

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



**TÜRKİYE'DE TİCARİ OLARAK SATILAN ŞİŞELENMİŞ
DOĞAL KAYNAK SULARININ İÇERDİĞİ RADON GAZININ
AKTİVİTE KONSANTRASYONUNUN BELİRLENMESİ VE
RADON KAYNAKLI RADYOLOJİK RİSKİN
DEĞERLENDİRİLMESİ**

EROL AYDIN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

PROF. DR. ŞEREF TURHAN

HAZİRAN - 2023

KASTAMONU

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.

Erol AYDIN

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TÜRKİYE'DE TİCARİ OLARAK SATILAN ŞİŞELENMİŞ DOĞAL KAYNAK SULARININ İÇERDİĞİ RADON GAZININ AKTİVİTE KONSANTRASYONUNUN BELİRLENMESİ VE RADON KAYNAKLI RADYOLOJİK RİSKİN DEĞERLENDİRİLMESİ

EROL AYDIN

KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANA BİLİM DALI

DANIŞMAN: PROF. DR. ŞEREF TURHAN

Yeraltı sularından elde edilen şişelenmiş kaynak suları, belediye su kaynaklarından sağlanan musluk sularından daha güvenli olduğu inancı nedeniyle Türkiye'de giderek daha fazla tüketilmektedir. Doğal uranyum serisinde bulunan radon renksiz, kokusuz ve radyoaktif bir gazdır. Toprak ve kayadaki radon gazı yer altı su kaynaklarına geçebilir ve suda çözünür. İçme suyuyla alınan radonun, mide çeperine önemli ölçüde radyasyon dozu verebilmesinden dolayı su kaynaklarındaki çözünmüş radon seviyelerinin değişimi, ilgi çekici olmaya devam etmektedir. Bu çalışma, Türkiye'de ticari olarak satılan ve tüketilen şişelenmiş kaynak sularının radon seviyelerini belirlemeyi ve bu suların sindirilmesi ve sulardaki radon gazının solunmasından kaynaklanan iç ışınlamayı değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Bu amaca yönelik Türkiye'de en çok tüketilen seksen üç markaya ait şişelenmiş kaynak suyu örneklerindeki radonun aktivite derişimi bir radon gazı monitörü (Alpha GUARD PQ 2000PRO) kullanılarak ölçüldü. Şişelenmiş kaynak sularında ölçülen radon aktivite konsantrasyonları, ortalaması $14,8 \pm 0,6$ mBq/L olmak üzere $3,2 \pm 0,8$ mBq/L – $28,7 \pm 2,7$ mBq/L aralığındadır. Araştırılan şişelenmiş kaynak suyu örneklerinde ölçülen radon seviyesi, Avrupa Komisyonu (AK) ve Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı tarafından içme suları için tavsiye edilen 100 Bq/L ve 11,1 Bq/L azami radon seviyesinin çok altındadır. Şişelenmiş kaynak suyu örneklerindeki radonun sindirilmesinden ve solunmasından kaynaklanan toplam yıllık etkin radyasyon dozu (TYERD), yıllık içme suyu tüketimine dayalı olarak dört farklı senaryoda üç yaş grubu (bebekler, çocuklar ve yetişkinler) için iç ışınlamayı değerlendirmek amacıyla tahmini olarak hesaplandı. Ayrıca TYERD'e eşlik eden yaşam boyu kanser riski (YBKR) yetişkinler için hesaplandı. TYERD değerleri, sular hakkındaki AK direktifinde ve Sağlık Bakanlığı tarafından hazırlanan içme suyu yönetmeliğinde belirlenen bireysel doz ölçütü olan 100 μ Sv değerinden önemli ölçüde düşüktür. Dolayısıyla çalışmada elde edilen sonuçlar, araştırılan şişelenmiş kaynak suyu örneklerinin tüketilmesinin, Türk halkı için önemli bir radyolojik sağlık riski oluşturmadığını gösterdi.

ANAHTAR KELİMELEER: Şişelenmiş doğal kaynak suyu, radon, i işınlama, yıllık etkin doz, yaşam boyu kanser riski, radon gazı monitörü

Haziran 2023, 62 Sayfa



ABSTRACT

MSC THESIS

DETERMINATION OF ACTIVITY CONCENTRATION OF RADON GAS CONTAINED IN COMMERCIALY SOLD BOTTLED NATURAL SPRING WATERS IN TURKEY AND EVALUATION OF RADON-INDUCED RADIOLOGICAL RISK

EROL AYDIN

KASTAMONU UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

DEPARTMENT OF PHYSICS

SUPERVISOR: PROF. DR. ŞEREF TURHAN

Bottled spring water obtained from underground waters is increasingly consumed in Turkey due to the faith in the safer than tap waters supplied from municipal water sources. Radon, which occurs in the natural uranium series, is a colorless, odorless, and radioactive gas. Radon gas in soil and rock can move into underground water sources and dissolve in water. The variation of dissolved radon levels in water supplies remains of interest since radon ingested through drinking water can give considerable radiation to the lining of the stomach. This study aims to determine the radon levels of commercially sold and consumed bottled spring waters in Turkey and to evaluate the internal exposure caused by the ingestion of these waters and inhalation of air containing degassed radon from the waters. For this aim, the activity concentration of radon in bottled spring water samples belonging to the eighty-three most consumed brands in Turkey was measured using a radon gas monitor (Alpha GUARD PQ 2000PRO). The activity concentrations of radon measured in bottled spring water samples varied from 3.2 ± 0.8 to 28.7 ± 2.7 mBq/L with an average of 14.8 ± 0.6 mBq/L. The radon level measured in the investigated bottled spring water samples is well below the maximum radon levels of 100 Bq/L and 11.1 Bq/L for drinking water recommended by the European Commission (EC) and the United States of America Environmental Protection Agency, respectively. The total annual effective radiation dose (TAERD) caused by the ingestion and inhalation of radon in bottled spring water samples was estimated to evaluate internal irradiation for three age groups (infants, children, and adults) in four different scenarios based on annual drinking water consumption. Also, the excess lifetime time cancer risk (ELTCR) associated with TAERD was calculated for adults. The values of TAERD are significantly lower than 100 μ Sv, which is the individual dose criterion determined in the EC directive on waters and the drinking water regulation prepared by the Ministry of Health. Therefore, the results obtained in the study revealed that the consumption of the investigated bottled spring water samples did not pose a significant radiological health risk for the Turkish people.

KEYWORDS:Bottled natural spring water, radon, internal exposure, annual effective dose, excess lifetime cancer risk, radon gas monitor

June 2023, 62 Page



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 saygılarımla teşekkür ederim.

Örneklerin radon ölçümlerini başarıyla gerçekleştiren Fizik Bölümü Öğretim Üyesi Doç. Dr. Aslı KURNAZ'a çok teşekkür ederim.

Örneklerin yerlerini gösteren haritayı hazırlayan İnsan ve Toplum Bilimleri Fakültesi Coğrafya Bölüm Başkanı Doç. Dr. Celalettin DURAN'a teşekkür ederim.

Tez kapsamında yapılan bu çalışma, Kastamonu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından KÜ-BAP01/2020-7 kodlu proje ile desteklenmiştir. Bu bağlamda, proje çalışanlarına ve BAP Koordinatörlüğüne teşekkür ederim.

Çalışmanın ilerleyişi sırasında gösterdiği nazik denetim ve rehberlik için Fizik Bölüm Başkanlığına ve Prof. Dr. Aybaba HANÇERLİOĞULLARI'na içtenlikle teşekkür ederim.

Aileme sevgi ve destekleri için minnettarım ve bu çalışmayı benim için çok kıymetli olan aileme ithaf ediyorum.

EROL AYDIN

Kastamonu, 2023

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEZ ONAYI	ii
TAAHHÜTNAME	iii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
TABLolar DİZİNİ	xi
GRAFİKLER DİZİNİ	xii
FOTOĞRAFLAR DİZİNİ	xiii
HARİTALAR DİZİNİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Değerlendirmesi	4
1.2 Tezin Kapsamı.....	14
1.3 Tezin Amacı	14
1.4 Tezin Yapısı	15
2. KURAMSAL BİLGİ	17
2.1 Radyoaktivite.....	17
2.2 Radyasyon	19
2.2.1 İyonlaştırıcı Radyasyonun Madde ile Etkileşmesi.....	20
2.2.2 İyonlaştırıcı Radyasyonun Biyolojik Etkileri	21
2.3 İyonlaştırıcı Radyoaktif Kaynakları	24
2.4 Radon ve Analiz Teknikleri.....	29
3. MALZEME VE YÖNTEM	34
3.1 Su Örneklerinin Toplanması	34
3.2 Su Örneklerinin Radon Analizi	34
4. BULGULAR, TARTIŞMA VE SONUÇ	39
4.1 Radon Aktivite Konsantrasyonu.....	39
4.2 Radyolojik Risk Değerlendirmesi	42
4.3 Sonuç	52
KAYNAKLAR	53
ÖZGEÇMİŞ.....	62

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 Uranyum radyoaktif serisi	27
Şekil 2.2 Toryum radyoaktif serisi	28
Şekil 2.3 Radonun bozunum şeması	31
Şekil 3.1 Radon analiz düzeneğinin şematik gösterimi	38



TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 1.1 Türkiye'deki şişelenmiş içme suyuna ilişkin istatistiksel bilgiler.....	2
Tablo 2.1 Farklı iyonlaştırıcı radyasyonlar için kalite faktör değerleri	23
Tablo 2.2 Doğal radyoaktif serilere ait olmayan terestriyal radyonüklitler	26
Tablo 4.1 Şişelenmiş kaynak suyu örneklerinin radon aktivite konsantrasyonuna ilişkin bazı tanımlayıcı istatistiksel veriler	39
Tablo 4.2 Şişelenmiş kaynak suyu örneklerinin radon aktivite seviyeleri.....	40
Tablo 4.3 ŞKS örneklerinde analiz edilen radon konsantrasyonunun literatür ve sınır değerler ile karşılaştırılması	42
Tablo 4.4 Birinci senaryoya ait sindirim için hesaplanan yıllık etkin radyasyon dozları	45
Tablo 4.5 İkinci senaryoya ait sindirim için hesaplanan yıllık etkin radyasyon dozları	46
Tablo 4.6 Üçüncü senaryoya ait sindirim için hesaplanan yıllık etkin radyasyon dozları	47
Tablo 4.7 Dördüncü senaryoya ait sindirim için hesaplanan yıllık etkin radyasyon dozları	48
Tablo 4.8 Solunum için hesaplanan yıllık etkin radyasyon dozları	49
Tablo 4.9 Toplam yıllık etkin radyasyon dozları	50
Tablo 4.10 Yaşam boyu kanser riski değerleri.....	51

GRAFİKLER DİZİNİ

Sayfa

Grafik 2.1 Doğal radyoaktiviteden kaynaklanan ortalama yıllık etkin radyasyon doz dağılım	25
Grafik 4.1 Radon aktivite derişimin frekans dağılımı.. ..	41



FOTOĞRAFLAR DİZİNİ

Sayfa

Fotoğraf 3.1 AquaKIT aksesuarı ile birlikte AlphaGuard radon monitörü36



HARİTALAR DİZİNİ

Sayfa

Harita 3.1 Örnekleme alanlarının dağılımını gösteren harita.....	35
--	----



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

A	: Aktivlik
²⁴¹ Am	: Amerikyum-241
Bq	: Becquerel (Bekerel)
²¹⁴ Bi	: Bizmut-214
¹⁴ C	: Karbon-14
Ci	: Curie
⁶⁰ Co	: Kobalt-60
¹³⁴ Cs	: Sezyum-134
¹³⁷ Cs	: Sezyum-137
g	: Gram
⁶⁷ Ga	: Galyum-67
Gy	: Gray
h	: Saat
³ H	: Tritiyum
¹³¹ I	: İyot-131
¹¹¹ In	: İndiyum-111
¹⁹² Ir	: İridyum-192
⁴⁰ K	: Potasyum-40
kg	: Kilogram (10 ³ g)
L	: Litre
¹³⁸ La	: Lantan-138
¹⁷⁶ Lu	: Luteryum-176
MeV	: Milyon elektron volt
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
³² P	: Fosfor-32
²¹⁰ Pb	: Kurşun-210
²¹⁴ Pb	: Kurşun-214
¹⁴⁷ Pm	: Prometyum-147
²¹⁴ Po	: Polonyum-214
²¹⁸ Po	: Polonyum-218
²³⁸ Pu	: Plütonyum-238
²³⁹ Pu	: Plütonyum-239
R	: Röntgen
rem	: Röntgen equivalent man
rad	: Radiation absorbed dose
⁸⁷ Rb	: Rubidyum
²²⁶ Ra	: Radyum-226
²¹⁹ Rn	: Aktinon

²²⁰ Rn	: Toron
²²² Rn	: Radon
s	: Saniye
¹⁴⁷ Sm	: Samaryum-147
⁸⁹ Sr	: Strontium-89
⁹⁰ Sr	: Strontium-90
Sv	: Sievert
^{99m} Tc	: Teknesyum-99m
²³² Th	: Toryum-232
²⁰¹ Tl	: Talyum-201
t	: zaman
²³⁵ U	: Uranyum-235
²³⁸ U	: Uranyum-238
WLM	: Working level month
y	: Yıl
Z	: Atom numarası
λ	: Bozunma sabiti
α	: Alfa parçacığı
β	: Beta parçacığı
γ	: Gama ışını

Kısaltmalar

AK	: Avrupa Konseyi
ABDÇKA	: Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı
DSÖ	: Dünya Sağlık Örgütü
PET	: Polietilen tereftalat
ŞKS	: Şişelenmiş kaynak suyu
UNSCEAR	: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation
USA EPA	: United States of America Environmental Protection Agency
WHO	: World Health Organization
YERD _{SIN}	: Yıllık etkin radyasyon dozu (sindirim)
YERD _{SOL}	: Yıllık etkin radyasyon dozu (solunum)
TL	: Türk Lirası
TYERD	: Sindirilmesi ve solunmasından kaynaklanan toplam yıllık etkin radyasyon dozu

1. GİRİŞ

Su, canlıların yaşamını sürdürebilmesi için gerekli ve vazgeçilmezdir çünkü canlılar su olmadan yaşayamazlar. Bu yüzden dünyada yaşayan her insanın yeterli, güvenli, temiz ve erişilebilir bir içme suyu kaynağına sahip olması temel bir insan hakkıdır ve mümkün olduğunca güvenli içme suyu elde etmek için her türlü çaba gösterilmelidir. İçme suyunun, hidro-elektrolitik, ısıl ve asit-baz dengesinin sağlanmasının yanı sıra tüketilen gıdalardaki besinlerin sindirimi, çözünmesi, emilmesi ve atılması gibi birçok önemli işlevi vardır (Petraccia vd., 2006). İnsanların sağlıklı bir yaşam sürmesi için gerekli olan günlük su ihtiyacı 1,5 veya 2 litredir (Piñero García vd., 2021). Ancak bu ihtiyaç yaşa, iklime, fiziksel aktiviteye ve sağlık durumuna bağlı olarak önemli ölçüde değişiklik gösterebilir (Seid, 2020).

İnsani tüketim amaçlı sular, yüzey suları (akarsular, nehirler, göletler vb.), yer altı suları (akiferler, sondajlar, kuyular vb.), yağış (yağmur, kar, dolu) ve benzeri su kaynaklarından sağlanmaktadır. Şehirlerde içme suyu olarak kullanılan şebeke veya musluk suları, genellikle ana nehir veya akarsu üzerine kurulan barajlardan veya göletlerden ve yüzey su kaynaklarından sağlanmaktadır (Seid, 2020). Bununla birlikte dünya nüfusunun yaklaşık üçte birinin içme suyu olarak yer altı sularını kullandığı tahmin edilmektedir (Altıkulaç vd., 2022; Singla vd., 2023; Turhan ve Kurnaz, 2022). Ticari olarak satılan ambalajlanmış veya şişelenmiş sular, tüketicinin musluk suyundan daha lezzetli, daha sağlıklı, daha kaliteli ve mineraller açısından daha zengin olduğuna inancı sebebiyle dünya çapında önemli bir içme suyu kaynağı hâline gelmiştir (Pourfadakari vd., 2022; Rožmarić vd., 2012; Semerjian vd., 2020). Şişelenmiş sular, su soğutucular için boyutları küçük tek kullanımlık şişelerden büyük damacanalara kadar değişebilen plastik veya cam su şişelerinde paketlenmiş içme sularıdır. Ticari olarak satılan şişelenmiş içme suları, doğal kaynak sularını, maden (mineralli) sularını ve işlenmiş içme sularını kapsar. Şişelenmiş doğal kaynak ve mineralli sular, açılan kuyulardan çıkarılan yeraltı suları ve serbest akan kaynak sularından temin edilmektedir. Şişelenmiş içme suları karbonatlı da olabilir. Şişelenmiş içme suyu tüketimi, son yıllarda başta Avrupa olmak üzere tüm dünyada her yıl artmaktadır (Rožmarić vd., 2012; Seid vd., 2022). T.C. Sağlık Bakanlığı

tarafından hazırlanan ve 25730 sayılı ve 17 Şubat 2005 tarihli Resmi Gazetede yayınlanan İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelikte 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. Sağlık Bakanlığı tarafından izinli ambalajlı su listesinde 369 firma ticari faaliyet göstermektedir (URL-1, 2023). Türkiye'de şişelenmiş içme suyu sektörü ile son sekiz yıla ilişkin istatistiksel bilgiler, Tablo 1.1'de sunulmaktadır (URL-2, 2023). Tablo 1.1'den de görülebileceği gibi pandemi nedeniyle üretim ve tüketimdeki düşüşe rağmen son iki yılda şişelenmiş içme suyu tüketiminde artış olmuştur.

Tablo 1.1 Türkiye'deki şişelenmiş içme suyuna ilişkin istatistiksel bilgiler

	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022 (Tahmini)
Toplam Üretim (Milyar Litre)	10,9	11,3	11,7	12,1	11,6	10,5	11,1	11,7
Damacana 19 L (Milyar Litre)	6,4	6,4	6,4	6,5	6,4	5,9	6,1	6,4
PET&Cam üretimi (Milyar Litre)	4,5	4,9	5,3	5,6	5,3	4,6	4,9	5,3
Pazar büyüklüğü (Milyar TL)	4,9	5,4	5,7	7,1	7,7	7,4	9,3	12,7
Kişi Başı Tüketim / Yıl	144	148	149	150	140	126	131	139
Büyüme (%)	2,5%	4,0%	3,1%	3,7%	-4,0%	-9,4%	5,6%	5,7%
Toplam ihracat (Ton)	264,813	407,571	424,988	417,023	440,038	369,790	385,453	404,726

İçme suları, insan sağlığına zarar verebilecek düzeyde radyonüklitler (radyoaktif elementler) içerebilir (WHO, 2011). Genel olarak bu riskler, içme suyunda bulunabilen mikroorganizmalar ve kimyasallardan kaynaklanan risklerden daha küçüktür (WHO, 2011). İçme suyundaki radyoaktivite, doğal ve yapay kaynaklardan gelir. Doğal radyoaktif kaynaklar, terestriyal (yer kabuğu kökenli) uranyum (^{238}U) ve toryum (^{232}Th) radyoaktif serisindeki radyonüklitler ile radyoaktif potasyum izotopunu (^{40}K) ve kozmojenik radyonüklitleri (^3H , ^7Be vb.) içerir. Yapay radyoaktif

kaynaklar, tıpta, tarımda ve endüstriyel faaliyetlerde ve atmosferik nükleer silah denemelerinde farklı amaçlarla kullanılan radyonüklitleri ve nükleer santral kazalarından sonra doğrudan atmosfere salınan radyonüklitleri (^3H , ^{14}C , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{89}Sr , ^{90}Sr , ^{131}I , ^{239}Pu , ^{241}Am vb.) içermektedir (Zriba, 2019). Ancak özel bir durum olmadıkça içme sularının yapay radyonüklit içerikleri doğal radyonüklit içeriklerine göre ihmal edilebilir düzeydedir (WHO, 2011). İçme sularındaki doğal radyonüklit seviyeleri, suyun aktığı toprak ve kayaçların jeokimyasal yapısına, kayaların aşınma derecesine, redoks koşullarına, suyun bu topraklarla temas süresine ve radyonüklitin çözünürlüğü gibi birçok parametreye bağlıdır (Özçitak, 2012). Yer altı suları ile taşınan yukarıda bahsedilen radyonüklitler gıda zincirine, doğrudan içme suyu olarak kullanılan yer altı suları ve dolaylı olarak tarla bitkilerinin sulanmasında kullanılan yer altı veya yüzey suları aracılığıyla girerler (Özçitak, 2012).

