve sağlık alanında sentetik olarak elde edilen etken maddelere kıyasla çok yönlü etki göstermeleri ve yan etki göstermemeleri nedeniyle artmaktadır. Tıbbi ve aromatik bitkiler, dünya nüfusunun büyük bir kısmının sağlık sisteminde baskın bir rol oynamaya devam etmektedir ve bu durum, özellikle bitkisel ilaçların uzun süreli kullanım geçmişine sahip gelişmekte olan ülkelerde geçerlidir (Dar vd., 2017).

Tıbbi ve aromatik bitkisel ilaçlar, aktif bileşen olarak bitki parçalarını, diğer bitki materyallerini veya bunların kombinasyonlarını içeren otları, bitkisel maddeleri, bitkisel preparatlarını ve bitkisel ürünleri içerir (WHO, 2019). Geleneksel, tamamlayıcı ve modern tıpta, hastalıkları tedavi etmek ve/veya hastalıkları önlemek için ilaç olarak tıbbi ve aromatik bitki türlerinin "drog" olarak isimlendirilen kurutulmuş ham kısımları (kök-sap, kök, gövde, yumru, odunsu yapı, kabuk, çiçek, yaprak, meyve, tohum ve bitkinin tamamı) ve özleri kullanılmaktadır (Demir, 2022; Sussa vd., 2013). Geleneksel ve tamamlayıcı tıp, özellikle yaşam tarzıyla ilişkili kronik hastalıkların önlenmesi ve yönetimi ile yaşlanan nüfusun sağlık ihtiyaçlarının karşılanmasında birçok uygulamaya sahip, önemli ve genellikle küçümsenen bir sağlık

kaynağıdır (WHO, 2019). Tüketicilerin bakım beklentilerinin arttığı, maliyetlerin yükseldiği ve çoğu bütçenin durgunlaştığı veya azaldığı bir dönemde, birçok ülke temel sağlık hizmetlerinin kapsamını genişletmeye çalışmaktadır. 21. yüzyılın benzersiz sağlık sorunları göz önüne alındığında, geleneksel ve tamamlayıcı tıpa olan ilgi yeniden canlanmaktadır (WHO, 2019). Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ), faydalı bileşenlerinin ulusal sağlık sistemlerine entegre edilmesini önererek dünya çapında geleneksel tıbbın kullanımını teşvik etmiştir (Popoola vd., 2024). Böylece, bugün bazı tıbbi ve aromatik bitki türlerinin kullanımı, modern tıbbi yöntemler, eczacılar ve moleküler biyologlar tarafından bilimsel olarak kanıtlanmış ve ilgili otoritelerin onayıyla insan yaşamına yeniden kazandırılmıştır (Cengiz ve Çağlar, 2019). Ayrıca, DSÖ raporuna (WHO, 2019) göre, 170 ülkede küresel nüfusun yaklaşık %80'i akupunktur, bitkisel ilaçlar, Ayurveda ve yerel tedavi gibi geleneksel uygulamaları kullanmaktadır. Ayrıca, artemisinin, aspirin ve çocukluk çağı kanser tedavileri de dahil olmak üzere modern farmasötik ürünlerin yaklaşık %40'ı doğal kaynaklardan ve geleneksel bilgiden elde edilmektedir (Kırıs, 2022; Zamani vd., 2025). Dahası, bitki kaynaklı aktif bileşenler gelişmiş ülkelerdeki reçeteli ilaçların yaklaşık %25'ini oluşturmaktadır (Kırıs, 2022; Zamani vd., 2025). Dünya genelinde tıbbi ve aromatik bitki materyali olarak kullanılan türlerin kesin sayısını belirlemek mümkün değildir ve sadece tıbbi amaçlarla kullanılan bitki türlerinin sayısı tahmin edilebilir (Türkekul ve Yıldız, 2021). DSÖ'nün 1970'lerin sonlarında yaptığı bir sayımda 21.000 tıbbi tür listelenmiştir (Türkekul ve Yıldız, 2021). Günümüzde 50.000'i tıbbi ve aromatik bitki olmak üzere dünya çapında 422.000 bitki türü olduğu ve tıbbi amaçlar için yaygın olarak 20.000 bitki türünün kullanıldığı tahmin edilmektedir (Monica vd., 2020; Türkekul ve Yıldız, 2021). Dolayısıyla bu bitkiler, bugün bile sağlık hizmetlerinde vazgeçilmez olmakla kalmayıp, aynı zamanda güvenli geleceğin ilaçları için en büyük umudu oluşturmaktadır (Dar vd., 2017). Hâlihazırda bir dizi modern ilaç olmasına rağmen, yeni tedavi edici ajanlar keşfetmek ve geliştirmek hâlâ gerçekten acildir. Kabul edilebilir tedavinin, bilinen insan rahatsızlıklarının yalnızca üçte biri için mevcut olduğu tahmin edilmektedir (Dar vd., 2017). Bu nedenle, hastalıklarla mücadele aralıksız sürdürülmelidir (Dar vd., 2017). Bu yüzden geleneksel bitkisel ilaçlar, küçük yan etkilerinin yanı sıra bileşik kombinasyonlarının sinerjik etkisi nedeniyle günümüz ilaç endüstrilerinde hâlâ önemli bir konuma sahiptir (Dar vd., 2017). Son 50 yılda modern tıbbi uygulamaları kökten değiştiren önemli ilaçların çoğu

bitkilerden izole edilmiş/türetilmiştir (Dar vd., 2017). Bu kimyasal bileşenler, bitkisel ve hayvansal ilaçların tedavi edici özelliklerini sergiler. Bu nedenle, bitki özleri gibi doğal kaynakların taranmasıyla elde edilen farmakolojik/biyolojik olarak aktif ajanların araştırılması, insan hastalıklarının tedavisinde önemli bir rol oynayan birçok farmasötik açıdan değerli ilacın tespit edilmesine yol açmıştır (Dar vd., 2017). Fitokimyasal-farmakolojik araştırma çalışmaları, son zamanlarda sentetik ilaç endüstrisinin karşılayamadığı bazı hastalıklara etkili çözümler de getirmiştir (Dar vd., 2017).

Coğrafi konumu ve genetik çeşitliliği sayesinde Türkiye'nin florası, tüm Avrupa'da bulunan toplam bitki sayısına eşdeğer bitki türüyle çeşitlilik ve zenginlik göstermektedir (Pakdemirli vd., 2021). Türkiye ayrıca, gelişmiş ülkelerin bitkisel ilaç, bitkisel kimyasallar, gıda ve katkı maddeleri, kozmetik ve parfümeri endüstrilerinin girdisini oluşturan çok sayıda bitkisel ürünün florasına da ev sahipliği yapmaktadır. Bu yüzden Türkiye, önemli bir tıbbi ve aromatik bitki ihracatçısıdır (Türkekul ve Yıldız, 2021). Türkiye'de tıbbi amaçlı kullanılan bitkilerin kesin sayısı bilinmemekle birlikte, yaklaşık 500 tıbbi ve aromatik bitkinin bulunduğu tahmin edilmektedir. Bu tıbbi ve aromatik bitkilerden haşhaş tohumu, zerdeçal, zencefil, baharat karışımları, safran, tarçın, vanilya, karanfil, susam tohumları, baharat tohumları, keçiboynuzu, sarımsak, salep, karabiber, kırmızı biber, yenibahar, vb. 200'ünün ihracat potansiyeline sahip olduğu belirtilmektedir (Acıbuca ve Budak, 2018; Türkekul ve Yıldız, 2021). Bununla birlikte, kahve, karabiber, zencefil, zerdeçal, ginseng, Hindistan cevizi ve tarçın gibi bitkileri Türkiye'de yetiştirmek mümkün olmadığından bu bitkiler ithal edilmektedir (Türkekul ve Yıldız, 2021). Türkiye'de, defne yaprağı, keçiboynuzu, haşhaş, kekik, adaçayı, kuşburnu, rezene, gül, anason, kimyon, nane, melisa, kapari, biberiye, lavanta, fesleğen (reyhan), vb. bazı tıbbi ve aromatik bitkilerin, gıda ve ilaç olarak kullanımının binlerce yıllık bir geçmişi olduğu bilinmektedir (Türkekul ve Yıldız, 2021). Türkiye'de tüketiciler bitkisel yöntemlere daha fazla ilgi göstermekte ve son zamanlarda sağlık sorunlarının gündemde olması, sentetik ilaçlardan daha güvenli ve daha düşük maliyetli olmaları nedeniyle tıbbi ve aromatik bitkilere olan talep artmaktadır. Tıbbi ve aromatik bitkilere olan ilginin artmasıyla birlikte, kırsal kesimdeki nüfus için yeni gelir getirici fırsatlar doğmaktadır (Türkekul ve Yıldız, 2021).

Tıbbi ve aromatik bitki türleri, terpenoidler, uçucu yağlar, fenolik bileşikler, alkaloidler, glukozinolatlar, siyanojenik glikozitler vb. geniş bir kimyasal bileşik yelpazesi içerir (Shuaibu vd., 2023; Zamani vd., 2025). Bu bileşiklerin, anti-inflammatuar, anti-kanser, anti-alerjik, antimikrobiyal, antimutajenik, antipiretik ve antidiyabetik özellikler de dâhil olmak üzere çeşitli tedavi edici etkileri vardır. Bu bileşikler, ayrıca sindirime yardımcı olur, ağrıyı hafifletir, bağışıklık sistemini düzenler, hafızayı ve enerjiyi artırır ve kan basıncını ve kolesterolü düşürür (Shuaibu vd., 2023; Zamani vd., 2025). Ormanlarda, meralarda ve kullanılmayan tarım arazilerinde doğal olarak yetişen veya kültüre alınan tıbbi ve aromatik türlerinin en yaygın kullanılan kısımlarını, kurutulmuş bütün, parçalanmış veya toz hâline getirilmiş kök, yaprak, meyve, çiçek, gövde, tohum, yumru, kabuk vb. oluşturmaktadır (Kandić vd., 2020; Pakdemirli vd., 2021). Ancak, yukarıda belirtildiği gibi, bu tür bitki esaslı gıdalar, sayısız fayda sunarken bu bitkiler, kökleri aracılığıyla çevre koşullarına bağlı olarak pestisitler, kalıntı çözücüler, biyolojik zehirli, maddeler, ağır metaller ve radyonüklitler (veya radyoaktif elementler) gibi çevre kirleticilerini de emer. Bu kirleticiler, tıbbi ve aromatik bitkilerin tedavi edici özellikleri, tüketici sağlığı, güvenliği ve etkinliği üzerinde olumsuz etkilere sahip olabilir (Shuaibu vd., 2023). Bu nedenle, tüketici sağlığı üzerinde olası istenmeyen yan etkilerden kaçınmak için tıbbi ve aromatik bitki türlerinin ve ürünlerinin kullanımının, kontrol altında tutulması gereklidir.

1.1 Tıbbi ve Aromatik Bitkilerde Radyoaktivite

Toprak, su, hava, gıda ve diğer çevresel örnekler, bulundukları ortamın jeolojik ve jeokimyasal özelliklerine bağlı olarak hem doğal kaynaklı radyonüklitleri hem de yapay kaynaklı radyonüklitleri içerebilir (UNSCEAR, 2000). Çevresel örneklerdeki doğal kaynaklı radyonüklitleri, genellikle yer kabuğu kökenli uranyum (^{238}U) ve toryum (^{232}Th) radyoaktif bozunma serisindeki radyonüklitler ve potasyum radyoizotopu (^{40}K) oluşturmaktadır. Yapay kaynaklı radyonüklitler ise özellikle trityum (^{3}H), radyoizotop karbon (^{14}C), stronsiyum radyoizotopları (^{89}Sr ve ^{90}Sr), iyot radyoizotopu (^{131}I) ve sezyum radyoizotoplarını (^{134}Cs ve ^{137}Cs) içerir. Bu radyonüklitler, esas olarak 1950'ler ve 1960'larda meydana gelen nükleer silah denemelerinden ve nükleer santral kazalarından (1957'de Windscale, 1986'da Çernobil

ve 2011'de Fukuşima Daiichi) kaynaklanan radyoaktif serpintiler; nükleer tesislerden ve diğer lisanslı tesislerden yetkili deşarjlar yoluyla meydana gelirler (IAEA, 2016). Tıbbi ve aromatik bitkilerde ve/veya bitki bazlı gıdalardaki doğal ve yapay radyoaktivite, bitkilerin kökleri vasıtasıyla topraktan aldığı, bitkilerin doğrudan atmosferden alarak biriktirdiği ve suyoluyla transfer ettiği yukarıda sözü edilen radyonüklitlerden ileri gelmektedir (IAEA, 2016). Kök alımı, besin zincirinde topraktan bitkilere radyonüklit transferinin ilk önemli adımıdır. Böylece bu radyonüklitler, yapraklara, kabuklara, tohumlara, çiçeklere ve meyvelere ve dolayısıyla insan besin zincirine aktarılır (Parmaksız ve Ağuş, 2014). Doğal ve/veya yapay radyonüklitlerin topraktan bitkilere aktarımı (transferi) ve bitkinin farklı kısımları arasındaki dağılımı, toprağın yapısına, kullanılan gübrelere ve radyonüklitlerin topraktaki davranışına büyük ölçüde bağlıdır (Abdelfadeel vd., 2023; Achari vd., 2024). Gübreler, tarımsal ortamdaki çevresel uranyum ve kısmen toryum konsantrasyonlarını artıran, teknolojik olarak geliştirilmiş doğal radyasyon olarak kabul edilir (Abdelfadeel vd., 2023). Bazı çalışmalar, bitkideki radyonüklitlerin emiliminin bitki türüne bağlı olduğunu da ileri sürmüştür (Abdelfadeel vd., 2023). Sonuç olarak bu radyonüklitlerin tamamı, bitkiler tarafından metabolizmaları yoluyla topraktan bitkiye çeşitli mekanizmalarla alınır ve bitkilerin farklı kısımlarında, farklı konsantrasyonlarda bulunur (Achari vd., 2024).

1.2 Radyoaktiviteden Kaynaklanan Olası Radyolojik Sağlık Riski

Besin zinciri yoluyla insanın sindirim sistemine dâhil olan dolayısıyla vücuda alınan radyonüklitlerden yayınlanan iyonlaştırıcı radyasyonlar (özellikle alfa- ve beta-radyasyonları), iç ışınlamaya sebep olarak olası radyolojik sağlık riski oluşturur. Olası radyolojik sağlık riski, vücuttaki her bir radyonüklitin davranışına, radyonüklitin zehirlilik derecesine (toksisitesine) ve tüketilme miktarına bağlıdır. Dolayısıyla, radyonüklit seviyesindeki artış, sindirime bağlı bireysel etkin radyasyon dozu ve dolayısıyla radyolojik riski artırır. Bu kapsamda, yüksek zehirlilik dereceleri sebebiyle radyum (Ra) izotopları, radyasyondan korunma açısından önemlidir (Jia ve Jia, 2012). Ra'nın 20'den fazla izotopu olduğu ve bunların hepsinin radyoaktif olduğu bilinmektedir. Bilinen izotopların kütle numaraları 206 ile 230 arasında değişir ve yarı ömürleri ^{216}Ra için 182 nanosaniyeden ^{226}Ra için 1600 yıla kadar uzanır. Çevre ve gıda

örneklerinde iki Ra izotopunun izlenmesi ve belirlenmesi, sağlık fiziği ve çevre koruması için ön plandadır. Bu Ra izotopları, ^{232}Th serisindeki beta yayıcı ^{228}Ra ($T_{1/2}$ = 5,76 y) ve U serisindeki alfa yayıcı ^{226}Ra ($t_{1/2}$ = 1600 y)'dır. Bu Ra izotopların bu kadar önemli olmalarının iki sebebi vardır. Birincisi bu radyonükliter, fosfat, madencilik, metal cevheri işlemesi, petrol ve gaz çıkarma endüstrisinden, kömür madenciliği ve yakma endüstrisinden atık veya yan ürün olarak büyük miktarlarda üretilebilir veya biriktirilebilir (Jia ve Jia, 2012). İkincisi bu radyonükliter, kalsiyum, stronsiyum ve baryum gibi diğer toprak alkali metallerine benzer kimyasal ve biyolojik davranışları nedeniyle kemiklerde (%70-80) ve insan kas dokusunda birikebilir ve yaygın uzun süreli kullanımları nedeniyle sağlık sorunlarına neden olabilir (Jia ve Jia, 2012). Doğal radyonüklit ^{40}K ve yapay radyonüklit ^{137}Cs, tıbbi bitkilerde bulunabilen en önemli radyonüklittir. Potasyum, temel bitki besinlerinden biridir. Potasyum ve sezyum aynı kimyasal element grubuna (alkali metaller) ait olduğundan, bitki metabolizmasındaki davranışları benzerdir (Kandić vd., 2020). Potasyum, sindirim ve kalp atış hızı gibi birçok vücut fonksiyonunun düzenlenmesinde önemli bir elementtir ve vücudun K içeriği metabolik süreçler boyunca sabit tutulur (IAEA, 2016). Potasyum, doğal olarak %0,117 oranında ^{40}K içerir ve bu radyoizotop, özellikle bağırsaklar ve kolonda olmak üzere organlara ve yumuşak doku radyasyon dozlarına dağılır (Parmaksız ve Ağuş, 2014). ^{137}Cs, tıbbi bitkilerde bulunabilen en önemli yapay radyonüklitlerden biridir. Çernobil kazasından (1986) sonra, radyosezyum dağılımının ve transferinin izlenmesine büyük önem verilmiştir. ^{137}Cs, çevresel örneklerde oldukça hareketlidir ve bu nedenle besin zincirlerine kolayca girebilir (Kandić vd., 2020). Bitkiler, ^{137}Cs'yi topraktan çoğunlukla kök sistemleri aracılığıyla alır ve bitkiye bağlı olarak çeşitli kısımlarında biriktirir (Kandić vd., 2020). Uzun yarı ömrü ($T_{1/2}$ = 30,07 y) nedeniyle, ^{137}Cs çevrede onlarca yıl aktif kalır ve önemli bir radyolojik risk oluşturur.

Sonuç olarak, bitkilerdeki radyonüklitler, besin zincirleri yoluyla insanlara aktarılabildiğinden ve insanlık çeşitli hastalık ve rahatsızlıkların tedavisinde geleneksel bitkisel ilaçları kullandığından, insan sağlığı üzerindeki ilişkili radyolojik riskleri değerlendirebilmek için tıbbi ve aromatik bitkilerin içerdiği doğal ve/veya yapay radyonüklit konsantrasyonlarının belirlenmesi büyük önem taşımaktadır.

1.3 Tezin Kapsamı

Bu tezin kapsamını;

(1) Türkiye genelinde tüketilen ve Tablo 1.1'de yaygın isimleri ve tıbbi kullanım amaçları verilen 39 familyaya ait ticari 91 tıbbi ve aromatik bitkinin 98 örneği,

(2) Tıbbi ve aromatik örneklerin doğal (^{228}Ra; ^{226}Ra ve ^{40}K) ve yapay (^{137}Cs) radyonüklit içerikleri,

(3) Bu radyonüklitlerin aktivite konsantrasyonlarının belirlenmesi için kullanılan yüksek saflıkta germanyum (HPGe) dedektör ile donatılmış yüksek çözünürlüklü bir gama-ışını spektrometrik sistemi ve

(4) İncelenen tıbbi ve aromatik bitki örneklerinde analiz edilen radyonüklitlerin sindirilmesinden kaynaklanan iç ışınlamanın sebep olduğu olası radyolojik sağlık riskinin erişkin tüketiciler için değerlendirilmesi oluşturmaktadır.

1.4 Tezin Hedef ve Amacı

Bu çalışma,

(1) Bir kısmı farklı ülkelere (özellikle Avrupa ülkelerine) ihraç edilen tıbbi ve aromatik bitki türlerinin radyolojik kalitesi ile ilgili ayrıntılı veri elde etmeyi,

(2) Tıbbi ve aromatik bitki türlerinin radyoaktivitesi hakkında tüketicilerde farkındalık oluşturabilmeyi ve

(3) İlgili doğal ve yapay radyonüklitler ve/veya yıllık etkin radyasyon dozu için ölçüt veya sınır veya kılavuz seviyelerin belirlenmesinde yol gösterici bilgileri elde etmeyi hedeflemektedir.

Bu hedeflere yönelik olarak bu çalışma;

(1) Tıbbi ve aromatik bitki türlerinin doğal (^{228}Ra; ^{226}Ra ve ^{40}K) ve yapay (^{137}Cs) radyonüklit içeriklerini, HPGe dedektörlü bir gama-ışını spektrometresi ile belirlemeyi,

(2) İncelenen örneklerin tüketilmesine eşlik eden olası radyolojik sağlık riskleri, erişkin tüketiciler için değerlendirmek amacıyla yıllık etkin dozları, mortalite ve morbidite yaşam boyu kanser risklerini, tahmini olarak hesaplamayı ve

(3) Elde edilen verileri, ulusal/uluslararası çalışmalarda elde edilenlerle, ulusal/uluslararası düzenlemelerde tavsiye edilen ölçüt, sınır veya kılavuz seviyeler ile karşılaştırılmayı amaçlamaktadır.

1.5 Tezin Yapısı

Bu tez, beş bölüm içermektedir. Her bir bölüm ile ilgili genel bilgi aşağıda verildi:

(1) Giriş Bölümü: Bu bölümde, tıbbi ve aromatik bitki türlerinin; önemi, tarihi, üretimi ve tüketim amacı, bitkilerin radyoaktivite içerikleri, radyoaktiviteden kaynaklanabilecek olası radyolojik sağlık riski ilgili genel bilgi sunuldu. Ayrıca, bu bölümde tezin kapsamı, hedefi, amacı ve kapsamı da belirtildi.

(2) Literatürel Araştırma ve Değerlendirme Bölümü: Bu bölümde, tıbbi ve aromatik bitkilerin radyonüklit içeriklerinin belirlenmesi ile ilgili olarak literatürde yer alan çalışmalar, uluslararası ve ulusal olmak üzere iki başlık altında kronolojik olarak ele alındı, özetlendi ve değerlendirildi. Ayrıca, bu bölümde tezin mevcut literatüre katkısı ve özgünlüğü hakkında bilgi verildi.

(3) Çalışma ile İlgili Kuramsal Bilgi Bölümü: Bu bölümde, iyonlaştırıcı radyasyon ve kaynakları, doz birimleri, radyasyonun sağlık üzerindeki etkileri, radyoaktivite, doğal radyoaktif kaynaklar, radyoaktivite ölçe yöntemleri ve gama-ışını spektrometresi ile ilgili öz bilgi sunuldu ve okuyucu, ayrıntılı bilgi için kaynaklara yönlendirildi.

(4) Malzeme ve Yöntem Bölümü: Bu bölümde, tıbbi ve aromatik bitki örneklerinin temin edilmesi, laboratuvara getirilmesi, örneklerin hazırlanması, ölçme yöntemi,

analizde kullanılan gama-ışını spektrometresi ve olası radyolojik sağlık risk değerlendirme yöntemi ile ilgili bilgi verildi.

(5) Bulgular, Tartışma, Sonuç ve Öneriler Bölümü: Bu bölümde, tıbbi ve aromatik bitki örneklerinde analiz edilen doğal ve yapay radyonüklitlerin konsantrasyonları, olası radyolojik sağlık riski değerlendirmek amacıyla hesaplanan etkin doz hızları, yaşam boyu mortalite ve morbidite kanser risk değerleri, tablolar ve grafikler şeklinde sunuldu. Elde edilen bulgular değerlendirildi, radyoaktivite bulguları, literatürde yer alan benzer çalışmalarda elde edilenlerle ulusal ve/veya uluslararası kurumların önerdiği sınır değerlerle karşılaştırıldı ve bazı öneriler verildi.

Tablo 1.1 Tez kapsamında incelenen tıbbi ve aromatik bitkiler ve etkileri

Bitki	**Etkisi**
Mentollü nane	Gaz giderici
Isırgan otu	Bağışıklığın güçlendirilmesi; Vücuttan toksinleri atılması, Böbrek taşı ve kum oluşumunun engellenmesi.
Maydanoz	Karaciğer rahatsızlıkları
Biberiye	Bağışıklık sistemi rahatsızlıkları
Funda	İdrar söktürmesi ve ödem attırması
Mercan köşk	Solunum ve mide barsak yollarında antiseptik
Ceviz	Üst solunum yolu rahatsızlıkları
Adaçayı	Antioksidan kaynağıdır; Stresi azaltır, Kötü kolesterolü düşürür. Mide ve sindirim sistemi rahatsızlıkları ve üst solunum yollarında soğuk algınlığı
Doğu çınarı	Romatizma rahatsızlar
Öksürük otu	Üst solunum yolu rahatsızlıkları
Defne	Metabolizmanın hızlandırması; Sindirim sağlığı, Kan şekerinin ve kolesterolün düşürülmesi; Tansiyonun dengelenmesi, Vücuttaki iltihabın azaltılması.
Ak söğüt	Ağrılara karşı
Mersin otu	Üst solunum yolu rahatsızlıkları
Melisa (Oğul otu)	Sindirim ve dolaşım sistemi rahatsızlıklar
Çuha	Sinir sistemi üzerinde etkilidir
Sinirli ot	Öksürüğün giderilmesi; Balgamın söktürülmesi, Sindirim sisteminin düzenlenmesi
Mate	Bağışıklık sistemini güçlendirilmesi
Ginko biloba	Dolaşım sistemi üzerinde etkili
Kırkkilit otu	İdrar yolları rahatsızlıkları
Oğul otu	Sakinleştirici ve sedatif etkili

Tablo 1.1'in devamı

Bitki	**Etkisi**
Zeytin	Üst solunum yolu enfeksiyonun giderilmesi; Kötü kolesterol oluşumunun önlenmesi, Kan basıncının düşürülmesi; İnsülin direncinin azaltılması, Virüs, mantar ve bakteri oluşumunun engellenmesi
Tarhun	Gastrointestinal sistem rahatsızlıkları
Kekik	Üst solunum yolu rahatsızlıklar; Antibakteriyel etkili
Beyaz çay	Kalp rahatsızlıkları
Yaban mersini	Yaban mersini yaprağı ve kuru meyvelerinden yapılan çay ishal önleyicidir
Aslanpençesi	Gastrointestinal rahatsızlıklar
Böğürtlen	İdrar yolu rahatsızlıkları
Avokado	Kalp damar rahatsızlıklar
Dut	Kalp ve sindirim sistemi üzerinde etkili
Cinnema (Gürman otu)	Diyabet rahatsızlığı
İncir	İncir yaprağı suyu veya çayı bağırsakları çalıştırır; Sindirim sistemini iyileştirir. Kalp hastalıkları riskini azaltır; Kan şekerini düzenler. Kolesterolü kontrol altında tutmaya yardımcıdır.
Karahindiba	Kemik rahatsızlıkları
Kekik	Sindirim ve solunum yolu rahatsızlıkları
Fesleğen (basil herb)	Kalp rahatsızlıklarında ve diyabete karşı
Kırmızı çay (Rooibos)	Kalp rahatsızlıkları
Üvez	Üst solunum yolu rahatsızlıkları
Karadut	Kabızlık ve menopoz rahatsızlıkları
Okaliptüs	Üst solunum yolları rahatsızlıkları, kas ve eklem ağrıları
Dulavrat otu	Ülserlerin iyileşmesini hızlandırır.
Ebegümeci	Üst solunum yolu rahatsızlıkları
Reyhan	Kan basıncını düşürür; Diyabet hastalığını önlemeye yardım eder; Kalp sağlığını korur
Hatmi	Üst solunum yolu rahatsızlıkları
Ihlamur	Üst solunum yolu rahatsızlıkları ve öksürük
Sinameki	Gastrointestinal sistem rahatsızlıkları
Mavi çay	Kan basıncını düşürür
Mayıs papatyası	Gastrit, kolit, yellenme gibi mide ve bağırsak sorunları
Ekinezya	Bağışıklık sistemini güçlendirir
Altın otu	İdrar yollarında ki taşların doğal yolla düşürülmesinde vücuda yardım eder. Vücutta yağ yakımını hızlandırarak kilo verme sürecini destekler.
Sarıpapatya	Papatya çayı iltihap giderici etki gösterir. Mide spazmı ve reflü gibi mide-sindirim şikâyetlerini azaltır. Kalp hastalıklarına karşı korur.
Dağ çayı	Gastrointestinal sistem rahatsızlıkları

Tablo 1.1'in devamı

Bitki	**Etkisi**
Bamya	Dolaşım sistemi rahatsızlıkları
Şerbetçiotu	Bağışıklık sistemi üzerinde etkili
Aynısefa	Yara tedavilerinde, ateşli hastalıklarda, böcek ısırıklarında, bebek pişiklerinde, diş eti hastalıklarında, hemoroit, mide kramplarında ve fototerapi
Aspir	Diyabete karşı etkilidir
Lavanta	Sinir sistemi rahatsızlıkları
Alıç	Kalp kaslarını güçlendirici
Civanperçemi	Cilt bakımı, dolaşım sistemi rahatsızlıkları
Çarkıfelek	Gastrointestinal ve sinir sistemi rahatsızlıkları
Mısır püskülü	Ödem söktürücü
Sarı kantaron	Güçlü bir antioksidan; bağışıklık sistemi ve sindirim sistemi
Ballıbaba	İdrar söktürücü, hastalıklardan koruyucu, kabız yapıcı
Kiraz sapı	Ödem sökücü
Karabaş otu	Üst solunum ve mide rahatsızlıkları
Kapari	Mide ve bağışıklık sistemi rahatsızlıkları
Rezene	Gastrointestinal sistem rahatsızlıkları
Kişniş	Gastrointestinal sistem rahatsızlıkları
Kimyon	Gastrointestinal sistem rahatsızlıkları
Hayıt	Kadınlarda progesteron, östrojen ve prolaktin seviyesinin dengelenmesine yardımcı olur. Hipofiz bezini destekler ve bu diğer birçok hormonun sentezinde dolaylı katkı sağlar.
Açlık otu	Mide-Barsak üzerinde laksatif etki
Elma çayı	Bağışıklık ve sindirim sistemi üzerinde etkili
Mersin otu	Üst solunum yolu rahatsızlıklarında
Kara mürver	Üst solunum yolları hastalıklarına iyi gelir. Balgam söktürücü özelliği bulunur. Kan basıncını düzenler.
Üzerlik	Kadın üregenital sistem rahatsızlıklarında
Ayrık	Ödem söktürücü
Kedi otu	Sinir sistemi rahatsızlıklarında
Meyan kökü	Mide yanması ve hazımsızlık gibi sindirim sorunlarını yatıştırır,
Pelin otu	Sindirim sistemi rahatsızlıkları
Kurtpençesi	Karaciğer, idrar ve sindirim sistemi rahatsızlıkları
Bodur mahmut	Ödem ve iltihap sökücü
Çoban çökerten	Üreme sistemi rahatsızlıklarına karşı
Çobançantası	İdrar söktürücü, üregenital rahatsızları
Şeker otu (stevia)	Doğal tatlandırıcı olarak kullanılır
Şahtere otu	Mide ve karaciğer rahatsızlıklarına etkilidir. Damar sertliğinin tedavisinde kullanılır.
Yoğurt otu	Tiroit bezi semptomlarını azaltır

Tablo 1.1'in devamı

Bitki	**Etkisi**
Yakı otu	Kabızlık yapma özelliği ile ishali keser. Prostat büyümesini önlemeye yardımcı olur.
Dereotu	Diyabete karşı ve idrar yolu enfeksiyonlarında
Kırlangıç otu	Göz sağlığını destekler. Karaciğer fonksiyonlarını düzenler.
Barut ağacı	Sindirim sürecini destekler ve bağırsak hareketlerini düzenler
Tropik çay	Öksürük, boğaz ağrısı ve soğuk algınlığı semptomlarını hafifletici etkisi

2. LİTERATÜREL ARAŞTIRMA VE DEĞERLENDİRME

Bu bölümde, tıbbi ve aromatik bitkilerin hem radyonüklit içeriklerinin belirlenmesi hem de bitkilerin tüketilmesinden kaynaklanan radyolojik sağlık risklerinin değerlendirilmesi ile ilgili olarak literatürde yer alan çalışmalar, uluslararası ve ulusal olmak üzere iki başlık altında değerlendirildi. Literatürdeki çalışmalar, kronolojik olarak ele alındı, özetlendi ve değerlendirildi.

