

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

**İSTANBUL'UN AVRUPA YAKASINDAKİ SULARDA RADON
ÖLÇÜMÜ VE YILLIK ETKİN DOZLARIN BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İbrahim ESER

Fizik Anabilim Dalı

TEMMUZ 2023

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

**İSTANBUL'UN AVRUPA YAKASINDAKİ SULARDA RADON
ÖLÇÜMÜ VE YILLIK ETKİN DOZLARIN BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İbrahim ESER

Fizik Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hakan YAKUT

TEMMUZ 2023

İbrahim ESER tarafından hazırlanan “İstanbul’un Avrupa Yakasındaki Sularda Radon Ölçümü ve Yıllık Etkin Dozların Belirlenmesi” adlı tez çalışması 27.07.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı : **Prof. Dr. Hakan YAKUT** (Danışman)
Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Doç. Dr. Emre TABAR**
Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Dr. Öğr. Üyesi Yakup BORAN**
Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “İSTANBUL’UN AVRUPA YAKASINDAKİ SULARDA RADON ÖLÇÜMÜ VE YILLIK ETKİN DOZLARIN BELİRLENMESİ” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(27/07/2023).

İbrahim ESER

Eşime ve çocuklarıma...

TEŞEKKÜR

BaŐta eğitim hayatım boyunca maddi, manevi destekleri ile her zaman yanımda olan çok sevdiğim, babam, annem ve aileme, yüksek lisans eğitimim boyunca bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, Sakarya Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümündeki değerli hocalarıma, incelemek üzere toplamıŐ olduğum numunelerin ölçülmesinde, efektif dozların hesaplanmasında ve tez yazım aŐamasında her türlü bilgi, birikim ve yardımlarını esirgemeyen değerli danışman hocam Prof. Dr. Hakan YAKUT'a teŐekkürlerimi sunarım.

İbrahim ESER

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SİMGELER	xv
TABLO LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Radon Gazı Özellikleri ve Sağlık Üzerindeki Etkileri	2
1.2. Sulardaki Radonun Kaynağı.....	4
1.3. Türkiye’de ve Dünyada Sulardaki Radon Ölçümleri Kısa Literatürü.....	5
2. MATERYAL VE YÖNTEM	15
2.1. Çalışma Bölgesi ve Jeolojik Özellikleri	15
2.2. RAD-7 Radon Ölçüm Cihazı Özellikleri	18
2.3. Numune Hazırlama ve Radon ölçüm Düzenegi	20
3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	23
3.1. Ölçümü Yapılan Suların Radon Aktiviteleri	25
3.1.1. Ölçümü yapılan farklı tipteki suların radon aktivitelerinin karşılaştırılması	27
3.1.2. Ölçümlerin ilçe bazlı karşılaştırılması	28
3.1.3. Ölçümlerin ulusal ve uluslararası çalışmalarla karşılaştırılması	29
3.2. Ölçülen Su Numunelerin İnsanlar Üzerindeki Etkileri	30
3.2.1. Hesaplanan doz değerlerinin ulusal bazlı karşılaştırılması	34
3.2.2. Hesaplanan doz değerlerinin ilçe bazlı karşılaştırılması.....	34
3.3. İçilen ve Solunan Radon Gazının Vücut Organları Üzerindeki Etkileri	35
3.3.1. Maruz kalınan toplam efektif dozların ilçe bazlı değerlendirilmesi	38
KAYNAKLAR	41
EKLER	47
ÖZGEÇMİŞ	53

KISALTMALAR

AB	: Avrupa Birliği
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
Co	: Company
CR-39	: Columbia Resin-39
ÇNAEM	: Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi
DNA	: Deoksiribo Nükleik Asit
DSÖ	: Dünya Sağlık Örgütü
EPA	: United States Environmental Protection Agency
IAEA	: International Atomic Energy Agency
ICRP	: International Commission on Radiological Protection
NCRP	: National Council on Radiation Protection and Measurement
SI	: International System of Unit
TAEK	: Türkiye Atom Enerjisi Kurumu
TSE	: Türk Standartlar Enstitüsü
UNSCEAR	: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atom Radiation
USEPA	: United States Environmental Protection Agency
WHO	: World Health Organization

SİMGELER

α	: Alfa parçacığı
β	: Beta parçacığı
Bq	: Becquerel
L	: Litre
m	: Metre
mSv	: MiliSievert
μSv	: MikroSievert
^{226}Rn	: Radyum
^{222}Rn	: Radon
^{220}Rn	: Toron
^{219}Rn	: Aktinon
Th	: Toryum
U	: Uranyum

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1.1. Uluslararası kuruluşlar ve değişik ülkelerin belirlediği kapalı alanlardaki izin verilen limit radon konsantrasyonları.....	4
Tablo 1.2. Su kaynaklarının ortalama radon konsantrasyonu ve yüzdelik kullanım oranları.	5
Tablo 2.1. Numune alınan ilçeler, İlçe başına alınan örnek sayısı, İlçelerin; Rakım, Nüfus ve Yüzölçümü bilgileri.	18
Tablo 3.1. Ölçümü yapılan suların koordinatları, rakımları, numune alım ve ölçüm zamanları, ikisi arasında geçen süre ve DCF bozunum faktörü değerleri. 24	
Tablo 3.2. Ölçümü yapılan suların Ortalama radon aktiviteleri, Standart sapmaları ve bunların HC+DCF düzeltmeleri yapılmış değerleri ile Minimum-Maksimum değerleri.	25
Tablo 3.3. Ölçümü alınan suların alındığı ilçe, ilçelerden alınan numune sayıları, ilçelerin HC+DCF düzeltmeleri yapılmış ortalama radon aktiviteleri ile bunların Minimum-Maksimum değerleri.....	28
Tablo 3.4. Çeşitli sularda yapılan Ulusal ve Uluslararası çalışmaların değerleri.....	29
Tablo 3.5. Belirli yaş gruplarının; yıllık su alım ve soluma miktarları ile doz dönüşüm katsayıları [39]	31
Tablo 3.6. Ölçümü yapılan suların, içilmesi ve sulardan havaya karışan radonun solunmasından kaynaklanan değişik yaş gruplarındaki yıllık efektif dozlar.	32
Tablo 3.7. Türkiye'nin farklı illerinden toplanan sular için hesaplanan ortalama yıllık veya min-mak. efektif doz değerleri.	34
Tablo 3.8. Ölçümü yapılan suların ilçe bazlı, içilmesi ve sulardan havaya karışan radonun solunmasından kaynaklanan değişik yaş gruplarındaki yıllık efektif dozlar.....	35
Tablo 3.9. Ölçümü yapılan suların içilmesi ve bu sulardan havaya karışan radonun solunması nedeniyle vücut organlarının maruz kaldığı μSvy^{-1} cinsinden yıllık efektif dozlar.	36
Tablo 3.10. Ölçümü yapılan suların ilçe bazlı, içilmesi ve sulardan havaya karışan radonun solunması nedeniyle vücut organların maruz kaldığı μSvy^{-1} cinsinden yıllık efektif dozlar.....	38

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

- Şekil 1.1.** Radon elementi ve özellikleri [bilimgenc.tubitak.gov.tr]..... 3
- Şekil 1.2.** Radon gazı moleküllerinin havayla birlikte solunum yoluyla akciğerlerde birikerek tümöre dönüşmesi ve akciğerlerde biriken radon ürünlerinin bozunumu sonucu olan ışınlanma ve DNA sarmalında meydana gelen harabiyet. [www.jmo.org.tr]..... 3
- Şekil 2.1.** İstanbul'un Avrupa yakasından alınan su numunelerin konumları 15
- Şekil 2.2.** İstanbul'un Avrupa yakasının genel jeoloji haritası (Arıç, 1955; Yalçınlar, 1976; Oktay ve Eren, 1999; Dalgıç, 2004; Dalgıç vd. 2009) [43-48]..... 17
- Şekil 2.3.** RAD-7 (DurrIDGE Co, USA) radon detektörü [49]..... 19
- Şekil 2.4.** RAD-7 cihazında ölçülen radyasyonun radonun hangi bozunum türünden geldiğini gösteren spektrum grafikleri. [49]..... 20
- Şekil 2.5.** Su numunelerinin toplanmasını gösteren resimler. 21
- Şekil 2.6.** RAD7'nin RAD H2O ekipmanları ile şematik gösterimi [49]..... 21
- Şekil 2.7.** Su Numunelerinin RAD-7 H₂O dedektörüne bağlanması ve su numunelerinin köpürtülmesi. 22
- Şekil 3.1.** Ölçülen ²²²Rn konsantrasyon değişimleri..... 27
- Şekil 3.2.** Yetişkin, Çocuk ve Bebekler için içme yoluyla alınan radon miktarları için hesaplanan yıllık efektif doz değişimleri 33

İSTANBUL'UN AVRUPA YAKASINDAKİ SULARDA RADON ÖLÇÜMÜ VE YILLIK ETKİN DOZLARIN BELİRLENMESİ

ÖZET

Bu tezin ana amacı çalışma alanında bulunan su örneklerinin ölçülen radon konsantrasyonlarının kullanım amaçlarına göre bölge halkı üzerinde doğurabileceği radyolojik etkilerin ve risklerin değerlendirilmesidir. İstanbul'un nüfusuyla, endüstriyel faaliyetleriyle ve her açıdan ülkemizin lokomotifi olduğu düşünüldüğünde çevresel radyasyon analizlerinin yapılması ve takibinin düzenli olması da bir gereklilik olmuştur. Bu tez çalışmasında su örneklerinde radon ölçümleriyle literatüre önemli bir katkı sunulması da amaçlanmaktadır. Bu bahsedilen araştırmaların tüm İstanbul'da yapılması uzun bir süreç ve maliyet gerektirdiğinden bu tez çalışması İstanbul'un Avrupa yakasıyla sınırlandırılmıştır. İstanbul ili Avrupa yakasındaki farklı ilçelerden toplanan su örneklerinin analiz edilip bünyelerinde radon gazı barındırıp barındırmadığının tespit edilmesi, sonuçların ulusal ve uluslararası düzeyde yapılmış benzer çalışmalarla karşılaştırılması ve insan sağlığı için radyolojik açıdan bu suların güvenli olup olmadığının belirlenmesi çalışmanın motivasyonunu oluşturmaktadır.

Bu tez çalışmasında İstanbul'un Avrupa yakasında tespit edilen elli farklı noktadan, farklı zamanlarda toplanan su numunelerinin (doğal kaynak suları, çeşme suları, dere yatakları, bentler, barajlar, göletler... gibi) içerisinde çözünmüş halde olan radon ($Rn-222$) gazı konsantrasyonları RAD-7 elektronik radon ölçüm dedektörü kullanılarak Sakarya Üniversitesi Nükleer Fizik Laboratuvarında ölçülmüştür. Ölçüm sonuçları Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ) ve literatürdeki benzer çalışmaların verileriyle karşılaştırılmıştır. Ölçülen ortalama radon konsantrasyonlarına bağlı olarak bu suların kullanımından kaynaklı her bir numune için insan vücuduna etki eden yıllık efektif dozlar hesaplanarak, ulusal ve uluslararası çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

Ölçümü yapılan numunelerdeki maksimum radon aktivitesi $48,986 \text{ BqL}^{-1}$, minimum radon aktivitesi $0,144 \text{ BqL}^{-1}$ ve ortalama radon aktivitesi $11,035 \text{ BqL}^{-1}$ olarak tespit edilmiştir. Bu suların kullanımı ve içilmesinden kaynaklı hesaplanan efektif dozların yetişkinler için; $0,25 \mu\text{Svy}^{-1}$ ile $85,72 \mu\text{Svy}^{-1}$ aralığında, çocuklar için; $0,262 \mu\text{Svy}^{-1}$ ile $89,15 \mu\text{Svy}^{-1}$ aralığında, bebekler için ise; $0,50 \mu\text{Svy}^{-1}$ ile $169 \mu\text{Svy}^{-1}$ aralığında değiştiği bulunmuştur. Elde edilen tüm doz sonuçlarına göre, bebeklerde doz alımı yetişkin ve çocuklardan daha yüksek çıkmıştır. Yetişkin ve çocuklar için hesaplanan tüm yıllık etkin doz sonuçları, DSÖ tarafından önerilen yıllık efektif doz $100 \mu\text{Svy}^{-1}$ değerinin altında iken birkaç numunede bebekler için hesaplanan dozların bu limit değeri aştığı gözlenmiştir. Sonuç olarak, içme suyu olarak kullanılan farklı türdeki sulara (yeraltı suları, baraj, gölet, doğal kaynak suları) radon kaynaklı radyolojik risk düzeyinin düşük olduğu tespit edilmiştir.

MEASUREMENT OF RADON IN THE WATERS OF THE EUROPEAN SIDE OF ISTANBUL AND DETERMINATION OF ANNUAL EFFECTIVE DOSES

SUMMARY

The main purpose of this thesis is to evaluate the radiological effects and risks that the measured radon concentrations of the water samples in the study area may cause on the people of the region according to their intended use. Considering that Istanbul is the locomotive of our country with its population, industrial activities and every aspect, it has been a necessity to carry out environmental radiation analyzes and follow up regularly. In this thesis study, it is also aimed to make an important contribution to the literature with radon measurements in water samples. Since it requires a long process and cost to carry out these researches in all of Istanbul, this thesis study is limited to the European side of Istanbul. The motivation of the study is to analyze the water samples collected from different districts on the European side of Istanbul and to determine whether they contain radon gas, to compare the results with similar studies conducted at national and international level and to determine whether these waters are safe for human health in terms of radiology.

As a result of the existence of the universe and the world, which is our planet, there are a number of elements that they contain within their bodies. Some of these elements have radioactive properties. These radioactive elements transfer the radiation in their bodies to the environment by radiating after a certain period of time. Radioactive elements on Earth emit radiation into the soil, subsurface waters and the earth's surface. The radioactive effect emitted by the universe due to the cosmic elements it possesses is the water resources on the earth and on the surface with the air and the rains; they reach open waters such as lakes, streams, dams, seas, etc.

The radionuclides and radioactive potassium in the natural radioactive series of uranium and thorium are the main source of natural radioactivity in waters, especially groundwater. When the concentrations of activity of these radionuclides are above the normal value, drinking and utility water distributed from sources fed from groundwater can increase the radiation dose to which humans are exposed. When soil and rocks containing even small amounts of uranium interact with surface and groundwater, it is not surprising that we encounter radon in the water we drink or use.

Radon gas is a radioactive element that has no color, smell or taste, is included in the noble gases class of the periodic table with the atomic number 86, and is formed as a result of the radioactive decay of natural uranium in rock, soil and water. Uranium and its decay products can be found in nature in different concentrations. For this reason, radon can pass through all surfaces, rocks, water, soil fragments and building materials containing uranium or radium (^{226}Ra), which is a decay product, into the environment.

In this thesis study, water samples collected at different times from fifty different points identified on the European side of Istanbul (natural spring waters, tap waters, stream beds, embankments, dams, ponds... The concentrations of radon (Rn-222) gas dissolved in it were measured at Sakarya University Nuclear Physics Laboratory using RAD-7 electronic radon measurement detector. The measurement results were compared with the data of similar studies in the World Health Organization (WHO) and the literature. Depending on the measured average radon concentrations, the annual effective doses affecting the human body for each sample resulting from the use of these waters were calculated and compared with national and international studies.

The maximum radon activity in the measured samples was 48.986 BqL^{-1} , the minimum radon activity was 0.144 BqL^{-1} and the mean radon activity was 11.035 BqL^{-1} .

Radon is an element with a low reactivity value. Therefore, it cannot bind chemically to the tissues by inhalation. In addition, its resolution in textures is also very low. Only radon and its decay products can be transported to the lungs by respiration by attaching to dust and other particles and forming radioactive aerosols. The decay products continue to decay, releasing radiation, until they become stable. With the formation of decay in the respiratory tube, the dose of radiation in the bronchial epithelium increases. The biological effects of alpha radioactivity are important because some of the decay products are alpha emitters.

To put it another way, radon gas molecules in soil and water emit into the air as time goes on. These radon gas molecules that enter the air combine with statically charged particles suspended in the air and are taken into the body by respiration. These particles, which are taken into the body through the air, adhere to the inner surface of the lung and disrupt the DNA chain in the lung tissue and cause damage to the lungs and various organs and therefore cancer over time.

Within the scope of our thesis, it was found that the effective doses calculated from the use and drinking of the measured waters ranged from $0.25 \mu\text{Svy}^{-1}$ to $85.72 \mu\text{Svy}^{-1}$ for adults, in the range of $0.262 \mu\text{Svy}^{-1}$ to $89.15 \mu\text{Svy}^{-1}$ for children, and from $0.50 \mu\text{Svy}^{-1}$ to $169 \mu\text{Svy}^{-1}$ for infants.

According to all the dose results obtained, dose intake in infants was higher than in adults and children. All annual effective dose results calculated for adults and children were below the WHO recommended annual effective dose value of $100 \mu\text{Svy}^{-1}$, while in a few samples the calculated doses for infants exceeded this limit value. As a result, it was determined that the level of radiological risk due to radon was low in different types of water used as drinking water (groundwater, dam, pond, natural spring water). As a result of drinking water containing radon and inhaling radon gas released into the air from these waters, various organs of the body are also affected by this situation.

Inhaled radons interact with the lungs and used radons interact with the stomach, large intestine, gonads (ovaries), liver, kidneys and skin, causing damage. The doses to which the stomach and large intestine are exposed due to drinking the measured waters range from $0.004 \mu\text{Svy}^{-1}$ to $1.234 \mu\text{Svy}^{-1}$, with average doses of $0.278 \mu\text{Svy}^{-1}$.

The doses to which the liver is exposed due to the consumption of measured waters range from $0.006 \mu\text{Svy}^{-1}$ to $2.057 \mu\text{Svy}^{-1}$, with an average dose of $0.463 \mu\text{Svy}^{-1}$, the

doses to which the ovaries (gonads) are exposed vary between $0.002 \mu\text{Svy}^{-1}$ and $0.512 \mu\text{Svy}^{-1}$, and the average dose is calculated as $0.116 \mu\text{Svy}^{-1}$.

The doses to which the kidneys are exposed as a result of the inhalation of the measured water into the air and the inhalation of this radon air vary between $0.018 \mu\text{Svy}^{-1}$ and $6.172 \mu\text{Svy}^{-1}$ and the average dose is calculated as $1.390 \mu\text{Svy}^{-1}$.

When the annual effective doses to which the organs are exposed are compared, respectively, from high dose to down; lungs-kidneys-gonads-stomach and colon-skin.

The total dose received by all organs has an average value of $5.886 \mu\text{Svy}^{-1}$ and ranges from $0.077 \mu\text{Svy}^{-1}$ to $26.129 \mu\text{Svy}^{-1}$. Therefore, the total dose amounts affecting the body organs calculated for the samples taken were lower than the threshold value recommended by the WHO World Health Organization ($100 \mu\text{Svy}^{-1}$).

1. GİRİŞ

Evrenin ve gezegenimiz olan dünyanın var oluşu sonucunda bünyelerinde barındırmış oldukları birtakım elementler bulunmaktadır. Bu elementlerden bazıları radyoaktif özelliğe sahiptir. Radyoaktif elementler bünyelerindeki radyasyonu belirli süreler geçtikçe ışıma yaparak ortama aktarmaktadırlar. Yer küredeki radyoaktif elementler radyasyonu toprağa, yer altındaki sulara ve yer yüzüne yaymaktadır. Evrenin sahip olduğu kozmik elementler dolayısıyla yaymış olduğu radyoaktif etki ise hava yoluyla ve yağın yağmurlarla birlikte yer yüzüne ve yüzeydeki su kaynakları olan; göller, akarsular, barajlar, denizler vb. gibi açıktaki sulara ulaşmaktadırlar.