Doğal kaynak suları, yeraltından, özellikle derin akiferlerden geldikleri için, yüzey sularından daha yüksek seviyelerde doğal radyonüklitler içerebilir. Bu nedenle kuyu ve sondaj kuyularından çıkan yer altı suları, radon (^{222}Rn) gazını yüzey sularına göre daha yüksek seviyede içermektedir. Çünkü su, çevresindeki jeolojik ortamla daha fazla zaman ve süreyle temas hâlinde, çözünmüş radonun kaçamadığı kapalı bir sistem içindedir ve ^{222}Rn 'nin çözünürlüğü artan sıcaklıkla azalır (Nayak vd., 2022; Singla vd., 2023). Renksiz, kokusuz, tatsız ve alfa radyasyonu yayınlayan ve radyoaktif asil gaz olan radonun üç ana izotopu, uranyum, toryum ve aktinyum doğal radyoaktif serilerde oluşur. Bu üç izotop; radon (yarı ömür: 3.824 gün), toron (^{220}Rn , yarı ömür: 55.6 s) ve aktinon (^{219}Rn , yarı ömür: 3,96 s) olarak isimlendirilir. ^{220}Rn ve ^{219}Rn , yarı ömürlerinin çok kısa olması ve düşük aktivite nedeniyle radyolojik açıdan ihmal edilebilir düzeydedir. ^{222}Rn , litosferde bulunan uranyum serisindeki radyum (^{226}Ra) radyonüklitinin alfa bozunmasıyla oluşur. ^{222}Rn , temas ettiği kaya ve topraklardan çözünme ve difüzyon sonucu veya suda çözünmüş ^{226}Ra 'nın bozunması sonucu suya girer. ^{222}Rn , doğal ortamlardan insan vücuduna ulaşmak için yeterince uzun bir radyoaktif yarı ömre sahiptir. Yer altı sularındaki ^{222}Rn konsantrasyonu (derişimi), radyoaktivite düzeyi, su ile temas hâlindeki kayaçların litolojisi ve morfolojisi, su akışı ve suyun kayalarla temas süresi ve gaz giderme ve radyoaktif bozunma nedeniyle sudan ^{222}Rn kaybı gibi faktörlere bağlı olarak büyük ölçüde değişir (Singla vd., 2023). ^{222}Rn ve kısa ömürlü bozunma ürünleri polonyum (^{218}Po ,

yarı ömür: 3,05 dakika ve ^{214}Po , yarı ömür: 164 mikrosaniye), kurşun (^{214}Pb , yarı ömür: 26,8 dakika) ve bizmut (^{214}Bi , yarı ömür: 19,9 dakika), doğal kaynaklardan dolayı insanın maruz kaldığı iyonlaştırıcı radyasyona en önemli katkı veren radyolojik öneme sahiptir radyonüklitlerdir (Abuelhia, 2019; Singla vd., 2023). ^{222}Rn içeren suların sindirilmesi (tüketilmesi) sonucunda, sindirim sisteminin dokuları ve organları, ^{222}Rn ve bozunma ürünlerinden yayınlanan alfa ve beta ışınları gibi iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalır. Bu maruziyet ise mide kanseri ve gastrointestinal hastalık riskinin artmasına sebep olur. (Auvinen vd., 2005; Nayak vd., 2022). Bu nedenle, içme suyundaki ^{222}Rn konsantrasyonunun doğru analizi, halk sağlığı üzerindeki radyolojik riski değerlendirmek için önemli ve gereklidir. Bu nedenle, çeşitli su türlerinde (yer altı suyu, musluk suyu, kaynak suyu, maden suyu vb.) ^{222}Rn konsantrasyonunun ölçülmesine yönelik çalışmalar, birçok ülkede içme suyunda ^{222}Rn seviyesinin izlenmesi amacıyla devam etmektedir.

1.1 Literatür Değerlendirmesi

Bu kısımda, ülkemizde ve dünyanın farklı bölgelerinde içme suyu olarak tüketilen yer altı suyu, musluk suyu, yüzey suyu, şişlenmiş doğal kaynak suyu ve şişelenmiş doğal maden sularındaki radon seviyesinin belirlenmesi ile ilgili yapılan çalışmalar, aşağıda verildiği gibi kronolojik olarak değerlendirildi ve özetlendi.

Baykara ve Dogru (2006), Kuzey ve Doğu Anadolu Fay Sistemleri (NAFS ve EAFS) üzerinden toplanan farklı su örneklerindeki radon aktivite konsantrasyonunu, CR-39 pasif dedektörlerini içeren pasif yöntem ile ölçmüştür.

Yalım vd. (2007), Afyonkarahisar ve çevresindeki Akşehir fay zonu yakınlarındaki kuyu sularından toplanan yer altı suyu örneklerindeki radon aktivite konsantrasyonunu, Packard Tri-Carb 2770TR/SL model sıvı sintilasyon analiz cihazı ile belirlemiş ve su örneklerindeki radon aktivite seviyelerinin, 0,7 Bq/L – 31,7 Bq/L aralığında değiştiğini bulmuştur.

Oner vd. (2009), Amasya ilinden, Orta Karadeniz bölgesinin iç kesimlerinden ve Amasya il merkezinden geçen Yeşilırmak nehrinden toplanan su örneklerindeki

radon aktivite konsantrasyonunu, WG-1001 Vakumlu Su Gaz Giderme Sistemi ve AB-5R Radyasyon Monitörü kullanarak ölçülmüştür.

Akar vd. (2009), Türkiye’de ticari olarak satılan şişelenmiş doğal kaynak sularındaki radyum aktivite konsantrasyonunu, aktif radon monitörü (AlphaGUARD) kullanarak belirlenen radon konsantrasyonundan ölçmüş ve su örneklerinde ölçülen ^{226}Ra (^{222}Rn)’nin aktivite seviyelerinin, 0,03 Bq/L – 0,43 Bq/L aralığında değiştiğini bulmuştur.

Yigitoglu vd. (2010), Tokat (Türkiye) ilinden toplanan örneklerindeki radon aktivite konsantrasyonunu ölçmüş ve musluk suyu örneklerindeki radon aktivite seviyelerinin, 0,5 Bq/L – 1,3 Bq/L aralığında değiştiğini bulmuştur.

Beyermann vd. (2010), Almanya’da tüketilen beş yüz altmış dört adet içme suyu örneğindeki bazı doğal radyonüklitlerin yanı sıra radonun aktivite konsantrasyonunu ölçmüş ve analiz edilen su örneklerinin tüketilmesi sebebiyle yetişkin bir bireylerin maruz kalabileceği yıllık etkin radyasyon dozunun büyük bir kısmının, ^{222}Rn , ^{228}Ra , ^{210}Po ve ^{210}Pb radyonüklitlerden ileri geldiğini bulmuştur.

Walencik vd. (2010), Dış Karpatlar (Polonya) bölgesinde bulunan yer altı maden suları ve kaynak sularındaki radon aktivite konsantrasyonunu, silikon yüzey engelli alfa spektrometrik teknikleri kullanarak ölçmüş ve su örneklerinde ölçülen radon aktivite seviyelerinin, < 1 Bq/L – 50 Bq/L aralığında değiştiğini bulmuştur.

Yalcin vd. (2011), Kastamonu (Türkiye) ilinde tüketilen doğal kaynak ve musluk suyu örneklerindeki radon aktivite konsantrasyonunu, AlphaGUARD radon gazı analiz cihazı ile belirmiş ve doğal kaynak ve musluk sularındaki radon aktivite seviyelerinin, sırasıyla 0,4 Bq/L – 12,7 Bq/L ve 0,4 Bq/L – 9,3 Bq/L aralığında değiştiğini bulmuştur.

Al Zabadi vd. (2012), Filistin’in Nablus ilinde tüketilen içme suyu örneklerindeki radon konsantrasyonunu, aktif radon ölçme sistemi (RAD7) kullanarak ölçmüş ve ana kaynaklarda, kaynak, kuyu sularında ve musluk sularında ölçülen ortalama radon

aktivite konsantrasyonunu, sırasıyla 6,9 Bq/L, 4,6 Bq/L, 9,5 Bq/L ve 1,0 Bq/L olarak bulmuştur.

Akar vd. (2012), Türkiye'nin Bursa ilindeki çeşitli jeolojik oluşum sahalarındaki kuyulardan temin edilen yirmi yedi adet kuyu ve on dokuz adet musluk suyu örneklerindeki radon konsantrasyonunu, AlphaGUARD PQ 2000PRO radon gazı analiz cihazı kullanarak ölçmüştür.

Campos vd. (2010), Minas Gerais (Brezilya) Eyaleti'nde yer alan Araxá'daki Termas de Araxá kaplıca suyu örneklerindeki radon konsantrasyonlarını, katı-hal nükleer iz dedektörleri (Makrofol E) kullanarak ölçülmüş ve radon seviyelerinin, 258 Bq/m³ – 1634 Bq/m³ aralığında değiştiğini bulmuştur.

Kadhim vd. (2012), Babil'in Hilla ilinde (Irak) yirmi iki bölgeden toplanan yer altı suyu örneğindeki radon konsantrasyonunu, elektronik radon dedektörü (RAD7) kullanarak ölçülmüş ve yer altı suyu örneklerindeki ortalama radon aktivite seviyesini 2,49 Bq/L olarak bulmuştur.

Nasir ve Shah (2012), Kulachi (Pakistan) şehrinde içme suyu olarak kullanılan yirmi adet musluk suyu, gölet suyu ve kuyu suyu örneklerindeki radon aktivite konsantrasyonunu, katı-hal nükleer iz dedektörleri (CR-39, Columbia Resin-39) kullanarak ölçülmüş ve bu suların tüketilmesine eşlik eden yıllık etkin radyasyon dozunu hesaplamıştır.

Todorovic vd. (2012), Novi Sad (Sırbistan) ilinde halka açık çeşmeden, şişelenmiş içme suyundan ve musluk suyundan alınan örneklerdeki radon aktivite konsantrasyonunu, aktif yöntem (RAD7) ile ölçmüş ve bazı su örneklerinde ölçülen radon aktivite seviyesinin, 100 Bq/L'yi aştığını belirlemiştir.

Yuce ve Gasparon (2013), Türkiye'nin Orta Batı Anadolu bölgesinde yer alan Eskişehir ilinin su kaynaklarındaki radon aktivite konsantrasyonunu belirlemiştir.

Abojassim ve Shitake (2013), Al-Necef (Irak) ilinde tüketilen içme suyundaki radon konsantrasyonunu, aktif radon ölçme sistemi (RAD7) kullanarak ölçmüş ve radon aktivite seviyelerinin, $2,4 \text{ Bq/m}^3 - 225,5 \text{ Bq/m}^3$ aralığında değiştiğini bulmuştur.

Erdogan vd. (2013), Konya bölgesindeki termal toplanan on adet termal su örneğindeki radon aktivite konsantrasyonunu, radon gazı analizörü (AlphaGUARD) kullanarak belirlemiş, ilkbahar ve yaz aylarında ölçülen radon aktivite seviyelerinin, sırasıyla $0,6 \text{ kBq/m}^3 - 70,3 \text{ kBq/m}^3$ ve $0,7 \text{ kBq/m}^3 - 36,5 \text{ kBq/m}^3$ aralığında değiştiğini bulmuştur.

Sola vd. (2013), Ratchaburi (Tayland) iline bağlı Suan Phueng bölgesindeki bir kaplıca alanında üretilen kaplıca suyu ve şişelenmiş maden suyu örneklerindeki radon aktivite konsantrasyonlarını, iyonlaşma odası dedektörü kullanılarak belirlemiş ve maden suyundaki radon aktivite seviyesinin, $17 \text{ Bq/L} - 22 \text{ Bq/L}$ aralığında değiştiğini bulmuştur.

Amin (2014), Libya'nın güneyinde tüketilen içme sularındaki radon aktivite konsantrasyonunu, CR-39 dedektörleri kullanarak ölçmüş ve farklı su kuyularından temin edilen içme suyu örneklerindeki ortalama radon seviyesini $3,46 \text{ Bq/L}$ olarak belirlemiştir.

Bonotto (2014), São Paulo ve Minas Gerais (Brezilya) eyaletlerine bağlı on dört beldede bulunan ve halka açık yerlerde içme, şişeleme ve banyo amacıyla yaygın olarak kullanılan yetmiş beş adet maden suyu kaynağındaki radon ve toron (^{220}Rn) aktivite konsantrasyonunu, RAD-H₂O aksesuarına bağlı RAD7 alfa parçacık dedektörü kullanılarak ölçmüş ve içme suyu olarak kullanılan Villela ve Dona Beja adlı iki kaynak suyunda ölçülen radon aktivite seviyesinin, WHO tarafından önerilen 100 Bq/L seviyesini aştığını gözlemiştir.

Elzain (2014), Kassala (Sudan) Eyaleti'nde farklı yerlerden ve halkın kullandığı içme suyu kaynaklarından toplanan içme su örneklerindeki radon aktivite konsantrasyonlarını, katı hal nükleer iz dedektörleri kullanarak ölçmüş ve su örneklerinde ölçülen ortalama radon aktivite seviyesini, $15,9 \text{ Bq/L}$ olarak bulmuştur.

Iranmanesh vd. (2014), Kerman (İran) da bulunan Kouhbanan fay zone bölgesindeki otuz dokuz adet içme suyu kaynağından toplanan kaynak suyu örneklerindeki radon aktivite konsantrasyonlarını, RAD7 aktif radon ölçme sistemi kullanarak ölçmüş ve altı su örneğinin radon aktivite seviyesinin, EPA tarafından önerilen sınır değeri olan 11,1 Bq/L'den daha büyük olduğunu bulmuştur.

Pinti vd. (2014), Montreal ve Quebec City (Kanada) arasındaki bölgeden toplanan yüz doksan sekiz yer altı suyu örneğindeki radon aktivite konsantrasyonunu, alfa sintilasyon sayacı kullanarak ölçmüş ve yer altı suyu örneklerinin %90'ında ölçülen radon aktivite seviyesinin, DSÖ tarafından önerilen 100 Bq/L'den daha düşük olduğunu bulmuştur.

Ravikumar ve Somashekar (2014), Bangalore (Hindistan) bölgesi, Güney Deccan Platosunun kalbinde ve Karnataka Eyaleti'nin güneydoğu köşesinde yer alan Sankey Tankı ve Mallathahalli Gölü bölgelerinden toplanan yer altı ve yüzey suyu örneklerindeki radon konsantrasyon dağılımını, RAD7 radon monitörü kullanılarak belirlemiştir.

Tabar ve Yakut (2014), Marmara Bölgesi'nde satılan on beş farklı markaya ait şişelenmiş doğal maden suyu örneğindeki radyum aktivite konsantrasyonunu, RAD7 aktif radon monitörü kullanarak belirlenen radon konsantrasyonundan ölçmüş ve su örneklerinde ölçülen ortalama ^{226}Ra (^{222}Rn)'nin aktivite seviyesini, 0,3 Bq/L olarak bulmuştur.

Wu vd. (2014), Beijing (Çin) ilindeki su şebekesinden ve çevresindeki kuyulardan toplanan seksen dokuz adet su örneğindeki radon aktivite konsantrasyonunu, RTM2200 kapalı hava döngülü bir radon monitörü kullanarak araştırmış ve musluk ve kuyu su örneklerindeki ortalama radon aktivite seviyesini, sırasıyla 4,6 Bq/L ve 11,4 Bq/L olarak bulmuştur.

Ahmad vd. (2015), Kedah (Malezya) Sungai Petani'nin farklı yerlerinden toplanan içme ve sulama suyu örneklerindeki radon aktivite konsantrasyonunu ölçmüş ve su kaynaklarında ölçülen azami radon aktivite seviyesini, 14,7 Bq/L olarak bulmuştur.

Ertugral vd. (2015), Sakarya (Türkiye) ilinde bulunan Kuzuluk ve Taraklı termal sularının radon aktivite konsantrasyonunu, aktif RAD7 radon monitörü kullanarak ölçmüş ve su örneklerinde ölçülen ortalama radon aktivite seviyesini, 0,98 Bq/L olarak bulmuştur.

Hao vd. (2015), Ho Chi Minh (Vietnam) ilinin Thu Duc bölgesindeki içilebilir su kaynaklarından toplana kırk dokuz adet içme suyu örneğindeki radon aktivite konsantrasyonunu, aktif RAD7 radon monitörü kullanarak ölçmüştür.

Krishan vd. (2015), Batı Bengal'in (Hindistan) Güney Pargana ve Doğu Medinipur bölgelerinin kıyılarından toplanan yirmi adet yer altı suyu örneğindeki radon aktivite konsantrasyonunu, RAD7 aktif radon monitörü kullanarak ölçmüş ve su örneklerinde ölçülen radon aktivite seviyelerinin, 1,9 Bq/L – 9,0 Bq/L aralığında değiştiğini bulmuştur.

Thabayneh (2015), Batı Şeria (Filistin)'da içme suyu olarak tüketilen yer altı, çeşme, yağmur ve maden sularındaki radon aktivite konsantrasyonlarını, hem aktif hem de pasif teknikler kullanarak ölçmüştür.

Erdogdu vd. (2016), Osmaniye (Türkiye) ilinden toplanan içme suyu örneklerindeki radon aktivite konsantrasyonunu, aktif radon gaz analizörü kullanarak ölçmüş ve su örneklerindeki ortalama radon aktivite seviyesini, 0,44 Bq/L olarak bulmuştur.

Fakhri vd. (2016), Hormozgan (İran) Eyaletindeki Minab şehri ve kasabalarından toplanan iki yüz elli adet musluk suyu örneğindeki radon aktivite konsantrasyonunu, taşınabilir bir alfa spektrofotometresi (RTM1688-2 model) kullanarak ölçmüş ve musluk sularındaki ortalama (geometrik) radon aktivite seviyesini, 5 °C için $0,78 \pm 0,06$ Bq/L ve 15 °C için $0,46 \pm 0,04$ Bq/L olarak bulmuştur.

Fonollosa vd. (2016), İspanya Katalonya'nın güneyinden toplanan doğal kaynak suyu örneklerindeki radon aktivite konsantrasyonunu çinko sülfür sintilatör sayacı ve ultra düşük seviyeli sıvı sintilasyon sayacı kullanarak ölçmüş ve su örneklerin çoğunda (% 90'ında) ölçülen radon aktivite seviyelerinin, 100 Bq/L'den daha düşük olduğunu bulmuştur.

Kasić vd. (2016), Tuzla bölgesindeki (Bosna Hersek) kazılmış kuyular ve doğal su kaynaklarından toplanan su örneklerindeki radon aktivite konsantrasyonunu, AquaKIT ölçüm sistemine sahip radon monitörü (AlphaGUARD) kullanarak ölçmüş ve su örneklerindeki radon aktivite seviyelerinin, 214 mBq/– 3702 mBq/L aralığında değiştiğini bulmuştur.

Kurnaz ve Çetiner (2016), Kastamonu (Türkiye) ilinde içme suyu olarak kullanılan altmış çeşme suyu ve on iki baraj suyu örneğindeki radon aktivite konsantrasyonunu, AquaKIT ölçüm sistemine sahip radon monitörü (AlphaGUARD) kullanarak ölçmüş; musluk suyu ve baraj suyu örneklerindeki ortalama radon aktivite seviyesini, sırayla 0,05 Bq/L ve 0,74 Bq/L olarak bulmuştur.

Oni vd. (2016), Ado-Ekiti (Nijerya) Eyaletindeki yirmi üç farklı noktadan toplanan altmış dört adet yer altı suyu örneğindeki radon aktivite konsantrasyonunu, RAD7 aktif radon ölçme sistemini kullanarak ölçmüş ve bazı su örneklerindeki radon aktivite seviyelerinin, EPA tarafından önerilen azami sınır değer olan 11,1 Bq/L'den daha büyük olduğunu belirlemiştir.

Abojassim vd. (2017), Irak'ta marketlerde satılan farklı markaya ait şişelenmiş içme suyu örneklerindeki radon aktivite konsantrasyonunu, RAD7 elektronik radon ölçme sistemi kullanarak ölçmüş şişelenmiş içme suyu örneklerindeki ortalama radon aktivite seviyesini 0,113 Bq/L olarak bulmuştur.

Ademola ve Ojeniran (2017), Ibadan (Nijerya) Üniversitesi'ndeki farklı su kaynaklarından (sığ kuyu, sondaj kuyusu, üniversite kullanım suyu kaynağından arıtılmış su ve ambalajlı içme suyu) toplanan su örneklerindeki radon aktivite konsantrasyonunu, AquaKIT ölçüm sistemine sahip radon monitörü (AlphaGUARD) kullanarak ölçmüş; sondaj kuyusu, sığ kuyu, ambalajlı ve kullanma suyu örneklerindeki radon aktivite seviyelerinin, sırasıyla 3,56 – 98,57 Bq/L, 0,88 – 25,49 Bq/L, 0,73 – 1,35 Bq/L ve 0,24 – 1,03 Bq/L aralığında değiştiği bulmuştur.

Duran vd. (2017), Türkiye'nin Orta ve Doğu Karadeniz bölgesinden toplanan kaplıca suyu örneklerindeki radon aktivite konsantrasyonunu ölçmüş ve su örneklerindeki ortalama radon aktivite seviyesini 267 Bq/L olarak bulmuştur.

Kaur vd. (2017), Pencap (Hindistan) Eyaletinin üç bölgesinden (Batala, Amritsar ve Gurdaspur) ve Kathua'dan toplanan içme suyu örneklerindeki radon aktivite konsantrasyonunu, RAD7 kullanarak ölçmüştür.

Seoud (2017), Kuveyt'te tüketilen on farklı markaya ait şişelenmiş doğal maden suyu örneklerindeki radon aktivite konsantrasyonunu, CR-39 nükleer iz dedektörleri kullanarak ölçmüş ve şişelenmiş maden suyu örneklerindeki ortalama radon aktivite seviyesini, 3 Bq/L olarak bulmuştur.

Büyüksulu vd. (2018), Giresun Üniversitesinin kampüsünde içme suyu olarak kullanılan musluk su örneklerindeki radon aktivite konsantrasyonunu, CR-39 dedektörleri kullanarak ölçmüş ve musluk suyu örneklerindeki radon aktivite seviyelerinin, 0,98 – 27,28 Bq/L aralığında değiştiğini bulmuştur.

Kamenova-Totzeva vd. (2018), Bulgaristan'da bulunan yirmi dört adet maden suyu kaynağından, farklı doğal kaynaklardan ve sondaj kuyularından toplanan elli dört adet su örneğindeki radon aktivite konsantrasyonunu, AquaKit'e sahip AlphaGuard radon monitörü kullanarak ölçmüştür.

Yousef (2018), Mısır'da tüketilen on dört ticari markalı şişelenmiş maden sularındaki radon aktivite konsantrasyonunu, CR-39 nükleer iz dedektörleri kullanarak ölçmüş ve maden sularındaki radon aktivite seviyelerinin, 0,9 Bq/L – 6,9 Bq/L aralığında değiştiğini bulmuştur.

E Silva vd. (2019), Rio de Janeiro (Brezilya) Eyaletindeki Paraíba do Sul'daki Salutaris Maden Suyu Parkından toplanan yer altı suyu örneklerindeki radon aktivite konsantrasyonunu ölçmüş ve su örneklerindeki radon aktivite seviyelerinin, 5,90 – $1,94 \times 10^4$ mBq/L aralığında değiştiğini bulmuştur.

