

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



TÜRKİYE’DE TÜKETİLEN ŞİŞELENMİŞ KAYNAK
SULARININ İÇERDİĞİ DOĞAL RADYOAKTİVİTEDEN
KAYNAKLANAN RADYOLOJİK SAĞLIK RİSKİNİN
DEĞERLENDİRİLMESİ

AYŞE TOPAÇ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

PROF. DR. ŞEREF TURHAN

HAZİRAN - 2025

KASTAMONU

TEZ ONAYI

Ayşe TOPAÇ tarafından hazırlanan “TÜRKİYE’DE TÜKETİLEN ŞİŞELENMİŞ KAYNAK SULARININ İÇERDİĞİ DOĞAL RADYOAKTİVİTEDEN KAYNAKLANAN RADYOLOJİK SAĞLIK RİSKİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ” adlı tez çalışmasının savunma sınavı **25.06.2025** tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği ile Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Fizik Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Danışman	Prof. Dr. Şeref TURHAN Kastamonu Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Prof. Dr. Sebahaddin ALPTEKİN Çankırı Karatekin Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Prof. Dr. Aslı KURNAZ Kastamonu Üniversitesi	

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

Enstitü Müdürü	Doç. Dr. Selçuk MEMİŞ	
----------------	-----------------------	-------

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.

Ayşe TOPAÇ

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TÜRKİYE’DE TÜKETİLEN ŞİŞELENMİŞ KAYNAK SULARININ İÇERDİĞİ DOĞAL RADYOAKTİVİTEDEN KAYNAKLANAN RADYOLOJİK SAĞLIK RİSKİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

AYŞE TOPAÇ

KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANA BİLİM DALI

DANIŞMAN: PROF. DR. ŞEREF TURHAN

İçme suyunun kalitesi, fiziksel, kimyasal, mikrobiyal ve radyolojik yönleriyle insan sağlığı açısından büyük önem taşımakta ve musluk veya ambalajlı su tercihlerinde önemli rol oynamaktadır. Türkiye’de tüketilen ambalajlı doğal kaynak suyunun ana kaynağını, sondaj kuyuları ile akiferlerden elde edilen yer altı suları oluşturmaktadır. Bu suların radyolojik kalitesi, akifer kayaçlarından gelen suda çözünmüş doğal radyonüklitlerin derişimi ile belirlenmektedir. Bu çalışma, Türkiye’de ticari olarak satılan ambalajlı doğal kaynak suyu markalarına ilişkin ilk ayrıntılı radyolojik verileri sunmaktadır. Seksen iki ambalajlı doğal kaynak suyu markasının içerdiği radyolojik olarak önemli radyum izotoplarının (^{226}Ra ve ^{228}Ra) ve potasyum (^{40}K) radyoizotopunun aktivite derişimleri, bir gama ışını spektroskopisi ile ölçüldü. İncelenen ambalajlı doğal kaynak suyu örneklerinin tüketilmesinin neden olduğu radyolojik risk, yetişkinler için yıllık etkin radyasyon dozu ve buna karşılık gelen yaşam boyu kanser riski tahmin edilerek değerlendirildi. Su örneklerinde ölçülen ^{228}Ra ’nın aktivite derişimleri, Dünya Sağlık Örgütü tarafından tavsiye edilen 0,1 Bq/L’lik kılavuz düzeyin üzerinde ve ^{226}Ra ’nın aktivite derişimleri ise 1 Bq/L’lik kılavuz düzeyin altında bulundu. Bununla birlikte, radyolojik risk değerlendirmesi, Türkiye’de yıllık olarak 130 L ambalajlı doğal kaynak suyu tüketilmesinin, insan sağlığı için önemli bir risk oluşturmadığını ortaya koymaktadır.

ANAHTAR KELİMELE: Ambalajlı Doğal Kaynak Suyu, Radyoaktivite, Radyum İzotopları, Gama Işını Spektroskopisi, Yıllık Etkin Radyasyon Dozu, Radyolojik Risk

Haziran 2025, 50 Sayfa

ABSTRACT

MSC THESIS

ASSESSMENT OF RADIOLOGICAL HEALTH RISK CAUSED BY NATURAL RADIOACTIVITY IN BOTTLED SPRING WATER CONSUMED IN TÜRKİYE

AYŞE TOPAÇ

KASTAMONU UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

DEPARTMENT OF PHYSICS

SUPERVISOR: PROF. DR. ŞEREF TURHAN

The quality of drinking water is of great importance for human health with its physical, chemical, microbial and radiological aspects and plays an important role in the preference of tap or packaged water. The main source of packaged natural spring water consumed in Türkiye is groundwater obtained from drilling wells and aquifers. The radiological quality of these waters is determined by the concentration of natural radionuclides dissolved in water coming from aquifer rocks. This study presents the first detailed radiological data on packaged natural spring water brands sold commercially in Türkiye. The activity concentrations of radiologically important radium isotopes (^{226}Ra and ^{228}Ra) and potassium radioisotope (^{40}K) contained in eighty-two packaged natural spring water brands were measured by gamma-ray spectroscopy. The radiological risk caused by the consumption of the examined packaged natural spring water samples was evaluated for adults by estimating the annual effective radiation dose and the corresponding lifetime cancer risk. The activity concentrations of ^{228}Ra measured in the water samples were found to be above the guideline level of 0.1 Bq/L and the activity concentrations of ^{226}Ra were below the guideline level of 1 Bq/L recommended by the World Health Organization. However, radiological risk assessment reveals that the annual consumption of 130 L of packaged natural spring water in Türkiye does not pose a significant risk to human health.

KEYWORDS: Packaged Natural Spring Water, Radioactivity, Radium Isotopes, Gamma Ray Spectroscopy, Annual Effective Radiation Dose, Radiological Risk

June 2025, 50 Pages

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca bilgi ve tecrübelerinden istifade ettiğim, her zaman hoşgörü ve sabırla yardım ve desteğini esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. Şeref TURHAN'a en kalbi duygularıyla müteşekkirdiğimi içtenlikle ifade ederim.

Ambalajlı doğal kaynak suyu örneklerinin Türkiye genelinde toplanmasını sağlayan Erol AYDIN'a ve örneklerin radyoaktivite ölçümleri konusunda yardımcı olan Fizik Bölümü Öğretim Üyesi Prof. Dr. Aslı KURNAZ'a içtenlikle teşekkür ederim.

Tez kapsamında yapılan bu çalışma, Kastamonu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından KÜBAP-01/2022-06 kodlu proje ile desteklenmiştir. Bu bağlamda, BAP Koordinatörlüğüne teşekkür ederim.

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

Bu çalışmayı, benim için çok kıymetli olan canım annem, babam ve aileme ithaf ediyorum.

AYŞE TOPAÇ

Kastamonu, 2025

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEZ ONAYI	ii
TAAHHÜTNAME	iii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
TABLolar DİZİNİ	ix
GRAFİKLER DİZİNİ	x
HARİTALAR DİZİNİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 İçme Suyunun Radyolojik Kalitesi	3
1.2 Literatür Değerlendirmesi	5
1.3 Tezin Kapsamı	10
1.4 Tezin Hedef ve Amacı	11
1.5 Tezin Yapısı	12
2. ÇALIŞMA İLE İLGİLİ TEORİK BİLGİ.....	13
2.1 Radyasyon ve Radyasyonun Madde ile Etkileşimi.....	13
2.2 İyonlaştırıcı Radyasyon Birimleri ve Biyolojik Etkileri.....	14
2.3 İyonlaştırıcı Radyasyon Kaynakları.....	17
2.4 Radyoaktivite	18
2.5 Radyoaktif Bozunum Süreçleri.....	19
2.6 Radyoaktivite Ölçme Yöntemleri ve Gama-ışını Spektroskopisi.....	20
3. MALZEME VE YÖNTEM	26
3.1 Örneklerin Toplanması ve Analiz İşlemi için Hazırlanması.....	26
3.2 Su Örneklerinin Radyoaktivite Analizi.....	26
3.3 Radyolojik Risk Değerlendirmesi.....	30
3.4 Uzaysal Dağılım Analizi.....	31
4. BULGULAR, TARTIŞMA, SONUÇ ve ÖNERİLER.....	32
4.1 Aktivite Derişim Bulguları	32
4.2 Radyum İzotoplarının Bölgesel Dağılımları	36
4.3 Radyolojik Risk Değerlendirme Bulguları	40
4.4 Sonuç ve Öneriler	43
KAYNAKLAR	45
ÖZGEÇMİŞ.....	50

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1 Bir gama-ışını spektroskopisinin şematik gösterimi.....	23
Şekil 2.2 Gama-ışının dedektör kristali ile etkileşmesi ve fotopik oluşumu.....	24



TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 3.1 HPGe dedektörünün özellikleri	28
Tablo 4.1 Ambalajlı doğal kaynak su örneklerindeki radyonüklit derişimleri ile ilgili istatistiki bilgi	32
Tablo 4.2 Farklı ülkelerde tüketilen ambalajlı içme sularındaki radyum izotoplarının aktivite derişimlerinin karşılaştırılması	35
Tablo 4.3 Karadeniz, Ege ve İç Anadolu Bölgelerinden temin edilen su örneklerindeki radyum izotop dağılımı	37
Tablo 4.4 Marmara Bölgesinden temin edilen su örneklerindeki radyum izotop dağılımı	38
Tablo 4.5 Akdeniz, Doğu ve Güneydoğu Bölgelerinden temin edilen su örneklerindeki radyum izotop dağılımı	39
Tablo 4.6 Senaryolara göre radyum izotoplarının sindirilmesinden kaynaklanan yıllık etkin radyasyon değerleri	42
Tablo 4.7 Senaryolara göre radyum izotoplarının sindirilmesinden kaynaklanan yaşam boyu kanser riski değerleri	42

GRAFİKLER DİZİNİ

Sayfa

Grafik 2.1 Foton etkileşmesinin bağıl önemi	22
Grafik 4.1 Su örneklerinde analiz edilen radyum izotoplarının frekans dağılımı.....	33
Grafik 4.2 Radyum izotoplarının ortalama aktivite derişimleri ile DSÖ'nün tavsiye etiğı rehber seviyelerin karşılaştırılması	34
Grafik 4.3 Radyum izotoplarının ortalama aktivite derişimleri ile USEPA'nın tavsiye etiğı azami kontaminasyon seviyesinin karşılaştırılması.....	34
Grafik 4.4 Coğrafi bölgelerdeki radyum izotoplarının ortalama aktivite derişimleri ile DSÖ kılavuz seviyelerin karşılaştırılması.....	40
Grafik 4.5 Coğrafi bölgelerdeki radyum izotoplarının ortalama aktivite derişimleri ile DSÖ kılavuz seviyelerin karşılaştırılması.....	40

HARİTALAR DİZİNİ

Sayfa

Harita 3.1 Ambalajlı doğal kaynak suyu örneklerinin temin edildiği yerlerin haritası	27
Harita 4.1 Birinci senaryo için hesaplanan toplam kanser risk değerlerinin mekânsal dağılımı	43



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

A	: Aktivite
²⁴¹Am	: Amerikyum-241
Bq	: Becquerel (Bekerel)
²¹⁴Bi	: Bizmut-214
C	: Coulomb
Ci	: Curie
¹³⁴Cs	: Sezyum-134
¹³⁷Cs	: Sezyum-137
d	: Day (Gün)
D	: Doz
eyb	: Elektrostatik yük birimi
eV	: Elektron volt
⁶⁷Ga	: Galyum-67
Gy	: Gray
³H	: Tritiyum
¹³¹I	: Iyot-131
¹¹¹In	: İndiyum-111
¹⁹²Ir	: İridyum-192
J	: Joule
⁴⁰K	: Potasyum-40
kg	: Kilogram (10 ³ g)
keV	: Kiloelektron volt
L	: Litre
¹³⁸La	: Lantan-138
¹⁷⁶Lu	: Luteryum-176
MeV	: Milyon elektron volt
min	: Minute (Dakika)
mL	: Mililitre (10 ⁻³ L)
mBq	: Milibekerel (10 ⁻³ Bq)
mSv	: Milisievert (10 ⁻³ Sv)
μBq	: Mikrobekerel (10 ⁻⁶ Bq)
μSv	: Mikrosievert (10 ⁻⁶ Sv)
N	: Çekirdek sayısı
³²P	: Fosfor-32
²¹⁰Pb	: Kurşun-210
²¹⁴Pb	: Kurşun-214
¹⁴⁷Pm	: Prometyum-147
²¹⁴Po	: Polonyum-214
²¹⁸Po	: Polonyum-218
²³⁸Pu	: Plütonyum-238
²³⁹Pu	: Plütonyum-239
R	: Röntgen
rem	: Röntgen equivalent man

rad	: Radiation absorbed dose
⁸⁷Rb	: Rubidyum
²²⁶Ra	: Radyum-226
²¹⁹Rn	: Aktinon
²²⁰Rn	: Toron
²²²Rn	: Radon
s	: Saniye
¹⁴⁷Sm	: Samaryum-147
⁸⁹Sr	: Strontium-89
⁹⁰Sr	: Strontium-90
Sv	: Sievert
T_{1/2}	: Yarılanma süresi veya Yarılanma Ömrü
^{99m}Tc	: Teknesyum-99m
²³²Th	: Toryum-232
²⁰¹Tl	: Talyum-201
t	: zaman
²³⁵U	: Uranyum-235
²³⁸U	: Uranyum-238
y	: Yıl
Z	: Atom numarası
λ	: Bozunma sabiti
α	: Alfa parçacığı
β	: Beta parçacığı
γ	: Gama ışını

Kısaltmalar

AB	: Akdeniz Bölgesi
AİE	: Atom İyonlaşma Enerjisi
AK	: Avrupa Konseyi
BBE	: Bağlı Biyolojik Etki
BDW	: Şişelenmiş İçme Suyu
BMW	: Şişelenmiş Maden Suyu
BNSW	: Şişelenmiş Doğal Kaynak Suyu
BSW	: Şişelenmiş Kaynak Suyu
DAB	: Doğu Anadolu Bölgesi
DSÖ	: Dünya Sağlık Örgütü
EB	: Ege Bölgesi
GAB	: Güneydoğu Anadolu Bölgesi
HPGe	: High Purity Germanium
IARC	: International Agency for Research on Cancer
ICRP	: International Commission on Radiological Protection
İAB	: İç Anadolu Bölgesi
KB	: Karadeniz Bölgesi
KF	: Kalite Faktörü
MB	: Marmara Bölgesi
ÖEA	: Ölçülebilir En düşük Aktivite
PET	: Polietilen tereftalat
PNSW	: Ambalajlı Doğal Kaynak Suyu
TGD	: Toplam Gösterge 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

1. GİRİŞ

Su, canlıların yaşamı için elzemdir. Su, yaşam için olmazsa olmazdır. İlkel türler okyanuslardan karaya yaşamaya başladığından beri hayatta kalmanın en önemli anahtarı, dehidrasyonun (susuz kalmanın) önlenmesi olmuştur (Popkin vd., 2010). İçme suyu, vücudun düzgün çalışabilmesi ve hayatta kalabilmesi için gerekli olan tüm fiziksel sistemlerde denge (hemostaz) unsurudur (Popkin vd., 2010). İçme suyu, yiyecekleri sindirmek ve besinleri emilmesini sağlamak, vücudumuzu iyi hareket ettirmek, atık ürünlerden kurtulmak ve vücudumuzu doğru sıcaklıkta tutmak için gereklidir (Petraccia vd., 2006). Dolayısıyla insanlar, su olmadan yaşamlarını sürdüremezler. Bebeklerde vücut ağırlığının %75'i ve yaşlılarda ise %55'i sudan oluşmaktadır (Popkin vd., 2010). Sağlıklı bir yaşam için günlük su gereksinimi; yaşa, sağlık durumuna, iklime ve fiziksel aktiviteye bağlı olarak 1 L ila 2 L arasında değişiklik göstermektedir (García vd., 2021). Bu yüzden güvenli içme suyuna erişimin sağlanması, olmazsa olmaz temel insan hakkıdır ve sağlık koruma için etkili bir politikanın ana bileşenidir (WHO, 2022).

Su; sıvı, gaz ve katı olmak üzere üç farklı hâlde bulunan kimyasal bir bileşiktir. Su, standart ortam basıncı ve sıcaklığında sıvıdır, ancak dünyada genellikle hem katı hem de sıvı hâlde bulunur. Okyanuslar, göller, akarsular, kutup, yer altı suyu ve dağ buzulları, toprak nemi ve atmosferdeki buhar dâhil olmak dünyanın yüzeyinde, altında ve üzerinde mevcut bulunan tüm suyun toplamı dünyanın yaklaşık %71'ini temsi eden su küreyi (hidrosferi) oluşturur. Ancak bol miktarda olan bu su kütesinin %97,5'i tuzludur ve sadece %2,5'i tatlı sudur. Tatlı suyun önemli bir miktarı (%69,8), kalıcı dağ buzulu, kar örtüsü, toprak nemi ve bataklıklar vb. olarak sıkışmış durumdadır (Saba, 2024). Tatlı suyun, yaklaşık %29,9'u, yer altı suyu olarak bulunur ve bunun yaklaşık %50'si, 800 metrelik ekonomik olmayan bir pompalama derinliğindedir (Saba, 2024). Bu nedenle, yağış ve sonucunda oluşan akışın meydana getirdiği küresel yenilenebilir tatlı su, mevcut tatlı suyun sadece %0,3'ü veya her yıl neredeyse yeniden doldurulan küresel suyun %0,02'sini oluşturmaktadır (Saba, 2024).

