

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SAKARYA'DAKİ YER ALTI SULARINDA RADON
KONSANTRASYONUNUN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Osman KAPTAN

Enstitü Anabilim Dalı : FİZİK

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Recep AKKAYA

Eylül 2020

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Osman KAPTAN

16.09.2020

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim süresince bilgi ve tecrübelerinden fazlasıyla yararlandığım, hiçbir konuda desteğini esirgemeyen, bu araştırmanın, tez aşamasına gelene kadar olan tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvikleriyle beni yönlendiren babacanlığını her zaman hissettiğim danışmanım sayın Prof. Dr. Recep AKKAYA'ya teşekkürü bir borç bilirim.

Danışmanım kadar kendisinden istifade ettiğim her sorumu sabırla cevaplayan ve laboratuvar çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen Doç.Dr. Hakan YAKUT'a ve yüksek lisans eğitimim süresince ders aldığım veya görüşlerinden istifade ettiğim, birbirinden değerli Fizik Bölümü öğretim üyeleri ve araştırma görevlilerine, birlikte ders aldığım öğrenci arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Eğitim sürecinin başından tezin yazılması aşamasına desteklerini bir an bile esirgemeyen, tüm stres ve gerginliklerime katlanan eşime ve çocuklarıma özellikle teşekkürlerimi sunuyorum.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	v
TABLOLAR LİSTESİ	vii
ÖZET	viii
SUMMARY	ix
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.	
KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
2.1. Radyoaktivite ve Radyasyon	4
2.2. Radyasyon Birimleri	6
2.3. Radyasyon Kaynakları	7
2.3.1. Doğal radyasyon kaynakları	8
2.3.2. Yapay radyasyon kaynakları	10
2.4. Radon ve Radon Bozunum Ürünleri	11
2.4.1. Radon	11
2.4.2. Radonun bozunum ürünleri	12
2.4.3. Sularda radon	14
2.4.4. Havada radon	15
2.4.5. Toprakta radon	15
2.5. Radon ve Sağlık İlişkisi	17

2.6. Radon ve Deprem İlişkisi	19
BÖLÜM 3.	
MATERYAL VE YÖNTEM	25
3.1. Çalışma Alanı ve Jeolojik Özellikleri	25
3.2. Materyal ve Yöntem	28
3.2.1. RAD-7 ölçüm dedektörü	28
3.2.2. RAD-7 spektrum örnekleri	31
3.2.2.1. Radon spektrumları	31
3.2.2.2. Toron spektrumları	32
3.2.3. Ölçümün yapılışı	33
BÖLÜM 4.	
DENEYSEL SONUÇLAR	37
4.1. Ölçülen Radon Aktiviteleri ve Hesaplanan Efektif Dozlar	37
4.2. Suların Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi	48
BÖLÜM 5.	
SONUÇ	52
KAYNAKLAR	54
ÖZGEÇMİŞ	60

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

^{220}Rn	: Toron
^{222}Rn	: Radon
Bq	: Becquerel
Ci	: Curie
DCF	: Düzeltme Faktörü
EPA	: United States Environmental Protection Agency
IAEA	: International Atomic Energy Agency
ICRP	: International Commission on Radiological Protection
KAFZ	: Kuzey Anadolu Fayı Zonu
lt	: Litre
MeV	: Mega elektron volt
MKS	: Meter, Kilogram, Second
mSv	: Milisievert
ppm	: Milyonda bir
R	: Röntgen
SI	: International System of Unit
TAEK	: Türkiye Atom Enerjisi Kurumu
Th	: Toryum
U	: Uranyum
UNSCEAR	: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atom Radiation
vd	: Ve diğerleri
WHO	: World Health Organization
α	: Alfa
β	: Beta
γ	: Gama

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Radyasyonun sınıflandırılması	5
Şekil 2.2. Alfa, beta ve gama radyasyonlarının farklı maddelerden geçişi.....	6
Şekil 2.3. Günlük hayatta karşılaşılan radyasyon kaynakları	8
Şekil 2.4. İnsanların maruz kaldıkları doğal radyasyon kaynaklarının oransal dağılımı	9
Şekil 2.5. İnsanların maruz kaldıkları yapay radyasyon kaynaklarının oransal dağılımı	11
Şekil 2.6. Uranyum (238) bozunma zinciri tablosu	13
Şekil 2.7. Toprağın radon geçirgenliği.....	16
Şekil 2.8. Polonyum 218'in akciğerlerde birikmesiyle DNA sarmalında hasar oluşması	18
Şekil 2.9. Deprem öncesin bazı fiziksel parametrelerde görülen değişimler.....	20
Şekil 3.1. Sakarya ili ve ilçeleri lokasyon haritası	26
Şekil 3.2. Araştırma sahası jeoloji haritası.....	28
Şekil 3.3. RAD-7 katı hal radon dedektörünün şematik çizimi	29
Şekil 3.4. RAD7 katıhal dedektörünün kullanımı ve numunelerin köpürtülmesine ait anlık görüntü	30
Şekil 3.5. Radon spektrum örnekleri.....	31
Şekil 3.6. Toron spektrum örnekleri	32
Şekil 3.7. Yer altı kaynak suyu alınan noktaları gösterir harita	34
Şekil 3.8. Kaynak sularından numune alınan iki noktaya ait örnek görüntü ve koordinatları gösterir QR kodları.....	35
Şekil 3.9. Numune alınması esnasında kullanılan şişelerde kullanılan etiket örnekleri	36
Şekil 3.10. Yer altı kaynak sularından alınıp laboratuvara getirilmiş numunelere ait görüntü	36

Şekil 4.1. Ölçülen radon konsantrasyon değerleri grafiği.....	41
Şekil 4.2. İncelenen numunelerin fay hattına uzaklıklarını gösterir grafik.....	42
Şekil 4.3. Sakarya ili yeraltı kaynak sularından alınan numunelerin radon gazı yoğunlukları	43
Şekil 4.4. Yetişkin, çocuk ve bebekler için hesaplanan yıllık efektif dozların grafikleri.....	47
Şekil 4.5. Ölçülen pH değerleri grafiği	50
Şekil 4.6. Ölçülen ORP değerleri grafiği	51
Şekil 4.7. Ölçülen EC değerleri grafiği.....	51



TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. Radyasyon birimleri (TAEK, 2020b).	7
Tablo 2.2. Toryum, Uranyum ve Aktinyum bozunma serileri.....	12
Tablo 2.3. Su kaynaklarının ortalama radon konsantrasyon değerleri ve kullanım oranları	14
Tablo 2.4. Türkiye’de deprem ve radon ilişkisine yönelik yapılan araştırmalar	21
Tablo 4.1. İncelenen numunelere ait koordinat, rakım ve kaynak türü bilgileri.....	38
Tablo 4.2. İncelenen numunelere ait alınma ve ölçüm tarihleri ile DCF bilgileri	39
Tablo 4.3. İncelenen numunelere ait düzeltme faktörleri eklenmiş (HC+DCF) deneysel sonuçlar tablosu.....	40
Tablo 4.4. İncelenen numunelerin fay hattına olan uzaklıkları.....	42
Tablo 4.5. Bu alışma ile diğer ülkelerde ve illerimizde yapılan çalışmalarının kıyaslanması.....	44
Tablo 4.6. İncelenen numunelerin tüketilmesiyle insanların maruz kalacağı yıllık etkin dozlar.....	45
Tablo 4.7. Farklı su konsantrasyonları için bulunan yıllık etkin dozların kıyaslanması.....	48
Tablo 4.8. İncelenen numunelerin belirlenen fiziksel (pH, EC, ORP) zellikleri	49

ÖZET

Anahtar kelimeler: Radon, RAD-7 ölçüm dedektörü, Sakarya, yer altı suları, aktivite.

Bu çalışmanın amacı, Sakarya'daki yer altı su kaynaklarından alınan su örneklerinde bulunan radon konsantrasyon değerlerinin ölçülerek, kullanım amaçlarına göre bölge halkı üzerinde doğurabileceği radyolojik etkilerin ve risklerin değerlendirilmesidir. Bu amaç doğrultusunda yapılan çalışmada; Sakarya iline ait 16 ilçedeki 175 mahalle muhtarı ile görüşülerek 35 farklı yer altı kaynak suyu belirlenmiş ve tespit edilen noktalardan su örnekleri alınarak sulara çözünmüş olan radon (^{222}Rn) gazının aktivitesi RAD-7 elektronik radon dedektörü kullanılarak ölçülmüştür.

Araştırma kapsamında Sakarya iline ait 35 farklı noktadan cam şişeler ile alınan numuneler laboratuvar ortamında incelenmiş ve radon konsantrasyon miktarları 0,1-62,4 Bq/L arasında ölçülmüştür. Tüm ildeki ölçüm sonuçlarının ortalaması ise 21,6 Bq/L olarak bulunmuştur.

Araştırmada elde edilen sonuçların, Dünya Sağlık Örgütü (WHO)'nün 100 Bq/L olarak belirlediği limit ile kıyaslandığında, sağlık açısından sorun teşkil etmeyecek aralıkta olduğu görülmüştür. Ancak Çevre Koruma Acentesi (EPA)'nin 11 Bq/L olarak belirlediği limitler ile kıyaslandığında 23 adet numunenin limiti aştığı görülmüştür. Çalışmada elde edilen veriler kullanılarak bu suların tüketilmesinden kaynaklı dozlar da hesaplanmış, insan vücuduna giren radonun sebep olduğu yıllık etkin doz miktarları ortalamaları; yetişkinler için $38 \mu\text{Svy}^{-1}$, çocuklar için $39 \mu\text{Svy}^{-1}$ ve bebekler için ise $74 \mu\text{Svy}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan değerlerin Birleşmiş Milletler Atomik Radyasyonun Etkileri Bilimsel Komitesi (UNSCEAR)'nin belirlemiş olduğu $100 \mu\text{Svy}^{-1}$ lık değerinin altında kaldığı görülmüştür. Ayrıca ölçülen radon konsantrasyonları ve bulunan yıllık etkin doz eşdeğerlerinin diğer illerde ve dünyanın çeşitli yerlerinde yapılan araştırmalarla kıyaslandığında anormal sonuçlar vermediği tespit edilmiştir.

INVESTIGATION OF RADON CONCENTRATION IN GROUNDWATER IN SAKARYA

SUMMARY

Keywords: Radon, RAD-7 measurement detector, Sakarya, groundwater, activity

The aim of this study is to measure the radon concentration values in the water samples taken from the groundwater water sources in Sakarya and to evaluate the radiological effects and risks that may arise on the people of the region according to their intended use. In the study conducted for this purpose, 35 different underground spring waters were identified by interviewing 175 neighborhood headmen in 16 districts of Sakarya, and the activity of the radon (^{222}Rn) gas dissolved in the water was measured using the RAD-7 electronic radon detector.

Within the scope of the research, samples taken with glass bottles from 35 different locations in Sakarya were examined in a laboratory environment and the radon concentration amounts were measured between 0,1-62,4 Bq/L. The average of the results obtained from the whole province was calculated as 21,6 Bq/L.

When compared with the limit set by the World Health Organization as 100 Bq/L, it was seen that the results obtained in the research are within the range that will not constitute a problem in terms of health. However, when the results obtained were compared with the limits set by the Environmental Protection Agency as 11 Bq/L, 23 samples were found to exceed the limit. Dosages resulting from the consumption of these waters were also calculated using the data obtained in the research. Accordingly, the average annual effective dose amount caused by radon entering the human body is calculated as follows: $38 \mu\text{Svy}^{-1}$ for adults, $39 \mu\text{Svy}^{-1}$ for kids and $74 \mu\text{Svy}^{-1}$ for babies. It was observed that calculated values are below $100 \mu\text{Svy}^{-1}$ determined by United Nations Scientific Committee on the Effects of Atom Radiation (UNSCEAR). In addition, it was found that the measured radon concentrations and the annual effective dose equivalents found did not give abnormal results when compared to the researches conducted in other provinces and around the world.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Radyasyon en genel anlamıyla farklı ortamlarda ilerleyebilen enerji türü olarak tanımlanabilir. Bu tanımdan yola çıkarak; doğal ya da suni kararsız çekirdeklerin, kararlı olmaya çalışmaları esnasında, Alfa(α), Beta(β) gibi parçacıklar veya elektromanyetik dalgalar (foton) yayımlamalarına “radyasyon” denir. Kâinatın oluşumu ve devamında yaşamın başlamasıyla birlikte, tüm canlıların çeşitli biçimlerde radyasyon ile etkileşim halinde olduğu bilinen bir gerçektir. Bu etkileşim; güneş başta olmak üzere, yıldızlar ve diğer galaksilerden yayınlanan kozmik ışınlarla veya doğada bulunan radyoaktif maddelerle ya da yapay radyoaktivite kaynakları ile olabilmektedir. Dolayısıyla insanlar etkisiyle oluşmuş olan radyasyon kaynaklarını yapay, doğada kendiliğinden bulunabilen kaynakları ise doğal radyasyon olarak ifade etmek mümkündür.

Dünyanın oluşumundan bu yana insanların maruz kaldığı doğal radyasyonun keşfi, 1896 yılında Fransız bilimci Henri Becquerel tarafından yapılan bir çalışmada uranyum tuzunun yayımladığı radyasyonun karanlıktaki fotografik bir levha üzerinde bıraktığı izlerin farkedilmesiyle gerçekleşmiştir. Radyasyon, yaptığı etki açısından “iyonlaştırıcı” ve “iyonlaştırıcı olmayan” radyasyon olarak iki şekilde incelenmektedir. Doğal kaynakların ortaya çıkardığı iyonlaştırıcı radyasyonun hücrelere nüfuz ederek çeşitli hasarlara neden olduğu bilinmektedir (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), 2018: 1-2).

İnsanlar yaşadıkları ortamlarda devamlı olarak radyasyona maruz kalabilmektedir. Maruz kalınan bu radyasyondaki en büyük pay ise doğal radyonüklidlerden oluşmaktadır. Dünya genelinde insanların maruz kaldığı radyasyonun %85’inin doğal kaynaklı olduğu belirtilmektedir. Radyonüklidler solunum yoluyla insan vücuduna girerek insan sağlığı açısından önemli riskler teşkil etmektedirler. Radyonüklidlere

yönelik yapılan araştırmalar, alınan radyasyon dozundaki en büyük katkının radon ve kısa yarı ömürlü bozunma ürünlerinden oluştuğunu göstermektedir. Dünyadaki doğal radyasyonun yarıya yakınının, her yerde bulunabilen ve radyoaktif bir soy gaz olan radondan kaynaklandığını söylemek mümkündür (Rahman, Rafique ve Matiullah, 2009: 424).

Alman fizikçi Friedrich Ernest Dorn tarafından 1900 yılında keşfedilen radon, renksiz, kokusuz, tatsız, gözle görülmeyen ve radyoaktif bir gazdır. İçerisinde Helyum, Argon, Neon, Ksenon ve Kripton bulunan soygazlar ailesinden olan radon, alfa parçacıkları yaymaktadır (United States Environmental Protection Agency (EPA), 2020). Radon gazının insanların maruz kaldığı doğal radyasyonun önemli bir bölümünü oluşturuyor olması, bu gazın ölçümlerine yönelik çalışmaları önemli kılmaktadır.

İnsanların maruz kaldığı radyasyon dozunun hesaplanabilmesi için, öncelikle doğal radyoaktivitenin incelenmesi gerekmektedir. Bu bağlamda bir bölgenin veya bir sahanın doğal radyoaktivitesini belirleyebilmek için, o bölgeye veya sahaya ait toprağın, suyun ve havanın doğal radyoaktivite düzeyinin ölçülerek belirlenmesi gerekir (Karahana, 1997: 1). Doğal radyasyon, canlılığın devam edebilmesi için gerekli olan, teneffüs edilen havada, içilen sularda ve tüketilen gıdalarda bulunabilmektedir. Su insanların ve diğer tüm canlıların en temel ihtiyacıdır. Az miktarlarda bile Uranyum içeren toprak ve kayaçlar, yüzey ve yer altı sularıyla etkileşime girdiğinde içtiğimiz ve kullandığımız sularda radonla karşılaşmamız sürpriz olmayacaktır. Suyun sindirilmesinden ve sudan alınan radon ve radon bozunum ürünlerinin solunmasından ve tüketilmesinden dolayı akciğer ve mide kanseri riski ortaya çıkabilir. Bu nedenle içme ve kullanma sularının radon konsantrasyonlarının belirlenerek Ulusal ve Uluslararası üst limitlerle karşılaştırılıp sağlık riski açısından değerlendirilmesi önem arz etmektedir.

Bu çalışmanın amacı; Sakarya'daki yer altı sularından alınan su örneklerinde bulunan radon konsantrasyon değerlerinin ölçülerek, kullanım amaçlarına göre bölge halkı üzerinde doğurabileceği radyolojik etkilerin ve risklerin değerlendirilmesidir. Bu amaç doğrultusunda yapılan çalışmada; Sakarya iline ait 16 ilçedeki 175 mahalle muhtarı ile

görüülerek 35 farklı yer altı kaynak suyu tespit edilmiş ve belirlenen noktalardan su örnekleri alınarak sularda çözünmüş olan radon (^{222}Rn) gazının aktivitesi RAD-7 elektronik radon dedektörü kullanılarak ölçülmüştür. Araştırma sahası Türkiye'nin Kuzey Anadolu Fayı Zonu (KAFZ) üzerinde bulunan yerler olduğundan söz konusu sulara radon takibinin düzenli yapılması önemli bir gerekliliktir. Ayrıca doğal kaynak sularının şişelenerek milyonlarca insanın tüketimine sunulduğu dikkate alındığında, sulardaki radon konsantrasyonlarına yönelik yapılan çalışmaların önem arz ettiği değerlendirilmektedir.

Bu bağlamda çalışmanın kaynak araştırması bölümünde konuyla ilgili literatür taranarak ilgili teorik kısım ortaya konmuştur. Buna göre öncelikle radyoaktivite, radyasyon, radyasyon birimleri ve radyasyon kaynakları açıklanmıştır. Ardından radon ve radon bozunum ürünleri ele alınarak suda, havada ve toprakta radon konuları incelenmiş ve radonun insan sağlığı ve deprem ile ilişkisi ortaya konmuştur. Çalışmanın sonraki bölümünde; çalışma alanı ve jeolojik özellikleri açıklanmış ve ölçümlerde kullanılan RAD-7 cihazına ve ölçümlere ilişkin bilgiler verilerek materyal ve yöntem ortaya konmuştur. Ardından çalışmanın deneysel sonuçları kapsamında; ölçülen radon aktiviteleri ve hesaplanan efektif dozlar ortaya konmuş, ayrıca suların fiziksel özellikleri incelenmiştir. Son olarak yapılan araştırmadan elde edilen bulgular değerlendirilerek çalışma tamamlanmıştır.

BÖLÜM 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

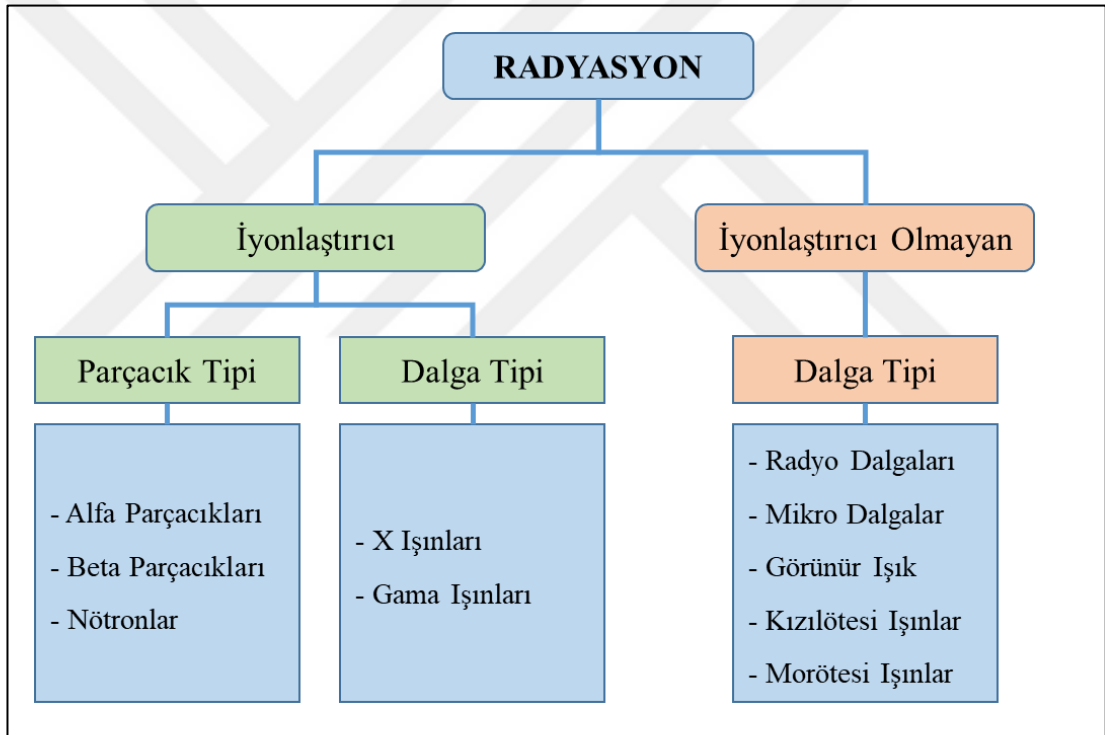
2.1. Radyoaktivite ve Radyasyon

İlk defa 1896 yılında Fransız Fizikçi Henry Becquerel tarafından keşfedilen radyoaktivite; atom çekirdeğinin ışın ya da parçacık çıkarıp kararsız halden daha kararlı bir atom çekirdeğine dönüşmesi olarak tanımlanan, yavaşlatılamaz, kontrol edilemez ve durdurulamaz bir olaydır (Gündoğan, 2016). Kararsız yapıya sahip atom çekirdeklerinin bozunmalarla kararlı yapıya geçme eğiliminde oldukları görülmektedir. Çekirdeğin kararlılığı konusunda bilgi alabilmek için çekirdekte mevcut nötron (n) ve proton (p) oranına bakılır. Genel olarak n/p oranı 1,5'den az olan çekirdekler kararlı ya da az kararlı; n/p oranı 1,5'un üzerinde olan çekirdekler ise kararsız kabul edilmektedir (International Atomic Energy Agency (IAEA), 2004). Bozunum geçiren radyoizotopun doğada bulunması ya da doğadaki diğer radyoizotopların bozunması sonucu ortaya çıkması doğal radyoaktiflik; radyoizotopun yapay olarak insan tarafından üretilmesi ise yapay radyoaktiflik olarak ifade edilmektedir (Özden, 1977).

Yeni Zelandalı-İngiliz ünlü deneysel fizikçi Ernest Rutherford, radyonüklidlerin bozunması esnasında yayımlanan radyasyonu; alfa (α), beta (β) ve gama (γ) radyasyonları olacak şekilde üç tipte sınıflandırmıştır. İnsanların günlük hayatlarında karşılaştıkları radyasyon kaynaklarından bazıları; güneş ışınları, radyo dalgaları, endüstri ve sağlık alanlarında kullanılan X ışınları olarak gösterilebilir (TAEK, 2020a). Radyasyon, "iyonlaştırıcı" ve "iyonlaştırıcı olmayan" olmak üzere ikiye ayrılır (İlhan, 2015):

- a. İyonlaştırıcı radyasyon: Maddeyle etkileşimi sonucunda maddeye ait atomlardan elektron koparabilecek enerjiye sahip olan radyasyonlardır. Alfa, beta, gama ve X ışınları iyonlaştırıcı radyasyonlardır.
- b. İyonlaştırıcı olmayan radyasyon: Maddeyle etkileşimi sonucunda maddeye ait atomlardan elektron koparamayacak kadar enerjiye sahip olan radyasyonlardır. Televizyon ve radyo dalgaları, mikro dalgalar, baz istasyonu dalgaları, cep telefonu dalgaları iyonlaştırıcı olmayan radyasyonlardır.