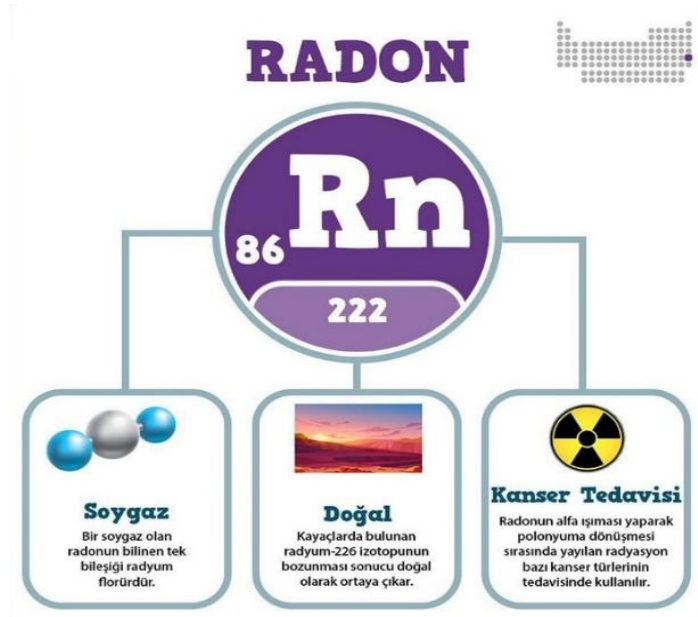
Uranyum ve toryum doğal radyoaktif serilerindeki radyonüklitler ve radyoaktif potasyum, özellikle yeraltı suları olmak üzere sulardaki doğal radyoaktivitenin temel kaynağıdır. Bu radyonüklitlerin aktivite derişimleri normal değerin üzerinde olduğunda, yer altı sularından beslenen kaynaklardan dağıtılan içme ve kullanma suları insanların maruz kaldığı radyasyon dozunu arttırabilir. Az miktarlarda bile Uranyum içeren toprak ve kayaçlar, yüzey ve yer altı sularıyla etkileşime girdiğinde içtiğimiz veya kullandığımız sularda radonla karşılaşmamız sürpriz olmaz. Suyun tüketilmesinden ve sudan salınan radon ve radon bozunum ürünlerinin solunmasından dolayı mide ve akciğer kanseri riski ortaya çıkabilir. Bu nedenle içme ve kullanma sularının radon konsantrasyonlarının belirlenerek Ulusal ve Uluslararası üst limitlerle karşılaştırılıp sağlık riski açısından değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır. Dünya Sağlık Örgütü WHO tarafından $100 \mu\text{Svy}^{-1}$ olarak açıklanan eşik doz değeri, bir insanın yıllık maruz kalabileceği maksimum doz miktarına karşılık gelmektedir. Dolayısıyla bu değerin altında alınan doz miktarları insan sağlığına kayda değer olumsuz etkiler bırakmayacağı gibi, belirtilen değerin üzerinde alınan doz miktarları ise insan vücudunda olumsuz etkiler oluşturabilmektedir. Bu tez çalışmasında İstanbul'un Avrupa yakasında bulunan 50 farklı noktasındaki, içme suyu kaynaklarından alınan, farklı tipteki su örneklerinin (doğal kaynak, çeşme, dere, baraj ve gölet sularının) radon (Rn-222) gazı konsantrasyonları RAD-7 elektronik radon ölçüm aygıtı kullanılarak belirlenmiştir. Bu tezin ana amacı çalışma alanında bulunan

su örneklerinin ölçülen radon konsantrasyonlarının kullanım amaçlarına göre bölge halkı üzerinde doğurabileceği radyolojik etkilerin ve risklerin değerlendirilmesidir. İstanbul'un nüfusuyla, endüstriyel faaliyetleriyle ve her açıdan ülkemizin lokomotifi olduğu düşünüldüğünde çevresel radyasyon analizlerinin yapılması ve takibinin düzenli olması da bir gereklilik olmuştur. Bu tez çalışmasında su örneklerinde radon ölçümleriyle literatüre önemli bir katkı sunulması da amaçlanmaktadır. Bu bahsedilen araştırmaların tüm İstanbul'da yapılması uzun bir süreç ve maliyet gerektirdiğinden bu tez çalışması İstanbul'un Avrupa yakasıyla sınırlandırılmıştır. İstanbul ili Avrupa yakasındaki farklı ilçelerden toplanan su örneklerinin analiz edilip bünyelerinde radon gazı barındırıp barındırmadığının tespit edilmesi, sonuçların ulusal ve uluslararası düzeyde yapılmış benzer çalışmalarla karşılaştırılması ve insan sağlığı için radyolojik açıdan bu suların güvenli olup olmadığının belirlenmesi çalışmanın motivasyonunu oluşturmaktadır.

1.1. Radon Gazı Özellikleri ve Sağlık Üzerindeki Etkileri

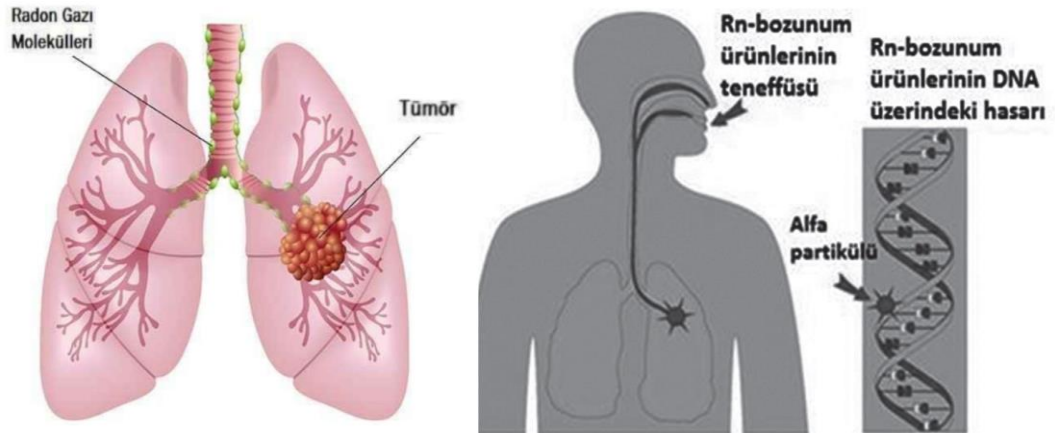
Radon gazı rengi, kokusu, tadı olmayan, 86 atom numarası ile periyodik cetvelin soy gazlar sınıfında yer alan, kaya, toprak ve sudaki doğal uranyumun radyoaktif bozunması sonucunda oluşan radyoaktif bir elementtir. Özellikleri kısaca Şekil 1.1.'de gösterilmiştir. Uranyum ve bozunum ürünleri doğada farklı konsantrasyonlarda bulunabilir. Bu sebepten dolayı da radon, uranyum ya da bozunma ürünü olan radyumun (^{226}Ra) bulunduğu tüm yüzey, kaya, su, toprak parçaları ve yapı malzemelerinden ortama geçiş yapabilmektedir.

Radon reaktivite değeri düşük olan bir elementtir. Dolayısıyla teneffüs edilmesi ile dokulara kimyasal olarak bağlanamaz. Ayrıca, dokulardaki çözünürlüğü de çok düşüktür. Sadece radon ve bozunum ürünleri, toz ve diğer parçacıklara tutunup radyoaktif aerosoller oluşturularak solunum yoluyla akciğerlere taşınabilirler. Bozunma ürünleri, kararlı hale gelene kadar radyasyon salımı yaparak bozunmaya devam eder. Solunum borusunda oluşan bozunma ile, bronşal epiteldeki radyasyon dozu artar. Bozunma ürünlerinin bazılarının alfa yayıcı olmaları nedeniyle alfa radyoaktivitesinin biyolojik etkileri önem kazanmaktadır.



Şekil 1.1. Radon elementi ve özellikleri [bilimgenc.tubitak.gov.tr].

Radon gazı teneffüs edildiğinde, solunum yetmezliği, baş ağrısı, öksürük gibi akut etkiler ortaya çıkmaz. Radyoaktif bozunuma maruz kalan radon gazı, teneffüs edildiği zaman akciğerlerin tutulabileceği parçacıklara dönüşür. Bu parçacıklardaki radon ürünlerinin bozunması neticesinde ortaya çıkan enerji, akciğerlerdeki dokulara zarar verir ve zamanla akciğerlerde kanser oluşabilir.



Şekil 1.2. Radon gazı moleküllerinin havayla birlikte solunum yoluyla akciğerlerde birikerek tümöre dönüşmesi ve akciğerlerde biriken radon ürünlerinin bozunumu sonucu olan ışınlanma ve DNA sarmalında meydana gelen harabiyet. [www.jmo.org.tr].

Başka bir şekilde ifade edecek olursak, toprakta ve suda bulunan radon gazı molekülleri zaman geçtikçe havaya doğru yayılım yaparlar. Havaya karışan bu radon gazı molekülleri havada asılı statik yüklü parçacıklarla birleşmekte ve solunum yoluyla vücuda alınmaktadır. Vücuda hava yoluyla alınan bu parçacıklar akciğerin iç yüzeyine yapışarak akciğer dokusundaki DNA zincirini bozarlar. Bu durum Şekil 1.2.'de gösterilmiştir.

Vücut bozulan hücreleri onarmakla birlikte radon gazının yoğunluğu ve sürekliliğine bağlı olarak onarılamayan hücreler kanserli hücreye dönüşmektedir. Aktif ve pasif sigara içen kişilerde radon gazının olumsuz etkileri daha da artmaktadır. Çünkü tütün ve tütün ürünleri belirli miktarda radon ve bozunum ürünleri içermektedir. Ancak bu, yüksek dozda radona maruz kalmış herkes akciğer kanserine yakalanacak anlamına gelmez. Uluslararası kuruluşların ve bazı ülkelerin izin verdikleri limit radon konsantrasyon değerleri Tablo 1.1.'de gösterilmiştir.

Tablo 1.1. Uluslararası kuruluşlar ve değişik ülkelerin belirlediği kapalı alanlardaki izin verilen limit radon konsantrasyonları.

Ülkeler	Limit değer (Bqm ⁻³)	Ülkeler	Limit değer (Bqm ⁻³)
A.B.D.	150	İsveç	200
Almanya	250	Kanada	800
Avustralya	200	Lüksemburg	250
Çin	200	Norveç	200
Danimarka	400	Rusya	200
Fransa	400	Türkiye	400
Hindistan	150	AB*	400
İngiltere	200	ICRP**	400
İrlanda	200	WHO***	100

1.2. Sulardaki Radonun Kaynağı

Dünya yüzeyinin hemen hemen %71'i sularla çevrilidir. Bu suların %97,5'lik kısmı okyanuslardaki ve denizlerdeki tuzlu sudur. Geri kalan %2,5'lik kısmı ise buzullar, yeraltı ve yerüstü sularındaki tatlı sudur. Tatlı suların da %99,7'lik kısmı buzullar ve yeraltı suları, %0,3'lük kısmı da yüzey sularından oluşmaktadır. Dolayısıyla yeryüzündeki içilebilir suların çok az bir kısmı yüzey sularından oluşmaktadır.

Yer altı suları kayaçlarla ve toprakla sürekli temas halinde olduğundan, kayaçlarda ve toprakta bulunan aktif bozunma ürünleri sulara geçmektedir. Yüzey suları ise bir kısmı topraktan bir kısmı da kozmik ışımalardan dolayı bünyesinde bozunma ürünleri barındırabilir. Dolayısıyla yer altı sularında, bunların yeryüzüne ulaşan kaynaklarında, kuyu sularında ve jeotermal sularda, yüzey sularına oranla daha yüksek değerlerde radon gazı bulunabilmektedir. Hatta kullandığımız içme sularında da radonla karşılaşmamız mümkündür.

Dünya Sağlık Örgütü (WHO), sudan elde edilebilecek yıllık doz için 100 mSvyl^{-1} limiti belirlemiştir. Ülkemizde ise, Sağlık Bakanlığı'nın 17 Şubat 2005 tarih ve 25730 sayılı yönetmeliğine göre birincil ve ikincil içme suyu ve genel su faaliyet standartları α (alfa) yayıcılar için $0,1 \text{ BqL}^{-1}$ ve β (beta) yayıcılar için 1 BqL^{-1} olarak belirlenmiştir. Birleşmiş Milletler Atomik Radyasyonun Etkileri Bilimsel Komitesi (UNSCEAR) tarafından 1993'te "İyonlaştırıcı Radyasyonun Kaynakları, Etkileri ve Riskleri" üzerine yayınladığı raporda ABD ve İngiltere'deki çeşitli su kaynaklarında ölçülen radon konsantrasyonları Tablo 1.2.'de gösterilmiştir.

Tablo 1.2. Su kaynaklarının ortalama radon konsantrasyonu ve yüzdeler kullanım oranları.

Kaynak tipi	Radon Konsantrasyon (BqL^{-1})			Kullanım (%)		
	İngiltere	ABD	Referans Değer	İngiltere	ABD	Referans Değer
Yüzey suyu	1	1,10	1	66	50	60
Yer altı suyu	30	1,15	10	34	32	30
Kuyu suyu	<100	208	100	<1	18	10

1.3. Türkiye'de ve Dünyada Sulardaki Radon Ölçümleri Kısa Literatürü

Bu kesimde ilk olarak ülkemizin farklı yerlerindeki sularda yapılan radon ölçümleriyle ilgili çalışmaların kısa bir özeti aşağıda verilmiştir.

Uludağ (2018), tez çalışmasında Şile, Kandıra ve İzmit konumlarından topladığı kaynak sularında radon konsantrasyonlarını RAD-7 cihazıyla ölçmüş ve radon aktivitesinin 0.334 BqL^{-1} ile 7.810 BqL^{-1} arasında değişmekte olduğunu ve ortalamasının 2.11 BqL^{-1} olarak elde edildiğini bildirmiştir [1].

Özer (2009), yüksek lisans tez çalışmasında Bursa ili Keleş ve Orhanlı ilçelerinden topladığı doğal kaynak suyu örneklerinde radon aktivitesini RAD-7 radon ölçüm aygıtını kullanarak ölçmüştür. Ölçülen radon konsantrasyonlarının 0.704 BqL^{-1} ile 87.48 BqL^{-1} aralığında değiştiğini ve ortalama radon aktivitesinin de 35.05 BqL^{-1} olduğunu belirtmiştir. Bu çalışmada üç numunenin dışında hesaplanan tüm efektif dozların WHO'nun önerdiği $100 \mu\text{Svy}^{-1}$ referans değerinin altında olduğu görülmüştür [2].

Seid (2020), Türkiye'deki marketlerde ticari olarak satılan kırk dokuz şişelenmiş sade ve meyve aromalı doğal maden suyu örneğinin radon aktivite seviyelerini bir aktif radon gazı ölçme sistemi (AlphaGUARD PQ 2 000 PRO) kullanarak ölçmüş ve örneklerindeki radonun aktivite derişiminin, $43.1 \pm 6,1 \text{ mBqL}^{-1}$ ortalama değerle 30.6 mBqL^{-1} ile 57.6 mBqL^{-1} aralığında değiştiğini bulmuştur [3].

Gümbür (2014), yüksek lisans tez çalışmasında da Kahramanmaraş'tan toplanan kırk iki adet su örneğinde radon konsantrasyonlarını, CR-39 pasif iz dedektörlerini kullanılarak belirlemiş ve radon konsantrasyon değerlerinin $305,8 \pm 10,7 \text{ Bq/m}^3$ ile $80,6 \pm 3,9 \text{ Bq/m}^3$ arasında değiştiğini not etmiştir. Radon soluma oranları değerlerini $9,9 \pm 0,4 \text{ mBq/m}^2 \text{ h}$ ile $2,6 \pm 0,1 \text{ mBq/m}^2 \text{ h}$ arasında bularak, çalıştığı içme sularının tavsiye edilen sınır değerlerle mukayese etmiştir [4].

Gümbür (2022), Doğu Anadolu fay zonu uzanımında bulunan Gölbaşı (Adıyaman)-Türkoğlu (Kahramanmaraş) segmenti üzerinde belirlediği 4 istasyonda radon gazı değişimlerinin deprem ile ilişkisinin incelenmesi üzerine yürüttüğü doktora tez çalışmasında kuyu sularından 12 ay boyunca örnekler almış ve bu sularda radon konsantrasyonları Durridge RAD-7 dedektörünü kullanılarak ölçmüştür. Ölçülen radon aktivitelerinin $35 \pm 3 \text{ kBqm}^{-3}$ ile $05 \pm 3 \text{ kBqm}^{-3}$ aralığında değiştiği not edilmiştir [5].

Karahan ve diğerleri (2000), İstanbul'daki çeşitli yüzey sularında (baraj, göl ve çeşme suları) Lucas radon dedektörüyle ^{222}Rn aktivitesini ölçmüş ve aktivitenin 0.019 BqL^{-1} ile 0.048 BqL^{-1} aralığında değiştiğini bildirmişlerdir. Bu çalışmada üç numunenin dışında hesaplanan tüm efektif dozların WHO'nun önerdiği $100 \mu\text{Svy}^{-1}$ referans değerinin altında olduğu görülmüştür [6].

Dervişoğlu (2022) tez çalışmasında, Diyarbakır'daki bazı içme sularında radon konsantrasyon oranlarını 31 numune için ölçmüş ve ortalama ^{222}Rn aktivite

konsantrasyon değerini $0,25 \text{ BqL}^{-1}$ olarak belirlemiştir. Ulusal ve Uluslararası çalışmalarla mukayese ettiğinde çalışmasındaki ortalama radon aktivite konsantrasyonunun diğerlerine göre düşük olduğunu not etmiştir [7].

Shaheen (2022) tezinde, Hilla şehrindeki su istasyonlarından ve yerleşim alanlarından 17 ham numune ve 45 sıvılaştırılmış içme suyu numunesi dahil olmak üzere 62 su numunesinin RAD7 H₂O aksesuarları ile RAD7 dedektörünü kullanarak radon ölçümlerini yapmıştır. Yapılan çalışmada; ham sudaki ortalama radon gazı konsantrasyonu $0,065794 \text{ BqL}^{-1}$, filtrelemeden sonra ise içme suyundaki ortalama radon gazı konsantrasyonu $0,068919 \text{ BqL}^{-1}$ olarak ölçülmüştür. Tüm numunelerdeki yıllık efektif doz miktarı da $0,0050704 \text{ mSvy}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır [8].

Kaptan (2020), tez çalışmasında Sakarya'daki 35 farklı yer altı kaynak sularında radon konsantrasyonunu RAD-7 cihazını ve H₂O aksesuarlarını kullanarak ölçmüştür. Sulara llen radon miktarlarının $0,1-62,4 \text{ BqL}^{-1}$ aralığında değiştiğini ve ortalama değerin ise $21,6 \text{ BqL}^{-1}$ olduğunu belirlemiştir. Su tüketimi ile birlikte insan vücuduna giren radonun sebep olduğu yıllık etkin doz miktarları ortalamalarını, yetişkinler için $38 \mu\text{Svy}^{-1}$, ocuklar için $39 \mu\text{Svy}^{-1}$, ve bebekler için $74 \mu\text{Svy}^{-1}$ olarak bulmuştur [9].

Genç (2019), tez çalışmasında, jeolojik değişimlere bağlı granitik ve metamorfik yapıdaki kayaçların bulunduğu bölgedeki farklı derinliklere sahip 13 kuyudan alınan sulara ²²²Rn aktivite konsantrasyonu AlphaGUARD PQ 2000PRO radon detektörü kullanarak ölçmüştür. Kuyu suları için radon aktivite konsantrasyonlarının $0,83 \text{ BqL}^{-1}$ ve $171,67 \text{ BqL}^{-1}$ aralığında değiştiği gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre bu suların içilmesi ve solunmasına bağlı olarak yıllık etkin doz değerleri tahmini olarak hesaplanmıştır. Sonuçlara göre sadece bir kuyudan alınan örnek hariç diğer su rnekleri DSÖ tarafından tavsiye edilen limit değerin altında yer almaktadır [10].

Tanrıverdi tez çalışmasında (2016), Türkiye'nin doğusunda bulunan Bitlis ilinin ve merkez ilçelerinde ilkbahar, yaz, sonbahar ve kış mevsimlerinde kaynak ve şehir içme sularında radon gazı aktivitesini ölçmüştür. Mevsimsel radon aktiviteler, ilkbahar ölçümleri için $0,43\pm0,07 \text{ BqL}^{-1}$ ile $71,13\pm11,96 \text{ BqL}^{-1}$ aralığında, yaz ölçümleri için $0,46\pm0,11 \text{ BqL}^{-1}$ ile $62,43\pm0,58 \text{ BqL}^{-1}$ aralığında, sonbahar ölçümleri için $0,47\pm0,05 \text{ BqL}^{-1}$ ile $81\pm5,85 \text{ BqL}^{-1}$ aralığında, kış ölçümleri için $0,24\pm0,02 \text{ BqL}^{-1}$ ile $56,1\pm0,03 \text{ BqL}^{-1}$ aralığında bulunmuştur. Elde edilen sonuçların Avrupa komitesi tarafından nerilen 100 BqL^{-1} 'nin altında olduğu görülmüştür [11].

Gündoğan (2016), Kilis il genelinden toplanan 49 adet su örneğinin radon konsantrasyonlarını CR-39 pasif nükleer iz algılayıcıları kullanılarak kapalı kutu yöntemi ile belirlemiştir. Kilis suları için ortalama radon konsantrasyonu $1,86 \text{ BqL}^{-1}$ (standart sapması: 0,09) olarak hesaplanmıştır. Su örneklerinin radon konsantrasyonları $0,69 \text{ BqL}^{-1}$ (SS: 0,06) ile $6,93 \text{ BqL}^{-1}$ (SS: 0,18) arasında değişmektedir. Bu değerler, içme suları için tavsiye edilen sınır değerleri ile karşılaştırılmış ve halk sağlığı açısından herhangi bir tehdit oluşturmadığı belirtilmiştir [12].

Erdoğdu (2015), tez çalışmasında Osmaniye ve çevresinde radon konsantrasyonlarını, AlphaGUARD Radon detektörünü kullanarak ölçmüş ve sonuçlar sunulmuştur. Analizler sonucunda maksimum ve minimum aktivite değerleri sırasıyla $0,986 \pm 0,472 \text{ BqL}^{-1}$ ve $0,164 \pm 0,103 \text{ BqL}^{-1}$ olarak tespit edilmiştir [13].