İnsani tüketim amaçlı sular, genellikle iki ana doğal kaynaktan elde edilmektedir: Yüzey suları (tatlı su gölleri, göletler, nehirler, akarsular vb.) ve yer altı suları (su kuyuları, sondaj sular, akiferler vb.) (Aydın, 2023). İllerde insani tüketim amaçlı kullanılan musluk veya şebeke suları, genellikle akarsular veya nehirler üzerine kurulan barajlardan veya göletlerden ve diğer yüzey sularından temin edilmektedir (Aydın, 2023). Ancak tahmini hesaplamalara göre dünya nüfusunun yaklaşık üçte biri, içme sularını yer altı su kaynaklarından sağlamaktadır (Aydın, 2023). Son yıllarda, daha kaliteli, daha güvenli, daha sağlıklı, daha lezzetli olması ve suyla ilgili hastalıkların farkında olunması nedeniyle tüketicilerin günlük su tüketimlerinde musluk suyunu, ticari olarak ambalajlı içme suyu ile değiştirme eğilimi görülmektedir (Altıkulaç vd., 2022; Asaduzzaman vd., 2016; Pourfadakari vd., 2022; Semerjian vd., 2020; Turhan vd., 2023). Ambalajlı sular, dünya çapında özellikle Avrupa ülkelerinde önemli bir içme suyu kaynağı olarak kabul edilmektedir (Aydın, 2023; Pourfadakari vd., 2022; Rožmarić vd., 2012; Semerjian vd., 2020). Bu nedenle ambalajlı içme suyu endüstrisi, dünya genelinde hızla gelişen bir pazar, günlük hayatın önemli bir parçası ve dünyanın en uzak köşelerinde bile önemli bir meta hâline gelmiştir. Ambalajlı su terimi, tek bir ürünü ifade etmez ve ülkelere bağlı olarak farklı ürünleri nitelemek için aynı tanımlama kullanılabilir. Ambalajlı sular, su soğutucuları için boyutları küçültülmüş poşetlerden büyük damacanalara kadar değişebilen plastik ambalajlarda veya şişelerde tüketiciye sunulan içme sularıdır. Dolayısıyla bu sular; çeşitli hacim, boyut ve şekillerde poşetler, bardaklar ve şişeler gibi tek kullanımlık ambalajlar ile döngüsel bir işlemle yeniden doldurulabilen ve tüketilebilen damacanalara gibi daha büyük ambalajları içerir. Genelde, ambalajlı su türü tanımlanabilir: Doğal mineralli su, ambalajlı doğal kaynak suyu ve arıtılmış su. Ambalajlı kaynak suyu, yer altı suyudur, kirlilik tehlikelerine karşı korunmuştur, mikrobiyolojik olarak güvenlidir, havalandırma gibi yetkilendirilmiş olanlar hariç herhangi bir ek işleme tabi tutulmadan insan tüketimine uygundur. Ambalajlı kaynak suyu, içme suyuna uygulanan aynı standartlara uyması gerektiği için doğal mineralli sudan farklıdır. Sabit bir mineral bileşimine sahip olması gerekmez. Bu tür suyun tüketimi, genellikle doğal mineralli sudan daha ucuz olduğu için artmaktadır. Türkiye'deki ambalajlı kaynak su endüstrisi, 2023 yılında yıllık yaklaşık 10,8 milyar litreye ulaştı ve pazar hacminin 2024 yılına kadar yaklaşık 11,1 milyar litreye ulaşması beklenmektedir (SUDER, 2024). Türkiye'de kişi başına düşen yıllık ortalama ambalajlı kaynak su tüketimi, 2018

yılında 150 L iken, pandemi ve ekonomik durgunluk nedeniyle 2024 yılında, 130 L olması beklenmektedir (SUDER, 2024). Türkiye'de satılan tüm ambalajlı kaynak sularının yaklaşık %78'i, ambalajlı doğal kaynak suyudur (Seid vd., 2022). İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelikte, doğal kaynak suyu, jeolojik şartlara uygun jeolojik birimlerde doğal olarak oluşan, bir veya birden fazla çıkış noktasından kendiliğinden çıkan veya teknik yöntemlerle çıkarılan, ambalajlanarak piyasaya sunulan ve satılan yer altı suyu olarak tanımlanmaktadır (RG, 2005). Dolayısıyla, her ambalajlı doğal kaynak suyu markasının kendine özgü bir tadı, kendine özgü bir dizi özelliği ve suyun çıkarıldığı bölgedeki jeolojik koşullardan kaynaklanan belirli bir mineral bileşimi vardır.

1.1 İçme Suyunun Radyolojik Kalitesi

Son yıllarda nüfus, kentleşme, teknolojik, ticari, endüstriyel ve tarımsal faaliyetler ile doğa olaylarının hızla artmasının su kaynaklarının kirlenmesine, azalmasına ve bozulmasına neden olduğu bilinen bir gerçektir (Lin vd., 2022; Salam ve Sultana, 2022). Kirlilik ve içme suyu kalitesinin bozulmasıyla ilişkili hastalıklar, insan sağlığı üzerinde büyük bir yük oluşturmaktadır (WHO, 2022). Bu nedenle temiz, güvenli ve kaliteli içme suyuna (ambalajlı su, musluk veya kamuya açık su vb.) erişim, insan sağlığının korunmasına yönelik etkili bir politikanın ana bileşenlerinden biridir (WHO, 2022). İçme suyu kalitesiyle ilgili düzenlemelerin veya standartların amacı, tüketicilerin güvenli, yeterli ve sürdürülebilir içme suyuna erişimini sağlamaktır (WHO, 2022). Suyun fiziko-kimyasal, mikrobiyolojik ve radyolojik özellikleriyle ilişkili olan içme suyu kalitesi, insan tüketimine yönelik suyun güvenliği açısından en önemli özelliğidir ve aynı zamanda insanların içme suyu tüketim tercihlerini etkileyen önemli bir faktördür (Ćirić vd., 2018; WHO, 2022). Tez kapsamında yapılan çalışmada, içme suyu olarak kullanılan ambalajlı doğal kaynak suyu örneklerinin radyolojik kalitesi araştırıldı.

Yüzey veya yer altı su kaynaklarından sağlanan içme suyunda herhangi bir biyolojik veya mikrobiyolojik ve kimyasal kirleticinin bulunmaması, içme sularının kanser gibi yaşamı tehdit eden sağlık riskleri oluşturabilecek doğal radyonüklitler içerebilmesi nedeniyle suyun iyi kalitede ve güvenli olduğuna ikna edici olmayabilir (Dekhissi vd.,

2024; WHO, 2022). Çünkü içme suyu, insan sağlığını tehdit edebilecek radyoaktif maddeler barındırabilir. Bu tehdit, içme sularının içerebileceği mikroorganizmalar ve kimyasallardan kaynaklanan tehditler ile karşılaştırıldığında genellikle küçüktür (WHO, 2022). Aşırı durumlar hariç, içme suyundaki radyonüklitlerin sindirilmesinden kaynaklanan radyasyon dozu, diğer radyasyon kaynaklarından alınan dozdan çok daha düşüktür (WHO, 2022). İçme sularının radyolojik kalitesi, içerdiği radyonüklitlere ve bunların aktivite derişimleri ile ilgilidir. Özellikle yer altı suyu, çeşitli kayaçların arasından akar ve doğal uranyum (^{238}U) ve toryum (^{232}Th) radyoaktif serisindeki bazı radyonüklitleri ve radyoaktif potasyumu (^{40}K) çözer ve yer altı kuyularında ve kaynaklarında biriken bu radyonüklitlerin önemli miktarlarını içerebilir (Dekhissi vd., 2024). Toprak veya kumla temas ettiğinde yer altı suyunda kolayca çözünen uzun ömürlü radyum izotopları (^{238}U serisinde ^{230}Th 'nin alfa- bozunmasıyla oluşan ^{226}Ra , $T_{1/2}$: 1600 y ve ^{232}Th 'nin alfa bozunmasıyla oluşan ^{228}Ra , $T_{1/2}$: 5,75 y), radyolojik olarak en önemli izotoplardır (Asaduzzaman vd., 2016; Brugge ve Buchner, 2012; Fonollosa vd., 2016; Kiro vd., 2015; Mangeret vd., 2020; Tomita vd., 2014; Zhou vd., 2019). Bu radyoizotopların yer altı sularındaki derişimleri ve dağılımları, akifer katılarının jeokimyasal özellikleri ve kaya veya toprağın yerel jeolojisi vb. gibi birçok parametreye bağlıdır (Asaduzzaman vd., 2016). ^{226}Ra (alfa radyasyon yayıcısı) ve ^{228}Ra (beta-radyasyon yayıcısı), içme suyu tüketimi nedeniyle sindirim sistemi yoluyla vücuda alınır ve kimyasal olarak kalsiyuma benzediklerinden ağırlıklı olarak kemiklerde ve yumuşak doku sarkomunda birikir. Bu nedenle, uzun yıllar boyunca radyum izotoplarına maruz kalmak kemik ve akciğer kanseri riskini artırabilir (Altıkulaç vd., 2022; Asaduzzaman vd., 2016; Brugge ve Buchner, 2012; Dekhissi vd., 2024; Kitto vd., 2005; Mangeret vd., 2020; Zhou vd., 2019). İçme suyunun içerdiği doğal radyoaktivite nedeniyle, içme suyunun radyolojik kalitesi konusunda duyulan büyük endişe, su kalitesiyle ilgili olarak tüketici güvenliğini güçlendirmeyi amaçlayan radyonüklit derişimleri ve radyasyon dozu ile ilgili radyolojik parametrelerin revize edilmesine ve yeniden düzenlenmesine yol açmıştır (Jia vd., 2009; Zhou vd., 2019). Bu bağlamda, Türkiye'deki içme suyu yönetmeliğinde (RG, 2005) ve Avrupa Birliği'nin insan tüketimine yönelik suya ilişkin direktifinde (EC, 1998), içme suyu tüketiminden alınan radyasyon dozunu sınırlamak için toplam gösterge dozu değerinin 0,1 mSv/y olması önerilmektedir. Bu gösterge dozu, Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ) (WHO, 2022) tarafından içme suyundan radyonüklit alımına ilişkin önerdiği bireysel

doz ölçütü (kriteri) ile örtüşmektedir. İçme suyu tüketiminden radyum izotopu alımını önlemek için, Birleşik Devletler Çevre Koruma Ajansı (USEPA), içme suyundaki $^{226+228}\text{Ra}$ (birleşik radyum) derişimi için azami kirletici seviyesini 0,185 Bq/L olarak önermiştir (USEPA, 2012). Hâlbuki DSÖ, radyum izotoplarının kılavuz seviyesi olarak ^{226}Ra için 1 Bq/L ve ^{228}Ra için 0,1 Bq/L önermiştir (WHO, 2022). Ancak, kılavuz seviyeler, içme suyu tüketim için güvenli olmadığı bir sınır olarak yorumlanmamalıdır (WHO, 2022). Bu değerler, optimizasyon ilkesini uygulamaya koymak için yararlı operasyonel araçlardır ve bu nedenle, her ülke, mevcut kaynakları ve radyolojik risk potansiyelini hesaba katarak içme suyunun radyonüklit bulaşıklığını veya kirliliğini izlemek için kriterler geliştirmelidir (WHO, 2022). Bu nedenle, radyonüklitlerin aktivite derişimlerinin belirlenmesi, içme suyu kaynaklarının radyolojik kalitesini izlemek ve bu suların tüketiminin neden olduğu olumsuz sağlık etkilerini değerlendirmek için çok önemlidir.

1.2 Literatür Değerlendirmesi

Bugüne kadar içme sularının radyolojik kalitesi üzerine yapılan araştırmalar giderek artan bir ilgiyle devam etmiştir. Son yıllarda Türkiye ve diğer ülkelerde tüketilen çeşitli içme sularındaki radyonüklit derişimlerinin ölçümü konusunda farklı spektrometrik teknikler (gama spektrometrisi, alfa spektrometrisi, sıvı sintilasyon vb.) kullanılarak çok sayıda çalışma yürütülmüştür. Bu kısımda, literatürde son on yılda doğal kaynak sularının veya ambalajlı içme sularının radyolojik kalitesi hakkına yapılan çalışmalar, kronolojik olarak ele alındı ve özetlendi.

Fonollosa vd. (2016) tarafından gerçekleştiren araştırmada, Katalonya (İspanya)'dan toplanan ve içme suyu olarak tüketilen doğal kaynak sularındaki radon seviyeleri, sıvı sintilasyon sayacı ile ölçülmüş ve su örneklerin büyük bir kısmında ölçülen ^{222}Rn 'nin aktivite derişiminin, 100 Bq/L'in altında olduğu bulunmuştur.

Kasić vd. (2016) tarafından gerçekleştiren araştırmada, Tuzla (Bosna Hersek) bölgesindeki sondaj kuyularından ve diğer doğal su kaynaklarından toplanan su örneklerindeki ^{222}Rn aktivite derişimi, aktif radon ölçme yöntemi (AlphaGUARD radon

monitörü) ile ölçülmüştür. Çalışma sonucunda, su örneklerinin içerdiği radonun aktivite seviyelerinin, 214- 3702 mBq/L aralığında olduğu bulunmuştur.

Abojassim vd. (2017) tarafından gerçekleştirilen araştırmada, Irak'ta tüketilen ve marketlerde ticari olarak satılan farklı markaya ait şişelenmiş içme suyu örneklerindeki ^{222}Rn aktivite derişimi, elektronik radon ölçme sistemi (RAD7) kullanarak ölçülmüş şişelenmiş içme suyu örneklerindeki ortalama radon aktivite derişimi, 0,113 Bq/L olarak bulunmuştur.

Seoud (2017) tarafından gerçekleştirilen araştırmada, Kuveyt'teki marketlerde ticari olarak satılan 12 farklı ticari markanın şişelenmiş doğal mineralli su örneklerindeki ^{222}Rn aktivite derişimi, pasif radon ölçme yöntemi (CR-39 nükleer iz dedektörleri) ile ölçülmüş ve su örneklerindeki radonun ortalama aktivite derişimi, 3 Bq/L olarak bulunmuştur.

Labidi ve Gharbi (2018) tarafından gerçekleştirilen araştırmada, Tunus'ta tüketilen en popüler altı şişelenmiş maden suyu örneğindeki toplam alfa, toplam beta, radyum izotopları (^{226}Ra , ^{228}Ra) ve uranyum izotoplarının (^{234}U , ^{238}U) aktivite derişimleri, gaz akışı orantılı sayım sistemi, yüksek saflıkta germanyum dedektörlü (HPGe) gama-ışını spektrometresi ve alfa spektrometrisi ile belirlenmiştir. Çalışmada elde edilen aktivite derişim sonuçlarına göre, içme suyu yoluyla radyum ve uranyum izotoplarının sindirilmesi nedeniyle oluşan radyolojik risk, yıllık etkin radyasyon dozu hesaplanarak üç farklı yaş grubu (< 1 yıl, 7-12 yıl ve > 17 yıl) için değerlendirilmiştir. Elde edile sonuçlar, uranyum izotoplarının sindirilmesine eşlik eden yıllık etkin radyasyon dozlarının, DSÖ tarafından öngörülen doz ölçütünden daha küçük olduğunu göstermiştir.

Salehipour vd. (2020) tarafından gerçekleştirilen araştırmada, İran'ın birçok eyaletinden toplanan yetmiş farklı ticari şişelenmiş maden suyu örneğindeki ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Pb ve ^{40}K radyonüklitlerin aktivite derişimleri, bir HPGe dedektörlü gama-ışını spektroskopisi ile belirlenmiş ve incelenen su örneklerindeki söz konusu radyonüklitlerin sindirilmesinden kaynaklanan radyolojik sağlık riski, etkin dozu hızı ve buna karşılık gelen kanser riski tahmini hesaplanarak üç yaş grubu için

değerlendirilmiştir. Çalışmada elde edilen sonuçlar, İran'ın farklı eyaletlerinde üretilen şişelenmiş suların sık kullanımının, tüketiciler için sağlık tehlikeleri barındırdığını ortaya koymuştur.

Kinahan vd. (2020) tarafından gerçekleştirilen araştırmada, Japonya'da tüketilen ticari 20 farklı şişelenmiş maden sularındaki uranyum izotopları (^{234}U , ^{235}U ve ^{238}U), radyum izotopları (^{226}Ra ve ^{228}Ra), ^{222}Rn , ^{210}Pb , ^{210}Po , ^{40}K , sezyum izotopları (^{134}Cs ve ^{137}Cs) trityum (^3H) ve karbon (^{14}C) radyoizotopunun aktivite derişimleri belirlenmiş ve incelenen su örneklerindeki söz konusu radyonüklitlerin sindirilmesinden kaynaklanan radyolojik sağlık riski değerlendirilmiştir. Çalışmada hesaplanan etkin doz hızlarının, DSÖ tarafından içme suyu kalitesi için önerilen kılavuz seviyesinden (0,1 mSv/y'den) daha küçük olduğu bulunmuştur.

Semerjian vd. (2020) tarafından gerçekleştirilen araştırmada, Birleşik Arap Emirlikleri'nde ticari olarak satılan çeşitli şişelenmiş su markalarındaki ^3H ve ^{40}K radyonüklitinin aktivite seviyeleri belirlenmiş ve bu suların tüketilmesine eşlik eden radyolojik sağlık riski farklı yaş grupları için etkin doz hızı ve buna karşılık gelen yaşam boyu kanser riski tahmini hesaplanarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, araştırılan şişelenmiş su örneklerinin, radyolojik açıdan güvenli olduğu, halk için önemli bir radyolojik maruziyet ve sağlık riski oluşturmayacağını göstermiştir.

Garcia vd. (2021) tarafından gerçekleştirilen araştırmada, İsveç'te içme suyu olarak tüketilen yirmi altı farklı markaya ait otuz yedi şişelenmiş su örneğindeki ^{210}Po , ^{210}Pb , ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{234}U ve ^{238}U 'in aktivite derişimleri alfa spektrometresi le ölçülmüş ve bu suların tüketilmesine eşlik eden radyolojik risk, farklı yaş grupları için değerlendirilmiştir. Çalışmada elde edilen sonuçlar, incelenen markalardan yalnızca üçünün içme suyu için eşik değeri olan 0,1 mSv/y'ı aşabildiğini göstermiştir. Bir marka için ise doz esas olarak hem ^{210}Po hem de ^{210}Pb 'nin aktivite derişimlerinin yaklaşık 100 mBq/L olmasından kaynaklanmıştır. Geriye kalan markalar için ise ^{228}Ra , hesaplanan yıllık etkin doza en çok katkıda bulunan bileşen olmuştur.