2.1 Uluslararası Ölçekte Yapılan Çalışmalar

Dufy vd. (1999) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Güneybatı Hawaii, Marshall Adaları'nda geleneksel tıpta kullanılan tıbbi bitki örneklerinin ^{137}Cs içerikleri, yüksek saflıkta germanyum (HPGe) dedektör ile donatılmış bir gama-ışını spektrometri sistemi ile belirlenmiştir.

Salamon ve Haban (2005) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Slovakya'da tüketilen bazı tıbbi bitki kısımlarının yapay radyoaktivite içerikleri, HPGe dedektör ile donatılmış bir gama-ışını spektrometri sistemi kullanılarak değerlendirilmiştir. Çalışmada, kökler, otlar, çiçekler ve yapraklar gibi yenilebilir tıbbi bitki kısımlarının sezyum radyoizotoplarının (^{137}Cs ve ^{134}Cs) içerikleri analiz edilmiş ve tıbbi bitkilerdeki radyoaktivite içeriklerinin, belirli bir yerde radyasyona maruz kalmaya bağlı olduğu doğrulanmıştır.

Narayana vd. (2007) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Hindistan'ın Mangalore yakınlarındaki Moodabidri'den toplanan 12 ayurvedik tıbbi bitki örneğinin radyonüklit içerikleri incelenmiş ve polonyum (^{210}Po) katkısının, (6,3 – 56,9) Bq/kg aralığında değiştiği bulunmuştur.

Sussa vd. (2009) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, alfa/beta sayımı sistemi ve nötron aktivasyon analiz tekniklerini kullanarak Brezilya'da kullanılan 11 adet tıbbi bitki örneğindeki kararlı elementlerin yanı sıra radyum izotopları (^{228}Ra ve ^{226}Ra), kurşun (^{210}Pb) radyonüklitinin aktivite konsantrasyonları, HPGe dedektör ile donatılmış bir gama-ışını spektrometri sistemi kullanılarak ölçülmüştür. Çalışma

kapsamında tıbbi bitki örneklerinde analiz edilen ^{228}Ra, ^{210}Pb ve ^{226}Ra'nın aktivite konsantrasyonlarının, sırasıyla (29 ± 3 – 65 ± 4) Bq/kg, (32 ± 3 – 76 ± 8) Bq/kg ve (<2,2 – 18,4 ± 0,2) Bq/kg aralığında değiştiği bulunmuştur.

Desideri vd. (2010) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, İtalya'ya farklı ülkelerden gelen ve yerel aktarlar ticari olarak satılan 35 adet tıbbi bitki örneği (kök, yaprak, kabuk, tohum, çiçek, meyve, dut vb.) doğal ve yapay radyoaktiviteyi belirlemek için analize tabi tutulmuştur. Çalışma kapsamında, uranyum (^{238}U) ve polonyum (^{210}Po) alfa spektrometresi; kurşun radyoizotopları (^{214}Pb ve ^{210}Pb), bizmut (^{214}Bi), potasyum (^{40}K) ve yapay radyoizotop sezyum (^{137}Cs) ise HPGe dedektörlü gama-ışını spektrometrisi ile belirlenmiştir. Çalışma sonucunda, her bitki grubundaki en yüksek ^{137}Cs aktivite konsantrasyonun, Doğu Avrupa'dan (Polonya, Macaristan ve Slovakya) gelen tıbbi bitkilerinde ölçüldüğü bildirilmiştir.

Jevremovic vd. (2011) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Sırbistan'daki marketlerden toplanan tıbbi bitki örneklerinin doğal (^{238}U; ^{40}K ve ^{232}Th) ve yapay (^{137}Cs) radyonüklit içerikleri, HPGe dedektör ile donatılmış bir gama-ışını spektrometri sistemi kullanılarak incelemiş; bitkisel çaylardaki ^{137}Cs'nin alımı ve radyonüklit içerikleri üzerinden yıllık etkin dozlar hesaplamıştır. Çalışma kapsamında tıbbi bitki örneklerinde analiz edilen ^{137}Cs; ^{238}U; ^{40}K ve ^{232}Th'nin aktivite konsantrasyonlarının, sırasıyla (0,3 – 8,8) Bq/kg, (0,6 – 8,2) Bq/kg, (126 – 1243,7) Bq/kg ve (1,7 – 15,1) Bq/kg aralığında değiştiği bulunmuştur ve radyonüklitlerin alımından kaynaklanan yıllık etkin doz değerlerinin, radyolojik risk açısından tehlikeli olmadığı gösterilmiştir.

Oni vd. (2011) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Nijerya Ughelli'deki petrol ve gaz tesislerinin çevresinden toplanan üç türe ait tıbbi bitki örneklerinin radyonüklit içerikleri, talyum ile aktive edilmiş sodyum iyodür (NaI(TI)) dedektörü ile donatılmış bir gama-ışını spektrometri sistemi ile araştırılmış ve yıllık etkin radyasyon dozu (YERD) hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda, her tıbbi bitki türü için hesaplanan YERD değerlerinin, tavsiye edilen sınır değer olan1 mSv/y'nin altında olduğu bulunmuştur. Ayrıca çalışmada, Nijerya'da endüstriyel faaliyetlerin ve atık depolama alanlarından alınan bitki örnekleri ile tarımın yapılmadığı el değmemiş bakir bir

bölgeden alınan aynı bitki örnekleri arasında radyoaktivite içerikleri açısından anlamlı bir fark olmadığı tespit edilmiştir.

Oufni vd. (2013) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Fas mutfağında ve geleneksel tıpta kullanılan çeşitli tıbbi bitki örneklerinin toron (^{220}Rn) ve radon (^{222}Rn) aktivite içerikleri, CR-39 ve LR-115 detektörlerinin kullanıldığı pasif katı hal nükleer izleme teknikleri kullanılarak araştırılmıştır. Çalışma kapsamında bitki örneklerinde analiz edilen ^{222}Rn ve ^{220}Rn'nin seviyelerinin, sırasıyla (0,9 ± 0,1 – 6,20 ± 0,47) Bq/kg ve (30,0 ± 2,3 – 195,0 ± 16,0) mBq/kg aralığında değiştiği bulunmuş ve incelenen bitkilerin köklerindeki ^{222}Rn ve ^{220}Rn içeriklerinin, gövde ve yapraklara kıyasla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Sussa vd. (2013) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Brezilya'nın Rio de Janeiro şehrinin Botanik Bahçesi'nden toplanan ve yaygın olarak tıbbi amaçlı kullanılan *Peperomia pellucida* örneğindeki doğal radyoaktivite üzerine bir çalışma sunulmuştur. Çalışma kapsamında bitki örneğindeki ^{238}U; ^{232}Th ve ^{230}Th'nin aktivite konsantrasyonu, alfa spektrometresi ve ^{226}Ra; ^{228}Ra ve ^{210}Pb'nin aktivite konsantrasyonu ise radyokimyasal ayırma işleminden sonra toplam alfa/beta sayım sistemi kullanılarak belirlenmiştir. Çalışma sonucunda belirlenen radyonüklit seviyelerinin, kontamine alanlar hariç, karşılaştırma için kullanılan konsantrasyonlarla aynı büyüklük mertebesinde veya biraz daha yüksek olduğu gösterilmiştir.

Tettey-Larbi vd. (2013) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Gana'da tüketilen sekiz tür tıbbi bitki örneğinin doğal radyoaktivitesi, HPGe dedektör ile donatılmış bir gama-ışını spektrometri sistemi kullanılarak araştırılmış ve doğal radyoaktiviteden kaynaklanan radyolojik sağlık riski değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamımda tıbbi bitki örneklerinde analiz edilen ^{238}U; ^{232}Th ve ^{40}K'nin ortalama aktivite konsantrasyonları, sırasıyla 31,8 ± 2,8 Bq/kg; 56,2 ± 2,3 Bq/kg ve 839,8 ± 11,9 Bq/kg olarak bulunmuştur. Çalışma sonucunda, incelenen tıbbi bitkilerdeki doğal radyonüklitlerin sindirilmesinden kaynaklanan yıllık etkin radyasyon değerlerinin, dünya ortalamasının altında olduğu bildirilmiştir.

Oprea vd. (2014) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Romanya'da çay olarak tüketilen *Tiliacordata, Matricariachamomilla, Calendula officinalis, Ocimumbasilicaum, Achilleamillefolium* ve *Hypericumperforatum* tıbbi bitki türlerinin doğal (^{210}Po; ^{210}Pb; ^{232}Th; ^{238}U) ve yapay (^{137}Cs ve ^{90}Sr) radyonüklit içerikleri, toplam alfa/beta sayım teknikleri kullanılarak araştırılmıştır. Çalışma sonucunda, (1) ^{137}Cs ve ^{90}Sr radyonüklitin aktivite değerlerinin, ölçülebilir minimum aktivite (ÖMA) değerinin sınırının altında olduğu (2) doğal radyonüklitlerin aktivite seviyelerinin, azami sınır değerlerden veya literatürde bildirilen değerlerden daha küçük olduğu ve (3) incelenen tıbbi çay örneklerinin tüketilmesinin, insan sağlığı için risk oluşturmayacağı bildirilmiştir.

Al- Rubiee vd. (2015) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Ürdün'de kullanılan ve farklı ülkelerden ithal edilen 46 tıbbi bitki örneğinin doğal radyoaktivitesi, HPGe dedektör ile donatılmış bir gama-ışını spektrometri sistemi kullanılarak araştırılmıştır. Çalışma kapsamında, tıbbi bitki örneklerin analiz edilen ^{226}Ra; ^{228}Ra ve ^{40}K'nin konsantrasyonlarının, sırasıyla (0,3 ± 0,1 – 15,6 ± 0,5) Bq/kg, (5,3 ± 0,1 –11,5 ± 0,5) Bq/kg ve (24 ± 1,6 – 2034 ± 57) Bq/kg aralığında değiştiği bulunmuştur.

Chandrashekara vd. (2015) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Güney Hindistan'ın kıyı Karnataka bölgesinde küçük bir kasaba olan Puttur'dan toplanan beş tıbbi bitki örneğinin doğal (^{226}Ra; ^{210}Pb; ^{232}Th; ^{40}K) ve yapay (^{137}Cs) radyonüklit içerikleri, HPGe dedektör ile donatılmış bir gama-ışını spektrometri sistemi kullanılarak araştırılmıştır. Çalışma kapsamında, tıbbi bitki örneklerinde analiz edilen (1) ^{137}Cs'nin aktivite konsantrasyonlarının, ÖMA değerinin altında olduğu ve (2) ^{226}Ra; ^{210}Pb; ^{232}Th ve ^{40}K'nin aktivite konsantrasyonlarının ise, sırasıyla (<ÖMA – 9,6) Bq/kg, (<ÖMA – 6,4) Bq/kg, (9,1 – 320,3) Bq/kg ve (443,5 – 3401,3) Bq/kg aralığında değiştiği bulunmuştur.

Kovács vd. (2015) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Macaristan'da tüketilen, aktarlardan ve süpermarketlerden satın alınarak toplanan 10 tıbbi bitki (dördü yaprak, altısı çiçek ve yarı bitki) örneğinin içerdiği ^{210}Po'nun aktivite konsantrasyonu, alfa spektrometresi ve ^{210}Pb; ^{40}K; ^{226}Ra; ^{232}Th ve ^{137}Cs aktivite konsantrasyonları ise HPGe dedektör ile donatılmış bir gama-ışını spektrometri sistemi ile belirlenmiştir.

Çalışmada, (1) ^{210}Po'nun en yüksek değerlerinin (10 –19 Bq/kg), yalnızca yaprak içeren tıbbi bitkilerde ölçüldüğü, (2) ^{226}Ra, ^{232}Th ve ^{40}K'nin topraktan gelmesinin muhtemel olduğu, (3) ^{137}Cs için önemli ölçüde farklı değerler bulunduğu ancak ekili toprakta yetiştirilen tıbbi bitkilerdeki sezyum aktivite konsantrasyonunun daha düşük (0,4 –1,6 Bq/kg) olduğu ve yaygın olarak yetiştirilen örneklerde ise daha yüksek (0,4 –20 Bq/kg) olduğu ve (4) ^{210}Po ve ^{226}Ra'nın, insanlarda aşırı iç doz maruziyetine neden olabileceği belirtilmiştir.

Harb (2015) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Yukarı Mısır'daki Qena'nın yerel pazardan toplanan 17 adet tıbbi bitki örneklerinin doğal radyonüklit içerikleri, HPGe dedektör ile donatılmış bir gama-ışını spektrometri sistemi ile belirlenmiş ve bu radyonüklitlerin sindirilmesine eşlik eden YERD hesaplanmıştır. Çalışma kapsamında, (1) tıbbi bitki örneklerinde analiz edilen radyonüklitlerin aktivite konsantrasyonlarının, (0,4 ± 0,2 – 21,0 ± 1,2) Bq/kg (^{226}Ra), (<0,3 –a 42,3 ± 5,9) Bq/kg ^{228}Ra ve (140 ± 6 Bq/kg – 1538 ± 54) Bq/kg ^{40}K aralığında ve (2) YERD değerlerinin ise (0,003 – 0,073) mSv/y arasında değiştiği bulunmuştur.

Najam vd. (2015) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Irak'ın yerel pazarlarından toplanan ithal dokuz tür tıbbi bitki örneğinde doğal olarak bulunan ^{40}K; ^{226}Ra ve ^{232}Th'nin aktivite seviyesi, toplam alfa/beta ve gama-ışını (orantılı sayaç + NaI(Tl) dedektörü) ve HPGe dedektörlü gama-ışını spektroskopik teknikleri kullanılarak belirlenmiş ve bu radyonüklitlerin sindirilmesine eşlik eden YERD hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda, incelenen tıbbi bitkilerdeki doğal radyonüklitlerin tüketilmesi sonucu popülasyon grubundaki herhangi bir bireyin organ veya dokusuna düşen ortalama YERD değerinin, dünya çapında doğal radyonüklitlerin tüketilmesi sonucu kişi başına alınan ortalama YERD değerinin (0,3 mSv/y) çok altında olduğu bulunmuştur.

Njinga vd. (2015) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Nijerya'nın tıbbi bitkileri üzerinde radyonüklit konsantrasyonunu araştırmak için bir ön araştırma yürütülmüştür. Çalışma kapsamında, Lapai'den toplanan yedi tıbbi bitki örneğindeki ^{226}Ra; ^{232}Th ve ^{40}K radyonüklitlerinin aktivite konsantrasyonları, NaI(Tl) dedektörü ile donatılmış bir gama-ışını spektrometri sistemi kullanılarak belirlenmiş ve

radyolojik parametre olarak yıllık etkin doz değerleri hesaplanmıştır. Çalışma kapsamında tıbbi bitki örneklerinde analiz edilen radyonüklitlerin ortalama aktivite konsantrasyonlarının, 324,2 ± 8,7, Bq/kg (^{40}K); 25,0 ± 3,2 Bq/kg (^{226}Ra) ve 35,1 ± 0,7 Bq/kg (^{232}Th) olarak bulunmuş ve bu radyonüklitlerin sindirilmesi nedeniyle, halkın aldığı ortalama YERD değeri ise 5,4 ± 0,4 × 10^{-3} mSv/y olarak hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda, incelenen tıbbi bitkilerdeki radyonüklitlerin alımından kaynaklanan ilişkili radyolojik sağlık riskinin önemsiz ve tıbbi bitkilerin radyolojik sağlık tehlikeleri açısından güvenli olduğu gösterilmiştir.

Pourimani vd. (2015) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, İran'ın Markazi Eyaleti, Shazand'daki Bagh e Baraftab köyünden toplanan sekiz tıbbi ve yenilebilir bitki örneğinin doğal ve yapay radyoaktivitesi, HPGe dedektörü ile donatılmış bir gama-ışını spektrometri sistemi kullanılarak araştırılmıştır ve radyolojik parametreler hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda, incelenen tıbbi bitkilerde analiz edilen radyonüklitlerin varlığının önemli seviyede olmadığı ve bitkilerin tüketilmesinin, tüketiciler için herhangi bir sağlık sorunu oluşturmayacağı belirtilmiştir.

Abojassim vd. (2016) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Irak'ın Necef şehrindeki çeşitli yerel pazarlardan toplanan 40 farklı tıbbi bitki örneğinin radon aktivite konsantrasyonu, katı hal nükleer iz dedektörleri kullanılarak belirlenmiştir. Çalışma kapsamında, tıbbi bitkilerde analiz edilen radonun ortalama aktivite konsantrasyonu, 26,5 Bq/m^3 olarak bulunmuş ve incelenen tıbbi bitki örneklerinin tüketiminin radon nedeniyle önemsiz bir sağlık riski oluşturduğu gösterilmiştir

Chandrashekara ve Somashekarappa (2016) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Güney Hindistan'ın Karnataka eyaletinin Malnad bölgesinden toplanan sekiz tıbbi bitki ve toprak örneğinin doğal (^{210}Pb; ^{40}K; ^{226}Ra ve ^{232}Th) ve yapay (^{137}Cs) radyonüklit içerikleri, HPGe dedektörü ile donatılmış bir gama-ışını spektrometri sistemi kullanılarak araştırılmıştır. Çalışmada ayrıca incelenen tıbbi bitkilerden alınan radyonüklitlerin sindirilmesi sonucu oluşan YERD değerleri de hesaplanmış. Çalışma kapsamında, tıbbi bitki örneklerinde analiz edilen (1) ^{137}Cs'nin aktivite konsantrasyonlarının, ÖMA değerinin altında olduğu ve (2) ^{210}Pb; ^{40}K; ^{226}Ra ve ^{232}Th'nin aktivite konsantrasyonlarının ise, sırasıyla (2,7 – 11,3) Bq/kg, (<ÖMA –

87,0) Bq/kg, (2,4 – 8,7) Bq/kg ve (93,8 – 6831,4) Bq/kg aralığında değiştiği bulunmuştur. Çalışma sonucunda incelenen bitkilerin tıbbi amaçlarla kullanılmasının, radyolojik açıdan herhangi bir sağlık riski oluşturmayacağı bildirilmiştir.

Kareem vd. (2016) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Irak'ın Necef şehrinin çeşitli yerlerindeki yerel pazarlardan toplanan 40 farklı tıbbi bitki örneklerinin doğal radyoaktivite seviyeleri, NaI(Tl) dedektörlü gama-ışını spektrometrik teknik ile araştırılmıştır. Çalışma kapsamında, tıbbi bitki örneklerinde analiz edilen ^{238}U; ^{232}Th ve ^{40}K'nin ortalama aktivite konsantrasyonu, sırasıyla 5,0 ± 0,4 Bq/kg; 3,0 ± 0,1 Bq/kg ve 219,1 ± 2,2 Bq/kg olarak bulunmuştur. Çalışmada analiz edilen radyoaktivite seviyelerinin, izin verilen azami seviyenin altında olması nedeniyle incelenen tıbbi bitki örneklerinin, insan tüketimi için güvenli olduğu sonucuna varılmıştır.

Saenboonruang vd. (2018) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Tayland'ın merkezinde yetiştirilen altı Tayland tıbbi bitkisindeki doğal radyonüklitlerin (^{226}Ra ve ^{40}K) aktivite seviyeleri ve topraktan bitkiye transfer faktörü (TF), HPGe dedektörü ile donatılmış bir gama-ışını spektrometri sistemi ile araştırılmıştır. Çalışma kapsamında; her tıbbi bitkinin kök, yaprak veya çiçek kısımlarında analiz edilen ^{40}K ve TF'nin aritmetik ortalaması, sırasıyla 610 ± 260 Bq/kg ve 2,0 ve ^{226}Ra ve TF'nin aritmetik ortalaması ise, sırasıyla 4,8 ± 2,6 Bq/kg ve 0,17 olarak bulunmuştur.

Kolapo ve Omoboyede (2019) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Güneybatı Nijerya'da yaygın olarak tüketilen beş tıbbi bitki türüne ait beşer örneğin, doğal radyonüklit içeriği, HPGe dedektörü ile donatılmış bir gama-ışını spektrometri sistemi kullanılarak belirlenmiş ve radyolojik risk değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında, (1) tıbbi bitki örneklerinde analiz edilen ^{40}K; ^{238}U ve ^{232}Th'nin aktivite konsantrasyonlarının, sırasıyla (315,7 ± 39,2 – 892,0 ± 63,1) Bq/kg, (1,7 ± 2,0 – 5,4 ± 2,4 Bq/kg) ve (1,2 ± 1,8 – 8,5± 2,7) Bq/kg aralığında değiştiği ve (2) ortalama YERD değerinin, dünya çapında doğal radyonüklitlerin tüketilmesi sonucu kişi başına alınan ortalama YERD değerinin (0,3 mSv/y) altında olduğu bulunmuştur.

Kranrod vd. (2019) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Tayland'daki çeşitli yerel pazarlardan toplanan ve çeşitli hastalıkların tedavisinde veya tamamlayıcı tıpta yaygın

olarak kullanılan 99 çeşit popüler Tayland tıbbi bitkisine ait 214 bitki örneğinin içerdiği ^{210}Po'nun aktivite konsantrasyonu, alfa spektrometresi ve ^{226}Ra; ^{228}Ra; ^{40}K aktivite konsantrasyonları ise gama-ışını spektrometresi ile belirlenmiş ve bu radyonüklitlerin sindirilmesine eşlik eden yıllık etkin doz hesaplanmıştır. Çalışma kapsamında, (1) tıbbi bitki örneklerinde analiz edilen radyonüklitlerin aktivite konsantrasyonlarının, (<0,2 – 89,9) Bq/kg (^{226}Ra), (<0,1 – 39,6) Bq/kg (^{228}Ra), (<0,8 – 2761,3) Bq/kg (^{40}K) ve (0,3 – 47,1) Bq/kg (^{210}Pb) aralığında değiştiği ve (2) incelenen tıbbi bitki örneklerinin tüketilmesiyle oluşan toplam YERD değerlerinin ise (0,0001 – 0,0327) mSv/y aralığında değiştiği bulunmuştur. Çalışma sonucunda incelenen Tayland şifalı bitki örneklerinin, radyolojik risk açısından güvenli olduğu kabul edilmiştir.

Okoor vd. (2019) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Ürdün'ün İrbid kentindeki yerel pazarlardan satın alınarak toplanan ithal ve yerel 32 farklı tıbbi bitki türü örneğinin, doğal ve yapay radyonüklit içeriği, HPGe dedektörü ile donatılmış bir gama-ışını spektrometri sistemi kullanılarak analiz edilmiştir. Çalışma kapsamında, (1) doğal radyonüklitlerin ortalama konsantrasyonları, 2,6 ± 0,3 Bq/kg (^{226}Ra); 1,4 ± 0,2 Bq/kg (^{232}Th) ve 594,0 ± 63,5 Bq/kg (^{40}K) olarak ve (2) yapay radyonüklit ^{137}Cs ise yalnızca Alkanet (*Alkanna tinctoria*) örneğinde 1,0 ± 0,3 Bq/kg olarak bulunuştur. Çalışmada elde edilen sonuçlar, uluslararası kabul görmüş standart değerlerle karşılaştırılmış ve değerlerin, kabul edilebilir sınırlar içinde olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, incelenen tıbbi bitki örneklerinin önemli bir sağlık riski oluşturmadığı ve yetişkinler tarafından tüketilmesinin radyolojik olarak güvenli olduğu kabul edilmiştir.

Alkufi vd. (2020) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Irak pazarlarından toplanan 40 tür şifalı bitki örneğinin doğal radyoaktivitesi, NaI(Tl) dedektörü ile donatılmış bir gama-ışını spektrometri sistemi kullanılarak belirlenmiş ve bitki tüketimi yoluyla alınan YERD değerleri hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen sonuçların, tıbbi ve gıda kullanımı için izin verilen sınırlar içinde olduğu ve incelenen tıbbi bitkilerin, insan sağlığı için bir tehdit oluşturmayacağı gösterilmiştir.

Hamza vd. (2020) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Irak'ta yaygın olarak kullanılan 10 tıbbi bitki örneğinin doğal radyonüklit içerikleri, NaI(Tl) dedektörü ile

donatılmış bir gama-ışını spektrometri sistemi kullanılarak belirlenmiş ve tıbbi bitkilerde analiz edilen bu doğal radyonüklitlerin sindirilmesinden kaynaklanan YERD değerleri hesaplanmıştır. Çalışma kapsamında, (1) tıbbi bitki örneklerinde analiz edilen doğal radyonüklitlerin ortalama aktivite konsantrasyonları; 38,1 ± 1,6 Bq/kg (^{238}U); 13,0 ± 0,9 Bq/kg (^{232}Th) ve 570,7 ± 31,5 Bq/kg (^{40}K) olarak ve (2) hesaplanan YERD değerlerinin ise dünya ortalaması olan 0,3 mSv/y'den daha küçük olduğu bulunmuştur.

Kandić vd. (2020) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Orta Sırbistan'daki üç lokasyonun (Kopaonik, Sokobanja ve Zlatar) her birinden toplanan 15 farklı şifalı bitki örneğinin doğal (^{40}K ve ^{210}Pb) ve yapay (^{137}Cs) radyonüklit içeriği, HPGe dedektörü ile donatılmış bir gama-ışını spektrometri sistemi kullanılarak araştırılmış ve tıbbi bitkilerde analiz edilen bu radyonüklitlerin sindirilmesinden kaynaklanan YERD değerleri, erişkin bireyler için hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda, incelenen bitkiler için elde edilen ^{137}Cs ve ^{40}K özgül aktivite konsantrasyon değerlerinin literatür verileri ile uyumlu olduğu ve hesaplanan YERD değerlerin ise 100 μSv/y'den daha küçük olduğu bulunmuştur.

Monica vd. (2020) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Hindistan Kerala'ya bağlı Kollam bölgesindeki yerel bitki uzmanlarından temin edilen en önemli Ayurveda ilaçlarının ana bileşeni olarak kullanılan 52 tıbbi bitki örneğinin doğal radyonüklit içerikleri, NaI(Tl) dedektörü ile donatılmış bir gama-ışını spektrometri sistemi kullanılarak belirlenmiş ve bu radyonüklitlerin sindirilmesine eşlik eden radyolojik risk değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında, (1) tıbbi bitki örneklerinde analiz edilen ^{226}Ra; ^{232}Th ve ^{40}K'nin ortalama aktivite konsantrasyonları, sırasıyla 43 ± 18 Bq/kg, 36 ± 15 Bq/kg ve 230 ± 46 Bq/kg olarak bulunmuş ve (2) reçeteli dozda yaygın Ayurvedik ilaçların alımından kaynaklanan ortalama YERD değerinin (39 ± 16 μSv/y), sınır değer olan 1 mSv/y'den önemli ölçüde küçük olduğu ve Ayurvedik ilaçların normal dozda alımının, birey için radyolojik risk oluşturmayacağı tespit edilmiştir.

Sultana vd. (2020) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Bangladeş'te yaygın olarak kullanılan toplam 39 tıbbi bitki örneğinin doğal radyoaktivite seviyesi, HpGe

dedektörü ile donatılmış bir gama-ışını spektrometri sistemi kullanılarak araştırılmıştır. Çalışmada ayrıca, toplanan bitki örneklerinde belirlenen doğal radyoaktivite konsantrasyonları kullanılarak, insanların bu bitkileri tüketerek maruz kalabilecekleri radyolojik risk değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında, (1) bitki örneklerinde analiz edilen doğal radyonüklitlerin aktivite konsantrasyonlarının, (4,1 ± 2,5 – 28,2 ± 7,8) Bq/kg (^{238}U), (3,0 ± 1,6 – 17,6 ± 6,5) Bq/kg (^{232}Th) ve (363,0 ± 36,4 – 1097,1 ± 209,9) Bq/kg (^{40}K) aralığında ve (2) bu radyonüklitlerin sindirilmesine eşlik eden YERD doz değerlerinin ise (6,3 ± 1,2 – 18,2 ± 4,6) µSv/y aralığında değiştiği bulunmuştur. Çalışmada elde edilen bulgular, incelenen tıbbi bitkilerin tedavi amaçlı kullanımının, herhangi bir sağlık tehlikesi oluşturmayacağını göstermiştir.

Adeleke vd. (2021) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Nijerya'nın Minna, Mekunkele ve Mando ve Kachia'dan toplanan 11 tıbbi bitki türü ve tıbbi bitkilerin yetiştirildiği toprak örneklerinin doğal ve yapay radyoaktivitesi, HPGe dedektörü ile donatılmış bir gama-ışını spektrometri sistemi kullanılarak araştırılmıştır ve tıbbi bitkilerden alınan radyonüklitlerin sindirilmesi sonucu oluşan YERD hesaplanmıştır. Çalışma kapsamında, (1) tıbbi bitkilerde analiz edilen doğal radyonüklitlerin aktivite konsantrasyonlarının, (1,3 – 10,4) Bq/kg (^{238}U), (5,2 – 13,8) Bq/kg (^{232}Th) ve (11,7 – 239,8) Bq/kg (^{40}K) aralığında değiştiği ve (2) yapay olarak üretilen ^{137}Cs radyonüklitinin aktivite konsantrasyonun, tüm bitki örneklerinde ÖMA değerinin altında olduğu bulunmuştur. Çalışma sonucunda hesaplanan YERD değerlerinin, dünya ortalaması olan 0,30 mSv/y ve güvenli sınır olan 1 mSv/y değerinin çok altında olduğu bulunmuştur. Çalışma sonucunda incelenen tıbbi bitki örneklerinin tüketilmesinin, halk sağlığı açısından herhangi bir radyolojik risk içermediği ve bitkilerin tıbbi amaçlarla kullanılmasının güvenli olduğu gösterilmiştir.

Biira vd. (2021) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Doğu Uganda'nın Tororo Bölgesi'ne bağlı Osukru Alt Bölgesinde yer alan beş köyden toplanan 10 adet tıbbi bitki ve toprak örneğinin doğal olarak içerdiği radyonüklitlerin (^{226}Ra; ^{232}Th ve ^{40}K) aktivite konsantrasyonları, NaI(Tl) dedektörü ile donatılmış bir gama-ışını spektrometri sistemi kullanılarak belirlenmiş ve bu radyonüklitlerin sindirilmesinden kaynaklanan olası radyolojik riskler, hamaile kadın ve yeni doğan bebekler için YERD hesaplanarak değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda, (1) tıbbi bitki örneklerinde

analiz edilen doğal radyonüklitlerin ortalama aktivite konsantrasyonları; 6,0 Bq/kg (^{226}Ra); 9,7 Bq/kg (^{232}Th) ve 359,6 Bq/kg (^{40}K) olarak bulunmuş, (2) YERD değerleri, tüm yaş grupları için dünya ortalaması olan 0,30 mSv/y'den daha küçük olarak hesaplanmış ve (3) 'tıbbi toprak' tüketimine bağlı YERD değerleri, bebeklerde 0,3 mSv/y daha yüksek hesaplanmış ve hamilelik sırasında toprak tüketiminin bebekler için doğal bir tehlike oluşturduğu dolayısıyla bu tür bir uygulamanın önerilmemesi gerektiği vurgulanmıştır.

Živković vd. (2021) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Sırbistan, Kragujevac'taki aktarlardan satın alınarak toplanan 10 şifalı bitki türü örneğinin doğal (^{226}Ra; ^{232}Th; ^{40}K) ve yapay (^{137}Cs) radyonüklit içerikleri, HPGe dedektörü ile donatılmış bir gama-ışını spektrometri sistemi kullanılarak belirlenmiştir. Çalışma kapsamında, tıbbi bitki örneklerinde analiz edilen ^{226}Ra; ^{232}Th; ^{40}K ve ^{137}Cs'nin ortalama aktivite konsantrasyonu, sırasıyla 2,8 Bq/kg; 0,6 Bq/kg; 984,3 Bq/kg ve 0,3 Bq/kg olarak bulunmuştur. Çalışma sonucunda, çay yapmak için kullanılan tıbbi bitkilerin, kişinin sağlığı üzerinde olumsuz sonuçlara yol açabilecek radyonüklit konsantrasyonunu içermediği gösterilmiştir.