Tel (2014), Konya'nın Selçuklu, Meram ve Karatay merkez ilçelerindeki 27 farklı konuttan alınan çeşme sularının 2012 yılının sonbahar ve kış mevsimlerindeki radon konsantrasyon değerlerini AlphaGUARD radon gazı görüntüleme sistemini kullanarak belirlemiştir. Bu ölçümler sonucunda su deposu olan 11 konuttan alınan örneklerin sonbahar ve kış mevsimi için radon konsantrasyon değeri ortalama 3.15 BqL^{-1} bulunurken su deposu olmayan konutlardan alınan su örnekleri için bu değer ortalama 10.20 BqL^{-1} bulunmuştur. Bu su örneklerinden içmeye bağlı olarak alınan radyasyon için yıllık etkin doz miktarı minimum $0.17 \mu\text{Svy}^{-1}$ ve maksimum $3.67 \mu\text{Svy}^{-1}$ aralığında iken solumaya bağlı yıllık etkin doz miktarı minimum $2.18 \mu\text{Svy}^{-1}$ ve maksimum $45.84 \mu\text{Svy}^{-1}$ aralığında hesaplanmıştır [14].

Alp (2014), "Batman ilindeki sulara radon konsantrasyonunun tayini" başlıklı tez çalışmasında Genitron Instruments tarafından üretilen AlphaGUARD PQ 2000PRO radon dedektörünü kullanmış ve radon konsantrasyonlarının $0,883 \pm 0,349 \text{ BqL}^{-1}$ ile $0,195 \pm 0,103 \text{ BqL}^{-1}$ arasında değiştiğini ve ortalama radon konsantrasyonunun $0,455 \text{ BqL}^{-1}$ olduğunu bulmuştur [15].

Alakuş (2013), Bursa ili kaynak sularında radon gazının mevsimsel değişimini incelemiş ve ölçülen radon konsantrasyonlarının 0.62 BqL^{-1} ile 50.96 BqL^{-1} değerleri arasında değiştiğini gözlemlemiştir. Yapılan ölçümler sonucunda Bursa ili kaynak sularında kış mevsimi için ortalama radon konsantrasyonu 7.29 BqL^{-1} , ilkbahar mevsimi için ortalama radon konsantrasyonu ise 9.24 BqL^{-1} olarak bulunmuştur [16].

Özkan (2011), Afyonkarahisar'da bulunan termal kaynakların bölgesel olarak radon ve radyum aktivitelerindeki değişimleri incelemiştir. Bu amaçla bölgenin 5 önemli termal kaynağından aldığı su numunelerindeki analizleri sonucunda maksimum radon aktivitesi $8,997 \text{ BqL}^{-1}$, minimum aktivite $0,029 \text{ BqL}^{-1}$, maksimum ve minimum radyum aktiviteleri sırasıyla $0,552 \text{ BqL}^{-1}$ ve $0,018 \text{ BqL}^{-1}$ olarak tespit edilmiştir [17].

Okur (2011), Tokat bölgesi içme ve ırmak sularında ^{222}Rn konsantrasyonunu ölçmüş ve elde edilen radon konsantrasyon değerleri musluk suyu için $0,42\pm 0,28$ ile $1,41\pm 0,37 \text{ BqL}^{-1}$ aralığında, pınar suyu için $0,13\pm 0,17$ ile $1,20\pm 0,29 \text{ BqL}^{-1}$ aralığında, Yeşilirmak sularında $0,09\pm 0,12$ ile $0,83\pm 0,17 \text{ BqL}^{-1}$ aralığında bulunmuştur. Bu radon değerlerinden hesaplanan ortalama efektif doz eşdeğeri musluk suyu için $5,0 \mu\text{Svy}^{-1}$, pınar suyu için $3,0 \mu\text{Svy}^{-1}$ olarak bulunmuştur [18].

İncirli (2011)'nin tez çalışmasında Kastamonu'nun 10 ilçesinde ve Ilgaz dağında toplamda 18 adet su örneği toplanmış ve AlphaGUARD PQ 2000PRO radon detektörüyle radon ölçümleri yapılmıştır. Kastamonu ilçelerinde yapılan bu çalışmada maksimum radon seviyesi ilkbahar dönemi için $12,734 \text{ Bq/L}$, yaz dönemi için $19,213 \text{ Bq/L}$ bulunmuş iken, minimum radon seviyeleri ise ilkbahar dönemi için $0,362 \text{ Bq/L}$, yaz dönemi için $0,312 \text{ Bq/L}$ olarak bulunmuştur [19].

Tabar (2011), yüksek lisans tez çalışmasında 4 farklı jeotermal su kaynağından 10 farklı tarihte su numuneleri toplamak suretiyle radon konsantrasyonlarını ölçmüştür. Ölçülen radon aktiviteleri Zeytindalı Kaplıcasında $0,34 \text{ Bq/L}$ ile $6,12 \text{ Bq/L}$ aralığında, Nebiler Kaplıcasında $0,45 \text{ Bq/L}$ ile $31,00 \text{ Bq/L}$ aralığında, Çamur Kaplıcasında $1,00 \text{ Bq/L}$ ile $19,83 \text{ Bq/L}$ aralığında, Bademli Kaplıcasında ise $1,00 \text{ Bq/L}$ ile $24,83 \text{ Bq/L}$ aralığında değiştiği görülmüştür [20].

Akar (2010), Bursa ilinin sıcak su çıkışı bakımından zengin Çekirge bölgesinden toplanmış termal su örneklerindeki radon konsantrasyonlarını AlphaGUARD PQ 2000PRO radon detektörüyle belirlemiştir. Analiz sonuçlarına göre edilen radon konsantrasyonu değerleri $2,513\pm 0,286 \text{ Bq/L}$ ile $94,347\pm 4,361 \text{ Bq/L}$ arasında değişmektedir. Bazı kaynaklara ait konsantrasyon değerlerinin USEPA (U.S. Environmental Protection Agency) tarafından içme suları için izin verilen 11 Bq/L değerini geçtiği tespit edilmiştir [21].

Akkurt (2006), Afyonkarahisar bölgesindeki 10 farklı termal su kaynağından topladığı örneklerde ^{222}Rn konsantrasyonlarını AB-5R model radon detektörüyle ölçmüş ve konsantrasyonun $0,085-73,62 \text{ BqL}^{-1}$ aralığında değiştiğini belirlemiştir [22].

İzmir'in Çeşme ilçesinde toprak ve yeraltı suları radyoaktivitesini tespit etmek üzere yapılan bir çalışmada 11 kuyu suyu ve 4 termal su örneğinde radon ölçümleri CR-39 katıhal iz detektörleriyle yapılmıştır. Termal sularda elde edilen radon aktivitesi $0,073$ ile $0,294 \text{ Bq/L}$ aralığında ($0,207 \text{ Bq/L}$ ortalama değerle) ve kuyu sularında ise $0,086$ ile $0,493 \text{ Bq/L}$ aralığında ($0,303 \text{ Bq/L}$ ortalama değerle) bulunmuştur [23].

Doğu Karadeniz Bölgesindeki çeşme sularında doğal radyoaktivitenin belirlenmesi üzerine yapılan bir çalışmada sıvı sintilasyon sayıcı kullanarak spesifik ^{222}Rn aktiviteleri 10.82 BqL^{-1} olarak ölçülmüş ve efektif doz $5.848 \mu\text{Svy}^{-1}$ olarak tahmin edilmiştir [24].

Erees ve diğerlerinin (2006), Türkiye'nin batısındaki toprak gazında ve termal sularda radon gazı ölçümlerinde (fay hattı boyunca) termal sularda radon aktivitesinin $0,67 \text{ BqL}^{-1}$ ile $25,90 \text{ BqL}^{-1}$ arasında değiştiği tespit edilmiştir [25].

Yarar ve diğ. (2006) tarafından Türkiye'nin batısındaki İzmir-Dikili bölgesi jeotermal su örneklerinde Rn-222 konsantrasyonları ölçülmüş ve radon aktivitesinin 29 Bq/m^3 ile 3075 Bq/m^3 arasında değiştiği belirlenmiştir [26].

Yalım ve diğ. (2007) tarafından Afyonkarahisar'da fay hattı boyunca bazı kuyu sularında radon konsantrasyonu Packard Tri-Carb 2770TR/SL model sıvı sintilasyon analizörü kullanılarak ölçülmüş ve aktivitenin $0,7$ ile $31,7 \text{ BqL}^{-1}$ aralığında değiştiği tespit edilmiştir [27].

Çeşme bölgesi aktif fay hatlarındaki kaplıçalarda yapılan çalışmada, 6 farklı istasyonda radon konsantrasyonlarını ölçülmüştür. Sıcak su kaynaklarında radon kolektör yöntemi ile çevresindeki topraklarda ise nükleer iz kazıma yöntemi ile belirlemiştir. Sudaki radon seviyelerini $33,24$ ile $1,38 \text{ BqL}^{-1}$ aralığında, topraklarda ise $2460 \text{ izcm}^{-2}\text{hafta}^{-1}$ ile $250 \text{ izcm}^{-2}\text{hafta}^{-1}$ aralığında bulunmuştur [28].

Amasya ilinde yapılan bir çalışmada, içme sularında radon aktivitesinin ölçülen değerlerinin $0,42\text{BqL}^{-1}$ ile $2,4 \text{ BqL}^{-1}$ aralığında değiştiği belirlenmiştir [29].

Tokat ili ve çevresinde yapılan bir çalışmada, içme sularında radon konsantrasyonu'nu ölçülmüş ve aktivitelerin $0,5$ ve $1,3 \text{ BqL}^{-1}$ aralığında değiştiği rapor edilmiştir [30].

Topsakal (2014) tez çalışmasında Konya'da Ilgın Fay Hattı civarındaki yer altı sularında radon konsantrasyonunu AlphaGUARD PQ 2000PRO detektörüyle ölçmüş ve konsantrasyonların 0,22 ile 64,75 kBqm⁻³ aralığında değiştiğini not etmiştir [31].

Şimdi de Dünyanın farklı yerlerinde sularda yapılan radon ölçümleri hakkında kısa bir literatürden bahsedilecektir.

Al-Bataina ve diğ. (1997), Ürdün doğal su kaynaklarında yaptıkları çalışmada CR-39 plastik detektörlerini kullanarak ²²²Rn aktivitelerinin soğuk kaynak sularında 3,3–10,7 Bq/L aralığında, kaplıca sularında 3,2–5,5 Bq/L aralığında, kuyu sularında 3,1–5,7 Bq/L aralığında, içme suyunda 2,5–4,7 Bq/L aralığında ve deniz sularında 4,3–6,3 Bq/L aralığında değiştiğini tespit etmişlerdir [32].

Al-Masri ve Blackburn (1999) tarafından İngiltere göller bölgesinde yapılan çalışmada, yüzey sularında uranyum, radyum ve radon konsantrasyonları ölçülmüş, kireçtaşı ve fay olan bölgeler dışında radon aktivitesinin referans değerinin altında olduğunu belirtilmiştir [33].

Yunanistan'da Lesvos Adasındaki termal kaplıcalardaki tedavi sırasında radon ve bozunum ürünlerinin değişimlerini inceleyen Vogianis ve di. (2004), termal suların radon değişiminin 10 ile 304 Bq/L aralığında olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca tedavi gören kişilerin aldığı radon kaynaklı yıllık doz değişiminin 0,0067-0,1279 mSv aralığında değiştiğini ve bu değerın tesiste çalışan personel için yıllık 20 mSv'in altında olduğunu tahmin etmişlerdir [34].

Nikolopoulos ve diğ. (2010), Yunanistan'daki Loutraki'nin (Attika) termal kaplıcalarında yaptıkları çalışmada radon ve ürünlerinin (²¹⁸Po, ²¹⁴Pb, ²¹⁴Bi ve ²¹⁴Po) tedavi gören hastalar ve çalışan personel üzerindeki etkisini belirlemeye çalışmışlardır. Alpha GUARD PQ2000 Pro cihazıyla elde edilen ölçüm değerleri su örnekleri için 54 ± 10 ile 297 ± 25 Bq/L, tedavi odaları için 200-1.200 Bq/m³ değer aralığında gözlenmiştir. EQF3020 ile belirlenen değerler ²²²Rn için 0-3 160 Bq/m³, ²¹⁸Po 9-1000 Bq/m³, ²¹⁴Pb için 7-780 Bq/m³, ²¹⁴Bi için 0-590 Bqm⁻³ aralığında bulunmuştur. Banyo tedavisi alan hastaların etkin dozları düşük bulunmuş ancak ihmal edilemeyecek düzeydedir. İyilebilir tedavi alan hastalara karşılık gelen dozlar yüksek ancak önerilen uluslararası limitlerin altındaydı. Çalışan personelin, işçiler için kabul edilebilir sınırların çok altında olmakla birlikte, önemli ölçüde etkili dozlara maruz kaldığı da tespit edilmiştir. Loutraki kaplıcalarında tedavi ve çalışmanın radon ve bozunum

ürünlerinde yoğun değişimlere yol açtığı ve sonuç olarak hem hastalar hem de çalışan personel için ek sağlık etkisinin olduğu sonucu rapor edilmiştir [35].

Song ve diğ. (2005), Çin'de Guangdong şehrinde bulunan dört farklı kaplıca otelinde NR-667A (III) radon detektörüyle radon ölçümleri yapmışlardır. Termal sulara radon konsantrasyonunun 53,4-292,5 BqL⁻¹ aralığında değiştiğini ve dışarıdaki havadaki radon seviyesinin 17,2-190,9 Bqm⁻³ aralığında değiştiğini ölçmüşlerdir. Hamamlarda kaynak suyu banyosu varken ortalama radon seviyeleri, kaynak suyu kullanılmadığında karşılık gelen ortalama seviyelere kıyasla otel odalarında %10,9 ile 813 ve banyolarda % 13,8 ile 489 oranlarında daha yüksek bulunmuştur. Banyolarında kaplıca suyunun kullanıldığı odaların içerisindeki havada radon düzeyi değişimini 22-2855 Bqm⁻³ aralığında ve banyosu olmayan odalarda 17-912 Bqm⁻³ aralığında bulmuşlardır [36].

Radolic ve diğ. (2005) tarafından Hırvatistan'daki kaplıca havuzlarının hava ve jeotermal sularındaki radon konsantrasyonlarının ortalama değerleri sırasıyla 40,3 ve 4,5 kBqm⁻³ olarak ölçülmüştür. Dokuz Hırvatistan kaplıcasının hava ve jeotermal sularında radon ölçümlerinde ve yüzme havuzlarının hava ve sularındaki radon konsantrasyonları sırasıyla 10,9-109 Bqm⁻³ ve 0,73-18,6 kBqm⁻³ aralığında elde edilmiştir. Kaynak sularındaki radon konsantrasyonları 2,02-93,79 kBqm⁻³ aralığında ve ortalama 19,6 kBqm⁻³ değerinde olduğu rapor edilmiştir. Belli bir kaplıca için personelin aldığı etkin doz değerini yılda 0,27 mSv bulmuşlardır. Ayrıca radonun termal su havuzundan havaya transfer faktörünü $4,9 \pm 0,7 \times 10^{-3}$ olarak hesaplamışlardır [37].

Villalba ve diğ. (2005), Meksika'nın Chihuahua Eyaletindeki dokuz şehrin yeraltı ve içme sularında yaptıkları bir çalışmada, örneklenen 114 kuyunun yüzde ellisinin USEPA tarafından radon konsantrasyonu için önerilen maksimum kirletici seviyesi (MCL) olan 11 Bq/L'yi aştığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca, 255 konuttan alınan musluk suyu örneklerinin yaklaşık % 48'inde (123 örnek) MCL'nin üzerinde radon konsantrasyonu ölçülmüştür. Yeraltı suyundaki toplam çözünmüş katılar ile radon konsantrasyonu arasında bariz bir ilişki olduğu ve burada ölçülen yüksek radon seviyelerinin, tamamen akifer kayalardan kaynaklanabileceğini not etmişlerdir [38].

Kaur ve diğ. (2019), Hindistan, Jammu ve Keşmir'in Shiwalik Himalayalarının köylerindeki bölge halkı tarafından da kullanılan su örneklerinde, radon ve uranyum

alımından kaynaklanan içme ve soluma dozları hesaplanmıştır. Toplanan su numunelerindeki uranyum konsantrasyonu, LED florimetrik tekniği ile belirlenmiş ve tüm doz değerleri, yüksek doz dönüştürme faktörü nedeniyle bebekler hariç tüm yaş kategorileri için önerilen $100 \mu\text{Svy}^{-1}$ değerinin altında bulunmuştur. Radon alımına bağlı olarak çeşitli vücut organları için yıllık efektif dozlar da hesaplanmış ve akciğerler için diğer organlara göre en yüksek doz tespit edilmiştir. Su numunelerindeki radon konsantrasyonu, Smart Rn Duo portatif monitör tarafından bulunmuş ve RAD7 ölçümleriyle karşılaştırılmıştır. İstatistiksel analizler yapılmış ve verilerin dağılımında Shapiro ve Wilk testi de kullanılmıştır [39].

Marković ve diğ. (2020), Kosova'nın kuzey ve güneydoğu kesimlerindeki madencilik ve endüstriyel faaliyetlerin yapıldığı yerlerinde ve yakın çevresinde kaynak sularındaki radonun konsantrasyonunu alfa spektrometrik yöntemle ölçmüş ve konsantrasyon değerlerinin $0,34 \pm 0,12$ ile 341 ± 35 Bq/L aralığında değiştiğini rapor etmişlerdir. Ayrıca ölçülen radon konsantrasyonları için yıllık soluma ve içme dozlarını da hesaplamışlardır [40].

Duong ve diğ. (2023), Kuzey Vietnam'daki nadir toprak elementi ve uranyum madenleri gibi yüksek arka plan radyasyon alanlarında/yakınında yapılan çalışmada kaynak suyundaki mevsimsel ^{222}Rn konsantrasyonu RAD-7 ile belirlenmiş, radon seviyesinin ortalama 1270 ± 60 – $66,400 \pm 2630$ Bq m^{-3} aralığında değiştiği bulunmuştur. ^{222}Rn aktivite konsantrasyonu, ^{222}Rn 'nin yakındaki madenlerden kaynak sularına sızmasına atfedilebilen kuru mevsimde daha yüksek ve yağmur suyuyla seyrelme nedeniyle yağmurlu mevsimde daha düşük olduğu not edilmiştir [41].

Abdullah ve diğ. (2023), Irak'ın Erbil şehrinde farklı yerlerden topladıkları 25 adet kaynak suyunda RAD7 detektörünü kullanılarak radon ölçümleri yapmışlar ve Erbil sakinlerinin tükettiği kaynak suyu örneklerinde radon gazı alımı ve solumasının yıllık efektif dozlarını belirlemişlerdir. Radon konsantrasyonlarının 0.15 ± 0.04 - 7.48 ± 0.28 BqL⁻¹ aralığında değiştiği gözlenmiştir. Radon alımından kaynaklanan tahmini yıllık etkin dozlar bebekler için (0,5 ile 25,79) μSvy^{-1} , çocuklar için (0,3 ile 15,44) μSvy^{-1} ve yetişkinler için (0,25 ila 13,08) μSvy^{-1} olarak bulunmuştur. Çalışmalarında radonun solunmasından kaynaklı yıllık etkin dozlar, 0,37 ile 18,84 μSvy^{-1} arasında elde edilmiştir [42].

Bu tez çalışmasında, İstanbul ilinin Avrupa yakasındaki ilçelerden toplanan farklı tipteki su örneklerinin radon aktiviteleri ölçülmüştür. Çalışılan bölgede yaşayan insanların aldıkları yıllık efektif dozlar, toplanan su numunelerinin radon aktivite ölçüm değerleri kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, Dünya'da ve Türkiye'de yapılmış literatürdeki benzer çalışmalar ile karşılaştırılarak analizler yapılmıştır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Çalışma Bölgesi ve Jeolojik Özellikleri

Çalışma bölgemiz İstanbul ili Avrupa yakasıdır. İstanbul'un Avrupa yakasında daha çok İstanbul'un kuzey kesimlerinde, ormanlık alanlar, doğal su kaynakları, dere yatakları, bentler, barajlar bulunmaktadır. Güney kesimlerinde ise Büyük Çekmece ve Küçük Çekmece gölleri dışında daha çok yerleşim yerleri yer almaktadır. Bu durum Şekil 2.1.'de açıkça görülmektedir. Alınan su numunelerinin konumları; yüzey suları mavi, kaynak suları kırmızı işaretle gösterilmek üzere Şekil 2.1.'e eklenmiştir.



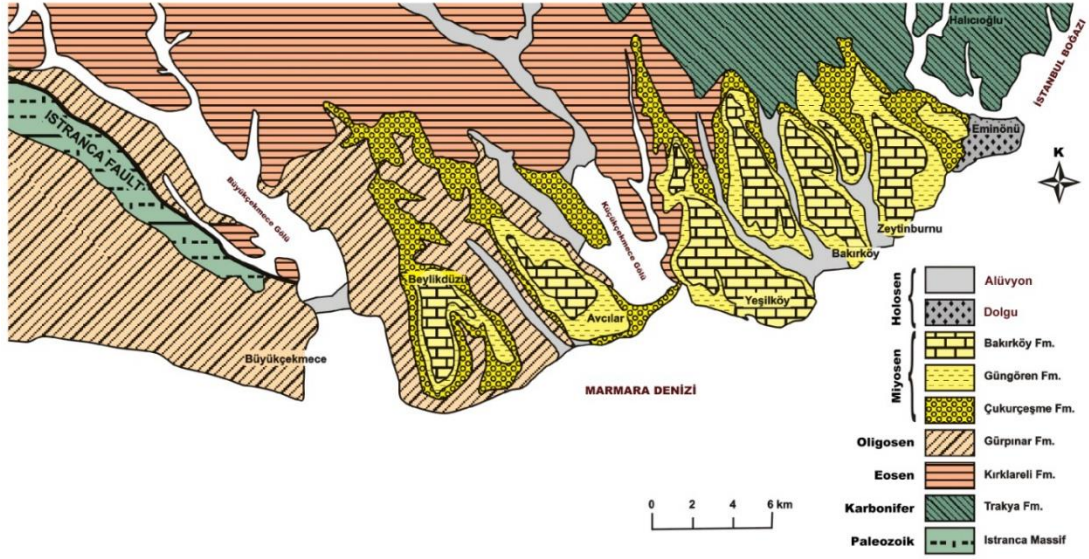
Şekil 2.1. İstanbul'un Avrupa yakasından alınan su numunelerinin konumları.