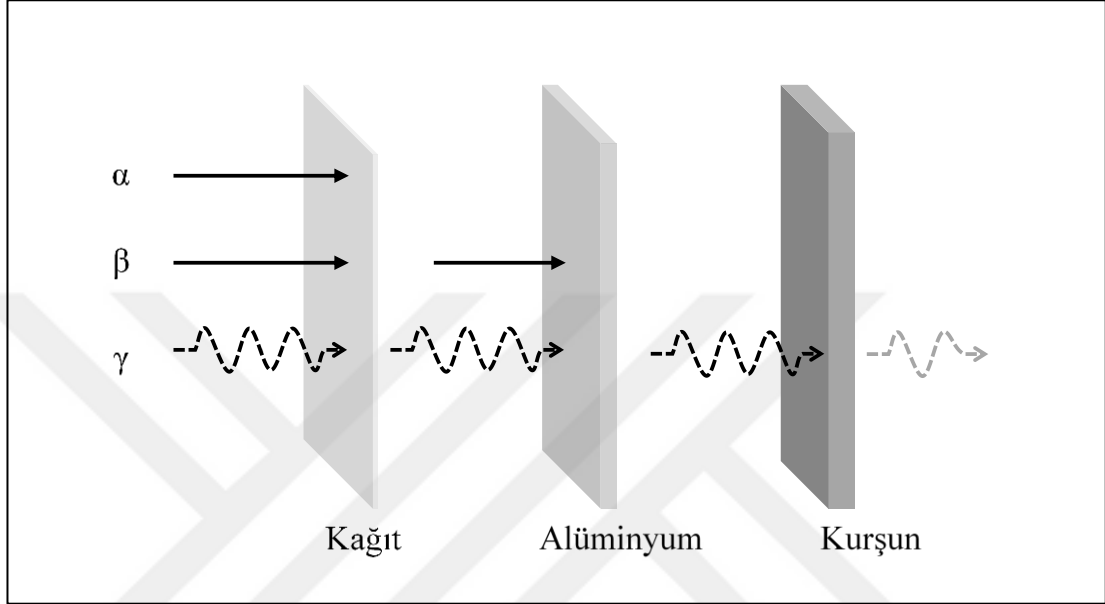
Radyasyon iyonize edebilme yeteneğine göre Şekil 2.1.'de gösterildiği gibi sınıflandırılmaktadır.



Şekil 2.1. Radyasyonun sınıflandırılması (Sabol ve Weng, 1995: 12; Krane 2001: 404).

Radyasyon yayımının ardından içinden geçtiği madde ile etkileşir. Alfa, beta ve gama radyasyonlarının farklı maddelere ilişkin geçişleri Şekil 2.2.'de gösterilmiştir. Buna göre, Alfa salınımı canlılara çok fazla zarar vermez. Genelde kâğıt veya benzer bir madde bu parçacığı durdurur. Canlı organizmaya işleyemez. Ancak solunum veya beslenme yoluyla vücuda alınması halinde tesirli olabilir. Beta salınımı canlılarda veya organik maddelerde birkaç santim kadar işleyebilir. Durdurmak için ince alüminyum

tabaka benzeri hedefler olmalıdır. Canlı organizmalara kalıcı zararlar verebilir. Gama salınımı ise canlılar açısından en zararlı kabul edilen radyasyondur. Durdurmak için kalın kurşun malzemeler kullanılır. Canlının vücudunda fazlaca yol alabilir. Kalıcı zararlar verir.



Şekil 2.2. Alfa, beta ve gama radyasyonlarının farklı maddelerden geçişi (Hacıosmanoğlu, 2013: 11).

2.2. Radyasyon Birimleri

Radyasyonun fiziksel etkilerinin anlamlı bir biçimde tanımlanabilmesi için bazı birim ve büyüklüklere ihtiyaç duyulmaktadır. İyonlaştırıcı radyasyonun etkisi geçtiği ortamda oluşturduğu iyonlaşmaya, iyonlaşma ise soğurulan radyasyonun enerjisine bağlıdır. Radyasyon birimleri olarak ilk başta Uluslararası Radyasyon Birimleri Komitesi (ICRU) tarafından (Gollnick, 1988);

- Aktivite için Curie (Ci),
- Işınlama için Röntgen (R),
- Soğurulan doz için rad,
- Biyolojik doz eşdeğeri için rem

birimleri tanımlanmıştır. Ancak MKS (Meter, Kilogram, Second) sistemini esas alan Uluslararası Birimler Sistemi (International System of Unit-SI)'nin kabul edilmesiyle

birlikte eski birimlerin yerine 1971’de ICRU tarafından; “Becquerel (Bq), Röntgen (R), Gray (Gy), Sievert (Sv)” birimleri kabul edilmiştir. Eski ve yeni radyasyon birimleri arasındaki ilişki Tablo 2.1.’de gösterilmiştir.

Tablo 2.1. Radyasyon birimleri (TAEK, 2020b).

Büyüklik	Eski Birim	SI Birimi	Dönüşüm Faktörü
Aktivite	Curie (Ci)	Becquerel (Bq)	1Ci= 3,7x10 ¹⁰ Bq
Işınlama	Röntgen (R)	Coulomb/kg (C/kg)	1C/kg= 3876 R
Soğurulan doz	Rad (rad)	Gray (Gy)	1Gy= 100 rad
Biyolojik doz eşdeğeri	Rem (rem)	Sievert (Sv)	1Sv= 100 rem

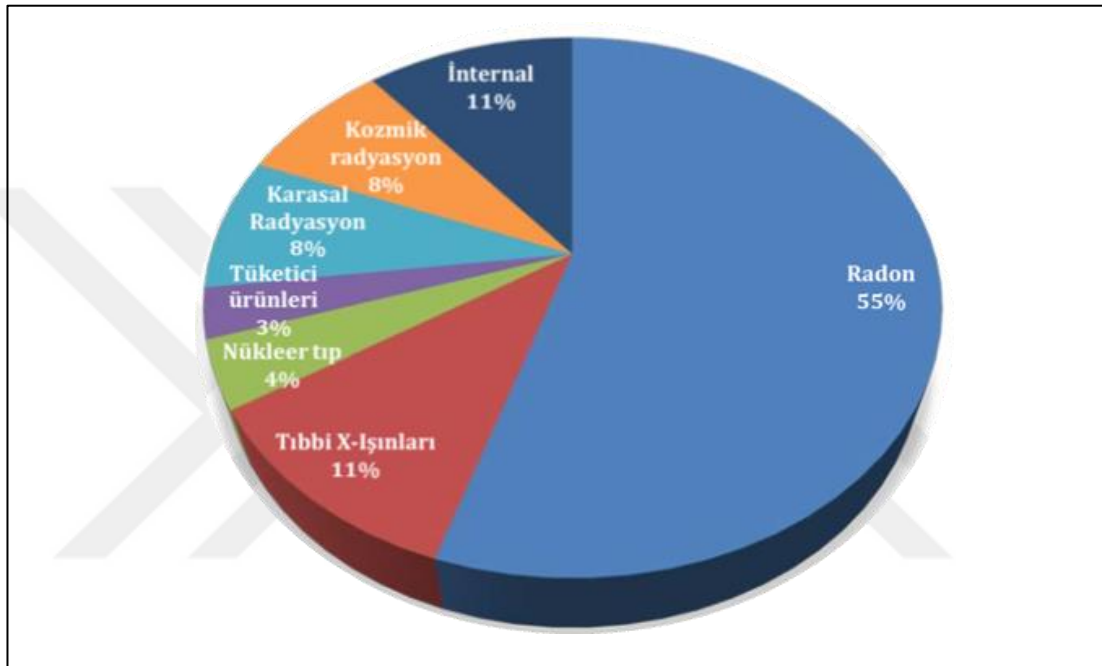
Tablo 2.1.’de yer alan radyoaktivite birimleri incelendiğinde;

- Aktivite birimi Becquerel; saniyede bir bozunma meydana getiren herhangi bir radyoaktif madde miktarını ifade etmektedir. Genel olarak büyük aktiviteye sahip radyasyonlar için Curie (Ci), küçük olanlar için ise Becquerel (Bq) birimi kullanılır (Turner, 2007).
- Işınlama birimi; hava kütlesi içerisinde meydana gelen iyonizasyonu ifade eder. Yeni birim sisteminde ışınlama birimi için özel bir isim belirlenmemiştir ve Coulomb/kg olarak ifade edilmektedir (Çelebi, 1995).
- Soğurulan doz birimi; her tür ve ortam için iyonlaştırıcı radyasyonları, diğer bir deyişle radyasyonla ışınlanan bir maddenin birim miktarındaki soğurulan radyasyon enerjisini ifade etmektedir (IAEA, 1980). Yeni birim sistemine göre Gray (Gy) olarak belirlenen soğurulan doz birimi; 1 kg’lık bir maddeye 1 Joule (J)’lük enerji veren herhangi bir iyonlaştırıcı radyasyonun dozunu gösterir.
- Biyolojik doz eşdeğeri birimi; radyasyonun biyolojik etkilerine bağlı olarak tanımlanan birim rem’i ifade eder. Doz eşdeğeri organlarda ve dokuda birim kütlede soğurulan enerji miktarları ile orantılı bir değerdir.

2.3. Radyasyon Kaynakları

İnsanlar soludukları havadan, içtikleri sudan, yedikleri besinlerden veya temas ettikleri nesnelere kaynaklı olarak çeşitli şekillerde iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalmaktadırlar. İnsan vücuduna nüfuz eden doğal ve yapay radyasyon düzeyi ülkelerin

teknolojiyi kullanma ve gelişmişlik seviyelerine bağlı olarak değişmektedir. Bununla birlikte yapılan araştırmalar, insanların yaşamlarını geçirdikleri mekânın fiziksel şartlarına, yaşadıkları bölgenin yapısına ve yaşam standartlarına göre kişi başı yıllık ortalama 2,7 mSv radyasyon dozuna maruz kaldığını göstermektedir. ICRP (2009) verilerine göre bir insanın günlük hayatında maruz kaldığı radyasyon kaynakları ve yıllık etkin doz katkı payları Şekil 2.3.'te gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Günlük hayatta karşılaşılan radyasyon kaynakları (ICRP, 2009)

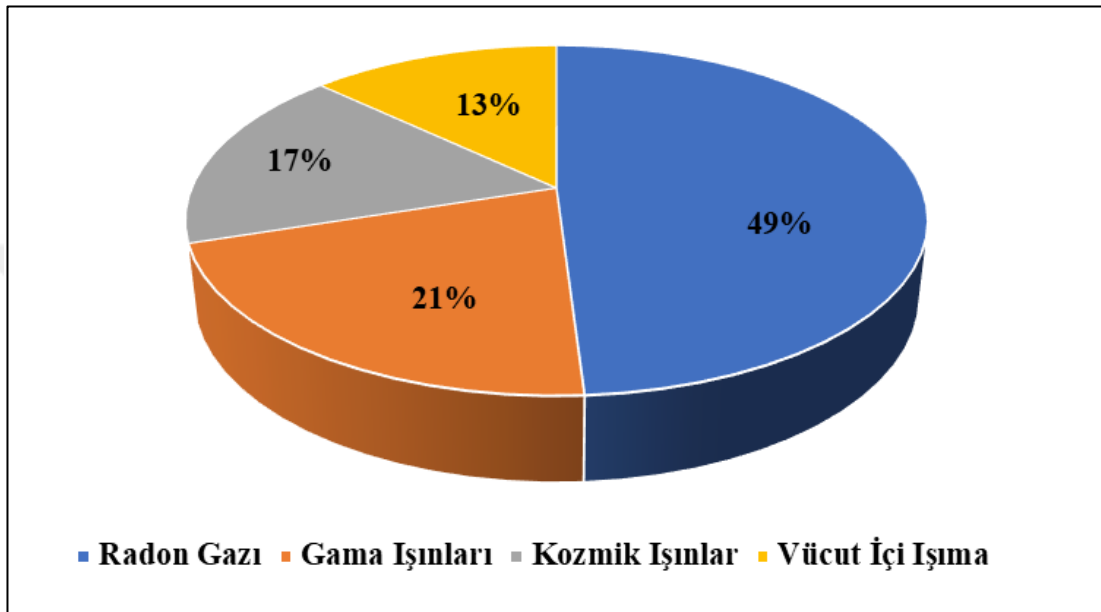
Çalışmanın bu kısmında radyasyon kaynakları doğal ve yapay kaynaklar olarak iki başlık altında incelenecektir.

2.3.1. Doğal radyasyon kaynakları

Tüm canlılar milyonlarca yıldır evrenden yayılan kozmik ışınların ve yerküredeki doğal radyoaktif maddelerin radyasyonuna maruz kalmaktadır. Dolayısıyla tüm canlıların varoluşlarından bu güne devamlı olarak doğal radyasyonla iç içe yaşadığını söylemek mümkündür. İnsan vücudunun sindirim ve solunum yollarından su, hava, besin vb. şekillerde içine aldığı radyoaktif maddeler zamanla organlarda birikmektedir. Bunlara ilaveten yerküredeki doğal radyoaktif maddeler ile kozmik

ışınların da vücuda nüfuz ettiği dikkate alındığında, insan vücudunun içten ve dıştan doğal radyasyon kaynaklarına maruz kaldığı görülmektedir (TAEK, 2017).

Dünya genelinde doğal radyasyon kaynaklarından dolayı maruz kalınan radyasyon dozlarının oransal değerleri Şekil 2.4.'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4. İnsanların maruz kaldıkları doğal radyasyon kaynaklarının oransal dağılımı (TAEK, 2017)

Doğal radyasyondan kaynaklanan ortalama yıllık etkin dozun yaklaşık 2,4 mSv olduğu ve bu dozun bazı ülkelerde ise 10 mSv'in üzerine çıktığı belirtilmektedir. Şekil 2.4. incelendiğinde insanların maruz kaldıkları doğal radyasyonun aşağıda açıklanan iki temel kaynağa dayandığı görülmektedir (TAEK, 2017):

- Dünya atmosferine uzaydan gelen yüksek enerjili kozmik ışınlar ait parçacıklar: Bu parçacıkların çoğunluğunu atmosfere ulaşan protonlar oluşturmaktadır. Güneş patlamalarına, yer küreden yüksekliğe ve yerin manyetik alanına göre kozmik ışınların yoğunluğu değişmektedir. Protonların atmosfere ulaştıktan sonra dünyanın manyetik alanı etkisine girmesi nedeniyle kozmik ışın yoğunluğu, ekvatoran kutuplara doğru artar. Dolayısıyla enlem arttıkça insanların maruz kaldığı radyasyon da artar. Ayrıca kozmik ışınların yoğunluğu deniz seviyesine yaklaşıldıkça azalır. Bunun yanı sıra kozmik ışın kaynaklı yer seviyesindeki yıllık etkin doz, enlem ve yükseklikle birlikte

değişse de UNSCEAR'un verilerine göre bu miktar yaklaşık 0,46 mSv/yıl olarak belirtilmektedir.

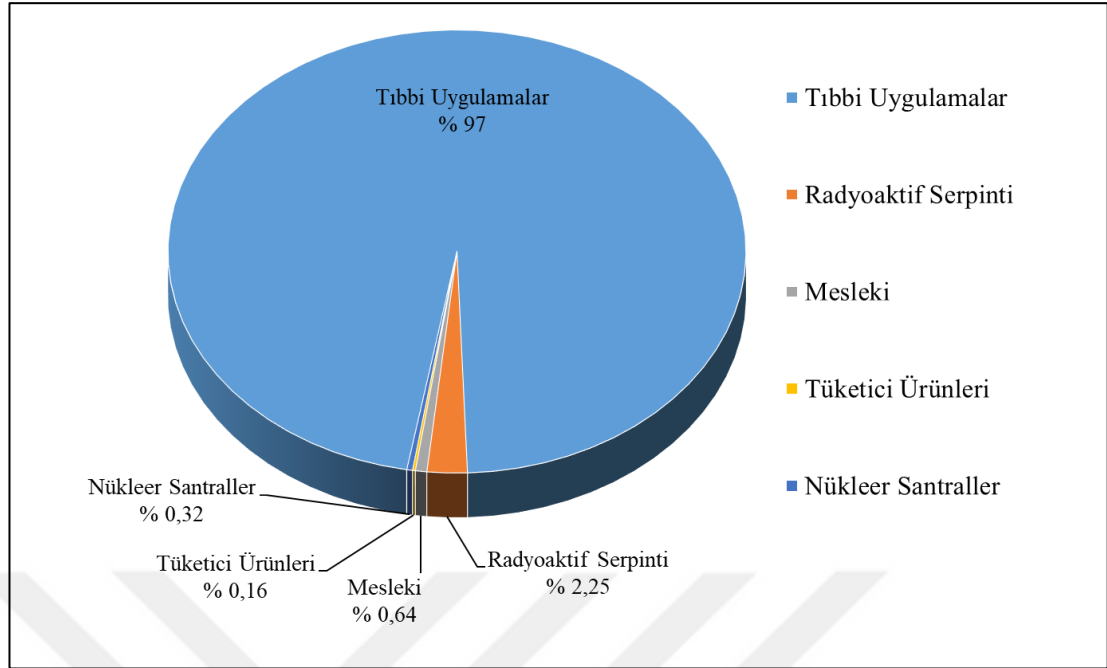
- b. Yer kabuğundaki (toprak, su, hava, bitkiler, diğer canlılar) doğal radyoaktif izotoplar: İnsan vücudunun yeryüzü kaynaklı maruz kaldığı doğal radyasyonun başlıca sebebi U-238 ve Th-232 serilerinden (bozunum ürünleri de dahil) ve K-40 radyoizotoplarından oluşan gama ışınlarıdır. U-238 bozunma serisinde ortaya çıkan ilk ürünler arasında yer alan radon radyoizotopu (Rn-222) ise atmosfere dağılarak alfa bozunmaya devam eder. Doğal gama ışınlarından alınan yıllık toplam etkin dozun yaklaşık 0,48 mSv olduğu belirtilmektedir.

2.3.2. Yapay radyasyon kaynakları

Günümüzde yüksek yaşam standartlarının sağlanmasında gelişmiş endüstriyel ekonomilerce doğada mevcut radyasyon kaynaklarının kullanılması bir zorunluluk haline gelmiştir. Teknolojide yaşanan ilerlemeler birçok alandaki işlerin daha iyi, kolay, hızlı, basit ve düşük maliyetli olmasını sağlamak açısından bazı radyasyon kaynaklarının yapay yollardan üretilmesini gerekli kılmaktadır. Yapay radyasyon kaynakları getirdiği kolaylıklarla birlikte, doğal radyasyon kaynaklarında olduğu gibi insanların belli dozlarda radyasyona maruz kalmasına sebep olmaktadır. Tabii bu dozlar doğal radyasyon kaynaklarıyla kıyaslandığında daha düşüktür. Yapay radyasyon kaynaklarından başlıcaları aşağıda sıralanmıştır (TAEK, 2020c):

- a. Tıbbi, endüstriyel ve tarımsal maksatlarla kullanılan X ışınları,
- b. Yapay radyoaktif maddeler,
- c. Nükleer bomba çalışmaları sonucunda ortaya çıkan nükleer serpintiler,
- d. Az miktarda da olsa nükleer güç üretimi esnasında salınan radyoaktif maddeler,
- e. Bazı tüketim ürünlerinde kullanılan radyoaktif maddelerdir.

IAEA verilerine göre yapay radyasyon kaynaklarının oluşturduğu küresel radyasyon dozu oranları Şekil 2.5.'te gösterilmiştir. Buna göre yapay radyasyonların tamamına yakınının tıbbi uygulamalardan kaynaklandığı anlaşılmaktadır.



Şekil 2.5. İnsanların maruz kaldıkları yapay radyasyon kaynaklarının oransal dağılımı (IAEA, 1996)

2.4. Radon ve Radon Bozunum Ürünleri

Çalışmanın bu bölümünde radon gazı ve bozunum ürünleri konusu açıklanarak radonun sulara, havada ve topraktaki varlığı incelenecektir.

2.4.1. Radon

Alman Fizikçi Friedrich Ernst Dorn tarafından 18. yüzyıl başlarında keşfedilen radon, 1923 yılına kadar “niton” ismiyle anılmış ve radyumdan sonra keşfedildiğinden dolayı “radon” ismini almıştır. Radon, ^{238}U bozulma zincirinde ^{226}Ra 'nın bozulmasıyla devamlı olarak meydana gelen ve bozunum süresince doğal olarak oluşmaktadır. Radon gazı diğer kimyasal elementler ile reaksiyona girmeyen kokusuz ve renksiz asal bir gazdır (Kumar vd., 2008: 508). Radon'un ağırlığı havadan 7,5 kat, hidrojenen ise 100 kat fazladır. Radon $-62\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de sıvılaşır, $-71\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de ise donmaktadır. Atomik yarıçapı $1,3 \times 10^{-10}\text{ m}$, atomik kesit alanı $0,72 \times 10^{-10}\text{ cm}^2$ 'dir. Radon'un yoğunluğu, 1 atmosfer basınçta 9,73 gr/L, 273 $^{\circ}\text{K}$ 'deki molar hacmi 50,5 cm^3/mol , öz ısısı ise 0,091 J/grK'dır. Isıl iletkenliği 0,0000364 W/cmK olarak çok düşük olan radonun elektrik iletkenliği yoktur (NCRP, 1988: 174).

2.4.2. Radonun bozunum ürünleri

Radon gazı ve bozunma ürünlerinin temel kaynağı yerküredir. Yerkürede bulunma miktarı ise yeryüzünün jeolojik yapısı ile ilişkilidir. Dünyada yaklaşık 100 ton radon olduğu tahmin edilmektedir. Radon ve ürünlerinin en önemli başlıca kaynakları; toprak ve kayalar, su (yeraltı suyu %18.5, şebeke suyu %0.5), yapı malzemeleri (%2,5) ile hava (%9.2)'dir (Örgün ve Çelebi, 2018). Uranyum ve toryum elementlerinin bozunması ile oluşan radyum ve radyumun bozunması ile meydana gelen radon doğal radyoaktif elementlerdendir. Radyoaktif kayalar çevresel faktörlere bağlı olarak zaman içerisinde küçük parçalara ayrılarak yağmur, yer altı suları ya da akıntı suları ile toprağa geçer. Radyoaktivitenin toprakta kalma ya da diğer ortamlara geçme süresi, toprağın jeolojik, kimyasal ve fiziksel yapısına, bulunduğu bölgenin meteorolojik koşullarına ve radyoaktif çekirdeğin kimyasal oluşumuyla ilgilidir (Tufaner, 2005).