Opoku-Ntim vd. (2019), Büyük Accra (Gana) bölgesindeki satılan on beş adet popüler markalı şişelenmiş içme suyu örneklerindeki radon aktivite konsantrasyonunu, RAD7 elektronik radon ölçme sistemi kullanarak ölçmüş ve su örneklerindeki ölçülen ortalama radon aktivite seviyesini, 0,06 Bq/L olarak bulmuştur.

Suresh vd. (2019), Uttara Kannada Bölgesi (Hindistan) Karnataka Eyaletinin kıyı bölgelerindeki farklı seçilmiş sahalardan toplanan altmış iki içme suyu örneğindeki, radon aktivite seviyelerinin, 2,4 Bq/L – 171,4 Bq/L aralığında değiştiğini bulmuştur.

Tan vd. (2019), Dongpo (Çin) W-polimetallik metalojenik bölge yakınlarındaki beş köyden toplanan kırk dokuz yer altı suyu örneğindeki radon aktivite konsantrasyonunu, RAD7 kullanarak ölçmüş ve su örneklerindeki ortalama radon aktivite seviyesini 10,47 Bq/L olduğu bulmuştur.

Vučković vd. (2019), Kruševac (Sırbistan) kasabasından toplanan içme suyu örneklerindeki radon aktivite konsantrasyonunu, RAD7 ile ölçmüş ve su örneklerindeki radon aktivite seviyelerinin, 5 Bq/L – 71 Bq/L aralığında değiştiğini bulmuştur.

El-Badry vd. (2020), Suudi Arabistan'da tüketilen yirmi dört adet şişelenmiş içme su örneğindeki radon aktivite konsantrasyonunu, CR-39 tipi nükleer iz detektörü kullanarak ölçmüştür.

Khaled vd. (2020), Qena (Mısır) ilinde içme suyu olarak tüketilen çeşitli kaynaklardan toplanan yüz on bir adet su örneğindeki radon aktivite konsantrasyonunu, AlphaGUARD kullanarak belirlemiştir.

Kinahan vd. (2020), Japonya'da satılan yirmi farklı markaya ait şişelenmiş içme suyu örneğindeki radon aktivite konsantrasyonunu belirlemiş ve radondan kaynaklanan yıllık etkin radyasyon dozunu hesaplamıştır.

Nagabhushana vd. (2020), Tumkur (Hindistan) ilinin sanayi bölgesinden toplanan yer altı suyu örneklerindeki radon aktivite konsantrasyonunu analiz etmiş ve su örneklerindeki ortalama radon aktivite seviyesini 75 Bq/L olarak bulmuştur.

Öge ve Özdemir (2020), Bartın iline bağlı dört örnekleme yerinden toplanan yer altı suyu örneklerinin radon aktivite konsantrasyonunu analiz etmiş ve yer altı suyu örneklerindeki radon aktivite seviyelerinin,, < 3 Bq/L – 12 Bq/L aralığında değiştiğini bulmuştur.

Yong vd. (2020), Çin’de ticari olarak satılan on beş farklı markaya ait şişelenmiş içme suyu örneklerindeki radon aktivite konsantrasyonunu ölçmüş ve bu suların tüketilmesine eşli eden yıllık etkin radyasyon dozunu bebek, çocuk ve yetişkin için hesaplamıştır.

Seid (2020), Türkiye pazarında ticari olarak satılan yirmi iki markanın kırk dokuz şişelenmiş doğal sade ve meyve aromalı maden suyu örneğindeki radon aktivite konsantrasyonunu, AquaKIT ölçüm sistemine sahip radon monitörü (AlphaGUARD) kullanarak ölçmüş ve maden su örneklerindeki radon aktivite seviyelerinin, 31 mBq/L – 58 mBq/L aralığında değiştiğini bulmuştur.

Deeba vd. (2021), Bangladeş’in güneydoğu kıyı bölgesindeki yer altı sularındaki radon aktivite konsantrasyonunu AlphaGUARD kullanılarak yerinde ölçmüş yer altı suyu örneklerindeki radon aktivite seviyelerinin 0,4 Bq/L – 16 Bq/L aralığında değiştiğini bulmuştur.

Ismail vd. (2021), Malezya Yarımadası’nın güneybatı kıyı bölgesindeki su kaynaklarında toplanan toplam yirmi yedi adet yer altı suyu, kaplıca, göl, nehir, deniz suyu ve musluk suyu örneğindeki radon aktivite konsantrasyonunu, RAD7 portatif radon detektörü kullanarak ölçülmüş ve bütün su örneklerindeki radon aktivite seviyelerinin, 0,07 Bq/L – 187 Bq/L aralığında değiştiğini bulmuştur.

Tasev vd. (2022), Kavadarci (Güney Makedonya) şehrinin Moklište bölgesindeki halka açık su çeşmesi “Elixir”den kendi kendine şişelenen içme suyu örneğindeki radon aktivite konsantrasyonunu, AlphaGUARD DF2000 radon monitörü kullanarak analiz etmiş ve içme suyu su örneklerindeki radon aktivite seviyelerinin, 2,6 Bq/L – 3,6 Bq/L aralığında değiştiğini bulmuştur.

Petrosyan ve Perikhanyan (2022), içme suyu yoluyla nüfus sağlığı üzerindeki radon ile ilişkili radyolojik riski değerlendirmek için Ermenistan’ın Erivan kentinde tüketilen yirmi dört içme suyu örneğindeki radon aktivite konsantrasyonunu, Alfarad Plus - ARP radon metre ile ölçmüştür.

Mamun ve Alazmi (2022), Suudi Arabistan'ın kuzeydoğu kesiminden farklı kuyulardan temin edilen yer altı suyu örneklerindeki radon aktivite konsantrasyonunu, bir elektronik portatif radon detektörü RAD7 kullanılarak analiz etmiş ve su örneklerindeki radon aktivite seviyelerinin, 0,03 Bq/L – 3,20 Bq/L aralığında değiştiğini bulmuştur.

Haroon ve Muhammad (2022), Pakistan'ın Mirpur Bölgesi'nden (Jatlan, Mirpur ve Dadyal) toplanan otuz altı adet yer altı suyu örneğindeki radon aktivite konsantrasyonunu, bir elektronik portatif radon detektörü RAD7 kullanılarak analiz etmiş ve Jatlan, Dadyal ve Mirpur yer altı su örneklerindeki ortalama radon aktivite seviyesini, sırasıyla 6 Bq/L, 5 Bq/L ve 14 Bq/L olarak bulmuştur.

Yukarıda özetlenen çalışmalar değerlendirildiğinde, Türkiye'de ticari olarak tüketilen şişelenmiş doğal kaynak sularında radon konsantrasyonlarının analizi ile ilgili sadece bir çalışma yapılmıştır. Ancak bu çalışmada çok az sayıda şişelenmiş kaynak suyu örneği toplanmış ve bu suların tüketiminden kaynaklanan radyolojik risk değerlendirilmemiştir. Bu bağlamda tez kapsamında yapılan bu çalışma, Türkiye'de ticari olarak satılan şişelenmiş kaynak sularındaki radon konsantrasyonunun ölçülmesine ve bu suların tüketilmesine eşlik eden radyolojik riskin değerlendirilmesine yönelik olarak yapılan ilk ayrıntılı çalışma niteliğindedir.

1.2 Tezin Kapsamı

Türkiye'de ticari olarak satılan ve tüketilen şişelenmiş doğal kaynak suları, yeryüzünde yaşayan bir insanın, doğal radyoaktif kaynaklar sebebiyle alabileceği ortalama yıllık etkin radyasyon dozunun yaklaşık %50'sinden sorumlu olan radon gazı ve aktif ölçme tekniği olarak çevresel örneklerin içerdiği radon gazının aktivite derişimin ölçülmesinde kullanılan AlphaGuard radon monitörü bu tezin kapsamındadır.

1.3 Tezin Amacı

Bu tezin amacı,

- 1- Türkiye’de tüketilen şişelenmiş doğal kaynak suyu örneklerindeki radon aktivite konsantrasyonlarını ölçme
- 2- Şişelenmiş doğal kaynak suyu örneklerindeki radonun, sindirim yolu ile alınmasından ve solunmasından kaynaklanan iç ışınlama sonucunda oluşabilecek sağlık riskini değerlendirmek amacıyla toplam yıllık etkin radyasyon dozunu ve yaşam boyu kanser riskini, yenidoğan, çocuk ve yetişkin birey için üç farklı kaynak suyu tüketimi göz önüne alarak hesaplamak
- 3- Şişelenmiş doğal kaynak suyu örneklerinde ölçülen radon derişimlerini, tahmini olarak hesaplanan toplam yıllık etkin radyasyon dozunu ve yaşam boyu kanser riskini, ulusal ve/veya uluslararası kuruluşlar tarafından belirlenen azami sınır değerler veya ölçütler ile karşılaştırmaktır.

1.4 Tezin Yapısı

Bu tez dört bölümden oluşmaktadır. Her bir bölümün içeriği aşağıda verilmektedir:

- Giriş bölümünde, içme suyunun sağlık açısından önemine ve şişelenmiş kaynak sularının Türkiye’deki durumu, üretilmesi ve tüketilmesine, içme sularındaki radyoaktivite, radon ve bireylerin alabileceği yıllık etkin radyasyon dozuna ilişkin genel bilgiler verildi. Literatürde yer alan ilgili çalışmalar özetlendi ve değerlendirildi. Tezin kapsamı ve amacı açıklandı.
- İkinci bölümde, radyoaktivite, doğal radyoaktif kaynaklar, radon, radon ölçme yöntemleri, iyonlaştırıcı radyasyonun sağlık üzerindeki etkileri ve radyasyon doz birimleri hakkında öz bilgi verildi. Daha ayrıntılı bilgi için okuyucu ilgili kaynaklara yönlendirildi.
- Üçüncü bölümde, şişelenmiş kaynak suyu örneklerinin toplanması, örneklerin ölçme işlemi için hazırlanması ve tez kapsamında kullanılan analiz yöntemi açıklandı ve cihaza ilişkin teknik bilgi verildi.
- Dördüncü bölümde, şişelenmiş kaynak suyu örneklerinde ölçülen radon aktivite konsantrasyonları, yenidoğan, çocuk ve erişkin için hesaplanan yıllık etkin radyasyon

dozları ve yaşam boyu kanser riski değerleri, tablolar ve grafikler şeklinde sunuldu. Elde edilen ortalama değerler tartışıldı, ulusal/uluslararası kuruluşlar tarafından tavsiye edilen sınır değerler ve literatürdeki veriler ile karşılaştırıldı ve bazı önerilerde bulunuldu.



2. KURAMSAL BİLGİ

2.1 Radyoaktivite

Radyoaktivite, kararsız atom çekirdeklerinin daha kararlı duruma gelebilmeleri için bozunum süreciyle farklı atom çekirdeklerine kendiliğinden dönüşmesidir (Krane, 1987). Bozunuma uğrayan kararsız çekirdek, radyonüklit veya radyoizotop olarak adlandırılır (Sultan, 2020). Rastgele gelişen ve istatistik yasalarına tabi olan radyoaktif bozunum, bir atom çekirdeğinin elektromanyetik radyasyon veya parçacık yayınlarak kendiliğinden farklı bir çekirdeğe dönüşmesidir ve aşağıdaki bozunum yasası,

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (2.1)$$

bağıntısı ile verilir. Burada, N_0 ve $N(t)$, sırasıyla başlangıçtaki ($t=0$) ve t zaman sonraki radyoaktif çekirdek sayısı ve λ bozunum sabitidir. Bozunum sabiti her bir kararsız çekirdeğin karakteristik bir parametresidir ve aşağıdaki bağıntı ile verilir:

$$\lambda = \frac{\ln(2)}{t_{1/2}} \quad (2.2)$$

Burada $t_{1/2}$, yarı ömür veya yarılanma süresidir. Yarılanma süresi başlangıçtaki kararsız çekirdek sayısının, yarıya düşmesi için geçen süre olarak tanımlanır. Bir radyoaktif kaynağın birim zamandaki bozunumu veya aktivitesi (A),

$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda \cdot N_0 e^{-\lambda t} = \lambda \cdot N \quad (2.3)$$

bağıntısı ile verilir (Krane, 1987). 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 konsantrasyonu, kütle veya hacim başına aktivite ile ilgilidir. Sıvı ve gazlar için Bq/L (veya Bq/m³) ve katılar için ise Bq/kg ile verilir (Sultan, 2020).

Genel olarak üç doğal radyoaktif bozunum süreci vardır: Alfa, beta ve gama bozunumu (Krane, 1987). Bütün bozunum süreçlerinin ortak bir özelliği, iyonlaştırıcı radyasyon (alfa-, beta-, X- ve gama- ışını) yayınlanmasıdır. Alfa ve beta bozunum süreçlerinde, kararsız bir çekirdek, alfa (α) ve beta (β) parçacığı yayınlamaya daha kararlı duruma geçer ve bu süreçlerden sonra daha kararlı ancak uyarılmış durumda kalan çekirdek gama (γ) bozunum süreci ile gama- radyasyonu yayınlamaya nükleer özelliğini kaybetmeden taban duruma geçiş yapar (Krane, 1987; Sultan, 2020).

Alfa tanecikleri (parçacıkları), iki nötron ve iki protondan oluşan helyum atomunun çekirdeğidir. Alfa bozunması, Coulomb itmesi etkisi ile oluşan ve özellikle kütle numarası büyük ($A \geq 210$) çekirdeklerde etkin bir süreçtir. Coulomb kuvveti, A ile ve atom numarasının karesi (Z^2) ile artar. Bir α bozunum süreci,



ile gösterilebilir. Burada, X ve Y, sırasıyla başlangıçtaki ve bozunum sonrası nihai çekirdeğin simgesidir. Alfa bozunum sürecinde, başlangıçtaki çekirdeğin proton sayısı ve nötron sayısı iki ve dolayısıyla da kütle sayısı 4 azalır. Bu bozunum sürecinde, proton sayısı, nötron sayısı, doğrusal ve açısal momentum ve enerji, korunur. Örnek olarak radyum (${}^{226}\text{Ra}$) alfa bozunumu yaparak radyoaktif radon (${}^{222}\text{Rn}$) gazını oluşturur. (Temirci, 2017).



Beta bozunumunda, başlangıçtaki çekirdeğin proton ve nötron sayıları değişirken kütle sayısı değişmez. Bir β bozunum sürecinde bir nötron, protona dönüşerek proton sayısını ve bir proton da nötrona dönüşerek nötron sayısını artırır. Beta bozunum süreçleri, aşağıda gösterildiği gibi üç değişik şekilde oluşabilir:

$${}^A_ZX_N \rightarrow {}^A_{Z+1}Y_{N-1} + \beta^-(e^-) + \bar{\nu} \quad n \rightarrow p + e^- \quad (2.6)$$

$${}^A_ZX_N \rightarrow {}^A_{Z-1}Y_{N+1} + \beta^+(e^+) + \nu \quad p \rightarrow n + e^+ \quad (2.7)$$

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

Burada ν ve $\bar{\nu}$, elektrik olarak yüksüz olan nötrino ve anti-nötrinodur. (2.6)'da verilen süreç, negatif beta (β^-) veya negatron bozunumu, (2.7)'de verilen süreç, pozitif beta (β^+) veya pozitron bozunumu ve (2.8)'de verilen süreç, elektron yakalama bozunumu olarak bilinir veya adlandırılır. Gama bozunum sürecinde uyarılmış bir durumdaki çekirdek, daha düşük enerji seviyesine veya taban duruma nükleer durumlar arasındaki enerji farkına eşit bir enerjide gama-ışını yayınlamaya geçiş yapar. Gama bozunması veya gama-ışını yayını, uyarılmış bağlı durumlara sahip ve kütle numarası > 5 olan bütün çekirdeklerde meydana gelebilir. Gama bozunmasının yarılanma ömürleri çok kısadır ve genellikle 10^{-9} saniyenin altındadır. Yarılanma ömürleri uzun olan geçişler, izomerik geçişler ve uzun süreli uyarılmış durumlar, ya izomerler ya izomerik durumlar ya da yarı kararlı durumlar olarak adlandırılır (Krane, 1987).

İç dönüşüm bozunma sürecinde, fazla enerji gama foton olarak yayınlanmaz ve gama fotonu, çekirdeğe en yakın olan iç yörüngedeki elektronla etkileşerek elektronun atomdan koparılmasına sebep olur.

2.2 Radyasyon

Yaşamsal alanın ve evrenin kaçınılmaz bir gerçeği olan radyasyon, bir radyoaktif kaynaktan çıkan parçacık veya elektromanyetik dalganın uzayda enerji taşımasıdır (Sultan, 2020). Radyasyon madde ile etkileşmesine göre iyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon olarak iki gruba ayrılabilir. İyonlaştırıcı radyasyon, etkileştiği ortamdaki atom veya moleküllerin dış yörüngelerinden bir elektronu koparmak için gerekli ve yeterli enerjiye sahip olan radyasyon olarak tanımlanır (Krane, 1987; Sultan, 2020). Alfa (α)- ve beta (β)- ışınları, enerjik proton vb. yüklü tanecikler,

doğrudan iyonlaştırıcı radyasyon olarak isimlendirilirken nötronlar, elektromanyetik spektrumun yüksek frekans bölgesinde yer alan X- ve gama (γ)- ışınları ise yüksüz dolaylı iyonlaştırıcı radyasyon olarak isimlendirilir (Sultan, 2020).

2.2.1 İyonlaştırıcı Radyasyonun Madde ile Etkileşmesi

Doğrudan iyonlaştırıcı radyasyon olarak tanımlanan enerjik α -, β - vb. yüklü parçacıklar, etkileştikleri ortamın atom veya moleküller ile esnek ve esnek olmayan çarpışmalar yaparak enerji kaybına uğrarlar ve geliş doğrultularından saparlar (Krane, 1987). Enerjik alfa parçacığı ağır ve yüklü olduğu için soğurucu bir ortama girdiğinde, ortamdaki atomların yörünge elektronları ile Coulomb etkileşmesi yapar. Gelen alfa parçacığının kinetik enerjisi, atomun iyonlaşma enerjisinden yeterince büyükse, enerjisini etkileştiği maddenin atomlarını iyonlaştırmak için harcar ve böylece madde içerisinden geçerken, elektronlar ile esnek çarpışmalar sonucunda enerjisinin büyük bir kısmını kaybeder. Gelen alfa parçacığının enerjisi, atomun iyonlaşma enerjisinden küçükse, alfa parçacıkları, enerjisinin bir kısmını madde atomunun elektronlarına aktarır ve böylece onları uyararak onların daha yüksek enerji seviyelerine çıkmalarını sağlar. Sonuç olarak alfa tanecikleri enerjilerini çok kısa mesafede kaybeder (Krane, 1987). Bu yüzden α - radyasyonu, yüksek doğrusal enerji aktarımına ve düşük nüfuz etme derinliğine sahip yüksek derecede iyonlaştırıcı radyasyondur (Zriba, 2019). Beta radyasyonu (enerjik elektronlar), alfa radyasyonu gibi içinden geçtikleri maddenin atom ve moleküllerin elektronları ile doğrudan Coulomb etkileşmesi yaparak, elektronları koparır atomu veya moleküle iyonlaştırır veya elektronları daha üst enerji seviyesine uyarır (Krane, 1987). Ayrıca enerjik elektronlar, atomun çekirdek alanından geçtiği zaman, radyasyon yolu ile enerji kaybına uğrar. Bu enerji, bremsstrahlung veya frenleme radyasyonu denilen sürekli X ışını spektrumu şeklinde görülür (Zriba, 2019).

Dolaylı iyonlaştırıcı radyasyon olarak tanımlanan X- ve gama-ışınları, öncelikle içinden geçtikleri ortamın atomları ile fotoelektrik etki, Compton saçılması ve çift oluşumu olmak üzere üç farklı şekilde etkileşme yapabilir (Krane, 1987). Bu etkileşim mekanizmaları farklı enerji eşiklerine ve farklı malzemeler için yüksek etkileşim kesitli bölgelere sahiptir (Sultan, 2020). Yeterli enerjiye sahip bir foton

demeti bir malzemeden geçtiğinde, demetteki tüm fotonlar aynı etkileşimleri yapmazlar. Radyasyon tespiti ile ilgili etkileşim süreçleri, tamamen istatistiksel olarak gerçekleşir. Bu etkileşme süreçlerinde ortaya çıkan ikincil elektronlar, ortamın atom ve molekülleri ile doğrudan Coulomb etkileşmesi yaparak onları uyarırlar ve iyonlaştırır. İyonlaştırıcı radyasyonun madde etkileşmesi sürecindeki en önemli etkileşme olayı, iyonlaşma sonucunda aktif radikal atom veya molekül meydana gelmesidir.