Dizman ve Mukhtarli (2021) tarafından gerçekleştirilen araştırmada, Azerbaycan ve Türkiye'de tüketilen ticari 42 şişelenmiş doğal ve mineral su örneğindeki trityum

aktivite derişimi, sıvı sintilasyon sayacı kullanılarak belirlenmiştir. Ayrıca incelenen su örneklerindeki söz konusu radyonüklitlerin sindirilmesinden kaynaklanan radyolojik sağlık riski, etkin doz hızı ve buna karşılık gelen kanser riski tahmini hesaplanarak değerlendirilmiştir. Çalışmada elde edilen sonuçlar incelenen suların insanlar tarafından tüketilmesinin trityum açısından herhangi bir sağlık riski oluşturmayacağını göstermiştir.

Altıkulaç vd. (2022) tarafından gerçekleştiren araştırmada, Türkiye’de pazarlanan 25 ticari markaya ait 58 şişelenmiş maden suyu örneklerindeki doğal radyonüklitlerin aktivite derişimleri, HPGe dedektörlü bir gama-ışını spektroskopisi ile tayin edilmiş ve bu suların tüketilmesinden kaynaklanan radyolojik sağlık risk değerlendirilmiştir. Şişelenmiş maden suyu örneklerinde ölçülen radyonüklitlerin ortalama aktivite derişimleri, 0,4 Bq/L (^{226}Ra), 0,5 Bq/L (^{228}Ra) ve 4,3 Bq/L (^{40}K) olarak bulunmuştur. Çalışmada, ^{228}Ra ’nın aktivite derişimlerinin, DSÖ’nün içme suyu için önerdiği kılavuz seviyesi olan 0,1 Bq/L’den daha büyük olduğu bulunmuştur.

Seid vd. (2022) tarafından gerçekleştiren araştırmada, Türkiye’de tüketilen 22 ticari markaya ait 49 şişelenmiş doğal maden sularındaki ^{222}Rn aktivite derişimi, radon monitörü (AlphaGUARD) kullanarak ölçülmüş ve ^{222}Rn ’nin yutulması ve solunmasıyla oluşan iç radyasyon ışınlamadan kaynaklanan radyolojik risk değerlendirilmiştir. İncelenen şişelenmiş maden su örneklerindeki ^{222}Rn aktivite derişimlerinin, 31 mBq/L – 58 mBq/L aralığında değiştiği bulunmuştur.

Bazza vd. (2023) tarafından gerçekleştiren araştırmada, Fas’ta tüketilen on iki adet şişelenmiş maden suyu örneğindeki ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K ’ın aktivite derişimi, bir NaI(Tl) dedektörlü gama-ışını spektrometresi ile belirlenmiş ve bu suların tüketilmesinden kaynaklanan radyolojik sağlık risk değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, incelenen örneklerin radyolojik kalitesinin, uluslararası güvenlik ve sağlık sınırlarına uyduğunu göstermiştir.

Turhan vd. (2023) tarafından gerçekleştiren araştırmada, Türkiye’de tüketilen ticari 77 kaynak suyu markalarındaki ^{222}Rn aktivite derişimi, radon monitörü (AlphaGUARD) kullanarak ölçülmüş ve ^{222}Rn ’nin yutulması ve solunmasıyla oluşan iç ışınlamadan

kaynaklanan radyolojik risk değerlendirilmiştir. İncelenen şişelenmiş doğal kaynak su örneklerindeki ^{222}Rn aktivite derişimlerinin, 7,1 mBq/L – 28,7 mBq/L arasında değiştii bulunmuştur. Çalışmada yıllık içme suyu tüketimini esas alan 4 farklı senaryoda 3 yaş grubu için radyolojik riski değerlendirmek üzere toplam yıllık etkili doz tahmin edilmiştir. Tüm tahmini doz değerlerinin, içme suyu için önerilen 100 μSv referans dozun önemli ölçüde altında olduğu ve bu nedenle, incelenen su örneklerindeki radon gazının, halk için kayda değer bir radyolojik risk içermediği belirtilmiştir.

Goshu vd. (2023) tarafından gerçekleştiren araştırmada, Etiyopya'nın Dire Dawa Şehri ve çevresinde üretilen dokuz farklı markaya ait şişelenmiş doğal kaynak suyu örneklerindeki ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K 'in aktivite derişimleri, HPGe dedektörlü gama-ışını spektroskopisi ile ölçülmüştür. İncelenen su örneklerindeki ölçülen aktivite derişimleri ^{238}U için 2,9 ila 4,0 Bq/L, ^{232}Th için 4,7 ila 13,3 Bq/L ve ^{40}K için 106,5 ila 136,5 Bq/L aralığında değiştii belirtilmiştir. Çalışmada, incelenen su örneklerinde ölçülen bu doğal radyonüklitlerin sindirilmesinden kaynaklanan ve farklı yaş grupları için değerlendirilen yıllık etkin radyasyon dozlarının, DSÖ tarafından içme suyu kalitesi için önerilen kılavuz seviyesinden (0,1 mSv/y'den) daha küçük olduğu bulunmuştur.

Dekhissi vd. (2024) tarafından gerçekleştiren araştırmada, Fas'ın doğu bölgesindeki farklı kaynaklardan alınan musluk, doğal kaynak ve kuyu suyu örneklerinde ve birkaç şişelenmiş maden suyu örneğindeki ^{226}Ra 'nın aktivite derişimi ölçülmüş ve bu suların tüketilmesine eşlik eden radyolojik sağlık risk değerlendirilmiştir. Çalışmada elde edilen sonuçlar, verilerin uluslararası kılavuz değerlere göre makul olduğu ve analiz edilen su örneklerindeki radyum ve radona atfedilebilecek herhangi bir radyolojik tehlikeyi olmadığı göstermiştir.

Martínez vd. (2024) tarafından gerçekleştiren araştırmada, İspanya'nın Katalonya Bölgesinden toplanan yirmi altı farklı doğal mineralli su örneklerindeki toplam alfa, topla beta, ^{210}Pb , ^{210}Po , ^{222}Rn , ^{226}Ra , ^{234}U and ^{238}U aktivite derişimleri ölçülmüş ve bu suların tüketilmesine eşlik eden radyolojik sağlık risk değerlendirilmiştir. Çalışmada, doğal mineralli su için radyolojik izleme gerekmesi de, daha fazla gözetimin yapılması önerilmiştir.

Chowdhury vd. (2024) tarafından gerçekleştiren araştırmada, Bangladeş'in Dakka şehrinde tüketlenen on üç en popöler markalı şişelenmiş maden suyu, on iki yer altı suyu ve Dakka'ya komşu Savar'daki nükleer sahasından toplanan altı su örneğindeki ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{40}K ve trityum radyoaktivite seviyeleri, HPGe dedektörlü bir gama-ışını spektrometresi ve bir sıvı sintilasyon sayacı kullanılarak ölcölmüştür. Çalışmanın sonuçları, ^3H hariç su örneklerinde ölcölen radyonöklitlerin aktivite derişimlerinin ve bu suların tüketilmesinden kaynaklanan etkin doz hızlarının, DSÖ'nün kabul edilebilir eşik değerlerinden daha büyük olduğunu göstermiştir.

Ong vd. (2025) tarafından gerçekleştiren araştırmada, Singapur'da tüketlenen musluk ve şişelenmiş içme sularında trityum, toplam alfa ve beta aktivite seviyeleri, ultra düşük seviyeli sıvı sintilasyon sayacı ile ölcölmüş ve bu suların tüketilmesinden kaynaklanan radyolojik sağlık risk ocuk ve yetişkinler için değerlendirilmiştir. Çalışmada elde edilen bulgular, musluk suyu ve şişelenmiş su tüketiminin Singapur halkı için önemsiz düzeyde radyolojik risk oluşturduğunu göstermiştir.

Literatür taramalarımıza göre, Türkiye'de ticari olarak satılan ve içme suyu olarak yaygın bir şekilde tüketlenen ambalajlı doğal kaynak sularındaki doğal radyonöklitlerin aktivite derişimlerinin ölcölmesi ve bu suların tüketilmesinden kaynaklanan radyolojik riskin değerlendirilmesi hakkında ayrıntılı bir çalışma bulunmamaktadır. Bu alışma Türkiye'de tüketlenen ambalajlı doğal kaynak sularının radyum izotoplarının envanterlerinin çıkarılmasına ve radyum izotoplarının neden olduğu radyolojik sağlık risklerinin değerlendirilmesine yönelik yapılan ilk çalışma niteliğindedir. Bu açıdan bakıldığında bu tez kapsamında yapılan çalışmanın özgünlüğü, söz konusu veri eksikliğini tamamlamayarak literatürde katkı yapmasıdır.

1.3 Tezin Kapsamı

Bu tezin kapsamını;

(i) Türkiye'de içme suyu olarak tüketlenen ticari markalara ait ambalajlı doğal kaynak su örnekleri,

(ii) bu örneklerin doğal olarak içerdiği radyum izotopları (^{226}Ra ve ^{228}Ra) ve ^{40}K radyoizotopu,

(iii) incelenen su örneklerinin sindirilmesinin sebep olduğu iç ışınlamadan kaynaklanan radyolojik sağlık riskinin erişkin tüketiciler için değerlendirilmesi ve

(iv) analiz veya ölçme işlemi için kullanılan HPGe dedektörlü gama-ışını spektroskopisi oluşturmaktadır.

1.4 Tezin Hedef ve Amacı

Tez kapsamında yapılan bu çalışma, bir kısmı Avrupa ülkelerine ihraç edilen ambalajlı doğal kaynak sularının radyolojik kalitesi hakkında tüketicilerde farkındalık oluşturabilmeyi ve ilgili doğal radyonüklitler ve/veya yıllık etkin radyasyon dozu için sınır değerlerin veya ölçütlerin veya kılavuz seviyelerin belirlenmesinde yararlı olabilmeyi hedeflemektedir. Bu hedeflere yönelik olarak bu çalışma;

(i) yüksek saflıkta HPGe dedektörlü bir gama-ışını spektrometrisi kullanarak marketlerden satın alınan seksen iki farklı ambalajlı doğal kaynak su markasındaki ^{226}Ra , ^{228}Ra ve ^{40}K radyonüklitlerinin aktivite derişimlerini ölçmeyi,

(ii) ambalajlı doğal kaynak suyu örneklerinde ölçülen bu radyonüklitlerin sindirilmesi nedeniyle oluşan radyolojik sağlık riskini erişkin tüketiciler için değerlendirmek amacıyla etkin doz hızı veya yıllık etkin dozu ve buna karşılık gelen yaşam boyu kanser riskini tahmini olarak hesaplamayı ve

(iii) çalışmada belirlenen ve tahmin edilen değerleri, ulusal/uluslararası düzenlemelerde ve DSÖ'nün dokümanlarında içme suyu kalitesi için önerilen kriter veya kılavuz seviyeler ve diğer ülkeler tarafından tüketilen ambalajlı doğal kaynak suları veya şişelenmiş içme suları için elde edilen değerlerle karşılaştırılmayı amaçlamaktadır.

1.5 Tezin Yapısı

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

- **Giriş Bölümü:** Bu bölümde, içme suyunun sağlık ile ilişkisi, ambalajlı doğal sularının kaynakları, üretimi ve tüketimi, içme sularının radyolojik kalitesi, radyum izotopları ve bireylerin alabileceği yıllık etkin radyasyon dozu ile ilgili genel bilgi sunuldu. Ayrıca, bu bölümde son onlu yıllarda yapılan ve literatürde yer alan ilgili araştırmalar değerlendirildi ve daha sonra da tezin kapsamı, hedefi ve amacı belirtildi.
- **Çalışma İle İlgili Teorik Bilgi Bölümü:** Bu bölümde, radyasyon, radyasyon doz birimleri, iyonlaştırıcı radyasyonun sağlık üzerindeki etkileri, radyasyon kaynakları, radyoaktivite, doğal radyoaktif kaynaklar, radyoaktivite ölçme yöntemleri ve gama-ışını spektrometresi ile ilgili kısa bilgi sunuldu ve okuyucu, daha detaylı bilgi için kaynaklara yönlendirildi.
- **Malzeme ve Yöntem Bölümü:** Bu bölümde, ambalajlı doğal kaynak suyu örneklerinin temin edilmesi, örneklerin ölçme veya analiz için hazırlanması, ölçme işlemi ve radyolojik risk değerlendirme yöntemi ile ilgili bilgi verildi.
- **Bulgular, Tartışma, Sonuç ve Öneriler Bölümü:** Bu bölümde, ambalajlı doğal kaynak suyu örneklerinde ölçülen radyonüklitlerin aktivite derişimleri ve tahmini olarak hesaplanan risk parametrelerin (ekin doz hızı ve kanser riski) değerleri, grafikler ve tablolar şeklinde sunuldu. Elde edilen bulgular, değerlendirildi, literatürdeki veriler ve ulusal ve/veya uluslararası kurumların önerdiği sınır değerler ile karşılaştırıldı ve bazı öneriler verildi.

2. ÇALIŞMA İLE İLGİLİ TEORİK BİLGİ

2.1 Radyasyon ve Radyasyonun Madde ile Etkileşimi

Hayatımızda veya günlük yaşantımızda her yerde sürekli maruz kaldığımız radyasyon, herhangi bir radyasyon kaynağından ortaya çıkan enerjik taneciklerin veya elektromanyetik dalgaların uzayda yayılması olarak tarif edilebilir (Aydın, 2023). Genel olarak radyasyon, herhangi ortam ile etkileşmesine göre iyonlaştırıcı (iyonize) ve iyonlaştırıcı olmayan (iyonize olmayan) radyasyon olarak isimlendirilebilir. İyonlaştırıcı radyasyon terimi, etkileştiği ortamdaki atom ve/veya molekülün yörüngelerinden elektron(ları) koparmaya yetecek kadar enerjisi olan radyasyonlar için kullanılır (Aydın, 2023; Krane, 1987). İyonlaştırıcı radyasyonlara örnek olarak alfa (α -), beta (β -), nötron ve elektromanyetik dalgalar (gama ve X- ışınları) verilebilir (Aydın, 2023).

Doğrudan iyonlaştırıcı radyasyonlar, etkileştikleri atom veya moleküller ile elastik ve elastik olmayan çarpışmalar yaparak enerji kaybederler ve geliş doğrultulara göre farklı yönde sapmaya uğrarlar (Aydın, 2023; Krane, 1987). Örneğin ağır ve yüklü olan α -taneciği, ortamdaki atomların elektronları ile Coulomb etkileşmesi yapar. Etkileşim sonucunda kinetik enerjisi, atomun iyonlaşma enerjisi (AİE)'sinden büyük olan α -tanecikleri enerjisini, atomları iyonlaştırmak için harcar. Böylece madde içerisinden geçen α -taneciği, elektronlar ile esnek çarpışmalar neticesinde enerjisinin büyük bir bölümünü kaybeder (Aydın, 2023). Kinetik enerjisi, AİE'den daha küçük olan α -tanecikleri, enerjisinin bir bölümünü elektronlara verir ve böylece onları daha yüksek enerji düzeylerine çıkararak uyarılmalarını sağlar (Aydın, 2023). Bu yüzden α -tanecikleri enerjilerini çok kısa mesafede kaybederler. Bununla birlikte nüfuz etme derinlikleri düşük olan α -tanecikleri, büyük doğrusal enerji aktarımına sahip yüksek seviyede iyonlaştırıcı radyasyon olarak bilinir (Aydın, 2023). Enerjik elektronların oluşturduğu β -tanecikleri, tıpkı α -tanecikleri gibi içinden geçtikleri maddenin atom ve moleküllerinin elektronları ile doğrudan Coulomb etkileşmesi sonucunda, elektronları kopararak atomu veya moleküle iyonlaştırır veya elektronları daha üst enerji seviyesine uyarır (Aydın, 2023; Krane, 1987). Bununla birlikte beta tanecikleri,

atomun çekirdek alanından geçtiği zaman, radyasyon yolu ile enerji kaybına uğrar ve bu enerji, frenleme radyasyonu veya bremsstrahlung ışınları olarak bilenen sürekli X-ışını spektrumu şeklinde görülür (Aydın, 2023; Zriba, 2019). Gama (γ -) ve X-ışınları, madde ile fotoelektrik olayı, Compton olayı ve çift oluşumu olay olmak üzere üç şekilde etkileşimde bulunurlar (Aydın, 2023; Krane, 1987). Bu etkileşme süreçlerinde fotonların ortaya çıkardıkları ikincil elektronlar, Coulomb etkileşmesi ile maddeyi meydana getiren atom ve molekülleri uyarırlar ve/veya iyonlaştırırlar. Bu iyonlaşma sürecinin aktif radikaller oluşturmaları, radyasyonun madde ile etkileşme sürecindeki en önemli olaydır (Aydın, 2023; Krane, 1987).

2.2 İyonlaştırıcı Radyasyon Birimleri ve Biyolojik Etkileri

Hava içinden geçen iyonlaştırıcı radyasyonun, havadaki atom ve molekülleri iyonlaştırması, ışınlama (X) olarak bilinir ve aşağıda verilen bağıntı ile tanımlanır (Aydın, 2023; Krane, 1987):

$$X = \frac{Q}{m} \quad (2.1)$$

Bağıntıdaki 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 (Aydın, 2023; Krane, 1987; Temirci, 2017). Daha önce ışınlama doz birimi olarak kullanılan röntgen (R), aşağıda verildiği gibi normal şartlar altında, bir cm³ kuru havada, bir eyb (elektrostatik yük birimi)'lik yük meydana getiren ışınlama olarak tanımlanır (Aydın, 2023; Krane, 1987; Temirci, 2017):

$$1 R = \frac{1 \text{ eyb}}{0,001293 \text{ g}} = 2,58 \times 10^{-4} \text{ C/kg} \quad (2.2)$$

Ancak, havadan farklı malzemeler radyasyona maruz bırakıldığında, bu malzemeler, havanıninkine benzemeyen enerji soğurma hızlarına sahip olacaktır (Aydın, 2023; Krane, 1987). Böylece bu malzemelerin iyonlaşma yolu ile soğurduğu (absorpladığı) enerjiiyi tarif etmek için yukarıda bahsedilen doz ışınlama biriminden daha farklı bir doz birimine ihtiyaç duyulmuştur (Aydın, 2023; Krane, 1987). 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 ışınlaması, soğurulmuş doz cinsinden 0,88 rad’a denktir (1 R = 0,88 rad) (Aydın, 2023; Krane, 1987). 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 (Aydın, 2023; Krane, 1987).