Saudi vd. (2022) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Mısır'da kullanılan 29 tıbbi bitki örneğinin doğal olarak içerdiği radyonüklitlerin aktivite konsantrasyonları, HPGe dedektörü ile donatılmış bir gama-ışını spektrometri sistemi kullanılarak belirlenmiş ve bu radyonüklitlerin tüketilmesinden kaynaklanan radyolojik sağlık riski değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında, tıbbi bitki örneklerinde analiz edilen doğal radyonüklitlerin ortalama aktivite konsantrasyonları; 7,3 ± 0,5 Bq/kg (^{238}U); 7,8 ± 0,6 Bq/kg (^{232}Th) ve 471,4 ± 11,3 Bq/kg (^{40}K) olarak bulunmuştur. Çalışma sonucunda elde edilen radyolojik veriler, incelenen bitki türlerinin içerdiği radyoaktivite seviyesinin, dünya ortalamasına yakın olduğunu ortaya koymuştur.

Abdelfadeel vd. (2023) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Mısır'da yaygın olarak tüketilen 17 tıbbi bitki örneğinin, (1) ^{226}Ra; ^{238}U; ^{232}Th ve ^{40}K içeriği, HPGe dedektörü ile donatılmış bir gama-ışını spektrometri sistemi, (2) ^{222}Rn ve ^{220}Rn içeriği, CR-39 nükleer iz dedektörleri kullanarak ve (3) zehirli element olarak bakır (Cu), çinko (Zn), kadmiyum (Cd) ve kurşun (Pb) içeriği ise, atomik absorpsiyon spektrofotometresi

kullanılarak ölçülmüştür. Çalışma sonucunda, (1) yaprak olarak kullanılan tıbbi örneklerde ölçülen doğal radyonüklitlerin aktivite seviyelerinin, dünya genelindeki ortalama aralıklarının üzerinde olduğu, (2) yaprak tıbbi bitki örneklerinin tüketilmesinden kaynaklanan radyolojik riski değerlendirmek için hesaplanan tüm radyolojik parametrelerin, önerilen izin verilen sınırdan daha yüksek olduğu ve (3) incelenen bazı örneklerde radon seviyeleri ile zehirli elementler arasında herhangi bir ilişki bulunmadığı ortaya koyulmuştur.

Shuaibu vd. (2023) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Malezya'nın Kuala Lumpur şehrindeki yerel marketlerden toplanan Apiaceae, Lauraceae, Solanaceae ve Zingiberaceae dâhil olmak üzere farklı familyalar ait 14 tür tıbbi bitki örneğinin doğal (^{226}Ra; ^{228}Ra; ^{40}K) ve yapay (^{137}Cs) radyonüklit içerikleri, HPGe dedektörü ile donatılmış bir gama-ışını spektrometri sistemi kullanılarak araştırılmıştır. Çalışma kapsamında, (1) tıbbi bitki örneklerinde analiz edilen ^{226}Ra, ^{228}Ra ve ^{40}K'nin ortalama aktivite konsantrasyonları, sırasıyla 5,4 ± 1,4 Bq/kg, 3,8 ± 0,9 Bq/kg ve 340,0 ± 13,0 Bq/kg olarak, (2) ^{137}Cs'nin aktivite konsantrasyonu ise sadece yıldız anason örneğinde 0,7 ± 0,2 Bq/kg olarak ve (3) analiz edilen radyonüklitlerin sindirilmesinden kaynaklanan YERD ve ilişkili yaşam boyu kanser risk değerlerinin, kabul edilebilir sınırların altında olduğu bulunmuştur. Çalışma sonucunda, incelen tıbbi örneklerin tüketilmesinin, radyolojik bir etkisinin olmayacağı vurgulanmıştır.

Achari vd. (2024) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Hindistan'ın Batı Ghat bölgesinden toplanan 17 adet toprak ve 17 adet tıbbi bitki örneğinin içerdiği ^{232}Th, ^{226}Ra ve ^{40}K'nin aktivite konsantrasyonları, NaI(Tl) dedektörü ile donatılmış bir gama-ışını spektrometri sistemi kullanılarak belirlenmiştir. Çalışma sonucunda, (1) tıbbi bitki örneklerinde analiz edilen doğal radyonüklitlerin ortalama aktivite konsantrasyonları; 9,3 ± 1,1 Bq/kg (^{232}Th); 28,4 ± 2,8 Bq/kg (^{226}Ra) ve 76,3 ± 3,7 Bq/kg (^{40}K) olarak bulunmuştur ve (2) tıbbi bitkilerin tüketiminin önemli bir sağlık riski oluşturmadığı, 15 yaş ve üzeri kişiler için radyolojik olarak güvenli olduğu ancak 5 yaşın altındaki bireyler için güvenli olmadığı değerlendirilmiştir.

Hossen vd. (2024) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Bangladeş'in Chattogram bölgesindeki yerel pazarlar da dâhil olmak üzere farklı yerlerden toplanan 21 tıbbi

bitki örneğinin doğal radyonüklit içerikleri, HPGe dedektörü ile donatılmış bir gama-ışını spektrometri sistemi kullanılarak belirlenmiş ve radyonüklitlerin sindirilmesinden kaynaklanan YERD değerleri hesaplanmıştır. Çalışma kapsamında, (1) tıbbi bitki örneklerinde analiz edilen ^{226}Ra; ^{232}Th ve ^{40}K'nin ortalama aktivite konsantrasyonları, sırasıyla 16,5 ± 5,1 Bq/kg; 15,733 ± 3,9 Bq/kg ve 157,9 ± 59,8 Bq/kg olarak bulunmuş ve (2) ortalama YERD değeri; $4{,}4\times10^{-4}$ mSv/y olarak hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda YERD değerlerinin, dünya ortalaması olan 0,29 mSv/y'nin çok altında olmasından dolayı incelenen tıbbi bitkilerin insani tüketim için güvenli olduğu gösterilmiştir.

Kabir vd. (2024) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Bangladeş'teki Sundarban Mangrov ekosistemindeki bazı tıbbi bitki ve toprak örneklerinin doğal radyoaktivite seviyeleri, HPGe dedektörü ile donatılmış bir gama-ışını spektrometri sistemi kullanılarak belirlenmiş ve bu radyoaktiviteden kaynaklanan radyolojik sağlık riski değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında, bitki örneklerinde analiz edilen doğal radyonüklitlerin ortalama aktivite konsantrasyonlarının, (9,0 ± 3,0 – 66,9 ± 8,2) Bq/kg (^{226}Ra), (25,3 ± 5,0 – 155,0 ± 16,0) Bq/kg (^{232}Th) ve (68,1 ± 8,3 – 139,0 ± 12,0) Bq/kg (^{40}K) aralığında değiştiği bulunmuştur. Çalışmada elde edilen veriler, incelenen tıbbi bitki tüketiminin, radyolojik olarak güvenli olduğunu göstermiştir.

Khanal vd. (2024) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Nepal, Katmandu'daki Arghakhanchi'nin Malarani ve Budhanilkantha'daki her örnekleme noktasından, 10 ila 15 cm derinlik aralığında tek seferde alınan farklı tarlalardan 10 tıbbi bitki ve ilgili bitkilerin köklerine bitişik toprak örneklerinin içerdiği ^{226}Ra; ^{232}Th ve ^{40}K'nin aktivite konsantrasyonları, NaI(Tl) dedektörü ile donatılmış bir gama-ışını spektrometri sistemi kullanılarak ölçülmüştür. Çalışma sonucunda, aktivite konsantrasyonlarına göre incelenen tıbbi bitkilerin, aşırı miktarda tüketilmedikçe herhangi bir radyolojik sağlık tehlikesi oluşturmayacağı ancak sürekli araştırmaların yapılması gerektiği vurgulanmıştır.

Popoola vd. (2024) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Nijerya'nın Edo Eyaleti'nin Esan-Merkez Yerel Yönetim Bölgesindeki Ewu'dan toplanan altı tıbbi bitki örneğinin içerdiği ^{40}K; ^{238}U ve ^{232}Th radyonüklitlerinin aktivite konsantrasyonları, NaI(Tl)

dedektörü ile donatılmış gama-ışını spektrometri sistemi kullanılarak belirlenmiştir. Çalışmada ayrıca, tıbbi bitki örneklerinin içerdiği bu radyonüklitlerin sindirilmesinden kaynaklanan YERD ve ilişkili yaşam boyu kanser riski hesaplanmıştır. Çalışma kapsamında; ^{40}K; ^{238}U ve ^{232}Th'nin ortalama aktivite konsantrasyonu, sırasıyla 209,4 ± 5,1 Bq/kg; 4,7 ± 0,2 Bq/kg ve 8,0 ± 0,4 Bq/kg olarak ölçülmüştür. Çalışmanın sonucunda, incelenen tıbbi bitki örneklerinin tüketilmesinden kaynaklanan radyolojik bir risk bulunmadığı ortaya koyulmuştur.

Shuaibu (2024) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Batı Malezya'dan temsili toprak örnekleri ve organik olarak yetiştirilen geleneksel şifalı bitkilerdeki doğal radyonüklitlerin aktivite konsantrasyonları ve topraktan bitkiye transfer faktörleri HPGe dedektörü ile donatılmış bir gama-ışını spektrometri sistemi kullanılarak incelenmiştir. Çalışma kapsamında, tıbbi bitki örneklerinde analiz edilen ^{226}Ra; ^{228}Ra ve ^{40}K'nin ortalama aktivite konsantrasyonları, sırasıyla 10 Bq/kg; 4 Bq/kg ve 498 Bq/kg olarak bulunmuştur. Çalışmada elde edilen bulgular, bitki büyüme alışkanlıklarının, radyonüklitlerin alımını büyük ölçüde etkilediğini ve incelenen tıbbi bitkilerin tüketiminden kaynaklanan YERD ve ilişkili yaşam boyu kanser riskinin ihmal edilebilir düzeyde olduğunu göstermiş.

Shuaibu vd. (2025) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Nijerya'nın Kano metropolünde bulunan tıbbi bitkiler ile ilgili radyolojik veri tabanı oluşturulması amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında, Kano'daki Dawanau uluslararası tahıl pazarından toplanan 12 tür tıbbi bitki örneğinin doğal radyoaktivite seviyesi, HPGe dedektörü ile donatılmış bir gama-ışını spektrometri sistemi kullanılarak belirlenmiş ve bu radyoaktiviteden kaynaklanan YERD ve ilişkili yaşam boyu kanser riski hesaplanmıştır. Çalışma kapsamında, tıbbi bitki örneklerinde analiz edilen ^{226}Ra; ^{232}Th ve ^{40}K'nin ortalama aktivite konsantrasyonu, sırasıyla 43 ± 5; 37 ± 4 ve 5883 ± 23 Bq/kg olarak bulunmuştur. Çalışma sonucunda, hesaplanan YERD değerlerinin, zararlı sağlık etkilerinden kaçınmak için önerilen 290 µSv/y olan azami alım dozunun altında kaldığı ve incelenen tıbbi bitkilerin tüketilmesinin güvenli olduğu gösterilmiştir.

2.2 Ulusal Ölçekte Yapılan Çalışmalar

Parmaksız ve Ağuş (2014) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Türkiye'nin Ankara ilindeki marketlerden ve aktarlardan temin edilen 22 tür Türkiye kökenli tıbbi bitki örneğinin doğal (^{226}Ra; ^{232}Th ve ^{40}K) ve yapay (^{137}Cs) radyonüklit içeriği, HPGe dedektörü ile donatılmış bir gama-ışını spektrometri sistemi kullanılarak araştırılmıştır. Çalışmada ayrıca, söz konusu radyoaktiviten kaynaklanan radyolojik riskler de değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında, tıbbi bitki örneklerinde analiz edilen (1) doğal radyonüklitlerin ortalama aktivite konsantrasyonları; 5,9 Bq/kg (^{226}Ra); 2,8 Bq/kg (^{232}Th) ve 500,2 Bq/kg (^{40}K) olarak ölçülmüş ve (2) ^{137}Cs'nin aktivite konsantrasyonlarının, ÖMA değerlerinden daha düşük olduğu bulunmuştur. Çalışma sonucunda, incelenen tıbbi bitkilerin tüketilmesine eşlik eden kanser riskinin ihmal edilebilecek kadar düşük olduğu ve dolayısıyla bu bitkilerin insani tüketim için güvenli olduğu kabul edilmiştir.

Bal vd. (2018) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Türkiye'nin Bitlis ilinde yetişen 10 farklı tıbbi ve aromatik bitki örneğinin doğal radyoaktivitesi, HPGe dedektörü ile donatılmış bir gama-ışını spektrometri sistemi kullanılarak belirlenmiştir. Çalışma kapsamında, bitki örneklerinde analiz edilen doğal radyonüklitlerin aktivite konsantrasyonlarının, (3,7 – 48,0) Bq/kg (^{226}Ra) ve (129,8 – 786,3) Bq/kg (^{40}K) aralığında değiştiği ve ^{232}Th'nin aktivite konsantrasyonlarının, ÖMA değerlerinden daha düşük olduğu bulunmuştur.

Canbazoğlu vd. (2018) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Türkiye'nin Kilis ilinde kullanılan tıbbi bitkilerin doğal (^{226}Ra; ^{232}Th ve ^{40}K) ve yapay (^{137}Cs) radyonüklitleri, HPGe dedektörü ile donatılmış bir gama-ışını spektrometri sistemi kullanılarak belirlenmiştir. Çalışma kapsamında, tıbbi bitki örneklerinde analiz edilen radyonüklitlerin ortalama aktivite konsantrasyonları; 10,8 ± 1,6 Bq/kg (^{226}Ra); 18,0 ± 2,1 Bq/kg (^{232}Th); 1025,8 ± 15,5 Bq/kg (^{40}K) ve 1,1 ± 0,4 Bq/kg (^{137}Cs) olarak ölçülmüştür. Çalışma sonucunda, incelenen tıbbi bitkiler için sindirilmeye bağlı YERD değeri 55,0 µSv/y olarak hesaplanmış ve bitkilerin tüketilmesinin halk sağlığı açısından herhangi bir risk oluşturmayacağı belirtilmiştir.

Bal vd. (2019) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Türkiye'nin Bitlis ilinde yetişen ve şifa amaçlı olarak tüketilen 13 farklı bitki örneğinin doğal radyonüklit içerikleri, NaI(Tl) dedektörü ile donatılmış bir gama-ışını spektrometri sistemi kullanılarak belirlenmiştir. Çalışma kapsamında, bitki örneklerinde analiz edilen doğal radyonüklitlerin aktivite konsantrasyonlarının, (12,5 ± 2,5 – 92,1 ± 5,3) Bq/kg (^{226}Ra), (23,1 ± 4,4 – 88,0 ± 6,7) Bq/kg (^{232}Th) ve (42,6 ± 5,2 – 533,0 ± 7,8) Bq/kg aralığında değiştiği bulunmuştur.

Cengiz ve Çağlar (2019) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Türkiye'nin Kars ilindeki çeşitli yerel pazarlardan toplanan yaprak, çiçek ve meyve formundaki yedi adet tıbbi bitki türü örneğinin doğal radyonüklit içerikleri, NaI(Tl) dedektörü ile donatılmış bir gama-ışını spektrometri sistemi kullanılarak belirlenmiştir. Çalışma kapsamında, bitki örneklerinde analiz edilen doğal radyonüklitlerin aktivite konsantrasyonlarının, (16,4 ± 2,2 – 32,8 ± 3,5) Bq/kg (^{226}Ra), (19,7 ± 3,7 – 85,0 ± 5,6) Bq/kg (^{232}Th) ve (795,8 ± 9,8 – 1056,3 ± 14,4) Bq/kg (^{40}K) aralığında değiştiği bulunmuştur. Çalışmada elde edilen aktivite verilerinin, diğer ülkelerin yayınlanmış değerleriyle büyük ölçüde örtüştüğü belirtilmiştir.

Cengiz ve Çağlar (2022) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Türkiye'nin Doğu Anadolu Bölgesi'nde yaygın olarak kullanılan, Kars ilinin tarım dışı çayırlarından, ormanlık alanlardan ve dere kenarlarından toplanan sekiz adet tıbbi bitki örneğinin doğal radyonüklit içerikleri, NaI(Tl) dedektörü ile donatılmış bir gama-ışını spektrometri sistemi kullanılarak belirlenmiştir. Çalışma kapsamında, bitki örneklerinde analiz edilen doğal radyonüklitlerin ortalama aktivite konsantrasyonları, sırasıyla 21,1 ± 2,80 Bq/kg; 56,0 ± 4,3 Bq/kg ve 908,3 ± 11,9 Bq/kg olarak ölçülmüş ve topraktan bitkiye ortalama transfer faktör değerleri ise ^{226}Ra; ^{232}Th ve ^{40}K için sırasıyla 0,6; 0,9 ve 1,5 olarak bulunmuştur. Çalışma sonucunda, incelenen tıbbi bitkilerin, hastalıkların tedavisinde kullanılmasının insanlar için herhangi bir radyolojik sağlık riski oluşturmayacağı bildirilmiştir.

Kırıs (2022) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Türkiye'nin Rize ilindeki yerel aktarlardan temin edilen ve yaygın olarak kullanılan 12 farklı tıbbi bitki örneğinin doğal ve yapay radyoaktivite seviyeleri, HPGe dedektörü ile donatılmış bir gama-ışını

spektrometri sistemi kullanılarak araştırılmıştır. Çalışmada ayrıca, toplanan bitki örneklerinde belirlenen radyoaktiviteden kaynaklanan radyolojik risk de değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında, (1) tıbbi bitki örneklerinde analiz edilen doğal ve yapay radyonüklitlerin ortalama aktivite konsantrasyonları; 4,5 Bq/kg (^{226}Ra); 1,8 Bq/kg (^{232}Th); 259,2 Bq/kg (^{40}K) ve 0,7 Bq/kg (^{137}Cs) olarak ölçülmüş ve (2) bu radyonüklitlerin sindirilmesinden kaynaklanan YERD ve ilişkili yaşam boyu kanser riski, sırasıyla 5,9 μSv/y ve 19,6 × 10^{-6} olarak hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda, incelenen bazı tıbbi bitkilerin, insan sağlığı için önemli bir radyolojik risk oluşturmayacağı bildirilmiştir.

Bal vd. (2023) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Türkiye'nin Bitlis ilinde yetişen ve şifa amaçlı olarak tüketilen 35 bitki ve 12 toprak örneğinin doğal ve yapay radyonüklit içerikleri, HPGe dedektörü ile donatılmış bir gama-ışını spektrometri sistemi kullanılarak belirlenmiştir. Çalışma kapsamında, bitki örneklerinde analiz edilen ^{226}Ra; ^{232}Th ve ^{137}Cs için transfer faktörlerinin sırasıyla (0,09 – 2,18); (0,01 – 0,19) ve (0,01 – 2,8) aralıklarında hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda incelenen tıbbi bitki örneklerinin, aşırı miktarda tüketilmediği sürece, insan sağlığı için herhangi bir radyolojik risk oluşturmayacağı bildirilmiştir.

Güven vd. (2023) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Ankara ili ve çevresindeki (Mamak, Kızılcahamam, Beypazarı, Kahramankazan ve Polatlı ilçeleri) çeşitli bölgelere ayrılmış arazilerden toplanan 35 tür tıbbi endemik bitki örneklerinin doğal radyoaktivite seviyeleri, NaI(Tl) dedektörü ile donatılmış bir gama-ışını spektrometri sistemi kullanılarak belirlenmiştir. Çalışmada ayrıca, toplanan bitki örneklerinde belirlenen doğal radyoaktivite konsantrasyonları kullanılarak, insanların bu bitkileri tüketerek maruz kalabilecekleri radyolojik risk değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında, bitki örneklerinde analiz edilen doğal radyonüklitlerin aktivite konsantrasyonları, (14,7 ± 1,3 – 59,1 ± 3,1) Bq/kg (^{226}Ra), (1,8 ± 0,1 – 50,1 ± 2,8 Bq/kg (^{232}Th) ve (207,2 ± 34,1 – 826,1 ± 25,4) Bq/kg (^{40}K) aralığında değiştiği bulunmuştur. Çalışmada elde edilen bulgular, incelenen tıbbi bitkilerin tedavi amaçlı kullanımının, herhangi bir sağlık tehlikesi oluşturmayacağını göstermiştir.

Kamislioglu vd. (2023) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Türkiye'nin Balıkesir kentinden taze olarak temin edilen dokuz tıbbi bitki (mercanköşk, biberiye, lavanta, kekik, adaçayı, nane, kutsal fesleğen, çalı fesleğeni ve melisa) örneğinin doğal ve yapay radyoaktivite seviyeleri, HPGe dedektörü ile donatılmış bir gama-ışını spektrometri sistemi kullanılarak araştırılmıştır. Çalışmada ayrıca, toplanan bitki örneklerinde belirlenen radyoaktiviteden kaynaklanan radyolojik risk de değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında, (1) tıbbi bitki örneklerinde analiz edilen doğal ve yapay radyonüklitlerin ortalama aktivite konsantrasyonları; 18,2 Bq/kg (^{226}Ra); 36,9 Bq/kg (^{232}Th); 1025,1 Bq/kg (^{40}K) ve 5,4 Bq/kg (^{137}Cs) olarak ölçülmüş ve (2) bu radyonüklitlerin sindirilmesinden kaynaklanan YERD ve ilişkili yaşam boyu kanser riski, sırasıyla 34,3 μSv/y ve 120,1 × 10^{-6} olarak hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda incelenen bazı tıbbi bitkilerin, Balıkesir'de yaşayan insanlar tarafından tüketilmesinin, radyolojik sağlık riski oluşturacağı tespit edilmiştir.

2.3 Literatürdeki Çalışmaların Genel Değerlendirilmesi

Yukarıda kronolojik olarak verilen literatürel çalışmalar ile ilgili yapılan değerlendirmeler aşağıda verilmiştir:

(1) Uluslararası ölçekte Literatürde yer alan uluslararası çalışmalar, Güneybatı Hawaii (Marshall Adaları), Slovakya, Brezilya, Mısır, İtalya, Sırbistan, Nijerya, Gana, Romanya, Macaristan, İran, Irak, Ürdün, Hindistan, Tayland ve Çin gibi ülkelerde tıbbi amaçlı olarak kullanılan bitki örneklerindeki doğal ve/veya yapay radyoaktivitenin araştırılması ve radyoaktiviteden kaynaklanan radyolojik riskin değerlendirilmesi ile ilgilidir.

(2) Ulusal ölçekte literatürde yer alan uluslararası çalışmalar, Türkiye'nin Ankara, Balıkesir, Bitlis ve Rize illerinde yetişen ve tıbbi amaçlı kullanılan bitki örneklerindeki doğal ve/veya yapay radyoaktivitenin araştırılması ve radyoaktiviteden kaynaklanan radyolojik riskin değerlendirilmesi ile ilgilidir.

(3) Çalışmalarda, genelde sınırlı sayıdaki tıbbi bitki örneklerinde, doğal radyonüklit olarak ^{238}U; ^{226}Ra; ^{232}Th; ^{228}Ra ve ^{40}K ve yapay radyonüklit olarak ^{137}Cs'nin ve birkaç

çalışmada ise bu radyonüklitlerin yanı sıra ^{210}Pb; ^{210}Po; ^{222}Rn; ^{220}Rn ve ^{90}Sr'nin aktivite konsantrasyonları belirlenmiştir.

(4) Yukarıda sözü edilen radyonüklitlerin aktivite konsantrasyonları, genelde HPGe veya NaI(Tl) dedektörlü gama-ışını spektrometresi kullanılarak ve birkaç çalışmada ise alfa spektrometresi, toplam lafa/beta sayım sitemi kullanılarak belirlenmiştir. Bir veya iki çalışmada tıbbı bitki örneklerinin radon ve toron aktivite içerikleri, nükleer iz dedektörlerin kullanıldığı pasif yöntem ile belirlenmiştir.

(5) Çalışmalar kapsamında belirlenen radyonüklitlerin sindirilmesinden kaynaklanan radyolojik riskler, genel olarak YERD'ler ve ilişkili yaşam boyu kanser riskleri hesaplanarak değerlendirilmiştir. Bazı çalışmalarda ise radyolojik riski değerlendirmek amacıyla radyum eş değer (Ra_{eq}) aktivite, dış ve iç ışınlama (H_{ex} ve H_{in}) indisleri hesaplanmıştır. Aslında bu indislerin tıbbi bitkilerin tüketilmesine eşlik eden radyolojik risklerin değerlendirilmesi ile ilgisi yoktur. Bu tür indisler, yapı malzemelerinin radyolojik açıdan kullanılabilirliği ile ilgilidir.

2.4 Çalışmanın Özgün Değeri ve Literatüre Katkısı

Yukarıda verilen literatür değerlendirmesinden de anlaşılacağı gibi tez kapsamında yapılan çalışmanın literatüre katkısı ve özgün değeri;

(1) Çalışmanın, Türkiye'de tıbbi ve aromatik amaçlar için tüketilen bitki türleri ve örnek sayısı açısından çok zengin olması ve

(2) Bu bitkiler örneklerinde analiz edilen radyum izotopları (^{226}Ra ve ^{228}Ra) ve ^{40}K'nin sindirilmesinden kaynaklanan radyolojik sağlık risklerini değerlendirmek için ilk defa mortalite ve morbidite yaşam boyu kanser risklerinin hesaplanmasıdır.

3. ÇALIŞMA İLE İLGİLİ KURAMSAL BİLGİ

3.1 Radyasyon ve Etkileşim Süreçleri

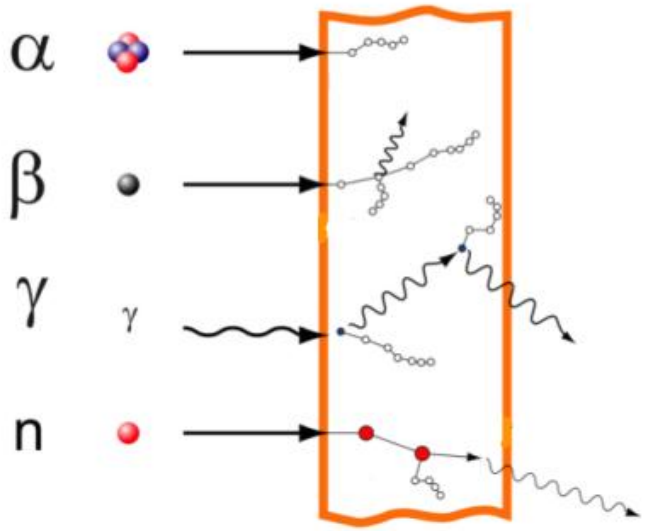
3.1.1 Radyasyon

İnsanların radyasyona maruz kalması, yeryüzündeki yaşamın sürekli ve kaçınılmaz bir özelliğidir. Radyasyon, enerjinin tanecikler ve/veya dalgalar hâlinden uzayda yayılması olarak tanımlanabilir. Radyasyon, iki ana kategoriye ayrılır: İyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon. İyonlaştırıcı radyasyon, maddeye nüfuz edebilen; hava, su, canlı dokular vb. etkileştiği ortamın atomlarından veya moleküllerinden elektronları koparabilen parçacık ve dalga biçimindeki enerjidir. İyonlaştırıcı radyasyona örnek olarak elektronlar, protonlar, alfa (α)- parçacıkları, (β)- parçacıkları, ağır iyonlar, elektromanyetik dalgalar (X- ışınları ve γ- ışınları) ve nötronlar verilebilir. Bir atomu iyonlaştırmak için gereken minimum enerji (iyonlaşma potansiyeli), alkali elementler için birkaç elektron volttan helyum (soy gaz) için 24,5 eV'ye kadar değişir. İyonlaşma doğrudan veya dolaylı olabilir. Enerjik elektronlar (β-ışını veya radyasyonu), enerjik elektronlar, alfa-parçacıkları ve ağır iyon gibi yüklü parçacıklardan oluşan doğrudan iyonlaştırıcı radyasyon, ortamdaki atomların yörünge elektronlarıyla doğrudan Coulomb etkileşimleri yoluyla ortama enerji biriktirir. Nötr parçacıklardan (nötronlar) ve fotonlardan (X-ışınları ve gama ışınları) oluşan dolaylı iyonlaştırıcı radyasyon, iki aşamalı bir süreçle ortama enerji aktarır. İlk adımda yüklü bir parçacık ortama salınır (fotonlar elektron veya pozitronları, nötronlar ise protonları veya daha ağır iyonları serbest bırakır). İkinci adımda, serbest kalan yüklü parçacıklar, ortamdaki atomların yörünge elektronlarıyla doğrudan Coulomb etkileşimleri yoluyla ortama enerji aktarır (Krane, 1987). Yüksek nüfuz etme gücü ve atom yapısını değiştirme yeteneği, iyonlaştırıcı radyasyonun iyi amaçlar için kullanılmasını sağlar; örneğin, X-ışını, gama, beta ve pozitron radyasyonu tıbbi görüntüleme, tahribatsız muayene ve çeşitli endüstriyel ölçümlerde kullanılır. İyonlaştırıcı radyasyonun sterilize edici etkileri, tıbbi aletlerin temizlenmesi, gıda ışınlaması ve steril böcek tekniği için faydalıdır. Bununla birlikte, aşırı veya uzun süreli maruziyetin insanlar için tehlikeli olabilmesi gibi bir dezavantajı da vardır.

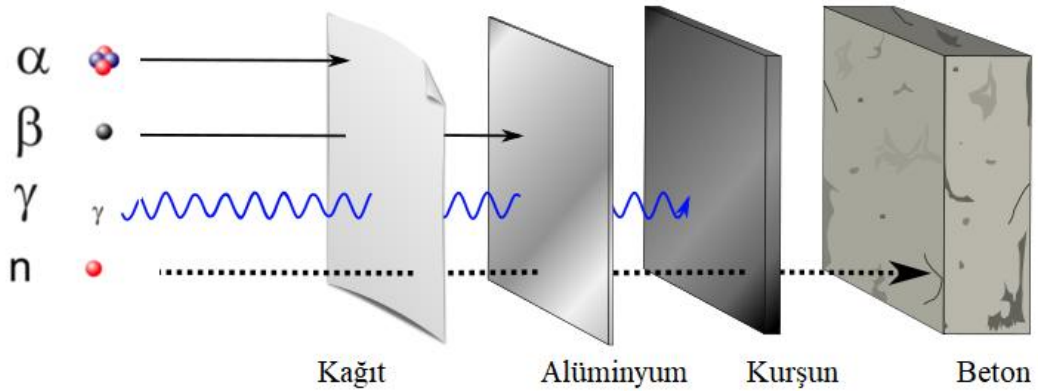
Öte yandan, iyonlaştırıcı olmayan radyasyon daha az enerjiktir, daha az nüfuz edicidir ve maddeden elektron koparamaz, bu da onu iyonlaştırıcı radyasyona kıyasla insan sağlığı için daha az tehlikeli kılar. Elektromanyetik spektrumda yer alan ultraviyole, görünür ışık, kızılötesi, mikrodalga ve radyo dalgaları iyonlaştırıcı olmayan radyasyondur. İyonlaştırıcı olmayan radyasyonun radar iletişimi, yemek pişirme (mikrodalgalar), bilgi iletimi (radyo dalgaları), ısıtma, kurutma, pişirme, seraları ısıtma, kızılötesi fotoğrafçılık ve ısı arayan füzeler (kızılötesi), görme, sıradan fotoğrafçılık, lazer ışınları (görünür ışık), spektroskopi, mineral analizi, sahteciliği tespit etme, bakteri öldürme gibi değerli kullanımları vardır.