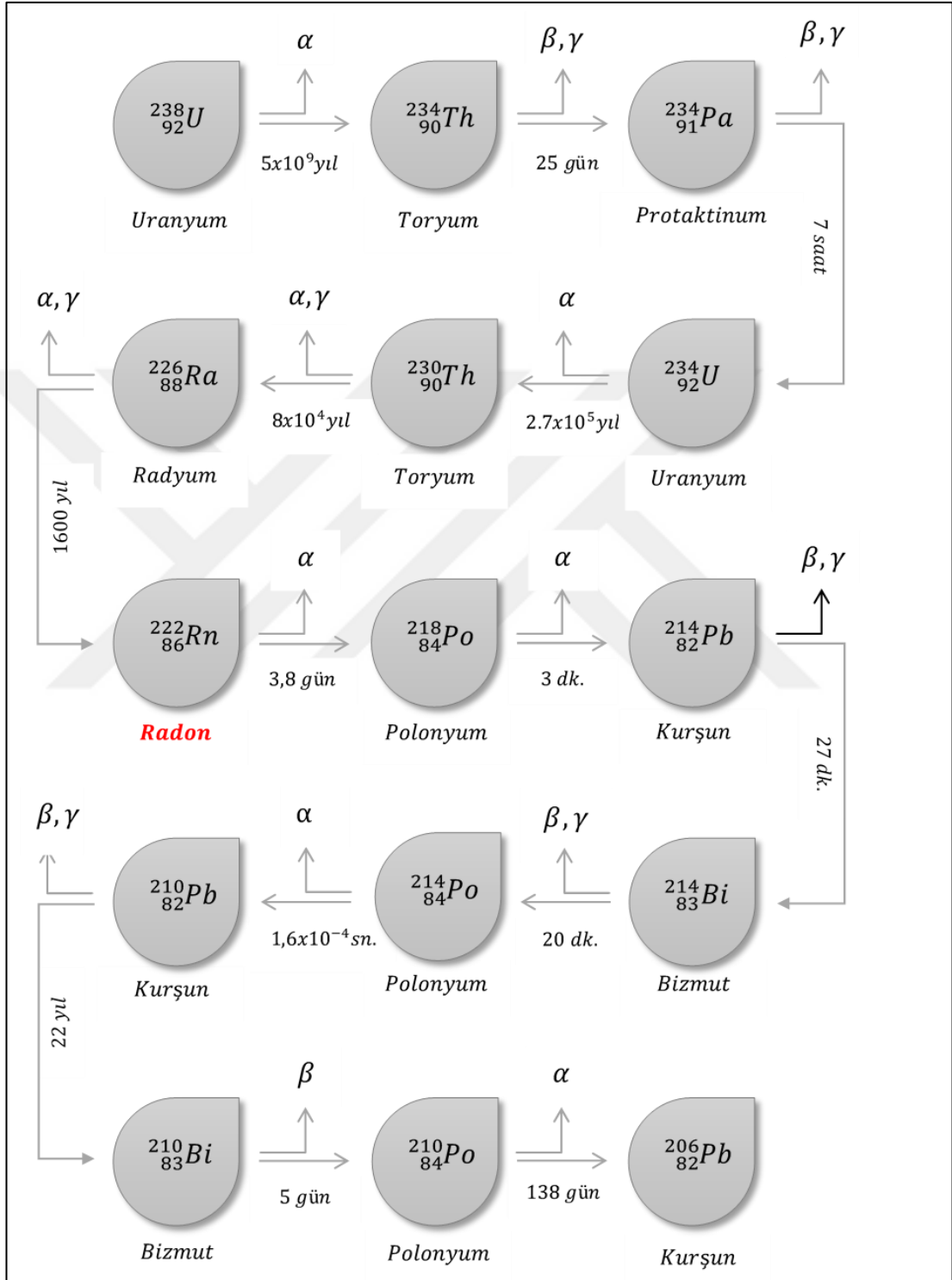
Radon gazının üç doğal radyoizotopu bulunmaktadır. Bunlar; ^{238}U (uranyum), ^{235}U (aktinyum) ve ^{232}Th (toryum) bozunma serilerinin ürünleri şeklinde ortaya çıkmaktadırlar. ^{238}U , ^{232}Th ve ^{235}U izotoplarının bozunma serileri Tablo 2.2.'de verilmiştir.

Tablo 2.2. Toryum, Uranyum ve Aktinyum bozunma serileri (Olsson ve Tengström, 2004)

Bozunma Serisi	Radyoaktif Çekirdek	Yarı-ömür (yıl)	Kararlı Çekirdek	Radyoizotop (Yarı-ömür)
Toryum	^{232}Th	1,4x1010	^{208}Pb	^{220}Rn (55,6 s)
Uranyum	^{238}U	4,5x109	^{206}Pb	^{222}Rn (3,8 g)
Aktinyum	^{235}U	7,1x108	^{207}Pb	^{219}Rn (4,0 s)

Miktar ve yarı-ömrüleri göz önüne alındığında, ölçümler için bu üç radyoizotoptan özellikle ^{222}Rn 'un incelenmesi daha doğru olacaktır (UNSCEAR, 1988). Radon, 3,82 gün yarı ömrü olan ve 5,48 MeV enerjili alfa yayınlayan radyoaktif gazdır (Durrani ve Ilic, 1997: 387). ^{222}Rn (radon), doğada genellikle ^{220}Rn (toron) ile birlikte bulunur. ^{238}U ve ^{232}Th 'un en önemli kaynağı toprak ve kayalardır (Sabol ve Weng, 1995). Yerkabuğunda ^{238}U konsantrasyonu yaklaşık 2 ppm'dir. ^{222}Rn radyoizotopunun bozunması sonucu kısa yarı ömrü olan radon ürünleri (^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi ve ^{214}Po)

oluşur. ^{238}U Uranyum bozunma zinciri tablosu ve bu süreçte Radon'un yeri Şekil 2.6.'da gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Uranyum (^{238}U) bozunma zinciri tablosu (Malling vd., 2013)*

* Malling vd. 2013'den uyarlanarak yazar tarafından hazırlanmıştır.

2.4.3. Sularda radon

İnsanlar su ihtiyacını, yüzey sularından ve yer altı su kaynaklarından karşılamaktadırlar. Su kaynakları, buldukları bölgenin radyoaktif elementleri ve jeokimyasal yapısı hakkında bilgi vermektedir. Radon, uranyum zincirinde radyumun bozunumu esnasında aldığı kinetik enerjiyle bağlı bulunduğu molekülden ayrılarak gaz haline geçer. Gaz halindeki radon topraktan atmosfere ya da bağ kuracağı yapıya doğru hareket eder (UNSCEAR, 1988). Su kaynağına ait kollardan birinin Uranyum kaynaklarından geçmesi halinde, Radyum ve Uranyum elementlerinin çözelti olarak bu sularda taşınabileceği dikkate alındığında kaynak sularında ya da kuyu sularında yapılacak çalışmalar radon konsantrasyon değerlerine yönelik fikir verebilmektedir. Suda mevcut radon konsantrasyon değerlerinde Bq/l veya pCi/l birimleri kullanılır (Davutoğlu, 2008). UNSCEAR tarafından yüzey sularındaki tipik ^{222}Rn konsantrasyonunun 40 Bq/m^3 (1 pCi/l) değerinin daha alt seviyesinde bulunduğu, yer altı sularındaki tipik ^{222}Rn konsantrasyonunun ise $4\text{-}40 \text{ kBq/m}^3$ arasında değişiklik gösterdiği belirtilmektedir (Eisenbud ve Gesel, 1997).

Radon insanların ev, ofis vb. yaşam alanlarına su aracılığıyla girer. Suyun sıcaklığının artmasıyla birlikte yaşam alanının atmosferindeki radon miktarı da artar (UNSCEAR, 1993). Yapılan araştırmalar canlıların hayatında önemli yere sahip kaynak sularındaki ve termal sulardaki radon gazı değerlerinin çoğunlukla yüksek oranlarda bulunduğunu göstermektedir. UNSCEAR (1993) tarafından yayınlanan su kaynaklarındaki ortalama radon konsantrasyon değerleri Tablo 2.3.'te gösterilmiştir.

Tablo 2.3. Su kaynaklarının ortalama radon konsantrasyon değerleri ve kullanım oranları (UNSCEAR 1993)

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

Konuyla ilgili ABD’de yapılan çeşitli çalışmalarda, radon gazının küçük su kaynaklarında ve özel kuyu kaynaklarında, daha büyük kamu su kaynaklarına göre daha yüksek oranda olduğu görülmüştür. Küçük su kaynakları ve özel kuyu kaynakları çoğunlukla uranyum taşıyan metamorfik kayalar, granit ya da fay zonu olan düşük kapasiteli akiferlerde olma eğilimindedir. Büyük kamu su kaynaklarının ise çoğunlukla uranyum içeriği daha düşük yüksek kapasiteli çakıl ve kum akiferleri kullanma eğiliminde olduğu bilinmektedir (Nazaroff ve Anthony, 1988: 518).

2.4.4. Havada radon

Radonun havadaki yayılımı, sudaki yayılımına kıyasla daha fazladır. Havadaki denge ilişkilerinin sıcaklıktan bağımsız geliştiği görülür. Radon yayılımı 0 °C sıcaklıktaki hava için sudaki yayılımından iki kat fazladır. Eşit kapalı hacimdeki +15 °C’deki havada ise radon yayılımının sudaki yayılımdan üç kat daha büyük olduğu görülmektedir (Nazaroff ve Anthony, 1988: 518).

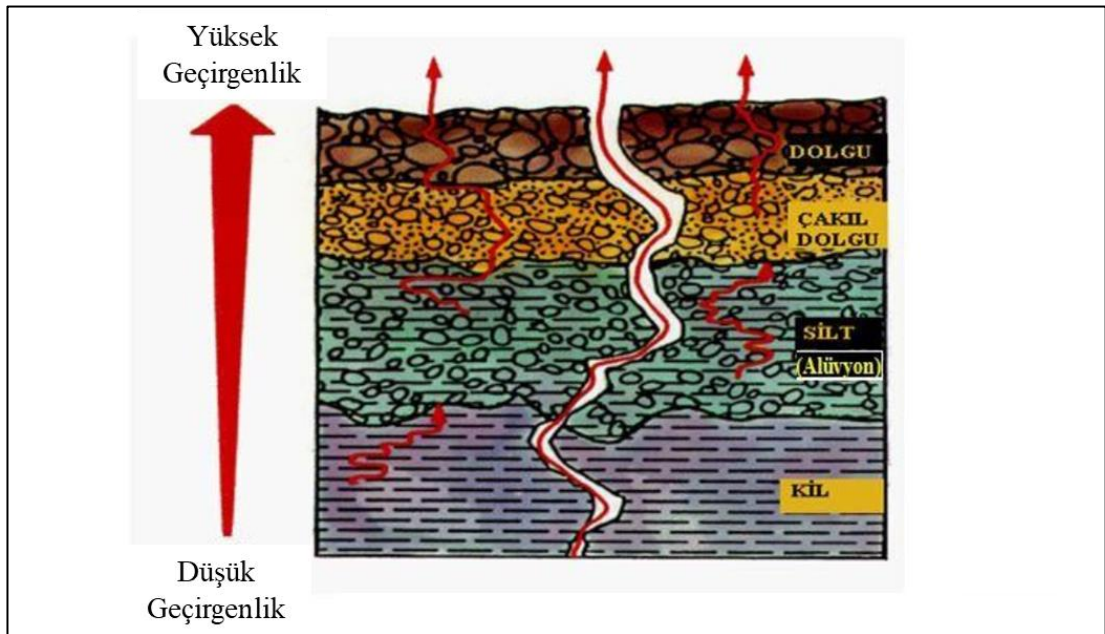
Havada bulunan radonun asıl kaynağı topraktan gelen radyumdur. Dolayısıyla havada mevcut radon konsantrasyonu; topraktaki radyum miktarına, atmosferik dağılım faktörlerine ve radyoaktif gaz çıkış hızına bağlıdır. Toprağın yanı sıra binalardaki yapı malzemelerinin de topraktaki uranyumu içerdiği dikkate alındığında, havadaki radonun diğer bir kaynağının da bina yapı malzemeleri olduğunu söylemek mümkündür. Ayrıca su kullanımında suda çözünen radonun yayılarak havaya karışması hava için diğer bir kaynak faktörüdür. İnsanların solunum yoluyla maruz kaldıkları radyasyonun temel kaynağı havadaki radon gazıdır. Dolayısıyla havadaki radonun insan sağlığına büyük oranda etkisi olmaktadır. Havadan alınan radon doz değerinin yaklaşık 1,3 mSv civarında olduğu belirtilmektedir (Canbazoglu, 2004).

2.4.5. Toprakta radon

Radonun toprak gazında bırakılma hızını ve toprak boyunca aktarılmasını etkileyen toprak özelliklerinin başında toprağın geçirimsizliği ve nem gelmektedir. Toprağın geçirimsizliği çoğunlukla; toprak yapısı, dokusu, gözenek çapı, gözenek hacmi,

gözenek boyu dağılımı, istiflenme yoğunluğu, tane büyüklüğü ve toprağın katı yoğunluğudur. Bazı durumlarda toprak gazında bulunan ^{222}Rn 'un başlıca kaynağı organik ^{226}Ra olabilmektedir (Greeman ve Rose, 1996'dan aktaran Atabey, 2013: 54). Topraktaki kaba taneli materyallerin çoğalması radonun hacim olarak etkinliğini artırır. Kış aylarında zeminin donması veya toprağın suya doymun olması nedeniyle killi ve humuslu topraklar geçirimsizdir. Çok kurak olan aylarda ise toprak çatlayarak daha geçirgen olur (Appleton, 2005'den aktaran Atabey, 2013: 55).

Özellikle inşaat malzemelerinde kullanılan toprak, taş, kuyu suyu, çimento vb. malzemelerde doğal olarak bulunan radon serbest bir şekilde sürekli ortama yayılabilmektedir. Topraktaki radyumun bozunması sonucu oluşan radon toprak taneciklerinin ve kayalardaki kırıkların arasından hava dolu gözeneklere sızarak atmosfere geçmektedir (Ekin, 2013). Radon salınım açısından değişik bölgelerde farklılık göstermektedir. Öyle ki aynı yerleşim bölgelerinde bile zamana göre değişimler olabilmektedir. Radon konsantrasyonlarında coğrafi yerleşim önemlidir. Örneğin radon çıkışını sağlayan toprağın az olduğu kutup bölgelerinde radon konsantrasyonları düşüktür (Kapdan, 2009). Radonun gaz olması toprakta ve kayada mevcut radyum ve uranyuma göre daha fazla hareketliliğe sahip olmasını sağlamaktadır (Kaynar, 2011). Radonun topraktaki geçirgenlik durumu Şekil 2.7.'de gösterilmiştir.



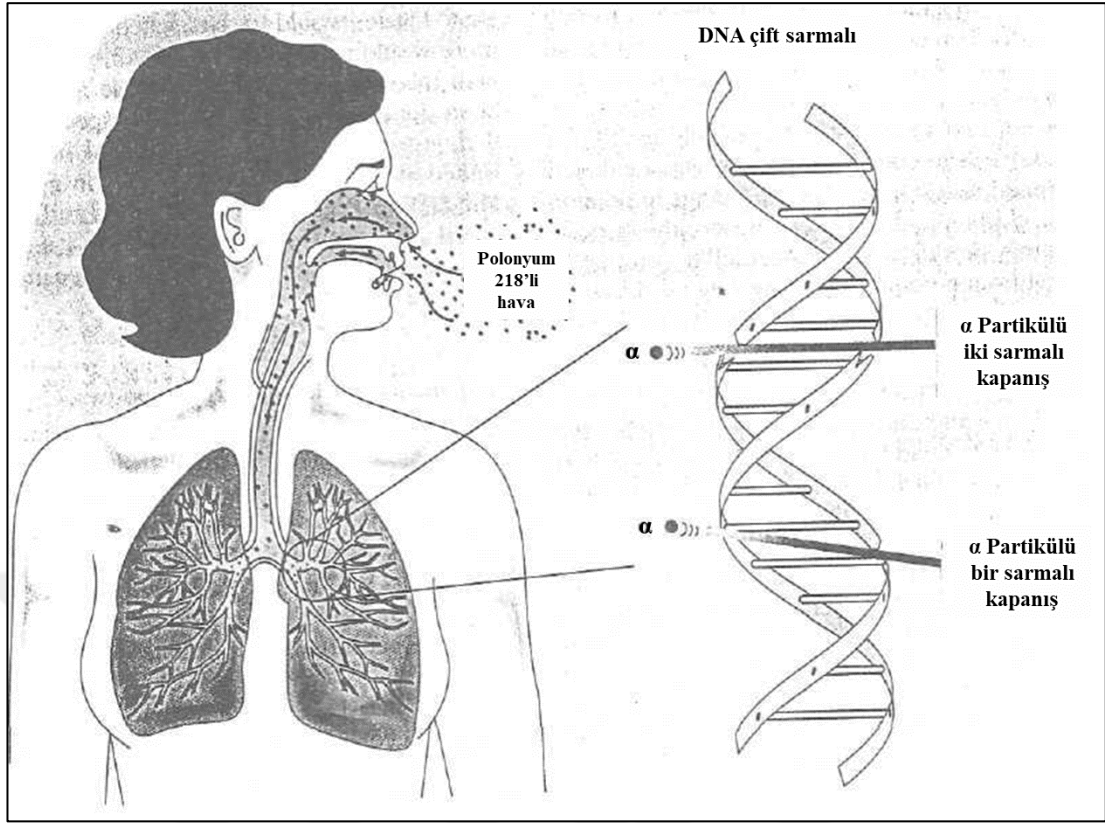
Şekil 2.7. Toprağın radon geçirgenliği (Yıldız, 2004: 57)

2.5. Radon ve Sağlık İlişkisi

Son zamanlarda yapılan çalışmalar radon gazının akciğer kanser riskini önemli derecede arttırdığını ortaya çıkarmıştır. Uranyum madenlerinde bulunan radon gazı ve bozunum ürünlerinin insan sağlığına etkisi üzerine yapılan çalışmalarda, uranyuma maruz kalan madencilerin kanser riskinin yüksek olduğu ortaya çıkmıştır (UNSCEAR, 1988).

Radon gazı ve bozunma ürünlerinin solunmasıyla bronşiyal epiteldeki radyasyon miktarı artmaktadır. Radyasyon bozunma ürünleri kararlı hale gelene kadar bozunmaya devam ettiğinden radyasyon önemli ölçüde sağlık riski taşımaktadır. Maruz kalınan radyasyonun akciğerlerde oluşturduğu hasar, havadaki radon gazı ve bozunum ürünlerinin miktarı, fizyolojik parametreler ve parçacıkların büyüklüklerine bağlı olarak zamanla kansere dönüşebilmektedir. İnsan vücudu için asıl zararlı olan, düşük çözünürlüklü ve reaktiviteli radon değil, radon gazının bozunumu ile ortaya çıkan Bizmut, Kurşun ve Polonyum radyoaktif izotoplarıdır. Radon gazı yarılanma süresinin bozunum ürünlerine göre çok uzun olması dolayısıyla solunum yoluyla insan vücuduna girse bile dokulara kimyasal olarak bağlanamaz ve yarı ömür süresini tamamlayamadan akciğerlerden atılır. Ancak radon gazının bozunmasıyla ortaya çıkan radyoaktif izotoplar havadaki toz ya da diğer parçacıklara yapışarak solunum yoluyla vücuda alınmış olurlar (Cothorn ve Smith, 1998).

Radonun bozunması sonucunda ortaya çıkan Polonyum 218'in akciğerlerde birikmesiyle oluşan alfa parçacıkları bir ya da iki DNA sarmalını koparmaktadır. Bu durum Şekil 2.8.'de görüldüğü üzere mutasyonun başlamasına, dolayısıyla kanserojen etkilerinin hızlanmasına sebep olmaktadır (Botkin ve Keller, 1988).



Şekil 2.8. Polonyum 218'in akciğerlerde birikmesiyle DNA sarmalında hasar oluşması (Botkin ve Keller, 1988)

Vücuda alınan bu parçacıklar alfa, beta ya da gama ışınması yaparak bozunumlarını kararlı duruma gelinceye kadar sürdürürler. Bu ışınmaların en önemli olanı alfa ışınmasıdır. Beta ve gama ışınlarının akciğerler üzerindeki etkisi alfa ışınına kıyasla ihmal edilebilir seviyededir. Akciğerlerin maruz kaldığı dozu tespit edebilmek için solunum ile alınan atom miktarını ve yarı ömrünün bilinmesi gereklidir. Radon ürünlerinin yarı ömür süreleri 20 dakika ile 4,8 saat arasında değişmektedir (Özdemir, 2006). Dünya genelinde radon gazından dolayı maruz kalınan ortalama dozun ise 1.315 mSv/yıl olduğu belirtilmektedir (Seligman, 1990).

Epidemiyolojik çalışmalar, radon gazı ve ürünleri dolayısıyla radyasyona maruz kalmış bireylerin akciğer kanseri riskinin yüksek olduğunu ortaya çıkarmıştır. İngiltere Milli Radyasyondan Korunma Komitesi (NRPB), İngiltere'de yıllık 41.000 akciğer kanseri vakalarından en az 2.500'ünün; ABD Halk Sağlığı Servisi, yıllık akciğer kanseri vakalarından sigara içmeyenlerin 5.000, sigara içenlerin 15.000'inin, Uluslararası Radyasyondan Korunma Komitesi (ICRP), toplam akciğer kanseri

vakalarının %10'unun radon gazından kaynaklı olduğunu bildirmektedirler (Halliday ve Resnick, 1974). EPA'ya göre ise dünya genelinde görünen akciğer kanseri vakalarının yaklaşık 20.000'inin radon gazına bağlı olduğu belirtilmiştir (Özdemir, 2006).