2.2.2 İyonlaştırıcı Radyasyonun Biyolojik Etkileri

İyonlaştırıcı radyasyonun en önemli özelliği, etkileştiği ortamdaki atom veya molekülleri iyonlaştırarak radikaller meydana getirmektir. Hava içinden geçen alfa (α)-, beta (β)-, X- ve gama (γ)-ışını, havanın içerdiği atom ve molekülleri iyonlaştırır ve kütlesi m olan havada oluşturulan iyonların toplam yükü Q ise ışınlama (X),

$$X = \frac{Q}{m} \quad (2.9)$$

bağıntısı ile verilir. Işınlamanın birimi, uluslararası birim sisteminde kilogram başına coulomb (C/kg) olarak ifade edilir (Krane, 1987; Temirci, 2017). Önceki yıllarda bu birim yerine, röntgen (R) birimi kullanılmaktaydı. Bir R, normal şartlar altında (0 °C ve 760 mm basınçta), bir cm^3 kuru havada, bir elektrostatik yük birimi (eyb) oluşturan ışınlama olarak tarif edilir ve ışınlama (X) cinsinden,

$$1 \text{ R} = \frac{1 \text{ eyb}}{0,001293 \text{ g}} = 2,58 \times 10^{-4} \text{ C/kg} \quad (2.10)$$

ile verilir. Havanın haricinde diğer farklı malzemeler iyonlaştırıcı ışınlarla (radyasyona) maruz bırakıldığında, bu tür malzemelerin enerji soğurma hızları havanınkinden farklı olacaktır. Bu sebepten farklı malzemelerin iyonlaşma ile soğurduğu enerjiyi tanımlamak için başka bir nicelik veya farklı bir birim gerekir. Bu nicelik veya birim, malzeme tarafından soğurulan doz olarak isimlendirilir ve malzemenin birim kütlesi başına soğurulan enerjinin ölçüsünü vermelidir. Soğurulan

doz birimi, rad (**r**adiation **a**bsorption **d**ose) ile verilir ve bir gram kütlenin 100 erg'lik enerji soğurmasına karşılık gelir. Dolayısıyla havada bir röntgenlik (1 R'lik) ışınlama, 0,88 rad'lık soğurulmuş doza eşittir (1 R = 0,88 rad). Uluslararası birim sisteminde soğurulan doz değeri, bir kilogram kütlenin 1 joule (J) enerji soğurmasına (1 Gy=J/kg) karşılık gelen gray (Gy) ile verilir.

İyonlaştırıcı radyasyonun (ışının), canlılar üzerindeki etkileri göz önüne alındığında, değişik ışınlama koşullarında, kütle başına eşit miktarda enerji soğurulması aynı biyolojik etkiyi göstermeyebilir. Radyasyonun meydana getirdiği biyolojik hasar, bu radyasyonun neden olduğu iyonlaşma veya uyarma etkisinde olan biyolojik moleküllerin kimyasal değişimi ile izlenebilir. Bu değişimlerin kalıcılığı ve büyüklüğü, doğrusal enerji aktarımı (transferi) olarak bilinen radyasyonun kat ettiği yol boyunca enerji birikimin yerel hızı ile ilgilidir (Krane, 1987; Temirci, 2017). Bu sebepten bireylerin radyasyondan korunmasına yönelik standartları tanımlamak için farklı tipteki radyasyonların bazı biyolojik etkilerinin ölçülmesi elzem ve önemlidir. Bu durumda belirli bir radyasyon dozunun, aynı biyolojik etkiyi oluşturan X-ışınlarının dozuna oranı olarak bilinen bağıl (rölatif) biyolojik etkinlik (RBE) tanımlanmıştır. Bununla birlikte RBE'nin, bağıl olarak ölçülmesi zor olduğu için RBE'nin yerini, birim yol boyunca biriken enerjiye göre bir iyonlaştırıcı radyasyonun enerjisi ve tipi için hesaplanabilen kalite faktörü (KF) almıştır. Tablo 2.1'de bazı iyonlaştırıcı radyasyon tipleri için KF değerleri verildi. Böylece belirli bir radyasyonun bir biyolojik sistem üzerindeki etkisi, soğurulan doza (D) ve radyasyonun KF ile çarpımı olan eşdeğer doz (ED),

$$ED = D \cdot KF \quad (2.11)$$

ile verilir. Burada D, rad olarak alındığında eşdeğer dozun birimi, rem (**r**oentgen **e**quivalent **m**an) ile verilir. D, Gy cinsinden alındığında eşdeğer dozun birimi, sievert (Si) ile verilir. Dolayısıyla 1 Sv, 100 rem'e eşittir (Temirci, 2017). İyonlaştırıcı radyasyonun, bir canlı üzerinde biyolojik etki yapabilmesi için radyasyon enerjisinin canlıyı oluşturan hücreler ve dokular tarafından soğurulması ve bu enerjinin dokularda dağılması gerekmektedir. Radyasyon enerjisinin soğurulması ile biyolojik etkinin ortaya çıkması arasında geçen süre içinde birbirini izleyen dört kademeli olay

meydana gelir: **Birinci kademe:** Fiziksel olayların meydana geldiği kademedir. Bu kademede, iyonlaştırıcı radyasyonu soğuran hücre veya dokuların atom ve/veya moleküllerinde uyarılma ve/veya iyonlaşma olayları meydana gelir. Bu ilk kademedeki etkileşimler sonucu ortaya çıkan ürünler, çok kısa süre içinde (10^{-10} s) ikincil tepkimelerin oluşmasına sebep olurlar ve ikincil tepkime ürünleri ortaya çıkar. **İkinci kademe:** Fiziksel ve kimyasal olayların meydana geldiği kademdir. Bu kademede, ikincil tepkimeler, radyasyon etkisinin ikinci kademesini, fizikokimyasal olayları içerir. **Üçüncü kademe:** Kimyasal tepkimelerin meydana geldiği kademdir. Bu kademede, serbest atom veya radikaller hem birbirleriyle hem de ortamdaki moleküller ile tepkimeye girerler. **Dördüncü kademe:** Biyolojik olayların meydana geldiği kademedir. Bu kademede, bir organizmada radyasyon etkisi ile oluşan moleküler değişiklikler, biyolojik olayların başlamasını tetikler (Temirci, 2017).

Tablo 2.1 Farklı iyonlaştırıcı radyasyonlar için kalite faktör değerleri (Temirci, 2017)

Radyasyon	KF
β -, X- ve γ - ışınları	1
Düşük enerjili ($\sim$ keV) nötron ve protonlar	2-5
Enerjik ($\sim$ MeV) nötron ve protonlar	5-10
α - ışınları	20

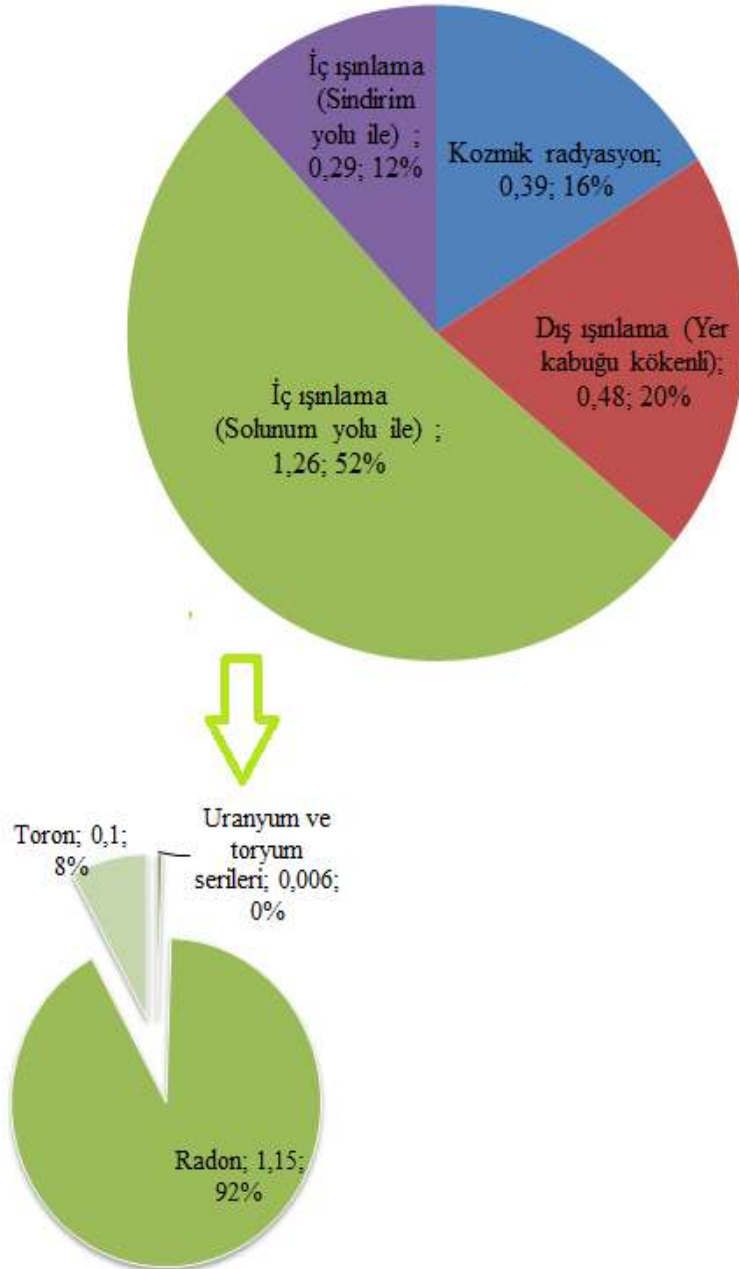
Yukarıda sözü edilen kademeler neticesinde, kromozomda oluşan hasarlar bir takım biyolojik etkilerin oluşmasına yol açar. Genlerde hasar gördüğünde, kanser oluşabilir. Üreme organlarındaki genler hasar gördüğünde, mutasyon oluşabilir ve bu tür bir mutasyon nesillere geçirilebilir. Kanserler ve kalıtsal mutasyonlar, olasılıklı (stokastik) etkiler olarak adlandırılır. Organın soğurduğu radyasyon dozu, yüksek veya düşük olsa da kanser veya mutasyon aynı davranır ve bu değişimlerin tamamı, bir kanser oluşumu veya bir mutasyon meydana gelme olasılığıdır. Bütün vücut, çok yüksek düzeydeki dozlara (1 Sv - 10 Sv) kısa süre zarfında maruz kaldığında, çok sayıda hücre ölür. Bu durumda hayati organlar ve sistemler işlevlerini yerine getiremezler ve mide bulantısı, kusma, cilt ve derin doku yanıkları, vücudun enfeksiyonla mücadele kabiliyetinin bozulması gibi akut (ani görülen) sağlık etkileri saatler, günler veya haftalar sonrasında ortaya çıkabilir. Tüm vücut aşırı düzeydeki radyasyon dozuna (10 Sv veya üzerinde) kısa süre zarfında maruz kaldığında, iç

organlar ve vücudun dokular öyle zarar görür ki hayati sistemlerin işlevleri sona erer ve ölüm günler veya haftalar içinde gerçekleşir. Hasarın büyüklüğü, radyasyon dozu ile artar. Bu etkilere, deterministik (belirli) etkiler olarak bilinir ve eşik değerlerin altındaki radyasyon doz seviyelerinde gözlenmeyebilir. Radyasyon dozları, eşik değerlerin altındaki seviyelere sınırlandırılırsa, belirli etkiler tamamen engellenebilir (Temirci, 2017). Dünya çapında radyolojik risklerin değerlendirilmesi, Uluslararası Radyolojik Koruma Komisyonu (International Commission on Radiological Protection), Atomik Radyasyonun Etkileri Hakkında Birleşmiş Milletler Bilimsel Komitesi (UNSCEAR; United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ) İyonlaştırıcı Radyasyonun Biyolojik Etkileri Komitesi (Committee of Biological Effects of Ionizing Radiation) ve Uluslararası Kanser Araştırmaları Ajansı (International Agency for Research on Cancer) gibi uluslararası kuruluşların düzenli olarak yayınladıkları raporlar esas alınarak yapılmaktadır (Sultan, 2020).

2.3 İyonlaştırıcı Radyoaktif Kaynakları

İnsanların yaşam süreleri boyunca maruz kaldıkları iyonlaştırıcı radyasyon, doğal ve yapay radyasyon kaynaklarından ileri gelmektedir. Yeryüzünde yaşayan bir kişinin bu radyasyon kaynaklarından dolayı aldığı ortalama yıllık etkin doz, yaklaşık 3 mSv'tir. Doğal radyoaktif kaynaklardan yayınlanan iyonlaştırıcı radyasyon, Grafik 2.1'de gösterildiği gibi ortalama toplam dozun %80'ine (2,4 mSv'sine) sebep olmaktadır (UNSCEAR, 2008). Doğal iyonlaştırıcı radyasyon kaynaklarından ileri gelen yıllık etkin toplam dozun %52'si (1.26 mSv)'i ise solunum yolu ile vücuda alınan radyonüklitlerden ve bu dozun da yaklaşık %92'si (1,15 mSv'i) de radondan kaynaklanmaktadır (UNSCEAR, 2008). Doğal iyonlaştırıcı radyasyon kaynakları, kozmik ve yer kabuğu kökenli (terrestriyal) radyonüklitlerden meydana gelir (Temirci, 2017). Terrestriyal radyonüklitler, uranyum (^{238}U), aktinyum (^{235}U) ve toryum (^{232}Th) doğal radyoaktif serilerine ait radyonüklitlerden ve Tablo 2.2'de verilen lütesyum (^{176}Lu), samaryum (^{147}Sm), lantan (^{138}La), rubidyum (^{87}Rb) ve potasyum (^{40}K) gibi radyoizotoplardan oluşmaktadır. Aktinyum serisindeki radyonüklitlerin ve ^{40}K 'ın dışında Tablo 2.2'de verilen radyonüklitlerin, kişilerin maruz kaldıkları radyasyon dozuna olan katkıları düşük seviyede olduğundan bu

radyonüklitler, radyolojik risk değerlendirmesinde dikkate alınmazlar (UNSCEAR, 2000). Uranyum serisi ve bozunum ürünleri, Şekil 2.1’de, toryum serisi ve bozunum ürünleri ise Şekil 2.2’de verildi. Uranyum ve toryum doğal radyoaktif serilerine ait radyonüklitler ile radyoaktif potasyum, bozunum süreçlerine bağlı olarak α -, β - ve γ -radyasyonu yayınlarlar.



Grafik 2.1 Doğal radyoaktiviteden kaynaklanan ortalama yıllık etkin radyasyon doz dağılımı

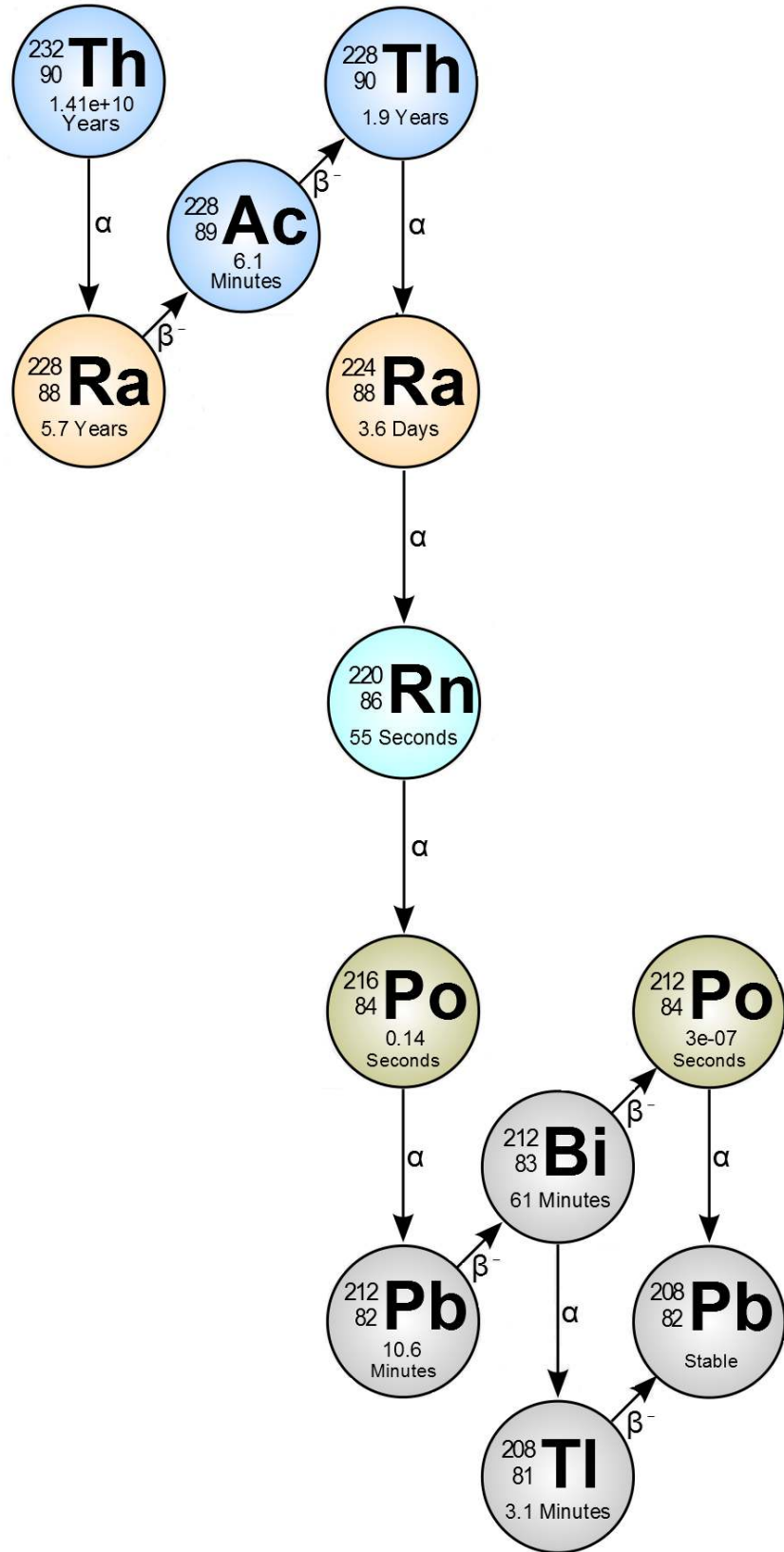
Tablo 2.2 Doğal radyoaktif serilere ait olmayan terestriyal radyonüklitler (Metin, 2023)

Radyonüklit	Yarılanma ömrü (yıl)	Yayınlanan radyasyon	Yerkabuğu aktivite konsantrasyonu (Bq/kg)
^{176}Lu	$2,20 \times 10^{10}$	β^-, γ	4×10^{-2}
^{147}Sm	$1,05 \times 10^{11}$	α	7×10^{-1}
^{138}La	$1,12 \times 10^{11}$	β, γ	2×10^{-2}
^{87}Rb	$4,8 \times 10^{10}$	β	7×10^1
^{40}K	$1,26 \times 10^9$	β, γ	$6,3 \times 10^2$

Yapay radyoaktif kaynaklarını;

- 1) Tıpta, kanser tedavisi için kullanılan γ -ışını kaynağı radyonüklitler (^{60}Co ve ^{137}Cs) ve β - ve X-ışını kaynağı elektron hızlandırıcıları ile nükleer tıpta hastalıkların teşhisi için kullanılan radyonüklitler (^{201}Tl , ^{131}I , ^{111}In , $^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^{67}Ga ^{18}F vb.),
- 2) Tarım ve endüstride kullanılan radyonüklitler (^{241}Am , ^{192}Ir , ^{147}Pm , ^{32}P vb.)
- 3) 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 (Özçitak, 2012).

Şekil 2.1 Uranyum radyoaktif serisi (Özçıtak, 2012)



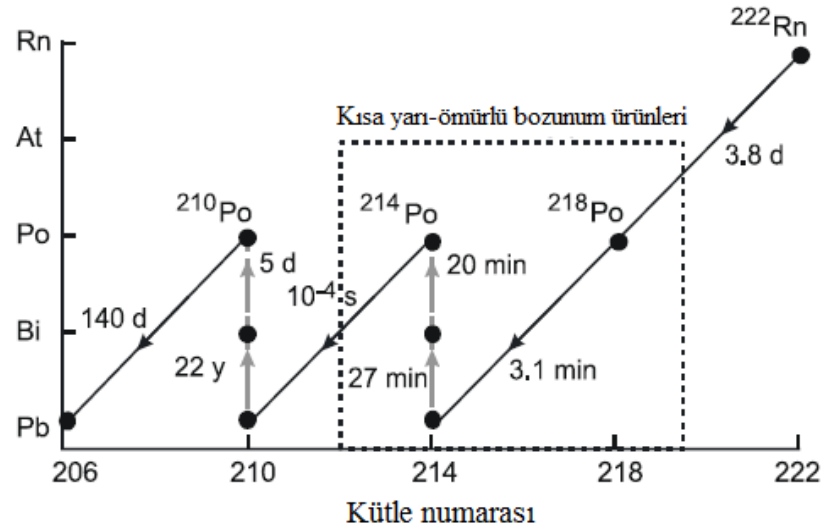
Şekil 2.2 Toryum radyoaktif serisi (Özçitak, 2012)

2.4 Radon ve Analiz Teknikleri

Kokusuz, tatsız ve renksiz radyoaktif bir gaz olan radon (atom sayısı:86), periyodik cetvelde soy gaz sınıfında yer almaktadır (Temirci, 2017). ^{222}Rn , içme suyu olarak kullanılan yer altı ve yeryüzü sularında en çok araştırılan doğal radyonüklitlerden biridir. ^{222}Rn 'nin yoğunluğu 9,73 g/L dir ve havadan 7,5 kat daha ağırdır. Kaynama noktası $-61,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve donma noktası $-71\text{ }^{\circ}\text{C}$ olduğundan ^{222}Rn gazı, soğuk suda daha iyi çözünebilir (Seid, 2020). Dolayısıyla sıcaklık arttıkça ^{222}Rn 'nin çözünürlüğü de azalır (Günay vd., 2018; Seid, 2020). ^{222}Rn bozunum şeması, Şekil 2.3'te gösterilmektedir. ^{222}Rn 'nin her çekirdeği, ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{214}Po ve ^{210}Pb dizisi aracılığıyla bozuna uğrar. Bu bozunum sürecindeki her dönüşümde bozunum çekirdekleri karakteristik iyonlaştırıcı radyasyon yayar. ^{222}Rn çekirdeği alfa bozunumu sonucunda, 5,5 MeV enerjili bir alfa taneciği yayınlayarak ^{218}Po çekirdeğine dönüşür. Polonyum metallendir ve havada veya duvarda veya akciğerin içindeki bir toz parçacığı ile temas ettikleri yüzeylere yapışma eğilimindedir (Seid, 2020). ^{218}Po çekirdeklerinin yarılanma ömrü kısa, sadece 3,05 dakikadır, bu da çoğunun oluşumundan sonra 6 dakika içinde bozulacağı anlamına gelir. ^{218}Po , alfa bozunumu sonucunda 6 MeV enerjili bir alfa taneciği yayınlayarak ^{214}Pb çekirdeğine dönüşür. ^{214}Pb , 26,8 dakikalık bir yarılanma ömrüne sahiptir ve beta bozunumu sonucunda β - radyasyonu yayarak ^{214}Bi çekirdeğine dönüşür. ^{214}Bi 'ün yarılanma ömrü 19,8 dakikadır ve beta bozunumu yaparak ^{214}Po çekirdeğine dönüşür. ^{214}Po , 164 mikro saniyelik yarılanma ömrüne sahiptir ve 7,7 MeV enerjili bir alfa taneciği yayınlayarak yarı ömrü 22,3 yıl olan ^{210}Pb çekirdeğine dönüşür. ^{210}Pb beta bozunumuna uğrayarak yarılanma ömrü 5 gün olan ^{210}Bi çekirdeğine dönüşür. ^{210}Bi beta bozunumu sonucunda yarılanma ömrü 138 gün olan ^{210}Po çekirdeğine dönüşür. ^{210}Po alfa bozunumu ile 5,3 MeV enerjili bir alfa taneciği yayınlayarak kararlı ^{206}Pb çekirdeğine dönüşür.