3.1.2 Radyasyon Etkileşim Süreçleri

Daha önce de ifade edildiği gibi iyonlaştırıcı radyasyon maddeyle etkileşime girdiğinde, maddeyi oluşturan atom veya moleküldeki elektronu uyarabilir ve/veya elektronu koparabilir. Bu açıdan ele alındığında iyonlaştırıcı radyasyon iki gruba ayrılabilir: Yüklü parçacık radyasyonu ve yükü olmayan radyasyon. Alfa parçacıkları, protonlar, elektronlar ve iyonları içeren yüklü parçacıkların maddeyle etkileşimi, X-ışınları, gama- ışınları ve nötronlar gibi yükü olmayan nötr radyasyonların etkileşiminden farklıdır. Yüklü parçacıklar, atomlarının elektronlarıyla etkileşime girerek atomları iyonlaştırır ve doğrudan iyonlaştırıcı olarak sınıflandırılırken, gama ışınları ve nötronlar, malzeme içindeki diğer atomları iyonlaştırabilen yüklü bir parçacık üretebilir ve dolaylı iyonlaştırıcı olarak sınıflandırılır. Şekil 3.1, iyonlaştırıcı radyasyon türleri ve maddeyle etkileşimlerini şematik olarak göstermektedir. Şekil 3.1'deki düz çizgiler, alfa, beta (elektron) ve nötron gibi parçacıkların yollarını; dalgalı çizgiler, gama- ışınlarını ve boş daireler iyonlaşmanın gerçekleştiği yerleri temsil eder (Grdanovska, 2015). Bu ayrım önemlidir çünkü etkileşimin gücü, yüklü parçacıkların nüfuz edebilirliğini sınırlar ve bu da malzeme yüzeyine verilen hasarı sınırlar. Fotonlar ve nötronlar ise daha derinlere nüfuz ederek daha homojen bir etki yaratabilir. Örneğin, 1 MeV enerjide, havadaki menzil fotonlar için 10^4 cm, nötronlar ve elektronlar için 10^2 cm ve protonlar için 10^0 cm civarındadır (Grdanovska, 2015). Şekil 3.2, bazı iyonlaştırıcı radyasyonların fraklı malzemelerdeki nüfuz etme derinliklerini şematik olarak göstermektedir.



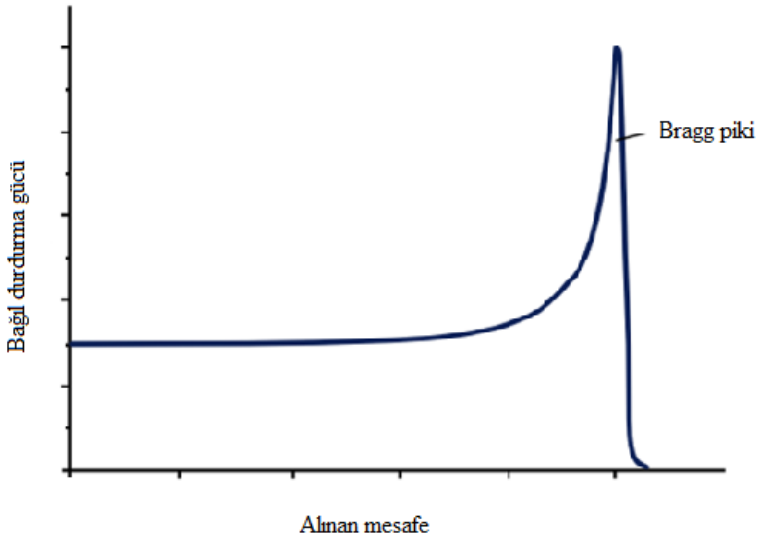
Şekil 3.1 İyonlaştırıcı radyasyon türleri ve maddeyle etkileşimleri (Grdanovska, 2015)



Şekil 3.2 Farklı iyonlaştırıcı radyasyon türlerinin nüfuz etme güçleri

Kütleleri elektronun kütlesinden yüzlerce kat daha büyük olduğu için "ağır" olarak tanımlanan yüklü ağır parçacıklar hem pozitif hem de negatif yüklü olabilirler ve hedef çekirdeklerin elektronlarını uyarırlar ve her uyarılmada enerjilerinin küçük bir kısmını kaybederler. Etkileştikleri madde için aldıkları yolun en sonunda, çok sayıda çarpışma sonucu neredeyse tüm kinetik enerjilerini kaybettikleri anlar hariç, oldukça düz bir yolda ilerlerler; kat edilen mesafe arttıkça iyonların enerjisi azalır. Yüklü ağır parçacıkların bağlı elektronlarla çarpışması esnek olmayan bir çarpışmadır; hedef elektronun bağlanma enerjisinin üstesinden gelmek için kinetik enerjinin bir kısmı kaybedilir. Yüklü parçacıkların nüfuz etme (penetrasyon) derinliğine bağlı enerji kaybı Bragg eğrisi ile gösterilir. Protonlar için tipik bir Bragg eğrisi Şekil 3.3'te gösterilmiştir. Parçacık durmadan hemen önce oluşan bağıl durdurma gücündeki tepe noktasına Bragg piki denir. Parçacık kinetik enerjisini kaybettikçe, etkileşim kesiti

artar. Bu, parçacık durmadan önce artan bir durdurma gücüyle sonuçlanan parçacık etkileşiminde bir artış olduğu anlamına gelir. Bu, protonun enerjisinin çoğunu biriktireceği özgül derinlik, malzemeye en fazla zararın verileceği yer olduğundan büyük önem taşır. Bragg eğrisi tarafından tanımlanan bağıl durdurma gücü davranışı, kanser tedavisi için parçacık terapisinde çok faydalıdır ve doktorların durdurma gücünü ve dolayısıyla parçacığın enerji birikimini kanser hücrelerine yoğunlaştırırken çevredeki hücrelere verilen hasarı en aza indirmesini sağlar. Beta parçacıkları (enerjik elektronlar) gibi yüklü hafif parçacıklar, madde içinde hareket ederken yüklü ağır parçacıklara benzer şekilde enerji kaybederler ve esas olarak Coulomb kuvveti aracılığıyla maddeyle etkileşime girerler. Ancak hafif ve ağır yüklü parçacıkların kütlelerindeki fark, iki tür arasındaki enerji kayıplarında fark yaratır. Yüklü hafif parçacıkların, özellikle elektronların, etkileştikleri maddenin atom çekirdeklerinin elektrik alanlarında geçerken yavaşlamaları sonucu elektromanyetik radyasyon olan Bremsstrahlung (frenleme) radyasyonu yayınlanabilir veya saptırılan parçacıklar hareket yoluyla ilişkili elastik saçılma etkileşimlerine maruz kalırlar.

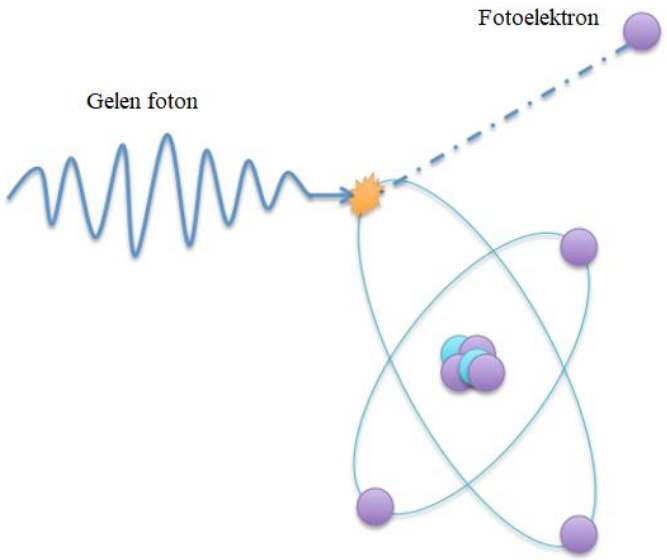


Şekil 3.3 Bağıl durdurma gücündeki protonlar için Bragg eğrisi (Grdanovska, 2015)

Nötron ve foton gibi yükü olmayan nötr radyasyonlar, herhangi bir yük taşımadıkları için dolaylı olarak iyonlaştırıcıdır. Nötron radyasyonu, çekirdek bölünmesi (nükleer fisyon) sonucunda yayınlananlar gibi serbest nötronlardan oluşmaktadır. Atomik elektronların geçişlerinden kaynaklanan X- ve kararsız bir çekirdekten yayınlanan gama- radyasyonları, yüksek enerjili fotonlardan oluşan elektromanyetik

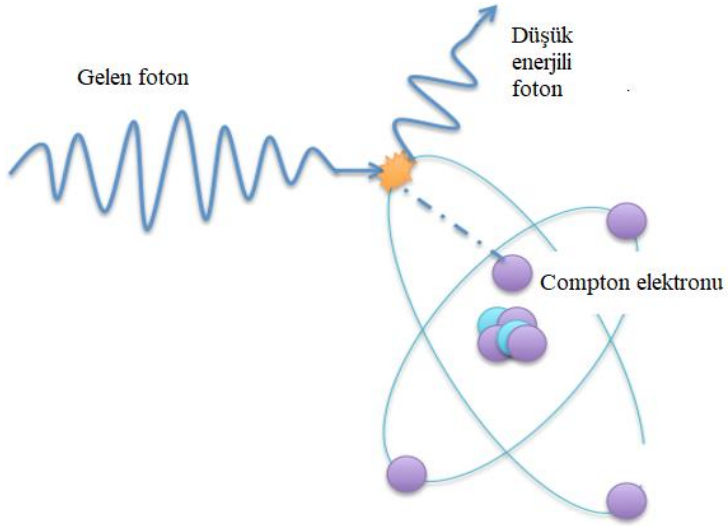
radyasyonlardır. Bu tezin kapsamı doğrultusunda, ele alınacak tek iyonlaştırıcı fotonlar gama- ışınlarıdır. Yüksek enerjili bir foton, maddeyle üç mekanizmadan biriyle etkileşime girebilir: Fotoelektrik etki, çift oluşumu ve Compton saçılması. Her bir mekanizmanın olasılığı, radyasyonun enerjisine ve hedef çekirdeğin atom numarasına bağlıdır.

Fotoelektrik etki, düşük enerjili bir gama ışını (E < 0,3 MeV) bir atomun yörünge elektronuyla etkileşime girdiğinde baskın hâle gelir. Fotonun kinetik enerjisi, bir elektronu yörünge kabuğundan çıkarıp atomu uyarılmış bir duruma göndermeye yeterlidir. Bu uyarılmış durumun oluşumunu, atom sonsuza kadar uyarılmış bir durumda kalamayacağı için her zaman ikincil bir emisyon izler. Fotonun bir yörünge elektronuyla etkileşimi, Şekil 3.4'de şematik olarak gösterildi.



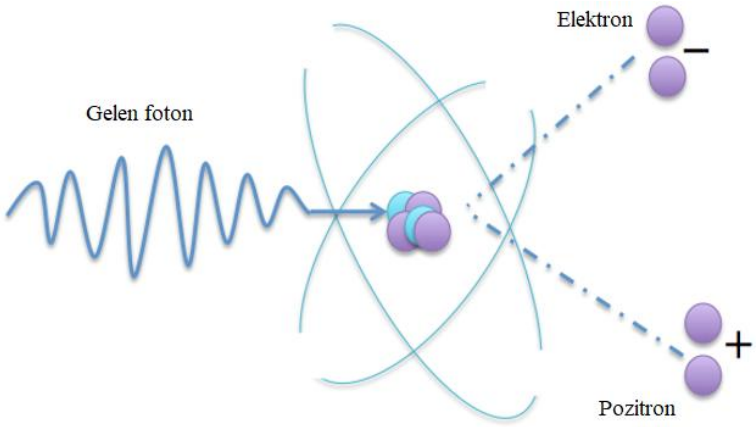
Şekil 3.4 Fotoelektrik etki ile gama etkileşimi (Grdanovska, 2015)

Compton saçılması, orta enerjili bir gama ışını (0,3 MeV < E < 1,5 MeV) ile hedef çekirdeğin tek bir elektronu arasındaki etkileşimdir (elektron ve atomu arasındaki bağlanma enerjisi, gama ışınının enerjisinden çok daha küçüktür). Fotoelektrik etkinin aksine, bu süreçte gama- ışını orijinal enerjisinin bir kısmını korur ve elektronu yörüngesinden çıkarmaya yetecek kadarını aktarırken, geri kalanı bir açıyla saptırılır (inkoherent saçılma). Compton saçılması, Şekil 3.5'te şematik olarak gösterildi.



Şekil 3.5 Compton saçılmasıyla gama etkileşimi (Grdanovska, 2015)

Çift oluşumu, en az 1,022 MeV enerjiye sahip bir fotonun, atom sayısı büyük olan bir malzeme tarafından soğrulmasıyla meydana gelir ve bu da bir elektron-pozitron çiftinin oluşmasıyla sonuçlanır. 1,022 MeV'lik enerji, elektron ve pozitronun durağan kütlesine eşdeğerdir. Çift çok kısa ömürlüdür ve bu iki parçacığın her biri 0,511 MeV enerjiye sahip iki gama- fotonuna dönüşmesine yol açar. Çift oluşumu, Şekil 3.6'da şematik olarak gösterildi.



Şekil 3.6 Çift oluşumu yoluyla gama etkileşimi (Grdanovska, 2015)

Elektronların, gama-ışınlarının ve yüklü ağır parçacıkların aksine, nötronlar Coulomb kuvvetiyle etkileşime girmez ve bu nedenle yalnızca atom çekirdekleriyle etkileşime girer. Nötronların, kökenlerine ve hareket mesafelerine bağlı olarak enerjileri, 1 eV'den daha düşükten birkaç MeV'e kadar değişebilir. Nötronların maddeyle birçok farklı etkileşimi vardır ve bu etkileşimlerin olasılığı büyük ölçüde nötron enerjisine

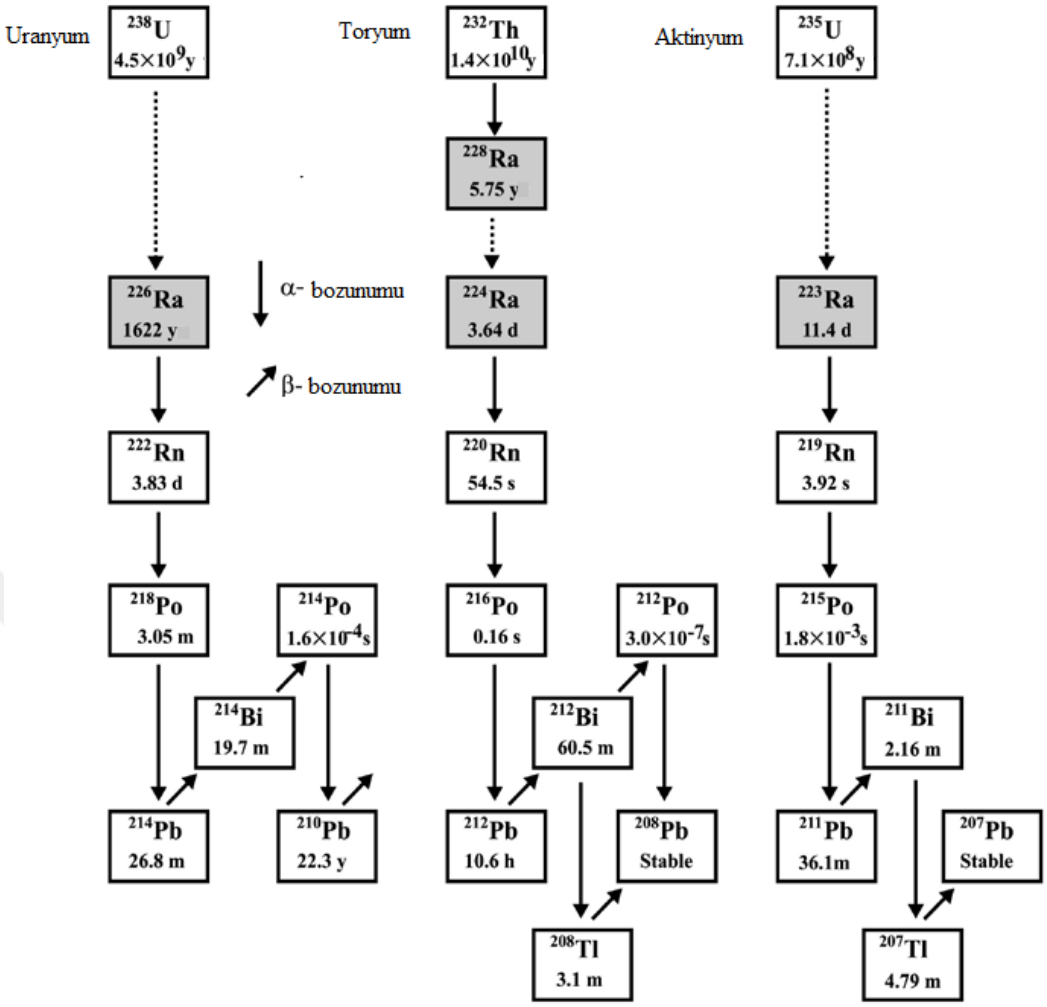
bağlıdır. Nötronlar maddeler ile enerjilerine göre baskın olarak saçılma, esnek saçılma, esnek olmayan saçılma, soğurulma, yakalama, dönüşüm ve çekirdek bölünmesi tepkimesi gibi etkileşirler.

3.2 İyonlaştırıcı Radyasyon Kaynakları

İyonlaştırıcı radyasyon kaynakları, doğal ve yapay iyonlaştırıcı radyasyon kaynaklar olarak iki gruba ayrılabilir (Sultan, 2025). Doğal iyonlaştırıcı radyasyon kaynakları, kozmik ve terrestriyal (yer kabuğu kökenli) radyonüklitlerden oluşmaktadır (Sultan, 2025). Doğal radyasyon kaynaklarından yayınlanan iyonlaştırıcı radyasyon, ortalama dünya nüfus radyasyon dozuna 2,4 mSv/y'lik yıllık etkin doz değeri (0,4 mSv/y kozmik ve 2 mSv/y terrestriyal kökenli) yaklaşık %80 oranında katkıda bulunur (WHO, 2022). Dünya, uzaydan gelen yüksek enerjili parçacıklar tarafından sürekli olarak bombardımana tutulmaktadır. Bu kozmik ışınlar, atmosferik bileşenlerin çekirdekleriyle etkileşime girerek, atmosferde derinlikle, uçak irtifalarından yer seviyesine kadar yoğunluğu azalan kozmik ışın maruziyetlerine katkıda bulunan bir dizi etkileşim ve ikincil reaksiyon ürünü üretir (UNSCEAR, 2000). Kozmik ışın etkileşimleri ayrıca kozmojenik radyonüklitler olarak bilinen bir dizi radyoaktif çekirdek üretir. Bunların en bilinenleri trityum (^{3}H) ve karbon radyoizotopudur (^{14}C'dir) (UNSCEAR, 2000). Atmosfere gelen Galiktik kozmik ışınların %98'i nükleonik bileşenlerden (protonlar (%88), alfa parçacıkları (%11) ve geri kalanı daha ağır çekirdekler) ve %2'si elektronlardan oluşur (UNSCEAR, 2000). Kozmik radyasyon rakıma göre değişim göstermekte ve rakım düştükçe azalmaktadır. Yer seviyesinde, kozmik ışın alanının baskın bileşeni, enerjileri çoğunlukla 1 – 20 GeV arasında olan müonlardır (UNSCEAR, 2000). Kozmik ışın nötron alanını başlatan protonlar, dünyanın manyetik alanından güçlü bir şekilde etkilenir ve bu da ekvator bölgelerindeki nötron akı oranının kutup bölgelerindekinden daha düşük olmasına neden olur (UNSCEAR, 2000). Kozmik ışın parçacıklarının atmosferdeki etkileşimleri; ^{3}H; berilyum (^{7}Be); ^{14}C ve sodyum (^{22}Na) dâhil olmak üzere bir dizi kozmojenik radyonüklit üretir (UNSCEAR, 2000). Esasen hedef çekirdeklerden daha hafif olan tüm nükleer türler (özellikle azot, oksijen ve argon) yüksek enerjili spalasyon etkileşimleri tarafından üretilir (UNSCEAR, 2000). Üretim üst stratosferde en yüksektir, ancak bazı enerjik kozmik ışın nötronları ve protonları alt atmosferde de

kozmojenik radyonüklitler üretir (UNSCEAR, 2000). Üretim yalnızca rakıma değil, aynı zamanda enleme de bağlıdır ve kozmik ışınların dünyanın manyetik alanından geçişini düzenleyen 11 yıllık güneş döngüsüne göre de değişir (UNSCEAR, 2000). Yer kabuğu kökenli radyonüklitleri iki gruba ayrılabilir. Birinci grubu, Şekil 3.7'de gösterildiği gibi uranyum (^{238}U), aktinyum (^{235}U) ve toryum (^{232}Th) doğal radyoaktif serilerine ait radyonüklitler ve ikinci grubu ise bu serilerde yer almayan lütesyum (^{176}Lu), samaryum (^{147}Sm), lantan (^{138}La), rubidyum (^{87}Rb) ve potasyum (^{40}K) gibi primordiyal radyonüklitler oluşturmaktadır (UNSCEAR, 2000). Ancak, aktinyum serisinde yer alan radyonüklitler ve ^{40}K′un dışındaki primordiyal radyonüklitler (^{176}Lu; ^{147}Sm; ^{138}La ve ^{87}Rb), toplam etkin doz hızına olan katıklarının küçük olması sebebiyle genelde radyasyondan korunma süreçlerine dâhil edilmemektedir (UNSCEAR, 2000). Bu radyonüklitlerin her biri, bozunma süreçlerine bağlı olarak α-, veya β- veya γ- veya bunların kombinasyonları olan iyonlaştırıcı radyasyonları yayarlar. Her üç radyoaktif seride de hem katı hem de gaz hâlinde radyonüklitler oluşmaktadır. Bu üç seride soy gaz olarak oluşan radon izotopları, uranyum serisindeki radon (^{222}Rn), toryum serisindeki toron (^{220}Rn) ve aktinyum serisindeki aktinon (^{219}Rn) olarak isimlendirilmektedir (Sultan, 2025).

Yapay iyonlaştırıcı radyasyon kaynaklarını, (1) nükleer silah denemeler ve nükleer santral kazalar sonucunda oluşan radyoaktif serpintiler ve nükleer tesislerden kaynaklanan yetkili deşarjlar ile yayılan ^{3}H; ^{14}C; ^{89}Sr; ^{90}Sr; ^{131}I; ^{134}Cs; ^{137}Cs vb. radyonüklitler, (2) tıpta teşhis amaçlı kullanılan ^{18}F; ^{67}Ga; ^{111}In; ^{201}Tl vb. radyonüklitler, Röntgen ve bilgisayarlı tomografi cihazları (3) endüstriyel faaliyetlerde ve tıpta tedavi amaçlı kullanılan ^{60}Co radyonükliti ve elektron hızlandırıcıları oluşturmaktadır. Nükleer reaktörlerin çalışması sırasında, aktivasyon radyonükliti ^{41}Ar gibi çeşitli fisyon soy gazları açığa çıkar. Daha belirgin fisyon soy gazları arasında, basınçlı su reaktörlerinden ^{133}Xe ve kaynar su reaktörlerinden ^{85}Kr; ^{87}Kr; ^{88}Kr; ^{133}Xe; ^{135m}Xe; ^{135}Xe ve ^{138}Xe bulunur (UNSCEAR, 2000). Fisyon ürünü soy gazların ve aktivasyon gazının çoğu kısa ömürlü olduğundan, tesisi yakınlardaki sakinlerin maruziyetine odaklanılmıştır (UNSCEAR, 2000).



Şekil 3.7 Uranyum, torum ve aktinyum doğal radyoaktif seriler (Kim, 2011)

3.3 İyonlaştırıcı Radyasyon Birimleri

Hava içinden geçen iyonlaştırıcı radyasyonun, havadaki atom ve molekülleri iyonlaştırması, ışınlama (X) olarak bilinir ve aşağıda verilen denklem ile tanımlanır (Krane, 1987; Sultan, 2025):

$$X = \frac{Q}{m} \tag{3.1}$$

Bu denklemde; m, havanın kütlesi (kg) ve Q ise havada oluşturulan iyonların Coulomb (C) cinsinden toplam yüküdür. Uluslararası birim sisteminde X'in birimi, C/kg olarak verilir (Krane, 1987; Sultan, 2025). Daha önce ışınlama doz birimi olarak kullanılan röntgen (R), aşağıda verildiği gibi normal şartlar altında, bir cm^3 kuru havada, bir

elektrostatik yük birimi (eyb) meydan getiren ışınlama olarak tanımlanır (Krane, 1987; Sultan, 2025):

$$1\,\mathrm{R} = \frac{1\,\mathrm{eyb}}{0{,}001293\ \ \mathrm{g}} = 2{,}58 \times 10^{-4}\,\mathrm{C/kg} \tag{3.2}$$

Ancak, havadan farklı malzemeler radyasyona maruz bırakıldığında, bu malzemeler, havanınkine benzemeyen enerji soğurma hızlarına sahip olacaktır (Krane, 1987; Sultan, 2025). Böylece bu malzemelerin iyonlaşma yolu ile soğurduğu (absorpladığı) enerjiyi tarif etmek için yukarıda bahsedilen doz ışınlama biriminden daha farklı bir doz birimine ihtiyaç duyulmuştur (Krane, 1987; Sultan, 2025). Malzemenin kütlesi başına soğurduğu enerjinin ölçüsünü veren bu doz birimi, malzeme tarafından soğurulan doz olarak isimlendirilir ve rad ("Radyasyon soğurma dozu" nun İngilizce karşılığı olan "radiation absorption dose" teriminin baş harflerinde türetilmiştir.) ile ifade edilir. Bir gram kütle, 100 erg'lik enerji soğurduğunda bir rad′lık iyonlaştırıcı radyasyon dozuna maruz kalmıştır. Havanın bir röntgen′lik ışınlanması, soğurulmuş doz cinsinden 0,88 rad'a denktir (1 R = 0,88 rad) (Krane, 1987; Sultan, 2025). Uluslararası birim sisteminde, doz birimi olarak gray (Gy) kullanılmaktadır. Bir kilogram kütle 1 joule (J) enerji soğurduğunda, 1 Gy′lik iyonlaştırıcı radyasyon dozuna maruz kalmıştır ve böylece 1 Gy = J/kg dır (Krane, 1987; Sultan, 2025).

Farklı ışınlama koşullarında, herhangi bir kütlenin eşit miktarda enerji soğurulması (absorblanması), aynı biyolojik etkiyi oluşturmayabilir. Radyasyona maruz kalmanın oluşturduğu biyolojik zarar, bu radyasyonun sebep olduğu uyarma ve/veya etkisindeki biyolojik moleküllerin kimyasal değişimi ile takip edilebilir. Bu biyolojik zarar ile ilgili olumsuz değişimlerin büyüklüğü ve kalıcılığı, radyasyonun geçtiği yol boyunca enerji birikimin yerel hızı olarak bilinen doğrusal enerji aktarımı ile ilgilidir (Krane, 1987; Sultan, 2025). Bu nedenle kişilerin radyasyondan korunması ile ilgili standartları belirlemek için farklı türdeki radyasyonların oluşturabileceği bazı biyolojik etkilerinin ölçülmesi gerekli ve önemlidir (Sultan, 2025). Bu durum için de bağıl biyolojik etkinlik (BBE) ortaya konmuştur. BBE, belirli bir radyasyon dozunun, aynı biyolojik etkiyi meydana getiren X-ışınlarının dozuna oranıdır (Sultan, 2025). Ancak BBE′nin, bağıl olarak ölçülmesi güç olduğundan BBE′nin yerini kalite faktörü

(KF) almıştır. KF, radyasyonun aldığı birim yol boyunca biriken enerjiye göre bir radyasyonun tipi enerjisi için kolaylıkla hesaplanabilir (Sultan, 2025). Dolayısıyla, bilinen bir iyonlaştırıcı radyasyonun herhangi bir biyolojik sistem üzerindeki etkisini tanımlayan eşdeğer doz (E) aşağıdaki denklem ile verilir (Krane, 1987; Sultan, 2025):

$$E = D \times KF \tag{3.3}$$

Bu denklemde; D, soğrulmuş doz ve KF ise radyasyonun kalite faktörüdür. D, rad cinsinden alındığında, eşdeğer dozun birimi, rem ile verilir ("Röntgen eşdeğer kişi" nin İngilizce karşılığı olan "(roentgen equivalent man)" teriminin baş harflerinden türetilmiştir.). D, Gy ise, sievert (Sv) eşdeğer doz birimidir (1 Sv=100 rem) (Sultan, 2025). KF değerleri: β-, X- ve γ- ışınları için 1; düşük enerjili (~ keV) nötron ve protonlar için 2 ila 5 arasında; enerjik (~ MeV) nötron ve protonlar için 5 ila 10 arasında ve α- ışınları için 20 olarak belirlenmiştir (Krane, 1987; Sultan, 2025).

3.4 İyonlaştırıcı Radyasyonun Biyolojik Etkileri

İnsanlar; ev, okul vb. kapalı yerlerde veya sokak, park vb. açık yerlerde (kamu maruziyetleri), iş yerlerinde (mesleki maruziyetler) veya tıbbi bir ortamda (tıbbi maruziyetler) gibi farklı koşullar altında yukarıda sözü edilen kaynaklardan yayınlanan iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalabilirler. Bu maruziyet iç ve dış ışınlama gibi iki farklı yolla meydana gelebilir. İç ışınlama, bir radyonüklitin solunması, yutulması (sindirilmesi) veya deri teması (enjeksiyon yoluyla veya yaralar yoluyla) ile kan dolaşımına girmesiyle meydana gelir. İç ışınlama, radyonüklitin vücuttan kendiliğinden veya bir tedavi sonucu atılmasıyla sona erer. Dış ışınlama, toprak, hava, su, toz, yapı malzemeleri vb. ortamlardaki radyonüklitlerden yayınlanan özellikle gama- radyasyonun, tüm vücudu ışınlamasıyla meydana gelebilir. İyonlaştırıcı radyasyona maruziyet, röntgen ışınlarından kaynaklanan tıbbi radyasyon maruziyeti gibi harici bir kaynaktan gelen ışınlanma sonucu da ortaya çıkabilir. Radyasyon kaynağı korunduğunda veya kişi radyasyon alanının dışına çıktığında harici ışınlama durur.

İyonlaştırıcı radyasyona maruz kalma, radyasyondan korunma amacıyla planlı, mevcut ve acil durumlar olmak üzere üç durumda değerlendirilebilir. Planlı maruz kalma durumları, radyasyon kaynaklarının belirli amaçlarla kasıtlı olarak sokulması ve çalıştırılmasından kaynaklanır; örneğin, radyasyonun teşhis veya tedavi amaçlı tıbbi kullanımı veya radyasyonun endüstri veya araştırma amaçlı kullanımı gibi. Mevcut maruz kalma, radyasyonun zaten mevcut olduğu ve kontrol kararı alınması gereken durumlarda ortaya çıkar; örneğin, evlerde veya iş yerlerinde radon maruziyeti veya çevreden gelen doğal arka plan radyasyonuna maruz kalma. Acil maruz kalma durumları, nükleer kazalar veya kötü niyetli eylemler gibi hızlı müdahale gerektiren beklenmedik olaylardan kaynaklanır. Yeryüzünde yaşayan bir birey, ortalama 3,0 mSv/y'lik yıllık etkin radyasyon dozuna maruz kalmaktadır. Bu yıllık etkin doz, kozmik ışınlardan iler gelen (0,4 mSv/y), yer kabuğu kökenli radyonüklitlerden kaynaklanan dış ışınlamadan (0,48 mSv/y), radon gazının solunmasının sebep olduğu iç ışınlamadan (1,26 mSv/y), yiyecek ve içme suyunun tüketilmesinden kaynaklanan iç ışınlamadan (0,29 mSv/y) kaynaklanan dozlardan oluşmaktadır (WHO, 2022). Radyasyonun tıbbi kullanımı, tüm yapay kaynaklardan ileri gelen toplam dozun %98'ini oluşturur ve toplam nüfus maruziyetinin %20'sini temsil eder. Dünya çapında her yıl 4200 milyondan fazla tanısal radyoloji muayenesi yapılmakta, 40 milyon nükleer tıp işlemi gerçekleştirilmekte ve 8,5 milyon radyoterapi tedavisi uygulanmaktadır. İyonlaştırıcı radyasyonun herhangi bir canlıda biyolojik etki meydana getirebilmesi için, radyasyon enerjisinin canlıyı meydan getiren hücreler ve dokular tarafından absorblanması ve dokularda dağılması gerekir. Radyasyon enerjisinin absorblanması ile biyolojik etkinin meydana gelmesi arasında geçen sürede aşağıda verilen dört süreç birbirini takip eder (Sultan, 2025): Birinci süreçte, fiziksel etkileşmeler meydana gelir ve iyonlaştırıcı radyasyonu absorblayan hücre veya dokuları oluşturan atomların veya moleküllerin uyarılma veya iyonlaşmalarını içerir. Etkileşmeler neticesinde meydana gelen ürünler; 10^{-10} s gibi çok kısa sürede ikincil tepkimelerin oluşmasına neden olurlar ve ikincil reaksiyon ürünleri ortaya çıkar (Sultan, 2025). İkinci süreçte, fizikokimyasal etkileşmeler meydana gelir ve ikincil tepkimeleri içerir. Üçüncü süreçte, kimyasal etkileşmeler meydana gelir ve radikallerin veya serbest atomların birbirleri ve ortamdaki moleküller ile tepkimelerini içerir. Dördüncü süreçte, biyolojik etkileşmelerin meydana gelir ve radyasyon etkisi ile herhangi bir organizmada oluşan moleküler değişiklikleri içerir (Sultan, 2025).