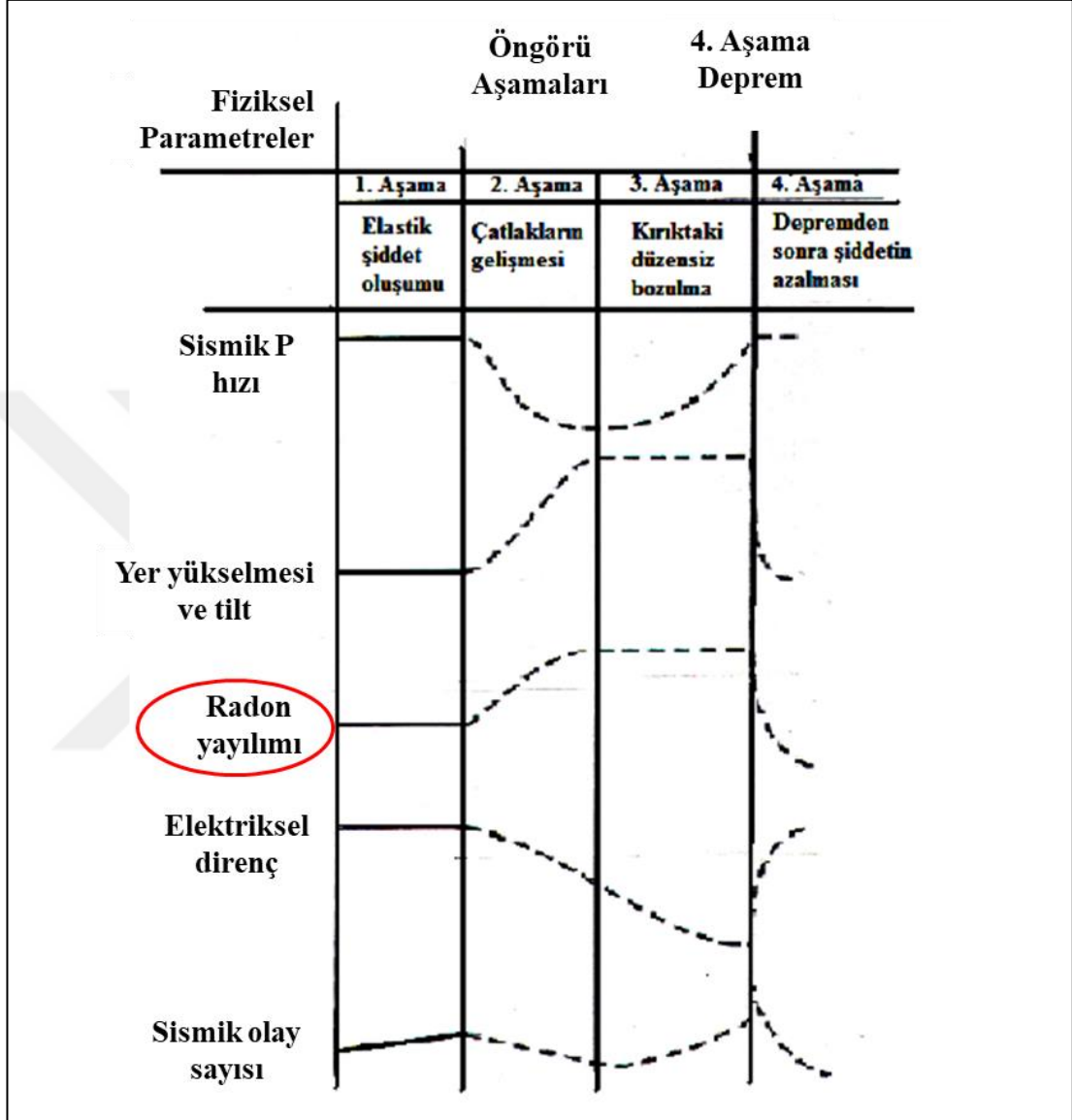
2.6. Radon ve Deprem İlişkisi

Radon ve deprem ilişkisini araştıran çalışmalar ilk defa Japon araştırmacı Okobe (1956) tarafından yapılmıştır. Okobe yaptığı araştırmada, yüzey yakınındaki atmosferik radonun günlük değişimleri ile sismik hareketler arasında pozitif bir korelasyon olduğunu belirlemiş ve radonun yeni bir deprem izleyicisi olduğunu göstermiştir. Radonun suda kolaylıkla çözünmesi ve asal bir gaz olmasından dolayı bileşik yapmaması, yer altı sularında bulunan radon konsantrasyonunun genel hidrolojik karakteristiklerden etkilenmemesini sağlamaktadır. Bu durum radonun yeraltı sularındaki dalgalanmasının büyük oranla tektonik hareketlere bağlı olduğunu göstermektedir (Teng 1980; Virk ve Singh 1993).

Rusya'da faaliyet gösteren "Semasko Scientific Institute" e bağlı Rus bilim adamlarınca uzun süre boyunca Taşkent artezyenlerinde radon ölçümleri yapılmıştır. Ulomov ve Mavashev 1967 ve 1971'de yaptıkları araştırmalarla 1966 Taşkent depremi öncesinde kuyu sularındaki radon konsantrasyonlarının önemli değişimler sergilediğini saptamışlardır. Bu çalışma ilk defa derin kuyu sularındaki radon anomalilerinin faydalı bir deprem izleyicisi olduğunu ortaya koymuştur (Ulomov ve Mavashev, 1971: 189).

Depremi önceden tespitinde radon konusunda yapılan en önemli çalışmalardan biri Çin'de yaşanan 7,3 büyüklüğündeki 4 Şubat 1975 tarihli Haicheng depremi öncesinde yapılmıştır. Bu deprem öncesi yer altı sularında tespit edilen radon anomalileri sayesinde deprem birkaç saat önceden bilinmiş ve milyonlarca insanın kurtarılması sağlanmıştır (Tanner, 1980). Radon ve deprem ilişkisine yönelik başka bir çalışmada Bolt (1993), deprem ön kestirimini yapabilmek için radon yayılımı, sismik olay sayısı, elektriksel iletkenlik gibi bazı fiziksel parametreleri incelemiştir. Araştırma sonucunda

söz konusu parametreler ve öncül olarak kabul edilen safhalar arasında ilişki tespit ederek bu ilişkiyi Şekil 2.9.'da olduğu gibi göstermiştir.



Şekil 2.9. Deprem öncesin bazı fiziksel parametrelerde görülen değişimler (Bolt 1993)

Şekil 2.9.'da görüldüğü üzere deprem ön kestirmelerinde radon yayılımındaki değişimin önemli bir fiziksel parametre olduğu anlaşılmaktadır. Buna göre deprem öncesi dönemde radon yayılımında artış olduğu ve artışın pik yaptığı veya azalmaya başladığı dönemlerde ise depremin meydana geldiği görülmektedir.

Radon ve deprem ilişkisine yönelik literatür incelendiğinde dünya üzerinde yapılan çok sayıda araştırmanın yanı sıra benzer araştırmaların Türkiye’de de yapıldığı görülmektedir. Özellikle Kuzey Anadolu, Doğu Anadolu ve Akşehir fay hatları üzerinde yapılan radon ölçümlerinden yola çıkılarak radon ve deprem ilişkisinin ortaya konmaya çalışıldığı araştırmalardan bazıları Tablo 2.4.’te gösterilmiştir.

Tablo 2.4. Türkiye’de deprem ve radon ilişkisine yönelik yapılan araştırmalar

Araştırmacı(lar)	Araştırma Konusu ve Amacı	Araştırma Sonucu
Belin vd. (2002)	Adapazarı-Kuzulukta mevcut termal suların kimyasal ve radyoaktif değişikliklerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Araştırmada deprem öncesinde ve sonrasında olacak şekilde alınan su örnekleri analiz edilmiş ve bazı elementlerin içeriklerine ilişkin değişimler incelenmiştir.	Uranyum konsantrasyonunda dikkat çeken bir artış gözlenmiştir. Buna göre sismik bölgelerde bulunan yer altı sularının kimyasal içeriklerinde yaşanan değişimin deprem ile ilişkili olduğu belirtilmiştir.
Yaprak vd. (2003)	Depremin önceden tahmin edilebilmesi doğrultusunda Manisa ve Alaşehir’deki toprak gazının radon konsantrasyonları, Alaşehir bölgesinde yer alan aktif faylarda devamlı olarak gözlemlenmiştir.	Araştırma sonucunda elde edilen iki haftalık radon ölçümlerinde, Alaşehir fay hattında meydana gelen 3M büyüklüğündeki deprem ile ilişkili olabilecek değişimler tespit edilmiştir.
Saç ve Camgöz (2005)	İzmir ve çevresinde yer alan aktif fay üzerinde ve yakınında radon konsantrasyonları incelenmiştir.	Radon konsantrasyonlarında sismik bir aktivite öncesinde değişim yaşandığı gözlenmiştir. Depremin önceden tahmininde radon çıkışının izlenmesinin önemli olduğu belirtilmiş ve devamlı radon ölçümleri yapılmasının gerekli olduğu vurgulanmıştır.

Tablo 2.4. (Devamı)

Araştırmacı(lar)	Araştırma Konusu ve Amacı	Araştırma Sonucu
Ereş vd. (2007)	Yüksek sismik aktivitesi olan ve termal sulara sahip Denizli’de yapılan araştırmada fay hattında bulunan termal suların radon gazı ölçümleri yapılarak deprem ve radon ilişkisi incelenmiştir.	Araştırmada yapılan ölçümlerden “Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi” ve “Deprem Araştırma Enstitüsü”nden elde edilen verilere göre, ölçümler esnasında iki konumdaki radon konsantrasyonlarının artışı ile deprem arasında pozitif ilişki olduğu saptanmış ve daha uzun süreli ölçümlerin yapılmasının faydalı olacağı vurgulanmıştır.
İnceöz vd. (2006)	Kuzey ve Doğu Anadolu fay hatlarına yönelik yapılan araştırmada aktif fay sisteminde bulunan toprak gazındaki radon ölçümleri incelenmiştir.	Araştırma sonucunda iki fay sisteminde de 4,3–9,8 kBg/m ³ arası değişen radon konsantrasyonu gözlemlenmiştir. Kuzey Anadolu hattının Doğu Anadolu hattına göre daha büyük radon değerlerine sahip olduğu görülmüş ve faylardaki radon konsantrasyonunun normalden daha yüksek olduğu saptanmıştır.
Güloğlu (2007)	Olası bir depremin önceden tahmin edilebilmesi kapsamında Çeşme bölgesinde yer alan aktif fay hatları üzerinde yapılan araştırmada, toprakta ve termal sulara mevcut radon gazı hareketi incelenerek sismolojik verilerle karşılaştırılmıştır.	Araştırma sonucunda yapılan radon gazı konsantrasyonlarında önemli değişimler saptanmıştır. Araştırma sürecinde yaşanan 5 depremden önce radon değerinin pik noktaya çıktığı gözlemlenmiştir.
Erkmen vd. (2007)	Adıyaman Gölbaşı Balkar beldesi güneybatısında bulunan Karaçemçe deresi üzerinde kuzeybatı-güneydoğu doğrultusundaki hatta bulunan toprağın radon gazı ölçümleri yapılarak fay kırıklarının tespit edilmesi amaçlanmıştır.	Araştırma sonucunda radon gazı değerlerinde 0-36 kBq/m ³ arası değişim tespit edilmiş, fay hattı boyunca ve yakınlarındaki radon değerlerinde yükselmeler görülmüştür. Ayrıca fay hattından uzaklaştıkça radon değerlerinin azaldığı gözlenmiştir.

Tablo 2.4. (Devamı)

Araştırmacı(lar)	Araştırma Konusu ve Amacı	Araştırma Sonucu
Şahin (2009)	Doğu Anadolu Fay Sistemi'nde bulunan Sivrice fay zonu üzerinde yapılan araştırmada doğal radyoaktivite ve radon değişimi ölçümleri yapılmış, sürekli radon gazı çıkışı değişiminin deprem ile ilişkisinin tespit edilmesi amaçlanmıştır.	Araştırma sonucunda fay zonundaki sürekli radon gazı değişiminin atmosferik şartların etkisinden arındırılarak depremin önceden tahmininde önemli bir parametre olduğunu ortaya koymuşlardır.
İnan vd. (2008)	17 Ağustos 1999 depreminin yaşandığı Marmara bölgesine yönelik yapılan çalışmada sismik aktiviteler ve radon gazı anomalileri ilişkisinin belirlenmesi amaçlanmış, 3 yıl boyunca topraktaki sürekli radon gazı değerleri incelenmiştir.	Araştırma sonucunda bölgede meydana gelen 4M'den fazla büyüklüğe sahip depremler ile radon anomalileri arasında pozitif korelasyon tespit edilmiştir. Sürekli radon gazı ölçümlerinde atmosferik koşulların etken olduğu ve özellikle yer seçiminin önemli olduğu belirtilmiştir. Araştırmada Marmara bölgesinde 3 yıl boyunca izlenen topraktaki radon gazı anomalilerinin sismik aktiviteler ile iyi ilişkinin olduğu vurgulanmıştır.
Yüce vd. (2010)	Kuzey Anadolu Fayı yakınında bulunan ve sismik olarak aktif olan Eskişehir ilinde ve çevresinde yapılan araştırmada, depremlerin jeokimyasal ve hidrojeolojik etkileri incelenmiştir. Bu kapsamda yaklaşık 1 yıl boyunca 5 istasyondaki CO ₂ ve radon konsantrasyonları, elektriksel iletkenlik, redoks potansiyeli, pH, su sıcaklığı ve seviyesi, iklim parametreleri ölçülmüştür.	Araştırma sonucunda elde edilen veriler olası bir depremden birkaç gün öncesinde yer altı sularındaki radon gazı konsantrasyonunun ve jeokimyasal parametrelerinin anomaliler gözlemlendiği belirtilmiştir.
Baykut vd. (2010)	Marmara bölgesinde yer alan Balıkesir, Armutlu ve Gönen'de özellikle yaz aylarında topraktaki sürekli radon gazı ölçülerek sismik aktiviteler ve radon gazı anomalileri arasındaki ilişkinin belirlenmesi amaçlanmıştır.	Araştırma sonucunda toprakta bulunan radon ile sismik aktivitelerin ilişkisini daha iyi analiz edebilmek için sıcaklık, yağış, basınç gibi atmosferik parametrelerin günlük değişimlerinin ve mevsimsel değişimlerinin elenmesi gerektiği belirtilmiştir. Bu bağlamda benzer araştırmalarda günlük periyodik değişimlerin etkisini kaldırılabilmesi ve daha iyi analiz yapabilmek için ampirik mod ayrıştırma yöntemine dayanan (EMD) algoritmanın kullanılabileceği belirtilmiştir.

Tablo 2.4.'te de görüldüğü üzere literatürde mevcut çalışmalar, deprem ve radon konsantrasyonları arasında ilişki olduğunu ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, aktif faylar üzerinde bulunan ve tarih boyunca yaşadığı depremler sonucunda ciddi kayıplar veren Türkiye açısından depremin önceden tahmin edilebilmesinin önemi dikkate alındığında, ülke genelinde mevcut fay sistemleri üzerinde yapılacak radon ölçümlerinin önemli olduğu anlaşılmaktadır.

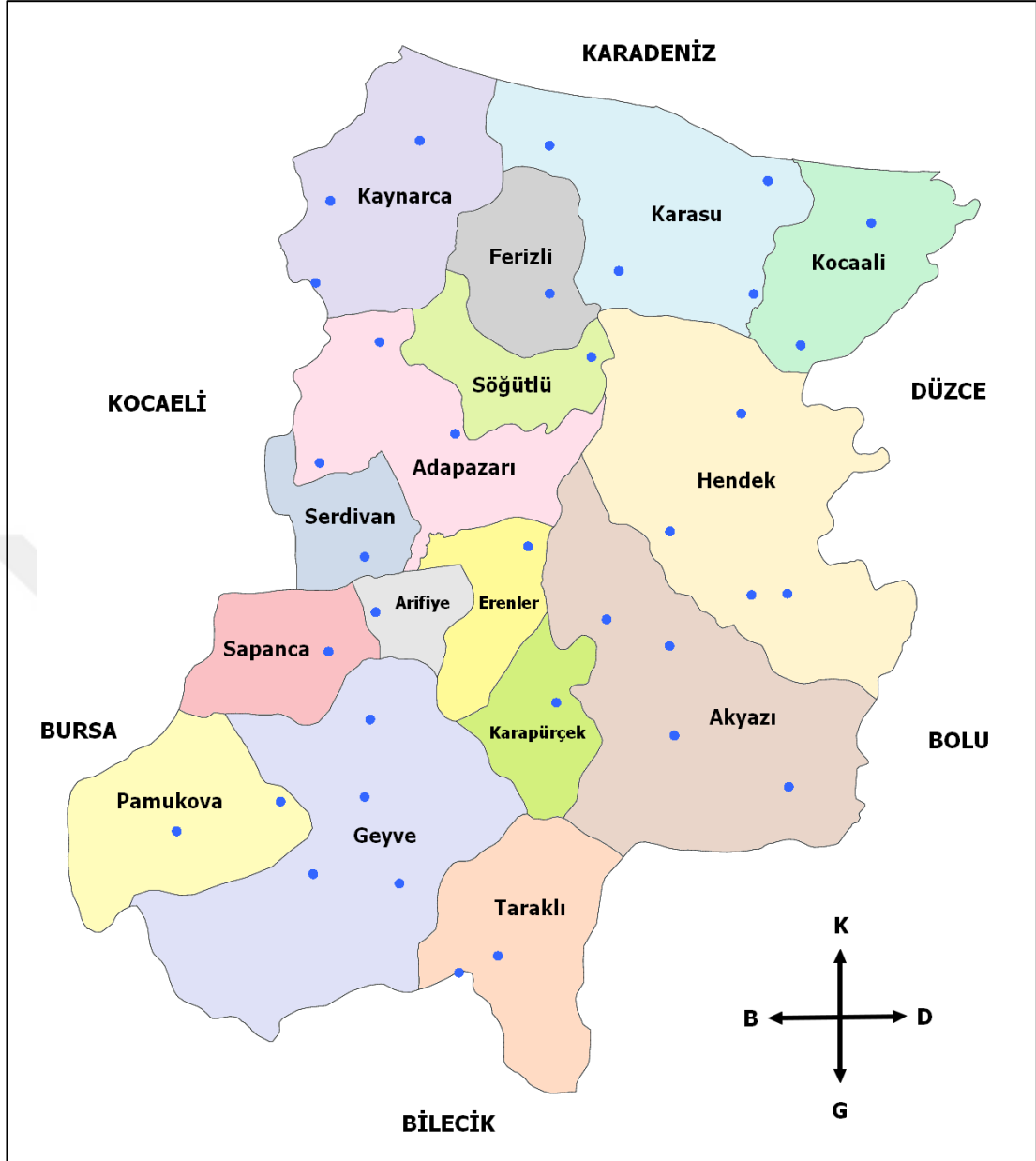


BÖLÜM 3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Çalışma Alanı ve Jeolojik Özellikleri

Bu araştırmada Sakarya ili çalışma bölgesi olarak seçilmiştir. İlin nüfusu 2019 yılsonu verilerine göre 1.029.650'dir. Yıllık nüfus artış hızı binde 18,6 olan Sakarya'nın yüz ölçümü 4.817 km² olup, buna göre il genelinde km²'ye 213 kişi düşmektedir. Sakarya ili Marmara bölgesinin en doğusunda ve Çatalca-Kocaeli Bölümünde yer almakta olup rakımı 31 m.'dir. Verimli toprakları sahip olan ilin, yüz ölçümünün yaklaşık %43'ü ormanlarla kaplıdır. Yer altı kaynak ve yer üstü suları bakımından zengindir. Sapanca başta olmak üzere çeşitli ölçeklerde göller mevcuttur. Maden ve yer altı kaynak suları bakımından zengin olması dolayısıyla Hendek, Sapanca, Arifiye ve Akyazı ilçelerinde, ulusal çapta onlarca kaynak suyu işletmecisi firma faaliyet göstermektedir. Akyazı (Kuzuluk), Geyve ve Taraklı ilçeleri termal yer altı suları ile tanınmıştır. Karasu ve Ferizli ilçeleri sınırlarında demir, bakır, çinko, magnez ve titanyum, Adapazarı, Akyazı ve Sapanca ilçelerinde ise mermer kaynakları bulunmaktadır (Sakarya Valiliği, 2020).

Nüfus olarak Türkiye'de 23'üncü, yüz ölçümü olarak ise 66'ncı sırada yer almaktadır. İl batıda Kocaeli ve Bursa illeri, güneyde Bilecik ve Bolu illeri, doğuda Düzce ili ve kuzeyde ise Karadeniz ile sınırdır. 22 Mart 2008 tarihli Resmi Gazetede yayınlanan 5747 sayılı Kanun ile birlikte Sakarya'da 4 yeni ilçe (Adapazarı, Erenler, Serdivan ve Arifiye) daha kurulmuş ve toplamda 16 ilçeye sahip olmuştur. Sakarya ilinin ve ilçelerinin konumunu gösterir harita Şekil 3.1.'de gösterilmiştir (Sakarya Valiliği, 2020).



Şekil 3.1. Sakarya ili ve ilçeleri lokasyon haritası

Sakarya ili tektonik olarak aktif olan Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ) üzerinde bulunduğundan dolayı 1. derece deprem bölgesidir. Yer altı sularının çok fazla ve zemine yakın bulunması depremlerin yıkıcı sonuçlarına da artırmıştır. Nitekim geçmişte ili etkileyen onlarca deprem olduğu bilinmektedir. Bu açıdan araştırma bölgesinin jeolojik açıdan önemli olduğunu söylemek yanlış olmayacaktır (Işık, 2007).

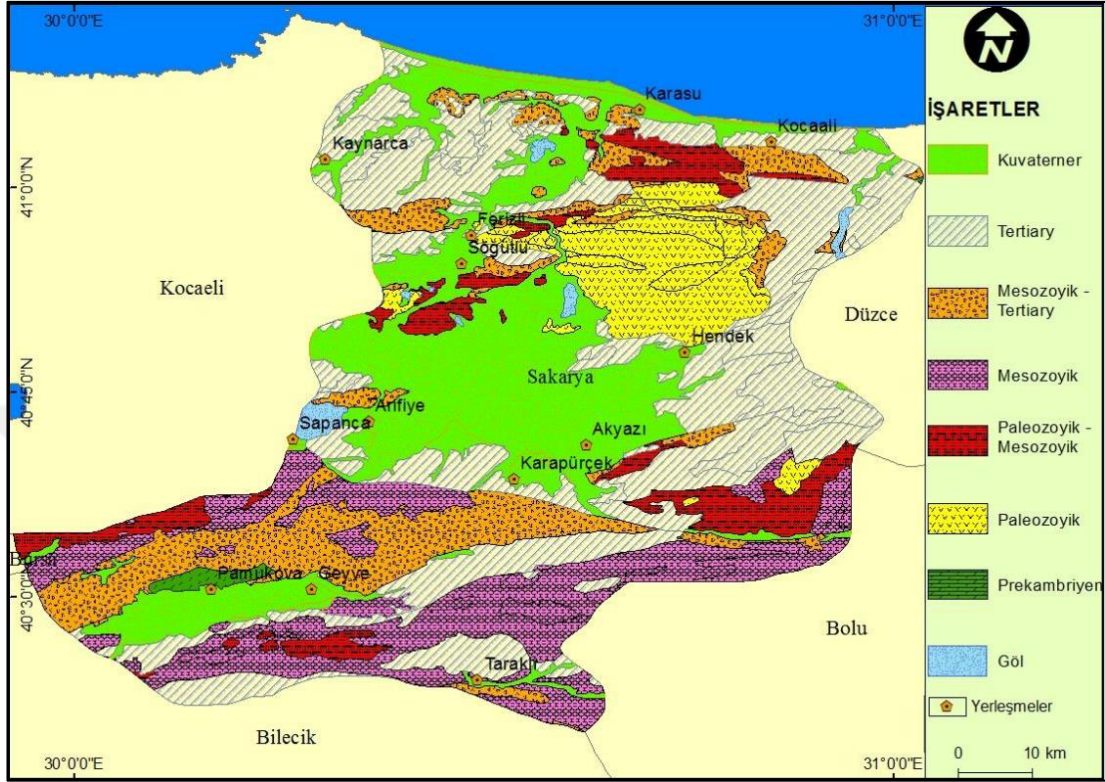
Sakarya'nın sade bir özelliğe sahip yüzey şekillerini üç bölümde incelemek mümkündür. Bunlar (Zorlu, 2010);

- a. Tepelik alanların bulunduğu kuzey alan,
- b. Adapazarı Ovası veya Akova olarak anılan düzlük orta alan,
- c. Engelibeli toprakların bulunduğu güney alandır.

Sakarya'nın en büyük ovası olan Akova (Adapazarı Ovası), Sapanca Gölü ile Adapazarı'nın doğusunda aşağı Sakarya Vadisi'nde yer alır. Doğuda Keremali Dağı eteklerine kadar uzanan Akova, Marmara Bölgesi'nin de en büyük ovaları arasında gösterilebilir. Sakarya Irmağı'nın taşıdığı kalın alüvyon tabakalarıyla kaplı olması ovanın çok verimli olmasını sağlamaktadır. Güneyden kuzeye akan Sakarya Irmağı ile doğudan kuzeye akan Mudurnu Çayı Akova'yı sulamaktadır. Aşağı Sakarya Vadisi'ndeki diğer önemli bir tarım alanı da Pamukova'dır. Akova'ya göre daha yüksek olan Pamukova'da Sakarya Irmağı daha hızlı akmakta ve ırmağın derinden akması yatağının değişmemesini sağlamaktadır. Buradaki taban suyu Akova'ya kıyasla daha düşüktür. Sakarya'nın yeryüzü şekillerinde platolar önemli yer kaplarlar. Yer yer ormanlarla kaplı olan bu platolar ilin %44,3'ünü kaplamaktadır (Zorlu, 2010).

