

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

FİZİK ANABİLİM DALI

**TRABZON İLİ İÇME SUYU ŞEBEKELERİNDE VE ÇEVRESİNDE
RADYOAKTİVİTE DÜZEYİNİN BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ayşegül ŞEN

**HAZİRAN 2019
TRABZON**



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

FİZİK ANABİLİM DALI

**TRABZON İLİ İÇME SUYU ŞEBEKELERİNDE VE ÇEVRESİNDE
RADYOAKTİVİTE DÜZEYİNİN BELİRLENMESİ**

Ayşegül ŞEN

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
“YÜKSEK LİSANS (FİZİK)”**

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Teslim Tarihi : 21/05/2019

Tezin Savunma Tarihi : 20/06/2019

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Belgin KÜÇÜKÖMEROĞLU

TRABZON – 2019

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Fizik Anabilim Dalında
Ayşegül ŞEN Tarafından Hazırlanan

TRABZON İLİ İÇME SUYU ŞEBEKELERİNDE VE ÇEVRESİNDE
RADYOAKTİVİTE DÜZEYİNİN BELİRLENMESİ

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 21 / 05 /2019 gün ve 1805 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. A. Hakan YILMAZ

Üye : Prof. Dr. Belgin KÜÇÜKÖMEROĞLU

Üye : Prof. Dr. Recep KESER

Prof. Dr. Asim KADIOĞLU
Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Trabzon ili içme suyu şebekelerinde ve çevresinde radyoaktivite düzeyinin belirlenmesini amaçlayan bu çalışma fhd-2016-5586 numaralı BAP projesi kapsamında desteklenmiştir.

Lisans eğitimime başladığım günden beri akademik anlamda idol edindiğim, her daim desteğini ve tüm imkanlarını benimle paylaşan sayın ve çok sevgili hocam Prof. Dr. Belgin KÜÇÜKÖMEROĞLU'na, ölçüm ve analizlerde yardımını esirgemeyen TAEK ÇNAEM Nükleer Fizik bölümü başkanı Doç. Dr Halim TAŞKIN'a, KTÜ Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksek Okulu öğretim görevlisi Dr. Selcen UZUN DURAN'a, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Öğr. Gör. Ali ÇİRİŞ'e, başardığım her işin asıl mimarı canım annem Şükran ŞEN'e, neşe kaynağım kardeşim Nurgül ŞEN'e, çalışmama başladığım günden beri varlığını yanımda hissettiğim Eren ULUÇAY'a yürekten teşekkür ederim.

Ayşegül ŞEN
Trabzon 2019

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Trabzon İli İçme Suyu Şebekelerinde ve Çevresinde Radyoaktivite Düzeyinin Belirlenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Belgin KÜÇÜKÖMEROĞLU’nun sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma süresince bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 20/06/2019

Ayşegül ŞEN

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ	X
TABLolar DİZİNİ.....	XI
KISALTMALAR VE SEMBOLLER DİZİNİ	XII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş	1
1.2. Radyoaktivite	7
1.3. Radyasyon Çeşitleri	9
1.3.1. Enerjisine Göre Radyasyon Çeşitleri	9
1.3.1.1. İyonlaştırıcı Radyasyon	10
1.3.1.2. İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyon	10
1.3.2. Türüne Göre Radyasyon Çeşitleri	10
1.3.3. Kaynağına Göre Radyasyon Çeşitleri.....	11
1.3.3.1. Doğal Radyasyon Kaynakları	11
1.3.3.2. Yapay Radyasyon Kaynakları	14
1.4. Radyoaktivite Kanunları	15
1.4.1. Radyoaktif Bozunma Kanunu.....	15
1.4.2. Radyoaktif Bir Numunenin Ortalama Ömrü ve Yarı Ömrü	17
1.4.3. Peş Peşe Bozunma Kanunu	18
1.4.4. Geçici Denge	20
1.4.5. Sürekli Denge	20
1.5. Radyoaktif Bozunma Türleri	21
1.5.1. Alfa Bozunumu.....	21
1.5.2. Beta Bozumu	23