Farklı ışınlama koşullarında, herhangi bir kütlenin eşit miktarda enerji absorplanması, 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 (Aydın, 2023; Krane, 1987; Temirci, 2017). Bu nedenle kişilerin radyasyondan korunması ile ilgili standartları belirlemek için farklı türdeki radyasyonların oluşturabileceği bazı biyolojik etkilerinin ölçülmesi gerekli ve önemlidir (Aydın, 2023). Bu durum için de bağıl biyolojik etkinlik (BBE) ortaya konmuştur. BBE, belirli bir radyasyon dozunun, aynı biyolojik etkiyi meydana getiren X-ışınlarının dozuna oranıdır (Aydın, 2023). Ancak BBE’nin, bağıl olarak ölçülmesi güç olduğundan RBE’nin yerini kalite faktörü (KF) almıştır. KF, radyasyonun aldığı birim yol boyunca biriken enerjiye göre bir radyasyonun tipi enerjisi için kolaylıkla hesaplanabilir (Aydın, 2023). Dolayısıyla, bilinen bir iyonlaştırıcı radyasyonun herhangi bir biyolojik sistem üzerindeki etkisini tanımlayan eşdeğer doz (E) aşağıdaki bağıntı ile verilir (Aydın, 2023; Krane, 1987; Temirci, 2017):

$$E = D \times KF \quad (2.3)$$

Bağıntıda D, soğurulmuş 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) (Aydın, 2023; Temirci, 2017). KF değerleri: β -, X- ve γ - ışınları için 1; düşük enerjili ($\sim$ keV) nötron ve protonlar için 2 ila 5 arasında; enerjik ($\sim$ MeV) nötron ve protonlar için 5 ila 10 arasında ve α - ışınları için 20 olarak belirlenmiştir (Aydın, 2023; Krane, 1987).

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 kademeli olay birbirini takip eder (Aydın, 2023):

Birinci kademe: Fiziksel etkileşmelerin meydana geldiği kademedir. Radyasyonu absorblayan hücre veya dokuları oluşturan atomların veya moleküllerin uyarılma veya iyonlaşma süreçlerini kapsar. Etkileşmeler neticesinde meydana gelen ürünler; 10^{-10} s gibi çok kısa sürede ikincil tepkimelerin (reaksiyonların) oluşmasına neden olurlar ve ikincil reaksiyon ürünleri ortaya çıkar (Aydın, 2023).

İkinci kademe: Fizikokimyasal etkileşmelerin meydana geldiği kademedir. İkincil reaksiyonları ve radyasyon etkisinin ikinci kademesini kapsar.

Üçüncü kademe: Kimyasal etkileşmelerin meydana geldiği kademedir. Radikallerin veya serbest atomların birbirleri ve ortamdaki moleküller ile tepkimelerini kapsar.

Dördüncü kademe: Biyolojik etkileşmelerin meydana geldiği kademedir. Radyasyon etkisi ile herhangi bir organizmada meydana gelen moleküler değişiklikleri kapsar (Aydın, 2023; Temirci, 2017).

Yukarıda bahsedilen kademeler neticesinde kromozomda meydana gelen hasarlar, bir takım biyolojik olayları tetikler. Bu olaylarda genlerin hasar alması, 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 (Aydın, 2023; Temirci, 2017). Dünya çapında radyolojik risklerin değerlendirilmesi, WHO-BEIR, UNSCEAR, ICRP ve IARC gibi uluslararası kuruluşların düzenli olarak yayınladıkları raporlar dikkate alınarak gerçekleştirilmektedir (Aydın, 2023; Sultan, 2020).

2.3 İyonlaştırıcı Radyasyon Kaynakları

İyonlaştırıcı radyasyon kaynakları iki grupta toplanabilir: Doğal ve yapay radyoaktif kaynaklar. Dünya’da yaşayan bir kişi bir yılda, radyasyon kaynaklarından dolayı ortalama yaklaşık 3 mSv’lik etkin radyasyon dozuna maruz kalmaktadır (UNSCEAR, 2008). Kişiler, doğal radyoaktif kaynaklardan dolayı 2,4 mSv’lik iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalmaktadır (UNSCEAR, 2008). Bu doz değerinin 1,26 mSv’lik bölümü ise, solunum yolu ile vücuda giren radyonüklitlerden özellikle radondan ileri gelmektedir (UNSCEAR, 2008).

Doğal iyonlaştırıcı radyasyon kaynakları, kozmik ve yer kabuğu kökenli radyonüklitlerden oluşmaktadır (Aydın, 2023; Temirci, 2017). Yer kabuğu kökenli radyonüklitler, uranyum (^{238}U), aktinyum (^{235}U) ve toryum (^{232}Th) doğal radyoaktif serilerine ait radyonüklitlerden ve lütesyum (^{176}Lu), samaryum (^{147}Sm), lantan (^{138}La), rubidyum (^{87}Rb) ve potasyum (^{40}K) gibi radyoizotoplardan oluşmaktadır. Bununla birlikte ^{235}U serisinde yer alan radyonüklitler ile ^{176}Lu , ^{147}Sm , ^{138}La ve ^{87}Rb radyonüklitlerin toplam doza olan katıkları küçük olduğundan, radyasyon koruması işlemlerinde ihmal edilmektedirler (UNSCEAR, 2000). ^{238}U ve ^{232}Th serilerine ait

radyonüklitler ile radyoaktif potasyum, bozunum süreçlerine bağlı olarak α -, β - ve γ -iyonlaştırıcı radyasyonunu yayarlar.

Yapay radyoaktif kaynaklarını (1) tıpta, kanser tedavisi için kullanılan radyonüklitler (^{60}Co ve ^{137}Cs) ve elektron hızlandırıcıları (beta- ve X-ışını kaynağı) (2) nükleer tıpta hastalıkların teşhisi için kullanılan radyonüklitler (^{201}Tl , ^{131}I , ^{111}In , $^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^{67}Ga ^{18}F vb.), (3) tarım ve endüstride kullanılan radyonüklitler (^{241}Am , ^{192}Ir , ^{147}Pm , ^{32}P vb.) ve (4) Nükleer yakıt döngüsü (nükleer enerji santral kazaları) ve atmosferik nükleer silah deneyleri sonrasında doğrudan atmosfere salınan radyonüklitler (^{238}Pu , ^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{89}Sr , ^{90}Sr , ^3H vb.) oluşturmaktadır (Aydın, 2023; Özçıtak, 2012).

2.4 Radyoaktivite

Radyoaktivite, kararsız atom çekirdeklerinin, daha kararlı duruma gelebilmeleri için bozunum süreçleri sonucunda elektromanyetik radyasyon veya tanecik yayınlayarak kendiliğinden farklı atom çekirdeklerine dönüşmesi olarak tarif edilebilir (Aydın, 2023; Krane, 1987). Radyoaktif bozunma yapan kararsız çekirdek, radyoizotop veya radyonüklit olarak isimlendirilir (Aydın, 2023; Sultan, 2020). Rastgele gelişen ve istatistik yasalarına tabi olan radyoaktif bozunum, aşağıdaki bağıntı ile verilir (Aydın, 2023; Krane, 1987):

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (2.4)$$

Bozunum 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 (Aydın, 2023; Krane, 1987):

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

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 (Aydın, 2023; Krane, 1987):

$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda \cdot N_0 e^{-\lambda t} = \lambda \cdot N \quad (2.6)$$

Aktivitenin geleneksel birimi, curiedir ve Ci ile gösterilir ve bir saniyede $3,7 \times 10^{10}$ tane kararsız çekirdeğin bozunuma uğrayarak daha kararlı hâle gelmesidir ($1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ bozunum/s}$). Son yıllarda aktivitenin uluslararası birimi olarak becquerel (Bq) kullanılmaktadır. Bir bekerel (becquerel), bir saniyede bir kararsız çekirdeğin bozunuma uğramasıdır ($1 \text{ Bq} = 1 \text{ bozunum/s}$). Aktivite derişimi, hacim veya kütle başına aktiviteyi ifade eder ve gaz-sıvılar için Bq/L ve katılar için ise Bq/kg ile verilir (Aydın, 2023; Sultan, 2020).

2.5 Radyoaktif Bozunum Süreçleri

Genel olarak alfa, beta ve gama bozunumu olmak üzere üç farklı radyoaktif bozunum süreci vardır (Aydın, 2023; Krane, 1987). Kararsız bir çekirdek, alfa bozunumu neticesinde α - ışını (taneciği) ve beta bozunumu neticesinde ise β - ışını (taneciği) yayınlarak daha kararlı duruma geçmeye çalışır. Bu bozunma süreçlerinden sonra daha kararlı ancak uyarılmış durumda kalan çekirdek, gama bozunması yaparak γ - radyasyonu (ışını) yayınlarak taban duruma nükleer özelliğini kaybetmeden geçiş yapar (Aydın, 2023; Krane, 1987; Sultan, 2020). 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.



Burada, X, başlangıçtaki ve Y de bozunum sonrasında oluşan çekirdeği gösterir. Bu bozunumda, X çekirdeğinin nötron sayısı ve proton sayısı 2 (kütle sayısı 4) birim azalır. Ayrıca bu bozunumunda, 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

bozunumu (X çekirdeğin bir nötronu, protona dönüşür) pozitif beta veya pozitron bozunumu (X çekirdeğin bir protonu, nötrona dönüşür) ve elektron yakalama bozunumu. Bu bozunumlar, sembolik olarak sırayla,

$${}^A_ZX_N \rightarrow {}^A_{Z+1}Y_{N-1} + \beta^-(e^-) + \bar{\nu} \quad n \rightarrow p + e^- \quad (2.8)$$

$${}^A_ZX_N \rightarrow {}^A_{Z-1}Y_{N+1} + \beta^+(e^+) + \nu \quad p \rightarrow n + e^+ \quad (2.9)$$

$${}^A_ZX_N \rightarrow {}^A_{Z-1}Y_{N+1} + \nu \quad p + e^- \rightarrow n \quad (2.10)$$

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 yayınlarak geçer (Aydın, 2023; Krane, 1987). 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 (Aydın, 2023; Krane, 1987). 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.

2.6 Radyoaktivite Ölçme Yöntemleri ve Gama-ışını Spektroskopisi

Radyoaktivite ölçümlerinde genel olarak alfa, beta ve gama spektrometrik yöntem olmak üzere üç spektrometrik yöntem kullanılmaktadır. Bu kısımda sadece tez kapsamında olan gama-ışını spektrometrik yöntem hakkında 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 (kalitatif) ve nicel (kantitatif) olarak analizlerini mümkün kılan bir nükleer analitik yöntemdir

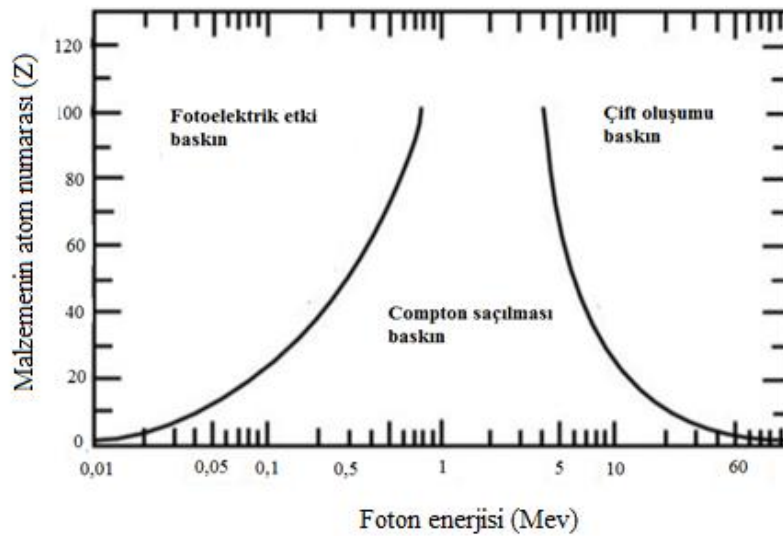
(Sultan, 2020). Bu yöntem, diğer bilinen (konvansiyonel) analitik yöntemlere göre en az seviyede örnek hazırlama süreci ile bir analiz işleminde çoklu radyonüklitlerin belirlenmesini sağlayabilen tahribatsız analiz yöntemidir. Bu spektroskopik yöntem; sağlık fiziki, nükleer tıp, çevre bilimi, malzeme araştırmaları, nükleer madde kaçakçılığı, nükleer tesislerde izleme gibi alanlarda ve nötron aktivasyon analizi gibi uygulamalarda etkin ve yaygın olarak kullanılmaktadır (Sultan, 2020). 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, 2020).

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, 2020). 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 sayısı ile önemli ölçüde artar. Aynı zamanda fotoelektrik olayı, bağıl olarak düşük enerjiye sahip X- ve γ -ışınları için baskın bir süreçtir (Sultan, 2020; Zriba, 2019). 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 2020):

$$\sigma_{Fo} \cong \text{sabit} \times \frac{Z^n}{E_\gamma^{3,5}} \quad (2.11)$$

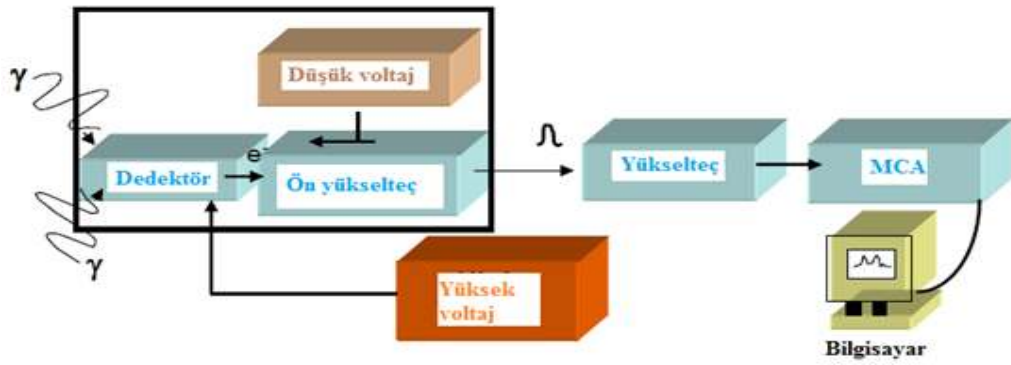
Bu bağıntıda; E, gelen γ -fotonunun enerjisi; Z, atom sayısı ve n, γ -ışını ile ilgili olarak değeri, 4- 5 aralığında olan sabittir (Knoll, 2000; Sultan 2020). Compton olayı, fotonlar

ile serbest veya gevşek bağlı elektronların esnek (elastik) olmayan saçılması veya çarpışmasıdır (Knoll, 2000; Sultan 2020). Fotoelektrik olayından farklı olarak Compton olayında, foton enerjisinin sadece bir bölümünü elektrona aktarır ve sürece sadece dış yörüngedeki serbest elektronlar dâhildir (Knoll, 2000; Sultan 2020). 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 (Abugoufa, 2019; Knoll, 2000; Sultan, 2023). Compton olayı olma ihtimali, hedef atomlarının elektron sayısına bağlı olduğundan atom sayısı ile doğru orantılı olarak artar (Abugoufa, 2019; Sultan, 2020; Temirci, 2017). 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 yaklaşıncaya kadar çok düşüktür ve bu yüzden çift oluşumu baskın olarak yüksek enerjili fotonlar için etkindir (Abugoufa, 2019; Knoll, 2000; Sultan, 2020; Temirci, 2017). Grafik 2.1'de, iyonlaştırıcı radyasyon ile madde arasındaki sözü edilen üç etkileşme mekanizmasının, farklı soğurucu malzemeler için bağıl önemi veya hangi enerji aralıklarında baskın olabilecekleri gösterildi (Abugoufa, 2019; Knoll, 2000; Sultan, 2020; Temirci, 2017).

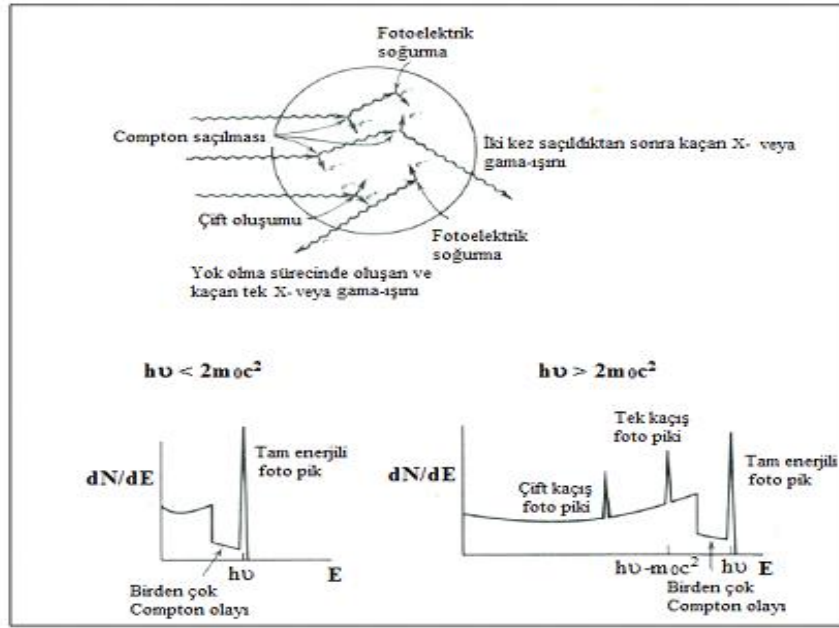


Grafik 2.1 Foton etkileşmesinin bağıl önemi (Knoll, 2000)

Tipik bir gama-ışını spektrometresi, şematik olarak Şekil 2.1’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, 2020). 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 meydana gelmektedir: (i) γ - fotonun, dedektör kristal ile daha önce bahsedilen etkileşim süreçlerinden sonra elektronlar oluşur (Şekil 2.2), (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, 2020).