Sakarya toprakları KAFZ yer kabuğunda 1943 Adapazarı (6,6), 1957 Sakarya-Hendek (7,1), 1967 Adapazarı-Hendek-Mudurnu (7,3), 1999 Marmara (7,4) ve 1999 Düzce (7,2) depremlerine maruz kalmıştır. Araştırma sahasının tektonik yapısında KAFZ'nin oluşturduğu ve günümüzde Arifiye-Sapanca Gölü-İzmit hattından geçen fay hattına ilaveten Samanlı dağları yamaçlarındaki düşey atımlı faylar da bulunmaktadır (Bol ve Önalp, 2002; Sandalcı vd., 2005). Kuvaterner dönemine ait alüvyon dolgular şehir genelindeki en geniş alanı oluşturur. Güncel alüvyonların ise Sapanca Gölü çevresinde ve Pamukova, Adapazarı ve Söğütlü ovalarının oluşmasında etkili olan akarsuların (Sakarya Nehri, Mudurnu Çayı, Çark Suyu, Dilsiz Çayı, Maden Deresi, Darıçayırı Deresi, Melen Deresi, Akçay Deresi, Karaçay, Yırtmaç Deresi, Mahmudiye Deresi, İstanbul Deresi, Değirmen Deresi gibi) vadilerinin kenarlarında olduğu görülmektedir. Alüvyal sahalara ilaveten eski alüvyon yelpazesi birimlerine de Sapanca Gölü kıyılarında ve Arifiye Ovası çevresinde rastlamak mümkündür. Sakarya'nın toprak yapısı genel olarak kil ve kum içermektedir. Yer altındaki kaya

yoğunluğu ise çok fazla yaygın değildir. Araştırma sahasının jeoloji haritası Şekil 3.2.'de gösterilmiştir (Kurt ve Duman, 2016: 273).



Şekil 3.2. Araştırma sahası jeoloji haritası (Kurt ve Duman, 2016: 274)

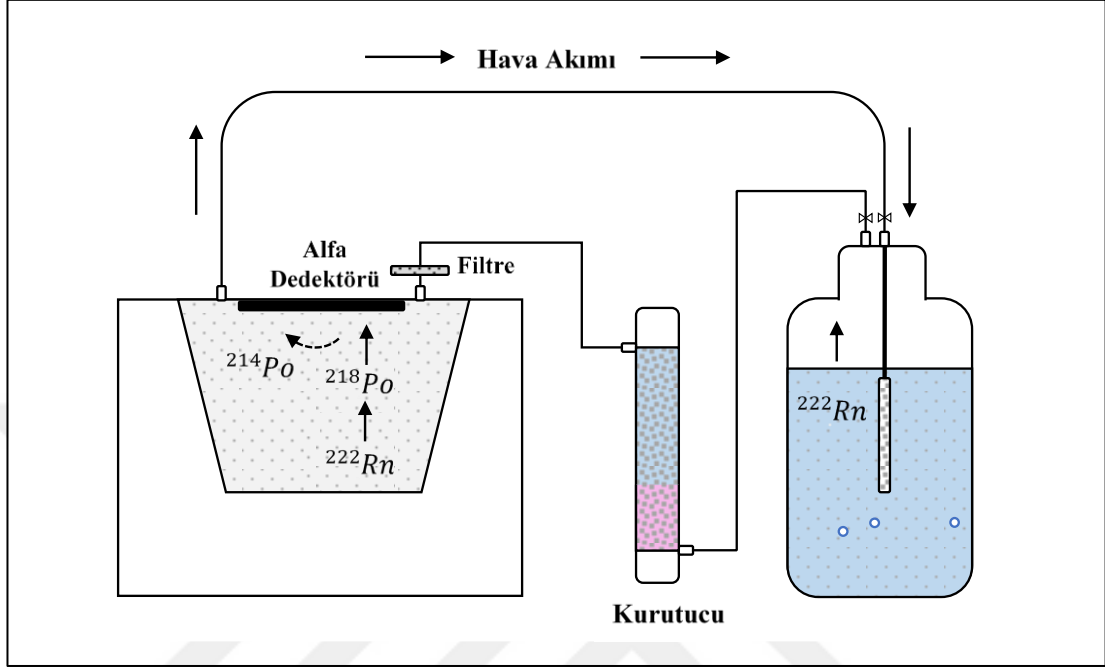
3.2. Materyal ve Yöntem

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen radon ölçümlerinde RAD 7 (Durrige Co, USA) radon dedektörü kullanılmıştır. Çalışmanın bu bölümünde, RAD-7 ölçüm dedektörüne ilişkin bilgiler verilerek RAD-7 spektrum örnekleri ortaya konacak ve yapılan ölçümlerin ne şekilde gerçekleştirildiği açıklanacaktır.

3.2.1. RAD-7 ölçüm dedektörü

RAD-7 cihazı kullanıcıya hızlı okuma imkânı sunan ideal bir ölçüm dedektörüdür. Taşınabilir olan bu cihaz (yaklaşık 5 kg) zararlı kimyasallarla çalışma riskini ortadan kaldırmaktadır. Araştırma kapsamında toplanan su numuneleri RAD H₂O (sudaki

radon) aksamı bağı olan RAD-7 elektronik dedektörü kullanılarak ölçülmüştür. RAD-7 katı hal radon dedektörünün şematik çizimi Şekil 3.3.'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3. RAD-7 katı hal radon dedektörünün şematik çizimi (RAD7 User Manuel, 2019: 61)

Şekil 3.3.'te görüldüğü üzere RAD-7 cihazında bir katı hal alfa dedektörü kullanılmaktadır. Bu dedektör alfa radyasyonunu doğrudan elektrik sinyaline dönüştüren yarı iletken (çoğunlukla silikon) bir malzemedir. Katı hal cihazların sağlam olması önemli bir avantajdır. Her bir alfa parçacığına ait enerjisi elektronik olarak belirleyebilmesi ise cihazın diğer bir avantajıdır. Böylelikle üretilen radyasyonun hangi radon bozunum ürününden (^{218}Po , ^{214}Po vb.) geldiği ölçülebilmektedir. Bu teknik “alfa spektroskopisi” olarak adlandırılmakta ve havayı çekme (sniffing) ya da numuneyi tutma uygulamaları açısından ciddi avantaj sağlamaktadır. (RAD7 User Manuel, 2019: 35)

Yapılan ölçümler esnasında RAD-7 katıhal dedektörünün kullanımına ve numunelerin köpürtülmesine ilişkin anlık bir görüntü Şekil 3.4.'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. RAD7 katıhal dedektörünün kullanımı ve numunelerin köpürtülmesine ait anlık görüntü

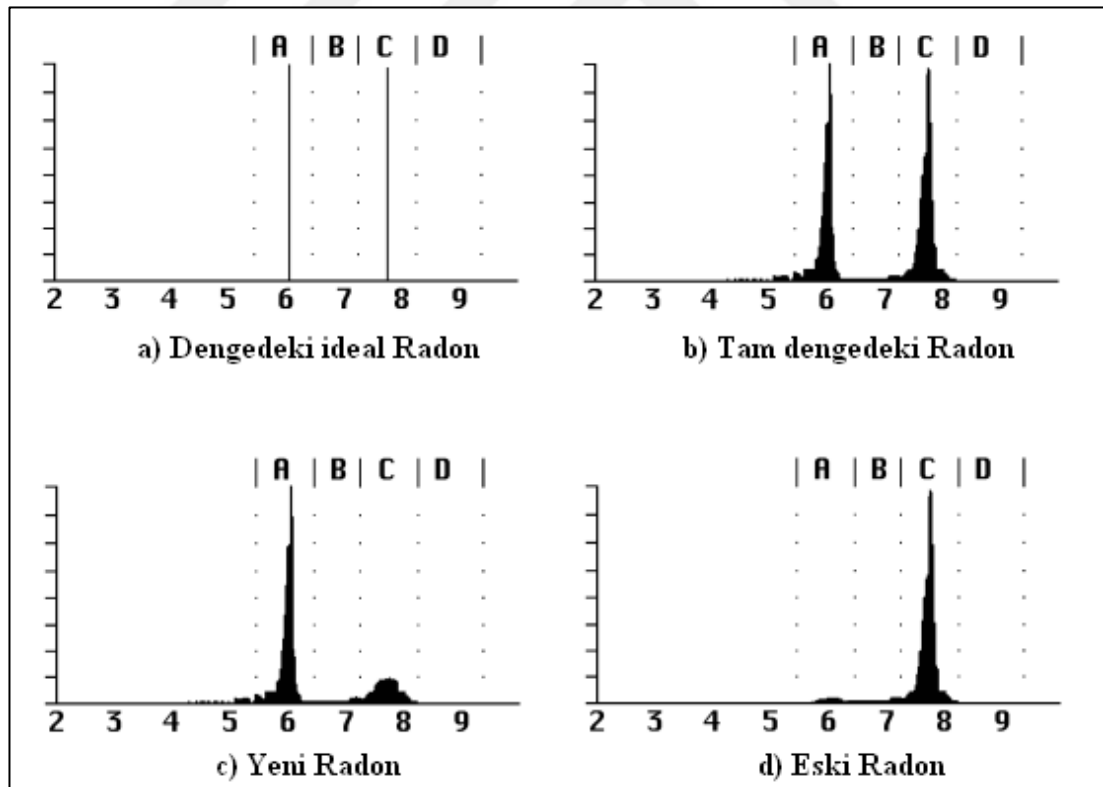
RAD-7 dedektörünün kullanımında ölçüm öncesi cihazın kendi materyalinde oluşması muhtemel nem değerlerinin referans aralığına getirilmesi gerekir. Cihazda istenen referans aralığının sağlanmasının ardından numuneler ölçülmeye başlanır. Numunelerin ölçümünde, RAD H2O aksamı kullanılarak su numunesinin bulunduğu 250 ml'lik şişeler kapalı bir hava borusu sistemi vasıtasıyla RAD-7 cihazına bağlanır. Ardından 5 dakikalık periyotlarda RAD-7 pompası vasıtasıyla su köpürtülür ve Şekil 3.4.'te görüldüğü gibi suda çözülmüş radon gazının yüzeye çıkması sağlanır. 5 dakika boyunca yapılan havalandırma sonunda mevcut radonun %94'ten fazlası sudan ayrılmış olur. Sonrasında sistem 5 dakika bekletilir ve sisteme ait printerin verdiği ara raporun ardından sayım başlar. Bu sayım 5'er dakikalık 4 periyot olacak şekilde devam eder. Sistem her ölçüm periyodunda bir ara rapor verir. 30 dakikalık periyodun sonunda ise RAD-7, her biri 5 dakikalık olan 4 sayımdaki ortalama radon aktivitesine bağlı bir spektrum verir. Böylelikle analizi yapılan su numunesine ait radon içeriği belirlenmiş olur (Özer, 2019: 19).

3.2.2. RAD-7 spektrum örnekleri

RAD-7 katıhal dedektörü ile yapılan deneysel ölçümler sonucunda elde edilen verilerin daha iyi anlaşılabilmesi açısından cihaza ait spektrum örneklerinin incelenmesinde fayda vardır. RAD7 spektrumu, 0 ila 10 MeV arasındaki alfa enerjilerinin ölçeğidir. Özellikle 6-9 MeV aralığında alfa parçacıkları üreten radon ve thoron spektrumları dikkat çekicidir (RAD7 User Manuel, 2019: 37). Bu bağlamda RAD-7 cihazına ait bazı Radon ve Toron spektrum örnekleri alt başlıklarda açıklanmıştır.

3.2.2.1. Radon spektrumları

Radon spektrumları; dengedeki ideal radon, tam dengedeki radon, yeni radon ve eski radon olarak Şekil 3.5.'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Radon spektrum örnekleri (RAD7 User Manuel, 2019: 45).

Şekil 3.5.'te gösterilen radon spektrumları incelendiğinde;

- a. Dengedeki ideal radon spektrumu: A ve C pencelerinde oluşan piklerin değerleri aynı yüksekliktedir.

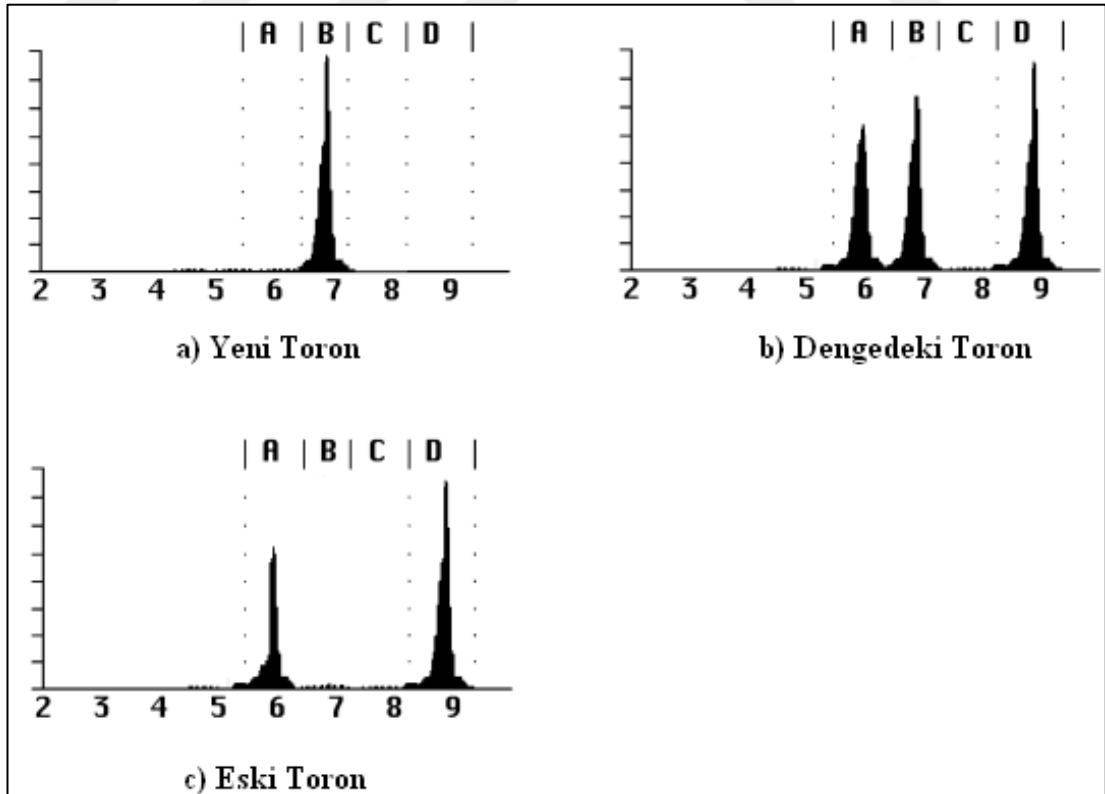
A 6,00 Mev Po-218

C 7,69 Mev Po-214

- b. Tam dengedeki radon spektrumu: Belirli radon seviyesinde yaklaşık üç saat kadar sonra C penceresindeki ile A penceresindeki sayım oranları hemen hemen birbirinin benzeridir.
- c. Yeni radon spektrumu: Bir saatten az süre ile radona maruz kalındığında C penceresindeki pik büyür, ancak yine de A penceresindeki sayım oranından hayli düşük kalır.
- d. Eski radon spektrumu: Dedektörü havalandırılarak temizlendikten sonraki birkaç dakikalık süre içerisinde meydana gelebilecek spektrumdur.

3.2.2.2. Toron spektrumları

Toron spektrumları; yeni toron, dengedeki toron ve eski toron olarak Şekil 3.6.'da gösterilmiştir.



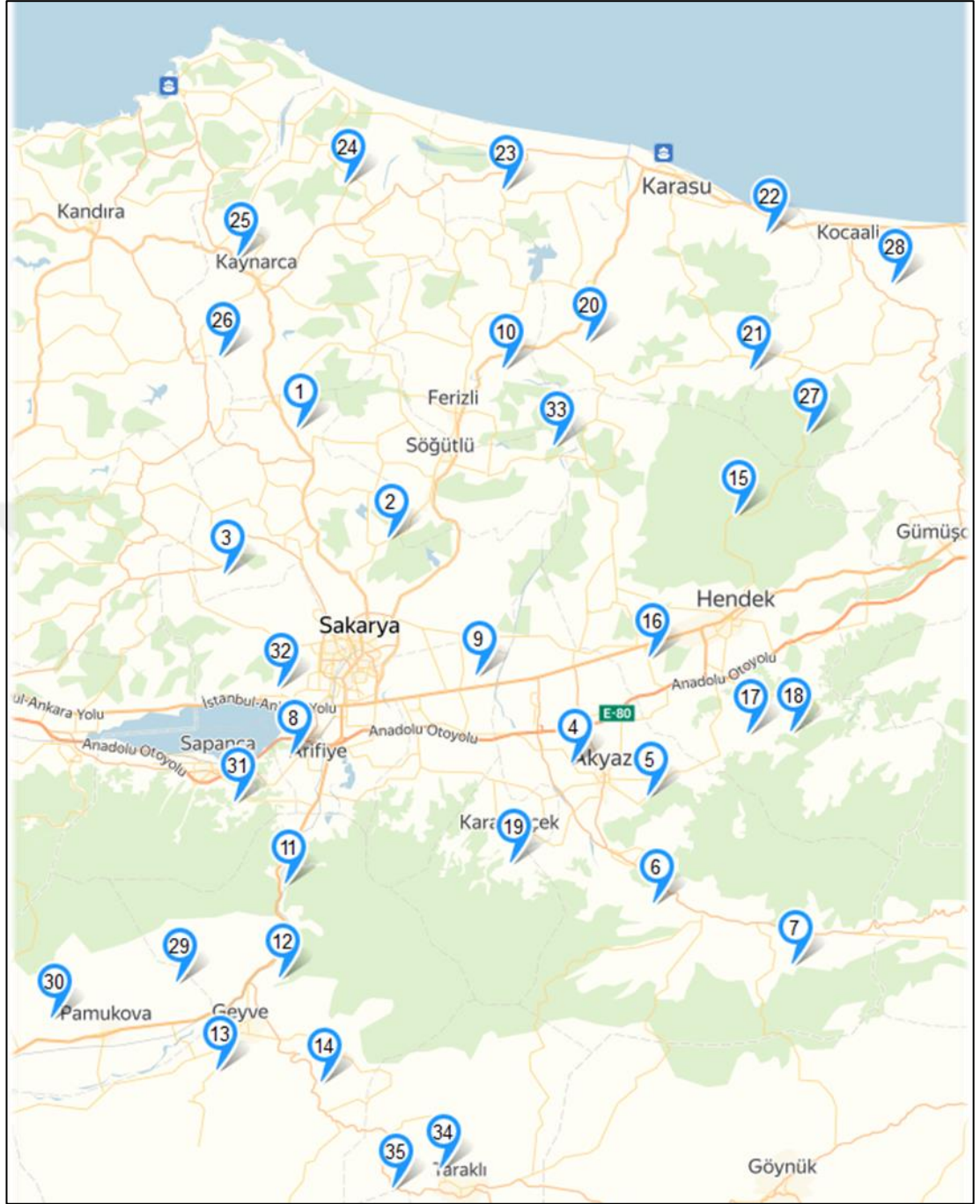
Şekil 3.6. Toron spektrum örnekleri (RAD7 User Manuel, 2019: 46)

Şekil 3.6'da gösterilen toron spektrumları incelendiğinde;

- a. Yeni toron: RAD-7 dedektörü tarafından hava ölçümlenirken elde edilen spektrumdur. B penceresinde pik yapmaktadır.
B 6,78 MeV Po-216
- b. Dengedeki toron: 12 saat civarı toron bulunan ortamda yapılan ölçüm neticesi elde edilen RAD-7 spektrumudur. A penceresindeki oranı D penceresindeki sayım oranının yaklaşık yarısı kadardır.
A 6,05 MeV Bi-212
B 6,78 MeV Po-216
C 8,78 MeV Po-212
- c. Eski toron: D penceresindeki sayım oranı pik yapar ve A'daki yüksekliğin yaklaşık iki katı kadardır. Örneklemenin kesilmesinden sonra havada bulunan torondan kaynaklanan RAD-7 spektrumudur.

3.2.3. Ölçümün yapılışı

Bu çalışma, Sakarya iline ait 4'ü merkez olmak üzere toplam 16 ilçede yapılmıştır. Numune alınması planlanan noktaların belirlenmesinde, bu 16 ilçede 175 mahalle muhtarı ile görüşülmüş, 950 km yol katedilerek çeşitli araştırmalar yapılmış ve 35 farklı, yer altı kaynak suyu bulunan adres tespit edilmiştir. Çalışma kapsamında her ilçeyi kapsayacak şekilde belirlenen 35 noktayı gösterir harita Şekil 3.7.'de olduğu gibidir.



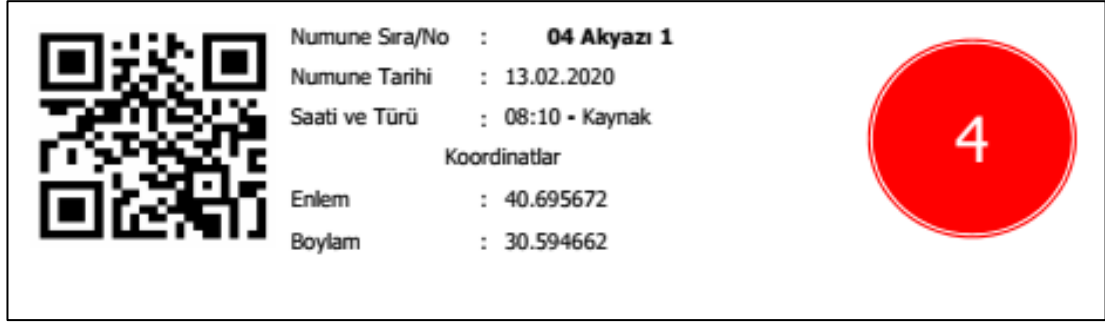
Şekil 3.7. Yer altı kaynak suyu alınan noktaları gösterir harita

Şekil 3.7.'deki noktalara ait koordinatların belirlenmesinde Google Maps ve Yandex Maps uygulamaları kullanılmıştır. Kaynak sularından numune alınan iki noktaya ait örnek görüntü ve koordinatları gösterir QR Kodları Şekil 3.8.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Kaynak sularından numune alınan iki noktaya ait örnek görüntü ve koordinatları gösterir QR kodları

Çalışma kapsamında numunelerin toplanması esnasında kullanılacak 250 ml'lik cam şişeler piyasadan temin edilmiştir. Bu şişelerin üzerine ve kapaklarına yapıştırılmak üzere; numune no, numune adı, konum, numune tarih-saati, koordinatlar ve QR kod bilgilerini içeren ve Şekil 3.9.'da bir örneği gösterilen özel etiketler hazırlanmıştır.



Şekil 3.9. Numune alınması esnasında kullanılan şişelerde kullanılan etiket örnekleri

Daha sonra bu şişeler yüksek sıcaklıkta bulaşık makinesi ile yıkanarak sterilize edilmiştir. Numuneler 3 grup olarak toplam 950 km'lik yol alınarak toplanabilmiştir. Numuneler toplanırken 250 ml'lik şişeler, su yüzeyine hemen hemen paralel olacak biçimde yatırılarak, suyun çalkalanması ve köpürülmesi engellenmiştir. Toplanan örnekler vakit kaybetmeksizin ve mümkün olduğunca hassas taşınarak Sakarya Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesinde bulunan Nükleer Fizik Laboratuvarına getirilmiştir (Şekil 3.10.).