İçme suyu olarak kullanılan yer altı ve yüzey suları, bulundukları veya içinden geçtikleri bölgeye bağlı olarak çeşitli seviyelerde ^{226}Ra içerir. ^{222}Rn , ^{226}Ra 'nın bozunumu ile meydana gelir ve ağırlıklı olarak çevredeki jeolojik ortamdan (kayalar, topraklar) çözünmesi gibi doğal süreçlerin bir sonucu olarak sulara salınır. Sudaki ^{222}Rn ayrıca havadaki radonun suya karışmasından ve havza alanındaki diğer yüksek

^{222}Rn taşıyan su akışlarından kaynaklanabilir (Seid, 2020). Suda çözünün ^{222}Rn gazı, su ile evin içine taşınır. Radonun sudaki çözünürlüğü, oksijen gazının çözünürlüğünden yaklaşık on kat daha fazladır (Seid, 2020). Nehirlerdeki ve rezervuarlardaki su genellikle çok az ^{222}Rn içerir, çünkü kolayca havaya karışır. Yüzey suyu kullanan evlerde genellikle su kaynağında ^{222}Rn sorunu yoktur. Şehir belediyeleri dağıtım sistemlerinde su işleme esnasında su havalandırıldığı için ^{222}Rn 'nin kaçmasına izin verilir. Bununla birlikte küçük su tedarik sistemlerinde, genellikle kısa su geçiş sürelerine sahip kapalı sistemler olduğu için ^{222}Rn 'nin tamamen uzaklaşmasına izin verilmez. Ayrıca, duş süresince sudaki ^{222}Rn iç ortama kaçır (Seid, 2020). ^{222}Rn 'nin kısa yarı ömürlü ürünleri, kapalı ve açık ortamlarda havada asıltı hâlindeki toz ve su zerrelere tarafından soğurulur ve böylece aktif alfa-ışını yayan asıltı taneciklerin oluşmasına sebep olur (Seid, 2020; Temirci, 2017). Bu asıltı tanecikler, kolaylıkla solunum ile üst solunum yoluna nüfuz edebilir, akciğerlere ulaşabilir, akciğerlerin duvarlarına tutunabilir ve orada kalıcı olarak yerel alfa radyasyon kaynağı gibi davranabilir (Seid, 2020; Temirci, 2017). Ayrıca içme suyu ile alınan ^{222}Rn , mide zarının ve sindirim sisteminin ışınlamasına sebep olarak mide kanseri riskini artırır. Alfa-beta ışını yayınlatabilen bu bozunum ürünlerinin solunum sistemindeki etkileri üzerine yapılan epidemiyolojik çalışmalar, radonun bozunum ürünlerinin akciğerlerdeki biyolojik yarı ömürlerinin birkaç saatten bir güne kadar olabileceğini, dolayısıyla akciğer dokusuna hasar vererek zamanla kansere sebep olma riski açısından radondan daha tehlikeli olabileceğini göstermiştir (Seid, 2020; Temirci, 2017). Uluslararası Kanser Araştırma Ajansı, 1988 yılında, radonu kansere yol açan madde olarak kabul etmiştir (Seid, 2020; Temirci, 2017). Yapılan araştırmalar, akciğer kanserine yakalanma riskinin, radona maruz kalmanın artışı ile doğru orantılı olarak arttığını göstermiştir (WHO, 2011).



Şekil 2.3 Radonun bozunum şeması (Seid, 2020)

Birçok sayıda ^{222}Rn analiz veya ölçme yöntemi bulunmasına rağmen nispeten düşük maliyeti ve basitliği içeren yöntemlerin veya tekniklerin kullanılması yaygınlaşmıştır (Seid, 2020). Dedeksiyon limitleri düşük, uygun fiyat ve basit kullanımlı çok sayıda güvenilir radon ölçme cihazını temin etmek mümkün. Ayrıca, su örneklerindeki radon analizi için örnek hazırlama işlemi, genellikle basit, hızlı ve kapsamlı kimyasal işlemleri gerektirmeyen bir süreçtir. Bu durum, radyokimyasal uygulamaları içeren diğer radyoanalitik tekniklere göre çok daha kısa geri dönüş süresi avantajı sağlar (Jobbáby vd. 2017).

Farklı geometrideki (katı, sıvı vb.) çevresel örneklerdeki ^{222}Rn analizi için pasif ve aktif olmak üzere iki yöntem kullanılmaktadır. Pasif analiz tekniğinde, katı-hal iz dedektörleri (LR-115, CR-39 vb.), kömür aktifli sıvı sintilasyon dedektörleri, termoluminesans dedektörleri, alfa kart, iyon odaları ve elektrometreler gibi elektrik enerjisi gerektirmeyen cihazlar kullanılmaktadır (Temirci, 2017). Pasif cihazlar, kapalı ortamda uygun bir yere yerleştirilerek uzun süreyle (en az üç ay) ^{222}Rn 'ye maruz bırakılırlar. İçme suyu (yer altı, yüzey, musluk, doğal kaynak ve maden suyu) örneklerindeki aktif radon ölçümü için prensipte üç farklı yaklaşım söz konusudur: Gama-ışını spektrometrik tekniği, emanometriyi ve sıvı sintilasyon sayımını. Analiz teknikleri, basit ve ucuz olanlardan daha karmaşık ve daha pahalı olanlara kadar çok çeşitlidir. Güvenilir ve karşılaştırılabilir sonuçlar elde etmek için standart yöntemlerden birinin izlenmesi tavsiye edilir. Analiz teknikleri, faz transferinin

uygulanması, analiz yeri, dedeksiyon sistemleri gibi bazı temel hususlara bağılı olarak gruplandırılabilir. En kolay analiz tekniğı, herhangi bir faz aktarımı olmaksızın gama-ışını spektrometresi kullanılarak doğrudan ölçümdür. Faz transferi söz konusu olduğunda, ^{222}Rn sulu fazdan başka bir faza aktarılır. Genellikle emanometri, ^{222}Rn 'yi sıvıdan gaz fazına aktarmak için kullanılır. Sıvı sintilasyon sayımı kullanılacağı zaman, hedef matrisi organik bir fazdır. Radonun gama-ışını spektrometresi ile ölçülebilmesini sağlayan aktif kömür gibi katı gözenekli yüzeylerde de ^{222}Rn adsorbe edilebilir. Hafif taşınabilir cihazlar kullanılarak yerinde ^{222}Rn analizi yapmak mümkündür. Bir laboratuvaradaki ölçümler, dikkatli örnekleme gerektirir. Analiz konumu hakkındaki karar, analizin aciliyeti, mevcut cihazlar, istenen doğruluk ve beklenen radon aktivite seviyeleri gibi birçok şarta bağılıdır. ^{222}Rn 'nin kısa yarı ömür nedeniyle bozunum düzeltilmesi, ölçüm başladığında veya örneklemeden sonra gecikmeli mümkün olduğunda ve uzun ölçüm sürelerinin gerekli olduğu yöntemler için dikkate alınmalıdır. Düşük ^{222}Rn aktivite konsantrasyonuna sahip su örnekleri, yerinde veya laboratuvarında, ancak numune toplandıktan kısa bir süre sonra (örneğin bir ^{222}Rn yarı ömrü içinde) ölçülmelidir (Jobbáby vd. 2017).

Emanometri, örneğin gazdan arındırılması ve ardından çeşitli alfa algılama sistemleri ile tanecik tespitine dayanır. Su örneğinin gazı alındıktan sonra ^{222}Rn , ya bir inert gaz akışı ya hava sirkülasyonu ya da vakum ile bir ölçüm hücresine aktarılır. Lucas hücresi gibi sintilasyon hücreleri, yarı iletken silikon detektörü ve iyonlaşma odası dâhil olmak üzere gaz fazındaki radon aktivite derişimini belirlemek için çeşitli algılama teknikleri uygulanabilir. Bu teknik, nakliye sırasında gaz giderme seviyesini etkileyebileceğı için su sıcaklığına duyarlıdır. Dedektör kontaminasyonu, düşük seviyeli ^{222}Rn analizinin gerçekleştirilebildiğinden ve daha uzun ömürlü bozunum ürünlerinin (örneğin ^{210}Po) oluşmadığından emin olmak için kontrol edilmelidir. Bazı su örnekleri, algılama sistemine de aktarılabilen yüksek seviyelerde toron (^{220}Rn) içerebilir. Bir gaz giderme yaklaşımı, su örneğini bir gaz giderme hücresine yerleştirmek ve radonsuz havayı veya inert gazı kapalı bir sisteme sokmaktır. Bu şekilde örnekteki ^{222}Rn , sayım hücresine veya detektöre taşınan bir pompa yardımıyla temizlenir. Havadaki radon aktivitesi derişimi ölçülür ve sudaki ilk derişim bu ölçümden türetilir. Diğer bir gaz giderme yaklaşımı ise küçük bir örnek alikotu bir şırınga ile kısmen vakumlu bir sintilasyon hücresine doğrudan

enjekte edilmesidir. Vakum nedeniyle su örneğinden ^{222}Rn salınır ve ardından radonsuz hava veya inert gaz verilerek basınç normal ortam basıncına ayarlanır. Enjeksiyondan üç saat sonra sintilasyon hücresi sayım için hazır duruma gelir.



3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1 Su Örneklerinin Toplanması

Türkiye'de içme suyu olarak tüketilen kaynak suları marketlerde, 0,2 L, 0,33 L, 0,5 L, 1 L, 1,5 L ve 5 L'lik yumuşak plastik şişelerde bazıları ise plastik bardak ve poşetler ambalajlarda satılmaktadır. 19 L'lik PET damacanalarda satılan kaynak suları, genellikle üreticiler tarafından evlere servis edilmektedir. Tez kapsamında, Türkiye'de tüketilen içme suyu olarak tüketilen ve ticari olarak satılan şişelenmiş doğal kaynak sularının büyük bir bölümünü temsil eden seksen üç farklı ticari markaya ait farklı hacimlerde su örnekleri marketlerden satın alınarak toplandı. Şişelenmiş doğal kaynak suyu örnekleri, ölçülen değerlerin varyasyonlarını sağlamak için Harita 3.1'de gösterildiği gibi farklı su kaynaklarından üretilen ve en çok tercih edilen markaları temsil edecek şekilde seçildi. Ambalajlanmış içme suyu numuneleri, ticari unvanın anonim kalması için ŞKS olarak kodlandı.

²²²Rn analiz işlemine tabi tutulacak her bir şişelenmiş doğal kaynak suyu örneği, oda sıcaklığında saklandı ve daha sonra analiz için laboratuvarında açıldı.

3.2 Su Örneklerinin Radon Analizi

Tez kapsamında yapılan çalışmada, her bir şişelenmiş doğal kaynak suyu örneğindeki ²²²Rn aktivite konsantrasyonu, su analizi için kullanılan ek aksesuarı (AquaKIT) ile kompakt bir taşınabilir radon gazı monitörü veya analiz cihazı AlphaGUARD PQ 2000PRO (Genitron Instruments, Almanya) kullanılarak analiz edildi. Analiz işlemlerinde kullanılan AlphaGUARD PQ 2000PRO radon gazı monitörü, Fotoğraf 3.1'de gösterilmektedir. Kalibrasyon kararlılığı, hızlı okuma ve önceki çalışmalarda doğrulanmış doğru ölçümler nedeniyle seçilen bu radon monitörünün özellikleri ve analiz teknikleri daha önceki çalışmalarda ayrıntılı olarak verilmiştir (Alonso vd., 2015; Di Carlo vd., 2019; Kotrappa vd., 2005; Li vd., 2015; Mas vd., 2021; Seid vd., 2022).

AlphaGUARD'ın ^{222}Rn dedektörü, optimize edilmiş bir darbe iyonlaşma odası tasarımına dayanmaktadır. Normal çalışmada, ölçüm gazı geniş yüzeyli bir cam elyaf filtre vasıtasıyla iyonlaşma odasına difüzyon modunda girer. Bu filtreden sadece gaz hâlindeki ^{222}Rn geçerken, bozunum ürünlerinin ve toz zerreciklerinin iyonlaşma odasına girmesi engellenir. AlphaGUARD, aktif hacmi 0,56 L olan bir silindirik iyonlaşma odasına sahiptir. Analizör çalıştırıldığında, metalik iç kısımdaki gerilim +750 V'tur. Uzunlamasına eksen boyunca yerleştirilen merkez elektrot, oldukça hassas ön yükselteç biriminin sinyal girişine bağlıdır. Ön yükselteç biriminin işlenmiş ölçüm sinyalleri, daha fazla sayısal (dijital) işleme için bir elektronik ağa iletilir. Analizörün aktivite konsantrasyon analiz aralığı, $2 \text{ Bq/m}^3 - 2 \times 10^6 \text{ Bq/m}^3$ ve azami analiz belirsizliği ise %3'tür.



Fotoğraf 3.1 AquaKIT aksesuarı ile birlikte AlphaGuard radon monitörü

AquaKIT, ^{222}Rn izleme sistemi AlphaGUARD PQ2000PRO için isteğe bağlı bir aksesuardır. ^{222}Rn monitörü ve Alpha pompası ile kombinasyon hâlinde, elektronik Pompalama ünitesi AquaKIT, su örneklerindeki ^{222}Rn aktivite derişiminin doğrudan ve hassas bir şekilde belirlenmesine ve bir derişim zaman serisi şeklinde hafızasında saklanmasına imkân verir. AquaKIT-Alpha Pompası-AlphaGUARD portatif kombinasyonu, sahada kullanım için kullanılabilir. AlphaGUARD ve Alpha Pompasının bataryası (pilleri), 12 saatten uzun bir süre elektrik şebekesinden

bağımsız çalışmasını sağlar. AquaKIT, gaz giderme kabı, güvenlik kabı, örnek alma için plastik enjeksiyonlar, montaj soketi, bağlantı tüpleri, ölçüm silindiri ve aktif kömür filtre kartuşundan oluşmaktadır. Alpha Pompası, batarya ile elektronik olarak çalışan, gazlar için kullanışlı bir pompalama birimidir. Akış hızı, 0,03 L/min'den 1 L/min'e kadar kademeli olarak ayarlanabilir. Elektronik aksam, bataryanın uzun ömürlü olmasını sağlayan asgari güç tüketimi için optimize edilmiştir.

Şekil 3.1'de şematik olarak gösterilen analiz düzeneği kuruladıktan sonra her ölçümden önce, laboratuvar ortamı (background) ölçümleri yapıldı. Akış modu seçildi ve her bir şişelenmiş kaynak suyu örneği gaz giderme kabına enjekte edildikten sonra analizör ve pompa on dakika 0,3 L/min akış hızında çalıştırıldı ve her dakikada ^{222}Rn aktivite derişimi kaydedildi. On dakika sonra pompa kapatıldı ve analizör yirmi dakika daha açık kaldı ve analize devam edildi. Daha iyi bir hassasiyet elde etmek için bu döngü üç kez tekrarlandı. Su örneklerindeki ^{222}Rn aktivite konsantrasyonunun belirlenmesinde, analizör tarafından belirlenen ^{222}Rn aktivite değeri esas alındı. Bu değeri, su örneğindeki ^{222}Rn aktivite konsantrasyonunu vermez çünkü dışarı sürülen ^{222}Rn , ölçüm kurulumu içinde havada seyreltilmiş ve ^{222}Rn 'nin küçük bir kısmı sulu fazda seyreltilmiş olarak kalmıştı. Şişelenmiş kaynak suyu örneklerindeki ^{222}Rn aktivite konsantrasyonu (A_{Rn}), aşağıda verilen denklem kullanarak belirlendi (Seid vd., 2022):

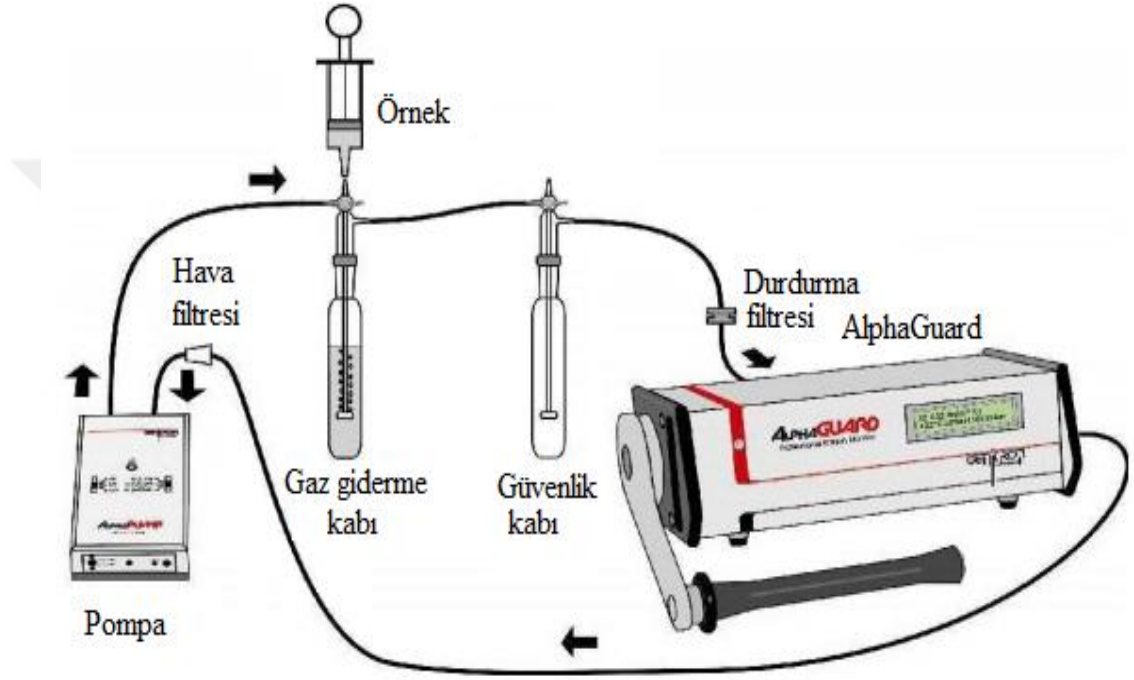
$$A_{\text{Rn}} = \frac{A_{\text{Hava}} \cdot \left(\frac{V_{\text{SIS}} - V_{\text{ÖRN}}}{V_{\text{ÖRN}}} + k \right) - A_0}{1000} \quad (3.1)$$

Burada, A_{Rn} : Şişelenmiş kaynak suyu örneğinin ^{222}Rn aktivite konsantrasyonudur (Bq/m^3); A_{Hava} : ^{222}Rn 'nin sudan çıkarılmasından sonra analizörün belirlediği radon ^{222}Rn aktivite konsantrasyonudur (Bq/m^3); A_0 : Laboratuvar ortamı için analiz edilen ^{222}Rn aktivite konsantrasyonudur (Bq/m^3); V_{SIS} : Analiz düzeneğinin iç hacmidir (mL); $V_{\text{ÖRN}}$: Kaynak suyu örneğinin hacmidir (mL) ve k : ^{222}Rn dağılım katsayısıdır. ^{222}Rn dağılım katsayısı, sıcaklığa bağlı olarak değişim gösterir ve sıcaklığın artması ile azalır (Seid, 2020). 20 °C'deki sudaki radon için dağılım katsayısı yaklaşık 0,25'tir, bu nedenle sudaki ^{222}Rn aktivite konsantrasyonu, havadaki konsantrasyonun yaklaşık % 25'ine düşene kadar sudan salınmaya devam eder. ^{222}Rn 'nin su içindeki

dağılım katsayısının sıcaklığın bir fonksiyonu olarak deneye dayalı bir ifadesi, aşağıda verilen Weigel bağıntısı ile bulunabilir (Seid, 2020):

$$k = 0,1057 + 0,405 \times e^{-0,050 \times T} \quad (3.2)$$

Burada, T, sıcaklıktır.



Şekil 3.1 Radon analiz düzeneğinin şematik gösterimi (Seid, 2020)

4. BULGULAR, TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu bölümde, (I) her bir şişelenmiş kaynak suyu örneğinde ölçülen radon aktivite konsantrasyon değerleri ve (II) incelenen kaynak sularının tüketilmesine eşlik eden radyolojik riski değerlendirmek için su örneklerindeki radon gazı sebebiyle iç ışınlamadan kaynaklanan toplam yıllık etkin radyasyon doz ve yaşam boyu kanser risk değerleri, tablolar ve grafikler şeklinde verildi, tartışıldı ve ulusal ve/veya uluslararası kuruluşlar tarafından belirlenen azami sınır değerler veya ölçütler ile karşılaştırıldı.