1.5.2.1 β^- Bozunumu	23
1.5.2.2. β^+ Bozunumu	23
1.5.2.3 Elektron Yakalama	23
1.5.3. Gama Bozunumu	24
1.6. Aktivite ve Radyasyon Birimleri	25
1.6.1. Aktivite Birimi	26
1.6.2. Işınlama Birimi	27
1.6.3. Soğurulmuş Doz Birimi	27
1.6.4. Eşdeğer Doz Birimi	27
1.6.5. Yıllık Etkin Doz Eşdeğeri.....	28
1.7. Sularda ve Toprakta Radyoaktivite	28
1.7.1. Sularda Radyoaktivite.....	28
1.7.2. Toprakta Radyoaktivite	29
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	31
2.1. Numunelerin Toplanması	31
2.2. Toplam Alfa-Toplam Beta Analizi	32
2.2.1. Deneysel Sistem.....	33
2.3. Kimyasal Analiz	35
2.3.1. Deneysel Sistem.....	35
2.4. Radon Ölçüm Sistemi	36
2.4.1. Deneysel Sistem.....	37
2.5. Radyonüklid Analizi	39
2.5.1. Su Numunelerinin Radyonüklid Analize Hazırlanması	39
2.5.2. Toprak Numunelerinin Radyonüklid Analize Hazırlanması	39
2.5.3. Deneysel Sistem.....	40
2.5.4. Dedektörün Verim Eğrisi.....	41
3. BULGULAR.....	43
3.1. Toplam Alfa-Toplam Beta Analizi Bulguları	43
3.2. Kimyasal Analiz Bulgular	49
3.3. Mevsimsel Radon Analizi Bulguları	52
3.4. Radyonüklid Analizi Bulguları	53
3.4.1. Su Numunelerinde Radyonüklid Analizi Bulguları.....	53

3.4.2. Toprak Numunelerinde Radyonüklid Analizi Bulguları	56
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	59
4.1. Su Numunelerinde Toplam Alfa-Toplam Beta Analizi	59
4.2. Mevsimsel Radon Analizi Sonuçları	62
4.3. Radyonüklid Analizi Sonuçları.....	64
4.3.1. Su Numunelerinde Radyonüklid Analizi Sonuçları	64
4.3.2. Toprak Numunelerinde Radyonüklid Analizi Sonuçları	66
5. ÖNERİLER.....	69
6. KAYNAKLAR	70
ÖZGEÇMİŞ	



Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

TRABZON İLİ İÇME SUYU ŞEBEKELERİNDE VE ÇEVRESİNDE RADYOAKTİVİTE DÜZEYİNİN BELİRLENMESİ

Ayşegül ŞEN

Karadeniz Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Belgin KÜÇÜKÖMEROĞLU

2019, 73 Sayfa

Bu çalışmada, Trabzon ili ve ilçelerinden toplanan su ve toprak örneklerinin radyoaktivite seviyesi ölçüldü. Trabzon ili ve ilçelerinde önceden düzenli olarak belirlenen yerlerden su ve toprak örnekleri toplandı. Tüm içme suyu örneklerinin elemental analizi ICP-OES cihazı ile yapılmıştır. İçme sularındaki Trityum analizi, Trabzon' un pilot bölge olarak seçilmiş beş merkezi su şebekesi örneği için yapıldı. Trityum seviyesi Quantulus-1220 Sıvı Sintilasyon Sayıcı Sistemi kullanılarak tayin edildi. Su ve toprak örneklerinde radyonüklid aktivite konsantrasyonları, gama spektrometresi ile ölçüldü. ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K ve ^{137}Cs aktivite konsantrasyonlarından toplam soğurulan dış gama dozları ve karşılık gelen yıllık etkin doz eşdeğerleri hesaplandı. Tüm toprak örnekleri için dış tehlike endeksi (H_{ex}) hesaplandı. Aynı zamanda bu bölgeden toplanmış içme sularındaki mevsimsel radon gazı ölçümleri AlphaGUARD PQ 2000PRO radon gazı dedektörü ile yapıldı. Radon konsantrasyonları kış mevsiminde 0.15 ± 0.05 Bq/L ile 11.00 ± 1.23 Bq/L arasında, yaz mevsiminde 0.35 ± 0.15 Bq/L ile 13 ± 4 Bq/L arasında, ilkbahar mevsiminde 0.63 ± 0.18 ile 16.50 ± 2.5 arasında, sonbahar mevsiminde 0.78 ± 0.04 ile 16.00 ± 2.8 arasında değiştiği bulunmuştur. Tüm sezonlar için içme sularındaki etkin dozlar hesaplanmıştır. Hesaplanan minimum ve maksimum etkin dozlar $4,1 \mu\text{Sv/y}$ ve $97 \mu\text{Sv/y}$ değerleri arasındadır. Elde edilen tüm sonuçlar, uluslararası limitler ve diğer ülkelerin sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Doğal Radyoaktivite, İçme Suları, Radyonüklid, Trabzon, Radon, Aktivite, Trityum, Etkin Doz

Master Thesis

SUMMARY

DETERMINATION OF RADIOACTIVITY LEVELS IN TRABZON PROVINCE AND SURROUNDING DRINKING WATER RESOURCES

Ayşegül ŞEN

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Physics Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Belgin KÜÇÜKÖMEROĞLU
2019, 73 Pages