Yukarıda bahsedilen kademeler neticesinde kromozomda meydana gelen hasarlar, bir takım biyolojik olayları tetikler. Bu olaylarda genlerin hasar almasına ve kansere sebep olabilir. Üreme organlarının hasar alması ise mutasyona götürebilir ve bu tip bir mutasyon nesillere aktarılabilir. Kalıtsal mutasyonlar ve kanser olayları, stokastik (olasılıklı) etkiler olarak isimlendirilir. Vücudun tamamı, kısa sürede yüksek seviyedeki radyasyon dozlarına (1 Sv- 10 Sv) maruz bırakıldığı zaman, çok sayıda hücre ölümü gerçekleşebilir. Bu durum, hayati organların ve sistemlerin fonksiyonlarını bozabilir. Bu bozulmalar neticesinde; kusma, mide bulantısı, derin doku ve cilt yanıkları, vücudun enfekte olması gibi ani (akut) görülen sağlık etkileri saatler, günler veya haftalar sonrasında ortaya çıkabilir. Vücudun tamamı, kısa sürede aşırı seviyedeki radyasyon dozlarına (≥10 Sv) maruz bırakıldığında, dokular ve iç organlar öyle hasar alır ki hayati sistemlerin fonksiyonları biter ve günler veya haftalar içinde ölüm gerçekleşir. Radyasyon dozu, hasarın büyüklüğünü artırır. Bu etkilere, belirli (deterministik) etkiler olarak tanımlanır ve eşik değerlerden daha küçük radyasyon doz seviyelerinde gözlenmeyebilir. Radyasyon dozları, eşik değerlerin altındaki seviyelere sınırlandırılırsa, belirli etkiler tamamen engellenebilir (Sultan, 2025). Dünya çapında radyolojik risklerin değerlendirilmesi, WHO-BEIR, UNSCEAR, ICRP ve IARC gibi uluslararası kuruluşların düzenli olarak yayınladıkları raporlar dikkate alınarak gerçekleştirilmektedir (Sultan, 2025).

3.5 Radyoaktivite

Radyoaktivite, kararsız atom çekirdeklerinin, daha kararlı duruma gelebilmeleri için bozunma süreçleri sonucunda elektromanyetik radyasyon veya tanecik yayınlayarak kendiliğinden farklı atom çekirdeklerine dönüşmesi olarak tarif edilebilir (Knoll, 2000; Krane, 1987; Sultan, 2025). Radyoaktif bozunma yapan karasız çekirdek, radyoizotop veya radyonüklit olarak isimlendirilir (Sultan, 2025). Rastgele gelişen ve istatistik yasalarına tabi olan radyoaktif bozunma, aşağıdaki bağıntı ile verilir (Krane, 1987; Sultan, 2025):

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \tag{3.4}$$

Bozunma Yasası olarak da bilen bu bağıntıda, N_0, başlangıçtaki (t=0) ve N(t), t süre sonraki kararsız çekirdek sayısı ve λ, her bir kararsız çekirdeğin karakteristiği olan bozunum sabitidir. λ, aşağıdaki bağıntı ile verilir (Krane, 1987):

$$\lambda = \frac{\mathrm{Ln}(2)}{T_{1/2}} \tag{3.5}$$

Burada $T_{1/2}$, başlangıçtaki kararsız çekirdek sayısının, yarıya düşmesi için geçen süre olarak tanımlanan yarılanma süresidir. Bir kaynağın radyoaktivitesi (birim zamandaki bozunum sayısı) (A), aşağıdaki bağıntı ile verilir (Krane, 1987; Sultan, 2025):

$$A = \left|\frac{dN}{dt}\right| = \lambda \cdot N_0 e^{-\lambda t} = \lambda \cdot N \tag{3.6}$$

Aktivitenin geleneksel birimi, curiedir ve Ci ile gösterilir ve bir saniyede 3,7 x 10^{10} tane kararsız çekirdeğin bozunuma uğrayarak daha kararlı hâle gelmesidir (1 Ci =3,7 x 10^{10} bozunum/s). Son yıllarda aktivitenin uluslararası birimi olarak becquerel (Bq) kullanılmaktadır. Bir bekerel (becquerel), bir saniyede bir kararsız çekirdeğin bozunuma uğramasıdır (1 Bq = 1 bozumun/s). Aktivite derişimi, hacim veya kütle başına aktiviteyi ifade eder ve gaz-sıvılar için Bq/L ve katılar için ise Bq/kg ile verilir (Sultan, 2025).

3.6 Radyoaktif Bozunma Süreci

Genel olarak alfa, beta ve gama bozunması olmak üzere üç değişik radyoaktif bozunma süreci vardır (Krane, 1987; Sultan, 2025). Kararsız bir çekirdek, alfa bozunması neticesinde α- ışını (taneciği) ve beta bozunması neticesinde ise β- ışını (taneciği) yayınlayarak daha kararlı duruma geçmeye çalışır. Bu bozunma süreçlerinden sonra daha kararlı ancak uyarılmış durumda kalan çekirdek, gama bozunması yaparak γ- radyasyonu (ışını) yayınlayarak taban duruma nükleer özelliğini kaybetmeden geçiş yapar (Krane, 1987; Sultan, 2025). Alfa tanecikleri, 2 nötron ve 2 protondan meydana gelen helyum (He) atomudur. Coulomb itmesi etkisi ile oluşan

Alfa bozunma süreci, özellikle kütle numarası 210′dan büyük olan çekirdeklerde etkindir. Bir α- bozunma süreci sembolik olarak aşağıda verildi:

$$ {}^{A}_{Z}X_{N} \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y_{N-2} + \alpha\left({}^{4}_{2}He\right) \tag{3.7} $$

Burada, X, başlangıçtaki ve Y de bozunma sonrasında oluşan çekirdeği gösterir. Bu bozunmada, X çekirdeğinin nötron sayısı ve proton sayısı 2 (kütle sayısı 4) birim azalır. Ayrıca bu bozunmada, nötron sayısı, proton sayısı, açısal ve doğrusal momentum ve enerji korunmaktadır.

Beta bozunma sürecinde, X çekirdeğinin nötron ve proton sayıları değişirken kütle sayısı sabit kalır. Üç tür beta bozunma süreci vardır: Negatif beta veya negatron bozunması (X çekirdeğin bir nötronu, protona dönüşür) pozitif beta veya pozitron bozunması (X çekirdeğin bir protonu, nötrona dönüşür) ve elektron yakalama bozunması. Bu bozunumlar, sembolik olarak sırayla,

$$ {}^{A}_{Z}X_{N} \rightarrow {}^{A}_{Z+1}Y_{N-1} + \beta^{-}(e^{-}) + \bar{\nu} \qquad n \rightarrow p + e^{-} \tag{3.8} $$

$$ {}^{A}_{Z}X_{N} \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y_{N+1} + \beta^{+}(e^{+}) + \nu \qquad p \rightarrow n + e^{+} \tag{3.9} $$

$$ {}^{A}_{Z}X_{N} \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y_{N+1} + \nu \qquad p + e^{-} \rightarrow n \tag{3.10} $$

İle gösterilir. Burada ν, nötrino ve $\bar{\nu}$ ise anti-nötrinodur.

Gama bozunma sürecinde uyarılmış bir durumda olan çekirdek, daha düşük enerji düzeyine ve/veya taban duruma nükleer durumlar arasındaki enerji farkına eşit bir enerjiye sahip γ-ışınını yayınlayarak geçer (Krane, 1987; Sultan, 2025). Gama bozunması, kütle numarası 5′ten büyük olan ve uyarılmış bağlı durumlara sahip çekirdeklerde oluşur ve yarılanma süreleri genellikle 10^{-9} saniyeden daha düşüktür. Uzun süreli uyarılmış durumlar, izomerik durumlar veya yarı kararlı durumlar ve yarılanma süreleri uzun olan geçişler ise izomerik geçişler olarak bilinir (Krane, 1987; Sultan, 2025). Bununla beraber, iç dönüşüm bozunma sürecinde, fazla enerji γ-fotonu

olarak yayınlanmaz ve γ- fotonu, çekirdeğe en yakın yörüngedeki elektronla etkileşerek onun atomdan koparılmasına neden olur.

3.7 Radyoaktivite Analiz Yöntemleri

Radyoaktivite analizi için genel olarak alfa-, beta- ve gama-ışını spektroskopik analiz yöntemleri kullanılmaktadır. Bu kısımda sadece tez kapsamında olan gama- ışını spektroskopik analiz yöntemi ile ilgili öz bilgi verildi. γ-ışını karakteristiktir, enerji düzeyleri sabittir ve enerji yoğunluğu zamanla azalır (Knoll, 2000; Krane, 1987). Gama-ışını spektroskopisi, çeşitli matrislerdeki değişik örneklerin içerebilecekleri γ-ışını (radyasyonu) yayınlayan radyonüklitlerin nitel ve nicel olarak analizlerini mümkün kılan bir nükleer analitik yöntemdir (Sultan, 2025). Bu yöntem, diğer bilinen (konvansiyonel) analitik yöntemlere göre en az seviyede örnek hazırlama süreci ile bir analiz işleminde çoklu radyonüklitlerin belirlenmesini sağlayabilen tahribatsız analiz yöntemidir. Bu spektroskopik yöntem; sağlık fiziği, nükleer tıp, çevre bilimi, malzeme araştırmaları, nükleer madde kaçakçılığı, nükleer tesislerde izleme gibi alanlarda ve nötron aktivasyon analizi gibi uygulamalarda etkin ve yaygın olarak kullanılmaktadır (Sultan, 2025). Hızlı, tekrarlanabilir, güvenilir, doğru ve kesin ölçme özelliğinden ve düşük analiz maliyetinden dolayı, dünya genelinde endüstriyel tesislerde ve akademik laboratuvarlarda yaklaşık iki yüz binden fazla gama-ışını spektrometresinin olabileceği tahmin edilmektedir (Sultan, 2025).

Gama-ışını spektroskopisinin en önemli elemanı olan dedektörlerin çalışma prensibi (ilkesi), ölçülecek radyasyonun, dedektör malzemesi ile etkileşmesine bağlıdır. Daha önce de belirtildiği gibi γ- fotonları, içinden geçtikleri malzeme ile fotoelektrik etki, Compton saçılması ve çift oluşumu olmak üzere üç farklı şekilde etkileşim yaparlar (Knoll, 2000; Krane, 1987). Radyasyon tespiti ile ilgili etkileşim süreçleri, tamamen istatistiksel olarak gerçekleşir. Demetteki γ- fotonların, malzeme ile nasıl etkileşime gireceği, yukarıda bahsedilen bu üç etkileşimin tesir kesitleri hesaplanır ve ilgili γ-foton enerjisindeki en yüksek değere göre tahmin edilebilir (Sultan, 2025). Fotoelektrik olayının etkileşme tesir kesiti, atom sayısı ile doğru ve gelen γ- fotonunun enerjisi ile ters orantılıdır. Böylece fotoelektrik olayının meydana gelem olasılığı, hedef atomun atom sayısıyla önemli ölçüde artar. Aynı zamanda fotoelektrik olayı,

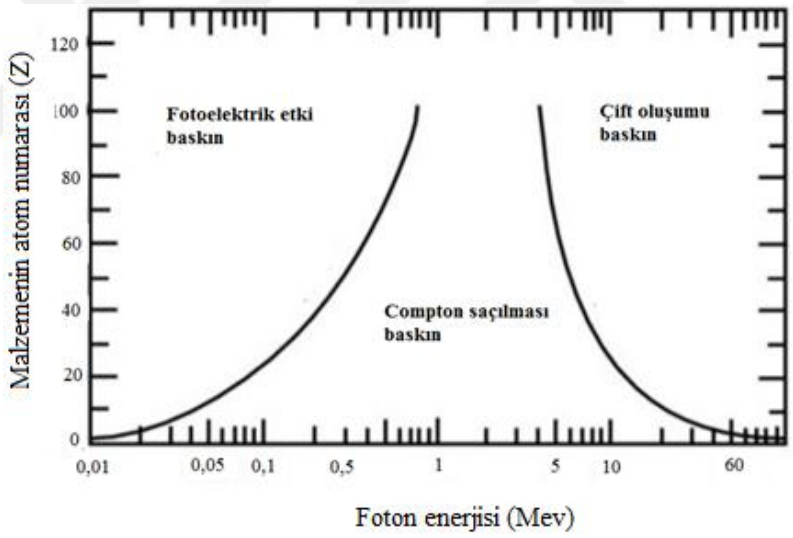
bağıl olarak düşük enerjiye sahip X- ve γ-ışınları için baskın bir süreçtir (Sultan, 2025). Fotoelektrik olayının etkileşme kesiti (σ_{Fo}), bütün γ-ışını enerjilerini ve atom sayılarını kapsayacak şekilde atom başına fotoelektrik soğurma ihtimali (olasılığı) için geçerli tek bir analitik tanım olmasa da kabaca aşağıdaki yarı ampirik bağıntı ile verilebilir (Knoll, 2000; Sultan, 2025):

$$\sigma_{Fo} \cong \text{sabit} \times \frac{Z^n}{E_\gamma^{3,5}} \tag{3.11}$$

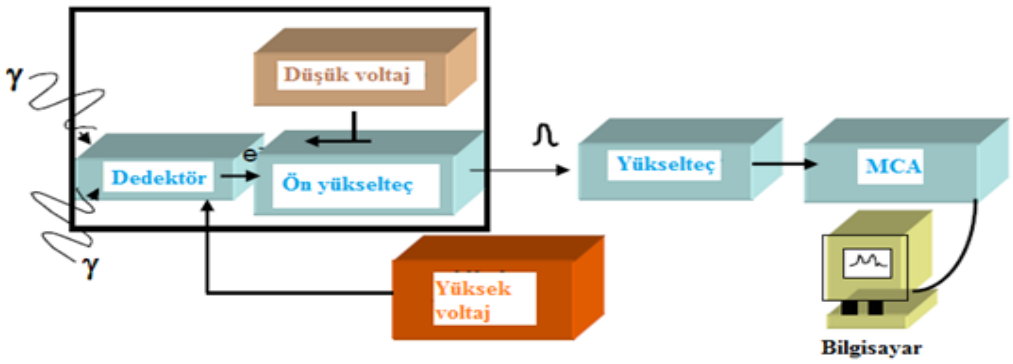
Bu bağıntıda; E, gelen γ-fotonunun enerjisi; Z, atom sayısı ve n, γ-ışını ile ilgili olarak değeri, 4- 5 aralığında olan sabittir (Knoll, 2000; Sultan 2025). Compton olayı, fotonlar ile serbest veya gevşek bağlı elektronların esnek (elastik) olmayan saçılması veya çarpışmasıdır (Knoll, 2000; Sultan 2025). Fotoelektrik olayından farklı olarak Compton olayında, foton enerjisinin sadece bir bölümünü elektrona aktarır ve sürece sadece dış yörüngedeki serbest elektronlar dâhildir (Knoll, 2000; Sultan 2025). Bu durumda gelen foton, geliş açısına göre bir açıda saçılırken elektronun da farklı bir açıda saçılmasını sağlar. Böylece elastik olmayan saçılmalar, bütün açılarda mümkün olabileceğinden dolayı elektronun kazandığı enerji, sıfırdan γ-ışını enerjisinin önemli bir bölümünde kadar değişebilir (Knoll, 2000; Sultan, 2025). Compton olayı olma ihtimali, hedef atomlarının elektron sayısına bağlı olduğundan atom sayısı ile doğru orantılı olarak artar (Sultan, 2025). Çift oluşumu sürecinde bir γ-fotonu, elektron-pozitron çiftine dönüştür. Çift oluşumu olayı, eğer fotonun enerjisi, elektron-pozitron çiftinin durgun kütle enerji toplamı olan 1,022 MeV′den büyük ise enerjik olarak mümkün olur. Uygulamalarda, bu etkileşmenin olma ihtimali, foton enerjisi birkaç MeV'e yaklaşana kadar çok düşüktür ve bu yüzden çift oluşumu baskın olarak yüksek enerjili fotonlar için etkindir (Knoll, 2000; Sultan, 2025). İyonlaştırıcı radyasyon ile madde arasındaki sözü edilen üç etkileşme mekanizmasının, farklı soğurucu malzemeler için bağıl önemi veya hangi enerji aralıklarında baskın olabilecekleri, Grafik 3.1′de gösterildi (Sultan, 2025).

Tipik bir gama-ışını spektrometresi, şematik olarak Şekil 3.8′de gösterildiği gibi bir dedektör, bu dedektöre bağlı elektronik birimlerden (yüksek gerilimli güç kaynağı, ön yükselteç, yükselteç, analog-sayısal dönüştürücü) ve çok kanallı analizör (MCA) veya

bilgisayar ve yazıcıdan meydana gelmektedir (Sultan, 2025). Elektronik birimin fonksiyonu, sinyal darbeleri ile oluşturulan elektronların toplamak, bu darbeleri işlemek ve yükseklik veya enerjiye göre sınıflandırmaktır. Bir gama-ışını spektrumu, aşağıda verilen aşamalardan sonra meydan gelmektedir: (i) γ- fotonun, dedektör kristal ile daha önce bahsedilen etkileşim süreçlerinden sonra elektronlar oluşur (Şekil 3.9), (ii) uygulanan besleme gerilimi, elektronları kristalden süpürür ve elektronlar akım sinyal darbesini meydana getirir; (iii) darbenin genliği ön yükselteç ile yükseltilir ve daha sonra darbenin genliği, yükselteç ile daha da güçlendirilir ve şekillendirilir; (iv) güçlendirilmiş sinyal darbesi bir analog-sayısal dönüştürücü ile sayısal değerlere dönüştürülür ve (vi) sayısal değerler, çok kanallı analizöre gönderilir ve burada darbeler, kanal numarasına göre yerleştirilir ve böylece bir gama-ışını spektrumu elde edilir. Darbelerin oluşturduğu fotopiklerin alanları, ilgili radyonüklitin aktivitesi ile ve kanal numarası da radyonüklitin enerjisi ile ilgilidir (Sultan, 2025).

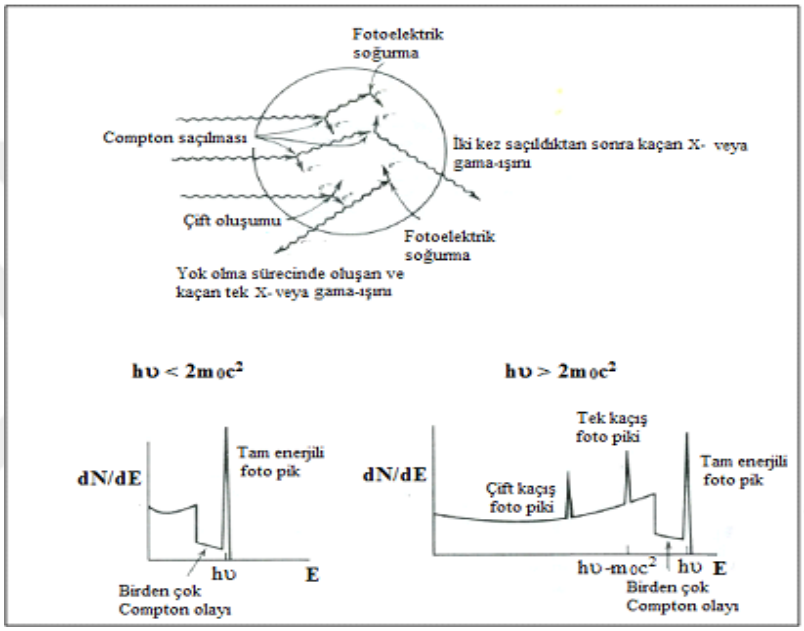


Grafik 3.1 Foton etkileşmesinin bağıl önemi (Knoll, 2000)



Şekil 3.8 Bir gama-ışını spektroskopisi (Sultan, 2025)

Gama-ışını spektroskopilerinde, yarı iletken veya inorganik sintilasyon dedektörleri kullanılmaktadır (Sultan, 2025). Genel olarak yarı iletken dedektörü olarak HPGe ve sintilasyon dedektörü olarak da NaI(Tl) kullanılır (Knoll, 2000; Sultan, 2025). HPGe dedektörünün, NaI(Tl) dedektörüne göre algılama verimi düşük iken ayırma gücü yüksektir. Genelde, bir HPGe dedektörü, ısıl uyarılma ile sonuçlanabilecek elektronik gürültüyü en aza indirgemek amacıyla sıvı azot sıcaklığında (77 K) çalıştırılır (Sultan, 2025).



Şekil 3.9 Gama-ışının dedektör kristali ile etkileşmesi ve fotopik oluşumu

Bir dedektörün duyarlılığı, herhangi bir kaynaktan yayınlanan gama-ışınlarından kaç tanesinin elektrik darbesine dönüştüğünün bir ölçüsü olan dedektör verimi ile doğru ile orantılıdır. Bir HPGe dedektörü ile ilgili dört verimden bahsedilebilir: 1) her bir Ge kristaline özgün verim, 2) mutlak verim, 3) NaI(Tl) dedektörüne göre bağıl verim ve 4) tam enerjili fotopik verimi (Sultan, 2025). Bir dedektörün ayırma gücü (rezülasyonu), belirli bir enerjideki tek bir γ-enerji fotopikinin yarı yüksekliğindeki tam genişliğinin ölçüsüdür. Ayırma gücü, HPGe için birkaç keV iken NaI(Tl) için ^{137}Cs′nin gama-ışını enerjisinin yüzdesi cinsinden verilir (yaklaşık olarak 40-60 keV dir) (Knoll, 2000).

Bir gama-ışını spektroskopisinde, enerji kalibrasyonu, kanal sayısına karşılık gelen γ-ışını enerjisinin bilinmesi için farklı geometrilerdeki (nokta, ampul, sıvı vb.) standart

kaynaklar kullanılarak yapılmaktadır. Enerji kalibrasyonu aşağıda verildiği gibi yapılır: Standart kaynak, dedektör üzerine konulur; belli bir süre sayılır, ilgili gama-ışını fotopikleri oluşturulur; fotopiklerin tepe noktasına karşılık gelen kanal sayısı belirlenir ve not edilir. Daha sonra bu veriler, birinci gerektiğinde ikinci veya üçüncü) dereceden bir polinoma uydurularak kanal sayısı ile γ- ışını enerjisi arasındaki ilişkiyi veren bağıntı elde edilir (Knoll, 2000).

4. MALZEME VE YÖNTEM

4.1 Örneklerin Toplanması

Tez kapsamında, yaprak, kök, çiçek, tohum, meyve, kabuk ve bitkinin tamamı (veya toprak üstü kısımları) olarak kullanılan toplam 98 tıbbi ve aromatik bitki (TAB) örneği, tanınmış ve güvenilir geleneksel baharat satıcıları ve aktarlardan satın alınarak toplandı. TAB örnekleri, tek tek etiketlenerek Kastamonu Ü. Fen Fakültesi Örnek Hazırlama Laboratuvarına getirildi. Örnekler, kullanılan kısımlara göre sınıflandırıldı ve "TAB" olarak kodlandı. Radyoaktivite analizine tabi tutulan TAB örnekleri, yaygın olarak bilenen adları, bilimsel adları ve familyaları ile birlikte Tablo 4.1'de listelendi.

4.2 TAB Örneklerin Analiz için Hazırlanması

Her bir TAB örneği, orijinal ambalajından çıkarıldıktan sonra nemini almak için sabit bir sıcaklıkta tekrar kurutuldu. Kurutulan TAB örnekleri, seramik bir havan kullanılarak toz hâline getirildi. Daha sonra her bir TAB örneği, HPGe dedektörünün verim kalibrasyonu için hazırlanan referans kaynak ile aynı geometri ve boyuta sahip bir plastik (polistiren) örnek kabına aktarıldı ve hassas bir terazi kullanılarak tartıldı (Sultan, 2025). Örnek kapları radon gazının kaçışını önlemek için parafin filmle sızdırmaz (hermetik) olarak kapatıldı. Fotoğraf 4.1'de gösterildiği gibi TAB örnekleri, radyum izotopları ile bozunma ürünleri arasında kalıcı bir denge sağlanması için en az bir ay süreyle laboratuvarda uygun bir yerde bekletildi.

4.3 TAB Örneklerinin Radyoaktivite Analizi

TAB örneklerinin doğal (^{228}Ra; ^{226}Ra ve ^{40}K) ve yapay (^{137}Cs) radyonüklit içerikleri, Kastamonu Ü. Merkez Araştırma Laboratuvarında bulunan ve Fotoğraf 4.2'de gösterilen HPGe dedektörü ile donatılmış gama-ışını spektroskopi sistemi kullanılarak analiz edildi. HPGe dedektörünün teknik özellikleri, Tablo 4.2′de verildi. HPGe dedektörü, Fotoğraf 4.2'den de görülebileceği gibi laboratuvar ortamındaki radyoaktivite seviyesini indirgemek amacıyla kurşundan yapılmış yüksek performanslı kurşun zırh (vonmak marka) içine yerleştirilmiştir. Elektronik gürültüyü

düşük seviye tutmak için sıvı azot kabı (30 L'lik Dewar) kullanılmıştır (Sultan, 2025). Dedektör, ara yüz modülü (DIM) ve ileri sayısal sinyal işlemi (DSP) içeren ve tam özellikli 16-K çok kanallı sayısal spektrum analizörüne (DSPEC-50) bağlıdır (Sultan, 2025).

Tablo 4.1 Tıbbi ve aromatik bitki örneklerin kullanılan kısımlara göre dağılımı

Örnek kodu	**Kullanılan kısım**	**Yaygın adı**	**Bilimsel adı**	**Familya**
TAB1	Yaprak	Nane	*Mentha piperita*	Lamiaceae
TAB2		Isırgan	*Urtica dioica*	Urticaceae
TAB3		Maydanoz	*Petroselinum crispum*	Apiaceae
TAB4		Biberiye	*Rosmarinus officinalis*	Lamiaceae
TAB5		Funda	*Erica arborea*	Ericaceae
TAB6		Mercanköşk	*Origanum majorana*	Lamiaceae
TAB7		Ceviz	*Juglans regia*	Juglandaceae
TAB8		Ekinezya	*Echinacea purpurea*	Asteraceae
TAB9		Adaçayı	*Salvia officinalis*	Lamiaceae
TAB10		Sinameki	*Senna cassia*	Fabaceae
TAB11		Doğu Çınarı	*Platanus orientalis*	Platanaceae
TAB12		Öksürükotu	*Tussilago farfara*	Asteraceae
TAB13		Defne	*Laurus nobilis*	Lauraceae
TAB14		Ak Söğüt	*Salix alba*	Salicaceae
TAB15		Mersin otu	*Myrtus communis*	Myrtaceae
TAB16		Melisa (Oğul Otu)	*Lippia citriodora*	Verbenaceae
TAB17		Çuha	*Primula acaulis*	Primulaceae
TAB18		Sinirli ot	*Plantago lanceolata*	Plantaginaceae
TAB19		Mate	*Ilex paraguariensis*	Aquifoliaceae
TAB20		Ginkgo biloba	*Ginkgo biloba*	Ginkgoaceae
TAB21		Kırk kilit otu	*Equisetum arvense*	Equisetaceae
TAB22		Oğul Otu	*Melissa officinalis*	Lamiaceae
TAB23		Zeytin	*Olea europae*	Oleaceae
TAB24		Tarhun	*Artemisia dracunculus*	Asteraceae
TAB25		Kekik	*Thymus longicaulis*	Lamiaceae
TAB26		Beyaz Çay	*Camellia sinensis*	Theaceae
TAB27		Yaban Mersini	*Vaccinium myrtillus*	Ericaceae
TAB28		Aslan pençesi	*Alchemilla mollis*	Rosaceae
TAB29		Böğürtlen	*Rubus fruticosus*	Rosaceae
TAB30		Avokado	*Persea americana*	Lauraceae
TAB31		Dut	*Morus alba*	Moraceae
TAB32		Cinnema (Gurmar otu)	*Gymnema sylvestre*	Apocynaceae
TAB33		İncir	*Ficus carica*	Moraceae
TAB34		Karahindiba	*Taraxacum officinale*	Asteraceae
TAB35		Kekik	*Origanum vulgare*	Lamiaceae
TAB36		Fesleğen	*Ocimum basilicum*	Lamiaceae
TAB37		Kırmızı çay (Rooibos)	*Aspalathus linearis*	Fabaceae
TAB38		Üvez	*Sorbus domestica*	Rosaceae
TAB39		Karadut	*Morus nigra*	Moraceae
TAB40		Okaliptüs	*Eucalyptus camaldulensis*	Myrtaceae
TAB41		Dulavrat otu	*Arctium majus*	Asteraceae
TAB42		Ebegümeci	*Malva sylvestris*	Malvaceae
TAB43		Reyhan	-	-

Tablo 4.1'in devamı

Örnek kodu	Kullanılan kısım	Yaygın adı	Bilimsel adı	Familya
TAB44	Çiçek	Hatmi	*Althaea officinalis*	Malvaceae
TAB45		Ihlamur	*Tilia platyphyllos*	Tiliaceae
TAB46		Sinameki	*Senna cassia*	Fabaceae
TAB47		Mavi Çay	*Clitoria ternatea*	Fabaceae
TAB48		Mayıs papatyası	*Matricaria recutita*	Asteraceae
TAB49		Ekinezya	*Echinacea purpurea*	Asteraceae
TAB50		Kekik	*Origanum onites*	Lamiaceae
TAB51		Altınotu	*Helichrysum arenarium*	Asteraceae
TAB52		Sarı papatya	*Cota tinctoria*	Asteraceae
TAB53		Dağ çayı	*Sideritis perfoliata*	Lamiaceae
TAB54		Bamya	*Abelmoschus esculentus*	Malvaveae
TAB55		Ebegümeci	*Malva sylvestris*	Malvaceae
TAB56		Şerbetçiotu	*Humulus lupulus*	Cannabaceae
TAB57		Aynisefa	*Calendula officinalis*	Asteraceae
TAB58		Aspir	*Carthamus tinctorius*	Asteraceae
TAB59		Lavanta	*Lavandula angustifolia*	Lamiaceae
TAB60		Alıç	*Crataegus monogyna*	Rosaceae
TAB61		Civanperçemi	*Achillea millefolium*	Asteraceae
TAB62		Çarkıfelek	*Passiflora edulis*	Passifloraceae
TAB63		Mısır püskülü	*Zea mays*	Poaceae
TAB64		Sarı Kantaron	*Hypericum perforatum*	Guttiferae
TAB65		Ballıbaba	*Lamium album*	-
TAB66		Kiraz sapı	*Prunus avium*	Rosaceae
TAB67		Karabaş otu	*Lavandula stoechas*	Lamiaceae
TAB68	Tohum	Kapari	*Capparis spinosa*	Capparaceae
TAB69		Rezene	*Foeniculum vulgare*	Apiaceae
TAB70		Kişniş	*Coriandrum sativum*	Apiaceae
TAB71		Kimyon	*Cuminum cyminum*	Apiaceae
TAB72		Hayıt	*Vitex agnus-castus*	Lamiaceae
TAB73	Meyve	Kahve Otu	*Cassia angustifolia*	Fabaceae
TAB74		Elma Çayı	*Malus domestica*	Rosaceae
TAB75		Mersin otu	*Myrtus communis*	Myrtaceae
TAB76		Kara mürver	*Sambucus nigra*	Adoxaceae
TAB77		Alıç	*Crataegus orientalis*	Rosaceae
TAB78		Üzerlik	*Peganum harmala*	Nitrariaceae
TAB79	Kök	Ayrık otu	*Agropyron repens*	Poaceae
TAB80		Isırgan otu	*Urtica dioica*	Urticaceae
TAB81		Kediotu	*Valeriana officinalis*	Caprifoliaceae
TAB82		Meyan kökü	*Glycyrrhiza glabra*	Fabaceae
TAB83	Toprak üstü	Pelin Otu	*Artemisia absinthium*	Asteraceae
TAB84		Kurtpençesi	*Lycopodium clavatum*	Lycopodiaceae
TAB85		Bodur mahmut	*Teucrium polium*	Lamiaceae
TAB86		Çoban çökerten	*Tribulus terrestris*	Zygophyllaceae
TAB87		Çobançantası	*Capsella bursa-pastoris*	Brassicaceae
TAB88		Şeker otu (stevia)	*Stevia rebaudiana*	Asteraceae
TAB89		Şahtere otu	*Fumaria officinalis*	Papaveraceae
TAB90		Yoğurt otu	*Galium aparine*	Rubiaceae
TAB91		Adaçayı	*Sideritis perfoliata*	Lamiaceae
TAB92		Yakı otu	*Epilobium angustifolium*	Onagraceae
TAB93		Dereotu	*Anethum graveolens*	Apiaceae
TAB94		Kırlangıç otu	*Chelidonium majus*	Papaveraceae