4.1 Radon Aktivite Konsantrasyonu

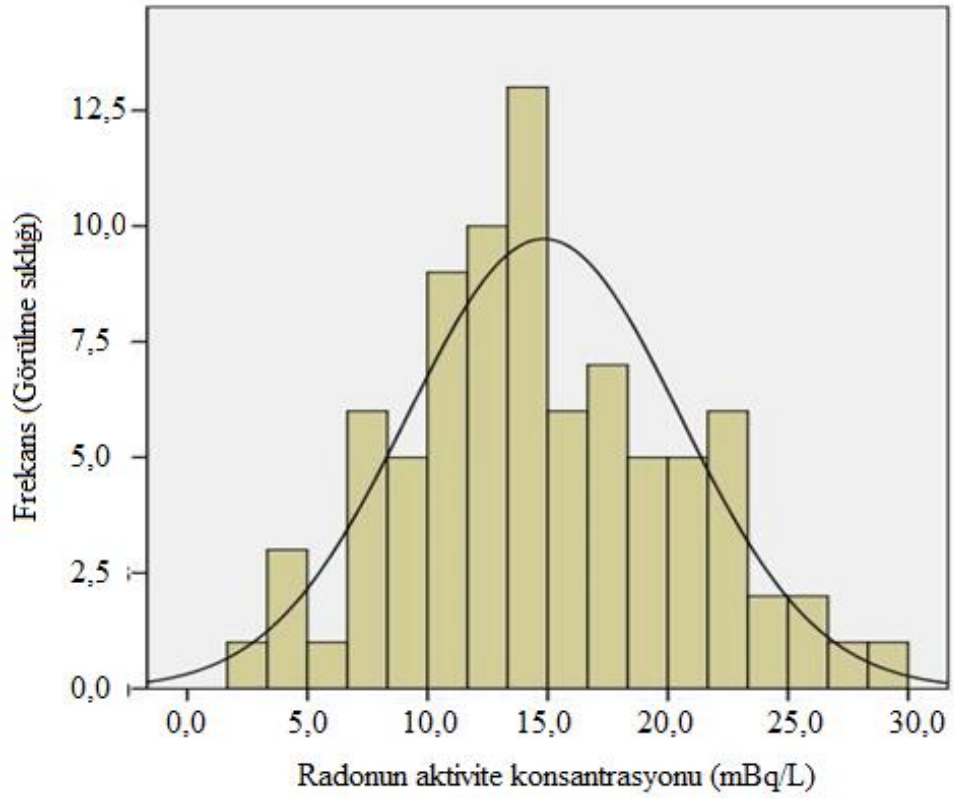
Şişelenmiş kaynak suyu (ŞKS) örneklerinde analiz edilen radonun aktivite konsantrasyonları ile ilgili bazı tanımlayıcı istatistiksel veriler, Tablo 4.1’de ve analiz edilen radonun frekans dağılımı ise Grafik 4.1’de verildi. Her bir şişelenmiş kaynak suyu örneğinin radon aktivite seviyesi, ölçme belirsizliği ile birlikte Tablo 4.2’de sunuldu. Tablo 4.1’den de görülebileceği gibi incelenen ŞKS örneklerinde analiz radon aktivite konsantrasyonlarının, ortalama ve ortanca değeri 14,8 mBq/L ve 14,7 mBq/L bulundu. Radon aktivite konsantrasyonları, $3,2 \pm 0,8$ mBq/L – $28,7 \pm 2,7$ mBq/L aralığında değişmektedir. Grafik 4.1 ‘den, ^{222}Rn konsantrasyonlarının dağılımının normale yakın dağılım sergilediği görülebilir. Şişelenmiş kaynak suyu örneklerindeki radon derişiminin yaklaşık %80’i 10 mBq/L – 22 mBq/L aralığındadır. ^{222}Rn ’nin en yüksek konsantrasyonu, ŞKS-68 kodlu su örneğinde analiz edilirken en düşük konsantrasyon ise ŞKS-29 kodlu örnekte analiz edildi.

Tablo 4.1 Şişelenmiş kaynak suyu örneklerinin radon aktivite konsantrasyonuna ilişkin bazı tanımlayıcı istatistiksel veriler

	^{222}Rn aktivite konsantrasyonu (mBq/L)
Ortalama	14.8
Standart Hata	0.6
Ortanca	14.7
Standart Sapma	5.7
Basıklık	-0.3
Çarpıklık	0.2
En küçük	3.2
En büyük	28.7
Örnek sayısı	83

Tablo 4.2 Şişelenmiş kaynak suyu örneklerinin radon aktivite seviyeleri

Örnek kodu	²²² Rn aktivite konsantrasyonu (mBq/L)	Örnek kodu	²²² Rn aktivite konsantrasyonu (mBq/L)
ŞKS-1	25,4 ± 1,7	ŞKS-43	14,4 ± 2,1
ŞKS-2	11,5 ± 1,3	ŞKS-44	14,7 ± 1,2
ŞKS-3	20,1 ± 3,0	ŞKS-45	11,0 ± 1,9
ŞKS-4	5,4 ± 0,8	ŞKS-46	10,1 ± 1,1
ŞKS-5	13,4 ± 2,3	ŞKS-47	14,9 ± 1,7
ŞKS-6	8,2 ± 0,8	ŞKS-48	17,7 ± 1,5
ŞKS-7	10,0 ± 1,8	ŞKS-49	15,0 ± 1,9
ŞKS-8	15,3 ± 2,1	ŞKS-50	9,2 ± 0,7
ŞKS-9	18,1 ± 1,4	ŞKS-51	10,1 ± 1,5
ŞKS-10	4,1 ± 1,1	ŞKS-52	22,5 ± 2,2
ŞKS-11	15,0 ± 2,0	ŞKS-53	16,3 ± 2,2
ŞKS-12	26,7 ± 3,4	ŞKS-54	12,2 ± 1,8
ŞKS-13	10,2 ± 1,1	ŞKS-55	25,8 ± 3,4
ŞKS-14	13,2 ± 1,4	ŞKS-56	19,0 ± 2,1
ŞKS-15	13,2 ± 1,3	ŞKS-57	8,1 ± 0,8
ŞKS-16	15,0 ± 1,8	ŞKS-58	3,4 ± 0,8
ŞKS-17	17,0 ± 2,1	ŞKS-59	20,4 ± 3,1
ŞKS-18	19,9 ± 2,8	ŞKS-60	14,9 ± 1,1
ŞKS-19	4,4 ± 0,9	ŞKS-61	25,0 ± 3,2
ŞKS-20	11,0 ± 0,8	ŞKS-62	17,2 ± 1,8
ŞKS-21	19,1 ± 1,5	ŞKS-63	22,2 ± 3,4
ŞKS-22	18,9 ± 1,9	ŞKS-64	15,2 ± 1,6
ŞKS-23	14,0 ± 1,7	ŞKS-65	20,8 ± 2,3
ŞKS-24	13,2 ± 1,6	ŞKS-66	8,1 ± 0,8
ŞKS-25	20,4 ± 3,0	ŞKS-67	10,9 ± 1,2
ŞKS-26	13,4 ± 1,4	ŞKS-68	28,7 ± 2,7
ŞKS-27	11,8 ± 1,2	ŞKS-69	9,0 ± 0,9
ŞKS-28	7,1 ± 0,8	ŞKS-70	13,2 ± 1,1
ŞKS-29	3,2 ± 0,8	ŞKS-71	16,9 ± 1,8
ŞKS-30	21,7 ± 1,8	ŞKS-72	25,0 ± 3,2
ŞKS-31	13,0 ± 1,6	ŞKS-73	15,9 ± 1,8
ŞKS-32	11,3 ± 1,7	ŞKS-74	19,0 ± 1,9
ŞKS-33	14,7 ± 1,3	ŞKS-75	8,1 ± 0,8
ŞKS-34	20,8 ± 1,3	ŞKS-76	22,6 ± 1,4
ŞKS-35	9,0 ± 0,9	ŞKS-77	10,0 ± 1,6
ŞKS-36	16,3 ± 1,7	ŞKS-78	16,8 ± 1,6
ŞKS-37	13,7 ± 1,6	ŞKS-79	22,0 ± 3,0
ŞKS-38	17,0 ± 2,1	ŞKS-80	14,1 ± 1,6
ŞKS-39	7,2 ± 0,9	ŞKS-81	23,0 ± 2,7
ŞKS-40	16,2 ± 1,6	ŞKS-82	12,7 ± 1,2
ŞKS-41	12,0 ± 1,5	ŞKS-83	13,0 ± 1,4
ŞKS-42	11,2 ± 1,5		



Grafik 4.1 Radon aktivite konsantrasyonunun frekans dağılımı

Son yıllarda DSÖ tarafından hazırlanan içme suyu kalitesi yönergesinde (WHO, 2022) ve Türkiye'deki ilgili kurum veya kuruluşlar tarafından hazırlanan içme suları ile ilgili yönetmelik ve standartlarda, radonun aktivite konsantrasyonu ile ilgili herhangi bir sınır veya azami değer tavsiye edilmemiştir. Bununla birlikte, radyolojik koruma açısından, Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı (ABDÇKA) (USEPA, 1986) tarafından hazırlanan yönetmelikte ve Avrupa Komisyonu (AK) tarafından hazırlanan direktifte (EU Directive, 2013), içme suyunda ^{222}Rn aktivite konsantrasyonu için sırasıyla 11,1 Bq/L ve 100 Bq/L sınır değerleri önerilmiştir. Bu çalışmada incelenen ŞKS örneklerinde analiz edilen ortalama ^{222}Rn aktivite konsantrasyonunun, farklı ülkelerde tüketilen şişelenmiş içme suyu (ŞİS), şişelenmiş maden suyu (ŞMS) ve ŞKS örneklerinde değişik analiz teknikleri kullanılarak belirlenen ^{222}Rn aktivite konsantrasyonları ve önerilen sınır değerler ile karşılaştırılması, Tablo 4.3'te sunuldu. Tablo 4.3'ten de görülebileceği gibi ŞKS örneklerinin ^{222}Rn konsantrasyonları, ABDÇKA ve AK tarafından önerilen değerlerin önemli ölçüde çok altındadır. ŞKS örneklerinin ^{222}Rn aktivite konsantrasyonu aralığının, Çin (Urumçi), Mısır ve Gana'da tüketilen ŞİS

örneklerinde ve İspanya (Sevilla) ve Türkiye'de tüketilen ŞMS örneklerinde belirlenenlerle karşılaştırılabilir olduğu açıktır. Bununla birlikte Cezayir, Avusturya, Bangladeş (Dakka), Irak, İran (Bandar Abbas), Kuveyt (Kuveyt şehri), Suudi Arabistan, Sırbistan'da (Novi) ve Sakarya'da tüketilen ŞİS örneklerinde ve Bursa'da tüketilen ŞKS örneklerinde analiz edilenlerden önemli ölçüde daha düşüktür. Bunun nedeni, ŞİS örneklerinin daha uzun raf ömürlerinin veya ham su kaynağındaki ^{222}Rn seviyelerindeki dalgalanmaların sonucu olabilir. Genel olarak, şişelenmiş içme sularındaki ^{222}Rn aktivite konsantrasyonu, suyun kaynağına, ham su kaynaklarının jeolojisine ve litografisine ve ham suyun toplanma mevsimlerine ve şişelenmiş içme sularının pazara taşınması ve depolanması sırasında geçen süreye bağlıdır.

Tablo 4.3 ŞKS örneklerinde analiz edilen radon konsantrasyonunun literatür ve sınır değerler ile karşılaştırılması

Ülke	Su tipi	^{222}Rn aktivitesi (Bq/L)		Kaynak
		Ortalama	Aralık (min-max)	
Cezayir	ŞİS	7,0	2,60 – 14,00	Amrani, 2002
Avusturya	ŞİS	0,54	0,12 – 18,0	Kralik vd., 2003
Bangladeş (Dhaka)	ŞİS	0,59	0,11 – 1,30	Al Mahmud vd., 2023
Çin (Urumqi)	ŞİS	0,09	0,01 – 0,30	Yong vd., 2020
Mısır	ŞİS	0,09	0,02 – 0,24	Hussein, 2019
Gana	ŞİS	0,06	0,03 – 0,09	Opoku-Ntim vd., 2019
Irak	ŞİS	0,11	0,04 – 0,28	Abojassim vd., 2017
İran (Bandar Abbas)	ŞİS	0,64	0,0 – 0,90	Fakhri vd., 2016
Kuveyt	ŞİS	2,97	1,02 – 6,05	Seoud, 2017
Suudi Arabistan	ŞİS	0,40	0,10 – 1,10	Abuelhia, 2019
Sırbistan (Novi Sad)	ŞİS	1,82	0,15 – 3,70	Todorovic vd., 2012
İspanya (Sevilya)	ŞİS	0,017	0,007 – 0,027	Mas vd., 2021
Türkiye	ŞMS	0,043	0,0306 – 0,0576	Seid vd., 2022
Türkiye (Sakarya)	ŞİS	5,41	0,75-22,8	Yakut vd., 2013
Türkiye (Bursa)	ŞKS	0,14	0,03 – 0,43	Akar vd., 2009
Türkiye	ŞKS	0,015	0,0032 – 0,0287	Bu çalışma
USEPA		11,1		USEPA, 1986
AK		100		EU Directive. 2013

4.2 Radyolojik Risk Değerlendirmesi

Şişelenmiş kaynak suyu örneklerinin tüketilmesi (içilmesi ve/veya su örneklerindeki radonun solunması) sonucunda vücut içine giren olan ^{222}Rn ve kısa yarı ömürlü

bozunum ürünlerinden yayınlanan iyonlaştırıcı radyasyon, bireylerin dâhili (iç) ışınlamasına sebep olur. Uzun süreli dâhili maruz kalma, bazı iç organlara işlevlerini kaybettirecek şekilde hasar verebilir. Bu nedenle dâhili ışınlamaya eşlik eden radyolojik riskin değerlendirilmesi önemlidir (Seid vd., 2022). Bu iç ışınlamadan kaynaklanan radyolojik riski değerlendirebilmek için ^{222}Rn 'nin sindirilmesi ve solunması ile alınan toplam yıllık etkin radyasyon dozunun tahmini olarak hesaplanması gerekir. Sindirilmeden kaynaklanan yıllık etkin radyasyona dozu, su tüketim oranlarına ve ^{222}Rn konsantrasyonlarına bağlıdır ve aşağıdaki formül kullanılarak tahmin edilmiştir (Seid vd., 2022):

$$\text{YERD}_{\text{SIN}} = A_{\text{Rn}} \times \text{DK}_{\text{SIN}} \times \text{YT} \times 0,001 \quad (4.1)$$

Burada, YERD_{SIN} : ^{222}Rn 'nin sindirilmesi yolu ile alınan yıllık etkin radyasyon dozudur ($\mu\text{Sv/y}$); A_{Rn} : ŞKS örneklerinde analiz edilen ^{222}Rn aktivite konsantrasyonudur (mBq/L); DK_{SIN} : ^{222}Rn 'nin sindirilmesi için hesaplanan doz dönüştürme faktörüdür ve YT: Yıllık ŞKS suyu tüketimidir (L/y). Hesaplamalarda, DK_{SIN} değerleri, yenidoğan için $0,023 \mu\text{Sv/Bq}$, çocuk için $0,0059 \mu\text{Sv/Bq}$ ve yetişkin için $0,0035 \mu\text{Sv/Bq}$ olarak alındı (UNSCEAR, 2000). ŞKS örneklerindeki ^{222}Rn 'nin solunması ile alınan yıllık etkin radyasyon dozu, aşağıda verilen bağıntı kullanılarak yenidoğan, çocuk ve yetişkin birey için hesaplandı (Seid vd., 2022):

$$\text{YERD}_{\text{SOL}} = A_{\text{Rn}} \times \text{DK}_{\text{SOL}} \times \text{TF} \times \text{DF} \times \text{İZ} \times 0,001 \quad (4.2)$$

Burada, YERD_{SOL} : ^{222}Rn 'nin solunması ile alınan yıllık etkin radyasyon dozudur ($\mu\text{Sv/y}$); DK_{SOL} : ^{222}Rn 'nin solunumu için hesaplanan doz dönüştürme faktörüdür; TF: Radonun sudan havaya transfer katsayısıdır (10^{-4}); DF: Kapalı ortamdaki radon ve bozunum ürünleri arasındaki denge faktörüdür (0,4) ve İZ: Kapalı ortamda geçirilen süredir (7000 h/y). Hesaplamalarda, DK_{SOL} değerleri, yenidoğan ve çocuk için $9 (\text{nSv/h})/(\text{Bq/m}^3)$ ve yetişkin için $13 (\text{nSv/h})/(\text{Bq/m}^3)$ olarak alındı (Seid vd., 2022).

Bu tez kapsamında ^{222}Rn 'nin sindirilmesi eşlik eden yıllık etkin radyasyon doz (YERD_{SIN}) değerleri, aşağıda verilen içme suyu tüketimlerine göre dört farklı

senaryo esas alınarak yenidoğan (1-2 y), çocuk (2-12 y) ve yetişkin (17 y üstü) için hesaplandı.

- Birinci senaryoda, DSÖ ve AK tarafından önerilen yıllık içme suyu tüketimi (yenidoğan için 250 L, çocuk için 350 L ve yetişkin için 730 L) alındı.
- İkinci senaryoda, Birleşmiş Milletler Atomik Radyasyonun Etkileri Bilimsel Komitesi (UNSCEAR) tarafından önerilen yıllık içme suyu tüketimi (yenidoğan için 150 L, çocuk için 350 L ve yetişkin için 500 L) alındı.
- Üçüncü senaryoda, Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı (ABDÇKA veya USEPA) tarafından önerilen yıllık içme suyu tüketimi (yenidoğan için 144 L, çocuk için 250 L ve yetişkin için 400 L) alındı.
- Dördüncü senaryoda Ambalajlı Su Üreticileri Derneği (SUDER) istatistiğine göre kişi başına yıllık şişelenmiş doğal kaynak suyu tüketimi 139 L alındı.

Bu dört farklı senaryo için hesaplanan $YERD_{SIN}$ değerleri, Tablo 4.4, Tablo 4.5, Tablo 4.6 ve Tablo 4.7’de ve incelenen şişelenmiş kaynak suyu örneklerindeki ^{222}Rn ’nin solunması eşlik eden yıllık etkin radyasyon doz ($YERD_{SOL}$) değerleri ise Tablo 4.8’de verildi. Üç yaş sınıfı ve dört senaryo için tahmin edilen toplam yıllık etkin doz değerleri (sindirim, soluma ve toplam) ortalama değerleri ise Tablo 4.9’da sunuldu. Yenidoğan, çocuklar ve yetişkinler için tahmin edilen ortalama toplam yıllık etkin radyasyon dozlar değerleri, sırasıyla, birinci senaryo için 0,123 μSv , 0,068 μSv ve 0,092 μSv ; ikinci senaryo için 0,089 μSv , 0,068 μSv ve 0,080 μSv ; üçüncü senaryo için 0,087 μSv ve 0,059 μSv ve 0,075 μSv ve dördüncü senaryo için 0,085 μSv , 0,050 μSv ve 0,061 μSv olarak bulundu. Tablo 4.4, Tablo 4.5, Tablo 4.6, Tablo 4.7 ve Tablo 4.9’dan hesaplanan bütün yıllık etkin radyasyon doz değerlerinin, DSÖ, Avrupa Komisyonu ve Türk yönetmelik ve standartları tarafından tavsiye edilen 100 μSv ’lik bireysel doz ölçütünden önemli ölçüde düşük olduğu açıkça görülebilir.