Şekil 2.1 Bir gama-ışını spektroskopisinin şematik gösterimi (Sultan, 2020)



Şekil 2.2 Gama-ışının dedektör kristali ile etkileşmesi ve fotopik oluşumu

Gama-ışını spektroskopilerinde, yarı iletken veya inorganik sintilasyon dedektörleri kullanılmaktadır (Sultan, 2020). Genel olarak yarı iletken dedektörü olarak HPGe ve sintilasyon dedektörü olarak da NaI(Tl) kullanılır (Knoll, 2000; Sultan, 2020). HPGe dedektörünün, NaI(Tl) dedektörüne göre algılama verimi düşük iken ayırma gücü yüksektir. Genelde, bir HPGe dedektörü, ısı uyarılma ile sonuçlanabilecek elektronik gürültüyü en aza indirmek amacıyla sıvı azot sıcaklığında (77 K) çalıştırılır (Sultan, 2020).

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 (Abugoufa, 2019; Knoll, 2000; Sultan, 2020). Bir dedektörün ayırma gücü (rezolüsyonu), 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) (Abugoufa, 2019; 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 (Abugoufa, 2019; Knoll, 2000).



3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1 Örneklerin Toplanması ve Analiz İşlemi için Hazırlanması

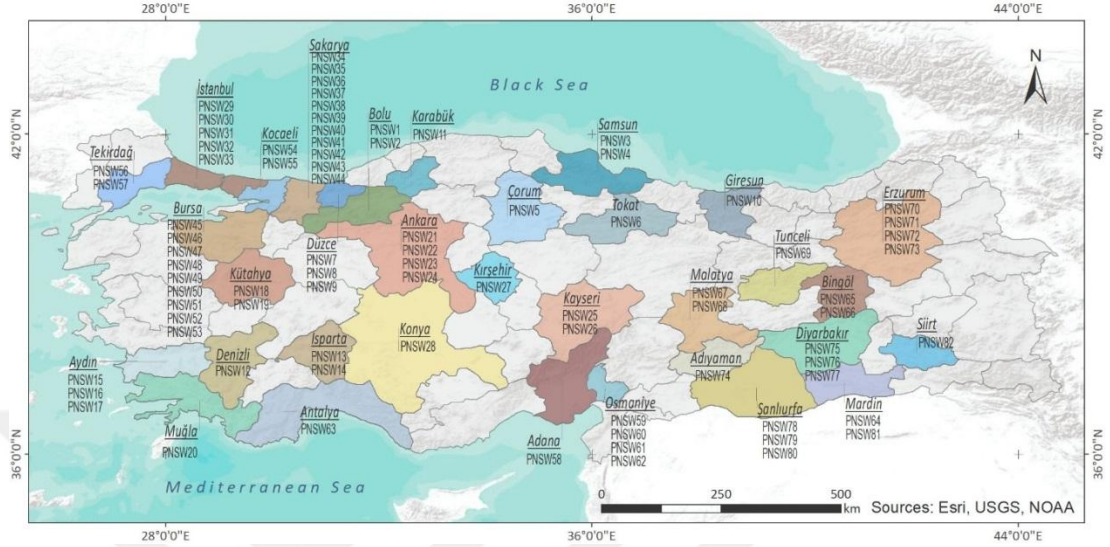
Türkiye’de üretilen doğal kaynak suları, ticari olarak faaliyet gösteren üreticiler tarafından, farklı hacimlerde yumuşak plastik poşetlerde (0,25 L ve 0,33 L), bardaklarda (0,225 L; 0,25 L ve 0,33 L), şişelerde (0,33 L; 0,5 L; 1 L; 1,5 L; 5 L; 8 L ve 10 L) ve damacanalarda (19 L) ambalajlanarak piyasaya arz edilmektedir. Tez kapsamında araştırılan ambalajlı doğal kaynak suyu örnekleri, Türkiye’nin farklı coğrafi bölgelerindeki yer altı sularından elde edilen ve içme suyu olarak tercih edilen markalardan seçildi. Toplam seksen iki farklı ambalajlı doğal kaynak suyu örnekleri, Ocak 2022 tarihinden itibaren Harita 3.1’de gösterildiği gibi Türkiye’nin yedi coğrafi bölgesinde bulunan otuz dört farklı şehirdeki büyük ve yerel marketlerden satın alınarak toplandı. Toplanan suların kaynağının "doğal kaynak" olup olmadığını belirlemek için bu markaların her birinin etiketi incelendi ve bardak ve şişe ambalajlı doğal kaynak suyu markaları seçildi. Örnek Hazırlama Laboratuvarına getirilen su örnekleri, ticari unvanın anonim kalması için PNSW olarak kodlandı. Bu kod, tez kapsamındaki suların bir kısmının ihraç edildiği dikkate alınarak “ambalajlı doğal kaynak suyu” teriminin, İngilizce karşılığı olan “packaged natural spring water” teriminin baş harflerinden türetildi.

Su örnekler, aktivite ölçümü yapılana kadar orijinal satış kapları ile uygun sıcaklıkta (4°C) saklandı. Her bir su örneği, HPGe dedektör verimliliği için hazırlanan referans kaynak ile aynı geometri ve boyuta sahip bir polistiren örnek kabına (5 x 6 cm) aktarıldı. Örnekteki radon gazının kaçmasını önlemek için sızdırmazlıkları sağlanan örnek kapları, radyum izotopları ile bozunum ürünleri arasında kalıcı (seküler) dengeyi elde etmek amacıyla ölçme işleminden önce en az dört hafta boyunca bekletildi.

3.2 Su Örneklerinin Radyoaktivite Analizi

Ambalajlı doğal kaynak suyu örneğinde doğal olarak var olan ^{226}Ra , ^{228}Ra ve ^{40}K ’nın aktivite derişimleri, Kastamonu Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında

bulunan ve Fotoğraf 3.1'de gösterilen HPGe dedektörlü gama-ışını spektrometresi kullanılarak belirlendi.



Harita 3.1 Ambalajlı doğal kaynak suyu örneklerinin temin edildiği yerlerin haritası



Fotoğraf 3.1 Tez kapsamındaki analizlerde kullanılan gama-ışını spektroskopisi (Sultan, 2020)

Teknik özellikleri, Tablo 3.1’de verilen HPGe dedektör, laboratuvar ortamı radyasyonunu (background) en aza indirmek için kurşundan yapılmış yüksek performanslı, çok düşük background’a sahip kurşun zırh içine yerleştirilmiş ve elektronik gürültüyü en aza indirmek için de 30 L’lik hacime sahip sıvı azot kabı (Dewar) kullanılmıştır (Sultan, 2020). Dedektör, 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, 2020). DSPEC-50, fotopikleri otomatik olarak bulan, fotopikleri değerlendiren, fotopiklerin belirsizliğini hesaplayan, kütüphanesi ile gerektiğinde radyonüklitleri belirleyen ve aktivite analizlerini yapabilen GammaVision gama spektroskopi yazılım ile çalışmaktadır (Sultan, 2020).

Tablo 3.1 HPGe dedektörünün özellikleri

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

Ambalajlı doğal kaynak suyu örneği ile ilgili γ - ışını spektrumu; dedektör üzerine yerleştirilen her bir örneğin, 50000 saniye süre sayılması ile oluşturuldu. ^{226}Ra aktivite derişiminin belirlenmesi için elde edilen gama-ışını spektrumlarında, radonun bozunum ürünleri olan ^{214}Pb ’e ait 295,2 keV ve 352,9 keV enerjili gama-ışını fotopikleri ile ^{214}Bi ’e ait 609,3 keV ve 1764,5 keV enerjili gama-ışını fotopikleri seçildi. ^{228}Ra aktivite derişiminin belirlenmesi için toryum serinde bozunum ürünleri olan ^{228}Ac ’e ait 911,2 keV enerjili fotopik ile ^{208}Tl ’ye ait 583,2 keV enerjili gama-ışını fotopiki seçilirken, ^{40}K aktivite derişiminin belirlenmesi için kendisine ait 1460,8 keV enerjili tek bir gama-ışını fotopiki seçildi. Her bir su örneğindeki radyonüklitlerin aktivite derişimleri, aşağıda verilen bağıntı ile hesaplandı (Altıkulaç vd., 2022):

$$A = \frac{N}{\varepsilon_{\gamma} \cdot P_{\gamma} \cdot V \cdot t} \quad (3.1)$$

Bu bağıntıda, A, ambalajlı doğal kaynak suyu örneğindeki radyonüklitin aktivite derişimi (Bq/L); N, ilgili gama-ışını fotopikinin net sayısı; ε_{γ} , ilgili gama-ışını fotopikin için dedektörün verimi; P_{γ} , ilgili gama-ışınının yayınlanma olasılığı; t, sayım süresi (s) ve V, örnek kabın hacmidir (L). Bu çalışmada dedektör verimini bulmak için radyonüklite özgül verimlilik kalibrasyon işlemi uygulandı. Verim kalibrasyonu, Uluslararası Atom Enerjisi Kurumundan temin edilen sertifikalı doğal uranyum (RGU-1) malzemesi kullanılarak gerçekleştirildi. Kalibrasyon için aşağıda verilen işlemler uygulandı: 10 gram RGU-1 referans malzemesi alındı ve üçte bir HCl asit ile doldurulmuş 118 mL'lik bir polistiren numune kabına konuldu. İki hafta boyunca saklandı. Bu karışım; 10; 25 ve 50°C sıcaklıklarda ve dönüş hızı sırasıyla 10; 20; 30 ve 40 rpm'ye kademeli olarak artırılarak yaklaşık 2 saat boyunca manyetik bir karıştırıcıda karıştırıldı. Karışımından sonra elde edilen beyaz sıvı 1 gün dinlenmeye bırakıldı. Daha sonra karışım süzülerek kabın dibine çöken çözünmeyen kısım uzaklaştırıldı. Böylece çözünmüş uranyum açık sarı ve şeffaf bir sıvı olarak elde edildi ve bu standart sıvı 2/3'ü ultra saf su ile doldurulmuş aynı hacimdeki numune örnek kabına aktarıldı. Örnek kabı sızdırmaz bir şekilde kapatıldı ve kalıcı denge için en az bir ay saklandı. Standart sıvı, dedektör üzerine konularak iyi istatistik elde edilene kadar sayıldı. Elde edilen standart sıvı spektrumunda, ^{214}Pb 'e ait 295,2 keV ve 351,9 keV enerjili ve ^{214}Bi 'e ait 609,3 keV; 1120,3 keV; 1764,5 keV ve 2204,1 keV enerjili fotopikler seçildi ve bu piklerin net sayımları belirlendi. Daha sonra bu fotopiklerin verimleri, Bağıntı (3.1)'den ε_{γ} çekilerek hesaplandı. Elde edilen deneysel değerler, aşağıda verilen fonksiyona fit edildi (Kurnaz vd., 2021):

$$\varepsilon_{\gamma} = \frac{1}{(a + b \times E_{\gamma}^c)} \quad (3.2)$$

Burada, E_{γ} , gama-ışını fotopikinin enerjisi ve a, b ve c, sırasıyla 4,64; 0,0973 ve 0,899 değerinde kat sayılardır.

Gama-ışını sayım sistemi için ölçülebilir en düşük aktivite (ÖEA) aşağıdaki bağıntı ile hesaplandı (Altıkulaç vd., 2022):

$$\text{ÖEA (Bq/L)} = \frac{F_C \times \sqrt{B}}{\varepsilon_\gamma \times P_\gamma \times t \times V} \quad (3.3)$$

Bu bağıntıda, F_C ; 1,64'e eşit istatistiksel kapsama faktörü (güvenirlilik düzeyi %95) ve B , her bir radyonüklit için ilgi fotopikin background spektrumundaki alanıdır. Bu çalışmada her bir radyonüklit için ortalama ÖEA değeri, 0,18 Bq/L (^{226}Ra), 0,21 Bq/L (^{228}Ra) ve 4,20 Bq/L (^{40}K) olarak bulundu. Aktivite derişiminin ölçüm belirsizliği (ΔA) aşağıda verilen bağıntı ile hesaplandı (Altıkulaç vd., 2022):

$$\Delta A = A \times \sqrt{(\Delta N / N)^2 + (\Delta \varepsilon_\gamma / \varepsilon_\gamma)^2 + (\Delta P_\gamma / P_\gamma)^2 + (\Delta V / V)^2} \quad (3.3)$$

Bu bağıntıda ΔN sayım hızı belirsizliği; $\Delta \varepsilon_\gamma$ verimlilik belirsizliği, ΔP_γ , gama-ışını yayınlanma olasılığı belirsizliği ve ΔV hacim belirsizliğidir.

3.3 Radyolojik Risk Değerlendirmesi

Radyonüklitler, suyun sindirilmesi yoluyla doğrudan gastrointestinal sisteme ulaşabilir ve daha sonra vücut sıvılarına taşınabilir (Asaduzzaman vd., 2016). Vücuda giren bu radyonüklitlerden yayılan iyonlaştırıcı radyasyon, iç ışınlamaya neden olur ve uzun süreli maruziyetler, insan sağlığı üzerinde olumsuz etkiler oluşturabilir. Bu nedenle, stokastik etkisi nedeniyle, bireysel etkili dozların değerlendirilmesi ve izlenmesi özel dikkat gerektirir. Bu çalışmada, incelenen veya araştırılan ambalajlı doğal kaynak suyu örneklerde analiz edilen radyonüklitlerin sindirilmesi sonucunda oluşan radyolojik sağlık riski yetişkin bireyler için, etkin radyasyon doz hızı (yıllık etkin radyasyon dozu) ve buna karşılık gelen yaşam boyu kanser riski hesaplanarak değerlendirildi.

Etkin radyasyon dozu hızı (E), aşağıda verilen bağıntı ile tahmini olarak hesaplandı (Altıkulaç vd., 2022; UNSCEAR, 2008):

$$E(\mu\text{Sv / y}) = Y\text{T} \times \sum_j A_j \times \text{DDK}_j \times 10^6 \quad (3.4)$$

Bu bağıntıda, YT, kişi başına düşen ortalama yıllık ambalajlı doğal kaynak suyu tüketimi (130 L/y); j, radyonüklitler ve A, su örneklerinde analiz edilen radyonüklitlerin aktivite derişimi (Bq/L) ve DDK, doz dönüşüm katsayıdır. DDK değeri, ^{226}Ra için $2,8 \times 10^{-7}$ ve ^{228}Ra için $6,9 \times 10^{-7}$ olarak alındı (ICRP, 2012).

Kanserin gelişmesi veya kanserden ölme riskinin yaşam boyu riski, bir kişinin yaşamı boyunca kanser teşhisi koyulması veya kanserden ölme şansını ifade eder. Sudaki radyonüklitlerin yutulmasıyla ilişkili kanserojen (mortality) hastalık riski, USEPA Raporunda önerilen yöntemle göre aşağıdaki bağıntı kullanılarak tahmin edildi (USEPA, 1999):

$$\text{KR} = \text{YRT} \times \text{OYS} \times \text{RK} \quad (3.5)$$

Bu bağıntıda, KR, yaşam boyu kanser riski; YRT, yıllık radyonüklit alımı (Bq/y); OYS, yetişkinler için ortalama yaşam süresi (79 yıl) (Turhan vd., 2023) ve RK, kanserojen risk katsayısıdır. RK değerleri, kanserojen hastalıklar için $7,17 \times 10^{-9}$ 1/Bq (^{226}Ra) ve $2,00 \times 10^{-8}$ 1/Bq (^{228}Ra) olarak alındı (USEPA, 1999).

3.4 Uzaysal Dağılım Analizi

Bu çalışmada kanser risklerinin uzaysal (mekânsal) dağılımı, QGIS Desktop 3.36.0 kullanılarak analiz edildi. Örnek toplama noktalarının coğrafi koordinatları dijital bir platforma haritalandı. Çalışma alanlarındaki radyonüklit derişimleri, ters mesafe ağırlıklandırma (IDW) interpolasyonu kullanılarak örneklenen yerlerdeki ölçülen değerlere göre tahmin edildi.