Tablo 4.1'in devamı

Örnek kodu	Kullanılan kısım	Yaygın adı	Bilimsel adı	Familya
TAB95	Kabuk	Ceviz	*Juglans regia*	Juglandaceae
TAB96		Söğüt	*Salix alba*	Salicaceae
TAB97		Barut ağacı	*Frangula alnus*	Rhamnaceae
TAB98	Karışık	Tropik çay	-	-



Fotoğraf 4.1 Radyoaktivite analiz için hazırlanan tıbbi ve aromatik bitki örnekleri



Fotoğraf 4.2 Yüksek çözünürlüklü gama-ışını spektrometresi

Tablo 4.2 HPGe dedektörünün özellikleri (Sultan, 2025)

Dedektör modeli	ORTEC GEM50P4-83
Bağıl verimi	% 50
Enerji ayırma gücü (çözünürlük)	1,9 keV (^{60}Co'ın 1,33 MeV enerjili fotopiki için)
Pik/Compton oranı	66:1
Dedektör geometrisi ve kristal tipi	Kapalı uçlu, eş eksenli ve p-tipi HPGe
Çapı ve yüksekliği	62,5 mm
Pencereden uzaklık	5 mm
Çalışma gerilimi	+3000 V dc
Kriyostat ve azot kabı hacmi	Dikey geometrili ve 30 L

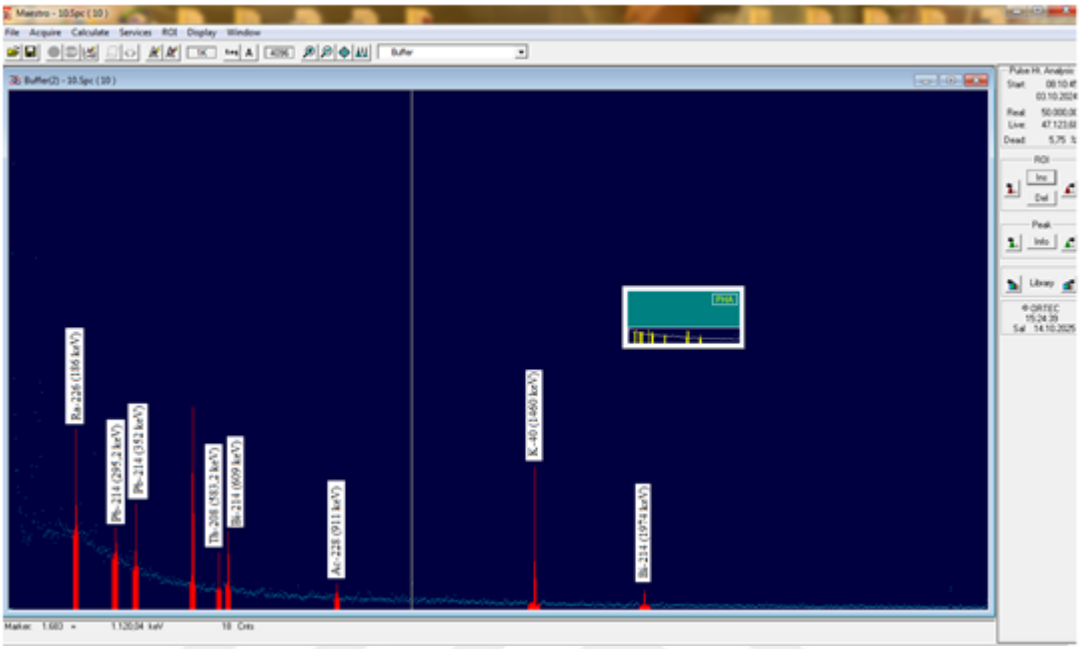
DSPEC-50, fotopikleri otomatik olarak bulan, fotopikleri değerlendiren, fotopiklerin belirsizliğini hesaplayan, kütüphanesi ile gerektiğinde radyonüklitleri belirleyen ve aktivite analizlerini yapabilen GammaVision gama spektroskopi yazılımı ile birlikte çalışmaktadır (Sultan, 2025).

Her bir bitki TAB örneğinin gama- ışını spektrumu, dedektör üzerine yerleştirilen örneğin; 86400 saniye süre sayılması ile elde edildi. Grafik 4.1, bir TAB örneğine ait gama-ışını spektrumunu göstermektedir. Laboratuvar ortamı (background) gama- ışını spektrumu da aynı şartlarda oluşturuldu. Her bir TAB örneğindeki ^{228}Ra; ^{226}Ra; ^{40}K ve ^{137}Cs'nin aktivite konsantrasyonları, Tablo 4.3'te verilen spektroskopik veriler kullanılarak analiz edildi. Grafik 4.1'de gösterildiği gibi gama-ışını spektrumunda, (1) ^{228}Ra'nın aktivitesinin belirlenmesi için toryum serisinin bozunum ürünleri olan ^{228}Ac'nin 911,2 keV ve ^{208}Tl'nin 583,2 keV enerjili gama-ışını fotopikleri, (2) ^{226}Ra'nın aktivitesinin belirlenmesi için uranyum serisinin bozunum ürünleri olan ^{214}Pb'nin 295,2 ve 352,9 keV enerjili gama-ışını fotopikleri ile ^{214}Bi'nin 609,3 keV ve 1764,5 keV enerjili gama-ışını fotopikleri, (3) ^{40}K'nin aktivitesinin belirlenmesi için kendisine ait 1460,8 keV enerjili tek bir gama-ışını fotopiki ve (4) ^{137}Cs'nin aktivitesinin belirlenmesi için kendisine ait 661,7 keV enerjili tek bir gama-ışını fotopiki seçildi (Sultan, 2025). Her bir radyonüklitin aktivite konsantrasyonu, aşağıda verilen denklem kullanılarak hesaplandı (Sultan, 2025):

$$A = \frac{NS}{\varepsilon_{\gamma} \times P_{\gamma} \times M \times t} \tag{4.1}$$

Bu denklemde; A, aktivite konsantrasyonu (Bq/kg); NS, ilgili gama-ışını fotopikinin alanından background spektrumunda seçilen aynı fotopikin alanı çıkarılarak elde

edilen net alan; εγ, ilgili gama-ışını fotopiki için dedektör verimi; Pγ, ilgili gama-ışınının yayınlanma olasılığı; M, TAB örneğinin kütlesi (kg) ve t, sayım süresidir (s).



Grafik 4.1 Bir TAB örneği gama-ışını spektrumu

Tablo 4.3 Radyonüklit konsantrasyonunun analizinde kullanılan spektroskopik parametreler

Analiz edilen radyonüklit	**Analizde kullanılan gama-ışını fotopik enerjisi (keV)**	**Yayınlanma olasılığı (%)**	**Gama-ışını fotopiki yayınlayan radyonüklit**
^{228}Ra	583,2	30,6	^{208}Tl
	911,2	26,6	^{228}Ac
^{226}Ra	295,2	18,2	^{214}Pb
	351,9	35,1	^{214}Pb
	609,3	44,6	^{214}Bi
	1764,5	15,1	^{214}Bi
^{40}K	1460,8	14,7	^{40}K
^{137}Cs	661,7	85,1	^{137}Cs

Gama-ışını spektrometrik sistemin verimi veya tam enerji fotopik verimi (ε_γ), dedektör örnek mesafesi ve örnek geometrisi gibi parametrelere bağlıdır ve aşağıda verilen denklem kullanılarak belirlenir (Altamemi vd., 2021).

$$\varepsilon_\gamma = \frac{NS}{A \times P_\gamma \times t} \times DF_K \times DF_G \times DF_D \qquad (4.2)$$

Bu denklemde; DF_K, toplam koinsidans (çakışma) düzeltme faktörü; DF_G, geometri düzeltme faktörü ve DF_D, bozunma düzeltme faktörüdür. Bu çalışmada dedektör verimini bulmak için radyonüklite özgün verim kalibrasyon işlemi uygulandı. Radyonüklite özgün verim kalibrasyon, Uluslararası Atom Enerjisi Kurumundan (IAEA) temin edilen sertifikalı doğal uranyum RGU-1 (U-cevher; 400 ± 2 μg/g), doğal toryum RGTh-1 (Th-cevher; 800 ± 16 μg/g) ve potasyum RGK-1 (K_2SO_4; %44,8 ± 0,3 K) referans malzemeleri kullanılarak yapıldı. Böylece, tam enerji fotopik verim kalibrasyonunda, yayılan gama-ışını fotonlarının, toplam koinsidans ve kütle zayıflama ve bozunum etkileri için düzeltme işlemlerine gerek kalmadı (Altamemi vd., 2021; Stoulo vd., 2003). Örnek kaplarına koyulan, tartılan ve dedektör üzerine yerleştirilen RGU-1, RGTh-1 ve RGK-1 referans malzemeleri, iyi bir istatistik elde edilene kadar sayım işlemine tabı tutuldu. Elde edilen gama-ışını spektrumunda ilgili fotopikler seçilerek, Tablo 4.3'teki veriler ve Denklem (4.2) kullanılarak 295 keV-2614 keV enerji aralığında tam enerji fotopik verimleri hesaplandı. Grafik 4.2'de gösterildiği gibi hesaplanan verim değerlerinin enerji değerlerine göre grafiği elde edildi ve eğri aşağıda verilen fonksiyona fit edildi:

$$\varepsilon_{\gamma} = a + b \times E_{\gamma} + \frac{c}{E_{\gamma}^{2}} \tag{4.3}$$

Bu denklemde; E_γ, ilgili gama-ışını fotopik enerjisi; a, b ve c, sırasıyla $2{,}1 \times 10^{-2}$; $-4{,}93 \times 10^{-6}$ ve $2{,}52 \times 10^{3}$ değerinde verilen katsayılardır.

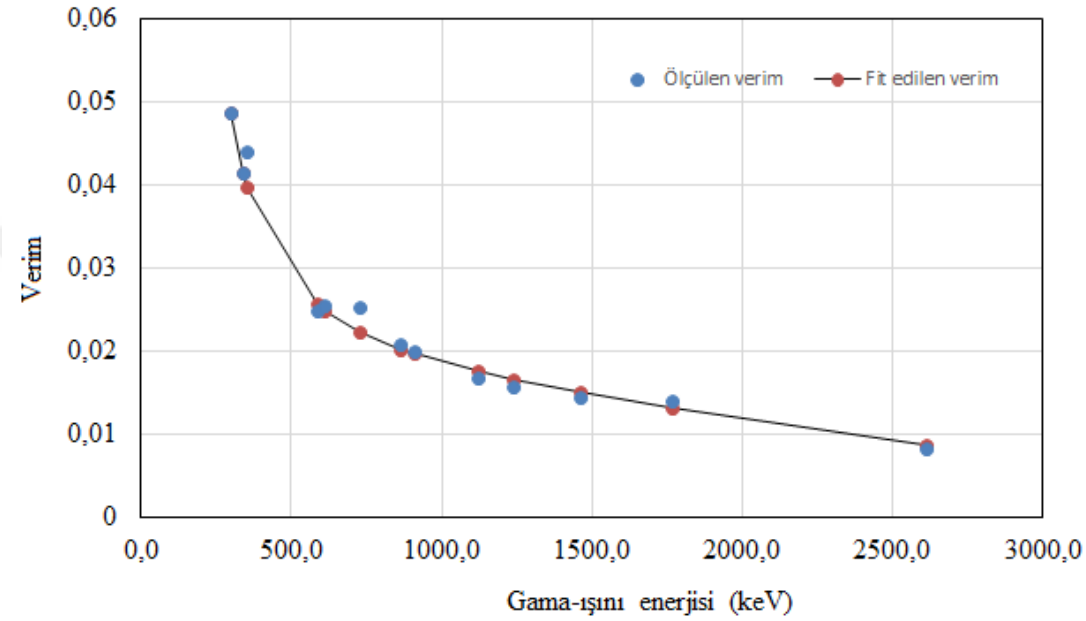
Her bir TAB örneği için elde edilen gama-ışını spektrumu değerlendirildi ve her radyonüklite ait verim değerleri ve Denklem (4.1) kullanılarak radyum izotoplarının aktivite konsantrasyonları aşağıda gibi hesaplandı:

$$A_{^{228}\mathrm{Ra}} = \frac{A_{^{208}\mathrm{Tl}} + A_{^{228}\mathrm{Ac}}}{2} \tag{4.4}$$

$$A_{^{214}\mathrm{Pb}} = \frac{A_{295} \times 18{,}2 + A_{352} \times 35{,}1}{18{,}2 + 35{,}1} \tag{4.5}$$

$$A_{^{214}Bi} = \frac{A_{609} \times 44,6 + A_{1764} \times 15,1}{44,6 + 15,1} \quad (4.6)$$

$$A_{^{226}Ra} = \frac{A_{^{214}Pb} + A_{^{214}Bi}}{2} \quad (4.7)$$



Grafik 4.2 Deneysel olarak elde edilen verim değerlerinin enerjiye göre değişimi

Currie (1968) türevine dayalı olarak radyoaktivite sistemi için ölçülebilir minimum aktivite, %95 güvenilirlikle aşağıda verilen denklem ile hesaplandı (Altamemi vd., 2021):

$$\text{ÖMA} = \frac{2,71 + 4,66 \times \sqrt{B}}{\varepsilon_\gamma \times P_\gamma \times M \times t} \quad (4.8)$$

Bu denklemde; ÖMA, ölçülebilir minimum aktivite (Bq/kg) ve B, ilgilenilen gama-ışını fotopikinin background spektrumundaki alanıdır. Tez kapsamındaki radyonüklitler için hesaplanan ortalama ÖMA değerleri; 0,6 Bq/kg (^{228}Ra); 0,5 Bq/kg (^{226}Ra); 6,2 Bq/kg (^{40}K) ve 0,3 Bq/kg (^{137}Cs) olarak bulundu.

Her ölçüme eşlik eden ölçme belirsizliği, aşağıda verilen denklem kullanılarak elde edildi (Altamemi vd., 2021; Sultan, 2025):

$$\Delta A = A \times \sqrt{\left(\frac{\Delta NS}{Ns}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{\Delta P_{\gamma}}{P_{\gamma}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta M}{M}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t}{t}\right)^2} \quad (4.9)$$

Bu denklemde; ΔA, aktivite konsantrasyon belirsizliği, ΔNS sayım belirsizliği; Δε, verimlilik belirsizliği, ΔP_{γ}, gama-ışını yayınlanma olasılığı belirsizliği, ΔM, kütle tartım belirsizliği ve Δt, zaman belirsizliğidir.

4.4 Olası Radyolojik Sağlık Risk Değerlendirmesi

Daha önce de ifade edildiği gibi TAB örneklerinin tüketilmesi sonucunda radyonüklitler, doğrudan gastrointestinal sisteme ulaşabilir ve daha sonra vücudun farklı organlarına taşınabilir. Vücuda alınan bu radyonüklitler, yerleştikleri organda, biyolojik ve fiziksel yarı ömürlerine bağlı olan etkin yarılanma süresince radyoaktif bozunmaya devam ederler. Dokular, radyoaktif bozunum süreçlerinden sonra yayınlanan özellikle α- ve β- ışınlarının oluşturduğu iç ışınlamaya maruz kalırlar ve uzun süreli maruziyetler, insan sağlığını olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle etkin radyasyon dozu (ERD), çeşitli kaynaklardan yayılan çeşitli iyonlaştırıcı radyasyon tiplerinden kaynaklanan iç ve dış ışınlanma (veya maruz kalma) sonucu bir doku veya organda biriken enerjinin bir ölçüsüdür. Bu nedenle ERD, potansiyel biyolojik hasarın bir ölçüsüdür (IAEA, 2016; Shuaibu vd., 2023). Radyonüklitler insan vücuduna alındığında, dokular üzerindeki etkileri, etkin yarılanma sürelerine bağlıdır. Sonuç olarak, sindirildikten sonra aylar hatta yıllar boyunca insan dokularında birikebilirler. Radyolojik sağlık etkileri, çeşitli dokulara verilen toplam ERD ile orantılıdır. Bu nedenle, bireye özgü ERD, stokastik sağlık etkisinin bir ölçüsü olarak da tahmin edilmesi gereken önemli bir radyolojik parametredir (Shuaibu vd., 2023). Bu yüzden, iyonlaştırıcı radyasyona maruziyetin stokastik etkisi sebebiyle, bireysel etkin radyasyon dozların izlenmesi ve değerlendirilmesi önem arz etmektedir ve özel ihtimam gerektirir. Bu izleme ve değerlendirme işleminin, yenidoğan, çocuk ve yetişkinler gibi her toplumun her yaş grubu için yapılması elzemdir. Tez kapsamında incelenen TAB örneklerinde analiz edilen radyonüklitlerin sindirilmesi sonucunda oluşabilecek radyolojik sağlık riski, yetişkin bireyler için değerlendirildi. Olası

radyolojik sağlık riski değerlendirme kapsamında, yıllık etkin radyasyon dozu (YERD), mortalite ve morbidite yaşam boyu kanser riskleri tahmini olarak hesaplandı.

4.4.1 Yıllık Ekin Radyasyon Dozu

TAB örneklerinde analiz edilen her bir radyonüklitin sindirilmesinden kaynaklanan yıllık etkin radyasyon dozu (YERD), tahmini olarak aşağıda verilen denklem kullanılarak hesaplandı (Turhan vd., 2025; UNSCEAR, 2000):

$$YERD = YTM \times A \times DDK \tag{4.10}$$

Bu denklemde; YERD, yıllık etkin radyasyon dozu (μSv/y); YTM, TAB örneklerinin ortalama tüketim miktarı (1,8 kg/y) (Achari vd., 2024; Güven vd., 2023; Kırış, 2022; Shuaibu vd., 2023); A, TAB örneklerinde analiz edilen her bir radyonüklitin aktivite konsantrasyonu (Bq/kg) ve DDK, her bir radyonüklitin doz dönüşüm katsayısı. DDK'lerin değerleri, Uluslararası Radyolojik Koruma Komisyonu raporundan her bir radyonüklit için 0,69 μSv/Bq (^{228}Ra); 0,28 μSv/Bq (^{226}Ra); 0,0062 μSv/Bq (^{40}K) ve 0,013 μSv/Bq (^{137}Cs) olarak alınmıştır (ICRP, 2012). Her TAB türünün tüketilmesi sonucu oluşan toplam yıllık etkin radyasyon dozu (TYERD), aşağıdaki şekilde hesaplandı:

$$TYERD = YERD_{^{228}Ra} + YERD_{^{226}Ra} + YERD_{^{40}K} + YERD_{^{137}Cs} \tag{4.11}$$

Bu denklemde; TYERD, toplam yıllık etkin radyasyon dozu (μSv/y); $YERD_{228Ra}$; $YERD_{226Ra}$; $YERD_{40K}$ ve $YERD_{137Cs}$; her bir radyonüklit için Denklem (4,10) kullanılarak elde edilen YERD değerleridir.

4.4.2 Yaşam Boyu Kanser Riski

İncelenen TAB örneklerinde radyonüklitin yutulmasına bağlı mortalite ve morbidite yaşam boyu kanser riski aşağıda verilen denklemler, kullanılarak hesaplandı (EPA, 1999; Turhan vd., 2025):

$$MTYKR = YRA \times MS \times RK_{MT} \quad (4.12)$$

$$MBYKR = YRA \times MS \times RK_{MB} \quad (4.13)$$

Bu denklemlerde; MTYKR, mortalite yaşam boyu kanser riski; MBYKR, morbidite yaşam boyu kanser riski; YRA, yıllık radyonüklit alımı (Bq/y) (YRA= A (Bq/kg) × YTM (1,8 kg/y)); MS, maruz kalma süresidir (70 y) ve RK_{MT} ve RK_{MB}, mortalite ve morbidite risk katsayısıdır. RK_{MT}'lerin değerleri, ABD Çevre Koruma Ajansı raporundan her bir radyonüklit için $2,74 \times 10^{-8}$ Bq^{-1} (^{228}Ra); $9,56 \times 10^{-9}$ Bq^{-1} (^{226}Ra); $5,89 \times 10^{-10}$ Bq^{-1} (^{40}K) ve $6,88 \times 10^{-10}$ Bq^{-1} (^{37}Cs) olarak alındı (EPA,199). RK_{MB}'lerin değerleri ise $3,86 \times 10^{-8}$ Bq^{-1} (^{228}Ra); $1,39 \times 10^{-8}$ Bq^{-1} (^{226}Ra); $9,26 \times 10^{-10}$ Bq^{-1} (^{40}K) ve $1,11 \times 10^{-9}$ Bq^{-1} (^{37}Cs) olarak alındı (EPA,199). Bu RK'ler, çevresel radyonüklitlere akut veya kronik maruziyet açısından yorumlanabilir. Yani, bir RK, yaşamı boyunca belirli bir çevresel ortamda sabit konsantrasyonda bir radyonüklite maruz kalan tipik bir bireyin maruz kalma birimi başına riski veya belirli bir popülasyonun belirli bir çevresel ortamda o radyonüklite akut olarak maruz kalan üyeleri için maruz kalma birimi başına ortalama risk olarak yorumlanabilir (EPA, 1999).

4.4.3 İstatistiksel Analiz

İstatistiksel analizden önce, veri setinin dağılımsal özellikleri Shapiro-Wilk testi kullanılarak normallik ve Levene testi kullanılarak varyansların homojenliği açısından değerlendirildi. Ham verilerin başlangıçta normal olmayan bir dağılıma sahip olması göz önüne alındığında, logaritmik, karekök, ters ve üstel dönüşümler, parametrik test varsayımlarının ihlallerini azaltmak ve sonraki analizlerin geçerliliğini artırmak için incelendi. Karekök dönüşümü, verilerin çarpıklığını ve basıklığını en etkili şekilde azaltarak, test edilen diğer dönüşümlere kıyasla normal dağılıma en yakın hale getirdiği için en uygun dönüşüm olarak ortaya çıkmıştır. Sonuç olarak, analiz edilen TAB türleri arasındaki anlamlı farklılıkları belirlemek için parametrik olmayan bir yaklaşım olan Kruskal-Wallis testi ($\alpha = 0,05$) kullanıldı ve ardından ikili karşılaştırmalar için Bonferroni düzeltmeli bir Dunn post-hoc testi uygulandı. Tüm istatistiksel hesaplamalar R Studio 2023.06 sürümünde (R Core Team, 2023) gerçekleştirildi.

5. BULGULAR, TARTIŞMA, SONUÇ ve ÖNERİLER

Dördüncü bölümde de ifade edildiği gibi tez kapsamımda; 39 familyaya ait 91 TAB türüne ait 43'ü yaprak; 24'ü çiçek, beşi tohum, altısı meyve, dördü kök; 12'si toprak üstü (bitkinin tamamı), üçü kabuk ve biri de karışık olmak üzere 98 örnek radyometrik açıdan incelemeye tabi tutuldu. Tezin bu bölümünde, (1) Türkiye′de tıbbi ve aromatik amaçlar için yaygın olarak kullanılan ticari TAB örneklerinde analiz edilen doğal ve yapay radyonüklitlerin aktivite derişimleri ve (2) incelenen TAB örneklerinin tüketilmesinden kaynaklanan olası radyolojik sağlık risk değerlendirme sonuçları verildi.

Tez kapsamındaki her bir TAB örneğinin radyolojik açıdan önemli olan doğal ve yapay radyonüklit içeriği, örneklere ait gama-ışını spektrumları değerlendirilerek nitel ve nicel olarak belirlendi. TAB doğal radyonüklit olarak ^{232}Th serisinden ^{228}Ra; ^{238}U serisinden ^{226}Ra ve primordiyal radyonüklit ^{40}K analiz edildi. Yapay radyonüklit (fisyon ürünü) olarak 1986 yılında meydan gelen Çernobil nükleer kazasının sonucu olarak yağışla Türkiye'ye (özellikle Karadeniz ve Trakya bölgesine) gelen ^{137}Cs, TAB örneklerinin tamamında, ÖMA değerinin (0,3 Bq/kg) altında gözlendi. Bu sebeple incelenen TAB örneklerinin tüketilmesinden kaynaklanan olası radyolojik risk değerlendirmesinde; ^{137}Cs dikkate alınmadı.

5.1 Tıbbi ve Aromatik Bitki Örneklerinin Doğal Radyonüklit İçeriği

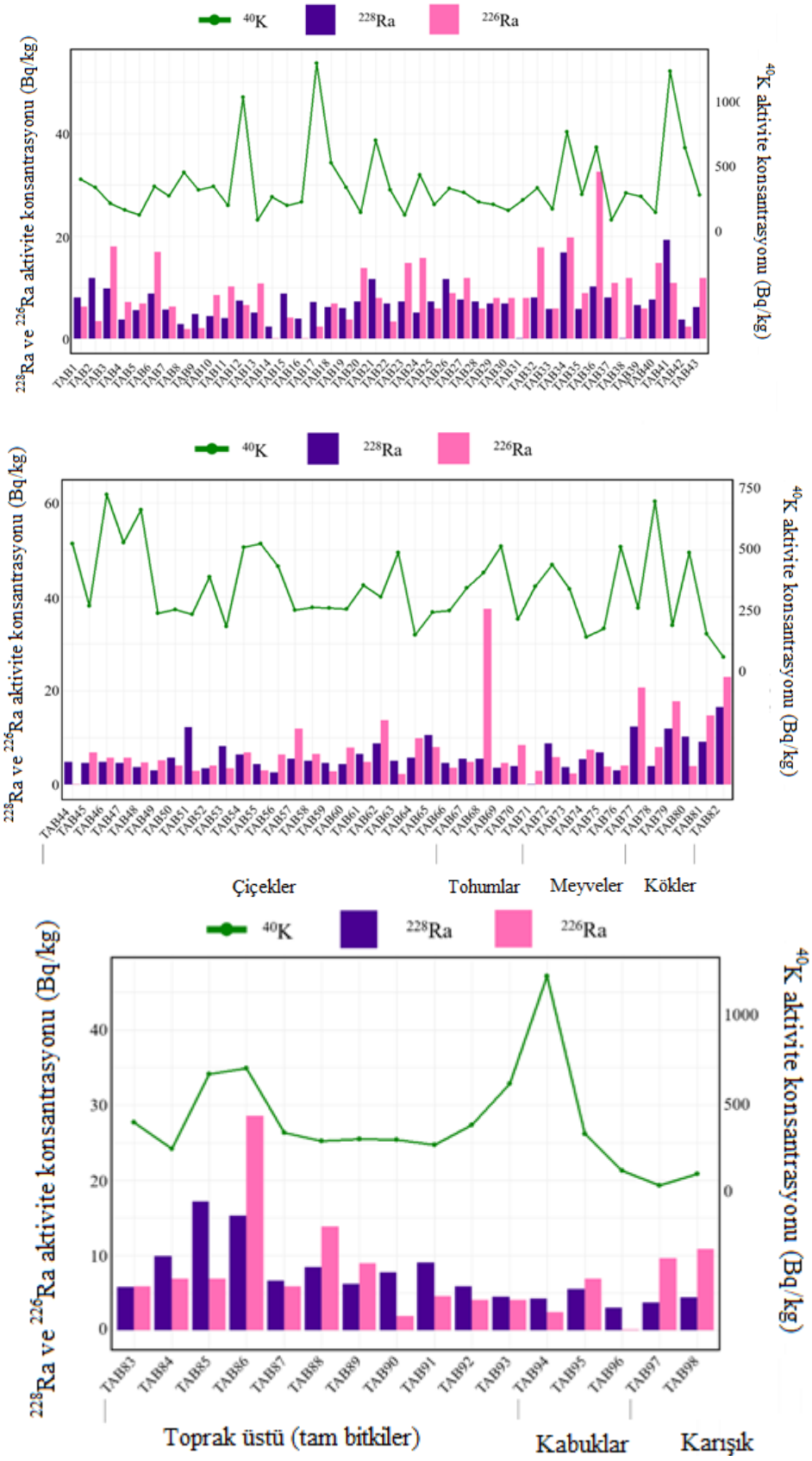
TAB örneklerinin tamamında analiz edilen ^{228}Ra; ^{226}Ra ve ^{40}K'nin aktivite konsantrasyonu ile ilgili bazı istatistiksel veriler, Tablo 5.1'de sunuldu. Ayrıca TAB örneklerinin doğal radyonüklit içeriklerinin birbirleriyle karşılaştırılması ise Grafik 5.1'de gösterildi. Veri dönüşümünün etkisini görsel olarak göstermek için radyonüklitlerin aktivite konsantrasyonlarının frekans dağılımları, Grafik 5.2'de ve karekök dönüşümünden sonraki aktivite konsantrasyonlarının frekans dağılımları ise Grafik 5.3'de gösterildi. Bu iki grafiğin karşılaştırması, dönüşümün eğriliği azaltarak ve şekli çan eğrisine yaklaştırarak verilerin normalleştirilmesine nasıl yardımcı olduğunu açıkça göstermektedir. Ayrıca, her bir radyonüklit için karekök dönüşümü uygulanmış aktivite konsantrasyonlarının dağılımının ortancaları, çeyreklik aralıkları

ve olası aykırı değerler de dâhil olmak üzere ayrıntılı bir özeti, Grafik 5.4'de gösterildi. Her bir TAB örneğinin kullanılan kısımda analiz edilen ^{228}Ra; ^{226}Ra ve ^{40}K'nin aktivite konsantrasyonları ölçme belirsizlikleri ile birlikte Tablo 5.2, Tablo 5.3 ve Tablo 5.4′de verildi. İncelenen TAB örneklerinin ortalama ^{228}Ra; ^{226}Ra ve ^{40}K içeriklerinin, literatürde yer alan uluslararası ve ulusal çalışma sonuçları karşılaştırılması ise Tablo 5.5′te sunuldu.