İstanbul'un Avrupa yakasındaki numune almaya elverişli olan alanlar Arnavutköy, Avcılar, Büyükçekmece, Çatalca, Eyüpsultan, Kağıthane, Küçükçekmece, Sarıyer, Silivri, Sultangazi, Şişli ilçeleri sınırlarındaki mevcut doğal su kaynakları, dere, bent, baraj gibi yerlerden oluşmaktadır. Bu ilçelerin özellikleri Tablo 2.1.'de sunulmuştur.

İstanbul'un Avrupa yakasında Karbonifer yaşlı Trakya formasyonu bulunmakta olup bu formasyon yaygın olarak, kireçtaşı mercekli, andezit ve diyabaz dayakları ile kesilmiş kumtaşı, siltaşı ve kiltaşından oluşmaktadır (Şekil 2.2.). Bu formasyon

tektonik olaylardan yoğun şekilde etkilenmiş, değişen doğrultulu fay, kırık, kıvrım ve eklem sistemlerine sahiptir. Bu formasyonun bölgesel verilere göre kalınlığı 1000 metreden fazla olup ilk 15-20 metrede orta ayrılmış kaya özelliğinde, daha alt tabakalarda ise gri-mavi renkli ayrılmamış kaya özelliğindedir. Trakya formasyonu üzerine, kalınlığı neredeyse 150 m olan Kırklareli formasyonu gelmekte olup bu formasyon da açısız diskordansla, Eosen yaşlı, orta, yer yer kalın tabakalı, mikritik, karstik boşluklu, bol fosilli, kireçtaşı, marn ve karbonatlı kiltaşından oluşmaktadır. Bu formasyonun üzerinde de 700 metreden daha kalın olan Gürpınar oluşumu bulunur ve bu oluşum Oligosen yaşlı, sıkı kum-kumtaşı mercekli sert kil-kiltaşından meydana gelmektedir. Gürpınar Formasyonunun biraz daha üzerinde Miyosen yaşlı çökel birimleri (ilk birim Çukurçeşme Formasyonu, sonraki Güngören Formasyonu ve en üst birim Bakırköy formasyonu) bulunur. Çukurçeşme formasyonu, yaklaşık 25 m kalınlıkta az tutturulmuş ya da tutturulmamış çakıllı kum tabakalarıyla arada kil tabakaları veya merceklerinden oluşur. Diğer üst birim Güngören Formasyonunu, yeşilimsi gri, açık kahve renkli, ince kum merceklerinin bulunduğu kil tabakaları oluşturur. Miyosen çökel istifindeki en üst birim olan 20 m kalınlığındaki Bakırköy Formasyonu ise beyaz, ince-orta tabakalı, arada yeşilimsi gri kil, marn ve kireçtaşından oluşmaktadır. Bu birimlerin üzerinde sarı kahve renkli kum ve killerden oluşan alüvyon çökelleri ve durgun ortamda çökelen siltli killerden oluşan 35 m kalınlıklı haliç çökelleri yer almaktadır. Alüvyon ve Haliç çökelleri üzerinde ise İstanbul'da eski yerleşim yerlerinde yer alan antik dolgu malzemeleri ve yeni yerleşim yerlerindeki güncel dolgu malzemeleri yer yer 30 metreye kadar ulaşmaktadır [43] (Dalgıç vd. 2009).

İstanbul'un Avrupa Yakasının genel jeoloji haritası Şekil 2.2.'de sunulmuş olup daha ayrıntılı bilgi için Ref. [43-48] (Arıç, 1955; Yalçınlar, 1976; Oktay ve Eren, 1999; Dalgıç, 2004; Dalgıç vd. 2009)]'na başvurulabilir.



Şekil 2.2. İstanbul'un Avrupa yakasının genel jeoloji haritası (Arıç, 1955; Yalçınlar, 1976; Oktay ve Eren, 1999; Dalgıç, 2004; Dalgıç vd. 2009) [43-48].

Arnavutköy ilçesinin nüfusu 312.023 kişi, yüzölçümü 31,93 km², rakımı 100 m ve koordinatları da 41.1864° enlem ve 28.7389° boylam şeklindedir. Avcılar ilçesi 457.981 kişilik nüfusa sahip olup yüzölçümü 41,85 km² ve rakımı 65 m.'dir. Koordinatları 40.9792° enlem ve 28.7214° boylam şeklindedir. Büyükçekmece ilçesi 269.160 nüfuslu, 163 km² yüzölçümlü, 10 m rakımlıdır. Bu ilçenin enlem ve boylam koordinatları sırasıyla 41.0248°- 28.5854° şeklindedir. Çatalca yüzölçümü 1.291 km² ve rakımı 150 m olup ilçenin nüfusu 76.131'dir. Coğrafi koordinatları da 41.1421 enlem- 28.4575 boylam şeklindedir.

Eyüpsultan ilçesinin deniz seviyesinden yüksekliği 8 m., yüzölçümü 242 km², nüfusu 417.360 ve 41.0551 enlem-28.9346 boylam koordinatlarında yer almaktadır. İlçe sınırlarından Kağıthane ve Alibeyköy dereleri geçerek Haliç'e (Altın Boynuz olarak ta bilinir) dökülmektedir. Alibeyköy Deresi, Arnavutköy ve İmrahor semtlerinin sularını alarak önce doğuya, sonra da güneye Haliç'e yönelmektedir. Yaklaşık 50 km uzunluğundaki bu derenin üzerine toprak dolgu biçiminde yapılan Alibey barajının göl alanı 1,66 km²'dir. Barajın su hacmi mevsim şartlarına göre değişiklikler gösterse de İstanbul'un su gereksiniminin neredeyse % 6,6'sını karşılamaktadır. İlçenin bugünkü kentsel yerleşme alanına karşılık gelen kısmının jeolojik yapısı ağırlıklı olarak 1. zamanda oluşmuştur. Ancak günümüzdeki jeolojik özelliklerin oluşmasında Haliç'in etkisi oldukça yüksektir. İstanbul Boğazı'nın oluşumuna bağlı olarak II. zaman ile IV. zaman arasındaki süreçte (II. zaman ile III. zamanda ortaya çıkan yükselme ve

sıkışmalarla) gelişen eski bir akarsu vadisi olan Haliç, İstanbul Boğazıyla birlikte kırılmış ve IV. zamanda denizlerin yükselmesiyle sular altında kalmıştır. Haliç çevresindeki arazi, genellikle I. zaman karbonifer sistemine bağlı grovak, killi şist, silisli şist ve kalkerden oluşmakta ve bölgede III. zaman miyosenine ait tabakalar yer yer ince bir örtü oluşturmaktadır. Haliç kıyısı boyunca ve Eyüpsultan merkezde batıya ve kuzeye uzanan vadilere doğru, kil, kumtaşı ve marnlı toprak yapısı hakimdir. Bu toprak sınıfı ağırlıklı IV. zaman deniz alüvyonu olarak ta ifade edilmektedir.

Kağıthane ilçesi 454.550 kişilik nüfusa sahiptir, yüzölçümü 16 km², rakımı 68 m, koordinatları da 41.0717° Enlem- 28.9646° Boylam şeklindedir. Küçükçekmece ilçesinin coğrafi koordinatları 41.0092° E.-28.7757° B. olup rakımı 70 m ve 37,75 km² lik alan düşen nüfusu 805.930 kişidir. Sarıyer ilçesinde (rakım 8 m) 152,26 km² 'lik yüzölçümüne düşen nüfus 349.968 kişi olup ilçe koordinatları 41.1664° E.- 29.0500° B. şeklindedir. Silivri ilçesinin nüfusu 209.014, yüzölçümü 860 km², rakımı 10 m olup, koordinatları 41.0737° Enlem- 28.2479° Boylamdır. Şişli ilçesinin (Enlem: 41.0604° Boylam: 28.9878°) nüfusu 284.294, yüzölçümü 10,62 km² ve rakımı 120 m.'dir. Sultangazi ilçesi Enlem: 41.1070°-Boylam: 28.8714° koordinatlarında olup 543.380 kişilik nüfusa (36 km² yüzölçüme ve 50 m. rakıma) sahiptir.

Tablo 2.1. Numune alınan ilçeler, İlçe başına alınan örnek sayısı, İlçelerin; Rakım, Nüfus ve Yüzölçümü bilgileri.

İlçe	Alınan Örnek Sayısı	Koordinat	Rakım	Nüfus	Yüzölçümü
Arnavutköy	9	Enlem: 41.1864 Boylam: 28.7389	100 m	312.023	31,93 km ²
Avcılar	1	Enlem: 40.9792 Boylam: 28.7214	65 m	457.981	41,85 km ²
Büyükçekmece	5	Enlem: 41.0248 Boylam: 28.5854	10 m	269.160	163 km ²
Çatalca	10	Enlem: 41.1421 Boylam: 28.4575	150 m	76.131	1.291 km ²
Eyüpsultan	10	Enlem: 41.0551 Boylam: 28.9346	8 m	417.360	242 km ²
Kağıthane	1	Enlem: 41.0717 Boylam: 28.9646	68 m	454.550	16 km ²
Küçükçekmece	2	Enlem: 41.0092 Boylam: 28.7757	70 m	805.930	37,75 km ²
Sarıyer	5	Enlem: 41.1664 Boylam: 29.0500	8 m	349.968	152,26 km ²
Silivri	5	Enlem: 41.0737 Boylam: 28.2479	10 m	209.014	860 km ²
Şişli	1	Enlem: 41.0604 Boylam: 28.9878	120 m	284.294	10,62 km ²
Sultangazi	1	Enlem: 41.1070 Boylam: 28.8714	50 m	543.380	36 km ²

2.2. RAD-7 Radon Ölçüm Cihazı Özellikleri

Çeşitli içme suyu örnekleri (doğal kaynak suları, yeraltı suları, yüzey suları... vs.) 500 ml şişeler kullanılarak İstanbul'un farklı yerlerinden toplanacaktır. İçme suyu

numunelerinin radon konsantrasyon ölçümleri RAD H₂O (sudaki radon) aksamı bağlı olan RAD-7 (Durridge Co, USA) [49] radon detektörü kullanılarak gerçekleştirilecektir.

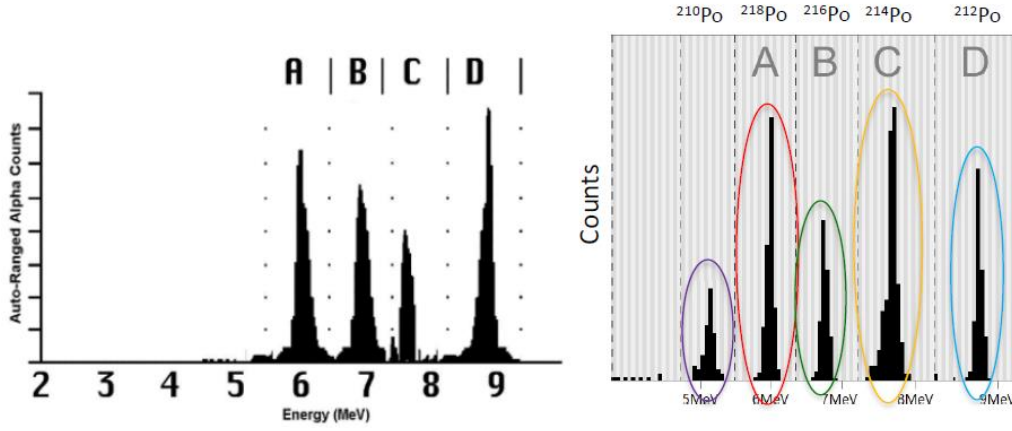


Şekil 2.3. RAD-7 (Durridge Co, USA) radon detektörü [49].

Çünkü bu RAD-7 cihazı doğru bir ölçüm ile hızlı bir okuma yapmaktadır, hafiftir yaklaşık 5kg ağırlığa sahiptir ve taşınması kolaydır. Radon ölçüm aralığı 0,004-750 BqL⁻¹, ölçüm doğruluğu $\pm 5\%$ 'dir. Ayrıca zararlı kimyasallarla çalışmayı da ortadan kaldırmaktadır. Böylece sorunsuz ve zararsız bir şekilde radyoaktif maddelere temas etmeden etkili bir ölçüm elde edilebilmektedir. RAD-7 (Durridge Co, USA) radon detektörü Şekil 2.3.'de sunulmuştur.

RAD-7 bir katihal alfa detektörü kullanır. Katihal detektörü alfa radyasyonunu doğrudan bir elektrik sinyaline dönüştüren yarıiletken bir malzemedir (genellikle silikon kullanılır). Katihal cihazların önemli bir avantajı sağlamlıklarındadır. Diğer bir avantajı her bir alfa parçacığının enerjisinin elektronik olarak belirlenebilmesidir. Bu sayede üretilen radyasyonun radonun hangi bozunum ürününden (Po-218, Po-214, vs.) geldiğini tam olarak ölçmek mümkündür. RAD-7 cihazında ölçülen radyasyonun radonun hangi bozunum türünden geldiğini gösteren spektrum grafikleri Şekil 2.4.'de gösterilmiştir. Alfa spektroskopisi olarak bilinen bu tekniğin havayı çekme (Sniffing) veya numuneyi tutma uygulamalarında mükemmel bir avantajı vardır. Ölçüm, bir numunenin alınmasından sonra 1 saat içinde yerinde tamamlanabilir. Bu cihazla aynı

zamanda radyum ölçmekte mümkündür. Bunun için radon ölçümünde kullanılan numunenin bir hafta bekletilmesi yeterlidir.



Şekil 2.4. RAD-7 cihazında ölçülen radyasyonun radonun hangi bozunum türünden geldiğini gösteren spektrum grafikleri [49].

Şekil 2.4.'teki spektrumun A sütunundaki sayım ^{218}Po 'den gelen 6 MeV enerjili ve ^{212}Bi 'den gelen 6,05 MeV enerjili alfalara aittir. B sütunundaki sayım ise ^{216}Po 'den gelen 6.78 MeV enerjili alfalara aittir. C sütununda ise ^{214}Po 'den gelen 7,69 MeV enerjili alfalar sayılmaktadır. D sütunundaki sayımlar ^{212}Po 'den gelen 8,78 MeV enerjili alfalardan gelmektedir. Buradaki şekilde A-B-C-D spektrumlarını açıklamak üzere tek bir spektrumda gösterilmiştir. Lakin ölçümlerde çıkan spektrumlarda tüm sayımların alınabilmesi çok nadir şekilde gözlenir. Genelde A spektrumunda gözlenen değer yeni radon (^{222}Rn) olarak, C spektrumunda gözlenen değer ise eski radon olarak adlandırılır. Ayrıca cihazımızda B spektrumunda gözlenen sayım yeni toron (^{220}Rn) olarak D spektrumunda gözlenen sayım ise eski toron olarak ifade edilir.

2.3. Numune Hazırlama ve Radon ölçüm Düzenegi

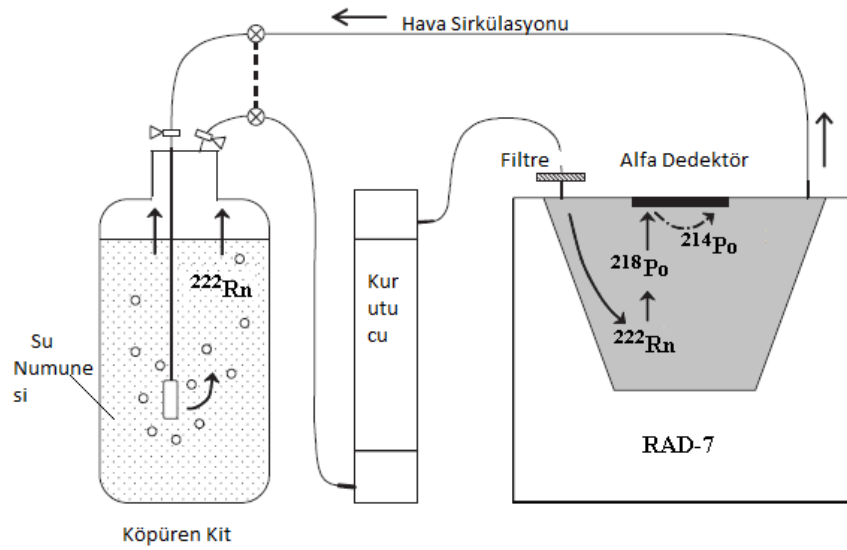
İstanbul'un Avrupa yakasında bulunan Arnavutköy, Avcılar, Büyükçekmece, Çatalca, Eyüpsultan, Kağıthane, Küçükçekmece, Sarıyer, Silivri, Şişli ve Sultangazi ilçelerinden 500 ml'lik örnekleme şişelerine doldururken numunelerdeki mevcut radonun kaçmaması için çok yavaş ve suyun havayla teması minimize edilecek şekilde dikkat edilerek toplanmıştır. Şekil 2.5.'de gösterilen değişik su tiplerinden su örnekleri alınmadan önce 500 ml'lik şişeler içinde radon bulunmayan saf su ile çalkalanarak temizlenmiştir. Şayet su kaynağı derinliğe sahipse su örneği alınırken suda çözünmüş halde bulunan radon gazının kaçmaması için daldırma yapılarak su havayla

köpürtülmeden şişenin tamamını (içerisinde mümkün olabildiğince hava kalmayacak şekilde) doldurmuş ve dış ortamla yalıtacak şekilde kapaklanmışır. Şişelerin üzerine ve not defterine örnek numaraları not edilerek toplanan örneklerle ilgili alındığı tarih, saat, ilçe, mevki, enlem, boylam ve rakım, bilgileri kaydedilmiştir.



Şekil 2.5. Su numunelerinin toplanmasını gösteren resimler.

Toplanan su örnekleri çok fazla sarsılmadan ya da köpürtülmeden en geç 48 saat içerisinde SAÜ Nükleer Fizik Laboratuvarına getirilmiş ve RAD-7 radon detektörü RAD H₂O aksesuarı kullanılarak ölçüm işlemlerine başlanmıştır. Ölçüm işlemleri 250 ml cam şişelere örnekler konularak cihazdaki WAT 250 protokolü kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 2.6. RAD7'nin RAD H₂O ekipmanları ile şematik gösterimi [49].

Sulardaki ölçümlerde Şekil 2.6.'da gösterilen RAD H₂O aksesuarı kullanılır. Su numunesi içeren küçük bir şişe (40 ml veya 250 ml) kapalı bir hava borusu sistemi ile RAD-7 radon detektörüne Şekil 2.7.'deki gibi bağlanır. RAD-7 pompası çalıştırılarak 5 dakika süre ile sistemdeki havayla su köpürtülür ve böylece suda çözünmüş olan radon gazının yukarıya çıkması sağlanır. 5 dk'lık bir havalandırma boyunca

numunedeki radonun %94'ünden fazlası sudan ayrılmış olur. Ardından sistem 5 dk. süreyle bekledikten sonra bir ara rapor vererek sayıma başlar ve ölçümler 5'er dakikalık 4 periyotla tekrar eder. Her ölçüm periyodunda sistem kendi kablosuz kızılötesi yazıcısında ara rapor verir ve 30 dk'lık süre sonunda RAD-7, her biri 5 dk'lık olan 4 sayımdaki ortalama radon konsantrasyonunu bir bar grafiğinde (bir spektrumda) gösterir. Böylelikle su örneğinin radon içeriği ölçülmüş olur. RAD H₂O aksesuarı on yılı aşan zamandan, günümüze kadar dünya çapında test merkezlerinde, eğitim ve araştırma laboratuvarlarında kullanılmaktadır. Bu cihaz sıvı sintilasyon sayıcıları kadar hassas ve doğru değerler vermektedir. Aynı zamanda diğer ölçüm sistemlerine göre duyarlılığı (10 pCi/L \approx 370 Bq/m³'ten daha az deteksiyon limitiyle) daha fazladır.



Şekil 2.7. Su Numunelerinin RAD-7 H₂O dedektörüne bağlanması ve su numunelerinin köpürtülmesi [49].