Şekil 3.10. Yer altı kaynak sularından alınıp laboratuvara getirilmiş numunelere ait görüntü

Laboratuvar ortamına getirilen numuneler Bölüm 3.2.'de anlatıldığı gibi çeşitli işlemlerden geçirilerek ölçüm sonuçları kaydedilmiştir.

BÖLÜM 4. DENEYSEL SONUÇLAR

4.1. Ölçülen Radon Aktiviteleri ve Hesaplanan Efektif Dozlar

Bu çalışmada, Sakarya'daki yer altı kaynak sularında radon konsantrasyonunun araştırılması amaçlanmıştır. Sakarya iline ait 35 farklı noktadan 250 ml'lik cam şişeler ile numuneler toplanarak Sakarya Üniversitesi Nükleer Fizik Laboratuvarına ulaştırılmıştır. 12.02.2020-18.02.2020 tarihleri arasında numuneler belirlenen noktalardan toplanarak laboratuvara konulmuş ve 12.02.2020-21.02.2020 tarihleri arasında da laboratuvarında numunelerin incelenmesi tamamlanmıştır. Ölçümler yapılırken numune alımı ile laboratuvar ortamına getirilmesi arasında acele edilerek, mümkün olduğu kadar az süre geçirilmeye dikkat edilmiştir. En az 1,8 ve en fazla 130,1 saat süre geçirilmiştir. Yapılan ölçümler laboratuvardaki RAD-7 (DurrIDGE Co, USA) radon dedektörü ile yapılmıştır. RAD-7 elektronik bir katı hal alfa dedektörüdür. Bölüm 3.2.'de yer verilen ölçüm teknikleri ile ^{222}Rn aktiviteleri elde edilmiş ve çeşitli düzeltme faktörleri ile çarpılarak Tablo 4.3.'e işlenmiştir. RAD-7 ve aparatları kullanılarak her bir numune için dörder adet ölçüm yapılmıştır. Bu ölçümler sonucunda dedektörün yazıcısından alınan slip ile ölçümlere ait spektrumlar, ortalama aktiviteler, standart sapmalar, minimum ve maksimum radon aktiviteleri elde edilmiştir. Numune elde edilmesi ile ölçümler arasındaki süreden dolayı Radon bozunmaya devam edeceği için düzeltme faktörleri (DCF) hesaba katılarak işlemlere devam edilmiştir. DCF aşağıda verilen bağıntı kullanılarak hesaplanmıştır.

$$DCF = \exp(T/\tau) \quad (4.1)$$

Burada bozunma süresi T ve ^{222}Rn 'nin ortalama ömrü de τ ile gösterilmiştir. ^{222}Rn 'nin ortalama ömrü 132,4 saat civarındadır. Yukarıda Denklem 4.1 ile verilen DCF hesaplama bağıntısı kullanılarak her numune için ayrı ayrı düzeltme faktörleri hesaplanmıştır.

Toplanan numunelere ait enlem-boylam, rakım ve kaynak türü bilgileri Tablo 4.1.'de, numunelerin alınma ve ölçüm tarihleri ile DCF bilgileri Tablo 4.2.'de, DCF eklenmiş deneysel sonuçlar ise Tablo 4.3.'te sunulmuştur.

Tablo 4.1. İncelenen numunelere ait koordinat, rakım ve kaynak türü bilgileri

Numune No.	Numune Adı	Enlem	Boylam	Rakım	Numune Türü
1	Adapazarı 1	40.930283	30.341190	50 m.	Kaynak
2	Adapazarı 2	40.852669	30.425229	15 m.	Kaynak
3	Adapazarı 3	40.828073	30.274084	55 m.	Kaynak
4	Akyazı 1	40.695672	30.594662	40 m.	Kaynak
5	Akyazı 2	40.673001	30.664443	50 m.	Kaynak
6	Akyazı 3	40.597212	30.670103	130 m.	Kaynak
7	Akyazı 4	40.553816	30.797786	670 m.	Kaynak
8	Arifiye	40.701606	30.336583	85 m.	Kaynak
9	Erenler	40.757334	30.506605	60 m.	Kaynak
10	Ferizli	40.971442	30.530938	55 m.	Kaynak
11	Geyve 1	40.611014	30.330538	60 m.	Kaynak
12	Geyve 2	40.545351	30.324389	325 m.	Kaynak
13	Geyve 3	40.480120	30.266957	145 m.	Kaynak
14	Geyve 4	40.471835	30.363121	390 m.	Kaynak
15	Hendek 1	40.869931	30.744702	720 m.	Kaynak
16	Hendek 2	40.770103	30.665223	45 m.	Kaynak
17	Hendek 3	40.716168	30.756110	180 m.	Kaynak
18	Hendek 4	40.717481	30.796229	350 m.	Kaynak
19	Karapürçek	40.625117	30.538237	260 m.	Kaynak
20	Karasu 1	40.990474	30.607972	160 m.	Kaynak
21	Karasu 2	40.970949	30.758541	275 m.	Kaynak
22	Karasu 3	41.066857	30.774539	20 m.	Kaynak
23	Karasu 4	41.096630	30.530579	60 m.	Kaynak
24	Kaynarca 1	41.100950	30.385852	50 m.	Kaynak
25	Kaynarca 2	41.049823	30.286168	85 m.	Kaynak
26	Kaynarca 3	40.980596	30.269477	85 m.	Kaynak
27	Kocaali 1	40.927562	30.811154	730 m.	Kaynak
28	Kocaali 2	41.030971	30.889675	110 m.	Kaynak
29	Pamukova 1	40.541236	30.230488	340 m.	Kaynak
30	Pamukova 2	40.516164	30.114477	180 m.	Kaynak
31	Sapanca	40.668296	30.283919	340 m.	Kaynak
32	Serdivan	40.748553	30.324237	150 m.	Kaynak
33	Söğütlü	40.917696	30.577364	45 m.	Kaynak
34	Taraklı 1	40.410709	30.473005	450 m.	Kaynak
35	Taraklı 2	40.396552	30.429606	385 m.	Kaynak

* Bu tablodaki enlem-boylam bilgilerinin tespitinde Google Haritalar'ın verileri kullanılmıştır.

Tablo 4.2. İncelenen numunelere ait alınma ve ölçüm tarihleri ile DCF bilgileri

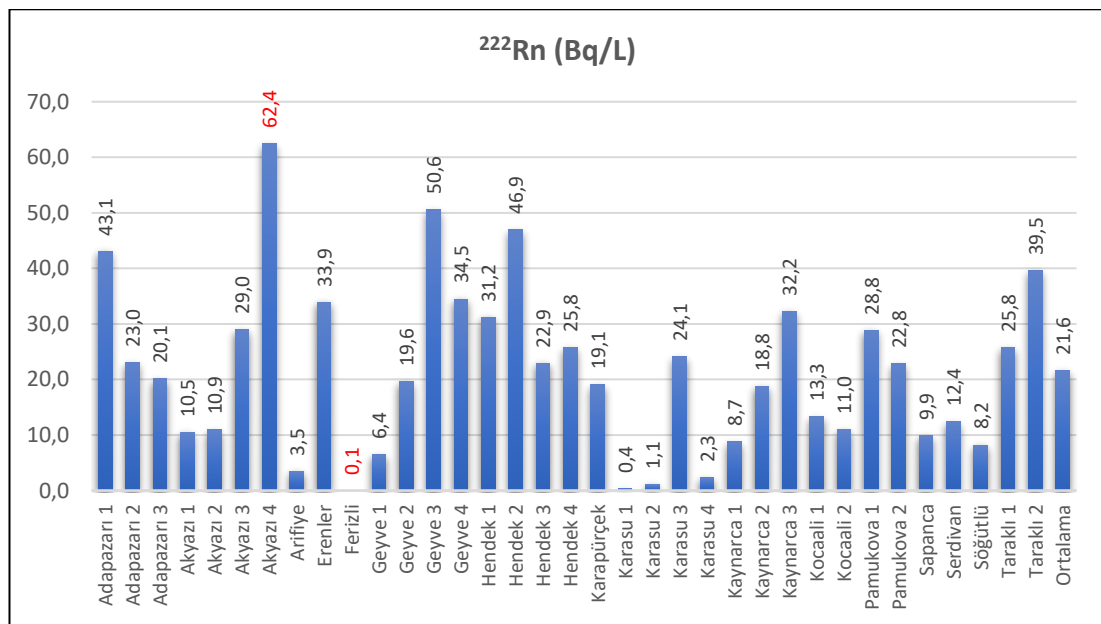
Numune No.	Numune Adı	Numune Tarih/Saati	Ölçüm Tarih/Saati	Geçirilen Süre (saat)	DCF
1	Adapazarı 1	18.02.2020 15:30	21.02.2020 11:51	68,3	1,676
2	Adapazarı 2	18.02.2020 10:00	21.02.2020 12:32	74,5	1,756
3	Adapazarı 3	18.02.2020 15:50	21.02.2020 15:24	71,6	1,717
4	Akyazı 1	13.02.2020 08:10	18.02.2020 18:17	130,1	2,672
5	Akyazı 2	13.02.2020 08:30	18.02.2020 17:11	128,7	2,643
6	Akyazı 3	13.02.2020 06:30	17.02.2020 14:29	104	2,193
7	Akyazı 4	13.02.2020 07:20	17.02.2020 15:39	104,3	2,199
8	Arifiye	12.02.2020 10:20	14.02.2020 10:51	48,5	1,443
9	Erenler	13.02.2020 11:00	14.02.2020 16:40	29,7	1,251
10	Ferizli	18.02.2020 11:00	21.02.2020 10:35	71,6	1,717
11	Geyve 1	12.02.2020 09:45	14.02.2020 09:36	47,9	1,435
12	Geyve 2	12.02.2020 09:20	13.02.2020 16:23	31	1,264
13	Geyve 3	12.02.2020 08:00	12.02.2020 16:03	8	1,063
14	Geyve 4	12.02.2020 07:40	12.02.2020 15:29	7,8	1,061
15	Hendek 1	13.02.2020 09:45	17.02.2020 13:18	99,6	2,121
16	Hendek 2	13.02.2020 10:30	14.02.2020 12:04	25,6	1,213
17	Hendek 3	13.02.2020 08:45	17.02.2020 12:05	99,3	2,118
18	Hendek 4	13.02.2020 09:00	17.02.2020 10:57	98	2,096
19	Karapürçek	13.02.2020 06:00	14.02.2020 15:31	33,5	1,288
20	Karasu 1	18.02.2020 11:20	20.02.2020 15:35	52,3	1,484
21	Karasu 2	18.02.2020 12:00	20.02.2020 14:24	50,4	1,463
22	Karasu 3	18.02.2020 13:30	20.02.2020 13:06	47,6	1,433
23	Karasu 4	18.02.2020 14:00	20.02.2020 11:58	46,0	1,415
24	Kaynarca 1	18.02.2020 14:30	20.02.2020 10:47	44,3	1,397
25	Kaynarca 2	18.02.2020 15:00	19.02.2020 15:23	24,4	1,202
26	Kaynarca 3	18.02.2020 15:15	19.02.2020 14:16	23,0	1,190
27	Kocaali 1	18.02.2020 12:20	19.02.2020 10:54	22,6	1,186
28	Kocaali 2	18.02.2020 13:00	19.02.2020 13:06	24,1	1,200
29	Pamukova 1	12.02.2020 09:00	13.02.2020 14:57	30	1,254
30	Pamukova 2	12.02.2020 08:40	13.02.2020 13:42	29	1,245
31	Sapanca	12.02.2020 10:10	13.02.2020 17:35	31,4	1,268
32	Serdivan	12.02.2020 11:50	12.02.2020 13:38	1,8	1,014
33	Söğütlü	18.02.2020 10:30	19.02.2020 12:00	25,5	1,212
34	Taraklı 1	12.02.2020 07:00	12.02.2020 14:14	7,2	1,056
35	Taraklı 2	12.02.2020 07:10	12.02.2020 14:52	7,7	1,060

Tablo 4.3. İncelenen numunelere ait düzeltme faktörleri eklenmiş (HC+DCF) deneysel sonuçlar tablosu

Numune No.	Numune Adı	DCF	Min./Maks. Değerler (HC+DCF) Bq/L	Standart Sapma (SD) (HC+DCF)	Rn (HC+DCF) Bq/L
1	Adapazarı 1	1,676	39,2-46,8	3,3	43,1
2	Adapazarı 2	1,756	22,3-23,9	0,7	23,0
3	Adapazarı 3	1,717	18,2-21,1	1,3	20,1
4	Akyazı 1	2,672	10,1-10,9	0,4	10,5
5	Akyazı 2	2,643	8,1-14,1	2,5	10,9
6	Akyazı 3	2,193	26,5-34,9	3,9	29,0
7	Akyazı 4	2,199	57,2-66,8	4,1	62,4
8	Arifiye	1,443	1,7-4,4	1,3	3,5
9	Erenler	1,251	32,2-36,4	2,0	33,9
10	Ferizli	1,717	0,0-0,3	0,1	0,1
11	Geyve 1	1,435	5,4-7,3	1,0	6,4
12	Geyve 2	1,264	16,4-23,3	3,4	19,6
13	Geyve 3	1,063	46,4-53,5	3,0	50,6
14	Geyve 4	1,061	30,2-38,3	3,3	34,5
15	Hendek 1	2,121	29,1-36,1	3,3	31,2
16	Hendek 2	1,213	40,5-51,8	4,8	46,9
17	Hendek 3	2,118	18,7-27,5	3,6	22,9
18	Hendek 4	2,096	20,5-28,7	3,7	25,8
19	Karapürçek	1,288	17,4-20,5	1,3	19,1
20	Karasu 1	1,484	0,0-1,0	0,4	0,4
21	Karasu 2	1,463	0,8-2,0	0,6	1,1
22	Karasu 3	1,433	22,6-27,1	2,0	24,1
23	Karasu 4	1,415	16,-3,3	0,8	2,3
24	Kaynarca 1	1,397	6,6-11,9	2,4	8,7
25	Kaynarca 2	1,202	17,6-19,8	1,1	18,8
26	Kaynarca 3	1,190	26,5-35,6	4,0	32,2
27	Kocaali 1	1,186	12,1-15,2	1,4	13,3
28	Kocaali 2	1,200	10,2-11,5	0,7	11,0
29	Pamukova 1	1,254	24,6-31,8	3,6	28,8
30	Pamukova 2	1,245	20,2-25,8	2,4	22,8
31	Sapanca	1,268	7,4-12,4	2,1	9,9
32	Serdivan	1,014	11,8-12,8	0,5	12,4
33	Söğütlü	1,212	6,3-10,5	1,9	8,2
34	Taraklı 1	1,056	22,3-29,4	2,9	25,8
35	Taraklı 2	1,060	36,5-44,1	3,2	39,5

RAD-7 dedektörünün ölçüm sonuçlarını etkileyebilecek diğer faktör ise nemdir. Ölçümler sırasında dedektörün içerisindeki nem oranının %10'ların altında olması, nem dolayısıyla oluşabilecek hataları azaltacaktır. Aksi durumda radon ve akabinde oluşan bozunum ürünlerinde çıkan parçacıkların dedektördeki silikon sensörler tarafından algılanmasını zorlaştıracaktır. RAD-7 dedektörüne ait “Durrige Terminal” ve “Capture” yazılımları veri alışverişi, analizler ve grafik çizimleri yapılabilmektedir. “Capture” yazılımı cihaz içerisindeki nem oranını belirleyerek, “Nem Düzeltme (HC) Faktörü” ’nü hesaplayıp aktivite içerisine otomatik olarak ekleyebilmektedir. (DCF) Bozunum düzeltme ve (HC) nem düzeltme faktörleri eklenmiş ölçüm sonuçları Tablo 4.3.’te verilmiştir. Cihaz tarafından yapılan nem düzeltmeleri eklendikten sonra radon aktivite büyüklükleri ortalama %10 kadar artış olduğu görülmüştür. Asıl artışın (DCF) bozunum düzeltme faktöründen (x 1,014-2,672) geldiği görülmektedir.

Tablo 4.3.’te verilen DCF-HC faktörleri eklenmiş konsantrasyon değerleri Şekil 4.1.’de grafiğe dökülmüştür. Hesaplanan değerler incelendiğinde en düşük değer 0,1 Bq/L olarak Ferizli numunesine, en yüksek değer ise 62,4 Bq/L ile Akyazı-4 numunesine ait olduğu, ayrıca Sakarya ilinden toplanan 35 numunenin genel ortalamasının da 21,6 Bq/L olduğu görülmektedir.

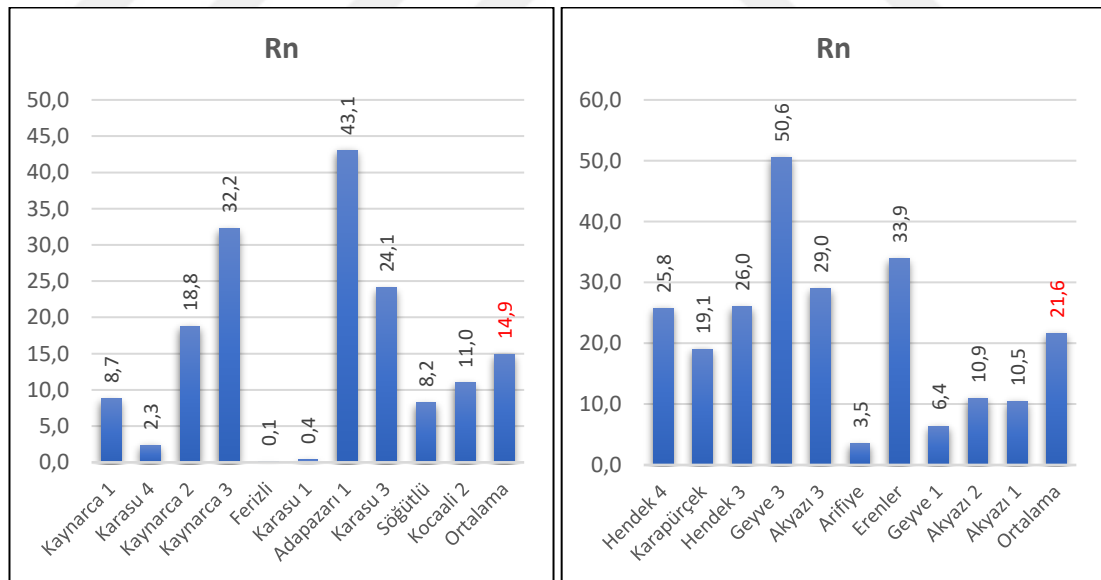


Şekil 4.1. Ölçülen radon konsantrasyon değerleri grafiği

Numunelerin konsantrasyon değerleri Kuzey Anadolu Deprem Fayına olan yakınlık-uzaklıklarına göre; en uzak 10 numune ve en yakın 10 numune olarak incelemek istersek, Tablo 4.4. ve Şekil 4.2.'deki sonuçlar elde edilecektir.

Tablo 4.4. İncelenen numunelerin fay hattına olan uzaklıkları

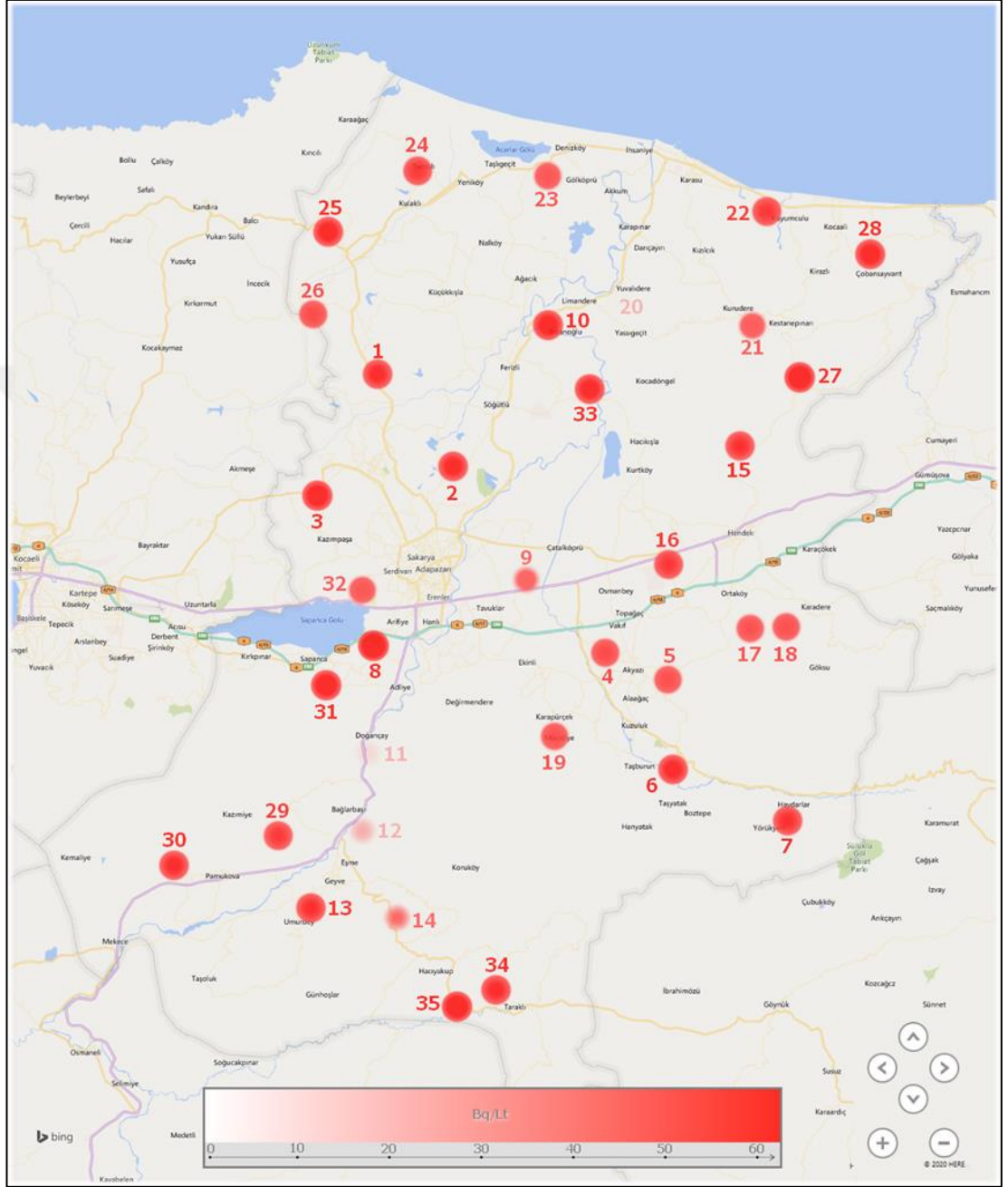
Numune	Fay Hattı Uzaklık(km)	Rakım	²²² Rn	Numune	Fay Hattı Uzaklık(km)	Rakım	²²² Rn
Kaynarca 1	44	50	8,7	Hendek 4	1	350	25,8
Karasu 4	43	60	2,3	Karapürçek	1	260	19,1
Kaynarca 2	37	85	18,8	Hendek 3	1	180	26,0
Kaynarca 3	29	85	32,2	Geyve 3	1	145	50,6
Ferizli	26	55	0,1	Akyazı 3	1	130	29,0
Karasu 1	25	160	0,4	Arifiye	1	85	3,5
Adapazarı 1	24	50	43,1	Erenler	1	60	33,9
Karasu 3	24	20	24,1	Geyve 1	1	60	6,4
Söğütü	18	45	8,2	Akyazı 2	1	50	10,9
Kocaali 2	17	110	11,0	Akyazı 1	1	40	10,5
Ortalama	29	72	14,9	Ortalama	1	136	21,6



Şekil 4.2. İncelenen numunelerin fay hattına uzaklıklarını gösterir grafik

Sonuçları incelediğimizde deprem fayına en uzak on numunenin ortalamasının 14,9 Bq/L ve en yakın on numunenin ortalamasının da 21,6 Bq/L olduğu görülmektedir. Fay hatları ile radon konsantrasyonları arasında ilişki olabileceği düşünülebilir.