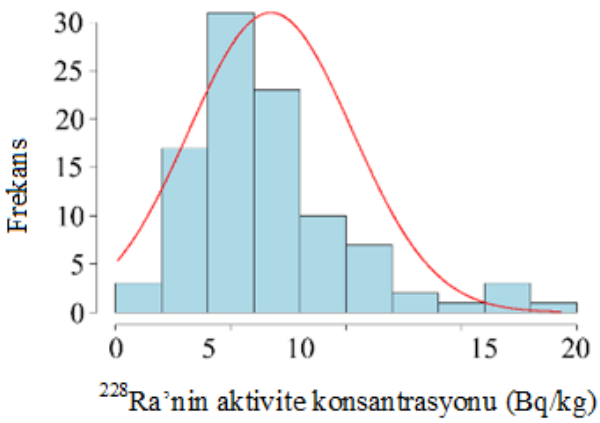
Tablo 5.1 TAB örneklerinin doğal radyonüklit içerikleri ile ilgili bazı istatistiki bilgi

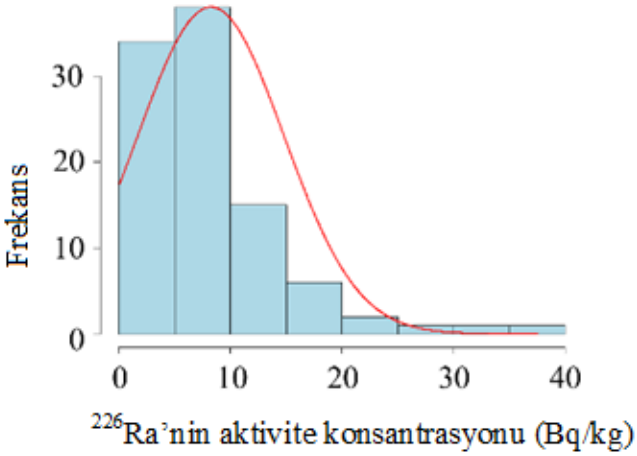
Aktivite konsantrasyonu (Bq/kg)			
	^{228}Ra	^{226}Ra	^{40}K
Ortalama	6,9	8,6	357,7
Standart hata	0,3	0,7	24,3
Ortanca	6,0	6,9	292,2
Standart sapma	3,4	6,5	240,6
Basıklık	2,5	5,7	4,5
Çarpıklık	1,5	2,1	1,9
En küçük	< 0,6	< 0,5	32,1
En büyük	19,3	37,5	1296,9
Örnek sayısı (ÖS)	98	98	98

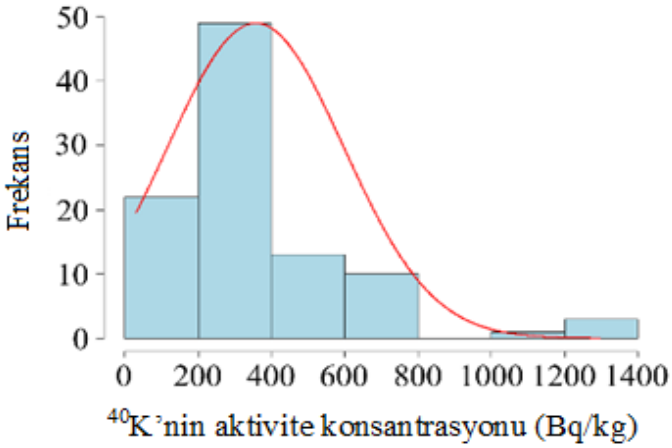
Tablo 5.1'de verilen ortalama aktive konsantrasyonlarına göre radyonüklitler ^{40}K > ^{226}Ra > ^{228}Ra olarak sıralanmaktadır. Grafik 5.1'den de görülebileceği gibi TAB örneklerinde analiz edilen radyonüklitlerin aktivite konsantrasyonlarında farklılıklar bulunmaktadır. Bu farklılıklar, muhtemelen Türkiye'nin farklı bölgelerinden toplanan TAB örneklerinin yetiştiği yerlerin jeolojik özelliklerinden ve bu TAB'ların yetiştiği veya ekildiği toprakların radyokimyasal bileşiminden kaynaklanmaktadır (Kranrod vd., 2019). Grafik 5.1'den; ^{40}K'nin aktivite konsantrasyonlarının, tüm TAB örneklerinde nispeten yüksek olduğu anlaşılmaktadır.



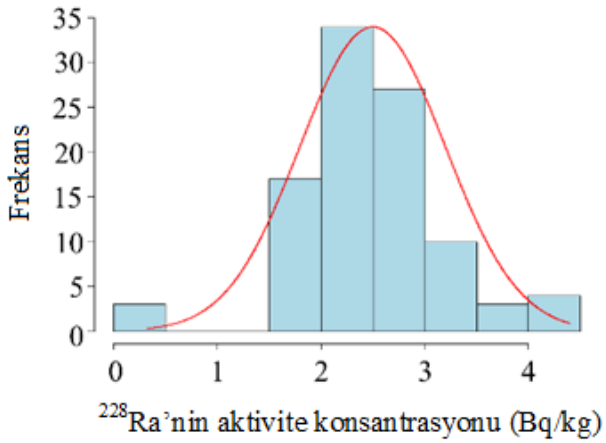
Grafik 5.1 TAB örneklerinin doğal radyonüklit içeriklerinin birbirleriyle karşılaştırılması

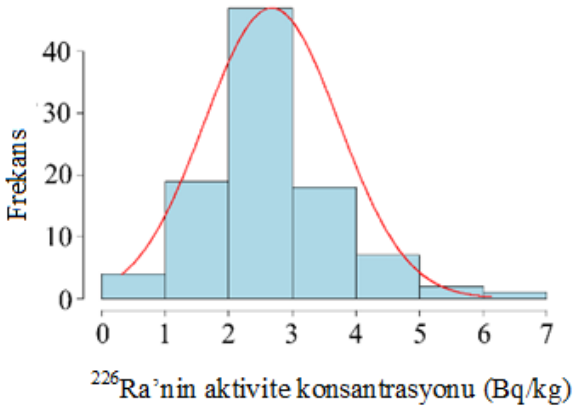


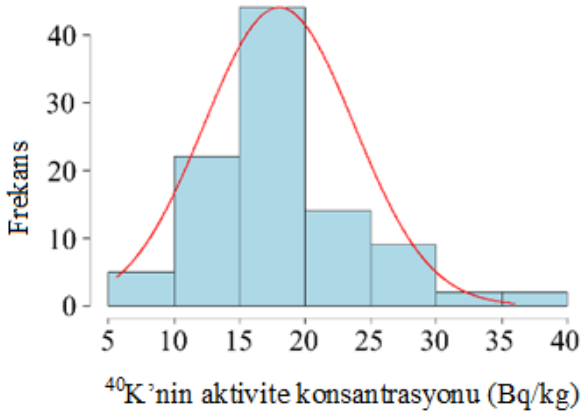




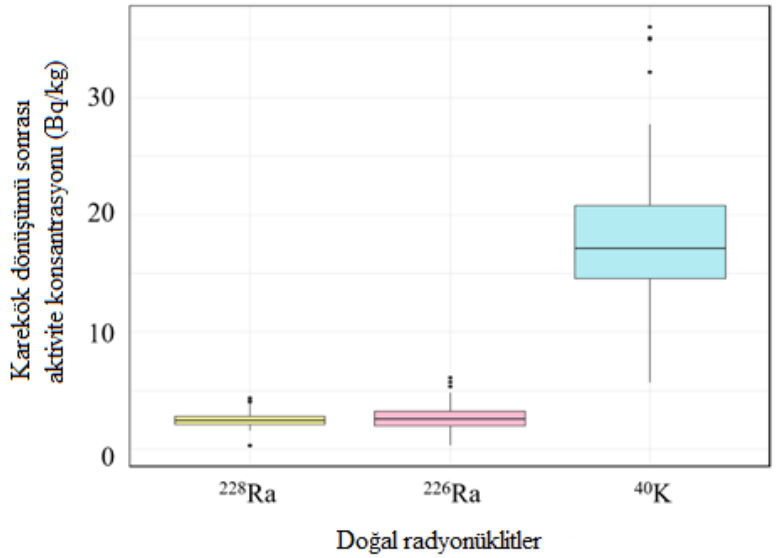
Grafik 5.2 Radyonüklitlerin aktivite konsantrasyonlarının frekans dağılımı







Grafik 5.3 Karekök dönüşümünden sonraki aktivite konsantrasyonlarının frekans dağılımı



Grafik 5.4 Karekök dönüştürülmüş veriler için kutu grafiği

TAB örneklerinde analiz edilen ^{228}Ra'nın aktivite konsantrasyonları, ortalaması 6,9 ± 0,3 Bq/kg olmak üzere < 0,6 Bq/kg – 0,90 ± 19,3 ± 0,7 Bq/kg aralığında değişmektedir. ^{228}Ra'nın en yüksek aktivite konsantrasyonu, TAB41 kodlu *Arctium majus* (dulavratotu) örneğinde bulunmuştur. Grafik 5.2; ^{228}Ra'nın aktivite konsantrasyonlarının, yaklaşık %73'nün; 5,5 Bq/kg – 9,5 Bq/kg aralığında değiştiğini göstermektedir. Tablo 5.2 – Tablo 5.4'e göre, tüm TAB örneklerinin kullanılan kısımlarda analiz edilen ^{228}Ra'nın ortalama aktivite konsantrasyonlarına göre ^{228}Ra'nın eğilimi şu şekildedir: kökler (12,0 Bq/kg) > toprak üstü (8,4 Bq/kg) > yapraklar (7,3 Bq/kg) > meyveler (5,9 Bq/kg) > çiçekler (5,7 Bq/kg) > tohumlar (5,5 Bq/kg) > kabuklar (4,0 Bq/kg). Tablo 5.5'den, TAB örneklerinin ortalama ^{228}Ra seviyesinin, Tayland, Malezya, Sırbistan ve Türkiye'den (Ankara market ve Rize) elde edilen tıbbi bitkilerde analiz edilenlerden daha yüksek olduğu görülmektedir.

TAB örneklerinde analiz edilen ^{226}Ra'in aktivite konsantrasyonları, ortalaması 8,6 ± 0,7 Bq/kg olmak üzere < 0,5 Bq/kg – 37,5 ± 1,3 Bq/kg aralığında değişmektedir. ^{226}Ra'nın en yüksek aktivite konsantrasyonu, MAH68 kodlu *Capparis spinosa* (kapari) örneğinde bulunmuştur. Tablo 5.2 – Tablo 5.4'e göre, tüm TAB örneklerinin kullanılan kısımlarda analiz edilen ^{226}Ra'nın ortalama aktivite konsantrasyonlarına göre ^{226}Ra'nın eğilimi şu şekildedir: kökler (14,9 Bq/kg) > tohumlar (11,9 Bq/kg) > yapraklar (9,5 Bq/kg) > kabuklar (8,3 Bq/kg) > toprak üstü (bütün bitkiler) (7,8 Bq/kg) > meyveler (7,8 Bq/kg) > çiçekler (5,9 Bq/kg).

Tablo 5.2 Yaprak hâlindeki TAB örneklerinin doğal radyonüklit içerikleri

Örnek kodu (Yaprak)	**Aktivite konsantrasyonu (Bq/kg)**								
	^{228}Ra			**^{226}Ra**			**^{40}K**		
TAB1	8,0	±	0,3	6,3	±	0,3	392,6	±	13,3
TAB2	11,9	±	0,4	3,5	±	0,1	332,8	±	12,3
TAB3	9,8	±	0,4	18,0	±	0,7	205,6	±	7,0
TAB4	3,7	±	0,1	7,2	±	0,3	155,6	±	4,4
TAB5	5,6	±	0,2	6,9	±	0,3	116,6	±	3,1
TAB6	8,8	±	0,3	16,9	±	0,7	339,1	±	9,8
TAB7	5,7	±	0,2	6,3	±	0,3	264,5	±	8,2
TAB8	2,9	±	0,1	1,9	±	0,1	446,7	±	14,3
TAB9	4,8	±	0,2	2,1	±	0,1	313,5	±	10,3
TAB10	4,4	±	0,2	8,5	±	0,3	338,2	±	11,5
TAB11	4,0	±	0,1	10,2	±	0,4	192,8	±	6,7
TAB12	7,5	±	0,3	6,6	±	0,3	1032,4	±	29,9
TAB13	5,1	±	0,2	10,8	±	0,4	80,3	±	2,2
TAB14	2,4	±	0,1	< 0,5			258,2	±	8,3
TAB15	8,8	±	0,3	4,1	±	0,2	191,5	±	6,7
TAB16	3,9	±	0,1	< 0,5			221	±	6,9
TAB17	7,2	±	0,3	2,4	±	0,1	1296,9	±	38,9
TAB18	6,2	±	0,2	6,9	±	0,3	523,4	±	15,2
TAB19	6,0	±	0,2	3,7	±	0,2	330,8	±	9,3
TAB20	7,3	±	0,3	13,8	±	0,6	135,9	±	3,7
TAB21	11,7	±	0,4	7,9	±	0,3	697,1	±	21,6
TAB22	6,9	±	0,2	3,4	±	0,1	311,9	±	11,2
TAB23	7,3	±	0,3	14,8	±	0,6	119,4	±	3,9
TAB24	5,1	±	0,2	15,8	±	0,7	430,2	±	14,6
TAB25	7,3	±	0,3	5,9	±	0,2	198,7	±	5,6
TAB26	11,7	±	0,4	8,9	±	0,4	325,3	±	10,1
TAB27	7,7	±	0,3	11,9	±	0,5	294,0	±	9,4
TAB28	7,3	±	0,3	5,9	±	0,2	218,7	±	7,2
TAB29	6,9	±	0,2	7,9	±	0,3	200,5	±	6,6
TAB30	6,9	±	0,2	7,9	±	0,3	152,1	±	5,2
TAB31	< 0,6			7,9	±	0,3	233,8	±	8,2
TAB32	8,0	±	0,3	17,8	±	0,7	326,8	±	9,1
TAB33	5,8	±	0,2	5,9	±	0,2	163,3	±	4,7
TAB34	16,8	±	0,6	19,8	±	0,8	764,8	±	19,9
TAB35	5,8	±	0,2	8,9	±	0,4	276,7	±	7,7
TAB36	10,2	±	0,4	32,6	±	0,8	641,2	±	17,3
TAB37	8,0	±	0,3	10,9	±	0,5	78,2	±	2,4
TAB38	< 0,6			11,9	±	0,5	288,8	±	9,2
TAB39	6,6	±	0,2	5,9	±	0,2	263,1	±	8,7
TAB40	7,7	±	0,3	14,8	±	0,6	137,1	±	4,7
TAB41	19,3	±	0,7	10,9	±	0,5	1231,4	±	43,1
TAB42	3,7	±	0,1	2,4	±	0,1	637,2	±	22,3
TAB43	6,2	±	0,2	11,9	±	0,5	274,7	±	10,2
Ortalama	7,3			9,5			358,9		
En küçük	< 0,6			< 0,5			78,2		
En büyük	19,3			32,6			1296,9		

Tablo 5.3 Çiçek ve tohum hâlindeki TAB örneklerinin doğal radyonüklit içerikleri

Örnek kodu (Çiçek)	**Aktivite konsantrasyonu (Bq/kg)**								
	^{228}Ra			**^{226}Ra**			**^{40}K**		
TAB44	4,9	±	0,2	< 0,5			520,2	±	18,7
TAB45	4,7	±	0,2	6,9	±	0,2	264,9	±	7,9
TAB46	4,9	±	0,2	5,8	±	0,2	721,4	±	24,5
TAB47	4,6	±	0,2	5,8	±	0,2	524,3	±	14,7
TAB48	3,7	±	0,1	4,8	±	0,2	657,2	±	17,7
TAB49	3,1	±	0,1	5,2	±	0,2	234,1	±	6,6
TAB50	5,8	±	0,2	4,1	±	0,1	248,7	±	5,7
TAB51	12,3	±	0,4	3,0	±	0,1	229,1	±	5,5
TAB52	3,5	±	0,1	4,1	±	0,1	383,5	±	11,9
TAB53	8,2	±	0,3	3,5	±	0,1	181,1	±	5,4
TAB54	6,5	±	0,2	6,9	±	0,2	503,4	±	17,1
TAB55	4,4	±	0,2	3,1	±	0,1	520,3	±	16,1
TAB56	2,6	±	0,1	6,4	±	0,2	427,3	±	13,2
TAB57	5,5	±	0,2	11,9	±	0,4	246,2	±	7,6
TAB58	5,1	±	0,2	6,6	±	0,2	257,1	±	8,0
TAB59	4,7	±	0,2	2,9	±	0,1	255,2	±	7,9
TAB60	4,4	±	0,2	7,9	±	0,3	250,5	±	7,8
TAB61	6,6	±	0,2	4,9	±	0,2	349,7	±	10,8
TAB62	8,8	±	0,3	13,8	±	0,5	302,3	±	9,4
TAB63	5,1	±	0,2	2,3	±	0,1	482,3	±	15,0
TAB64	5,8	±	0,2	9,9	±	0,4	145,7	±	4,5
TAB65	10,6	±	0,4	8,0	±	0,3	238,5	±	7,4
TAB66	4,7	±	0,2	3,6	±	0,1	245,3	±	7,6
TAB67	5,5	±	0,2	4,9	±	0,2	338,3	±	10,5
Ortalama	5,7			5,9			355,3		
En küçük	2,6			< 0,5			145,7		
En büyük	12,3			13,8			721,4		

Örnek kodu (Tohum)	Aktivite konsantrasyonu (Bq/kg)								
	^{228}Ra			^{226}Ra			^{40}K		
TAB68	5,5	±	0,2	37,5	±	1,3	399,7	±	12,4
TAB69	3,6	±	0,1	4,6	±	0,2	509,1	±	15,8
TAB70	4,0	±	0,1	8,5	±	0,3	210,3	±	6,5
TAB71	< 0,6	±		3,0	±	0,1	344,4	±	10,7
TAB72	8,8	±	0,3	5,9	±	0,2	432,9	±	13,4
Ortalama	5,5			11,9			379,3		
En küçük	3,6			3,0			210,3		
En büyük	8,8			37,5			509,1		

Tablo 5.4 Meyve, kök, bitki, kabuk hâlindeki TAB örneklerinin doğal radyonüklit içerikleri

Örnek kodu (Meyve)	**Aktivite konsantrasyonu (Bq/kg)**								
	^{228}Ra			**^{226}Ra**			**^{40}K**		
TAB73	3,7	±	0,1	2,4	±	0,1	334,7	±	10,4
TAB74	5,4	±	0,2	7,4	±	0,3	136,2	±	4,2
TAB75	6,9	±	0,2	3,9	±	0,1	171,1	±	5,3
TAB76	3,1	±	0,1	4,1	±	0,1	506,9	±	15,7
TAB77	12,4	±	0,4	20,7	±	0,7	255,2	±	7,9
TAB78	4,0	±	0,1	8,0	±	0,3	693,5	±	21,5
Ortalama	5,9			7,8			349,6		
En küçük	3,1			2,4			136,2		
En büyük	12,4			20,7			693,5		

Örnek kodu (Kök)	**Aktivite konsantrasyonu (Bq/kg)**								
	^{228}Ra			**^{226}Ra**			**^{40}K**		
TAB79	12,0	±	0,4	17,8	±	0,6	184,1	±	5,7
TAB80	10,3	±	0,4	4,0	±	0,1	483,3	±	15,0
TAB81	9,1	±	0,3	14,8	±	0,5	149,8	±	4,6
TAB82	16,6	±	0,6	23,0	±	0,8	54,1	±	1,7
Ortalama	12,0			14,9			217,8		
En küçük	9,1			4,0			54,1		
En büyük	16,6			23,0			483,3		

Örnek kodu (Bitki, toprak üstü)	**Aktivite konsantrasyonu (Bq/kg)**								
	^{228}Ra			**^{226}Ra**			**^{40}K**		
TAB83	5,8	±	0,2	5,9	±	0,2	388,9	±	12,1
TAB84	9,9	±	0,3	6,9	±	0,2	240,6	±	7,5
TAB85	17,2	±	0,6	6,9	±	0,2	663,2	±	20,6
TAB86	15,3	±	0,5	28,7	±	1,0	697,4	±	21,6
TAB87	6,6	±	0,2	5,9	±	0,2	331,4	±	10,3
TAB88	8,4	±	0,3	13,8	±	0,5	284,6	±	8,8
TAB89	6,2	±	0,2	8,9	±	0,3	296,2	±	9,2
TAB90	7,7	±	0,3	1,9	±	0,1	290,3	±	9,0
TAB91	9,0	±	0,3	4,6	±	0,2	259,8	±	8,1
TAB92	5,9	±	0,2	4,1	±	0,1	374,8	±	11,6
TAB93	4,5	±	0,2	4,1	±	0,1	610,1	±	18,9
TAB94	4,2	±	0,1	2,4	±	0,1	1223,1	±	37,9
Ortalama	8,4			7,8			471,7		
En küçük	4,2			1,9			240,6		
En büyük	17,2			28,7			1223,1		

Örnek kodu (Kabuk) ve karışık)	**Aktivite konsantrasyonu (Bq/kg)**								
	^{228}Ra			**^{226}Ra**			**^{40}K**		
TAB95	5,5	±	0,2	6,9	±	0,2	325,6	±	10,1
TAB96	3,0	±	0,1	< 0,5			116,3	±	3,6
TAB97	3,7	±	0,1	9,6	±	0,3	32,1	±	1,0
Ortalama	4,0			8,3			158,0		
En küçük	3,0			6,9			32,1		
En büyük	5,5			9,6			325,6		
Örnek kodu (Karışık)									
TAB98	4,4	±	0,2	10,8	±	0,4	97,6	±	3,0

Tablo 5.5 TAB örneklerinin radyonüklit içeriklerinin literatür ile karşılaştırılması

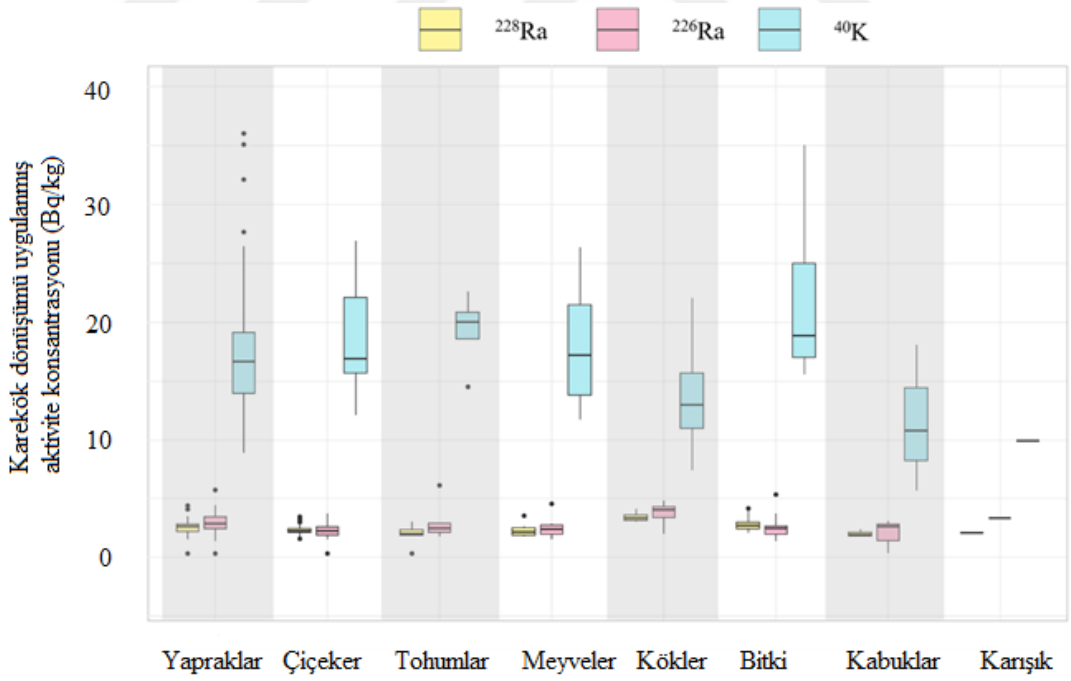
Ülke	Örnek sayısı	Aktivite konsantrasyonu (Bq/kg)			Referans
		^{228}Ra (^{232}Th)	^{226}Ra	^{40}K	
Hindistan	17	9,3	28,4	76,3	Achari vd., 2024
Mısır	17	9,2	5,2	686,0	Harb, 2015
Tayland	214	2,6	1,6	325,9	Kranrod vd., 2019
Malezya	14	3,8	5,4	340,0	Shuaibu vd., 2023
Nijerya	12	37,0	43,0	5883,0	Shuaibu vd., 2025
Uganda	10	9,7	6,0	359,6	Biira vd., 2021
Irak	9	-	-	431,4	Najam vd., 2015
Sırbistan	10	0,6	2,8	984,3	Živković vd., 2021
Nepal	10	61,5	6,5	1270,0	Khanal vd., 2024
Türkiye (Bitlis)	13	58,1	42,9	343,6	Bal vd., 2019
Türkiye (Kars)	7	22,6	61,0	935,8	Cengiz ve Çağlar, 2019
Türkiye (Ankara)	35	26,8	33,8	451,4	Güven vd., 2023
Türkiye (Rize)	12	1,8	4,5	259,2	Kırış, 2022
Türkiye (Balıkesir)	9	36,9	16,7	1025,1	Kamislioglu, 2021
Türkiye (Kilis)	19	18,0	10,9	1025,8	Canbazoğlu vd., 2018
Türkiye (Ankara market)	22	2,8	5,9	500,2	Parmaksız ve Ağuş, 2014
Türkiye	98	6,9	8,6	357,7	Bu çalışma

Grafik 5.2; ^{226}Ra'nın aktivite konsantrasyonlarının yaklaşık %79'unun; 5,5 Bq/kg – 13,5 Bq/kg aralığında değiştiğini göstermektedir. Tablo 5.5'den, TAB örneklerinin ortalama ^{226}Ra seviyesinin, Hindistan, Nijerya ve Türkiye'den (Bitlis, Kars, Ankara, Balıkesir ve Kilis) elde edilen tıbbi bitkilerde analiz edilenlerden daha düşük olduğu anlaşılmaktadır.

TAB örneklerinde analiz edilen ^{40}K'nin aktivite konsantrasyonları, ortalaması 357,7 ± 24,3 Bq/kg olmak üzere 32,1 ± 1,0 Bq/kg – 1296,9 ± 38,9 Bq/kg aralığında değişmektedir. ^{40}K'nin en yüksek aktivite konsantrasyonu, TAB17 kodlu *Primula acaulis* (primula) örneğinde bulunmuştur. Grafik 5.2; ^{40}K'nin aktivite konsantrasyonlarının, yaklaşık %76'sının, 180 Bq/kg – 460 Bq/kg aralığında değiştiğini göstermektedir. Tablo 5.2 – Tablo 5.4'e göre, tüm TAB örneklerinin kullanılan kısımlarda analiz edilen ^{40}K'nin ortalama aktivite konsantrasyonlarına göre ^{40}K'nin eğilimi şu şekildedir: Toprak üstü (bütün bitkiler) (471,7 Bq/kg) > tohumlar (379,3 Bq/kg) > yapraklar (358,9 Bq/kg) > çiçekler (355,3 Bq/kg) > meyveler (349,6 Bq/kg) > kökler (217,8 Bq/kg) > kabuklar (158,0 Bq/kg). Tablo 5.5'den, TAB örneklerinin ortalama ^{40}K'nin seviyesinin, Mısır, Nijerya, Irak, Sırbistan, Nepal ve Türkiye'den (Kars, Ankara, Kilis ve Balıkesir) elde edilen tıbbi bitkilerde analiz edilen

değerden düşük iken, Tayland, Malezya, Uganda ve Türkiye'den (Bitlis) elde edilen tıbbi bitkilerle uyumlu olduğu anlaşılmaktadır.

Grafik 5.3'ten ise karekök dönüşümünden sonra üç radyonüklitlerin frekans dağılımlarının, normale yakın bir dağılım sergilediği görülmektedir. Grafik 5.5, TAB örneklerinin kullanılan kısımlarında analiz edilen her bir radyonüklitin merkezi eğiliminin, yayılımının ve aykırı değerlerin varlığının net bir görsel karşılaştırmasına olanak tanımaktadır. Grafikteki kutular çeyreklik aralıkları, ince çizgiler 5. ile 95. yüzdelikleri ve noktalar aykırı değerleri göstermektedir. Bu grafik ayrıca, radyonüklitlerin çeşitli bitki organlarındaki birikimini vurgulayarak, radyonüklit alımı ve potansiyel maruziyeti değerlendirirken belirli bitki bölgelerinin dikkate alınmasının önemini vurgular. Verilerin dağılım özellikleri göz önünde bulundurularak yapılan sağlam parametrik olmayan testler kullanan sonraki istatistiksel analiz, ^{228}Ra konsantrasyonlarında anlamlı farklılıkların yalnızca tohum ve kök ile tohum ve çiçek bölgeleri arasında gözlemlendiğini ortaya koymuştur ($p < 0,05$).



Grafik 5.5 TAB'ların kullanılan kısımlarının karşılaştırmalı aktivite konsantrasyon değerleri

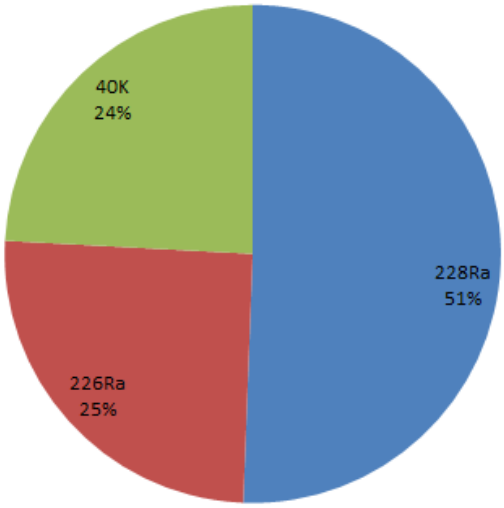
5.2 Olası Radyolojik Sağlık Risklerinin Değerlendirilmesi

5.2.1 Yıllık Etkin Radyasyon Dozu (YERD) Değerleri

İncelenen TAB örneklerinin tüketilmesi sonucunda radyonüklitlerin sindirilmesinden kaynaklanan olası radyolojik sağlık riskini değerlendirmek amacıyla her bir radyonüklit için tahmini olarak hesaplanan YERD ve TYERD'e ait bazı istatistiki bilgi, Tablo 5.6'da verildi ve her bir radyonüklitin, TYERD'e katkısı ise Grafik 5.6'da gösterildi. Her bir radyonüklitin sindirilmesinden kaynaklanan ortalama YERD değerleri; 8,4 µSv/y (3,0 – 24,0 µSv/y) (^{228}Ra); 4,2 µSv/y (0,9 – 18,9 µSv/y) (^{226}Ra) ve 4,0 µSv/y (0,4 – 14,5 µSv/y) (^{40}K) olarak hesaplandı. TAB örneklerinde analiz edilen radyonüklitlerin sindirilmesine eşlik eden TYERD değerleri, ortalaması µSv/y µSv/y olmak üzere 5,0 µSv/y – 43,2 µSv/y aralığında değişmektedir. Grafik 5.6'dan görülebileceği gibi her bir radyonüklitin TYERD'e katkısı %51 (^{228}Ra); %25 (^{226}Ra) ve %24 (^{40}K) olarak hesaplandı. Bununla birlikte dulavratotu (*Arctium majus*) TYERD'e en yüksek katkıyı göstererek TYERD'in yaklaşık %55'i; ^{228}Ra'dan; %13'ü, ^{226}Ra'dan ve %32'si ^{40}K'den kaynaklandı. TAB örneklerinin kullanılan kısımları için hesaplanan ortalama YERD ve TYERD değerleri, Tablo 5.7'de verildi. Ortalama TYERD değerlerine göre kullanılan kısımlar, kökler (24,9 µSv/y) > toprak üstü (19,6 µSv/y) > yapraklar (17,3 µSv/y) > tohumlar (15,7 µSv/y) > meyveler (15,2 µSv/y) > çiçekler (13,9 µSv/y) > kabuklar (9,6 µSv/y) olarak sıralandı.