4. BULGULAR, TARTIŞMA, SONUÇ ve ÖNERİLER

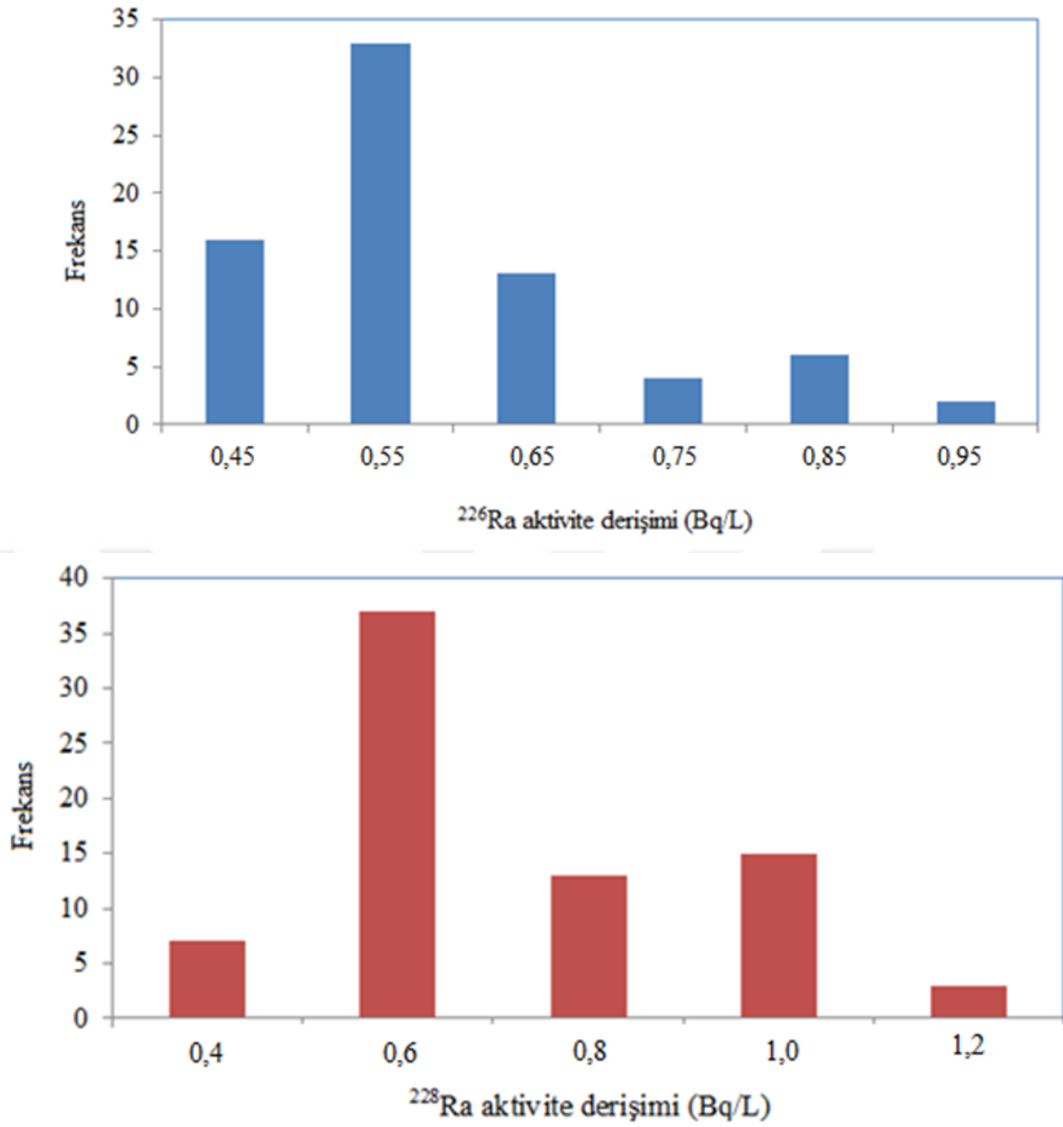
Tez kapsamındaki ambalajlı doğal kaynak suyu örneklerinde analiz edilen radyonüklitler doğal ve yapay olmak üzere iki sınıfta değerlendirildi. Su örneklerinde, ^{137}Cs başta olmak üzere diğer gama-ışını yayınlayan yapay radyonüklitler analiz edilmedi. Su örneklerinde doğal radyonüklitler olarak uranyum radyoaktif serisinden ^{226}Ra , toryum radyoaktif serisinden ^{228}Ra ve bu serilerde yer almayan yer kabuğu kökenli ^{40}K analiz edildi. ^{40}K , üç su örneği hariç, örneklerin tamamında ÖEA değerinin (4,20 Bq/L) altında analiz edildi. Analiz edilen ^{40}K 'ın aktivite derişimi, PNSW53 kodlu örnekte $5,30 \pm 0,35$ Bq/L, PNSW24 kodlu örnekte $5,10 \pm 0,33$ Bq/L ve PNSW72 kodlu örnekte $4,90 \pm 0,30$ Bq/L olarak bulundu. Bu sebeple incelenen su örneklerin tüketilmesinden kaynaklanan radyolojik risk değerlendirmesinde, ^{226}Ra ve ^{228}Ra radyonüklitinin aktivite derişimleri esas alındı.

4.1 Aktivite Derişim Bulguları

Tez kapsamında incelenen bütün su örneklerinde analiz edilen doğal radyonüklitler ile ilgili tanımlayıcı istatistiki bilgi, Tablo 4.1'de verildi. Bu radyonüklitlerin frekans dağılımı, Grafik 4.1'de, ortalama aktivite değerleri ile DSÖ tarafından tavsiye edilen kılavuz değerler in karşılaştırılması, Grafik 4.2'de ve USEPA tarafından belirlenen azami bulaşma (kontaminasyon) seviyesi ile karşılaştırılması, Grafik 4.3'te gösterildi.

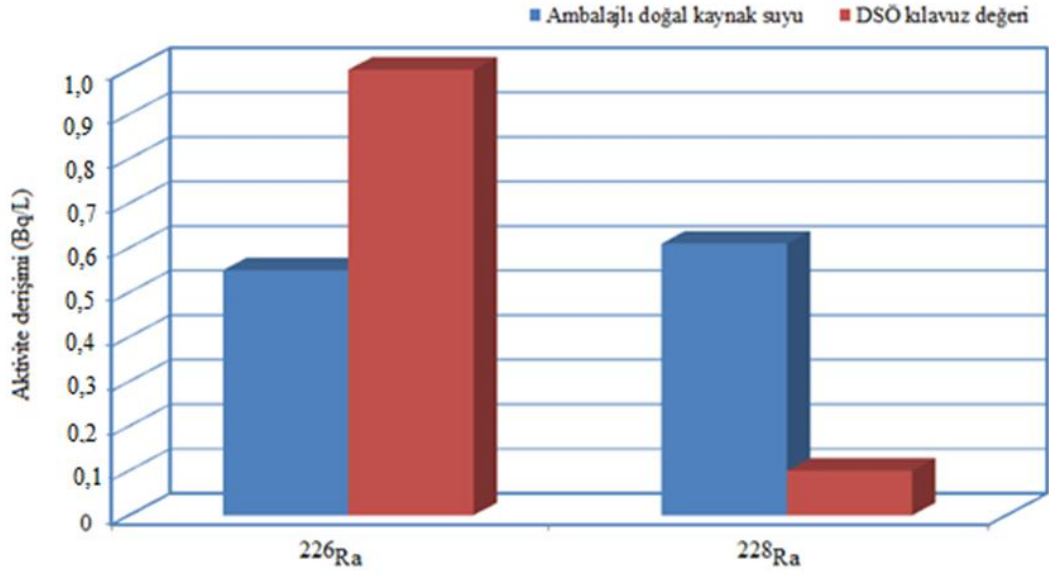
Tablo 4.1 Ambalajlı doğal kaynak su örneklerindeki radyonüklit derişimleri ile ilgili istatistiki bilgi

	Aktivite derişimi (Bq/L)	
	^{226}Ra	^{228}Ra
Ortalama	0,55	0,61
Medyan	0,52	0,54
Standart sapma	0,12	0,20
Standart hata	0,01	0,01
Basıklık	0,92	-1,00
Çarpıklık	1,23	0,65
En küçük	< ÖEA	< ÖEA
En büyük	0,91	1,04

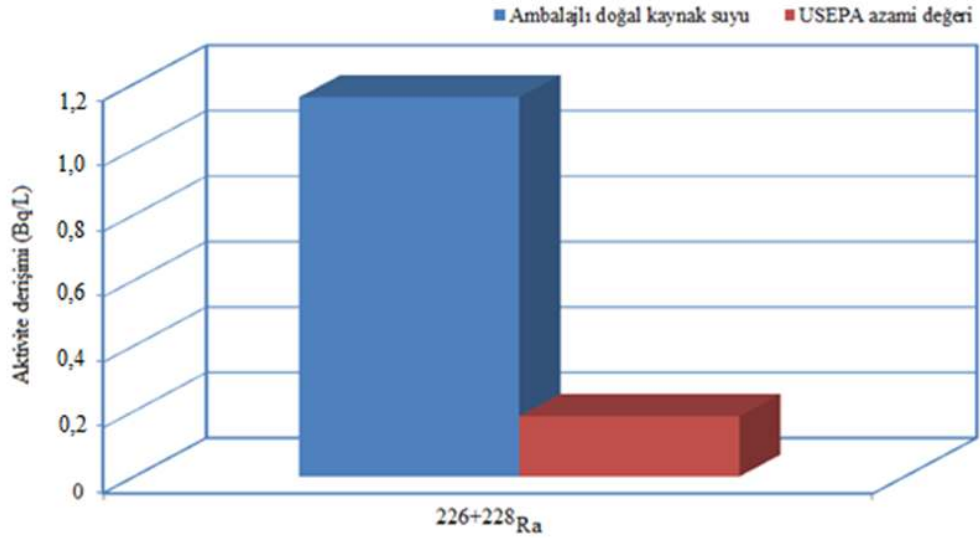


Grafik 4.1 Su örneklerinde analiz edilen radyum izotoplarının frekans dağılımı

Tablo 4.1'den, incelenen ambalajlı doğal kaynak suyu örneklerinde analiz edilen ^{226}Ra aktivite derişimi, ortalaması 0,55 Bq/L olmak üzere <ÖEA (0,18 Bq/L) ila 0,91 Bq/L aralığında ve ^{228}Ra aktivite derişimi ise ortalaması 0,61 Bq/L olmak üzere <ÖEA (0,21 Bq/L) ila 1,04 Bq/L aralığında değıştığı görülmektedir. Su örneklerinde ölçülen ^{228}Ra aktivite derişimlerinin yaklaşık %71'inin ^{226}Ra aktivite derişimlerinden daha büyüktür. ^{226}Ra 'nın en yüksek aktivite derişimi, Erzurum ilinden temin edilen PNSW71 kodlu su örneğinde ve ^{228}Ra 'nın en yüksek aktivite derişimi, Şanlıurfa ilinden temin edilen PNSW79 kodlu su örneğinde ölçüldü.



Grafik 4.2 Radyum izotoplarının ortalama aktivite derişimleri ile DSÖ'nün tavsiye ettiği rehber seviyelerin karşılaştırılması



Grafik 4.3 Radyum izotoplarının ortalama aktivite derişimleri ile USEPA'nın tavsiye ettiği azami kontaminasyon seviyesinin karşılaştırılması

Grafik 4.1'den, ^{226}Ra 'nın frekans dağılımı normal olmayan dağılım gösterirken ^{228}Ra 'nın frekans dağılımı normale yakın bir dağılım sergilediği görülmektedir. Su örneklerinde ÖEA'nın üzerinde analiz edilen ^{226}Ra 'nın aktivite derişimlerinin % 84'ü; 0,45 ila 0,65 Bq/L aralığında ve ^{228}Ra 'nın aktivite derişimlerinin % 76'sı; 0,40 ila 0,80 Bq/L aralığında ölçüldü.

Grafik 4.2'den, ÖEA'nın üzerinde analiz edilen ^{226}Ra 'nın aktivite derişimlerinin tamamının, DSÖ tarafından önerilen kılavuz değerden (1 Bq/L'den) daha küçük ve ^{228}Ra 'nin aktivite derişimlerinin tamamının da DSÖ tarafından önerilen kılavuz değerden (0,1 Bq/L'den) daha büyük olduğu görülebilir.

Grafik 4.3'ten, ÖEA'nın üzerinde analiz edilen radyum izotoplarının toplam ($^{226}+^{228}\text{Ra}$) aktivite derişimlerinin tamamının, USEPA tarafından önerilen azami kontaminasyon seviyesinden (0,185 Bq/L'den) daha büyük olduğu açıkça görülebilir.

Tablo 4.2, incelenen ambalajlı doğal kaynak suyu örneklerinde ölçülen radyum izotoplarının aktivite derişimleri ile dünyanın farklı ülkelerinde içme suyu olarak tüketilen farklı su gruplarında ölçülen değerlerin bir karşılaştırmasını sunmaktadır. Tablo 4.2'den, incelenen su örneklerindeki radyum izotoplarının aktivite derişimlerinin, Tunus ve Türkiye'de tüketilen şişenmiş maden suyu (BMW) hariç diğer su örneklerinden ölçülen değerlerin üzerinde olduğu anlaşılmaktadır.

Tablo 4.2 Farklı ülkelerde tüketilen ambalajlı içme sularındaki radyum izotoplarının aktivite derişimlerinin karşılaştırılması

Ülke	Su tipi	Aktivite derişimi (mBq/L)		Referans
		^{226}Ra	^{228}Ra	
Fas	BDW	1,0 - 3,4	1,6 - 3,6	Bazza vd., 2023
Polonya	BDW	< 3,0 - 641,0	< 20,0 - 250,0	Chmielewska vd., 2020
İsveç	BSW	2,5 - 38,0	7,9 - 52,0	García vd., 2021
Japonya	BMW	0,9 - 13,0	16,0 - 49,0	Kinahan vd., 2020
Bangladeş	BDW	31,1 - 86,4	22,6 - 71,0	Asaduzzaman vd., 2016
İtalya	BDW	0,5 - 60,8	0,1 - 25,7	Jia vd., 2009
Kanada	BDW	1,1 - 550,0	< 100,0	Tremblay-Cantin vd., 2024
Hırvatistan	BNSW	0,7 - 38,1	< 0,1 - 8,5	Rožmarić vd., 2012
Tunus	BDW	< 390,0 - 1770,0	< 380 - 1490	Ben Fredj vd., 2005
Türkiye	BNSW	30,0 - 430,0	-	Akar vd., 2009
Türkiye	BMW	< 200,0 - 700,0	< 300,0 - 1200,0	Altıkulaç vd., 2022
Türkiye	PNSW	< 170,0 - 546,1	< 190,0 - 613,3	Bu çalışma

BDW: Şişelenmiş İçme Suyu; BSW: Şişelenmiş Kaynak Suyu; BMW: Şişelenmiş Maden Suyu; BNSW: Şişelenmiş Doğal Kaynak Suyu; PNSW: Ambalajlı Doğal Kaynak Suyu

4.2 Radyum İzotoplarının Bölgesel Dağılımları

Karadeniz, Ege ve İç Anadolu Bölgelerinden temin edilen su örneklerindeki radyum izotop dağılımı, Tablo 4.3'te, Marmara Bölgesinden temin edilen su örneklerindeki radyum izotop dağılımı, Tablo 4.4'de ve Akdeniz, Doğu ve Güneydoğu Bölgelerinden temin edilen su örneklerindeki radyum izotop dağılımı, Tablo 4.5'te verildi. Coğrafi bölgelerdeki radyum izotoplarının ortalama değerleri ile DSÖ tarafından tavsiye edilen kılavuz değerler ile karşılaştırılması, Grafik 4.4'de ve USEPA tarafından belirlenen azami bulaşma (kontaminasyon) seviyesi ile karşılaştırılması, Grafik 4.5'te gösterildi.

Tablo 4.3, Tablo 4.4 ve Tablo 4.5'te verildiği gibi coğrafi bölgelerdeki radyum izotoplarının ortalama aktivite derişimleri ^{226}Ra için 0,58 Bq/L (KB); 0,54 Bq/L (EB) ve 0,51 Bq/L (İAB); 0,52 Bq/L (MB); 0,60 Bq/L (AK); 0,59 (DAB) ve 0,57 Bq/L (GAB); ^{228}Ra için 0,49 Bq/L (KB); 0,62 Bq/L (EB) ve 0,59 Bq/L (İAB); 0,67 Bq/L (MB); 0,57 Bq/L (AK); 0,63 (DAB) ve 0,61 Bq/L (GAB) olarak bulundu. Ambalajlı doğal kaynak suyu örneklerindeki radyum izotoplarının ortalama derişimlerine göre izotoplar, coğrafi bölgelere göre aşağıda verildiği gibi sıralandı:

^{226}Ra : İAB < MB < EB < GAB < KB < DAB < AB

^{228}Ra : KB < AB < İAB < GAB < EB < DAB < MB

Grafik 4.4'den, coğrafi bölgelerdeki ^{226}Ra 'nın aktivite derişimlerinin tamamının, DSÖ'nün kılavuz değerinin altında olduğu ve ^{228}Ra 'nın aktivite derişimlerinin tamamının da kılavuz değerin üzerinde olduğu görülebilir.

Grafik 4.5'ten, coğrafi bölgelerdeki radyum izotoplarının toplam ($^{226}+^{228}\text{Ra}$) aktivite derişimlerinin tamamının, USEPA'nın azami kontaminasyon seviyesinin üzerinde olduğu görülebilir.