Tablo 4.4 Birinci senaryoya ait sindirim için hesaplanan yıllık etkin radyasyon dozları

Örnek kodu	YERD _{SIN} (μSv/y)			Örnek kodu	YERD _{SIN} (μSv/y)		
	1-2 y	2-12 y	> 17 y		1-2 y	2-12 y	> 17 y
ŞKS-1	0,146	0,052	0,065	ŞKS-43	0,083	0,030	0,037
ŞKS-2	0,066	0,024	0,029	ŞKS-44	0,085	0,030	0,038
ŞKS-3	0,116	0,042	0,051	ŞKS-45	0,063	0,023	0,028
ŞKS-4	0,031	0,011	0,014	ŞKS-46	0,058	0,021	0,026
ŞKS-5	0,077	0,028	0,034	ŞKS-47	0,086	0,031	0,038
ŞKS-6	0,047	0,017	0,021	ŞKS-48	0,102	0,037	0,045
ŞKS-7	0,058	0,021	0,026	ŞKS-49	0,086	0,031	0,038
ŞKS-8	0,088	0,032	0,039	ŞKS-50	0,053	0,019	0,024
ŞKS-9	0,104	0,037	0,046	ŞKS-51	0,058	0,021	0,026
ŞKS-10	0,024	0,008	0,010	ŞKS-52	0,129	0,046	0,057
ŞKS-11	0,086	0,031	0,038	ŞKS-53	0,094	0,034	0,042
ŞKS-12	0,154	0,055	0,068	ŞKS-54	0,070	0,025	0,031
ŞKS-13	0,059	0,021	0,026	ŞKS-55	0,148	0,053	0,066
ŞKS-14	0,076	0,027	0,034	ŞKS-56	0,109	0,039	0,049
ŞKS-15	0,076	0,027	0,034	ŞKS-57	0,046	0,017	0,021
ŞKS-16	0,086	0,031	0,038	ŞKS-58	0,020	0,007	0,009
ŞKS-17	0,098	0,035	0,043	ŞKS-59	0,117	0,042	0,052
ŞKS-18	0,114	0,041	0,051	ŞKS-60	0,086	0,031	0,038
ŞKS-19	0,025	0,009	0,011	ŞKS-61	0,144	0,052	0,064
ŞKS-20	0,063	0,023	0,028	ŞKS-62	0,099	0,036	0,044
ŞKS-21	0,110	0,039	0,049	ŞKS-63	0,128	0,046	0,057
ŞKS-22	0,109	0,039	0,048	ŞKS-64	0,087	0,031	0,039
ŞKS-23	0,081	0,029	0,036	ŞKS-65	0,120	0,043	0,053
ŞKS-24	0,076	0,027	0,034	ŞKS-66	0,047	0,017	0,021
ŞKS-25	0,117	0,042	0,052	ŞKS-67	0,063	0,023	0,028
ŞKS-26	0,077	0,028	0,034	ŞKS-68	0,165	0,059	0,073
ŞKS-27	0,068	0,024	0,030	ŞKS-69	0,052	0,019	0,023
ŞKS-28	0,041	0,015	0,018	ŞKS-70	0,076	0,027	0,034
ŞKS-29	0,018	0,007	0,008	ŞKS-71	0,097	0,035	0,043
ŞKS-30	0,125	0,045	0,055	ŞKS-72	0,144	0,052	0,064
ŞKS-31	0,075	0,027	0,033	ŞKS-73	0,091	0,033	0,041
ŞKS-32	0,065	0,023	0,029	ŞKS-74	0,109	0,039	0,049
ŞKS-33	0,084	0,030	0,038	ŞKS-75	0,047	0,017	0,021
ŞKS-34	0,120	0,043	0,053	ŞKS-76	0,130	0,047	0,058
ŞKS-35	0,052	0,019	0,023	ŞKS-77	0,058	0,021	0,026
ŞKS-36	0,094	0,034	0,042	ŞKS-78	0,097	0,035	0,043
ŞKS-37	0,079	0,028	0,035	ŞKS-79	0,127	0,045	0,056
ŞKS-38	0,098	0,035	0,043	ŞKS-80	0,081	0,029	0,036
ŞKS-39	0,041	0,015	0,018	ŞKS-81	0,132	0,047	0,059
ŞKS-40	0,093	0,033	0,041	ŞKS-82	0,073	0,026	0,033
ŞKS-41	0,069	0,025	0,031	ŞKS-83	0,075	0,027	0,033
ŞKS-42	0,064	0,023	0,029				

Tablo 4.5 İkinci senaryoya ait sindirim için hesaplanan yıllık etkin radyasyon dozları

Örnek kodu	YERD _{SIN} (μSv/y)			Örnek kodu	YERD _{SIN} (μSv/y)		
	1-2 y	2-12 y	> 17 y		1-2 y	2-12 y	> 17 y
ŞKS-1	0,088	0,052	0,044	ŞKS-43	0,050	0,030	0,025
ŞKS-2	0,040	0,024	0,020	ŞKS-44	0,051	0,030	0,026
ŞKS-3	0,069	0,042	0,035	ŞKS-45	0,038	0,023	0,019
ŞKS-4	0,019	0,011	0,009	ŞKS-46	0,035	0,021	0,018
ŞKS-5	0,046	0,028	0,023	ŞKS-47	0,051	0,031	0,026
ŞKS-6	0,028	0,017	0,014	ŞKS-48	0,061	0,037	0,031
ŞKS-7	0,035	0,021	0,018	ŞKS-49	0,052	0,031	0,026
ŞKS-8	0,053	0,032	0,027	ŞKS-50	0,032	0,019	0,016
ŞKS-9	0,062	0,037	0,032	ŞKS-51	0,035	0,021	0,018
ŞKS-10	0,014	0,008	0,007	ŞKS-52	0,078	0,046	0,039
ŞKS-11	0,052	0,031	0,026	ŞKS-53	0,056	0,034	0,029
ŞKS-12	0,092	0,055	0,047	ŞKS-54	0,042	0,025	0,021
ŞKS-13	0,035	0,021	0,018	ŞKS-55	0,089	0,053	0,045
ŞKS-14	0,046	0,027	0,023	ŞKS-56	0,066	0,039	0,033
ŞKS-15	0,046	0,027	0,023	ŞKS-57	0,028	0,017	0,014
ŞKS-16	0,052	0,031	0,026	ŞKS-58	0,012	0,007	0,006
ŞKS-17	0,059	0,035	0,030	ŞKS-59	0,070	0,042	0,036
ŞKS-18	0,069	0,041	0,035	ŞKS-60	0,051	0,031	0,026
ŞKS-19	0,015	0,009	0,008	ŞKS-61	0,086	0,052	0,044
ŞKS-20	0,038	0,023	0,019	ŞKS-62	0,059	0,036	0,030
ŞKS-21	0,066	0,039	0,033	ŞKS-63	0,077	0,046	0,039
ŞKS-22	0,065	0,039	0,033	ŞKS-64	0,052	0,031	0,027
ŞKS-23	0,048	0,029	0,025	ŞKS-65	0,072	0,043	0,036
ŞKS-24	0,046	0,027	0,023	ŞKS-66	0,028	0,017	0,014
ŞKS-25	0,070	0,042	0,036	ŞKS-67	0,038	0,023	0,019
ŞKS-26	0,046	0,028	0,023	ŞKS-68	0,099	0,059	0,050
ŞKS-27	0,041	0,024	0,021	ŞKS-69	0,031	0,019	0,016
ŞKS-28	0,024	0,015	0,012	ŞKS-70	0,046	0,027	0,023
ŞKS-29	0,011	0,007	0,006	ŞKS-71	0,058	0,035	0,030
ŞKS-30	0,075	0,045	0,038	ŞKS-72	0,086	0,052	0,044
ŞKS-31	0,045	0,027	0,023	ŞKS-73	0,055	0,033	0,028
ŞKS-32	0,039	0,023	0,020	ŞKS-74	0,066	0,039	0,033
ŞKS-33	0,051	0,030	0,026	ŞKS-75	0,028	0,017	0,014
ŞKS-34	0,072	0,043	0,036	ŞKS-76	0,078	0,047	0,040
ŞKS-35	0,031	0,019	0,016	ŞKS-77	0,035	0,021	0,018
ŞKS-36	0,056	0,034	0,029	ŞKS-78	0,058	0,035	0,029
ŞKS-37	0,047	0,028	0,024	ŞKS-79	0,076	0,045	0,039
ŞKS-38	0,059	0,035	0,030	ŞKS-80	0,049	0,029	0,025
ŞKS-39	0,025	0,015	0,013	ŞKS-81	0,079	0,047	0,040
ŞKS-40	0,056	0,033	0,028	ŞKS-82	0,044	0,026	0,022
ŞKS-41	0,041	0,025	0,021	ŞKS-83	0,045	0,027	0,023
ŞKS-42	0,039	0,023	0,020				

Tablo 4.6 Üçüncü senaryoya ait sindirim için hesaplanan yıllık etkin radyasyon dozları

Örnek kodu	YERD _{SIN} (μSv/y)			Örnek kodu	YERD _{SIN} (μSv/y)		
	1-2 y	2-12 y	> 17 y		1-2 y	2-12 y	> 17 y
ŞKS-1	0,084	0,037	0,036	ŞKS-43	0,048	0,021	0,020
ŞKS-2	0,038	0,017	0,016	ŞKS-44	0,049	0,022	0,021
ŞKS-3	0,067	0,030	0,028	ŞKS-45	0,036	0,016	0,015
ŞKS-4	0,018	0,008	0,008	ŞKS-46	0,033	0,015	0,014
ŞKS-5	0,044	0,020	0,019	ŞKS-47	0,049	0,022	0,021
ŞKS-6	0,027	0,012	0,011	ŞKS-48	0,059	0,026	0,025
ŞKS-7	0,033	0,015	0,014	ŞKS-49	0,050	0,022	0,021
ŞKS-8	0,051	0,023	0,021	ŞKS-50	0,030	0,014	0,013
ŞKS-9	0,060	0,027	0,025	ŞKS-51	0,033	0,015	0,014
ŞKS-10	0,014	0,006	0,006	ŞKS-52	0,075	0,033	0,032
ŞKS-11	0,050	0,022	0,021	ŞKS-53	0,054	0,024	0,023
ŞKS-12	0,088	0,039	0,037	ŞKS-54	0,040	0,018	0,017
ŞKS-13	0,034	0,015	0,014	ŞKS-55	0,085	0,038	0,036
ŞKS-14	0,044	0,019	0,018	ŞKS-56	0,063	0,028	0,027
ŞKS-15	0,044	0,019	0,018	ŞKS-57	0,027	0,012	0,011
ŞKS-16	0,050	0,022	0,021	ŞKS-58	0,011	0,005	0,005
ŞKS-17	0,056	0,025	0,024	ŞKS-59	0,068	0,030	0,029
ŞKS-18	0,066	0,029	0,028	ŞKS-60	0,049	0,022	0,021
ŞKS-19	0,015	0,006	0,006	ŞKS-61	0,083	0,037	0,035
ŞKS-20	0,036	0,016	0,015	ŞKS-62	0,057	0,025	0,024
ŞKS-21	0,063	0,028	0,027	ŞKS-63	0,074	0,033	0,031
ŞKS-22	0,063	0,028	0,026	ŞKS-64	0,050	0,022	0,021
ŞKS-23	0,046	0,021	0,020	ŞKS-65	0,069	0,031	0,029
ŞKS-24	0,044	0,019	0,018	ŞKS-66	0,027	0,012	0,011
ŞKS-25	0,068	0,030	0,029	ŞKS-67	0,036	0,016	0,015
ŞKS-26	0,044	0,020	0,019	ŞKS-68	0,095	0,042	0,040
ŞKS-27	0,039	0,017	0,017	ŞKS-69	0,030	0,013	0,013
ŞKS-28	0,024	0,010	0,010	ŞKS-70	0,044	0,019	0,018
ŞKS-29	0,011	0,005	0,004	ŞKS-71	0,056	0,025	0,024
ŞKS-30	0,072	0,032	0,030	ŞKS-72	0,083	0,037	0,035
ŞKS-31	0,043	0,019	0,018	ŞKS-73	0,053	0,023	0,022
ŞKS-32	0,037	0,017	0,016	ŞKS-74	0,063	0,028	0,027
ŞKS-33	0,049	0,022	0,021	ŞKS-75	0,027	0,012	0,011
ŞKS-34	0,069	0,031	0,029	ŞKS-76	0,075	0,033	0,032
ŞKS-35	0,030	0,013	0,013	ŞKS-77	0,033	0,015	0,014
ŞKS-36	0,054	0,024	0,023	ŞKS-78	0,056	0,025	0,024
ŞKS-37	0,045	0,020	0,019	ŞKS-79	0,073	0,032	0,031
ŞKS-38	0,056	0,025	0,024	ŞKS-80	0,047	0,021	0,020
ŞKS-39	0,024	0,011	0,010	ŞKS-81	0,076	0,034	0,032
ŞKS-40	0,054	0,024	0,023	ŞKS-82	0,042	0,019	0,018
ŞKS-41	0,040	0,018	0,017	ŞKS-83	0,043	0,019	0,018
ŞKS-42	0,037	0,017	0,016				

Tablo 4.7 Dördüncü senaryoya ait sindirim için hesaplanan yıllık etkin radyasyon dozları

Örnek kodu	YERD _{SIN} (μSv/y)			Örnek kodu	YERD _{SIN} (μSv/y)		
	1-2 y	2-12 y	> 17 y		1-2 y	2-12 y	> 17 y
ŞKS-1	0,081	0,021	0,012	ŞKS-43	0,046	0,012	0,007
ŞKS-2	0,037	0,009	0,006	ŞKS-44	0,047	0,012	0,007
ŞKS-3	0,064	0,016	0,010	ŞKS-45	0,035	0,009	0,005
ŞKS-4	0,017	0,004	0,003	ŞKS-46	0,032	0,008	0,005
ŞKS-5	0,043	0,011	0,007	ŞKS-47	0,048	0,012	0,007
ŞKS-6	0,026	0,007	0,004	ŞKS-48	0,057	0,015	0,009
ŞKS-7	0,032	0,008	0,005	ŞKS-49	0,048	0,012	0,007
ŞKS-8	0,049	0,013	0,007	ŞKS-50	0,029	0,008	0,004
ŞKS-9	0,058	0,015	0,009	ŞKS-51	0,032	0,008	0,005
ŞKS-10	0,013	0,003	0,002	ŞKS-52	0,072	0,018	0,011
ŞKS-11	0,048	0,012	0,007	ŞKS-53	0,052	0,013	0,008
ŞKS-12	0,085	0,022	0,013	ŞKS-54	0,039	0,010	0,006
ŞKS-13	0,033	0,008	0,005	ŞKS-55	0,082	0,021	0,013
ŞKS-14	0,042	0,011	0,006	ŞKS-56	0,061	0,016	0,009
ŞKS-15	0,042	0,011	0,006	ŞKS-57	0,026	0,007	0,004
ŞKS-16	0,048	0,012	0,007	ŞKS-58	0,011	0,003	0,002
ŞKS-17	0,054	0,014	0,008	ŞKS-59	0,065	0,017	0,010
ŞKS-18	0,064	0,016	0,010	ŞKS-60	0,048	0,012	0,007
ŞKS-19	0,014	0,004	0,002	ŞKS-61	0,080	0,021	0,012
ŞKS-20	0,035	0,009	0,005	ŞKS-62	0,055	0,014	0,008
ŞKS-21	0,061	0,016	0,009	ŞKS-63	0,071	0,018	0,011
ŞKS-22	0,060	0,015	0,009	ŞKS-64	0,049	0,012	0,007
ŞKS-23	0,045	0,011	0,007	ŞKS-65	0,066	0,017	0,010
ŞKS-24	0,042	0,011	0,006	ŞKS-66	0,026	0,007	0,004
ŞKS-25	0,065	0,017	0,010	ŞKS-67	0,035	0,009	0,005
ŞKS-26	0,043	0,011	0,007	ŞKS-68	0,092	0,024	0,014
ŞKS-27	0,038	0,010	0,006	ŞKS-69	0,029	0,007	0,004
ŞKS-28	0,023	0,006	0,003	ŞKS-70	0,042	0,011	0,006
ŞKS-29	0,010	0,003	0,002	ŞKS-71	0,054	0,014	0,008
ŞKS-30	0,069	0,018	0,011	ŞKS-72	0,080	0,021	0,012
ŞKS-31	0,042	0,011	0,006	ŞKS-73	0,051	0,013	0,008
ŞKS-32	0,036	0,009	0,005	ŞKS-74	0,061	0,016	0,009
ŞKS-33	0,047	0,012	0,007	ŞKS-75	0,026	0,007	0,004
ŞKS-34	0,066	0,017	0,010	ŞKS-76	0,072	0,019	0,011
ŞKS-35	0,029	0,007	0,004	ŞKS-77	0,032	0,008	0,005
ŞKS-36	0,052	0,013	0,008	ŞKS-78	0,054	0,014	0,008
ŞKS-37	0,044	0,011	0,007	ŞKS-79	0,070	0,018	0,011
ŞKS-38	0,054	0,014	0,008	ŞKS-80	0,045	0,012	0,007
ŞKS-39	0,023	0,006	0,004	ŞKS-81	0,074	0,019	0,011
ŞKS-40	0,052	0,013	0,008	ŞKS-82	0,041	0,010	0,006
ŞKS-41	0,038	0,010	0,006	ŞKS-83	0,042	0,011	0,006
ŞKS-42	0,036	0,009	0,005				

Tablo 4.8 Solunum için hesaplanan yıllık etkin radyasyon dozları

Örnek kodu	YERD _{SOL} (μSv/y)			Örnek kodu	YERD _{SOL} (μSv/y)		
	1-2 y	2-12 y	> 17 y		1-2 y	2-12 y	> 17 y
ŞKS-1	0,064	0,064	0,092	ŞKS-43	0,036	0,036	0,052
ŞKS-2	0,029	0,029	0,042	ŞKS-44	0,037	0,037	0,054
ŞKS-3	0,051	0,051	0,073	ŞKS-45	0,028	0,028	0,040
ŞKS-4	0,014	0,014	0,020	ŞKS-46	0,025	0,025	0,037
ŞKS-5	0,034	0,034	0,049	ŞKS-47	0,038	0,038	0,054
ŞKS-6	0,021	0,021	0,030	ŞKS-48	0,045	0,045	0,064
ŞKS-7	0,025	0,025	0,036	ŞKS-49	0,038	0,038	0,055
ŞKS-8	0,039	0,039	0,056	ŞKS-50	0,023	0,023	0,033
ŞKS-9	0,046	0,046	0,066	ŞKS-51	0,025	0,025	0,037
ŞKS-10	0,010	0,010	0,015	ŞKS-52	0,057	0,057	0,082
ŞKS-11	0,038	0,038	0,055	ŞKS-53	0,041	0,041	0,059
ŞKS-12	0,067	0,067	0,097	ŞKS-54	0,031	0,031	0,044
ŞKS-13	0,026	0,026	0,037	ŞKS-55	0,065	0,065	0,094
ŞKS-14	0,033	0,033	0,048	ŞKS-56	0,048	0,048	0,069
ŞKS-15	0,033	0,033	0,048	ŞKS-57	0,020	0,020	0,029
ŞKS-16	0,038	0,038	0,055	ŞKS-58	0,009	0,009	0,012
ŞKS-17	0,043	0,043	0,062	ŞKS-59	0,051	0,051	0,074
ŞKS-18	0,050	0,050	0,072	ŞKS-60	0,037	0,037	0,054
ŞKS-19	0,011	0,011	0,016	ŞKS-61	0,063	0,063	0,091
ŞKS-20	0,028	0,028	0,040	ŞKS-62	0,043	0,043	0,063
ŞKS-21	0,048	0,048	0,070	ŞKS-63	0,056	0,056	0,081
ŞKS-22	0,048	0,048	0,069	ŞKS-64	0,038	0,038	0,055
ŞKS-23	0,035	0,035	0,051	ŞKS-65	0,052	0,052	0,076
ŞKS-24	0,033	0,033	0,048	ŞKS-66	0,020	0,020	0,029
ŞKS-25	0,051	0,051	0,074	ŞKS-67	0,027	0,027	0,040
ŞKS-26	0,034	0,034	0,049	ŞKS-68	0,072	0,072	0,104
ŞKS-27	0,030	0,030	0,043	ŞKS-69	0,023	0,023	0,033
ŞKS-28	0,018	0,018	0,026	ŞKS-70	0,033	0,033	0,048
ŞKS-29	0,008	0,008	0,012	ŞKS-71	0,043	0,043	0,062
ŞKS-30	0,055	0,055	0,079	ŞKS-72	0,063	0,063	0,091
ŞKS-31	0,033	0,033	0,047	ŞKS-73	0,040	0,040	0,058
ŞKS-32	0,028	0,028	0,041	ŞKS-74	0,048	0,048	0,069
ŞKS-33	0,037	0,037	0,053	ŞKS-75	0,020	0,020	0,029
ŞKS-34	0,052	0,052	0,076	ŞKS-76	0,057	0,057	0,082
ŞKS-35	0,023	0,023	0,033	ŞKS-77	0,025	0,025	0,036
ŞKS-36	0,041	0,041	0,059	ŞKS-78	0,042	0,042	0,061
ŞKS-37	0,035	0,035	0,050	ŞKS-79	0,055	0,055	0,080
ŞKS-38	0,043	0,043	0,062	ŞKS-80	0,036	0,036	0,051
ŞKS-39	0,018	0,018	0,026	ŞKS-81	0,058	0,058	0,084
ŞKS-40	0,041	0,041	0,059	ŞKS-82	0,032	0,032	0,046
ŞKS-41	0,030	0,030	0,044	ŞKS-83	0,033	0,033	0,047
ŞKS-42	0,028	0,028	0,041				

Tablo 4.9 Toplam yıllık etkin radyasyon dozları

Senaryo	TYERD ($\mu\text{Sv/y}$)								
	Sindirim			Solunum			Toplam		
	Yenidoğan	Çocuk	Yetişkin	Yenidoğan	Çocuk	Yetişkin	Yenidoğan	Çocuk	Yetişkin
Birinci	0,085	0,031	0,038	0,037	0,037	0,054	0,123	0,068	0,092
İkinci	0,051	0,031	0,026	0,037	0,037	0,054	0,089	0,068	0,080
Üçüncü	0,049	0,022	0,021	0,037	0,037	0,054	0,087	0,059	0,075
Dördüncü	0,047	0,012	0,007	0,037	0,037	0,054	0,085	0,050	0,061

İncelenen ŞKS su örneklerinin tüketilmesine eşlik eden yıllık etkin radyasyon dozunun sebep olduğu yaşam boyu kanser riski (YBKR) aşağıda verilen bağıntı ile hesaplandı (ICRP, 1990):

$$YBKR = TYED \times OÖ \times RF \quad (4.3)$$

Burada, TYED: Toplam yıllık etkin radyasyon dozudur ($\mu\text{Sv/y}$); OÖ: Yetişkinler için ortalama yaşam süresidir (79 yıl) (TSE, 2022) ve RF: Risk faktörüdür ($0.057/\text{Sv}$) (ICRP, 1990). Dört farklı senaryo göz önüne alınarak yetişkinler için hesaplanan ortalama yaşam boyu kanser risk değerleri, Tablo 4.10'da verildi. Tablo 4.10'dan da görülebileceği gibi dört senaryo için hesaplanan ortalama yaşam boyu kanser riski değerleri, topraktaki yer kabuğu kökenli radyonüklitlerden kaynaklanan ortalama değer (2,9 x 10⁻⁴) çok altındadır (UNSCEAR, 2008).

Tablo 4.10 Yaşam boyu kanser riski değerleri

Senaryo	YBKR
Birinci	4,1 x 10 ⁻⁷
İkinci	3,6 x 10 ⁻⁷
Üçüncü	3,4 x 10 ⁻⁷
Dördüncü	2,8 x 10 ⁻⁷

4.3 Sonuç

Bu çalışmada, Türkiye’de ticari olarak satılan seksen üç adet şişelenmiş kaynak suyu örneğindeki radon aktivite konsantrasyonu analiz edildi. Analiz edilen radon aktivite konsantrasyonları esas alınarak incelenen su örneklerinin tüketilmesine eşlik eden radyolojik risk, yıllık etkin radyasyon dozu ve yaşam boyu kanser riski hesaplanarak değerlendirildi. Literatür araştırmamıza göre bu tez kapsamında yapılan çalışma, bugüne kadar yapılan ayrıntılı ilk araştırmadır. Bu çalışmada elde edilen veriler, ileriye dönük olarak çevresel radyoaktivitenin değerlendirilmesine ve şişelenmiş doğal kaynak sularındaki radon konsantrasyonu ile ilgili yasal mevzuatın veya standartların hazırlanmasına yönelik olarak kullanılabilecek yol gösterici bilgi mahiyetindedir. Çalışma sonucunda, Türkiye’de ticari olarak satılan ve tüketilen şişelenmiş kaynak sularının içerdiği radondan kaynaklanan radyon riskin, ihmal edilecek seviye olduğu görüldü.