Tablo 5.6 İncelenen TAB örneklerinin tüketilmesine eşlik eden yıllık etkin doz değerleri

	Yıllık etkin doz (µSv/y)			
	YERD$_{228Ra}$	**YERD$_{226Ra}$**	**YERD$_{40K}$**	**TYERD**
Ortalama	8,4	4,2	4,0	16,5
Standart hata	0,4	0,3	0,3	0,7
Ortanca	7,3	3,4	3,3	14,5
Standart sapma	4,4	3,3	2,7	7,3
Basıklık	2,2	5,4	4,5	3,1
Çarpıklık	1,2	2,0	1,9	1,6
En küçük	3,0	0,9	0,4	5,0
En büyük	24,0	18,9	14,5	43,2



Grafik 5.6 Radyonüklitlerin toplam yıllık doza katkıları

Tablo 5.7 Kullanılan kısımlar için hesaplanan ortalama yıllık etkin doz değerleri

Kullanılan kısım	**Yıllık etkin doz (µSv/y)**			
	^{228}Ra	**^{226}Ra**	**^{40}K**	**Toplam**
Yapraklar	8,7	4,5	4,0	17,3
Çiçekler	7,0	2,9	4,0	13,9
Tohumlar	5,4	6,0	4,2	15,7
Meyveler	7,4	3,9	3,9	15,2
Kökler	14,9	7,5	2,4	24,9
Toprak üstü (tüm bitkiler)	10,4	4,0	5,3	19,6
Kabuklar	5,0	2,8	1,8	9,6
Karışık	5,5	5,4	1,1	12,0

5.2.2 Yaşam Boyu Kanser Risk Değerleri

İncelenen TAB örneklerinin tüketilmesi sonucunda radyonüklitlerin sindirilmesinden kaynaklanan olası radyolojik sağlık riskini değerlendirmek amacıyla her bir radyonüklit için tahmini olarak hesaplanan mortalite ve morbidite yaşam boyu kanser risk değerleri, Tablo 5.8'de verildi. Ayrıca, TAB örneklerinin kullanılan kısımları için tahmini olarak hesaplanan ortalama mortalite ve morbidite yaşam boyu kanser risk değerleri ise Tablo 5.9'da verildi. Tablo 5.8'den de görülebileceği gibi her bir radyonüklit için hesaplanan ortalama yaşam boyu mortalite kanser riski; $2,4 \times 10^{-5}$ (^{228}Ra); $1,0 \times 10^{-5}$ (^{226}Ra) ve $2,7 \times 10^{-5}$ (^{40}K) olarak ve ortalama yaşam boyu morbidite kanser riski ise $3,4 \times 10^{-5}$ (^{228}Ra); $1,5 \times 10^{-5}$ (^{226}Ra) ve $4,2 \times 10^{-5}$ (^{40}K) olarak bulundu. Ortalama toplam yaşam boyu kanser risk değeri, mortalite için $6,0 \times 10^{-5}$ ($1,9 \times 10^{-5}$ – $1,7 \times 10^{-4}$) ve morbidite için $8,9 \times 10^{-5}$ ($2,8 \times 10^{-5}$ – $2,6 \times 10^{-4}$) olarak hesaplandı. Tablo

5.9'da verilen ortalama toplam yaşam boyu kanser risk değerlerine (mortalite ve morbidite) göre kullanılan kısımlar, kökler ($7,6 \times 10^{-5}$ ve $1,099 \times 10^{-4}$) > toprak üstü ($7,3 \times 10^{-5}$ ve $1,095 \times 10^{-4}$ > yapraklar ($6,2 \times 10^{-5}$ ve $9,2 \times 10^{-5}$) > tohumlar ($5,8 \times 10^{-5}$ ve $8,6 \times 10^{-5}$) > meyveler ($5,6 \times 10^{-5}$ ve $8,3 \times 10^{-5}$) > çiçekler ($5,3 \times 10^{-5}$ ve $7,9 \times 10^{-5}$) > kabuklar ($3,2 \times 10^{-5}$ ve $4,8 \times 10^{-5}$) olarak sıralandı.

Tablo 5.8 TAB örneklerinin tüketilmesine eşlik eden yaşam boyu kanser risk değerleri

	Yaşam boyu kanser riski							
	Mortalite				**Morbidite**			
	^{228}Ra	**^{226}Ra**	**^{40}K**	**Total**	**^{228}Ra**	**^{226}Ra**	**^{40}K**	**Total**
Ortalama	$2{,}4 \times 10^{-5}$	$1{,}0 \times 10^{-5}$	$2{,}7 \times 10^{-5}$	$6{,}0 \times 10^{-5}$	$3{,}4 \times 10^{-5}$	$1{,}5 \times 10^{-5}$	$4{,}2 \times 10^{-5}$	$8{,}9 \times 10^{-5}$
Standart hata	$1{,}2 \times 10^{-6}$	$8{,}0 \times 10^{-7}$	$1{,}8 \times 10^{-6}$	$2{,}6 \times 10^{-6}$	$1{,}7 \times 10^{-6}$	$1{,}2 \times 10^{-6}$	$2{,}8 \times 10^{-6}$	$4{,}0 \times 10^{-6}$
Ortanca	$2{,}0 \times 10^{-5}$	$8{,}1 \times 10^{-6}$	$2{,}2 \times 10^{-5}$	$5{,}3 \times 10^{-5}$	$2{,}8 \times 10^{-5}$	$1{,}2 \times 10^{-5}$	$3{,}4 \times 10^{-5}$	$7{,}9 \times 10^{-5}$
Standart sapma	$1{,}2 \times 10^{-5}$	$7{,}9 \times 10^{-6}$	$1{,}8 \times 10^{-5}$	$2{,}6 \times 10^{-5}$	$1{,}7 \times 10^{-5}$	$1{,}1 \times 10^{-5}$	$2{,}8 \times 10^{-5}$	$3{,}9 \times 10^{-5}$
Basıklık	2,2	5,4	4,5	4,1	2,2	5,4	4,5	4,1
Çarpıklık	1,2	2,0	1,9	1,8	1,2	2,0	1,9	1,8
En küçük	$8{,}3 \times 10^{-6}$	$2{,}2 \times 10^{-6}$	$2{,}4 \times 10^{-6}$	$1{,}9 \times 10^{-5}$	$1{,}2 \times 10^{-5}$	$3{,}3 \times 10^{-6}$	$3{,}7 \times 10^{-6}$	$2{,}8 \times 10^{-5}$
En büyük	$6{,}7 \times 10^{-5}$	$4{,}5 \times 10^{-5}$	$9{,}6 \times 10^{-5}$	$1{,}7 \times 10^{-4}$	$9{,}4 \times 10^{-5}$	$6{,}6 \times 10^{-5}$	$1{,}5 \times 10^{-4}$	$2{,}6 \times 10^{-4}$

Tablo 5.9 Kullanılan kısımlar için hesaplanan ortalama yaşam boyu kanser risk değerleri

Kullanılan kısım	**Yaşam boyu kanser riski**							
	Mortalite				**Morbidite**			
	^{228}Ra	**^{226}Ra**	**^{40}K**	**Total**	**^{228}Ra**	**^{226}Ra**	**^{40}K**	**Total**
Yapraklar	$2{,}4 \times 10^{-5}$	$1{,}1 \times 10^{-5}$	$2{,}7 \times 10^{-5}$	6,2E-05	$3{,}4 \times 10^{-5}$	$1{,}6 \times 10^{-5}$	$4{,}2 \times 10^{-5}$	$9{,}2 \times 10^{-5}$
Çiçekler	$2{,}0 \times 10^{-5}$	$6{,}8 \times 10^{-6}$	$2{,}6 \times 10^{-5}$	5,3E-05	$2{,}8 \times 10^{-5}$	$9{,}9 \times 10^{-6}$	$4{,}1 \times 10^{-5}$	$7{,}9 \times 10^{-5}$
Tohumlar	$1{,}5 \times 10^{-5}$	$1{,}4 \times 10^{-5}$	$2{,}8 \times 10^{-5}$	5,8E-05	$2{,}1 \times 10^{-5}$	$2{,}1 \times 10^{-5}$	$4{,}4 \times 10^{-5}$	$8{,}6 \times 10^{-5}$
Meyveler	$2{,}0 \times 10^{-5}$	$9{,}3 \times 10^{-6}$	$2{,}6 \times 10^{-5}$	5,6E-05	$2{,}9 \times 10^{-5}$	$1{,}4 \times 10^{-5}$	$4{,}1 \times 10^{-5}$	$8{,}3 \times 10^{-5}$
Kökler	$4{,}2 \times 10^{-5}$	$1{,}8 \times 10^{-5}$	$1{,}6 \times 10^{-5}$	7,6E-05	$5{,}9 \times 10^{-5}$	$2{,}6 \times 10^{-5}$	$2{,}5 \times 10^{-5}$	$1{,}1 \times 10^{-4}$
Toprak üstü (tüm bitkiler)	$2{,}9 \times 10^{-5}$	$9{,}4 \times 10^{-6}$	$3{,}5 \times 10^{-5}$	7,3E-05	$4{,}1 \times 10^{-5}$	$1{,}4 \times 10^{-5}$	$5{,}5 \times 10^{-5}$	$1{,}1 \times 10^{-4}$
Kabuklar	$1{,}4 \times 10^{-5}$	$6{,}6 \times 10^{-6}$	$1{,}2 \times 10^{-5}$	3,2E-05	$2{,}0 \times 10^{-5}$	$9{,}7 \times 10^{-6}$	$1{,}8 \times 10^{-5}$	$4{,}8 \times 10^{-5}$
Karışık	$1{,}5 \times 10^{-5}$	$1{,}3 \times 10^{-5}$	$7{,}2 \times 10^{-6}$	3,5E-05	$2{,}1 \times 10^{-5}$	$1{,}9 \times 10^{-5}$	$1{,}1 \times 10^{-5}$	$5{,}2 \times 10^{-5}$

5.3 Sonuç ve Öneriler

Daha önce de ifade edildiği gibi bu çalışmanın temel amacı, Türkiye'de sinir sistemi, üst solunum yolu, gastrointestinal sistem, dolaşım sistemi, bağışıklık sistemi, kalp vb. gibi hastalıkları önlemek veya tedavi etmek için kullanılan popüler ticari tıbbi ve aromatik bitki türlerinin radyolojik önemini ve kalitesi değerlendirmektir. Tez kapsamında yapılan çalışmada, ilk defa, Türkiye′deki tıbbi ve aromatik bitki türü envanterinin yaklaşık yarısı kadar örnek toplandı ve bu örnekler kullanılan kısımlarına göre gruplandırıldı. Her bir kısımda analiz edilen doğal radyonüklitlerin sindirilmesi sonucunda oluşan iç ışınlamadan kaynaklanan olası radyolojik sağlık risklerini değerlendirmek için yıllık etkin radyasyon dozlarını yanı sıra ilk defa yaşam boyu mortalite ve morbidite kanser riskleri tahmin olarak hesaplanarak çalışma özgün hâle getirildi. Bu açıdan bakıldığında, bu çalışma, bazıları ihraç edilen tıbbi ve aromatik bitki türü sayısı ve bunların radyolojik kalitesi ile ilgili yapılan ilk ayrıntılı araştırma niteliğindedir. Ancak bu tez kapsamında olası radyolojik sağlık riski, sadece yetişkin tüketiciler için değerlendirildi. Bunun sebebi maalesef Türkiye'de diğer yaş grupları için yıllık tüketim miktarları ile ilgili herhangi bir istatistikî bilginin olmamasıdır.

Tez kapsamında yapılan radyometrik ve radyolojik değerlendirmenin sonuçları aşağıda maddeler hâlinde özetlendi:

- Tıbbi ve aromatik bitki türlerinin radyolojik kalitesini değerlendirmek için bitki türlerinde doğal (^{228}Ra; ^{226}Ra ve ^{40}K) ve yapay (^{137}Cs) radyonüklitlerin aktivite düzeyleri belirlendi. Çernobil nükleer kazasının sonucu olarak Türkiye'ye yağışla gelerek toprak, su ve gıda örneklerini kirleten (kontamine eden) fisyon ürünü yapay ^{137}Cs radyonükliti, örneklerin tamamında, ÖMA değerinin (0,3 Bq/kg) altında gözlendi. Örneklerde analiz edilen doğal radyonüklitlerin ortalama aktivite konsantrasyonları; 6,9 Bq/kg (^{228}Ra); 8,6 Bq/kg (^{226}Ra) ve 357,7 Bq/kg (^{40}K) olarak bulundu. Radyum izotopları için bulunan aktivite konsantrasyon değerleri düşük ve ^{40}K için bulunan değer ise normal olarak kabul edilebilir. Bilindiği gibi Birleşmiş Milletlere bağlı Dünya Sağlık Örgütü ve Gıda ve Tarım Örgütü (GTÖ) Ortak Gıda Standartları Programı kapsamında oluşturulan Kodeks Alimentarius Komisyonu, nükleer bir acil durumun ardından gıdalardaki belirli (yapay fisyon ürünü olan)

radyonüklitler için kılavuz seviyeleri geliştirmiştir. Bu kılavuz seviyeler, nükleer veya radyolojik bir acil durumun ardından kontamine olmuş, insan tüketimine yönelik ve uluslararası ticareti yapılan gıdalara uygulanmaktadır. Bu Kodeks'de doğal kaynaklı radyonüklitler dikkate alınmamış ve bunlar için herhangi kılavuz seviye belirlenmemiştir.

- Tıbbi ve aromatik bitki örneklerinde analiz edilen doğal radyonüklitlerin sindirilmesine eşlik eden yıllık etkin radyon doz değerleri (5,0 μSv/y – 43,2 μSv/y), (1) gıdalardaki doğal radyonüklitlerin tüketiminden kaynaklanan yıllık etkin radyon doz değerinin küresel ortalamasından (290 μSv/y'den) ve (2) Dünya Sağlık Örgütü-Gıda ve Tarım Örgütü ile Uluslararası Radyasyon Koruması Komisyonu tarafından sınır değer olarak önerilen 1 mSv/y'den önemli ölçüde küçüktür.

- Kökler ve toprak üstü için hesaplanan toplam morbidite yaşan boyu kanser risk değeri ($1{,}1 \times 10^{-4}$) hariç, diğer kullanılan kısımları için tahmin edilen tüm ortalama toplam mortalite ve morbidite yaşan boyu kanser risk değerleri, ABD Çevre Koruma Ajansı tarafından tavsiye edilen değer aralığının ($1{,}0 \times 10^{-6} – 1{,}0 \times 10^{-4}$) içindedir.

Sonuç olarak, bu çalışmada elde edilen radyolojik değerlendirme bulguları, halk sağlığı için kabul edilebilir sınırların önemli ölçüde altında olduğunu ortaya koymuştur. Bununla birlikte olumlu sonuçlara rağmen, tıbbi ve aromatik bitki türlerindeki doğal radyonüklitlere uzun süreli maruz kalmanın, potansiyel radyolojik sağlık risklerini en aza indirmek için bitkilerdeki radyonüklit aktivite konsantrasyonlarının periyodik olarak izlenmesi şiddetle önerilmektedir. Bu çalışmada elde edilen bulguların tüketicilerde farkındalık oluşturacağı, tıbbi bitkilerin radyolojik kalite kontrolü için temel veri sağlayacağı ve gelecekte olası radyoaktivite kontaminasyonun izlenmesi için referans veri olarak kullanılacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

Abdelfadeel, E. H., El-Halim, E. S. A., Hegazy, T. M. & Ghany, H. A. A. (2023). Relationship between radioactivity and toxicity in some medicinal plants. *Scientific Reports, 13*(1), 1–13.

Abojassim, A. A., Hady, H. N. & Kareem, A. A. (2016). Radon levels in different types of plants with medicinal properties. *Madridge Journal of Food Technology, 1*(1), 18–21.

Achari, S., Pudiyaneravana Ramanand, V., Chikkahalkur Shivanandappa, K., Patlamane Pashupathi, S., Timmanna Hedge, S. & Yerol, N. (2024). Evaluation of natural radioactivity and assessment of health risk due to the consumption of medicinal plants grown in the Western Ghat region of India. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry, 104*(19), 7500–7522.

Acıbuca, V. & Budak, D.B. (2018). Dünya'da ve Türkiye'de tıbbi ve aromatik bitkilerin yeri ve önemi. *Çukurova Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi, 33*(1), 37–44.

Adeleke, F., Olarinoye, I., Idris, M. & Isah, K. (2021). Estimation of soil-to-plant transfer factors for 238U, 232Th, 40K and 137Cs radionuclides for some selected medicinal plants in some parts of Minna and Kaduna, Nigeria. *Journal of Radiation and Nuclear Applications, 1*, 1–5.

Al-Rubiee, S. F. M., Abu Sini, M. & Al-Jundi, J. S. (2015). Natural radioactivity determination in some medicinal plants. *American Journal of BioMedicine, 3*(6), 369–380.

Alkufi, A. A., Alhous, S. F. & Kadhim, S. A. (2020). Annual committed effective dose as a result of daily consumption of medicinal herbs in Iraq. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 928*, 1–5.

Altamemi, R. A. A., Turhan, Ş. & Kurnaz, A. (2021). Natural and anthropogenic radioactivity in some vegetables and fruits commonly consumed in the Western Black Sea region of Turkey. Radiochimica Acta, 109(12), 935–942.

Bal, S. Ş., Gönültaş, F., Kılıç, Ö., Kurşat, M. & Yetiş, A. D. (2019). Bitlis'te yetişen bazi tibbi ve aromatik bitkilerin radyo izotop aktivite konsantrasyonları. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 8*, 25–29.

Bal, S. Ş., Kurşat, M., Kuluöztürk, M. F., Çelik, Ş. K. & Yılmaz, E. (2023). Soil to plant transfer of 226Ra, 232Th and 137Cs to some medicinal and aromatic plants growing in Bitlis (Turkey). *Journal of Environmental Radioactivity, 257*, 1–3.

Bal, S. Ş., Kurşat, M., Kuluöztürk, M. F., Karatepe, Ş. & Yılmaz, E. (2018). Determination of the radio-isotope activity concentration in some medicinal and

aromatic plants in Bitlis. *ALKÜ Fen Bilimleri Dergisi Özel Sayı, (NSP 2018)*, 183–187.

Biira, S., Ochom, P. & Oryema, B. (2021). Evaluation of radionuclide concentrations and average annual committed effective dose due to medicinal plants and soils commonly consumed by pregnant women in Osukuru, Tororo (Uganda). *Journal of Environmental Radioactivity*, *227*, 1–7.

Canbazoglu, C., Ilter, S., Sahin-Bal, S., Karatepe, S. & Dogru, M. (2018). A preliminary study on radioactivity concentrations and dose assessment of some anticarcinogenic medicinal plants used in Turkey. *Fresenius Environmental Bulletin, 27*, 793–798.

Cengiz, G.B. & Çağlar, İ. (2019). Estimation of natural radioactivity of some medicinal or herbal plants used in Kars, Turkey. *Acta Pharmaceutica Sciencia, 57*(4), 133–138.

Cengiz, G.B. & Çağlar, İ. (2022). Transfer factors of natural radionuclides from soil to medicinal plants used by local people in Eastern Anatolia, Turkey. *International Journal of Environment and Geoinformatics, 9*(2), 039–044.

Chandrashekara, K. & Somashekarappa, H. M. (2016). Estimation of radionuclides concentration and average annual committed effective dose due to ingestion for some selected medicinal plants of South India. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences, 9*(1), 68–77.

Chandrashekara, K., Karunakara, N. & Somashekarappa, H. M. (2015). Activity distribution and uptake of radionuclides in medicinal plants of coastal Karnataka, India. *Research Journal of Recent Sciences, 4*, 101–109.

Currie, L. A. (1968). Limits for qualitative detection and quantitative determination. *Analytical Chemistry, 40*(3), 586–593.

Dar, R. A., Shahnawaz, M. & Qazi, P. H. (2017). General overview of medicinal plants: A review. *The Journal of Phytopharmacology*, *6*(6), 349–351.

Demir, S. (2022). Mbellıferae Familyasına Ait Bazı Tıbbi-Aromatik Bitkilerde Kimyasal Kompozisyon, Kalıntı Analizleri ve Antimikrobiyel Aktivitenin Belirlenmesi. Doktora Tezi, *Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.* Kastamonu.

Desideri, D., Meli, M. A. & Roselli, C. (2010). Natural and artificial radioactivity determination of some medicinal plants. *Journal of Environmental Radioactivity, 101*(9), 751–756.

Duffy, S., Simon, S. L. & Whicker, F. W. (1999). 137Cs contamination of plants used for traditional medicine and implications for human exposure. *Journal of Environmental Radioactivity, 46*(1), 27–44.

EPA (Environmental Protection Agency). (1999). Cancer Risk Coefficients for Environmental Exposure to Radionuclides. Federal Guidance Report No. 13, EPA 402-R-99-001, Washington, DC.

Grdanovska, S. (2015). Characterization of radiation damage to a novel photonic crystal sensor. Doctoral thesis, *University of Maryland, Faculty of the Graduate School*. USA.

Güven, A., Cengiz G. B., Çağlar, İ., & Ateş, S. (2023). Evaluation of radioactivity levels and radiological hazards of some endemic plants used as medicine in Ankara, Turkey. *Applied Radiation and Isotopes, 200*, 1–8.

Hamza, Z. M., Alshebly, S. A. & Hussain, H. H. (2020). A practical study to determine the percentage of radiation in medicinal herbs used in the Iraqi market. *Journal of Physics: Conference Series, 1591*, 1–3.

Harb, S. R. (2015). Natural radioactivity concentrations in some medicinal plants and annual committed effective dose from their consumption. *Radiation Protection and Environment, 38*, 35–38.

Hossen, M., Haydar, M. A., Rahman, M. A., Ali, M. I., Paul, D., Asaduzzaman, K., Hossain Miah, M. & Khandaker, M. U. (2024). Committed effective dose due to the intake of medicinal plants and herbs by the Bangladeshi populace. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 1–13.

IAEA (International Atomic Energy Agency). (2016). Criteria for Radionuclide Activity Concentrations for Food and Drinking Water, TECDOC-1788, IAEA, Vienna (2016). https://wwwpub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1788_web.pdf, Erişim Tarihi: 15.05.2025.

ICRP (International Commission on Radiological Protection). (2012). International Commission on Radiological Protection Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60. ICRP Publication 119. Ann. ICRP 41(Suppl.) Published by Elsevier Ltd.

Jevremovic, M., Lazarevic, N., Pavlovic, S. & Orlic, M. (2011). Radionuclide concentrations in samples of medicinal herbs and effective dose from ingestion of 137Cs and natural radionuclides in herbal tea products from Serbian market. *Isotopes in Environmental and Health Studies, 47*(1), 87–92.

Kabir, S., Islam, M. A. & Hossen, M. B. (2024). Natural radioactivity in soils and medicinal plants of the Sundarban: Concomitant radiological risks and radionuclide transfer factor. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences, 17*(4), 1–8.

Kamislioglu, M., Eke, C., Kaman, T. & Boztosun, I. (2023). Natural and artificial radionuclide activity concentrations and dose assessments of some medicinal plants in Balikesir, Turkey. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry, 103*(20), 9062–9080.

Kandić, I., Kandić, A., Čeliković, I., Gavrilović, M. & Janaćković, P. (2020). Activity concentrations of ^{137}Cs, ^{40}K, and ^{210}Pb radionuclides in selected medicinal herbs from Central Serbia and their effective dose due to ingestion. *Science of the Total Environment, 701*, 1–7.

Kareem, A. A., Hady, H. N. & Abojassim, A. A. (2016). Measurement of natural radioactivity in selected samples of medical plants in Iraq. *International Journal of Physical Sciences, 11*(14), 178–182.

Khanal, M., Acharya, A., Maharjan, R., Upadhyay, D. R., Dhobi, S. H., Shah, B. R., Adhikari, R., Mulmi, D. D., Lamichhane, T. K. &Lamichhane, H. P. (2024). Investigation of naturally occurring radionuclides in selected medicinal plants and associated soils, and calculation of soil-to-plant transfer factors. *Journal of Environmental Radioactivity, 280*, 1–5.

Kim, G. (2011). Measurement and application of radium and radon in the environment. *Journal of Analytical Science and Technology 2* (Suppl A), A115-A119ç

Kırıs, E. (2022). Radioactivity levels and radiation health hazards in medicinal plants used in Rize Province, Turkey. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry, 102*(12), 2865–2878.

Knoll G.F. (2000). *Radiation detection and measurements*. 3rd ed., New York: John Wiley & Sons.

Kolapo, A. A. & Omoboyede, J. O. (2018). Health risk assessment of natural radionuclide and heavy metals in commonly consumed medicinal plants in southwest Nigeria. *IFE Journal of Science, 20*(3), 529–537,

Kovács, T., Horvath, M., Toth-Bodrogi, E. & Somlai, J. (2015). ^{210}Po, ^{210}Pb, ^{226}Ra, ^{232}Th, ^{40}K and ^{137}Cs concentration of medicinal herbs. *Radiation Emergency Medicine, 4*(2), 40–44.

Krane, K.S. (1987). Introductory nuclear physics. 2nd ed., New York: John Willey & Sons.

Kranrod, C., Chanyotha, S., Kritsananuwat, S., Ploykrathok, T., Pengvanich, P., Tumnoi, Y., Thumvijit, T. & Sriburee, S. (2019). Natural radioactivity concentration in traditional Thai herbal medicine. *IOP Conference Series: Journal of Physics: Conference Series, 1285*, 1–10

Monica, S., Jojo, P.J. & Khandaker, M. U. (2020). Radionuclide concentrations in medicinal florae and committed effective dose through Ayurvedic medicines. *International Journal of Radiation Biology, 96*(8), 1028–1037.

Najam, L. A., Tafiq, N. F. & Kitah, F. H. (2015). Estimation of natural radioactivity of some medicinal or herbal plants used in Iraq. *Detection, 3*, 1–7.

Narayana, Y. & Prakash, V. (2007). Radioactivity in ayurvedic medicinal plants. *International Journal of Low Radiation, 4*(3), 184–188.

Njinga, R. L., Jonah, S. A. & Gomina, M. (2015). Preliminary investigation of naturally occurring radionuclides in some traditional medicinal plants used in Nigeria. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences, 8*(2), 208-215.

Okoor, S. A. K., Abumurad, K. M., Ababneh, E. M., Abdallah, M. J. & Tawalbeh, A. A. (2019). Natural radioactivity concentrations and dose assessment in selected medicinal plants consumed in Jordan. *Fresenius Environmental Bulletin, 28*, 5179–5187.

Oni, O. M., Isola, G. A., Oni, F. G. & Sowole, O. (2011). Natural activity concentrations and assessment of radiological dose equivalents in medicinal plants around oil and gas facilities in Ughelli and environs, Nigeria. *Environment and Natural Resources Research, 1*(1), 201–206.

Oprea, E., Pintilie, V., Bufnea, V., Aprotosoaie, A. C., Cioancă, O., Trifan, A. & Hăncianu, M. (2014). Radionuclides content in some medicinal plants commonly used in Romania. *Farmacia, 62*(4), 658–663.

Oufni, L., Manaut, N., Taj, S. & Manaut, B. (2013). Determination of radon and thoron concentrations in different parts of some plants used in traditional medicine using nuclear track detectors. *American Journal of Environmental Protection, 1*(2), 34–40.

Pakdemirli, B., Birişik, N. & Akay, M. (2021). General overview of medicinal and aromatic plants in Turkey. *Journal of Aegean Agricultural Research Institute, 31*(1), 126–135.

Parmaksız, A. & Ağuş, Y. (2014). Activity concentrations of 226Ra, 232Th, 40K and 137Cs radionuclides in Turkish medicinal herbs, their ingestion doses and cancer risks. *Radiation Effects and Defects in Solids, 169*(11), 980–988.

Popoola, F. A., Isola, O. B., Fakeye, O. D., Owolabi, T. A., Sanyaolu, M. E., Owoyemi, S. I. & Elijah, I. O. (2024). Examination of medicinal plants for radionuclide absorption and their health Implications. *Pollution 10*(2), 700–711.

Pourimani, R., Noori, M. & Madadi, M. (2015). Radioactivity concentrations in eight medicinal and edible plant species from Shazand, Iran. *International Journal of Ecosystem, 5*(1), 22–29.

R Core Team, (2023). A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. https://www.R-project.org/, Erişim Tarihi: 10.04.2025.

Saenboonruang, K., Phonchanthuek, E. & Prasandee, K. (2018). Soil-to-plant transfer factors of natural radionuclides (^{226}Ra and ^{40}K) in selected Thai medicinal plants. *Journal of Environmental Radioactivity, 184*, 1–5

Salaman, I. & Haban, M. (2004). The Radioactivity Evaluation of Selected Species of Medicinal Plants. *Acta Fytotecnica and Zootecnica, 4*, 103–106.

Saudi, H. A., Abedelkader, H.T., Issa, S. A. M., Diab, H. M., Alharshan, G. A., Uosif, M. A. M., Bashter, I. I., Ene, A., Ghazaly, M. E. & Zakaly, H. M. H. (2022). An in-depth examination of the natural radiation and radioactive dangers associated with regularly used medicinal herbs. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 19*(13), 1–19.

Shuaibu, H. K., Kankara, U. M., Muhammad, A. N., Gusau, M. B., Garba, N. N., Kolo, M. T. & Khandaker, M. U. (2025). Natural radioactivity and radiological risks in some medicinal plants consumed in northern Nigeria. *Radiation Physics and Chemistry, 234*, 1–9.

Shuaibu, H. K., Mohamed, F., Khandaker, M. U., Ismail, A. F. & Osman, H. (2024). Estimation of the concurrent radiological dosage to humans due to the transfer of ^{226}Ra, ^{228}Ra, and ^{40}K from soil-to-Malaysian traditional medicinal plants. *Radiation Physics and Chemistry. 223*, 1–12.

Shuaibu, H. K., Mohamed, F., Khandaker, M. U., Ismail, A. Z. & Omar, R. S. (2023). Radioactivity and concomitant radiation dose from Malaysian herbal plants. *Radiation Physics and Chemistry. 211*, 1–10.

Stoulo, S., Manolopoulou, M. & Papastefanou, C. (2003). Assessment of natural radiation exposure and radon exhalation from building materials in Greece. *Journal of Environmental Radioactivity, 69*(3), 225–240.

Sultan, D. A. O. (2025). Türkiye'de tüketilen alkolsüz gazlı ve fonksiyonel içeceklerdeki radyotoksik elementlerin belirlenmesi ve radyolojik sağlık risklerin değerlendirilmesi. Doktora Tezi, *Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.* Kastamonu.

Sultana, S., Ferdous, J. & Haque, M. M. (2020). Natural radioactivity and hazards assessment in medicinal plants in Bangladesh. *Journal of Health Science, 10*(1), 20–27

Sussa F. V., Damatto, S. R., Alencar, M. M., Mazzilli, B. P. & Silva, P. S. (2013). Natural radioactivity determination in samples of Peperomia pellucida commonly used as a medicinal herb. *Journal of Environmental Radioactivity, 116*, 148–151.

Sussa, F., Silva, P., Damatto, S., Favaro, D. & Mazzilli, B. (2009). Radioactive and stable elements'concentration in medicinal plants from Brazil. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 281*(2), 165–170.

Tettey-Larbi, L., Darko, E. O., Schandorf, C. & Appiah, A. A. (2013). Natural radioactivity levels of some medicinal plants commonly used in Ghana. *Springer Plus.*, 2(1), 1–9.

Turhan, Ş., Kurnaz, A., Altuner, E. M. & Topaç, A. (2025). Radiological quality of packaged natural spring waters sold in Türkiye and radiological health risk assessment. *Journal of Food Composition and Analysis, 146*, 1–10.

Türkekul, B. & Yıldız, Ö. (2021). Medıcınal and aromatıc plants productıon, marketıng and foreıgn trade. In S. Ekren (Eds.), *Medicinal and aromatic plants: economics production agricultural ultilization and other aspects* (pp. 3-43). Iksad.

UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation). (2000). Sources and effects of ionizing radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. *United Nations Publication*, New York, USA, 2000.

WHO (World Health Organization). (2019). WHO global report on traditional and complementary medicine 2019. WHO Library Cataloguing-in-Publication Data NLM classification: WA 675, Geneva.

WHO (World Health Organization). (2022). Guidelines for drinking-water quality, Fourth edition incorporating the first and second addenda, WHO Library Cataloguing-in-Publication Data NLM classification: WA 675, Geneva.

Zamani, S., Fathi, M., Ebadi, M.T. & Máthé, Á. (2025). Global trade of medicinal and aromatic plants. A review. *Journal of Agriculture and Food Research, 21*, 1–21.

Živković, M. P., Zlatić, N. M., Krstić, D. Z. & Stanković, M. S. (2021). Health risk assessment of natural and artificial radionuclides ın medicinal plants. *Kragujevac J. Sci*. 43, 15–22.