In this study, the radioactivity levels were measured in soil samples and drinking water resources collected from Trabzon province and its towns. Drinking water and soil samples have been collected regularly from previously determined station in Trabzon and its towns. Elemental analyses were carried out with to help of ICP-OES device for all samples of drinking water in Trabzon province and its town. For the tritium analysis in drinking water, the city Trabzon are chosen as pilot areas and tritium levels of five central water resources are determined. Tritium levels are determined by using Quantulus-1220 ultra-low scintillation counter system. Radionuclide activity concentrations in soil and drinking water samples were measured through gamma-ray spectrometry. From the activity concentrations of ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K and ^{137}Cs , the total absorbed outdoor gamma-ray rates and corresponding annual effective dose rates were determined. The corresponding values of the external hazard indices (H_{ex}) of all the soil samples were calculated. Also, in this study, the measurement of radon concentration in drinking waters collected from this region was performed using radon gas analyzer (Alpha GUARD PQ 2000PRO). The radon concentrations were found to vary from 0.15 ± 0.05 Bq/L to 11.00 ± 1.23 Bq/L in winter, from 0.35 ± 0.15 Bq/L to 13 ± 4 Bq/L in summer, from 0.63 ± 0.18 to 16.50 ± 2.5 in spring and from 0.78 ± 0.04 to 16.00 ± 2.83 in autumn for drinking water. The effective doses in drinking waters for all seasons were also calculated. The calculated minimum and maximum effective doses are $4,1 \mu\text{Sv/y}$ and $97 \mu\text{Sv/y}$, respectively. The obtained all results were compared with international recommendations and concentrations reported for other countries.

Key Words: Natural Radioactivity, Drinking Waters, Radionuclide, Trabzon, Radon, Activity, Tritium, Effective Dose

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Çekirdeklerin proton ve nötron sayıları değişim grafiği (Krane, 2010))	8
Şekil 2. İyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon (URL-1, 1996).....	9
Şekil 3. Canlı ve cansız varlıkların maruz kaldığı doğal ve yapay radyasyon kaynaklarının oranı.....	11
Şekil 4. Doğal radyasyon kaynakları	12
Şekil 5. Radon gazının kapalı ortamlara giriş yolları (Tufaner, 2005).....	13
Şekil 6. Yapay radyasyon kaynakları	14
Şekil 7. Zamanla aktivite değişimi (Krane, 2001).....	17
Şekil 8. Peş peşe bozunma grafiği(URL-2, 2009).....	19
Şekil 9. α , β , γ radyasyonlarının giricilikleri	16
Şekil 10. Çalışma bölgesi ve ölçüm alınan istasyonlar	31
Şekil 11. Berthold LB770 toplam alfa-toplam beta sayım cihazı.....	33
Şekil 12. Toplam alfa-toplam beta sayım cihazının şeması	34
Şekil 13. Spectro Genesis ICP-OES kimyasal ölçüm cihazı.....	35
Şekil 14. AlphaGUARD PQ 2000PRO aktif radon ölçüm cihazı	37
Şekil 15. Gama spektrometre sistemine ait blok şeması	41
Şekil 16. Dedektörün verim eğrisi	42
Şekil 17. Toplam alfa ve toplam beta değerlerinin karşılaştırılması (Bq/ml)	60
Şekil 18. Trabzon ili mevsimsel radon değişimleri (Bq/l).....	62
Şekil 19. Ortalama radon konsantrasyonlarının izin verilen değerler ile karşılaştırılması (40Bq/l)	63
Şekil 20. Hesaplanan yıllık etkin doz eşdeğerlerinin WHO tarafından belirlenen sınır değerler ile karşılaştırılması (μ Sv/y)	63
Şekil 21. Trabzon ilinde hesaplanan soğurulan doz ve yıllık etkin doz eşdeğerleri.....	65
Şekil 22. Yıllık etkin doz eşdeğerlerinin dünya ortalaması ile karşılaştırılması	66
Şekil 23. Gama dozu eşdeğerlerinin dünya ortalaması ile karşılaştırılması.	67