RAD-7 dedektörü ölçüm işlemleri öncesinde kendi materyalinde oluşabilecek nem değerlerinin referans aralığa yani maksimum %9 oranına veya daha altına gelmesi için dedektörümüz sniff modunda yaklaşık 10-15 dakika çalıştırılır, nem alma işlemi nem tutucu silikajeller vasıtasıyla yapılmaktadır. Kullandığımız özel silika jellerin nem azaltma özelliği yanında radon absorbe etme özelliğinden dolayı da cihaz içerisinde bir önceki ölçümden ya da daha önceki ölçümlerden kalan eski radon seviyesinin azaltılmasına önemli miktarlarda yardımcı olmaktadır. Bu da yapılan ölçümdeki hata oluşma riskini azaltmaktadır. RAD-7 sistemi istenen nem değerlerine ulaşıldığı anda bir başka numunenin radon ölçümü yapılmaya başlanabilir. Su örneklerinde ²²²Rn konsantrasyonunu tespit ettiğimiz RAD-7 cihazı Sakarya Üniversitesi Fen Fakültesi Nükleer Fizik araştırma laboratuvarında yapılan araştırmalarda yıllardır kullanılmaktadır ve tutarlı değerler vermektedir.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu tez çalışması Marmara Bölgesindeki İstanbul ilinin Avrupa yakasındaki muhtelif ilçelerinde bulunan 50 farklı yerden (doğal kaynak suyu, dere, bent, baraj, vb. gibi) su kaynaklarından alınan 500 ml'lik örnekler 24-48 saat içerisinde SAÜ Nükleer Fizik Laboratuvarına sarsıntı ve çalkalama olmayacak şekilde dikkat edilerek getirilmiştir. Akabinde laboratuvarımızdaki Şekil 2.2.'de gösterilen RAD-7 elektronik radon dedektör sistemi kullanılarak Bölüm 2.3.'de anlatılan ölçüm tekniğine uygun olarak ^{222}Rn aktivite ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümler, numunelerden 7 tanesi hariç diğerleri kaynaktan alınıp laboratuvara getirilmesine kadar geçen süre olan 24-48 saat içerisinde yapılmıştır. 7 numunenin ölçümü ise kış şartlarında Sakarya Üniversitesine ulaşım yolları kapandığı için ancak 72 saat içerisinde yapılabilmektedir. Bu gecikmelerden dolayı isabetli ve doğru sonuçlar elde edebilmek adına numune alınımından ölçüm yapılma anına kadar geçen süre içerisindeki radonun bozunmasının da hesaba katılması gerektiğinden elde edilen sonuçlar DCF düzeltme faktörü ile çarpılmıştır. Bunun sebebinin alınan örneklerin radonun bozunmaya başlamasından önce analiz edilemeyeşi ile bu süre içerisinde radonun bozunmaya başlaması ve bozunmaya devam etmesi olarak açıklayabiliriz. Yani doğru sonuçlar elde edebilmek için bu işlemi yapma zorunluluğu vardır. Suyun örneklendiği andan ölçüm yapılana kadar geçen süre belirlenerek bozunum düzeltme faktörü (DCF);

$$\text{DCF}=\exp(T/\tau) \quad (3.1)$$

Bağıntısı ile hesaplanmıştır. Bu bağıntıda, T; bozunma süresi (saat cinsinden), τ ; ^{222}Rn 'nin ortalama ömrüdür (132,4 saat).

Toplanan su örneklerinin alındığı ilçelerin isimleri, örneklere verilen numaralar, ilçelerdeki örnek alım noktalarının koordinatları, örnek alınan yerlerin rakımları, örneğin alındığı tarih ve saatler, laboratuvarında yapılan ölçümün tarih ve saatleri, örneklerin toplanması ile laboratuvara getirilip ölçüme başlanmasına kadar ki süreçte geçen süreler ve bozunum düzeltme faktörleri gibi bilgiler aşağıda Tablo 3.1.'de gösterilmiştir.

Tablo 3.1. Ölçümü yapılan suların koordinatları, rakımları, numune alım ve ölçüm zamanları, ikisi arasında geçen süre ve DCF bozunum faktörü değerleri.

İlçe	Örnek ID	Koordinatlar	Rakım (metre)	Alınan Tarih/ Saat	Ölçülen Tarih/Saat	Geçen Süre (saat)	DCF
Arnavutköy	1	K41,2728° -D28,6942°	136	22.01.22/14.18	24.01.22/14.49	48,516	1,443
Arnavutköy	2	K41,3027° -D28,6765°	11	22.01.22/15.40	24.01.22/15.36	47,933	1,436
Arnavutköy	3	K41,3212° -D28,7142°	52	22.01.22/16.15	24.01.22/17.40	49,416	1,452
Arnavutköy	4	K41,2735° -D28,6614°	95	22.01.22/16.54	25.01.22/11.49	64,916	1,633
Arnavutköy	5	K41,2763° -D28,6611°	78	22.01.22/17.04	25.01.22/12.44	67,666	1,667
Arnavutköy	6	K41,3108° -D28,6123°	76	22.01.22/17.24	25.01.22/14.23	68,983	1,684
Çatalca	7	K41,2359° -D28,5588°	58	22.01.22/17.52	25.01.22/15.08	69,266	1,687
Çatalca	8	K41,2246° -D28,5242°	70	22.01.22/18.02	25.01.22/15.59	69,950	1,696
Çatalca	9	K41,2443° -D28,4938°	52	22.01.22/18.20	25.01.22/16.46	69,966	1,696
Çatalca	10	K41,2345° -D28,4945°	77	22.01.22/18.48	25.01.22/17.35	70,783	1,707
Sultangazi	11	K41,1095° -D28,9207°	21	29.01.22/10.53	30.01.22/14.39	27,766	1,233
Eyüpsultan	12	K41,0926° -D28,9249°	2	29.01.22/12.00	30.01.22/15.32	27,533	1,231
Kağıthane	13	K41,1039° -D28,9839°	5	29.01.22/12.30	30.01.22/16.12	27,700	1,233
Şişli	14	K41,1104° -D28,9886°	11	29.01.22/12.51	30.01.22/16.50	27,983	1,235
Eyüpsultan	15	K41,1683° -D28,9371°	60	29.01.22/14.38	30.01.22/17.28	26,833	1,225
Eyüpsultan	16	K41,1686° -D28,9456°	53	29.01.22/14.45	30.01.22/18.06	27,350	1,229
Eyüpsultan	17	K41,1749° -D28,9580°	71	29.01.22/15.11	30.01.22/18.42	27,516	1,231
Sarıyer	18	K41,1700° -D28,9637°	73	29.01.22/15.55	31.01.22/10.57	43,033	1,384
Sarıyer	19	K41,1831° -D28,9940°	145	29.01.22/17.00	31.01.22/11.45	42,750	1,381
Sarıyer	20	K41,1865° -D28,9882°	156	29.01.22/17.53	31.01.22/12.29	42,600	1,380
Sarıyer	21	K41,1912° -D28,9885°	153	29.01.22/18.15	31.01.22/13.08	42,883	1,382
Sarıyer	22	K41,1900° -D28,9858°	155	29.01.22/18.28	31.01.22/14.48	44,333	1,398
Eyüpsultan	23	K41,1787° -D28,8897°	43	18.06.22/16.34	19.06.22/15.53	23,316	1,193
Eyüpsultan	24	K41,1919° -D28,8750°	50	18.06.22/16.59	19.06.22/16.35	23,600	1,195
Eyüpsultan	25	K41,1922° -D28,8753°	57	18.06.22/17.03	19.06.22/17.15	24,200	1,200
Eyüpsultan	26	K41,2260° -D28,8288°	64	18.06.22/17.33	19.06.22/17.52	24,316	1,202
Eyüpsultan	27	K41,2294° -D28,8236°	67	18.06.22/18.08	19.06.22/18.30	24,366	1,202
Eyüpsultan	28	K41,2409° -D28,8058°	80	18.06.22/18.19	19.06.22/19.07	24,800	1,206
Arnavutköy	29	K41,2678° -D28,6750°	77	18.06.22/18.54	19.06.22/19.54	25,000	1,208
Arnavutköy	30	K41,2692° -D28,6868°	96	18.06.22/19.05	19.06.22/20.31	25,433	1,212
Arnavutköy	31	K41,3111° -D28,6606°	2	18.06.22/21.00	19.06.22/21.07	24,116	1,200
Küçükçekmece	32	K40,9898° -D28,7700°	0	15.10.22/11.25	16.10.22/14.39	27,233	1,228
Küçükçekmece	33	K40,9909° -D28,7708°	2	15.10.22/11.52	16.10.22/15.25	27,550	1,231
Avcılar	34	K40,9829° -D28,7445°	1	15.10.22/12.06	16.10.22/16.11	28,083	1,236
Büyükçekmece	35	K40,9903° -D28,6128°	87	15.10.22/13.00	16.10.22/16.49	27,817	1,234
Büyükçekmece	36	K41,0205° -D28,5784°	2	15.10.22/13.40	16.10.22/17.26	27,767	1,233
Büyükçekmece	37	K41,0224° -D28,5760°	1	15.10.22/14.00	16.10.22/18.05	28,083	1,236
Büyükçekmece	38	K41,0585° -D28,5403°	3	15.10.22/14.30	16.10.22/18.45	28,250	1,238
Büyükçekmece	39	K41,0885° -D28,5188°	18	15.10.22/15.06	16.10.22/19.38	28,533	1,240
Çatalca	40	K41,1413° -D28,4634°	88	15.10.22/15.50	16.10.22/20.15	28,417	1,239

Tablo 3.1. (Devamı): Ölçümü yapılan suların koordinatları, rakımları, numune alım ve ölçüm zamanları, ikisi arasında geçen süre ve DCF bozunum faktörü değerleri.

İlçe	Örnek ID	Koordinatlar	Rakım (metre)	Alınan Tarih/ Saat	Ölçülen Tarih/Saat	Geçen Süre (saat)	DCF
Çatalca	41	K41,1424°-D28,4615°	90	15.10.22/16.05	16.10.22/20.49	28,733	1,242
Çatalca	42	K41,1407°-D28,4600°	102	15.10.22/16.22	16.10.22/21.25	29,050	1,245
Çatalca	43	K41,1453°-D28,4566°	87	15.10.22/16.43	16.10.22/22.00	29,283	1,248
Çatalca	44	K41,1983°-D28,3917°	41	15.10.22/17.34	16.10.22/22.35	29,017	1,245
Çatalca	45	K41,2055°-D28,3843°	51	15.10.22/17.45	16.10.22/23.11	29,433	1,249
Silivri	46	K41,1979°-D28,3390°	153	15.10.22/18.00	16.10.22/23.51	29,850	1,253
Silivri	47	K41,2269°-D28,2961°	166	15.10.22/18.35	17.10.22/00.20	29,750	1,252
Silivri	48	K41,2136°-D28,2631°	165	15.10.22/18.55	17.10.22/01.06	30,183	1,256
Silivri	49	K41,2126°-D28,2593°	145	15.10.22/19.05	17.10.22/01.44	30,650	1,260
Silivri	50	K41,1545°-D28,2215°	107	15.10.22/19.25	17.10.22/02.19	30,900	1,263

3.1. Ölçümü Yapılan Suların Radon Aktiviteleri

Ölçüm yapmak üzere topladığımız su numunelerimizin toplanma zamanı ile ölçümü yaptığımız zamanı Tablo 3.1.'de görüldüğü gibi not edip ölçümler alınmış, sırasıyla hesaplanan zamana karşılık gelen DCF düzeltme faktörleri tespit edilmiştir. Akabinde RAD-7 cihazı (H₂O) aksesuarları ile 250 ml'lik şişeler kullanılarak 4'er adet radon aktivite ölçümü alınmış ve bu ölçümlerden her bir numunenin ortalama radon aktivitesi (BqL⁻¹), standart sapması ile minimum- maksimum değerleri not alınmıştır. Yapılan ölçümlerden isabetli sonuçlar elde etmek için; RAD 7 cihazının ölçüm sırasında kaydettiği nem değerleri, RAD-7 cihazını bilgisayara bağlamak suretiyle bilgisayara aktarılmış ve *CAPTURE v6.2.4* programı vasıtasıyla aktarılan bu nem değerleri HC (nem düzeltme) faktörüne çevrilip tüm ölçümlere DCF (bozunum düzeltme faktörü) ile birlikte uygulanıp Tablo 3.2.'de gösterilmiştir.

Tablo 3.2. Ölçümü yapılan suların Ortalama radon aktiviteleri, Standart sapmaları ve bunların HC+DCF düzeltmeleri yapılmış değerleri ile Minimum-Maksimum değerleri.

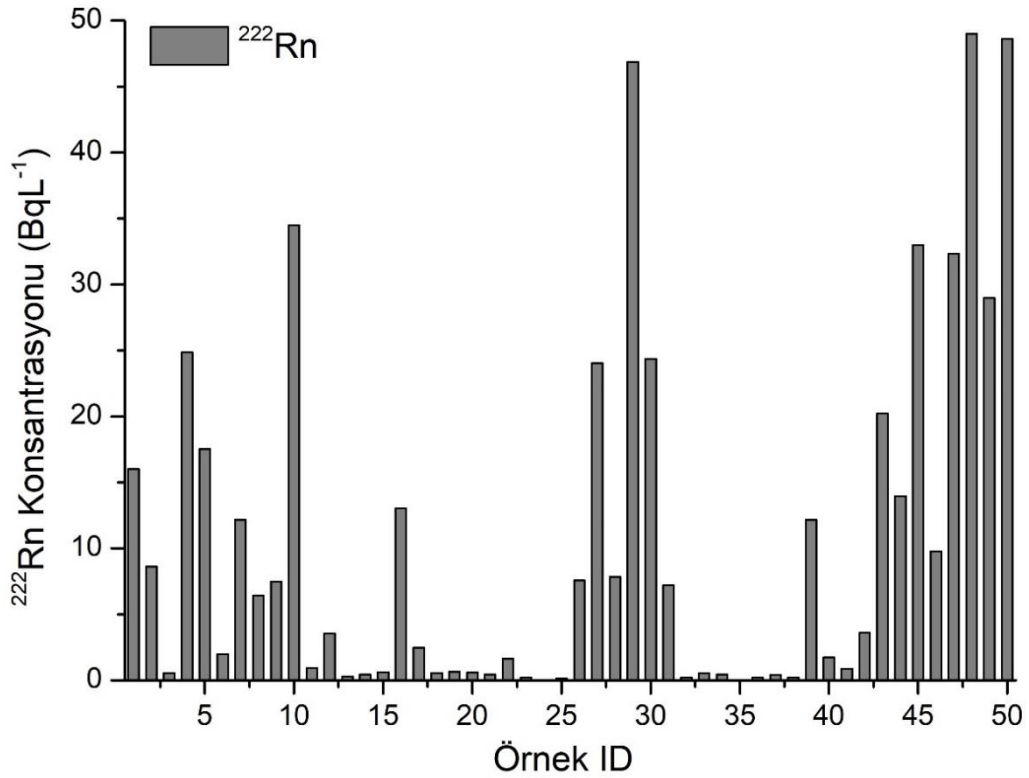
İlçe	Örnek ID	Ort. Rn Aktivitesi, Bq/L	Standart Sapma (SD)	Ort. Rn Bq/L (HC+DCF)	Standart Sapma (HC+DCF)	Min.-Mak. Değerler Bq/L (DCF+HC)
Arnavutköy	1	9,700	0,512	16,013	0,750	15,003-16,734
Arnavutköy	2	5,330	0,616	8,617	0,977	7,612-9,766
Arnavutköy	3	0,334	0,223	0,552	0,378	0,247-1,017
Arnavutköy	4	12,800	1,130	24,865	2,304	22,047-27,352
Arnavutköy	5	10,700	1,350	17,523	2,281	15,993-20,861
Arnavutköy	6	1,000	0,445	1,970	0,876	1,684-2,862

Tablo 3.2. (Devamı): Ölçümü yapılan suların Ortalama radon aktiviteleri, Standart sapmaları ve bunların HC+DCF düzeltmeleri yapılmış değerleri ile Minimum-Maksimum değerleri.

İlçe	Örnek ID	Ort. Rn Aktivitesi, Bq/L	Standart Sapma (SD)	Ort. Rn Bq/L (HC+DCF)	Standart Sapma (HC+DCF)	Min.-Mak. Değerler Bq/L (DCF+HC)
Çatalca	7	6,130	0,647	12,149	1,282	10,968-13,330
Çatalca	8	3,150	0,560	6,411	1,136	5,088-7,802
Çatalca	9	3,680	0,561	7,490	1,158	6,128-8,886
Çatalca	10	18,100	1,580	34,477	3,072	30,381-37,720
Sultangazi	11	0,705	0,224	0,937	0,296	0,777-1,394
Eyüpsultan	12	2,710	0,446	3,533	0,591	2,955-4,284
Kağıthane	13	0,111	0,142	0,290	0,123	0,197-0,382
Şişli	14	0,334	0,075	0,432	0,099	0,383-0,581
Eyüpsultan	15	0,482	0,253	0,612	0,318	0,184-0,931
Eyüpsultan	16	10,300	0,681	13,032	0,873	11,987-13,893
Eyüpsultan	17	1,630	0,843	2,464	1,313	1,328-4,279
Sarıyer	18	0,371	0,284	0,554	0,415	0,221-1,121
Sarıyer	19	0,334	0,328	0,659	0,428	0,221-1,077
Sarıyer	20	0,297	0,321	0,575	0,441	0,207-1,090
Sarıyer	21	0,297	0,171	0,429	0,249	0,221-0,650
Sarıyer	22	1,110	0,563	1,635	0,825	0,447-2,208
Eyüpsultan	23	0,075	0,086	0,215	0,005	0,216-0,218
Eyüpsultan	24	-----Radon aktivitesi ölçülememiştir.-----				
Eyüpsultan	25	0,075	0,086	0,144	0,120	0,000-0,216
Eyüpsultan	26	5,390	0,617	7,570	0,841	6,609-8,531
Eyüpsultan	27	17,200	1,090	24,041	1,551	22,238-29,777
Eyüpsultan	28	5,660	0,483	7,839	0,651	7,091-8,611
Arnavutköy	29	34,300	2,340	46,864	3,865	42,636-50,608
Arnavutköy	30	17,800	1,180	24,357	1,490	22,660-26,417
Arnavutköy	31	5,240	0,775	7,199	1,116	5,279-7,979
Küçükçekmece	32	0,037	0,074	0,209	0,001	0,209-0,209
Küçükçekmece	33	0,186	0,223	0,536	0,148	0,431-0,640
Avcılar	34	0,074	0,149	0,433	0,000	0,431-0,431
Büyükçekmece	35	-----Radon aktivitesi ölçülememiştir.-----				
Büyükçekmece	36	0,111	0,074	0,222	0,002	0,210-0,247
Büyükçekmece	37	0,148	0,210	0,418	0,297	0,198-0,618
Büyükçekmece	38	0,111	0,074	0,219	0,002	0,198-0,210
Büyükçekmece	39	8,680	1,110	12,157	1,675	9,800-13,348
Çatalca	40	1,260	0,494	1,748	0,694	1,215-2,702
Çatalca	41	0,631	0,282	0,870	0,385	0,609-1,491
Çatalca	42	2,600	0,671	3,599	0,946	2,864-4,981
Çatalca	43	14,700	1,460	20,210	1,971	17,341-21,707
Çatalca	44	10,200	1,480	13,944	2,054	12,948-17,057
Çatalca	45	23,900	2,980	32,972	4,396	27,477-36,969
Silivri	46	7,030	1,020	9,773	1,366	8,394-11,527
Silivri	47	23,600	1,970	32,341	2,958	28,580-35,725
Silivri	48	35,700	2,020	48,986	2,701	46,851-52,880
Silivri	49	21,500	2,330	28,991	2,887	26,974-33,529
Silivri	50	35,200	1,100	48,620	0,985	47,357-49,757

Alınan 50 adet numune içerisinde 2 tanesinin radon değeri ölçülemediği ve ölçülen radon konsantrasyon değerleri Şekil 3.1.'de gösterilmiştir. Yapılan ölçümlere göre;

- Maksimum radon aktivitesi, 48,986 Bq/L değer ile Silivri ilçesinden alınan 48 numaralı numuneye aittir.
- Minimum radon aktivitesi, 0,144 Bq/L değer ile Eyüpsultan ilçesinden alınan 25 numaralı numuneye aittir.



Şekil 3.1. Ölçülen ²²²Rn konsantrasyon değişimleri.

3.1.1. Ölçümü yapılan farklı tipteki suların radon aktivitelerinin karşılaştırılması

Radon aktivitesi hesaplanan su numunelerinden; 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 16, 23, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 33, 34, 35, 36, 37, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50 numaralı olanlar kaynak sularından alınmış, 11, 12, 13, 14, 15, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 24, 31, 32, 38 numaralı olanlar ise yüzey sularından alınmıştır. İki farklı tipte toplanan su numuneleri üzerinde yaptığımız ölçümlere göre;

- Kaynak sularından alınan su numunelerinin minimum radon aktivitesi 0,144 BqL⁻¹, yüzey sularından alınan su numunelerinin minimum radon aktivitesi ise 0,204 BqL⁻¹ olarak hesaplanmıştır.

- Kaynak sularından alınan su numunelerinin maksimum radon aktivitesi 48,986 BqL⁻¹, yüzey sularından alınan su numunelerinin maksimum radon aktivitesi ise 7,199 BqL⁻¹ olarak hesaplanmıştır.
- Kaynak sularından alınan su numunelerinin ortalama radon aktivitesi 14,998 BqL⁻¹, yüzey sularından alınan su numunelerinin ortalama radon aktivitesi ise 1,409 BqL⁻¹ olarak hesaplanmıştır.

Kaynak sularından alınan su numunelerindeki ortalama radon aktivitesi, yüzey sularından alınan su numunelerindeki ortalama radon aktivitesinden yüksek çıkmıştır. Bunun nedeni radon bulaşmış kaynak suları herhangi bir gecikmeye maruz kalınmaksızın direk kaynağından alınmışlar, açıkta olan yüzey suları ise uzun süre açıkta beklemişler, yüzeyleri hava ile temas halinde olduğu için de bünyelerindeki radon miktarlarını zamanla kaybetmişler ve buna bağlı olarak da radon aktiviteleri düşmüştür.