KAYNAKLAR

- Abojassim, A. A., & Shitake, A. R. (2013). Estimated the mean of annual effective dose of radon gases for drinking water in some locations at Al-Najaf city. *Journal of Kufa – Physics*, 5(2), 53–58.
- 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.
- Abuelhia E. 2019. Assessment of radiation dose from radon ingestion and inhalation in commercially bottled drinking water and its annual effective dose in Eastern Province, Saudi Arabia. *Journal of Environmental Health Research*, 29(2), 164–172.
- Ademola, J. A., & Ojeniran, O. R. (2017). Radon-222 from different sources of water and the assessment of health hazard. *Journal of Water and Health*, 15(1), 97–102.
- Ahmad, N., Jaafar, M. S., & Alsaffar, M. S. (2015). Study of radon concentration and toxic elements in drinking and irrigated water and its implications in Sungai Petani, Kedah, Malaysia. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 8, 294–299.
- 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.
- Akar, U., Gürler, O., Kahraman, A., Yalçın, S., Kaynak, G., & Gündoğdu, Ö. (2012). Measurements of radium levels in bottled natural spring water of Marmara region of Turkey. *Romanian Journal of Physics*, 57, 1204–1210.
- Al Mahmud, J., Siraz, M. M. M., Alam, M. S., Das, S. C., Bradley, D. A., Khandaker, M. U., Tokonami, S., Shelley, A., & Yeasmin, S. (2023). A study into the long-overlooked carcinogenic radon in bottled water and deep well water in Dhaka, Bangladesh. *Journal of Environmental Analytical Chemis* DOI: 10.1080/03067319.2022.2163895.
- Alonso, H., Cruz-Fuentes, T., Rubiano, J. G., González-Guerra, J., Cabrera, M. D. C., Arnedo, M. A., Tejera, A., Rodríguez-Gonzalez, A., Pérez-Torrado, F. J., & Martel, P. (2015). Radon in groundwater of the northeastern Gran Canaria aquifer. *Water*, 7, 2575–2590.
- 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.
- Al Zabadi, H., Musmar, S., Issa, S., Dwaikat, N., & Saffarini, G. (2012). Exposure assessment of radon in the drinking water supplies: a descriptive study in Palestine. *BMC Research Notes*, 5(29), 1–8.

- Amin, R. F. (2014). Evaluation of radon gas concentration in the drinking water and dwellings of south-west Libya, using CR-39 detectors. *International Journal of Environmental Sciences*, 4(4), 484–490.
- Amrani, D. (2002). Natural radioactivity in Algerian bottled mineral waters. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 252, 597–600.
- Auvinen, A., Salonen, L., Pekkanen, J., Pukkala, E., Ilus, T., & Kurttio, P. (2005). Radon and other natural radionuclides in drinking water and risks of stomach cancer: A case–cohort study in Finland. *International Journal of Cancer*, 10, 109–113.
- Baykara O, Dogru M. 2006. Measurements of radon and uranium concentration in water and soil samples from East Anatolian active fault systems (Turkey). *Radiation Measurements*, 41, 362–367.
- Beyermann, M., Bünger, T., Schmidt, K., & Obrikat, D. (2010). Occurrence of natural radioactivity in public water supplies in Germany: ^{238}U , ^{234}U , ^{235}U , ^{228}Ra , ^{226}Ra , ^{222}Rn , ^{210}Pb , ^{210}Po and gross α activity concentrations. *Radiation Protection Dosimetry*, 141(1), 72–81.
- Bonotto, D. M. (2014). ^{222}Rn , ^{220}Rn and other dissolved gases in mineral waters of southeast Brazil. *Journal of Environmental Radioactivity*, 132, 21–30.
- Büyüksulu, H., Özdemir, F. B., Öge, T. Ö., & Gökce, H. (2018). Indoor and tap water radon (^{222}Rn) concentration measurements at Giresun University campus areas. *Applied Radiation and Isotopes*, 139, 285–291.
- Campos, M. P., Pecequilo, B. R. S., & Mazzilli, B. P. (2010). ^{222}Rn and ^{212}Pb exposures at a Brazilian spa. *Radiation Protection Dosimetry*, 141(2), 210–214.
- Deeba, F., Rahman, S. H., & Kabir, M. Z. (2021). Assessment of annual effective dose due to inhalation and ingestion of radon from groundwater at the Southeast Coastal area, Bangladesh. *Radiation Protection Dosimetry*, 194(2–3), 169–177.
- Di Carlo, C., Lepore, L., Venoso, G., Ampollini, M., Carpentieri, C., Tannino, A., Ragno, E., Magliano, A., D'Amario, C., Remetti, R., & Bochicchio, F. (2019). Radon concentration in self-bottled mineral spring waters as a possible public health issue. *Scientific Reports*. 39(1), 1–7.
- Duran, S.U., Kucukomeroglu, B., Damla, N., Taskin, H., Celik, N., Cevik, U., & Ersoy, H. (2017). Radioactivity measurements and risk assessment of spa waters in some areas in Turkey. *Isotopes in Environmental and health Studies*, 53(1), 91–103.
- El-Badry, B. A., Al-Naggar, T. I., & Khouqeer, G. A. (2020). Monitoring the levels of radon and toxic elements pollutants in bottled drinking water. *International Journal of Radiation Research*, 18(3), 427–435.

- Elzain, A. A. (2014). A study on the radon concentrations in drinking water in Kassala state (Eastern Sudan) and the associated health effects. *World Applied Sciences Journal*, 31(3), 367–375.
- E Silva, C. R., Machado, D. V., & Da Silva-Filho, E. V. (2019). Determination of the natural radioactivity in the mineral water distributed in the Salutaris Park, Paraíba do Sul, Brazil. *Environmental Earth Sciences*, 78(639), 1–9.
- Erdogan, M., Ozdemir, F., & Eren, N. (2013). Measurements of radon concentration levels in thermal waters in the region of Konya, Turkey. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 49(4), 567–574.
- Erdogdu, M., Damla, N., Kara, A., Sahan, H., Işık, U., Tel, E., & Sahan, M. (2016). Spatial distribution of ^{222}Rn concentrations and dose estimations in various waters. *Human and Ecological Risk Assessment*, 22(4), 927–940.
- Ertugral, F., Yakut, H., Tabar, E., Akkaya, R., Demirci, N., & Zenginerler, Z. (2015). Measurements of radon content in the thermal waters in Sakarya. *Acta Physica Polonica A*, 128, 251–253.
- EU Directive. 2013. Council Directive 51/Euratom. Council Directive 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 Journal of the European Union L 296, 12–21.
- Fakhri, Y., Kargosha, M., Langarizadeh, G., Zandsalimi, Y., Amirhajeloo, L. R., Moradi, M. Moradi, B., & Mirzaei, M. (2016). Effective dose radon 222 of the tap water in children and adults people; Minab City, Iran. *Global Journal of Health Science*, 8(4), 234–243.
- Fonollosa, E., Penalver, A., Borrull, F., & Aguilar, C. (2016). Radon in spring waters in the south of Catalonia. *Journal of Environmental Radioactivity*, 151, 275–281.
- Günay, O., Aközcan, S., & Kulalı, F. (2018). Determination of indoor radon concentrations. *European Journal of Science and Technology*, 13, 91–97.
- Hao, L. C., Phong, Thu, H. N. P., Thang, N. V., & Bao, L. Q. (2015). Radon and radium concentrations in drinkable water supplies of the Thu Duc region in Ho Chi Minh City, Vietnam. *Applied Radiation and Isotopes*, 105, 219–224.
- Haroon, H., & Muhammad S. (2022). Spatial distribution of radon concentrations in groundwater and annual exposure doses in Mirpur District Pakistan. *Groundwater for Sustainable Development*, 17, 1–8.
- Hussein, A. S. (2019). Evaluation of the radiation dose from radon ingestion from different types of drinking water samples in Egypt using nuclear track detectors (LR-115 Type II). *Radiation Protection and Environment*, 42, 168–72.
- ICRP (1990). Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, 212, 1-3, publication 60.

- Iranmanesh, F., Bafti, A. S., Negarestani, A., & Malakootian, M. (2014). Estimated annual effective doses of radon in springs and Qanats nearby Kouhbanan active fault system, Iran. *Journal of Sciences*, 25(4), 345–355.
- Ismail, N. F., Hashim, S., Sanusi, M. S. M., Abdul Rahman, A. T., & Bradley, D. A. (2021). Radon levels of water sources in the Southwest Coastal Region of Peninsular Malaysia. *Applied Sciences*, 11(15), 1–12.
- Jobbáby, V., Altitizoglou, T., Malo, P., Tanner, V., Hult, M. (2017). A brief on radon measurements in drinking water. *Journal of Environmental Radioactivity*, 173, 18–24.
- Kadhim, I. H., Al-shimmary, I. H., & Al-Bodairy, O. H. R. (2012). Study the concentration of radon gas in groundwater in the selected samples of the province of Babel/ Iraq. *Environmental Science An Indian Journal*, 12(2), 78–84.
- Kamenova-Totzeva, R. M., Totzev, A. V., Kotova, R. M. & Ivanova-Teneva, G. R. (2018). Quantitative and qualitative study of radon content in Bulgarian mineral waters. *Radiation Protection Dosimetry*, 181, 48–51.
- 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.
- Kaur, M., Tripathi, P., Choudary, I., Mehra, R., & Kumar, A. (2017). Assessment of annual effective dose due to inhalation and ingestion of radon in water samples from some regions of Punjab, India. *International Journal of Pure and Applied Physics*, 13(2), 193–200.
- Khaled, S. D., Khaled, A. M., Shaban, R. H., & Baset, A. A. (2020). Measurement of ^{222}Rn concentration levels in drinking water samples from Qena city (Egypt) and evaluation of the annual effective doses. *International Journal of Radiation Research*, 18, 227–233.
- Kinahan, A., Hosoda, M., Kelleher, K., Tsujiguchi, T., Akata, N., Tokonami, S., Curri van, L., & Vint ró, 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(4992), 1–12.
- Kotrappa, P., Stieff, L. R., & Volkovitsky, P. (2005). Radon monitor calibration using NIST radon emanation standards: steady flow method. *Radiation Protection Dosimetry*, 113, 70–74.
- Kralik, C., Friedrich, M., & Vojir, F. (2003). Natural radionuclides in bottled water in Austria *Journal of Environmental Radioactivity*, 65, 233–241.
- Krane, K.S. (1987). *Introductory nuclear physics*. 2nd ed., New York: John Willey & Sons.
- Krishan, G., Rao, M. S., Kumar, C. P., & Semwal, P. (2015). Radon concentration in groundwater of east coast of West Bengal, India. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 303, 2221–2225.

- Kurnaz, A., Çetiner, M. A. (2016). Exposure assessment of the radon in residential tap water in Kastamonu, *International Journal of Radiation Research*, 14, 245–250.
- Li, T., Wang, N., & Li, S. (2015). Preliminary investigation of radon concentration in surface water and drinking water in Shenzhen City, South China. *Radiation Protection Dosimetry*, 167, 59–64.
- Mamun, A., & Alazmi A. (2022). Investigation of radon in groundwater and the corresponding human-health risk assessment in Northeastern Saudi Arabia. *Sustainability*, 14(21), 1–12.
- Mas, J. L., Velázquez, L. M., & Hurtado-Bermúdez, S. J. (2021). Optimization of AlphaGUARD AquaKIT set-up for analysis of radon in water using stainless-steel bottles and its validation through IAEA standard samples. *Radiation Measurements*, 142, 1–6.
- Metin, O. (2023). Türkiye’de Farklı Sektörlerde Katkı Ham Maddesi Olarak Kullanılan Bentonit Mineralinin Kimyasal ve Radyometrik Karakterizasyonu. Doktora Tezi, *Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Kastamonu.
- Nagabhushana, S. R., Sunilkumar, Suresh, S., Sannappa, J., & Srinivasa, E. (2020). Study on activity of radium, radon and physicochemical parameters in ground water and their health hazards around Tumkur industrial area. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 323, 1393–1403.
- Nasir, T., & Shah, M. (2012). Measurement of annual effective doses of radon from drinking water and dwellings by CR-39 track detectors in Kulachi city of Pakistan. *Journal of Basic & Applied Sciences*, 8, 528–536.
- Nayak, T., Basak, S., Deb, A., & Dhal, P. K. (2022). A systematic review on groundwater radon distribution with human health consequences and probable mitigation strategy, *Journal of Environmental Radioactivity*, 247, 1–9.
- Oner, F., Yalim, H. A., Akkurt, A., & Orbay, M. (2009). The measurement of radon concentrations in drinking water and the Yesilirmak River water in the area of Amasya in Turkey. *Radiation Protection Dosimetry*, 133(4), 223–226.
- Oni, E. A., Oni, O. M., Oladapo, O. O., Olatunde, I. D., & Adediwura, F. E. (2016). Measurement of radon concentration in drinking water of Ado-Ekiti, Nigeria. *Journal of Academia and Industrial Research*, 4(8), 190–192.
- Opoku-Ntim, I., Gyampo, O., & Andam, A. B. (2019). Risk assessment of radon in some bottled water on the Ghanaian market. *Environmental Research Communications*, 1, 1–8.
- Öge, T. Ö, & Özdemir, F. B. (2020). Assessment of radioactivity from groundwater samples from selected areas of Western Black Sea Region, Turkey. *Radiochimica Acta*, 108(6), 499–508.
- 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.
- Petrosyan, V., & Perikhanyan Y. (2022). Assessment of possible risks on human health by estimation of annual effective doses associated with radon in drinking water. *Applied Radiation and Isotopes*, 189, 1–5.
- Piñero García, F., Thomas, R., Mantero, J., Forssell-Aronsson, E., & Isaksson, M. (2021). Radiological impact of naturally occurring radionuclides in bottled water. *Food Control* 130, 1–9.
- Pinti, D. L., Retailleau, S., Barnette, D., Moreira, F., Moritz, A. M., Larocque, M., Gélinas, Y., Lefebvre, R., Hélie, J. F., & Valadez, A. (2014). ²²²Rn activity in groundwater of the St. Lawrence Lowlands, Quebec, eastern Canada: relation with local geology and health hazard. *Journal of Environmental Radioactivity*, 136, 206–217.
- 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.
- Ravikumar, P., & Somashekar, R. K. (2014). Determination of the radiation dose due to radon ingestion and inhalation. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 11, 493–508.
- 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.
- Seid, A. M. (2020). Türkiye'de Tüketilen Şişelenmiş Maden Sularındaki Radon Aktivitesinin Aktif Yöntem İle Ölçülmesi ve Yıllık Etkin Radyasyon Dozunun Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, *Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Kastamonu.
- 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., Nabulssi, A., & Metwally, W. A. (2020). Age-dependent effective ingestion dose estimations and lifetime risk assessment for selected radionuclides (40K 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.

- Singla, A.K., Kanse, S., Kansal, S., Rani, S., & Mehra, R. A. (2023). Comprehensive study of radon in drinking waters of Hanumangarh district and the assessment of resulting dose to local population. *Environmental Geochemistry Health*, 45(2), 443–455.
- Sola, P., Srisuksawad, K., Loaharojanaphand, S., O-Manee, A., Permmnamtip, V., Issarapan, P., & Thummagarun, L. (2013). Radon concentration in air, hot spring water, and bottled mineral water in one hot spring area in Thailand. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 297, 183–187.
- Sultan, D. A. O. (2020). Kastamonu’da Yetiştirilen Siyez (*Triticum monococcum* L.) Buğdayının Radyonüklit, Esansiyel ve Ağır Metal İçeriklerinin Tahratsız Analiz Yöntemi ile Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, *Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Kastamonu.
- Suresh, S., Rangaswamy, D. R., Srinivasa, E., Sannappa, J. (2019). Measurement of radon concentration in drinking water and natural radioactivity in soil and their radiological hazards. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 13(1), 12–26.
- Tabar, E., & Yakut, H. (2014). Determination of ^{226}Ra concentration in bottled mineral water and assessment of effective doses, a survey in Turkey. *International Journal of Radiation Research*, 12(3), 193–201.
- Tan, W., Li, Y., Tan, K., Xie, Y., Han, S., & Wan, P. (2019). Distribution of radon and risk assessment of its radiation dose in groundwater drinking for village people nearby the W-polymetallic metallogenic district at Dongpo in southern Hunan province, China. *Applied Radiation and Isotopes*, 151, 39–45.
- Tasev, G., Serafimovski, T., Boev, B., & Gjorgiev, L. (2022). Radon and radium concentration in self-bottled mineral spring water from the public fountain “Elixir” at the Moklište area, Republic of North Macedonia. *Geologica Macedonica*, 36(1), 55–72.
- 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.
- Thabayneh, K. M. (2015). Measurement of ^{222}Rn concentration levels in drinking water and the associated health effects in the Southern part of Westbank – Palestine. *Applied Radiation and Isotopes*, 103, 48–53.
- Todorovic, N., Nikolov, J., Forkapic, S., Bikit, I., Mrdja, D., Krmar, M., & Veskovic, M. (2012). Public exposure to radon in drinking water in SERBIA. *Applied Radiation and Isotopes*, 70, 543–549.
- TSE (Türk Standardları Enstitüsü), 2022. Avrupa Ülkelerinde Cinsiyete Göre Doğumda Beklenen Yaşam Süresi. Web sayfası <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Hayat-Tabloları-2017-2019-33711> (20/01/2022).

- Turhan, Ş., & Kurnaz, A. (2022). Potentially toxic element contamination and health risk assessment in bottled mineral waters consumed in Turkey. *International Journal of Environmental Health Research*, doi: 10.1080/09603123.2022.2105825.
- UNSCEAR (2000). Sources and effects of ionizing radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, *United Nations Publication*, New York, USA.
- UNSCEAR (2008). Sources and effects of ionizing radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, *United Nations Publication*, New York, USA.
- URL-1. T.C Sağlık Bakanlığı Halk Sağlığı Genel Müdürlüğü Çevre Sağlığı Dairesi Başkanlığı. İzinli Ambalajlı sular listesi pdf. <https://hsgm.saglik.gov.tr> Erişim Tarihi; 16/03/2023.
- URL-2. SUDER (Türkiye'deki Ambalajlı Su Üreticileri Derneği). Suder-İstatistik: <https://suder.org.tr/ambalajli-su/istatistik> Erişim Tarihi; 16/03/2023.
- USEPA, 1986. United States Environmental Protection Agency. Drinking Water Regulation, Code of Federal Regulations, 40 Part 141, USA.
- Vučković, B., Todorović, N., Nikolov, J., Radovanović, D., & Kevkić, T. (2019). Assessment of radiation risk from drinking water at public fountains on the wider territory of Kruševac. *Publication in Natural Sciences*, 9(1), 72–76.
- Walencik, A., Kozłowska, B., & Zipper, J. D. (2010). Natural radioactivity in underground water from the Outer Carpathians in Poland with the use of nuclear spectrometry techniques. *Applied Radiation and Isotopes*, 68, 839–843.
- WHO (World Health Organization). (2011). *Guidelines for Drinking-water Quality*. 4th edition, WHO Library Cataloguing-in-Publication Data NLM classification: WA 675, Geneva.
- WHO (World Health Organization). 2022. *Guidelines for Drinking-water Quality*, Fourth edition incorporating the first and second addenda, WHO Library Cataloguing-in-Publication Data NLM classification: WA 675, Geneva.
- Wu, Y. Y., Ma, Y. Z., Cui, H. X., Liu, J. X., Sun, Y. R., Shang, B., & Su, X. (2014). Radon concentrations in drinking water in Beijing City, China and contribution to radiation dose. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 11, 11121–11131.
- Yakut, H., Tabar, E., Zenginerler, Z., Demirci, N., & Ertugral F. (2013). Measurement of ²²²Rn concentration in drinking water in Sakarya, Turkey. *Radiation Protection Dosimetry* 157(3), 397–406
- Yalcin, S., Gurler, O., Akar, U. T., Incirci, F., Kaynak, G., & Gundogdu, O. (2011). Measurements of radon concentration in drinking water samples from Kastamonu (Turkey). *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 47(4), 438–445.

- Yalim, H. A., Sandıkcioglu, A., Ünal, R., & Orhun Ö. (2007). Measurements of radon concentrations in well waters near the Akşehir fault zone in Afyonkarahisar, Turkey. *Radiation Measurement*, 42, 505–508.
- Yigitoglu, I., Oner, F., Yalim, H. A., Akkurt, A., Okur, A., & Ozkan, A. (2010). Radon concentrations in water in the region of Tokat city in Turkey. *Radiation Protection Dosimetry*, 142(2–4), 358–362.
- Yong, J., Feng, G., Liu, Q., Tang, C., Wu, B., Hu, Y., Cai, C., & Mao, P. (2020). Radon concentration measurement and effective dose assessment in different brands of commercial bottled water produced in China. *Water Supply*, 20(5), 1581–1591.
- Yousef, H. A. (2018). Assessment of the annual effective dose of bottled mineral waters using closed can technique. *Journal of Advances in Physics*, 14, 5696–5707.
- Yuce, G., & Gasparon, M. (2013). Preliminary risk assessment of radon in ground water: a case study from Eskişehir, Turkey. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 49(2), 163–179.
- Zriba, N. A. EM. (2019). Kapadokya Bölgesinde Tüketilen Ambalajlı Suların Radyolojik ve Kimyasal Özelliklerinin Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, *Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Kastamonu.