Sakarya ili yeraltı kaynak sularından alınan numunelerin radon gazı yoğunlukları haritası Şekil 4.3.'te gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Sakarya ili yeraltı kaynak sularından alınan numunelerin radon gazı yoğunlukları

Kaynak suları üzerinde çeşitli ülke ve illerde yapılan radon konsantrasyon ölçümleri Tablo 4.5.'te sunulmuştur.

Tablo 4.5. Bu çalışma ile diğer ülkelerde ve illerimizde yapılan çalışmalarının kıyaslanması

Numune Türü	Rn (Bq/L)	Çalışma	Yer
Diğer Ülkeler			
Kaynak	10-28	Kaur vd. (2019)	Hindistan
Kaynak	6,2-20,10	Khan, vd. (2018)	Pakistan
Kaynak	1,4-105	Fonollasa vd. (2016)	İspanya
Kaynak	3,1-187,3	Moldovan vd. (2014)	Romanya
Kaynak	0,70-27,6	Khattak vd. (2014)	Pakistan
Kaynak	11,4-83,4	Mowlavi vd. (2009)	İran
Kaynak	2-129,3	Cosma vd. (2008)	Romanya
Kaynak	0,46-49,6	Abdallah vd. (2007)	Lübnan
Diğer İller			
Kaynak	0,704-76,24	Özer (2019)	Bursa
Kaynak	0,334-7,810	Uludağ (2018)	İzmit
Kaynak	1,47-14,76	Doğan vd. (2018)	İstanbul
Kaynak	1,85-99,27	Erdoğan vd. (2013)	Konya
Kaynak	0,43-0,69	Erdoğan vd. (2016)	Osmaniye
Kaynak	0,74-59,65	Yakut vd. (2013)	Sakarya
Kaynak	0,39-19,21	Yalçın vd. (2011)	Kastamonu
Kaynak	0,334-7,810	Yiğitoğlu vd. (2010)	Tokat
Kaynak	0,085-44,57	Akkurt (2006)	Afyon
Kaynak	0,1-62,4	Bu Çalışma (2020)	Sakarya

Tablo 4.5.'te görüldüğü üzere Yakut vd. (2013) tarafından Sakarya'da yapılan çalışma ile bu çalışma kıyaslandığında benzer sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Aynı şekilde yapılan bu çalışmanın, Özer (2019) tarafından Bursa'da, Erdoğan vd. (2013) tarafından Konya'da, Akurt vd. (2006) tarafından Afyon'da yapılan radon konsantrasyon ölçümleri ile benzer ve karşılaştırılabilir olduğu görülmüştür. Uludağ (2018) tarafından İzmit'te, Doğan vd. (2018) tarafından İstanbul'da, Erdoğan vd. (2016) tarafından Osmaniye'de, Yalçın vd. (2011) tarafından Kastamonu'da ve Yiğitoğlu vd (2010) tarafından Tokat'ta yapılan ölçümlere göre ise biraz fazla, ancak yine de karşılaştırılabilir olduğu görülmüştür.

Bu çalışma sonuçlarıyla Romanya (Moldova vd. 2014), Romanya (Cosma vd. 2008), İspanya (Fonollasa vd. 2016) ülkelerinde yapılan ölçümlere göre çok düşük, İran (Mowlavi vd.2009), Pakistan (Khattak vd. 2014), Lübnan (Abdallah vd. 2007), Hindistan (Kaur vd. 2019) ve Pakistan (Khan, F. vd. 2018) ile benzer ve karşılaştırılabilir olduğu görülmüştür.

Su tüketimi yoluyla insanların maruz kalacağı radyasyona yıllık etkin doz denir. Etkin dozun hesaplanmasında 4.2. bağıntısı kullanılır. Burada C_{Rn} tüketilen suyun radon konsantrasyonu, I_a yıllık bir insanın tüketmiş olduğu su miktarı ve D_f ise doz dönüşümü faktörüdür. UNSCEAR doz dönüşümü faktörünü $3,5 \text{ nSvBq}^{-1}$ olarak önermektedir. Yıllık su tüketimi ise yetişkinler için 500 Lt, çocuklar için 350 Lt ve bebekler için ise 150 Lt'dir (UNSCEAR, 2000).

$$D_{içme}^{Rn} = C_{Rn} \times I_a \times D_f \quad (4.2)$$

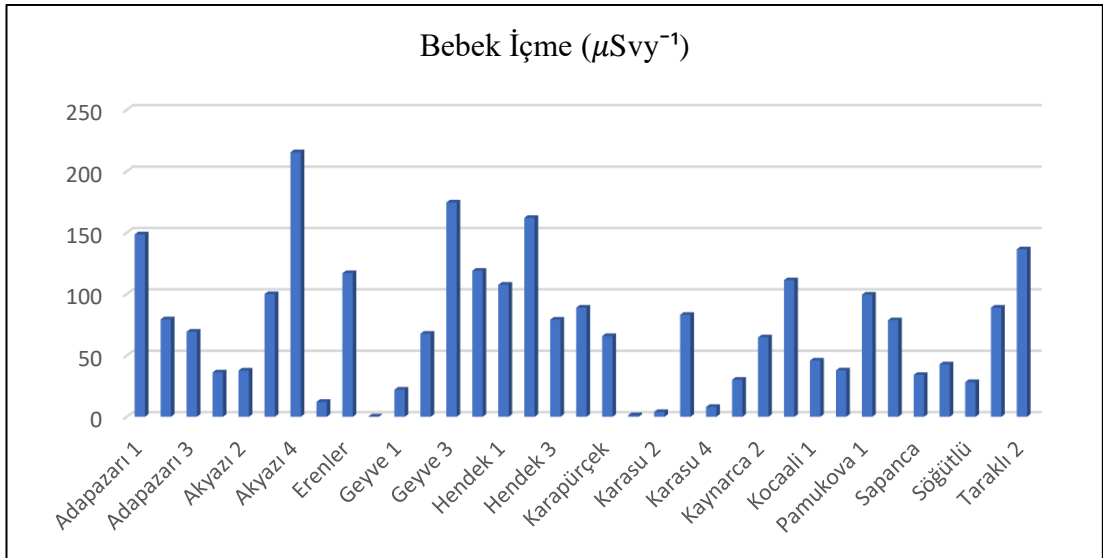
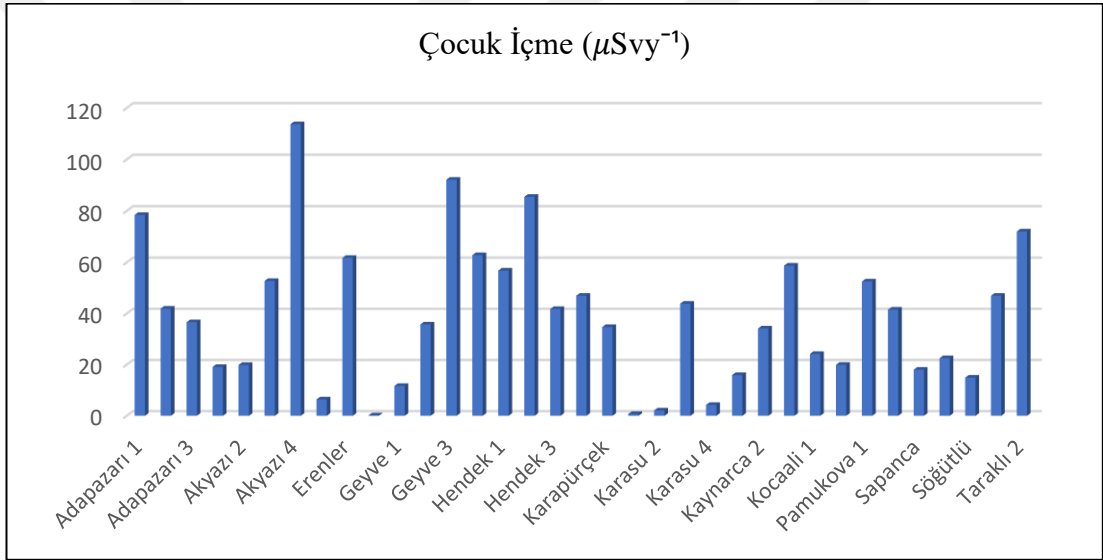
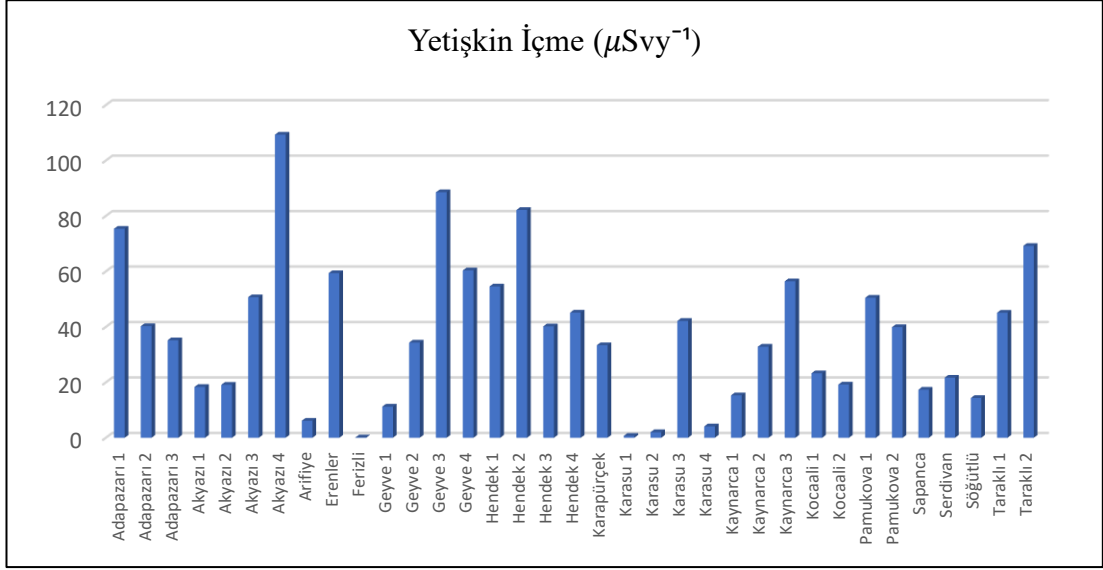
Denklem 4.2 kullanılarak hesaplamalar yapılmış, çıkan sonuçlar Tablo 4.6. ve Şekil 4.4.'te gösterilmiştir.

Tablo 4.6. İncelenen numunelerin tüketilmesiyle insanların maruz kalacağı yıllık etkin dozlar

Numune No	Numune Adı	Rn (Bq/L) (HC-DCF)	İçme (μSvy^{-1})		
			Yetişkin	Çocuk	Bebek
01	Adapazarı 1	43,1	75,365	78,380	148,577
02	Adapazarı 2	23,0	40,252	41,862	79,355
03	Adapazarı 3	20,1	35,154	36,560	69,304
04	Akyazı 1	10,5	18,329	19,062	36,133
05	Akyazı 2	10,9	19,103	19,867	37,659
06	Akyazı 3	29,0	50,663	52,690	99,879
07	Akyazı 4	62,4	109,278	113,649	215,434
08	Arifiye	3,5	6,135	6,380	12,094
09	Erenler	33,9	59,336	61,710	116,977
10	Ferizli	0,1	0,130	0,135	0,255

Tablo 4.6. (Devamı)

Numune No	Numune Adı	Rn (Bq/L) (HC-DCF)	İçme (μSvy^{-1})		
			Yetişkin	Çocuk	Bebek
11	Geyve 1	6,4	11,203	11,651	22,086
12	Geyve 2	19,6	34,294	35,666	67,608
13	Geyve 3	50,6	88,522	92,063	174,514
14	Geyve 4	34,5	60,334	62,747	118,944
15	Hendek 1	31,2	54,563	56,745	107,567
16	Hendek 2	46,9	82,151	85,437	161,955
17	Hendek 3	22,9	40,133	41,738	79,118
18	Hendek 4	25,8	45,106	46,910	88,924
19	Karapürçek	19,1	33,361	34,696	65,769
20	Karasu 1	0,4	0,667	0,694	1,316
21	Karasu 2	1,1	1,992	2,072	3,928
22	Karasu 3	24,1	42,120	43,804	83,036
23	Karasu 4	2,3	4,086	4,249	8,055
24	Kaynarca 1	8,7	15,306	15,919	30,175
25	Kaynarca 2	18,8	32,820	34,133	64,703
26	Kaynarca 3	32,2	56,429	58,687	111,247
27	Kocaali 1	13,3	23,242	24,172	45,820
28	Kocaali 2	11,0	19,167	19,934	37,787
29	Pamukova 1	28,8	50,467	52,486	99,492
30	Pamukova 2	22,8	39,877	41,472	78,615
31	Sapanca	9,9	17,306	17,998	34,117
32	Serdivan	12,4	21,642	22,508	42,666
33	Söğütlü	8,2	14,343	14,916	28,275
34	Taraklı 1	25,8	45,098	46,902	88,907
35	Taraklı 2	39,5	69,184	71,951	136,391



Şekil 4.4. Yetişkin, çocuk ve bebekler için hesaplanan yıllık efektif dozların grafikleri

Bu tez çalışmasında hesaplanan yıllık ortalama etkin dozlar ile farklı yerler için çıkartılan etkin dozların kıyaslaması Tablo 4.7.'de gösterilmiştir.

Tablo 4.7. Farklı su konsantrasyonları için bulunan yıllık etkin dozların kıyaslanması

Yer	Çalışma	Yıllık Etkin Doz (μSvy^{-1})
Samsun-Rize	Duran vd. (2017)	56,03
Afyon	Yalım vd. (2007)	74
Kastamonu	Yalçın vd. (2011)	0,8-49,9
Konya	Erdoğan vd. (2013)	0,37-19,85
Bursa	Özer vd. (2019)	61,34
Sakarya	Bu Çalışma (2020)	38

Tablo 4.7.'de görüldüğü üzere bu çalışmada hesaplanan değerlerin; Duran vd. (2017) tarafından Samsun-Rize'de, Yalım vd. (2007) tarafından Afyon'da, Yalçın vd. (2011) tarafından Kastamonu'da, Erdoğan vd. (2013) tarafından Konya'da, Özer (2019) tarafından Bursa'da hesaplanan büyüklüklerle kıyaslanabilir olduğu ve UNSCEAR'ın belirlediği $100 \mu\text{Svy}^{-1}$ 'lik değerinin altında kaldığı görülmektedir. Bu sınır değeri yetişkinler için sadece Akyazı 4 numunesinde aşılmış ve $109 \mu\text{Svy}^{-1}$ olarak bulunmuştur.

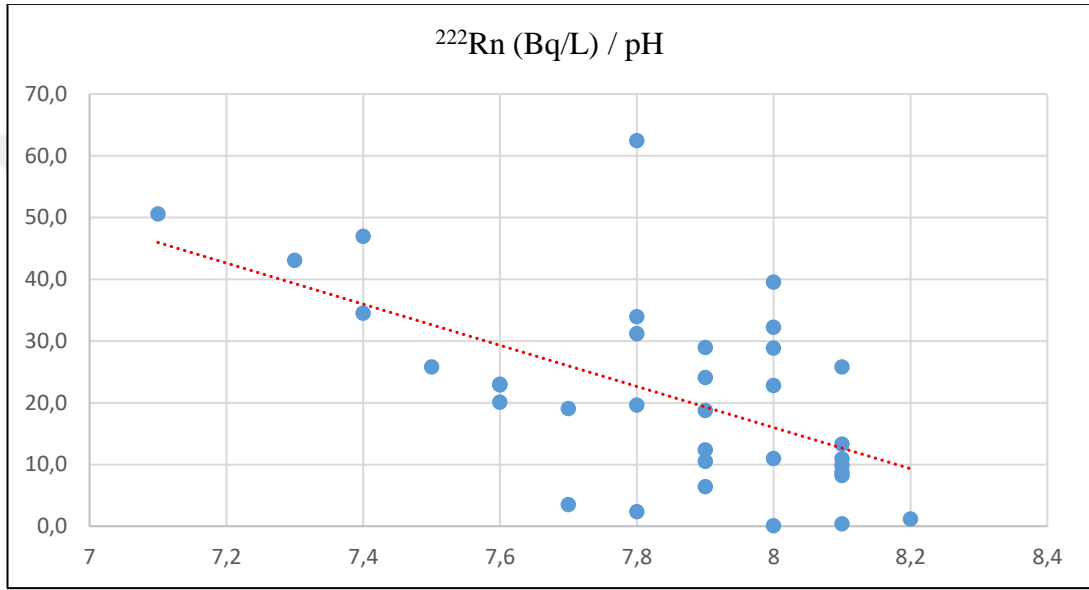
4.2. Suların Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi

Toplanan kaynak sularının radon konsantrasyonları ölçüldükten sonra, suların fiziksel özellikleri (sıcaklık, pH, ORP, EC) Adwa AD8000 marka/model cihaz ile ölçülmüştür. Ölçüm yapılmadan önce $\text{pH}=7,01$ ve $\text{pH}=10,1$ ölçüm sıvıları ile kalibrasyon yapılmıştır. Ölçüm sonuçları Tablo 4.8.'de verilmiştir. pH maddenin asitlik derecesini belirlemektedir. ORP değerleri "Oksidasyon İndirgeme Potansiyeli" dir. Birimi mV (milivolt) ile ifade edilir. EC değerleri de "Elektriksel İletkenlik" olarak tanımlanır. Birimi de μS (mikro Siemens) ile verilir.

Tablo 4.8. İncelenen numunelerin belirlenen fiziksel (pH, EC, ORP) özellikleri

Numune Adı	²²² Rn Bq/L	Sıcaklık (C°)	pH	ORP (mV)	EC (µS)
Adapazarı 1	43,1	19,2	7,3	17,1	548
Adapazarı 2	23,0	19,1	7,6	8,5	410
Adapazarı 3	20,1	19,1	7,6	9,8	560
Akyazı 1	10,5	19,3	7,9	-0,2	290
Akyazı 2	10,9	19,3	8,1	-18	289
Akyazı 3	29,0	19,3	7,9	-4,3	297
Akyazı 4	62,4	19,3	7,8	5,1	329
Arifiye	3,5	19,2	7,7	3,2	258
Erenler	33,9	19,2	7,8	-2,2	686
Ferizli	0,1	19,1	8	-13	200
Geyve 1	6,4	19,2	7,9	-7,2	214
Geyve 2	19,6	19,3	7,8	-3,2	381
Geyve 3	50,6	19,3	7,1	37,5	437
Geyve 4	34,5	19,3	7,4	20,7	1130
Hendek 1	31,2	19,3	7,8	5,4	106
Hendek 2	46,9	19,2	7,4	19	264
Hendek 3	22,9	19,3	7,6	13,2	116
Hendek 4	25,8	19,3	7,5	15	163
Karapürçek	19,1	19,3	7,7	3,3	386
Karasu 1	0,4	19,4	8,1	-17,6	182
Karasu 2	1,1	19,4	8,2	-28	42
Karasu 3	24,1	19,3	7,9	-2,7	283
Karasu 4	2,3	19,2	7,8	0,5	218
Kaynarca 1	8,7	19,2	8,1	-16,7	430
Kaynarca 2	18,8	19,3	7,9	-5,7	381
Kaynarca 3	32,2	19,3	8	-10,8	361
Kocaali 1	13,3	19,2	8,1	-16,4	171
Kocaali 2	11,0	19,3	8	-12,3	218
Pamukova 1	28,8	19,4	8	-14,3	317
Pamukova 2	22,8	19,4	8	-10,4	345
Sapanca	9,9	19,5	8,1	-19,5	131
Serdivan	12,4	19,4	7,9	-9	337
Söğütlü	8,2	19,4	8,1	-16,3	381
Taraklı 1	25,8	19,5	8,1	-15,8	778
Taraklı 2	39,5	19,5	8	-12,3	511

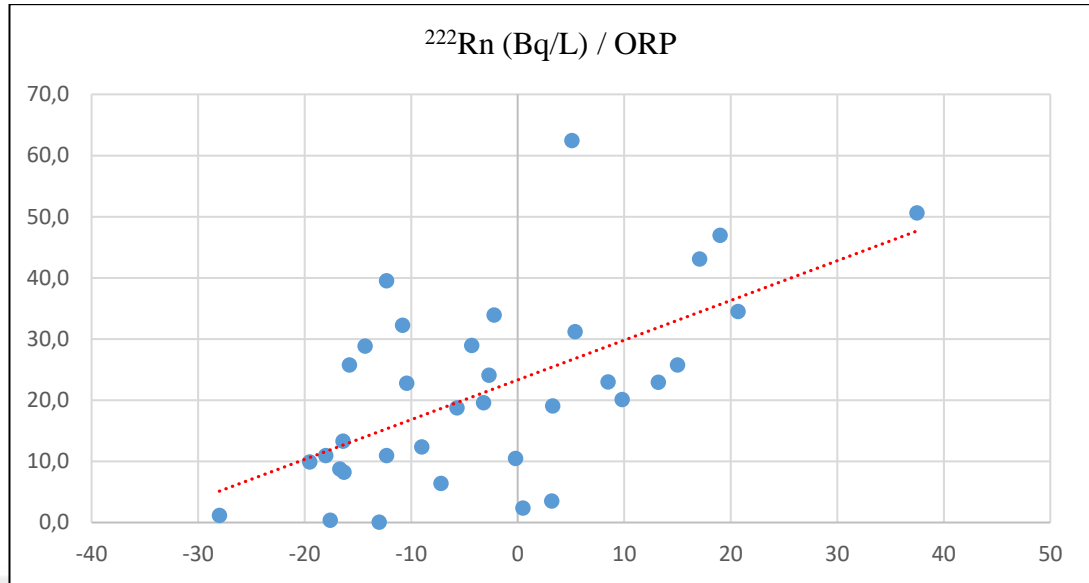
Maddeleri asidik veya bazik olarak değerlendirebilmek için içerisindeki hidrojen (H⁺) ve hidroksil (OH⁻) iyonlarının derişimi incelenmelidir. pH değerini bu derişim oranı ile ilgilidir. H⁺ derişimi OH⁻ den fazla ise madde asidiktir ve pH ölçümü de 7'nin altındadır. Eğer OH⁻ derişimi H⁺ dan fazla ise madde baziktir denir ve pH ölçümü de 7'nin üzerinde çıkacaktır. Hidrojen (H⁺) ve hidroksil (OH⁻) iyonları eşit ise pH değeri 7 ölçülür ve madde nötrdür denir. Ölçülen pH değerleri grafiğı Şekil 4.5.'te olduğu gibidir.