3.1.2. Ölçümlerin ilçe bazlı karşılaştırılması

İstanbul'un Avrupa yakasında numune alınmasına müsait; Arnavutköy, Çatalca ve Silivri ilçelerinden alınan su numunelerimiz çoğunlukla kaynak suları olduğu için radon aktiviteleri yüksek çıkmıştır. Avcılar, Büyükçekmece, Eyüpsultan, Kağıthane, Küçükçekmece, Sarıyer, Şişli ve Sultangazi ilçelerinden alınan su numunelerimiz ise çoğunlukla baraj, bent, göl, dere... vb. gibi yüzey suları olduğu için ortalama radon aktiviteleri düşük çıkmıştır.

Tablo 3.3. Ölçümü alınan suların alındığı ilçe, ilçelerden alınan numune sayıları, ilçelerin HC+DCF düzeltmeleri yapılmış ortalama radon aktiviteleri ile bunların Minimum-Maksimum değerleri.

İlçe	Alınan Örnek Sayısı	Ort. Rn. Aktivitesi Bq/L (HC+DCF)	Min.-Mak. Değerler Bq/L (DCF+HC)
Arnavutköy	9	16,440	0,247-50,608
Avcılar	1	0,431	0,431-0,431
Büyükçekmece	5	3,246	0,198-13,348
Çatalca	10	13,387	0,609-37,72
Eyüpsultan	10	6,607	0-29,777
Kağıthane	1	0,290	0,197-0,382
Küçükçekmece	2	0,369	0,209-0,640
Sarıyer	5	0,770	0,207-2,208
Silivri	5	33,742	8,394-52,88
Şişli	1	0,432	0,383-0,581
Sultangazi	1	0,937	0,777-1,394

Numune alınan ilçelerin ortalama radon aktiviteleri karşılaştırıldığında;

- En düşük ortalama radon aktivitesi 0,290 Bq/L ile Kağıthane ilçesindedir.
- En yüksek ortalama radon aktivitesi 33,742 Bq/L ile Silivri ilçesindedir.
- İlçe ortalamalarının, ortalama radon aktivitesi 6,968 Bq/L olarak hesaplanmıştır.

3.1.3. Ölçümlerin ulusal ve uluslararası çalışmalarla karşılaştırılması

Alınan yeraltı ve yüzey sularının ölçülen minimum ve maksimum değerleri ulusal ve uluslararası düzeyde yapılan diğer çalışmaların sonuçları ile birlikte Tablo 3.4.'te gösterilmiştir.

Tablo 3.4. Çeşitli sularda yapılan Ulusal ve Uluslararası çalışmaların değerleri.

²²² Rn Activity (BqL ⁻¹)				
Kaynak (Spring)	Kuyu (Well)	Musluk (Tap)	Çalışmalar	Yer
0,34-341	-	-	Marković et al. (2020) [40]	Kosova
0,1-576	-	0-2	Horvath et al. (2000) [50]	Venezuela
0.15-7.48	-	-	Abdullah et al. (2023) [42]	Irak/Erbil
1270-66,400	-	-	Doung et al. (2023) [41]	K.Vietnam
3,3-10,7	3,1-5,7	2,5-4,7	Kullab et al. (2005) [51]	Sırbistan
0,46-49,6	0,91-19,88	-	Abdallah et al. (2007) [52]	Lübnan
3,3-10,7	3,1-5,7	2,5-4,7 4,3-6,3 (Deniz)	Al-Bataina et al. (1997) [32]	Ürdün
53,4-292,5	-	-	Song ve diğ. (2005) [36]	Çin
2-129,3	0,6-112,6	-	Cosma et al. (2008) [53]	Romanya
2,02-93,79	-	-	Radolic ve diğ. (2005) [37]	Hırvatistan
10-28	0,4-20	-	Kaur et al. (2019) [39]	Hindistan
14-1385	-	-	Martins, L et al. (2019) [54]	Portekiz
54-297	-	-	Nikolopoulos et al. (2010) [35]	Yunanistan
0,246-34,36	0,86-16,12	-	Khan, A. R.et al. (2019) [55]	Pakistan
280-2164	29-3090	-	Sobakin (2018) [56]	Yakutistan
1,7-117 (RAD7)	-	2,5-49(RAD7)		
2,1-277 (RnDuo)	-	13,5-61 (RnDuo)	Prasad et al. (2018) [57]	Hindistan
6,2-20,10	9,1-23,6	-	Khan, F. et al. (2018) [58]	Pakistan
-	12,4-17	6,7-9,4	Ahmad et al. (2015) [59]	Malezya
2-14	-	-	Lebed et al. (2018) [60]	Ukrayna
52-380	-	-	Renteria-Villalobos et al. (2017) [61]	Meksika
1,4-105	-	-	Fonollosa, et al. (2016) [62]	İspanya
2,8-46,62	-	8,33-8,51	Kumar et al. (2017) [63]	Hindistan
-	-	0,10-2,89	Sola et al. (2017) [64]	Tayland

Tablo 3.4. (Devamı): Çeşitli sulara yapılan Ulusal ve Uluslararası çalışmaların değerleri.

²²² Rn Activity (Bql ⁻¹)				
Kaynak (Spring)	Kuyu (Well)	Musluk (Tap)	Çalışmalar	Yer
10,2-68,9	5,6-35,2	1,2-4,5	Nita et al. (2013) [66]	Romanya
0,70-27,6	1,27-16,5	-	Khattak et al. (2014) [67]	Pakistan
18-1522	-	-	Kozłowska et al. (2008) [68]	Polonya
2,11-120	1,12-40,3	0,31-24,3	Somlai et al. (2007) [69]	Macaristan
-	21,59 -27,93	16,23-24,71	Ajibola et al. (2021) [70]	Nijerya
0,041-0,69	0,28-9,5	-	Karataşlı et al. (2017) [71]	Mersin
10,82	-	-	Damla et al. (2005) [72]	Karedeniz
0,207	0,303	-	Bariş et al. (2006) [23]	İzmir
0,085-44,57	-	-	Akkurt (2006) [22]	Afyon
22,68	-	-	Özdemir et al. (2006) [73]	Afyon
1,0-5,4	-	-	Kumru et al. (2006) [74]	Denizli
6,23-11,35	-	-	Duran et al. (2017) [75]	Karadeniz
0,334-7,810	-	-	Yamaç et al. (2018) [76]	İzmit
4,31-15,44	-	0,32-21,30	Koray et al. (2014) [77]	Zonguldak
-	-	-	Bozkurt and Ertürk (2022) [78]	Kapadokya
1,85-99,27	-	-	Erdoğan et al. (2017) [79]	Konya
1,47-14,76	-	0,83-1,63	Doğan et al. (2018) [80]	İstanbul
0,39-1,17	-	0,42-2,4	Öner et al. (2009) [29]	Amasya
0,13-1,20	-	0,48-1,30	Yığıtoğlu et al. (2010) [30]	Tokat
0,13-0,90	-	1,02-3,30	Baykara et al. (2006) [81]	NAFZ ²
0,39-19,21	-	0,31-13,14	Yalçın et al. (2011) [82]	Kastamonu
0,43-0,69	-	0,16-0,69	Erdoğan et al. (2016) [83]	Osmaniye
0,74-59,65	1,98-20,8	1,49-9,01	Yakut et al. (2013) [84]	Sakarya
0,704-76,24	-	-	Özer et al. (2019) [2]	Bursa
0,144-48,986	-	0,204-7,99	Bu çalışma (2023)	İstanbul

3.2. Ölçülen Su Numunelerin İnsanlar Üzerindeki Etkileri

İnsanların yaş gruplarına bağlı olarak yıllık tükettikleri su miktarları ile yıllık soludukları hava miktarları değişmektedir. Bunlara bağlı olarak da radon içeren suları içme ve sulardan havaya karışan radonun solunması sebebiyle alınan dozlar da yaş gruplarına göre farklılık göstermektedir. Yaş grupları Yetişkin, Çocuk ve Bebek olarak ele alınmıştır.

Farklı yaş grupları için suyun içilmesi yoluyla radyonüklid alımına bağlı alım dozu, UNSCEAR'ın 2000 yılındaki raporunda verilen dönüşüm parametreleri (UNSCEAR 2000a) kullanılarak hesaplanmıştır ve alım oranları ise Dünya Sağlık Örgütü (WHO) 'nün 2011 raporunda belirtilmiştir (WHO 2011). Çeşitli yaş kategorileri için dönüşüm parametrelerinin ve günlük su alım oranlarının değerleri Tablo 3.5.'de verilmiştir.

Tablo 3.5. Belirli yaş gruplarının; yıllık su alım ve soluma miktarları ile doz dönüşüm katsayıları [39].

Yaş grupları	Bebekler		Çocuklar		Erkekler		Kadınlar			Referanslar [87-91]
	Faktörler	0-6 ay	1-3 yaş	4-8 yaş	9-13 yaş	14-18 yaş	Yetişkin	9-13 yaş	14-18 yaş	
Vücut kütlesi (kg)	6	12	20	36	61	70	37	54	57	DRI (2005)
Nefes oranı (m ³ h ⁻¹)	0.11	0.22	0.35	0.56	0.72	0.78	0.56	0.64	0.61	ICRP (2002)
İçme oranı (Ly ⁻¹)	200	260	300	350	600	730	350	600	730	WHO (2011)
DCF _{Ing} (Rn) (μSv Bq ⁻¹)	0.023	0.0059		0.0035			0.0035			UNSCEAR (2000b)
Maruz kalma per. (year)	-	6		30			30			USEPA (2001)
Maruz kalma sıklığı (gy ⁻¹)	350	350		350			350			USEPA (2001)
Maruziyet süresi (hy ⁻¹)	8760	8760		8760			8760			USEPA (2001)
Ort. Ömür (yıl)	65	65		65			65			WHO (2011)
Ort. süre (gün)	23,725	23,725		23,725			23,725			WHO (2011)

$D_{içme}^{Rn}$, (AED_{ing}, μSvy⁻¹ biriminde) doz katsayıları, radyonüklidlerin aktivite konsantrasyonları ve yıllık su tüketimi kullanılarak Birleşmiş Milletler Atomik Radyasyonun Etkileri Bilimsel Komitesi (UNSCEAR)'nin 1993, 2000 ve 2008 yıllarında yayınladığı raporlara göre aşağıdaki gibi hesaplanmıştır (UNSCEAR 2008):

$$D_{içme}^{Rn} = A_{Rn} \times W_{in} \times D_f^i \quad (3.2)$$

Burada; A_{Rn} sudaki radon aktivitesini (BqL⁻¹), W_{in} içilen yıllık su miktarını (Lyıl⁻¹) (WHO 2011) ve D_f^i mide yoluyla alım dozu dönüşüm faktörüdür (SvBq⁻¹) (UNSCEAR 2000a).

Sudan kaçan radonun solunması yoluyla alınan yıllık efektif doz ($D_{Solunma}^{Rn}$, veya AED_{inh}, μSvy⁻¹ biriminde) aşağıdaki gibi hesaplanmıştır (UNSCEAR 2000):

$$D_{Solunma}^{Rn} = A_{Rn} \times R_w \times F \times T \times D_f^s \quad (3.3)$$

Burada D_f^s solunma yoluyla alımda doz dönüşüm faktörüdür ve 9 nSvm³h⁻¹Bq⁻¹ olarak önerilmiştir. R_w ise havadaki radon ve sudaki radon oranıdır (10⁻⁴), F ise radon ve ürünlerinin arasındaki denge faktörüdür (0,4) ve T ise (7000 hy⁻¹) kişi başına yıllık ortalama iç mekanda bulunma zamanıdır (UNSCEAR, 1993).

Tablo 3.5.'e göre belirli yaş gruplarının yıllık ortalama tüketmiş oldukları su miktarları ve yapmış oldukları solunum miktarları baz alınarak ortalama radon aktiviteleri hesaplanan su numunelerinin içilmesinden ve solunmasından kaynaklanan yıllık efektif dozlar hesaplanıp Tablo 3.6.'da gösterilmiştir.

Tablo 3.6. Ölçümü yapılan suların, içilmesi ve sulardan havaya karışan radonun solunmasından kaynaklanan değişik yaş gruplarındaki yıllık efektif dozlar.

Numune Alınan İlçe Bilgisi ve Ölçüm Değerleri				İçilme Kaynaklı Doz			Solunma Kaynaklı Doz
İlçe	Örnek ID	Ort. Rn Bq/L (HC+DCF)	Standart Sapma (HC+DCF)	Yetişkin (≥ 17 yaş) (μSvy^{-1})	Çocuk (12-16 yaş) (μSvy^{-1})	Bebek (≤ 1 yaş) (μSvy^{-1})	Yetişkin (≥ 17 yaş) (μSvy^{-1})
Arnavutköy	1	16,013	0,750	28,022	29,143	55,245	40,352
Arnavutköy	2	8,617	0,977	15,081	15,684	29,730	21,716
Arnavutköy	3	0,552	0,378	0,966	1,005	1,904	1,391
Arnavutköy	4	24,865	2,304	43,514	45,254	85,784	62,660
Arnavutköy	5	17,523	2,281	30,665	31,892	60,454	44,158
Arnavutköy	6	1,970	0,876	3,447	3,585	6,796	4,964
Çatalca	7	12,149	1,282	21,261	22,111	41,914	30,615
Çatalca	8	6,411	1,136	11,220	11,668	22,119	16,156
Çatalca	9	7,490	1,158	13,108	13,632	25,841	18,875
Çatalca	10	34,477	3,072	60,335	62,749	118,947	86,883
Sultangazi	11	0,937	0,296	1,640	1,706	3,234	2,362
Eyüpsultan	12	3,533	0,591	6,183	6,431	12,190	8,904
Kağıthane	13	0,290	0,123	0,507	0,527	0,999	0,730
Şişli	14	0,432	0,099	0,757	0,787	1,492	1,090
Eyüpsultan	15	0,612	0,318	1,072	1,114	2,113	1,543
Eyüpsultan	16	13,032	0,873	22,806	23,719	44,961	32,841
Eyüpsultan	17	2,464	1,313	4,313	4,485	8,502	6,210
Sarıyer	18	0,554	0,415	0,969	1,008	1,910	1,395
Sarıyer	19	0,659	0,428	1,153	1,199	2,273	1,660
Sarıyer	20	0,575	0,441	1,007	1,047	1,985	1,450
Sarıyer	21	0,429	0,249	0,750	0,780	1,479	1,080
Sarıyer	22	1,635	0,825	2,862	2,976	5,642	4,121
Eyüpsultan	23	0,215	0,005	0,392	0,408	0,773	0,565
Eyüpsultan	24	-----Radon aktivitesi ölçülemediği için-----					
Eyüpsultan	25	0,144	0,120	0,252	0,262	0,497	0,363
Eyüpsultan	26	7,570	0,841	13,248	13,778	26,117	19,077
Eyüpsultan	27	24,041	1,551	42,072	43,755	82,942	60,584
Eyüpsultan	28	7,839	0,651	13,718	14,267	27,045	19,754
Arnavutköy	29	46,864	3,865	82,011	85,292	161,680	118,096
Arnavutköy	30	24,357	1,490	42,625	44,330	84,031	61,379
Arnavutköy	31	7,199	1,116	12,598	13,102	24,836	18,141
Küçükçekmece	32	0,209	0,001	0,365	0,380	0,720	0,526
Küçükçekmece	33	0,536	0,148	0,927	0,964	1,827	1,334
Avcılar	34	0,433	0,000	0,755	0,785	1,489	1,087
Büyükçekmece	35	-----Radon aktivitesi ölçülemediği için-----					
Büyükçekmece	36	0,222	0,002	0,363	0,377	0,715	0,522
Büyükçekmece	37	0,418	0,297	0,725	0,754	1,429	1,044
Büyükçekmece	38	0,219	0,002	0,357	0,372	0,705	0,515
Büyükçekmece	39	12,157	1,675	21,274	22,125	41,941	30,635
Çatalca	40	1,748	0,694	3,058	3,181	6,029	4,404
Çatalca	41	0,870	0,385	1,522	1,583	3,000	2,192
Çatalca	42	3,599	0,946	6,298	6,550	12,417	9,070
Çatalca	43	20,210	1,971	35,368	36,782	69,725	50,930
Çatalca	44	13,944	2,054	24,403	25,379	48,108	35,140
Çatalca	45	32,972	4,396	57,702	60,010	113,755	83,090
Silivri	46	9,773	1,366	17,102	17,786	33,715	24,627
Silivri	47	32,341	2,958	56,596	58,860	111,576	81,499
Silivri	48	48,986	2,701	85,725	89,154	169,001	123,444
Silivri	49	28,991	2,887	50,734	52,764	100,019	73,058
Silivri	50	48,620	0,985	85,086	88,489	167,740	122,523

Ölçümü yapılan numunelerin içerisinde;

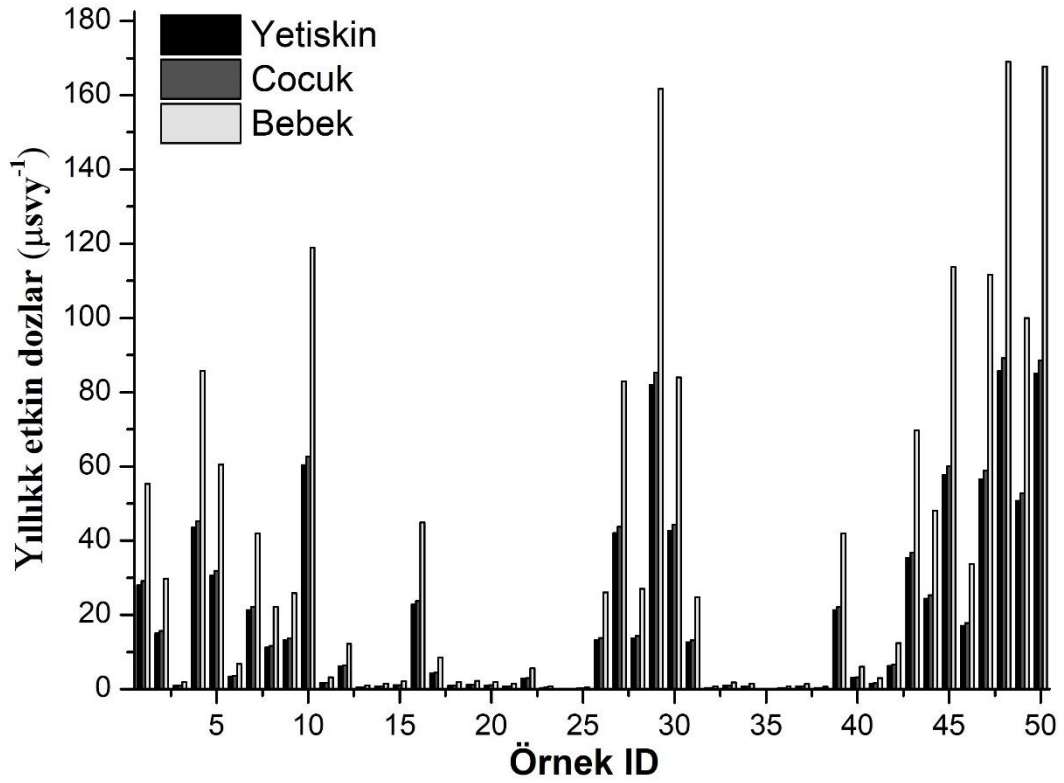
- Maksimum radon aktivitesi 48,986 Bq/L
- Minimum radon aktivitesi 0,144 Bq/L
- Ortalama radon aktivitesi 11,035 Bq/L olarak tespit edilmiştir.

Ayrıca ölçüm sonuçları kullanılarak, bu suların kullanımından kaynaklı insan vücuduna etki eden dozlar hesaplanmıştır.

Numunesi alınan suların kullanımı ve içilmesinden kaynaklı Şekil 3.2.'de gösterilen yıllık efektif dozlar;

- Yetişkinler için 0,25 μSvy^{-1} ile 85,72 μSvy^{-1} aralığında
- Çocuklar için 0,262 μSvy^{-1} ile 89,15 μSvy^{-1} aralığında
- Bebekler için ise 0,50 μSvy^{-1} ile 169,00 μSvy^{-1} aralığında değişmektedir.

Bu çalışma sırasında tespit edilen tüm ortalama efektif dozlar, Dünya Sağlık Örgütü'nün (WHO) önerdiği 100 μSvy^{-1} referans değerinin altındadır.



Şekil 3.2. Yetişkin, Çocuk ve Bebekler için içme yoluyla alınan radon miktarları için hesaplanan yıllık efektif doz değişimleri.

3.2.1. Hesaplanan doz değerlerinin ulusal bazlı karşılaştırılması

Türkiye çapında 17 farklı bölgede ölçülen radon kaynaklı yıllık efektif doz miktarları Tablo 3.7.'de gösterilmiştir.

Yapılan bu ölçümlere göre;

- Ortalama efektif doz miktarı yaklaşık 36 (μSvy^{-1}) değerine tekabül etmektedir.
- Maksimum ortalama efektif doz miktarı Afyonda 74(μSvy^{-1}), minimum ortalama efektif doz miktarı da İstanbul'da 0,2 (μSvy^{-1}) olarak ölçülmüştür.