Tablo 4.3 Karadeniz, Ege ve İç Anadolu Bölgelerinden temin edilen su örneklerindeki radyum izotop dağılımı

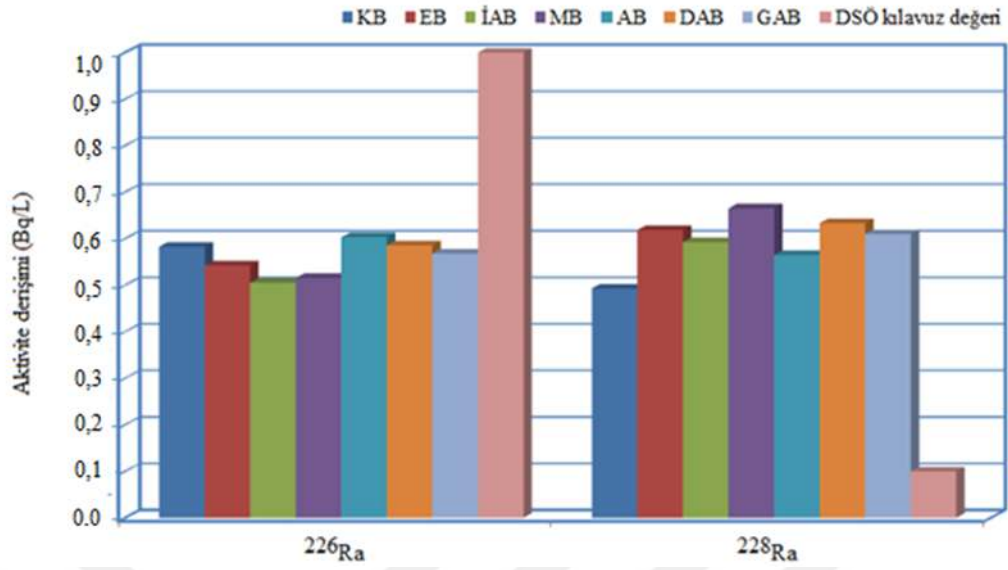
Örnek kodu	İl	Coğrafi Bölge	Aktivite derişimi (Bq/L)					
			²²⁶ Ra			²²⁸ Ra		
PNSW1	Bolu	Karadeniz Bölgesi (KB)	0,63	±	0,03	0,44	±	0,02
PNSW2	Bolu		0,74	±	0,03	0,46	±	0,02
PNSW3	Samsun		0,53	±	0,03	0,70	±	0,04
PNSW4	Samsun		0,46	±	0,02	0,52	±	0,03
PNSW5	Çorum		< ÖEA		< ÖEA	< ÖEA	±	< ÖEA
PNSW6	Tokat		0,70	±	0,04	0,45	±	0,03
PNSW7	Düzce		0,48	±	0,03	0,43	±	0,02
PNSW8	Düzce		0,46	±	0,02	0,42	±	0,03
PNSW9	Düzce		0,50	±	0,02	0,47	±	0,02
PNSW10	Giresun		0,81	±	0,04	0,45	±	0,02
PNSW11	Karabük		0,52	±	0,02	0,59	±	0,03
	Ortalama		0,58			0,49		
	En küçük		< ÖEA			< ÖEA		
	En büyük		0,81			0,70		
PNSW12	Denizli	Ege Bölgesi (EB)	0,69	±	0,03	1,02	±	5,00
PNSW13	Isparta		0,54	±	0,02	0,40	±	0,02
PNSW14	Isparta		0,43	±	0,02	0,54	±	0,03
PNSW15	Aydın		0,51	±	0,03	0,44	±	0,02
PNSW16	Aydın		< ÖEA	±	< ÖEA	0,72	±	0,03
PNSW17	Aydın		0,52	±	0,03	0,41	±	0,03
PNSW18	Kütahya		0,47	±	0,02	0,96	±	0,04
PNSW19	Kütahya		0,64	±	0,03	0,46	±	0,03
PNSW20	Muğla		< ÖEA		< ÖEA	< ÖEA		< ÖEA
	Ortalama		0,54			0,62		
	En küçük		< ÖEA			< ÖEA		
	En büyük		0,69			1,02		
PNSW21	Ankara	İç Anadolu Bölgesi (İAB)	0,54	±	0,02	1,01	±	0,05
PNSW22	Ankara		0,43	±	0,02	0,47	±	0,03
PNSW23	Ankara		0,55	±	0,03	0,40	±	0,02
PNSW24	Ankara		0,49	±	0,03	0,44	±	0,03
PNSW25	Kayseri		0,52	±	0,03	0,39	±	0,02
PNSW26	Kayseri		0,58	±	0,03	0,62	±	0,03
PNSW27	Kırşehir		0,47	±	0,03	0,60	±	0,03
PNSW28	Konya		0,46	±	0,03	0,81	±	0,04
	Ortalama		0,51			0,59		
	En küçük		0,43			0,39		
	En büyük		0,58			1,01		

Tablo 4.4 Marmara Bölgesinden temin edilen su örneklerindeki radyum izotop dağılımı

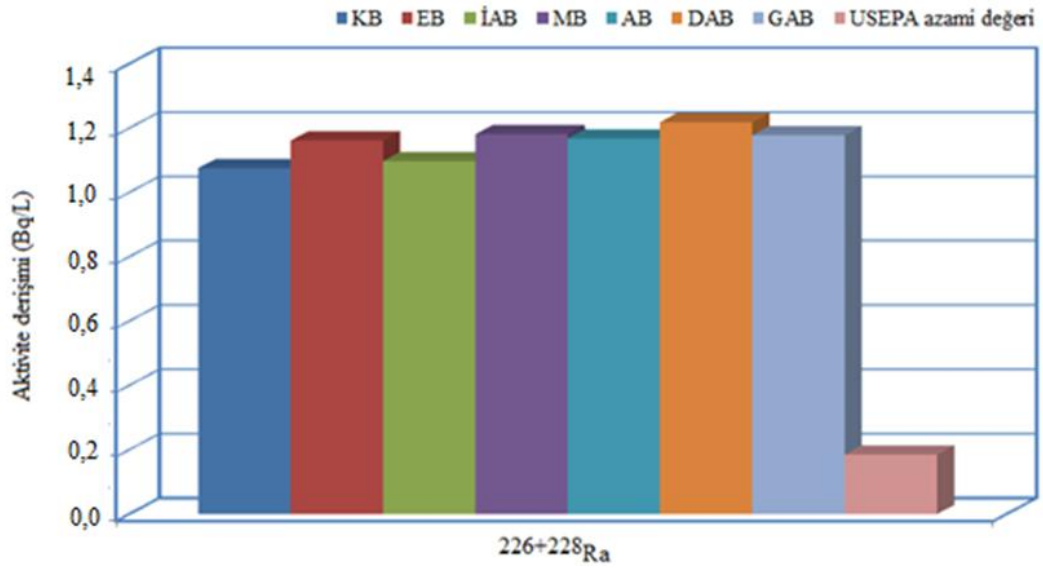
Örnek kodu	İl	Coğrafi Bölge	Aktivite derişimi (Bq/L)					
			²²⁶ Ra			²²⁸ Ra		
PNSW29	İstanbul	Marmara Bölgesi (MB)	0,53	±	0,02	0,74	±	0,03
PNSW30	İstanbul		0,43	±	0,02	0,84	±	0,04
PNSW31	İstanbul		0,48	±	0,02	0,45	±	0,02
PNSW32	İstanbul		0,67	±	0,03	0,74	±	0,03
PNSW33	İstanbul		0,64	±	0,03	0,46	±	0,02
PNSW34	Sakarya		0,42	±	0,03	0,91	±	0,04
PNSW35	Sakarya		0,47	±	0,02	0,94	±	0,04
PNSW36	Sakarya		0,52	±	0,03	0,44	±	0,02
PNSW37	Sakarya		0,76	±	0,04	0,47	±	0,02
PNSW38	Sakarya		0,46	±	0,03	0,70	±	0,04
PNSW39	Sakarya		0,48	±	0,02	0,60	±	0,03
PNSW40	Sakarya		0,37	±	0,02	0,46	±	0,03
PNSW41	Sakarya		0,42	±	0,02	0,74	±	0,03
PNSW42	Sakarya		0,48	±	0,03	0,41	±	0,02
PNSW43	Sakarya		0,45	±	0,02	0,74	±	0,03
PNSW44	Sakarya		0,54	±	0,03	0,60	±	0,03
PNSW45	Bursa		0,49	±	0,02	0,69	±	0,03
PNSW46	Bursa		0,41	±	0,02	0,87	±	0,04
PNSW47	Bursa		0,43	±	0,02	0,91	±	0,04
PNSW48	Bursa		0,44	±	0,02	0,89	±	0,04
PNSW49	Bursa		0,39	±	0,02	0,60	±	0,03
PNSW50	Bursa		0,84	±	0,04	0,47	±	0,03
PNSW51	Bursa		< ÖEA			< ÖEA		
PNSW52	Bursa		0,44	±	0,02	0,97	±	0,04
PNSW53	Bursa		0,64	±	0,03	0,50	±	0,03
PNSW54	Kocaeli		0,57	±	0,02	0,74	±	0,03
PNSW55	Kocaeli		0,45	±	0,02	0,40	±	0,02
PNSW56	Tekirdağ		0,76	±	0,04	0,94	±	0,05
PNSW57	Tekirdağ		0,46	±	0,02	0,41	±	0,02
Ortalama			0,52			0,67		
En küçük			< ÖEA			< ÖEA		
En büyük			0,84			0,97		

Tablo 4.5 Akdeniz, Doğu ve Güneydoğu Bölgelerinden temin edilen su örneklerindeki radyum izotop dağılımı

Örnek kodu	İl	Coğrafi Bölge	Aktivite derişimi (Bq/L)					
			²²⁶ Ra			²²⁸ Ra		
PNSW58	Adana	Akdeniz Bölgesi (AK)	0,56	±	0,03	0,40	±	0,02
PNSW59	Osmaniye		0,82	±	0,04	0,46	±	0,02
PNSW60	Osmaniye		0,61	±	0,03	0,44	±	0,02
PNSW61	Osmaniye		0,43	±	0,02	0,66	±	0,03
PNSW62	Osmaniye		0,78	±	0,03	0,84	±	0,03
PNSW63	Antalya		0,42	±	0,02	0,59	±	0,03
	Ortalama		0,60			0,57		
	En küçük		0,42			0,40		
	En büyük		0,82			0,84		
PNSW64	Mardin	Doğu Anadolu Bölgesi (DAB)	0,47	±	0,02	0,89	±	0,04
PNSW65	Bingöl		0,49	±	0,03	0,45	±	0,02
PNSW66	Bingöl		0,59	±	0,03	0,97	±	0,04
PNSW67	Malatya		0,58	±	0,03	0,46	±	0,02
PNSW68	Malatya		< ÖEA			< ÖEA		
PNSW69	Tunceli		0,47	±	0,02	0,43	±	0,02
PNSW70	Erzurum		0,64	±	0,03	0,69	±	0,03
PNSW71	Erzurum		0,91	±	0,04	0,47	±	0,02
PNSW72	Erzurum		0,55	±	0,03	0,94	±	0,04
PNSW73	Erzurum		0,57	±	0,03	0,40	±	0,02
	Ortalama		0,59			0,63		
	En küçük		< ÖEA			< ÖEA		
	En büyük		0,91			0,97		
PNSW74	Adıyaman	Güneydoğu Anadolu Bölgesi (GAB)	0,51	±	0,03	0,43	±	0,02
PNSW75	Diyarbakır		0,45	±	0,02	0,62	±	0,03
PNSW76	Diyarbakır		< ÖEA			< ÖEA		
PNSW77	Diyarbakır		< ÖEA			< ÖEA		
PNSW78	Şanlıurfa		0,86	±	0,04	0,82	±	0,03
PNSW79	Şanlıurfa		0,57	±	0,03	1,04	±	0,05
PNSW80	Şanlıurfa		< ÖEA			< ÖEA		
PNSW81	Mardin		0,54	±	0,03	0,29	±	0,02
PNSW82	Siirt		0,48	±	0,03	0,46	±	0,02
	Ortalama		0,57			0,61		
	En küçük		< ÖEA			< ÖEA		
	En büyük		0,86			1,04		



Grafik 4.4 Coğrafi bölgelerdeki radyum izotoplarının ortalama aktivite derişimleri ile DSÖ kılavuz seviyelerin karşılaştırılması



Grafik 4.5 Coğrafi bölgelerdeki radyum izotoplarının ortalama aktivite derişimleri ile DSÖ kılavuz seviyelerin karşılaştırılması

4.3 Radyolojik Risk Değerlendirme Bulguları

Bu çalışmada radyolojik sağlık risk, araştırılan su örneklerinde analiz edilen radyum izotoplarının aktivite derişimlerini esas alarak, yıllık su tüketim miktarlarına göre aşağıda verilen beş farklı senaryo için değerlendirildi: **Birinci senaryo:** Türkiye'deki yıllık ambalajlı veya şişelenmiş su tüketimi. **İkinci senaryo:** DSÖ tarafından önerilen yıllık içme suyu tüketimi (WHO, 2011). **Üçüncü senaryo:** Avrupa Birliği tarafından

önerilen yıllık içme suyu tüketimi (EU Council Directive, 2013). **Dördüncü senaryo:** USEPA tarafından önerilen yıllık içme suyu tüketimi (USEPA, 2004). **Beşinci senaryo:** UNSCEAR ve ICRP tarafından önerilen yıllık içme suyu tüketimi (ICRP, 2002; UNSCEAR; 2008;). Söz konusu senaryolar için tahmini olarak hesaplanan yıllık etkin radyasyon doz (E) değerlerinin ortalama ve aralık (en küçük-en büyük) değerleri Tablo 4.6'da ve bunlara karşılık gelen yaşam boyu kanser riski (KR) değerleri de Tablo 4.7'de verildi. Ayrıca, KR risklerinin uzaysal dağılımı, Harita 4.1'de gösterildi.

Tablo 4.6'dan da görülebileceği gibi E değerleri, geniş bir aralıkta değişmektedir. Birinci senaryoda, toplam E değerleri, ortalaması 73 μSv olmak üzere 45 μSv ile 114 μSv aralığında değişmektedir. Radyum izotoplarının, E değerlerine katkısı ^{226}Ra için %28 ve ^{228}Ra için %72 olarak bulundu. PNSW18, PNSW21, PNSW52, PNSW56, PNSW62, PNSW66, PNSW72, PNSW78 ve PNSW79 kodlu su örnekleri hariç diğer örnekler için bulunan E değerleri, DSÖ (WHO, 2022), Türk Su Yönetmeliği (RG, 2005) ve AB Direktifinde (EC, 1998) önerilen 100 μSv 'lik bireysel doz ölçütü veya toplam gösterge doz değerinin altındadır. Bu dokuz PNSW örneği için tahmin edilen E'ler, bireysel doz ölçütünden %1- %14 daha yüksektir. Diğer dört senaryo için ortalama E değerleri; 409 μSv (700 L için); 224 μSv (400 L için); 280 μSv (500 L için) ve 268 μSv (477 L için) olarak hesaplandı. Dolayısıyla farklı kuruluşlar tarafından önerilen yıllık içme suyu tüketimine göre tahmin edilen ortalama E değerlerinin, bireysel doz ölçütünden veya toplam gösterge doz değerinden daha yüksektir.

Tablo 4.7'de verilen birinci senaryoda, toplam KR değerleri, kanserojen hastalık riski için ortalaması $1,7 \times 10^{-4}$ olmak üzere $9,9 \times 10^{-5}$ ile $2,6 \times 10^{-4}$ aralığında ve kanserojen olmayan hastalık için $2,3 \times 10^{-4}$ olmak üzere $1,4 \times 10^{-5}$ ile $3,7 \times 10^{-4}$ aralığında değişmektedir. Diğer dört senaryo için ortalama KR değerleri, kanserojen hastalık riski için $9,3 \times 10^{-4}$ (700 L için); $5,1 \times 10^{-4}$ (400 L için); $6,4 \times 10^{-4}$ (500 L için) ve $6,1 \times 10^{-4}$ (477 L için) olarak ve kanserojen olmayan hastalık riski için $1,3 \times 10^{-3}$ (700 L için); $7,2 \times 10^{-4}$ (400 L için); $9,0 \times 10^{-4}$ (500 L için) ve $8,6 \times 10^{-4}$ (477 L için) olarak hesaplandı.

Tablo 4.6 Senaryolara göre radyum izotoplarının sindirilmesinden kaynaklanan yıllık etkin radyasyon değerleri

Senaryo/Yıllık su tüketimi (L)		E (μSv)		
		²²⁶ Ra	²²⁸ Ra	Total
Birinci/130	Ortalama	20	53	73
	En küçük	14	25	45
	En büyük	33	91	114
İkinci/730	Ortalama	112	299	409
	En küçük	76	142	252
	En büyük	186	509	640
Üçüncü/400	Ortalama	61	164	224
	En küçük	41	78	138
	En büyük	102	279	351
Dördüncü/500	Ortalama	77	205	280
	En küçük	52	97	173
	En büyük	127	348	438
Beşinci/477	Ortalama	73	196	268
	En küçük	49	93	165
	En büyük	122	332	418

Tablo 4.7 Senaryolara göre radyum izotoplarının sindirilmesinden kaynaklanan yaşam boyu kanser riski değerleri

Senaryo/ Yıllık su tüketimi (L)		KR					
		Kanserojen			Kanserojen olmayan		
		²²⁶ Ra	²²⁸ Ra	Total	²²⁶ Ra	²²⁸ Ra	Total
Birinci/ 130	Ortalama	4,0×10 ⁻⁵	1,3×10 ⁻⁴	1,7×10 ⁻⁴	5,8×10 ⁻⁵	1,8×10 ⁻⁴	2,3×10 ⁻⁴
	En küçük	2,7×10 ⁻⁵	6,0×10 ⁻⁵	9,9×10 ⁻⁵	4,0×10 ⁻⁵	8,4×10 ⁻⁵	1,4×10 ⁻⁴
	En büyük	6,7×10 ⁻⁵	2,1×10 ⁻⁴	2,6×10 ⁻⁴	9,7×10 ⁻⁵	3,0×10 ⁻⁴	3,7×10 ⁻⁴
İkinci/ 730	Ortalama	2,3×10 ⁻⁴	7,1×10 ⁻⁴	9,3×10 ⁻⁴	3,3×10 ⁻⁴	9,9×10 ⁻⁴	1,3×10 ⁻³
	En küçük	1,5×10 ⁻⁴	3,3×10 ⁻⁴	5,6×10 ⁻⁴	2,2×10 ⁻⁴	4,7×10 ⁻⁴	7,9×10 ⁻⁴
	En büyük	3,8×10 ⁻⁴	1,2×10 ⁻³	1,5×10 ⁻³	5,5×10 ⁻⁴	1,7×10 ⁻³	2,1×10 ⁻³
Üçüncü/ 400	Ortalama	1,2×10 ⁻⁴	3,9×10 ⁻⁴	5,1×10 ⁻⁴	1,8×10 ⁻⁴	5,4×10 ⁻⁴	7,2×10 ⁻⁴
	En küçük	8,4×10 ⁻⁵	1,8×10 ⁻⁴	3,1×10 ⁻⁴	1,2×10 ⁻⁴	2,6×10 ⁻⁴	4,3×10 ⁻⁴
	En büyük	2,1×10 ⁻⁴	6,6×10 ⁻⁴	8,0×10 ⁻⁴	3,0×10 ⁻⁴	9,2×10 ⁻⁴	1,1×10 ⁻³
Dördüncü/ 500	Ortalama	1,5×10 ⁻⁴	4,8×10 ⁻⁴	6,4×10 ⁻⁴	2,2×10 ⁻⁴	6,8×10 ⁻⁴	9,0×10 ⁻⁴
	En küçük	1,0×10 ⁻⁴	2,3×10 ⁻⁴	3,8×10 ⁻⁴	1,5×10 ⁻⁴	3,2×10 ⁻⁴	5,4×10 ⁻⁴
	En büyük	2,6×10 ⁻⁴	8,2×10 ⁻⁴	1,0×10 ⁻³	3,7×10 ⁻⁴	1,2×10 ⁻³	1,4×10 ⁻³
Beşinci/ 477	Ortalama	1,5×10 ⁻⁴	4,6×10 ⁻⁴	6,1×10 ⁻⁴	2,1×10 ⁻⁴	6,5×10 ⁻⁴	8,6×10 ⁻⁴
	En küçük	1,0×10 ⁻⁴	2,2×10 ⁻⁴	3,6×10 ⁻⁴	1,5×10 ⁻⁴	3,1×10 ⁻⁴	5,2×10 ⁻⁴
	En büyük	2,5×10 ⁻⁴	7,8×10 ⁻⁴	9,6×10 ⁻⁴	3,6×10 ⁻⁴	1,1×10 ⁻³	1,4×10 ⁻³



Harita 4.1 Birinci senaryo için hesaplanan toplam kanser risk değerlerinin mekânsal dağılımı

4.4 Sonuç ve Öneriler

Daha önce de ifade edildiği gibi bu çalışmanın temel amacı, Türkiye'de tüketilen ve farklı ülkelere ihraç edilen ticari ambalajlı doğal kaynak sularının radyolojik kalitesi hakkında ilk kez kapsamlı bir araştırma yapmaktır. Ayrıca, çalışmanın kapsamı, incelenen su örneklerinde ölçülen radyum izotoplarının sindirilmesiyle oluşan radyolojik sağlık risklerini değerlendirmek için yıllık etkin radyasyon dozu ve yaşam boyu kanser risklerini tahmin etmek üzere genişletilmiştir.