Şekil 4.5. Ölçülen pH değerleri grafiğı

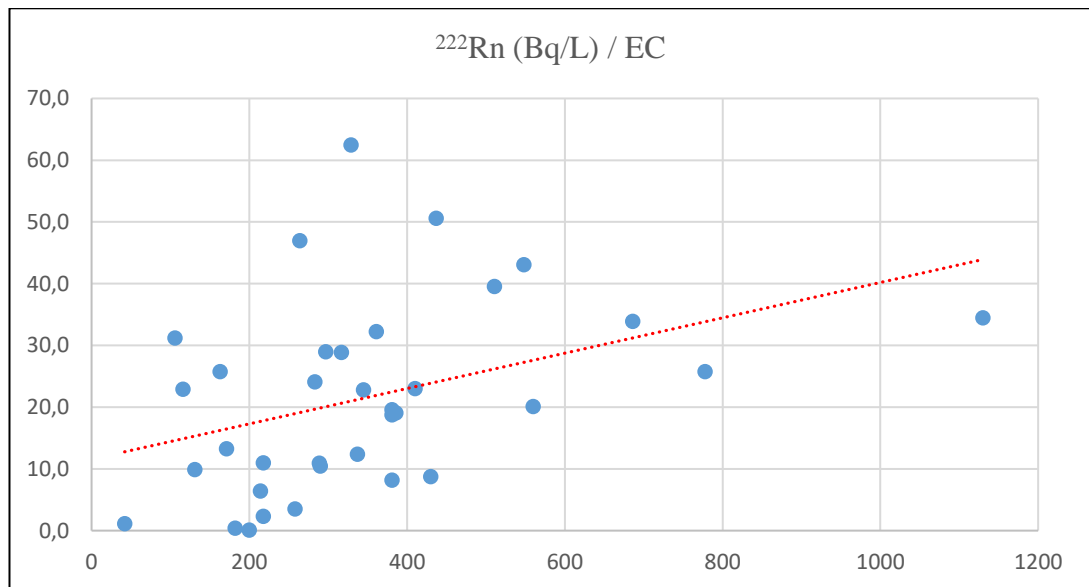
Ölçüm sonuçları incelendiğinde pH değerleri 7,1 ile 8,2 arasında değıştığı ve ortalama değerin 7,8 olduğu görülmektedir. En yüksek değer Karasu 2 numunesine aittir. Ölçülen değerlerin tamamının 7'nin üzerinde olması, numunelerin tamamının bazik su olduğunu göstermektedir.

ORP ölçüm değerleri pozitif çıkan numunelerin oksidasyon özelliğı var demektir. Diğer bir değışle Numunenin paslandırıcı, çözücü veya yapı bozucu etkisi vardır. Sonuçlar negatif ise numunenin paslanmayı engellediğı ve antioksidan etkisi olduğu söylenir. Bu çalışmada ölçümlenen ORP değerleri -28 mV – 37,5mV aralığında çıkmıştır. Tüm numunelerin ORP genel ortalaması da -2,8mV olmuştur. Ölçülen ORP değerleri grafiğı Şekil 4.6.'da olduğu gibidir.



Şekil 4.6. Ölçülen ORP değerleri grafiği

EC ölçüm yapılan numunelerin elektriksel iletkenlikleri hakkında bilgi vermektedir. İletkenlik kavramı numune içindeki çözülmüş halde bulunan iyon sayıları ile ilgilidir. Ölçüm sonucunda EC değerleri, $47\mu\text{S} - 1130\mu\text{S}$ aralığında değiştiği görülmüştür. Tüm numunelerin EC genel ortalaması da $347\mu\text{S}$ olmuştur. Ölçülen EC değerleri grafiği Şekil 4.7.'de olduğu gibidir.



Şekil 4.7. Ölçülen EC değerleri grafiği

BÖLÜM 5. SONUÇ

Bu çalışma ile Sakarya'daki yer altı kaynak sularında Radon Konsantrasyonunun araştırılması yapılmıştır. Sakarya iline ait 35 farklı noktadan cam şişeler ile numuneler alınmış ve laboratuvar ortamında incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

- a. İncelenen numunelerden elde edilen radon konsantrasyon miktarları 0,1-62,4 Bq/L arasında çıkmış ve tüm ilden elde edilen sonuçların ortalaması ise 21,6 Bq/L olmuştur. Elde edilen bu sonuçlar Dünya Sağlık Örgütü'nün (WHO) 100 Bq/L olarak belirlediği limit ile kıyaslandığında, sağlık açısından sorun teşkil etmeyecek aralıkta olduğu görülmektedir. Ancak Çevre Koruma Acentesi (EPA)'nın 11 Bq/L olarak belirlediği limitler ile kıyaslandığında ise 23 numunenin limiti aştığı anlaşılmıştır.
- b. Su tüketimi ile birlikte insan vücuduna giren radonun sebep olduğu yıllık etkin doz miktarları ortalamaları, yetişkinler için $38 \mu\text{Svy}^{-1}$, çocuklar için $39 \mu\text{Svy}^{-1}$ ve bebekler için ise $74 \mu\text{Svy}^{-1}$ bulunmuştur. Ayrıca genel ortalama da $50 \mu\text{Svy}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler UNSCEAR'ın belirlemiş olduğu $100 \mu\text{Svy}^{-1}$ 'lık değerin altında kalmaktadır. Bu sınır değeri yetişkinler için sadece Akyazı 4 numunesinde aşılmış ve $109 \mu\text{Svy}^{-1}$ olarak bulunmuştur.
- c. Ölçtüğümüz radon konsantrasyonları ve bulunan yıllık etkin doz eşdeğerleri diğer illerde ve dünyanın çeşitli yerlerinde yapılan araştırmalarla kıyaslandığında ölçümlerin anormal sonuçlar vermediği görülmüştür. Sonuçların güvenilir olduğu iddia edilebilir. Zira konsantrasyon ölçümlerinin hiçbiri WHO'nun 100 Bq/L olarak belirlediği limiti geçmemiştir. Dolayısıyla tezimiz sonunda Sakarya'daki yer altı sularının radon konsantrasyonu ve içme yoluyla alınması halinde yıllık etkin doz eşdeğerleri açısından risk oluşturmadığı söylenebilir.

Bu tez çalışmasında elde edilen numunelerden bazılarının konsantrasyon miktarlarının yüksek çıkmasının sebepleri arasında, numune alınan noktaların Kuzey Anadolu Deprem Fayına olan uzaklıklarının, yeraltı toprak ve su hareketliliklerinin, bölgenin jeolojik yapısından kaynaklanan ve yeraltındaki uranyum ve bozunum zincirinde yer alan element rezervleri vb. etmenler sayılabilir. Sular direkt olarak topraktan çıktığı noktalardan alındığı için, bölgedeki radon hareketlerinden etkilendiği söylenebilir.

Toplanan yer altı kaynak suyu numunelerinin büyük çoğunluğunun yerleşim yerlerine uzak oldukları göz önüne alındığında su tüketiminin az olacağı, maruz kalınan dozların da sağlık açısından risk teşkil edecek boyutlara gelmeyeceği değerlendirilmektedir.

Bu çalışmanın kış döneminde ve tek seferlik ölçümler ile yapılmış olması, bölgenin radon konsantrasyonu hakkında kesin kanıya ulaşmak için yeterli değildir. Zira kesin kanıya ulaşabilmek için yılın farklı zamanlarında ve uzun süreli ölçümler yapılarak analiz edilmelidir.

KAYNAKLAR

- Abdallah, S. M., Habib, R. R., Nuwayhida, R. Y., Chatilac, M., Katuld, G. 2007. Radon measurements in well and springwater in Lebanon. *Radiation Measurements*, 42: 298-303.
- Akkurt, A. 2006. Afyon jeotermal sularında radon (Rn-222) aktivitesi tayini. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Atabey, E. 2013. Türkiye’de Doğal Radyasyon Kaynakları ve Tıbbi Jeolojik Etkileri. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Yerbilimleri ve Kültür Serisi-10, Ankara, 53-64.
- Baykut, S., Akgül T., İnan, S., Seyis, C. 2010. Observation and removal of daily quasi-periodic components in soil radon data. *Radiation Measurements*, 45: 872-879.
- Belin, B., Yalçın, T., Süner, F., Bozkurtoğlu, E., Gelir, A., Güven H. 2002. Earthquake-related chemical and radioactivity changes of thermal water in Kuzuluk-Adapazarı, Turkey. *Journal of Environmental Radioactivity*, 63: 239-249.
- Bol, E., Önalp, A. 2002. Adapazarı Zeminlerinin Jeomorfolojik ve Geoteknik Özellikleri. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Dokuzuncu Ulusal Kongresi, Eskişehir, Anadolu Üniversitesi.
- Bolt, B. A. 1993. *Earthquake and Geological Discovery*, W. H. Freeman and Company, New York, A.B.D, 182-191.
- Botkin, D., Keller, E., 1988. *Environmental Science*, John Willey Sons.
- Canbazoğlu, C. 2004. Elazığ yöresinde doğal radyoaktivite tayini. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
- Cosma, C., Moldovan, M., Dicu, T., Kovacs, T. 2008. Radon in water from Transylvania (Romania). *Radiation Measurements*, 43: 1423-1428.
- Cothorn, C. R., Smith, J. E. 1998. Environmental radon, library of congress cataloging in publication data. *Environmental Science Research*, 59-75.
- Çelebi, N. 1995. Çevresel örneklerde uranyum, radyum ve radon ölçüm tekniklerinin geliştirilmesi. İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
- Davutoğlu, H. 2008. Radon gazı ölçme metotları. Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Doğan, M., Ganioglu, E., Sahin, L., Hafizoğlu, N. 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.

- 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*, 53(1): 91-103.
- Durrani, S. A., Iliç, R. 1997. *Radon Measurements by Etched Track Detectors: Applications in Radiation Protection, Earth Sciences and the Environment*, World Scientific, New Jersey, U.S.A.
- Eisenbud, M., Gesell, T. 1997. *Environmental Radioactivity. From Natural, Industrial, and Military Sources*, 4th Edition, Academic Press.
- Ekin, K. 2013. İzmir-Urla ve çevresindeki sismik aktivitenin sürekli radon ölçümlerine olan etkisinin incelenmesi. Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Bölümü, Yüksek Lisans Tezi.
- Erdoğan, M., Damla, N., Kara, A., Sahan, H., Işık, U., Tel, E., Sahan, M. 2016. Spatial distribution of ^{222}Rn concentrations and dose estimations in various waters. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 22(4): 927-940.
- Erdoğan, M., Eren, N., Demirel, S., Zedef, V. 2013. Determination of Radon Concentration Levels in Well Water in Konya, Turkey. *Radiation Protection Dosimetry*, 156(4): 489-494.
- Ereeş, F. S., Aytaç, S., Saç, M. M., Yener, G., Şalk, M. 2007. Radon concentrations in thermal waters related to seismic events along faults in the Denizli Basin, Western Turkey. *Radiation Measurements*, 42: 80-86.
- Erkmen, C., Kuterdem, N. K., Özaraç, V., Tekin, B. M., Eravcı, B., Yaman, M., Aktan, T., Albayrak, H., Tepeuğur, E. 2007. Doğu Anadolu Fayı'nın Gölbaşı-Türkoğlu Arasında Kalan Kesiminin Tektonik Özellikleri ve Paleosismolojisi. *Esen ARPAT Doğu Anadolu Fay Zonu Sempozyumu*, Diyarbakır, 24-27.
- Fonollosa, E., Peñalver, A., Borrull, F., Aguilar, C. 2016. Radon in spring waters in the south of Catalonia. *Journal of Environmental Radioactivity*, 151: 275-281.
- Gollnick, D. A. 1988. *Basic Radiation Protection Technology*, Pacific Radiation.
- Güloğlu, A. 2007. Çeşme bölgesi aktif fay hatlarındaki kaplıçalarda radon anomalileri ile sismik aktiviteler arasındaki ilişkilerin incelenmesi. Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Gündoğan, A. 2016. Kilis ili sularında radon gazı ölçümü. Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Hacıosmanoğlu, T. 2013. Temel radyasyon fiziği ve Tanımlar. İçinde: Nükleer Tıp Teknisyen Notları. Türkiye Nükleer Tıp Derneği, Ankara, 7-22, http://www.tsnm.org/wp-content/uploads/2019/03/teknisyen_el_kitabi.pdf, Erişim: 10.07.2020.
- Halliday, D., Resnick, R. 1974. *Fundamentals of Physics*, John Wiley & Sons, Inc. USA.
- ICRP. 2009. International Commission on Radiological Protection Statement on Radon, ICRP Ref 00-902-09.

- Işık, S. 2007. Sakarya'nın tarım coğrafyası. Sakarya Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Coğrafya Bölümü, Yüksek Lisans Tezi.
- International Atomic Energy Agency (IAEA). 1980. Research Reactor Core Conversion from the Use of High Enriched Uranium to the Use of Low Enriched Uranium Fuels Guidebook, IAEATECDOC-233.
- IAEA. 1996. Radiation Safety. IAEA Division of Public Information, 96-00725 IAEA/PI/A47E.
- IAEA. 2004. International Atomic Energy Agency. Radiation, People and The Environment. IAEA/PI/A.75/04-00391, 15-17.
- İlhan, M. Z. 2015. Afyonkarahisar şehir merkezinde toprakta radon aktivite konsantrasyonunun belirlenmesi. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- İnan, S., Akgül, T., Seyis, C., Saatçılar, R., Baykut, S., Ergintav, S., Baş, M. 2008. Geochemical monitoring in the Marmara region (NW Turkey): A search for precursors of seismic activity. Journal of Geophysical Research, 113 (B03401): 1-15.
- İnceöz, M., Baykara, O., Aksoy, E., Doğru, M. 2006. Measurements of soil gas radon in active fault systems: A case study along the North and East anatolian fault systems in Turkey. Radiation Measurements, 41: 349-353.
- Kapdan, E. 2009. Adapazarı merkezi kış dönemi radon ölçüm ve analizleri. İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, Enerji Bilim ve Teknoloji Bölümü, Yüksek Lisans Tezi.
- Karahan, G. 1997. İstanbul'un çevresel doğal radyoaktivitesinin tayini ve doğal radyasyonların yıllık etkin doz eşdeğeri. İstanbul Teknik Üniversitesi, Nükleer Enerji Enstitüsü, Doktora Tezi.
- 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).
- Kaynar, S. Ç. 2011. Akhisar-Gölmarmara-Gördes-Sındırgı bölgesi doğal radyoaktivitesinin jeolojik yapı ile ilişkisinin incelenmesi. Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Bölümü, Doktora Tezi.
- Khan, F., Wazir, Z., Ali, N., Khattak, S. A. 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.
- Khattak, N. U., Khan, M. A., Shah, M. T., Ali, N. 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.
- Krane, K.S., 2001. Nükleer Fizik. 1. Cilt, Ders Kitabı, Çeviren: Başar Şarer, Birinci Baskı, Palme Yayıncılık, Ankara.

- Kumar, R., Mahur, A. K., Rao, N. S., Sengupta, D., Prasad, R. 2008. Radon exhalation rate from sand samples from the newly discovered high background radiation area at Erasama beach placer deposit of Orissa, India. *Radiation Measurements*, 43: 508-511.
- Kurt, S., Duman, E. 2016. Sakarya ilinde kentsel gelişim sürecinin arazi kullanımını ve jeomorfolojik birimler üzerindeki etkisinin zamansal değişimi. *Marmara Coğrafya Dergisi*, (34): 268-282.
- Malling, D. C., Fiorucci, S., Pangilinan, M., Chapman, J. J., Faham, C. H., Verbus, J. R. 2013. Dark Matter Search Backgrounds From Primordial Radionuclide Chain Disequilibrium. *Instrumentation and Methods For Astrophysics*, In Press.
- Moldovan, M., Benea, V., Niță, D. C., Papp, B., Burghel, B. D., Bican-Brișan, N., Cosma, C. 2014. Radon and radium concentration in water from North-West of Romania and the estimated doses. *Radiation protection dosimetry*, 162(1-2): 96-100.
- Mowlavi, A. A., Shahbahrami, A., Binesh, A. 2009. Dose evaluation and measurement of radon concentration in some drinking water sources of the Ramsar region in Iran. *Isotopes Environ. Health Stud.* 45(3): 269-272.
- Nazaroff, W. W., Anthony, V. N. 1988. *Radon and Its Decay Products in Indoor Air*, John Wiley and Sons, New York.
- NCRP. 1988. Report. Measurements of Radon and Radon Daughters in Air, No.97.
- Örgün, Y., Çelebi, N. 2018. Radyasyon, radon (Rn) ve toplum sağlığı. *TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Haber Bülteni*, 11-27.
- Özdemir, F. B. 2006. Afyon ve çevresindeki kuyu sularında radon (Rn- 222) aktivitesi tayini. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Özden, N. 1977. *Radyoaktivite ve Radyasyonlar*, İ. T. Ü., İstanbul.
- Özer, Y. 2019. Bursa'daki Orhaneli termik santrali çevresindeki sularda radon seviyesinin ve yıllık etkin dozların belirlenmesi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- RAD-7 Electronic Radon Detector User Manuel. 2019. DURRIDGE Company Inc. USA.
- Rahman, S. U., Rafique, M., Matiullah, A. J. 2009. Radon measurement studies in workplace buildings of the Rawalpindi region and Islamabad capital area, Pakistan, *Building and Environment*, 45(2): 421-426.
- Sabol, J., Weng, P. S. 1995. *Introduction to Radiation Protection Dosimetry*. World Scientific Publishing, 300, Singapore.
- Saç, M. M., Camgöz, B. 2005. İzmir'de sismik aktiviteler ile radon konsantrasyonları arasındaki korelasyonun incelenmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 7: 47-54.
- Sakarya Valiliği. 2020. Sakarya İl Brifingi. http://sakarya.gov.tr/kurumlar/sakarya.gov.tr/y_site/sakarya/brifing/kisa_brifing_2020.pdf, Erişim: 02.07.2020.

- Sandalcı, M., Sünbül, F., Sandalcı, M., Saltabaş, L. 2005. Kaf üzerinde Arifiye-Sapanca İzmit Körfezi kolunda 1955-1995 yılları arası meydana gelen depremlerin Sapanca Gölü'ne etkisi. İçinde: Kocaeli Deprem Sempozyumu Bildiriler Kitabı, Kocaeli, 90-93.
- Seligman, H. 1990. Isotopes in everyday life. International Atomic Energy Agency, PI, A6E.
- Şahin, S. 2009. Sivrice fay zonundaki radon değişimi ve doğal radyoaktivite. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
- Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK). 2020c. Radyasyon Kaynakları. <https://www.taek.gov.tr/ogrenci/r05.htm>, Erişim: 02.07.2020.
- TAEK. 2020a. Radyasyon ve Biz. <https://www.taek.gov.tr/ogrenci/r02.htm>, Erişim: 02.07.2020.
- TAEK. 2020b. Radyasyon Birimleri. <https://www.taek.gov.tr/ogrenci/r04.htm>, Erişim: 02.07.2020.
- TAEK. 2017. Radyasyonla Birlikte Yaşıyoruz, Doğal Radyasyon Kaynakları, <https://www.taek.gov.tr/tr/2016-06-09-00-43-46/1087-dogal-radyasyon-kaynaklari.html>, Erişim: 02.07.2020.
- Tanner, A. B. 1980. Radon migration in the ground. A supplementary review. İçinde: The Natural Radiation Environment III. Symposium Proceedings, Houston, TX, 23-28 April (Ed: Gesell F.F and Lowder W.M.), Rep. Conf- 780422, U.S. Dept. of Energy, Washington, D.C. 1, 5-56.
- Teng, T. L. 1980. Some recent studies on groundwater radon content as an earthquake. J. Geophys. Res., 85: 3089-3099.
- Tufaner, F. 2005. Doğal radon emisyonunun insan sağlığına etkileri ve alınması gereken tedbirler. Çankırı Karatekin Üniversitesi Çankırı Araştırma Dergisi, 75-87.
- Turner, J. 2007. Atoms, Radiation and Radiation Protection. John Wiley & Sons, USA.
- Ulomov, V. I., Mavashev, B. Z. 1971. Forerunners of the Taşkent earthquake. Izv. Akad. auk Uzb. SSR, 188-200.
- Uludağ, N. 2018. Şile-Kandıra-İzmit bölgesindeki kaynak sularında radon gazının incelenmesi ve Sakarya Üniversitesi radon farkındalık anketi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). 1988. Sources, Effects, and Risks of Ionizing Radiation United Nations sales publication No: E.88.IX.7, New York.
- UNSCEAR. 1993. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources, Effects, and Risks of Ionizing Radiation, New York.
- UNSCEAR. 2018. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation, UNSCEAR 2017 Report. United Nations, New York. https://www.unscear.org/docs/publications/2017/UNSCEAR_2017_Report.pdf, Erişim: 03.07.2020.

- United States Environmental Protection Agency (EPA). 2020. Radon, <https://www.epa.gov/radon>, Erişim: 03.07.2020.
- Virk, H. S., Singh, B. 1993. Radon anomalies in soil-gas and groundwater as earthquake precursor phenomena. *Tectonophysics*, 227: 215-224.
- Yakut, H., Tabar, E., Zenginerler, Z., Demirci, N., Ertugral, F. 2013. Measurement of (RN)- R-222 concentration in drinking water in Sakarya, Turkey. *Radiation Protection Dosimetry*, 157(3): 397-406.
- Yalçın, S., Gürler, O., Tarım, U. A., İncirci, F., Kaynak, G., Gündoğdu, O. 2011. Measurements of radon concentration in drinking water samples from Kastamonu (Turkey). *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 47: 438-445.
- Yalim, H. A., Akkurt, I., Özdemir, F. B., Ünal, R., Sandıkçiođlu, A., Akkurt, A. 2007. The measurement of radon and Radium concentrations in well water in the Afyonkarahisar area of Turkey. *Indoor and Built Environment*, 16: 77-81.
- Yaprak, G., Candan, O., Gür, F., Batmaz, İ., Camgöz, B. 2003. Aktif Gediz Grabeninde Yer alan Alaşehir/Manisa Yöresinde Tektonik Aktiviteye Dayalı Radon Anomalilerinin İncelenmesi. VIII. Ulusal Nükleer Bilimler ve Teknolojileri Kongresi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri.
- Yıldız, S. 2004. Görünmeyen tehlike radon gazı. *Bilim ve Teknik*, Şubat: 54-57. <https://services.tubitak.gov.tr/edergi/user/yaziForm1.pdf?cilt=37&sayi=435&sayfa=54&yaziid=15750>, Erişim: 05.07.2020.
- Yiğitoğlu, I., Öner, F., Yalim, H. A., Akkurt, A., Okur, A., Özkan, A. 2010. Radon concentration in water in the region of Tokat city in Turkey *Radiat. Prot. Dosim.* 141(2): 358-362.
- Yüce, G., Uđurluođlu, D. Y., Adar, N., Yalçın, T., Yaltırak, C., Streil, T., Oeser, V. 2010. Monitoring of earthquake precursors by multi-parameter stations in Eskişehir region (Turkey). *Applied Geochemistry*, 25: 572-579.
- Zorlu, K. 2010. Adapazarı Ovası ve Aşağı Sakarya Platosu'nda tarımsal değişim. Sakarya Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Coğrafya Bölümü, Yüksek Lisans Tezi.

ÖZGEÇMİŞ

Osman Kaptan, 01.01.1979 yılında Sakarya'da doğdu. İlk, orta, lise eğitimini Sakarya ve İstanbul'da tamamladı. 19 Mayıs Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik bölümünden 2003 yılında mezun oldu. 2004 yılında Sakarya Üniversitesi Fizik Bölümünde Yüksek Lisans eğitime başladı ve halen çalışmalarına devam etmektedir.