Bu tez çalışmasındaki ölçümlere göre;

- Ortalama efektif doz miktarı 19,31 (μSvy^{-1}) olarak ölçülmüştür.
- Maksimum efektif doz miktarı 85,72 (μSvy^{-1}), minimum efektif doz miktarı ise 0,25(μSvy^{-1}) olarak ölçülmüştür.

Tablo 3.7. Türkiye'nin farklı illerinden toplanan sular için hesaplanan ortalama yıllık veya min-mak. efektif doz değerleri.

Yer	Çalışmalar	AED (μSvy^{-1})
Amasya	Öner et al. (2009) [29]	5.87
Tokat	Yiğitoğlu et al. (2010) [30]	3.0
Elazığ	Baykara ve Doğru (2006) [81]	9.0
Tekirdağ	Yarar et al. (2000) [85]	9.3
İstanbul	Karahan et al. (2000) [6]	0.2
Bursa	Tarım et al. (2011) [86]	1.11
Eskişehir	Örgün et al. (2005) [87]	1.9
Kastamonu	Yalçın et al. (2011) [82]	Min-Mak: 0,8-49,09
Konya	Erdoğan et al. (2017) [79]	Min-Mak: 0,37-19,85
Zonguldak	Koray et al. (2014) [77]	Min-Mak: 0,91-3,24
Kapadokya	Bozkurt ve Ertürk (2022) [78]	Min-Mak: 0,62-31,92
Afyon	Yalın et al. (2007) [28]	74
Osmaniye	Erdoğan et al. (2016) [83]	Min-Mak: 0,42-2,52
Samsun-Rize	Duran et al. (2017) [75]	56,03
Sakarya	Yakut et al. (2013) [84]	1.92
Yalova	Tabar ve Yakut (2014) [88]	6,55
Bursa	Özer et al. (2019) [2]	61,34
İstanbul	Bu çalışma (2023)	19,31

3.2.2. Hesaplanan doz değerlerinin ilçe bazlı karşılaştırılması

Her ilçeden farklı sayılarda alınan su numunelerinin ortalama radon aktiviteleri ve bundan kaynaklı değişik yaş gruplarının maruz kaldığı yıllık efektif dozlar ilçe bazlı hesaplanıp karşılaştırma yapmak üzere Tablo 3.8.'de gösterilmiştir.

Tablo 3.8. Ölçümü yapılan suların ilçe bazlı, içilmesi ve sulardan havaya karışan radonun solunmasından kaynaklanan değişik yaş gruplarındaki yıllık efektif dozlar.

Numune Alınan İlçe Bilgisi ve Ölçüm Değerleri			İçilme Kaynaklı Doz			Solunma Kaynaklı Doz
İlçe	Örnek Sayısı	Ort. Rn Bq/L (HC+DCF)	Yetişkin (≥17 yaş) (μSvy ⁻¹)	Çocuk (12-16 yaş) (μSvy ⁻¹)	Bebek (≤1 yaş) (μSvy ⁻¹)	Yetişkin (≥17 yaş) (μSvy ⁻¹)
Arnavutköy	9	16,013	28,022	29,143	55,245	40,352
Avcılar	1	8,617	15,081	15,684	29,730	21,716
Büyükçekmece	5	0,552	0,966	1,005	1,904	1,391
Çatalca	10	24,865	43,514	45,254	85,784	62,660
Eyüpsultan	10	17,523	30,665	31,892	60,454	44,158
Kağıthane	1	1,970	3,447	3,585	6,796	4,964
Küçükçekmece	2	12,149	21,261	22,111	41,914	30,615
Sarıyer	5	6,411	11,220	11,668	22,119	16,156
Silivri	5	7,490	13,108	13,632	25,841	18,875
Şişli	1	34,477	60,335	62,749	118,947	86,883
Sultangazi	1	48,620	85,086	88,489	167,740	122,523

3.3. İçilen ve Solunan Radon Gazının Vücut Organları Üzerindeki Etkileri

Radon gazı teneffüs edildiğinde, solunum yetmezliği, baş ağrısı, öksürük gibi akut etkiler ortaya çıkmaz. Radyoaktif bozunuma maruz kalan radon gazı, teneffüs edildiği zaman akciğerlerin tutulabileceği parçacıklara dönüşür. Bu parçacıklardaki radon ürünlerinin bozunması neticesinde ortaya çıkan enerji, akciğerlerdeki dokulara zarar verir ve zamanla akciğerlerde kanser oluşabilir.

Solunum yoluyla alınan radonlar akciğerler, kullanım yoluyla alınan radonlar ise mide, kalın bağırsak, gonadlar (yumurtalıklar), karaciğer, böbrekler ve deri ile etkileşime girerek hasarlara yol açarlar.

Vücudun radon alımına bağlı olarak iç organlar değişik miktarlarda dozlara maruz kalmaktadırlar. Bu doz miktarları organların doku ağırlık miktarlarına göre farklılık göstermektedir. W_T ile gösteren doku ağırlık faktörleri; akciğer, kolon ve mide için (0,12), yumurtalıklar için (0,20), karaciğer ve böbrek için (0,05) ve cilt için (0,01) olarak kabul edilir (ICRP 2012) [89].

Çeşitli vücut organları için yıllık ortalama etkin doz olarak adlandırılan (D_0) Birleşmiş Milletler Atomik Radyasyonun Etkileri Bilimsel Komitesi (UNSCEAR)'nin 2000 yılında düzenlediği raporda belirtilen faktörlere göre aşağıdaki ifade kullanılarak hesaplanmıştır.

$$D_o(\mu Svy^{-1}) = W_T x H(r_T)_{ing,inh} \quad (3.2)$$

$H(r_T)$ ise ayrı ayrı eşdeğer içme ve solunma dozudur. Aşağıdaki gibi tanımlanırlar.

$$H(r_T)_{inh} = A_{Rn} \times R_{a/w} \times DCF \times F \times O_{In} \quad (3.3)$$

$$H(r_T)_{ing} = A_{Rn} \times EDC \times A_w \quad (3.4)$$

A_{Rn} (BqL^{-1}) radon konsantrasyonudur, EDC mide yoluyla alımda doz dönüşüm katsayısıdır ($D_f^i = 3,5 \text{ nSvBq}^{-1}$)'dir. A_w , yetişkinler tarafından alınan günlük su miktarıdır. ($600Ly^{-1}$), $R_{a/w}$, havadaki radonun sudaki radona oranı (10^{-4}), F denge değeri (0,4), O_{In} ise kişi başına ortalama kapalı alanda kalma süresi (7000 hy^{-1}) ve DCF, radon maruziyeti için doz dönüşüm faktörüdür ($D_f^s = 9 \text{ nSvm}^3\text{h}^{-1}\text{Bq}^{-1}$) (UNSCEAR, 1993).

Yukarıda verilen formüller kullanılarak, alınan su numunelerinin içilmesi ve alınan su numunelerinden havaya karışan radonun solunması yoluyla vücudun farklı organlarının maruz kaldıkları yıllık efektif dozlar hesaplanarak Tablo 3.9.'da gösterilmiştir.

Tablo 3.9. Ölçümü yapılan suların içilmesi ve bu sulardan havaya karışan radonun solunması nedeniyle vücut organlarının maruz kaldığı μSvy^{-1} cinsinden yıllık efektif dozlar.

İlçe	Örnek ID	Akciğerler	Mide	Kalın Bağırsak	Gonadlar	Karaciğer	Böbrekler	Deri	Toplam Doz
Arnavutköy	1	4,842	0,404	0,404	0,673	0,168	2,018	0,034	8,541
Arnavutköy	2	2,606	0,217	0,217	0,362	0,090	1,086	0,018	4,597
Arnavutköy	3	0,167	0,014	0,014	0,023	0,006	0,070	0,001	0,294
Arnavutköy	4	7,519	0,627	0,627	1,044	0,261	3,133	0,052	13,263
Arnavutköy	5	5,299	0,442	0,442	0,736	0,184	2,208	0,037	9,347
Arnavutköy	6	0,596	0,050	0,050	0,083	0,021	0,248	0,004	1,051
Çatalca	7	3,674	0,306	0,306	0,510	0,128	1,531	0,026	6,480
Çatalca	8	1,939	0,162	0,162	0,269	0,067	0,808	0,013	3,420
Çatalca	9	2,265	0,189	0,189	0,315	0,079	0,944	0,016	3,995
Çatalca	10	10,426	0,869	0,869	1,448	0,362	4,344	0,072	18,390
Sultangazi	11	0,283	0,024	0,024	0,039	0,010	0,118	0,002	0,500
Eyüpsultan	12	1,069	0,089	0,089	0,148	0,037	0,445	0,007	1,885
Kağıthane	13	0,088	0,007	0,007	0,012	0,003	0,037	0,001	0,155
Şişli	14	0,131	0,011	0,011	0,018	0,005	0,054	0,001	0,231
Eyüpsultan	15	0,185	0,015	0,015	0,026	0,006	0,077	0,001	0,327
Eyüpsultan	16	3,941	0,328	0,328	0,547	0,137	1,642	0,027	6,951
Eyüpsultan	17	0,745	0,062	0,062	0,104	0,026	0,311	0,005	1,314
Sarıyer	18	0,167	0,014	0,014	0,023	0,006	0,070	0,001	0,295
Sarıyer	19	0,199	0,017	0,017	0,028	0,007	0,083	0,001	0,351
Sarıyer	20	0,174	0,014	0,014	0,024	0,006	0,072	0,001	0,307

Tablo 3.9. (Devamı): Ölçümü yapılan suların içilmesi ve bu sulardan havaya karışan radonun solunması nedeniyle vücut organlarının maruz kaldığı μSvy^{-1} cinsinden yıllık efektif dozlar.

İlçe	Örnek ID	Akciğerler	Mide	Kalın Bağırsak	Gonadlar	Karaciğer	Böbrekler	Deri	Toplam Doz
Sarıyer	21	0,130	0,011	0,011	0,018	0,005	0,054	0,001	0,229
Sarıyer	22	0,495	0,041	0,041	0,069	0,017	0,206	0,003	0,872
Eyüpsultan	23	0,065	0,005	0,005	0,009	0,002	0,027	0,000	0,115
Eyüpsultan	24	-----Radon aktivitesi ölçülememiştir.-----							
Eyüpsultan	25	0,044	0,004	0,004	0,006	0,002	0,018	0,000	0,077
Eyüpsultan	26	2,289	0,191	0,191	0,318	0,079	0,954	0,016	4,038
Eyüpsultan	27	7,270	0,606	0,606	1,010	0,252	3,029	0,050	12,824
Eyüpsultan	28	2,371	0,198	0,198	0,329	0,082	0,988	0,016	4,181
Arnavutköy	29	14,172	1,181	1,181	1,968	0,492	5,905	0,098	24,997
Arnavutköy	30	7,366	0,614	0,614	1,023	0,256	3,069	0,051	12,992
Arnavutköy	31	2,177	0,181	0,181	0,302	0,076	0,907	0,015	3,840
Küçükçekmece	32	0,063	0,005	0,005	0,009	0,002	0,026	0,000	0,111
Küçükçekmece	33	0,162	0,013	0,013	0,022	0,006	0,067	0,001	0,286
Avcılar	34	0,131	0,011	0,011	0,018	0,005	0,055	0,001	0,231
Büyükçekmece	35	-----Radon aktivitesi ölçülememiştir.-----							
Büyükçekmece	36	0,067	0,006	0,006	0,009	0,002	0,028	0,000	0,118
Büyükçekmece	37	0,126	0,011	0,011	0,018	0,004	0,053	0,001	0,223
Büyükçekmece	38	0,066	0,006	0,006	0,009	0,002	0,028	0,000	0,117
Büyükçekmece	39	3,676	0,306	0,306	0,511	0,128	1,532	0,026	6,484
Çatalca	40	0,528	0,044	0,044	0,073	0,018	0,220	0,004	0,932
Çatalca	41	0,263	0,022	0,022	0,037	0,009	0,110	0,002	0,464
Çatalca	42	1,088	0,091	0,091	0,151	0,038	0,453	0,008	1,920
Çatalca	43	6,112	0,509	0,509	0,849	0,212	2,546	0,042	10,780
Çatalca	44	4,217	0,351	0,351	0,586	0,146	1,757	0,029	7,438
Çatalca	45	9,971	0,831	0,831	1,385	0,346	4,155	0,069	17,587
Silivri	46	2,955	0,246	0,246	0,410	0,103	1,231	0,021	5,213
Silivri	47	9,780	0,815	0,815	1,358	0,340	4,075	0,068	17,251
Silivri	48	14,813	1,234	1,234	2,057	0,514	6,172	0,103	26,129
Silivri	49	8,767	0,731	0,731	1,218	0,304	3,653	0,061	15,464
Silivri	50	14,703	1,225	1,225	2,042	0,511	6,126	0,102	25,934
Minimum		0,044	0,004	0,004	0,006	0,002	0,018	0,000	0,077
Maksimum		14,813	1,234	1,234	2,057	0,514	6,172	0,10	26,129
Ortalama		3,337	0,278	0,278	0,463	0,116	1,390	0,023	5,886
Standart Sapma		4,226	0,352	0,352	0,587	0,147	1,761	0,029	7,455

Ölçümü yapılan suların havaya karışması ve bu radonlu havanın solunması neticesinde akciğerlerin maruz kaldığı yıllık efektif dozlara göre;

- Minimum doz $0,044 \mu\text{Svy}^{-1}$ değerine sahiptir.
- Maksimum doz $14,813 \mu\text{Svy}^{-1}$ değerine sahiptir.
- Ortalama doz miktarı ise $3,337 \mu\text{Svy}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır

Ölçümü yapılan suların içilmesi sebebiyle midenin ve kalın bağırsağın maruz kaldığı dozlar $0,004 \mu\text{Svy}^{-1}$ ile $1,234 \mu\text{Svy}^{-1}$ aralığında değişmekte olup, ortalama dozları $0,278 \mu\text{Svy}^{-1}$ değerindedir.

Ölçümü yapılan suların tüketilmesinden kaynaklı karaciğerin maruz kaldığı dozlar $0,006 \mu\text{Svy}^{-1}$ ile $2,057 \mu\text{Svy}^{-1}$ aralığında değişmekte olup ortalama dozu $0,463 \mu\text{Svy}^{-1}$ olarak, yumurtalıkların (gonadlar) maruz kaldığı dozlar $0,002 \mu\text{Svy}^{-1}$ ile $0,512 \mu\text{Svy}^{-1}$ aralığında değişmekte olup ortalama dozu $0,116 \mu\text{Svy}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır.

Ölçümü yapılan suların havaya karışması ve bu radonlu havanın solunması neticesinde böbreklerin maruz kaldığı dozlar $0,018 \mu\text{Svy}^{-1}$ ile $6,172 \mu\text{Svy}^{-1}$ aralığında değişmekte olup ortalama dozu $1,390 \mu\text{Svy}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır.

Organların maruz kaldığı yıllık efektif dozlar karşılaştırıldığında yüksek dozdan aşağıya doğru sırasıyla; akciğerler-böbrekler-gonadlar-mide ile kalın bağırsak-deri olarak sıralayabiliriz.

Tüm organlar tarafından alınan toplam doz miktarı ise ortalama $5,886 \mu\text{Svy}^{-1}$ değere sahip olup $0,077 \mu\text{Svy}^{-1}$ ile $26,129 \mu\text{Svy}^{-1}$ aralığında değişmektedir. Dolayısıyla alınan numunelerin hesaplanan doz miktarları WHO Dünya Sağlık Örgütü tarafından önerilen eşik değerinden ($100 \mu\text{Svy}^{-1}$) düşük çıkmıştır.

3.3.1. Maruz kalınan toplam efektif dozların ilçe bazlı değerlendirilmesi

Ölçümü yapılan 50 adet su numunesi ilçe bazlı ayrılarak ilçelerin ortalama radon seviyeleri hesaplanmıştır. Bu suların içilmesi ve sulardan havaya karışan radonların solunması neticesinde vücut organlarının maruz kaldığı yıllık efektif dozlar hesaplanıp Tablo 3.10.'da gösterilmiştir. Bu sayede alınan su numunelerinin ilçe bazlı radon ortalamalarının hesaplanıp karşılaştırılması ve vücut organları üzerinde bıraktıkları etkiler daha kolay gözlemlenecektir.

Tablo 3.10. Ölçümü yapılan suların ilçe bazlı, içilmesi ve sulardan havaya karışan radonun solunması nedeniyle vücut organların maruz kaldığı μSvy^{-1} cinsinden yıllık efektif dozlar.

İlçe	Örnek Sayısı	Akciğerler	Mide	Kalın Bağırsak	Gonadlar	Karaciğer	Böbrekler	Deri	Toplam doz
Arnavutköy	9	4,971	0,414	0,414	0,690	0,173	2,071	0,035	8,769
Avcılar	1	0,131	0,011	0,011	0,018	0,005	0,055	0,001	0,231
Büyükkçekmece	5	0,984	0,082	0,082	0,137	0,034	0,410	0,007	1,736
Çatalca	10	4,048	0,337	0,337	0,562	0,141	1,687	0,028	7,141

Tablo 3.10. (Devamı): Ölçümü yapılan suların ilçe bazlı, içilmesi ve sulardan havaya karışan radonun solunması nedeniyle vücut organlarının maruz kaldığı μSvy^{-1} cinsinden yıllık efektif dozlar.

İlçe	Örnek Sayısı	Akciğerler	Mide	Kalın Bağırsak	Gonadlar	Karaciğer	Böbrekler	Deri	Toplam doz
Eyüpsultan	10	1,998	0,166	0,166	0,277	0,069	0,832	0,014	3,523
Kağıthane	1	0,088	0,007	0,007	0,012	0,003	0,037	0,001	0,155
Küçükçekmece	2	0,113	0,009	0,009	0,016	0,004	0,047	0,001	0,199
Sarıyer	5	0,233	0,019	0,019	0,032	0,008	0,097	0,002	0,411
Silivri	5	10,204	0,850	0,850	1,417	0,354	4,252	0,071	17,998
Şişli	1	0,131	0,011	0,011	0,018	0,005	0,054	0,001	0,231
Sultangazi	1	0,283	0,024	0,024	0,039	0,010	0,118	0,002	0,500
Ortalama		2,108	0,176	0,176	0,293	0,073	0,878	0,015	3,717

Yapılan ölçümlerde ilçelerde maruz kalınan yıllık, ortalama toplam doz miktarları karşılaştırıldığında;

- En yüksek ortalama $17,998 \mu\text{Svy}^{-1}$ ile Silivri ilçesindedir.
- En düşük ortalama $0,155 \mu\text{Svy}^{-1}$ ile Kağıthane ilçesindedir.
- İlçelerin ortalama toplam doz miktarlarının, ortalaması ise $3,717 \mu\text{Svy}^{-1}$ dir.