Tez kapsamındaki ambalajlı doğal kaynak suyu örnekleri için yapılan radyoaktivite analiz sonuçları,

- 1) ^{228}Ra 'in aktivite derişimlerinin, DSÖ tarafından önerilen kılavuz değerden 3–10 kat daha büyük,
- 2) toplam radyoizotopların ($^{226+228}\text{Ra}$) aktivite derişimlerinin, USEPA tarafından önerilen azami kontaminasyon seviyesinden 4-11 kat daha büyük ve
- 3) ^{226}Ra 'in aktivite derişimlerinin, DSÖ tarafından önerilen kılavuz değerden daha küçük olduğunu ortaya koymuştur.

Radyolojik risk değerlendirme sonucunda,

1) birinci senaryo için hesaplanan ortalama yıllık etkin radyasyon değerin, DSÖ dokümanlarında, Türk Su Yönetmeliğinde ve AB Direktifinde önerilen bireysel doz ölçütü veya toplam gösterge doz değerinin altında olduğu,

2) diğer dört senaryo için hesaplanan ortalama yıllık etkin radyasyon değerlerinin bireysel doz ölçütünden veya toplam gösterge doz değerinden 2-4 kat daha yüksek olduğu ve

3) ikinci senaryo hariç tüm senaryolar için yaşam boyu kanser risk değerlerinin, gıda ve içme suyu alımına eşlik eden ve uzun vadeli kanser etkileri açısından önemli olan $1,2 \times 10^{-3}$ dünya ortalamasının altında olduğu kayıt edilmelidir.

Aslında, bireysel doz ölçütler, nüfusun içme suyu kullanımının güvenliğini sağlamak için kesin yerliliği göstermeyen ancak doz azaltımının gerekliliğini gösteren temel bir referans eşiği görevi görür. Dolayısıyla doz ölçütleri, kullanılan referanslara bağlı olarak değişebilir. Örneğin, Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı ve ICRP, doz ölçütü olarak 300 μSv 'i önermektedir. İkinci senaryo hariç diğer senaryolar dikkate alındığında, bütün toplam kanser risk değerleri, USEPA tarafından eyleme geçmek için önerilen sınırın eşiğinde olan 10^{-4} 'e yaklaşmaktadır. Bu durum, Türkiye'de güvenli içme suyu sağlamak için ticari olarak satılan içme sularının radyonüklit derişimlerinin izlenmesinin önemini vurgulamaktadır.

Sonuç olarak, bu çalışmada elde edilen sonuçlar ve yapılan değerlendirmeler, su kaynaklarındaki doğal radyonüklitlere uzun süreli maruz kalmanın, potansiyel sağlık etkilerini anlamak için devam eden izleme, sıkı düzenleme ve daha fazla araştırmanın önemini vurgulamaktadır. Bu çalışma, Türkiye'deki ilgili kurum ve kuruluşlara önemli veriler ve parametreler sunarak, bilinçli kararlar almalarını ve DSÖ tarafından belirlenen hedef ve ilkelerle uyumlu güvenli içme suyu için stratejiler uygulamalarını sağlamaktadır. Bu çalışmada elde edilen veriler, ileriye dönük olarak çevresel radyoaktivitenin değerlendirilmesine ve ambalajlı doğal kaynak sularındaki radyonüklit derişimleri ile ilgili yasal mevzuatın veya standartların hazırlanmasına yönelik olarak kullanılabilecek yol gösterici bilgi mahiyetindedir.

KAYNAKLAR

- Abojassim, A. A., Kadhim, S. H., Mraity, H. A. A., & Munim, R. R. (2017). Radon levels in different types of bottled drinking water and carbonated drinks in Iraqi markets. *Water Supply*, 17(1), 206–211.
- Abugoufa, H.A.A. (2019). Adana Bölgesinde Yetişen Yer Fıstığı (*Arachis hypogaea* L.) Örneklerinin Radyonüklit, Ana Element ve Ağır Metal İçeriklerinin Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, *Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Kastamonu.
- Akar, U., Gurler, O., Kahraman, A., Yalcin, S., Kaynak, G., & Gundogdu, O. (2009). Measurements of radium levels in bottled natural spring water of Marmara region (Turkey). *Romanian Journal of Physics*, 57, 1204–1210.
- Altıkulaç, A., Kurnaz, A., Turhan, Ş., & Kutucu, M. (2022). Natural radionuclides in bottled mineral waters consumed in turkey and their contribution to radiation dose. *ACS Omega*, 7(38), 34428–34435.
- Asaduzzaman, Kh., Mannan, F., Khandaker, M.U., Farook, M.S., Elkezza, A., Amin, Y. M., & Sharma, S. (2016). Natural radioactivity levels in commercialized bottled drinking water and their radiological quality assessment. *Desalination and Water Treatment*, 57(26), 11999–12009.
- Aydın, E. (2023). Türkiye’de Ticari Olarak Satılan Şişelenmiş Doğal Kaynak Sularının İçerdiği Radon Gazının Aktivite Konsantrasyonunun Belirlenmesi ve Radon Kaynaklı Radyolojik Riskin Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, *Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Kastamonu.
- Bazza, A., Rhiyourhi, M., Marhou, A., & Hamal, M. (2023). Assessment of natural radioactivity in Moroccan bottled drinking waters using gamma spectrometry. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(11), 1–10.
- Ben Fredj, A., Hizem, N., Chelbi, M., & Ghedira, L. (2005). Quantitative analysis of gamma-ray emitters radioisotopes in commercialised bottled water in Tunisia. *Radiation Protection Dosimetry*, 117(4), 419–424.
- Brugge, D., & Buchner, V. (2012). Radium in the environment: exposure pathways and health effects. *Reviews on Environ Health*, 27(1), 1–17.
- Chmielewska, I., Chalupnik, S., Wysocka, M., & Smolinski, A. (2020). Radium measurements in bottled natural mineral-, spring- and medicinal waters from Poland. *Water Resources and Industry*, 24, 1–11.
- Chowdhury, M.I., Islam, S., Hossain, M.A., & Ferdous, J., Bakshi, P.K. (2024). Radioactivity levels, spatial distribution, and radiological risk assessment of ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{40}K , and ^3H in water samples from Dhaka city and Savar, Bangladesh. *ACS Omega*, 9(40), 41236–41249.

- Ćirić, S., Milošević, B., Spasić, Z., Ilić, Z., & Prodanović, D. (2018). Bottling spring water from a Serbian mountain. *Polish Journal of Environmental Studies*, 27(2), 597–607.
- Dekhissi, H., Didi, A., Dekhissi, I., Derkaoui, J.E., & Yjjou, M. (2024). The first investigation on the radiotoxicity risks associated with ingesting radium in drinking water from the Oujda Region-Morocco and some bottled mineral waters. *Applied Radiation and Isotopes*, 210, 1–6.
- Dizman, S., & Mukhtarli, O. (2021). Tritium concentrations and consequent doses in bottled natural and mineral waters sold in Turkey and Azerbaijan. *Chemosphere* 267,
- EC (European Communities), (1998). Council Directive 98/83/EC of 3 November 1998 on the quality of water intended for human consumption. Official Journal of the European Communities L 330/32.
- EU Council Directive, (2013). 2013/51/EURATOM of 22 October 2013 laying down requirements for the protection of the health of the general public with regard to radioactive substances in water intended for human consumption Official J. Eur. Commun. L296/12 7 November 2013.
- Fonollosa, E., Peñalver, A., Borrull, F., & Aguilar, C. (2016). Radon in spring waters in the south of Catalonia. *Journal of Environmental Radioactivity*, 151, 275–281.
- García, F.P., Thomas, R., Mantero, J., Forssell-Aronsson, E., & Isaksson, M. (2021). Radiological impact of naturally occurring radionuclides in bottled water. *Food Control* 130, 1–9.
- Goshu, B.S., Abasa, E., & Woldeamanuel, M.M. (2023). Assessment of the natural radioactivity of bottled drinking water produced in dire dawa, Ethiopia. *Romanian Journal of Biophysics*, 33(3), 89–103.
- ICRP (International Commission on Radiological Protection), (2012). Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60. ICRP Publication 119. Ann. ICRP 41(Suppl.) Published by Elsevier Ltd.
- Jia, G., Torri, G., & Magro, L. (2009). Concentrations of ²³⁸U, ²³⁴U, ²³⁵U, ²³²Th, ²³⁰Th, ²²⁸Th, ²²⁶Ra, ²²⁸Ra, ²²⁴Ra, ²¹⁰Po, ²¹⁰Pb and ²¹²Pb in drinking water in Italy: reconciling safety standards based on measurements of gross alpha and beta. *Journal of Environmental Radioactivity*, 100(11), 941–949.
- Kasić, A., Kasumović, A., Adrović, F., & Hodžić, M. (2016). Radon measurements in well and spring water of the Tuzla area, Bosnia and Herzegovina. *Archives of Industrial Hygiene and Toxicology*, 67, 332–339.
- Kinahan, A., Hosoda, M., Kelleher, K., Tsujiguchi, T., Akata, N., Tokonami, S., & Vintρό, L.L. (2020). Assessment of radiation dose from the consumption of bottled drinking water in Japan. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(14), 1–12.

- Kiro, Y., Weinstein, Y., Starinsky, A., & Yechieli, Y. (2015). Application of radon and radium isotopes to groundwater flow dynamics: An example from the Dead Sea. *Chemical Geology*, 411, 155–171.
- Kitto, M.E., Parekh, P.P., Torres, M.A., & Schneider, D. (2005). Radionuclide and chemical concentrations in mineral waters at Saratoga Springs, New York. *Journal of Environmental Radioactivity*, 80(3), 327–339.
- Knoll G.F. (2000). *Radiation detection and measurements*. 3rd ed., New York: John Wiley & Sons.
- Krane, K.S. (1987). *Introductory nuclear physics*. 2nd ed., New York: John Willey & Sons.
- Kurnaz, A., Turhan, Ş., Alzaridi, F. M. N. S., & Bakır, T. K. (2021). Radiological and physicochemical aspects of drinking waters consumed in the Western Black Sea Region of Turkey. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 328, 805–814.
- Labidi, S., & Gharbi, S. (2018). Dose assessment to members of the public in Tunisia from intakes of some naturally occurring radionuclides in bottled mineral water. *International Journal of Radiation Research*, 16(3), 371–381.
- Lin, L., Yang, H., & Xu, X. (2022). Effects of water pollution on human health and disease heterogeneity: A review. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 1–16.
- Mangeret, A., Reyss, J.L., Seder-Colomina, M., Stetten, L., Morin, G., Thouvenot, A., Souhaut, M., & van Beek, P. (2020). Early diagenesis of radium 226 and radium 228 in lacustrine sediments influenced by former mining sites. *Journal of Environmental Radioactivity*, 222, 1–10.
- Martínez, J., Peñalver, A., Riu, J., Aguilar, C., & Borrull, F. (2024). Radiological characterization related to lithology and risk assessment of bottled natural mineral water. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196, 1–16.
- Ong, J.X., Kok, J.Z.I., Lee, K.K.M., Chng, K.R., Wu, Y., & Chan, J.S.H. (2025). Evaluation of tritium, gross alpha and gross beta radioactivity levels in tap and bottled drinking water in Singapore. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 334, 667–677.
- Özçıtak, E. (2012). Nevşehir ili ve ilçelerinde tüketilen içme ve kaplıca sularındaki radyoaktivitenin ölçülmesi. Yüksek Lisans Tezi, *Nevşehir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Nevşehir.
- Petraccia, L., Liberati, G., Masciullo, S. G., Grassi, M., & Fraioli, A. (2006). Water, mineral waters and health. *Clinical Nutrition*, 25, 377–385.
- Popkin, B.M., D'Anci, K.E., & Rosenberg, I.H. (2010). Water, hydration, and health. *Nutrition Reviews*, 68(8), 439–458.

- Pourfadakari, S., Dobaradaran, S., De-la-Torre, G. E., Mohammadi, A., Saeedi, R., & Spitz, J. (2022). Evaluation of occurrence of organic, inorganic, and microbial contaminants in bottled drinking water and comparison with international guidelines: a worldwide review. *Environmental Science and Pollution Research International*, 29(37), 55400–55414.
- RG (Resmi Gazete) (2005). İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik. Resmi Gazete, sayı: 25730, tarih:17 Şubat 2005.
- Rožmarić M, Rogić M, Benedik L, Strok M. 2012. Natural radionuclides in bottled drinking waters produced in Croatia and their contribution to radiation dose. *Science of the Total Environment*, 437, 53–60.
- Saba, A. (2024). Assessment of Drinking Water Quality: Its Health and Marketing Impacts. MPRA Paper 120870, University Library of Munich, Germany.
- Salam, M.A., & Sultana, N. (2022). Pollution of water resources, Editor(s): Ashwani Kumar Tiwari, Amit Kumar, Abhay Kumar Singh, T.N. Singh, Enrico Suozzi, Gagan Matta, Stefano Lo Russo, Current Directions in Water Scarcity Research, Elsevier, Volume 5, 2022, pp. 355–378.
- Salehipour, A., Eslami, A., Mirzaee, M., Bolori, F., Saghi, M., Bahmani, Z., & Hashemi, M. (2020). Spatial distributions of natural radionuclide concentrations of bottled mineral water: doses estimation and health risk assessment. *Environmental Health Engineering and Management Journal*, 7(2), 107–117.
- Seid, A.M.A., Turhan, Ş., Kurnaz, A., Bakır, T.K., & Hançerlioğulları, A. (2022). Radon concentration of different brands of bottled natural mineral water commercially sold in Turkey and radiological risk assessment. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 102(19), 7469–7481.
- Semerjian, L., Alrajaby, H., Naaz, N., Kasfah, R., Dalah, E. Z., Waheed, E., Nabalssi, A., & Metwally, W. A. (2020). Age-dependent effective ingestion dose estimations and lifetime risk assessment for selected radionuclides (^{40}K and ^3H) in bottled waters marketed in United Arab Emirates. *Chemosphere*, 249, 1–5.
- Seoud, M. S. (2017). Measurement of radon-222 concentration in bottled natural mineral drinking water in Kuwait using the nuclear track detector (CR-39). *International Journal of Physics*, 5, 201-207.
- SUDER (Türkiye'deki Ambalajlı Su Üreticileri Derneği) (2025). Suder-İstatistik: <https://suder.org.tr/ambalajli-su/istatistik> Erişim Tarihi; 16/03/2025.
- Sultan, D. A. O. (2020). Kastamonu'da Yetiştirilen Siyez (Triticum monococcum L.) Buğdayının Radyonüklit, Esansiyel ve Ağır Metal İçeriklerinin Tahribatsız Analiz Yöntemi ile Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, *Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Kastamonu.
- Temirci, A. T. (2017). Kastamonu'da kullanılan yapı malzemelerinde doğal olarak bulunan radyonüklitlerin (^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Th , ^{222}Rn ve ^{40}K) aktivite derişimlerinin

ve bu malzemelerin radon salım hızlarının ölçülmesi. Yüksek Lisans Tezi, *Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Kastamonu.

Tomita, J., Zhang, J., & Yamamoto, M. (2014). Radium isotopes ((226)Ra and (228)Ra) in Na-Cl type groundwaters from Tohoku District (Aomori, Akita and Yamagata Prefectures) in Japan. *Journal of Environmental Radioactivity*, 137, 204–212.

Tremblay-Cantin, J.C., Martin, L., Proulx, M., Priest, N.D., & Larivière, D. (2024). Levels of naturally occurring radioisotopes in local and imported bottled drinking water available in Québec City, Canada. *Journal of Environmental Radioactivity*, 274, 1–11.

Turhan, Ş., Kurnaz, A., & Aydın, E. (2023). Assessment of internal radiation exposure caused by radon in commercially bottled spring waters consumed in Turkey. *International Journal of Environmental Health Research*, 34 (2), 1215–1226.

UNSCEAR (2008). Sources and effects of ionizing radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, *United Nations Publication*, New York, USA, 2010.

USEPA (United States Environmental Protection Agency), (2012). Edition of the Drinking Water Standards and Health Advisories. EPA 822-S-12-001. Washington, DC.

USEPA (United States Environmental Protection Agency), (2004). Estimated per capita water ingestion and body weight in the United States—an update 2004 (Washington, DC: Office of Science and Technology) EPA-822-R-00-001.

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

WHO (World Health Organization), (2011). Guidelines for Drinking-water Quality, Fourth edition WHO Library Cataloguing-in-Publication Data NLM classification, 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.

Zhou, Z., Zhao, X., & Cornett, R.J. (2019). An AMS method for measurement of Radium-226 in drinking water. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 455, 271–275.

Zriba, N. A. EM. (2019). Kapadokya Bölgesinde Tüketilen Ambalajlı Suların Radyolojik ve Kimyasal Özelliklerinin Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, *Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Kastamonu.