İlçe bazlı maruz kalınan yıllık ortalama doz miktarlarına göre, organların maruz kaldığı ortalama doz miktarları içerisinde;

- En yüksek ortalama doz miktarı $2,108 \mu\text{Svy}^{-1}$ ile akciğerler

En düşük ortalama doz miktarı ise $0,015 \mu\text{Svy}^{-1}$ ile deri olarak hesaplanmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] Uludağ, N. (2018). *Şile Kandıra İzmit Bölgesindeki Kaynak Sularında Radon Gazının İncelenmesi ve Sakarya Üniversitesi Radon Farkındalık Anketi* [Yüksek lisans tezi]. Sakarya Üniversitesi
- [2] Özer, Y. (2019). *Bursa'daki Orhaneli Termik Santrali Çevresindeki Sulara Radon Seviyesinin ve Yıllık Etkin Dozların Belirlenmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Sakarya Üniversitesi
- [3] Seid, A. M. A. (2020). *Türkiye'de Tüketilen Şişelenmiş Maden Sularındaki Radon Aktivitesinin Aktif Yöntem ile Ölçülmesi ve Yıllık Etkin Radyasyon Dozunun Değerlendirilmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Kastamonu Üniversitesi
- [4] Gümbür, S. (2014). *Kahramanmaraş İlinde Su Örneklerinde Radon Gazı Ölçümü* [Yüksek Lisans Tezi] Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi
- [5] Gümbür, S. (2022). *Doğu Anadolu fay zonu uzanımında bulunan Gölbaşı (Adıyaman)-Türkoğlu (Kahramanmaraş) segmenti üzerinde radon gazı değişimlerinin deprem ile ilişkisi ve doğal radyoaktivitenin belirlenmesi* [Doktora tezi]. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi
- [6] Karahan, G., Öztürk N., Bayülken A., *Natural Radioactivity in Various Surface Waters In İstanbul, Turkey*, Wat. Res. Vol. 34, No. 18, pp. 4367-4370, 2000
- [7] Dervişoğlu Koç, Y. (2022). *Diyarbakır'da bazı içme sularında radon konsantrasyon seviyelerinin belirlenmesi* [Yüksek lisans tezi]. Bitlis Eren Üniversitesi
- [8] Shaheen, A. J. O. (2022). *Hilla şehri içme suyundaki radyoaktif radon gazı konsantrasyonunun filtrelemeden önce ve sonra ölçümü* [Yüksek lisans tezi]. Çankırı Karatekin Üniversitesi
- [9] Kaptan, O. (2020). *Sakarya'daki yer altı sularında radon konsantrasyonlarının araştırılması* [Yüksek lisans tezi]. Sakarya Üniversitesi
- [10] Genç, İ. (2019). *İç Anadolu'nun granitçe zengin bölgelerindeki kuyu sularında radon aktivite konsantrasyonunun belirlenmesi ve radyasyon doz tahmini* [Yüksek lisans tezi]. Selçuk Üniversitesi
- [11] Tanrıverdi, E. (2016). *Bitlis bölgesindeki sulara radon aktivitesinin belirlenmesi* [Yüksek lisans tezi]. Bitlis Eren Üniversitesi
- [12] Gündoğan, A. (2016). *Kilis ili sularında radon gazı ölçümü* [Yüksek lisans tezi]. Kilis 7 Aralık Üniversitesi
- [13] Erdoğan, M. (2015). *Osmaniye ve çevresindeki içilebilir ve işlenebilir sulara radon (Rn-222) konsantrasyonunun belirlenmesi* [Yüksek lisans tezi]. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Mustafa Kemal Üniversitesi ortak programı
- [14] Tel, F. (2014). *Konya'nın çeşme sularında radon (Rn-222) konsantrasyonları değişimlerinin incelenmesi* [Yüksek lisans tezi]. Selçuk Üniversitesi

- [15] Alp, M. S. (2014). *Batman ilindeki sulara radon konsantrasyonunun tayini* [Yüksek lisans tezi]. Bingöl Üniversitesi
- [16] Alakuş, F. (2013). *Bursa ili kaynak sularında radon gazı radyoaktivitesinin ölçülmesi* [Yüksek lisans tezi]. Bozok Üniversitesi
- [17] Özkan, D. (2011). *Afyonkarahisar yöresindeki jeotermal su kaynaklarında bölgesel radon gazı değişimlerinin incelenmesi* [Yüksek lisans tezi]. Afyon Kocatepe Üniversitesi
- [18] Okur, A. (2011). *Tokat ili içme ve yüzey sularında radon gazı konsantrasyonu ölçümü* [Yüksek lisans tezi]. Gaziosmanpaşa Üniversitesi
- [19] İncirli, F. (2011). *Kastamonu bölgesindeki sulara radon aktivitesinin ölçülmesi* [Yüksek lisans tezi]. Kastamonu Üniversitesi
- [20] Tabar, E. (2011). *Dikili ve Bergama bölgelerindeki tektonik aktivitenin jeotermal sulara radon ölçümleri ile değerlendirilmesi* [Yüksek lisans tezi]. Ege Üniversitesi
- [21] Akar, Ü. (2010). *Bursa-Çekirge bölgesi termal sularında radon konsantrasyonunun tayini* [Yüksek lisans tezi]. Uludağ Üniversitesi
- [22] Akkurt, A. 2006. Afyon Jeotermal Sularında Radon (Rn-222) Aktivitesi Tayini. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Afyonkarahisar. 57 s.
- [23] Barış, C. 2006, “İzmir-Çeşme Yeraltı-Termal Suları ve Çevresindeki Topraklarda Radyoaktivite Araştırmaları”, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Manisa, s. 70.
- [24] Çevik, U., Damla, N., Karahan, G., Çelebi, N., Kobya. A.I., 2006. “Natural Radioactivity In Tap Waters of Eastern Black Sea Region of Turkey”, Radiation Protection Dosimetry 118 (1): 88 – 92.
- [25] Erees, F.S., Yener, G., Salk, M., Özbal Ö., 2006. “Measurements of Radon Content in Soil Gas and in the Thermal Waters in Western Turkey”, Radiation Measurements 41: 354-361.
- [26] Yazar, Y., T. Günaydı, N. Çelebi, 2006. Determination of Radon Concentrations of the Dikili Geothermal Area in Western Turkey. Radiation Protection Dosimetry 118(1): 78-81.
- [27] Yalim, H.A., A. Sandıkçioğlu, R. Ünal, Ö. Orhun, 2007. “Measurements of Radon Concentrations in Well Waters Near the Akşehir Fault Zone in Afyonkarahisar”, Turkey. Radiation Measurements 42, 505–508.
- [28] Güloğlu, A. 2007. “Çeşme Bölgesinde Aktif Fay Hatlarındaki Kaplıçalarda Radon Anomalileri ile Sismik Aktiviteler Arasındaki İlişkilerin İncelenmesi”, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İzmir, s. 12-23, s.61.
- [29] Oner, F., Yalim, H.A., Akkurt, A. and Orbay, M., 2009. The measurements of radon concentrations in drinking water and the Yeşilirmak river water in the area of Amasya in Turkey. Radiation Protection Dosimetry.133, 223–226.
- [30] Yiğitoğlu, I., Öner, F Yalim, H. A., Akkurt, A., Okur, A. And Ozkan, A. 2010. “Radon concentration in water in the region of Tokat city in Turkey” Radiation Protection Dosimetry, 141 (2):358 – 362.

- [31] Topsakal E. Ş. 2014. “Konya’nın İlgin İlçesinde Bulunan İlgin Fay Hattı Civarındaki Yer Altı Sularında ve Toprak Gazında Radon Aktivite Seviyelerinin Belirlenmesi”, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- [32] Al-bataina, B.A., İsmail, A.M., Kullab, M.K., Abmurad, K.M., Mustafa, H., 1997, “Radon measurements in different types of natural waters in Jordan”, *Radiat.Meas.* 28 (1-6), pp. 591-594.i.
- [33] Al- masri, M.S., Blackburn, R., 1999, “Radon-222 and related activities in surface waters of the English Lake”, *District. Appl. Radiat. Isot.* 50, pp. 1137-1143.
- [34] Vogianis, E., Nikolopoulos, D., Louizi B A., Halvadakis, C.P. 2004., “Radon Variations During Treatment in Thermal Spas of Lesvos Island (Greece)”, *Journal of Environmental Radioactivity*, 75: 159-170.
- [35] Nikolopoulos, D. 2010., et al. “Investigation of The Exposure to Radon and Progeny in The Thermal Spas of Loutraki, Results From Measurements and Modelling”, *Science of The Total Environment*, Attica-Greece, 408- 495-504.
- [36] Song, G., Zhang, B., Wang, X., Gong, J., Chan, D., Bernett, J., Lee, S.C. 1994., *Indoor Radon Levels In Selected Hot Spring Hotels in Guangdong, China. Science of The Total Environment*, 339: 63-70.
- [37] Radolic, V., Vukovic, B., Smit, G., Stanic, D., Planinic, J. 2005., *Radon in The Spas of Croatia. Journal of Environmental Radioactivity*, 83: 191-198.
- [38] Villalba, L., L.C. Sujo, M.E.M. Cabrera, A.C. Jimenez, M.R. Villalobos, C.J.D. Mendoza, L.A.J. Tenorio, I.D. 2005. “Rangel, E.F.H. Peraza, Radon Concentrations in Ground and Drinking Water in the State of Chihuahua, Mexico”, *Journal of Environmental Radioactivity* 88: 139-151.
- [39] Kaur, M., Kumar A., Mehra R., 2019, Age-dependent ingestion and inhalation doses due to intake of uranium and radon in water samples of Shiwalik Himalayas of Jammu and Kashmir, India, *Environmental Monitoring and Assessment*, 191-224.
- [40] Marković, S., Vučković, B., Nikolić-Bujanović, L. *et al.* Heavy metals and radon content in spring water of Kosovo. *Sci Rep* 10, 10359 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67371-1>
- [41] Duong, V.H., Vu, H.D., Nguyen, D.T. *et al.* Seasonal ²²²Rn activity in spring water close to rare earth element and uranium mines in North Vietnam. *J Radioanal Nucl Chem* (2023). <https://doi.org/10.1007/s10967-023-08872-x>
- [42] Abdullah, G.M., Azeez, H.H., Mustafa, H.T. *et al.* A study of radon concentration and physicochemical parameters in spring water of Erbil city, Iraqi Kurdistan Region. *J Radioanal Nucl Chem* 332, 775–784 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10967-023-08808-5>
- [43] Dalgıç S., Turgut M., Kuşku İ., Coşkun Ç., Coşgun T., 2009. İstanbul’un Avrupa Yakasındaki Zemin ve Kaya Koşullarının Bina Temellerine Etkisi, *Uygulamalı Yerbilimleri Sayı:2 (Ekim-Kasım 2009)* 47-70.
- [44] Arıç, C., 1955. Geology of Haliç-Küçükçekmece Lake. İstanbul Technical University, Doctora thesis (In Turkish).
- [45] Yalçınlar, İ, 1976. Türkiye jeolojisine giriş, İstanbul Üniversitesi Edebiyat Fak. Coğrafya Enstitüsü yayını.

- [46] Oktay, Y.F., ve Eren, R., 1999. İstanbul Büyükşehir Belediyesi zemin ve deprem inceleme müdürlüğü, Danışman: Tahir Öngür, Editör:Mustafa Alp Dağıstanlı, Atlas dergisi yayını.
- [47] Dalgıç, S.,2004. Factors Affecting the Greater Damage in the Avcılar Area of Istanbul During the 17 August 1999 Izmit Earthquake, Bulletin of the International Association for Engineering Geology and the Environment, Bull. Eng. Geol. Env. 63. 221 – 232.
- [48] Dalgıç, S., 2005. İstanbul ili, Büyükçekmece ilçesi, yerleşime uygun olmayan alanların jeolojik-jeoteknik değerlendirme raporu, İÜ, Araştırma ve Yardım Vakfı.
- [49] Durrige Company. 1997. RAD7, RAD H2O accessory owner's manual. <http://www.durrige.com/documentation/RADH2OManual.pdf>. Erişim Tar.: 15.05.2023.
- [50] Horvath, A., Bohus, L.O., Urbani, F., Marx, G., Piroth, A. and Greaves, E.D., 2000. Radon concentrations in hot spring waters in northern Venezuela. Journal of Environmental Radioactivity. 47, 127-133.
- [51] Kullab, M., 2005. Assessment of radon-222 concentrations in buildings, building materials, water and soil in Jordan. Applied Radiation and Isotopes. 62, 765–773.
- [52] Abdallah, S.M., Habib, R.R., Nuwayhida, R.Y., Chatilac, M. and Katuld, G., 2007.Radon measurements in well and springwater in Lebanon. Radiation Measurements. 42, 298 – 303.
- [53] Cosma, C., Moldovan, M., Dicu, T. and Kovacs, T., 2008. Radon in water from Transylvania (Romania). Radiation Measurements. 43, 1423 – 1428.
- [54] Martins L. et al., 2019. A New Framework for the Management and Radiological Protection of Groundwater Resources: The Implementation of a Portuguese Action Plan for Radon in Drinking Water and Impacts on Human Health, *Water* 2019, 11(4), 760; <https://doi.org/10.3390/w11040760>.
- [55] Khan, A. R.et al., 2019, Geo-spatial analysis of radon in spring and well water using by using active technique in drinking water sources of Abbottabad, KPK, Pakistan, *Indoor And Built Environment*, 27, 5, 682-689.
- [56] Sobakin, P. I., 2018, Radon in Surface and Ground Waters of The Elkon Uranium Region in Southern Yakutiya, *Atomic Energy*, 125, 2 , 133-138.
- [57] Prasad, M. et al., 2018, A comprehensive study of radon levels and associated radiation doses in Himalayan groundwater, *Acta Geophysica*, 66, 5, 1223-1231.
- [58] Khan, F. et al., 2018, Estimation of radon concentrations and associated radon doses by using active technique in drinking water sources of Abbottabad, KPK, Pakistan, *Indoor And Built Environment*, 27, 5, 682-689.
- [59] Ahmad, N., Jaafar, M. S., Alsaffar, M. S. (2015). Study of radon concentration andtoxic elements in drinking and irrigated water and its implications in SungaiPetani, Kedah, Malaysia. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 8(3),294-299.
- [60] Lebed, O. O. et al.,2018, Radon in the spring water of the Zdolbuniv Region, Ukraine, *Ukrainian Journal Of Ecology*, 8, 3, 83-91.

- [61] Renteria-Villalobos, M. et al., 2017, Hydrochemistry and Rn-222 Concentrations in Spring Waters in the Arid Zone El Granero, Chihuahua, Mexico, *Geosciences*, 7, 1, UNSP 12.
- [62] Fonollosa, E. et al., 2016, Radon in spring waters in the south of Catalonia. *J. Environ. Radioact.*, 151, 275–281.
- [63] Kumar, A. et al., 2017, Radon and uranium concentrations in drinking water sources along the fault line passing through Reasi district, lesser Himalayas of Jammu and Kashmir State, India, *Human And Ecological Risk Assessment*, 23, 7, 1668-1682.
- [64] Sola P. et al., 2017. Investigation of radon level in air and tap water of workplaces at Thailand Institute of Nuclear Technology, Thailand, *J. Phys.: Conf. Ser.* 860 012012.
- [65] Moldovan, M. et al., 2014, Radon and Radium Concentration in Water From North- West Of Romania And The Estimated Doses, Conference: 2nd International Conference on Radiation and Dosimetry in Various Fields of Research RAD and The 2nd East European Radon Symposium (SEERAS) Location: Nis, SERBIA Date: MAY 27-30, 2014, *Radiation Protection Dosimetry*, 162, 1-2, 96-100.
- [66] Nita, D. C. et al., 2013, Radon Concentrations in Water and Indoor Air in North-West Regions of Romania, Conference: 1st East European Radon Symposium (FERAS) Location: Cluj Napoca, Romania Date: SEP 02-05, 2012, *Romanian Journal Of Physics*, 58, S, S196-S201.
- [67] Khattak, N. U. et al., 2014, Radon concentration in drinking water sources of the region adjacent to a tectonically active Karak Thrust, southern Kohat Plateau, Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan, *Journal Of Radioanalytical And Nuclear Chemistry*, 302, 1, 315-329.
- [68] Kozłowska, B., Walencik, A., Dorda, J., 2008, Natural radioactivity and dose estimation in underground water from the Sudety Mountains in Poland, *Radiation Protection Dosimetry*, 128, 3, 331-335.
- [69] Somlai, K. et al., 2007, Rn-222 concentrations of water in the Balaton Highland and in the southern part of Hungary, and the assessment of the resulting dose, *Radiation Measurements*, 42, 3, 491-495.
- [70] Ajibola, T., Orosun, M., Lawal, W. A., Akinyose, F., & Salawu, N. (2021). Assessment of Annual Effective Dose Associated with Radon in Drinking Water from Gold and Bismuth Mining area of Edu, Kwara, North-central Nigeria. *Pollution*, 7(1), 231-240. doi: 10.22059/poll.2020.309470.892
- [71] Karataşlı. M., Turhan, Ş., Varinlioğlu, A., Yeğingil, Z.: Natural and fallout radioactivity levels and radiation hazard evaluation in soil samples. *Environ. Earth Sci.* 75–424, 1 (2016).
- [72] Damla, N., Çevik, U., Karahan, G., Tıraşoğlu, E., Kobyay, A.Ğ., Çelebi, N., 2005, “Doğu Karadeniz Bölgesi İçme Sularında 222Rn Analizi”, *Ulusal Su Günleri, Trabzon*.
- [73] Özdemir, F.B. 2006a., “Afyon ve Çevresindeki Kuyu Sularında Radon (Rn-222) Aktivitesi Tayini”, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Afyonkarahisar*. s. 93.

- [74] Kumru M.N et al. (2006), Denizli
- [75] Duran Uzun S., Küçükömeroğlu, B., Damla,N., Taşkın, H., Çelik, N., Çevik, U., Ersoy, H. 2017. Radioactivity measurements and risk assessments of spa waters in some areas in Turkey, *Isotopes in Environmental and Health Studies*, vol. 53, no. 1, 91–103.
- [76] Yamaç et al. (2018), İzmit
- [77] Koray A., Akkaya G., Kahraman A., Kaynak G. (2014) Measurements of radon concentrations in waters and soil gas of Zonguldak, Turkey, *Radiation Protection Dosimetry*, 162(3):375-81.
- [78] Bozkurt, V., Erturk, S. Evaluation of radon gas concentration in indoor air of spas and in spring water in the central Anatolia region of Turkey. *Radiat Environ Biophys* 61, 609–614 (2022). <https://doi.org/10.1007/s00411-022-00992-4>
- [79] Erdoğan, M. Manisa K., Zedef V., 2017. “Radon in Spring Water in The Region of Seydişehir of Konya Province, Turkey”, *Radiation Protection Dosimetry*, 177, 1-2, pp.194-197.
- [80] Doğan, M. et al., 2018, Investigation of radon concentrations in some reservoirs, spring and tap waters in İstanbul, Turkey, *Journal Of Radioanalytical And Nuclear Chemistry*, 315, 3, 653-660.
- [81] Baykara, O. and 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.
- [82] Yalçın, S., Gurler, O., Tarım, U.A., Incirci, F., Kaynak, G. and Gundogdu O. Measurements of radon concentration in drinking water samples from Kastamonu (Turkey). *Isotopes in Environmental and Health Studies*. 47, 438-445 (2011).
- [83] Erdoğan M. vd. (2016), Spatial distribution of ^{222}Rn concentrations and dose estimations in various waters, *Human And Ecological Risk Assessment* 2016, VOL. 22, NO. 4, 927–940.
- [84] Yakut H., Tabar E., Zenginerler Z., Demirci N., Ertugral F., "Measurement of (RN)-R-222 concentration in drinking water in Sakarya, Turkey", *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 157, 3, pp. 397-406, ISSN:0144-8420, DOI: 10.1093/rpd/nct157, DEC, 2013.
- [85] Yazar, Y., Gunaydin, T. and Kam, E. A radon survey in some regions of Turkey. *International Congress Series*. 1276, 385–386 (2000).
- [86] Tarım, U.A., Gurler, O., Akkaya, G., Kilic N., Yalçın, S., Kaynak, G. and Gundogdu O. Evaluation of radon concentration in well and tap waters in Bursa, Turkey. *Radiation Protection Dosimetry*. 150, 1-6 (2011).
- [87] Örgün, Y., Altınsoy, N., Gültekin, A. H., Karahan, G. and Çelebi, N. Natural radioactivity levels in granitic plutons and groundwaters in south-east parts of Eskisehir, Turkey. *Applied Radiation and Isotopes*. 63, 267–275 (2005).
- [88] Tabar E., Yakut H.,2014.
- [89] ICRP. 2012. International Commission on Radiological Protection 2012 Annual Report

EKLER



EK 1: (1 numaralı numune)



EK 2: (2 numaralı numune)



EK 3: (3 numaralı numune)



EK 4: (4 numaralı numune)



EK 5: (5 numaralı numune)



EK 6: (6 numaralı numune)



EK 7: (7 numaralı numune)



EK 8: (8 numaralı numune)



EK 9: (9 numaralı numune)



EK 10: (10 numaralı numune)



EK 11: (11 numaralı numune)



EK 12: (12 numaralı numune)



EK 13: (13 numaralı numune)



EK 14: (14 numaralı numune)



EK 15: (15 numaralı numune)



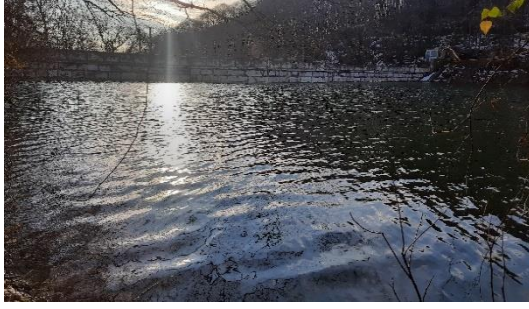
EK 16: (16 numaralı numune)



EK 17: (17 numaralı numune)



EK 18: (18 numaralı numune)



EK 19: (19 numaralı numune)



EK 20: (20 numaralı numune)



EK 21: (21 numaralı numune)



EK 22: (22 numaralı numune)



EK 23: (23 numaralı numune)



EK 24: (24 numaralı numune)



EK 25: (25 numaralı numune)



EK 26: (26 numaralı numune)



EK 27: (27 numaralı numune)



EK 28: (28 numaralı numune)



EK 29: (29 numaralı numune)



EK 30: (30 numaralı numune)



EK 31: (31 numaralı numune)



EK 32: (32 numaralı numune)



EK 33: (33 numaralı numune)



EK 34: (34 numaralı numune)



EK 35: (35 numaralı numune)



EK 36: (36 numaralı numune)



EK 37: (37 numaralı numune)



EK 38: (38 numaralı numune)



EK 39: (39 numaralı numune)



EK 40: (40 numaralı numune)



EK 41: (41 numaralı numune)



EK 42: (42 numaralı numune)



EK 43: (43 numaralı numune)



EK 44: (44 numaralı numune)



EK 45: (45 numaralı numune)



EK 46: (46 numaralı numune)



EK 47: (47 numaralı numune)



EK 48: (48 numaralı numune)



EK 49: (49 numaralı numune)



EK 50: (50 numaralı numune)

ÖZGEÇMİŞ

Adı-Soyadı : İbrahim ESER

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2009, Sakarya Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik
- **Yüksek lisans** : 2023, Sakarya Üniversitesi , Fizik, Nükleer Fizik

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- Eser I., Yakut H. ve Tabar E. (2023, 19-21, Mayıs). İstanbul'un Avrupa Yakasındaki Yüzey Sularının Radon Konsantrasyonu, Türkiye. *10. Uluslararası Mardin Artuklu Bilimsel Araştırmalar Kongresi*, Mardin, Türkiye.
- Eser, I., Yakut, H. ve Tabar, E. 2023. Radon Concentrations Of The Surface Waters In The European Side Of Istanbul, Türkiye. *10th International Mardin Artuklu Scientific Researches Conference*, Full Texts Book 978-625-367-121-1