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. İnsan Vücudunda Bulunan Doğal Radyoaktif Elementler	13
Tablo 2. Radyoaktif Seriler	15
Tablo 3. Alfa Parçacığı Yayımlayan Bazı Radyonüklidler	22
Tablo 4. Beta Parçacığı Yayımlayan Bazı Radyonüklidler	24
Tablo 5. Gama Işınması Yapan Bazı Radyonüklidler	25
Tablo 6. Radyasyon Birimleri ve Dönüşümleri	26
Tablo 7. Sularda Radyoaktivite Sınır Değerleri (UNSCEAR, 2011)	29
Tablo 8. Toprakta Bulunan Radyonüklid Konsantrasyon Ortalamaları	29
Tablo 9. Trabzon İlinde Bulunan Ana Şebekeler ve Bu Şebekelerin Su Sağladığı İlçeler .	31
Tablo 10. Trabzon İline Bağlı İlçeler ve Bu İlçelerin Nüfusları	32
Tablo 11. AlphaGUARD Monitörünün Bazı Teknik ve Fiziksel Özellikleri.....	38
Tablo 12. Trabzon İli İçme Sularında Toplam Alfa ve Toplam Beta Sonuçları	44
Tablo 13. Yetişkinler İçin Yıllık Etkin Doz Eşdeğerleri	46
Tablo 14. Çocuklar İçin Yıllık Etkin Doz Eşdeğerleri	47
Tablo 15. Bebekler İçin Yıllık Etkin Doz Eşdeğerleri	48
Tablo 16. Trabzon İli İçme Suyu Şebekelerindeki Kimyasal Element Analiz Değerleri (µg/L)	49
Tablo 17. Trabzon İli Su Numunelerinde Anyon Sonuçları (µg/L)	49
Tablo 18. Ana Şebekeler ve İlçelerin Musluk Sularında Radon Gazı Değerleri ve Bu Değerler Göz Önüne Alınarak Hesaplanan Yıllık Etkin Eşdeğerleri	53
Tablo 19. Trabzon İli ve İlçelerinin İçme Sularında Radyonüklid Konsantrasyonları ve Doz Değerleri	55
Tablo 20. Trabzon İli Toprak Numunelerinde Radyonüklid Konsantrasyonları.....	57
Tablo 21. Türkiye’de ve Dünyada Bazı İçme Sularında Toplam Alfa ve Toplam Beta Konsantrasyonu.....	61
Tablo 22. Türkiye’de ve Dünyada Bazı İçme Sularında Radon Konsantrasyonu.....	64
Tablo 23. Türkiye’de ve Dünyada Sularında Radyonüklid Seviyeleri.....	65
Tablo 24. Türkiye’de ve Dünyada Bazı Bölge Topraklarında Radyonüklid Seviyeleri	68

KISALTMALAR VE SEMBOLLER DİZİNİ

A : Aktiflik

Bq : Becquerel

Ci : Curie

ÇNAEM : Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi

D : Soğurulan doz

DSÖ Dünya Sağlık Örgütü

EPA : Environmental Protection Agency

Gy : Gray

IAEA : International Atomic Energy Agency

ICRP : International Commission on Radiological Protection

ppm. : Parts per million

Sv : Sievert

T1/2 : Yarı ömür

TAEK : Türkiye Atom Enerji Kurumu

UNSCEAR : United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation

WHO: World Health Organization

λ : Bozunma sabiti

τ : Ortalama ömür

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Gelişen teknoloji ile birlikte radyasyon günlük hayatımızın bir parçası haline gelmiştir. Yoğun biçimde kullandığımız cep telefonlarımızdan, tedavi ve tanı amaçlı kullanılan birçok tıbbi cihaza kadar her gün yoğun biçimde radyasyona maruz kalmaktayız. Bütün bu etmenler vücuda alınan radyasyon dozunu arttırmasının yanında insanoğlu ve diğer tüm canlılar sürekli hava, su ve topraktan radyasyon almaktadır.

Güneşten gelen kozmik ışınlar, yerkürede bulunan doğal radyoaktif maddeler ve artan enerji ihtiyacı ile birlikte sayısı gittikçe artan nükleer enerji santrallerinden yayılan sızıntılar havada, suda, toprakta radyoaktif maddeler bulunmasına sebep olur. Canlılar toprakta ve havada bulunun radyoaktiviteden beslenme ve solunum yoluyla etkilenmektedirler.

Su ise canlıların en çok etkileşimde bulunduğu maddedir. Gıda olarak tükettiğimiz besinlerin sulanması sırasında besinlerle etkileşmesinin yanı sıra, içme ve kullanım amaçlı da tüketilmektedir. Canlılığın sürdürülebilmesi için en önemli ihtiyacımız olan su hem dünyamızın hem de vücudumuzun büyük bölümünü oluşturmaktadır. Dünya üzerinde bulunan 1,4 milyar m³ civarındaki suyun yaklaşık %2,6'sı kullanılabilir nitelikte tatlı su olduğu Dünya Meteoroloji Örgütü (WMO) ve UNESCO tarafından yayınlanan etkinlik raporunda belirtilmiştir. Ülkemizde bulunan 112 milyar m³ kullanılabilir suyun yaklaşık %16'sı içme ve kullanma suyudur. Kullanıma uygun bu sular yeryüzüne düşen yağışların topraktan süzülerek birikmesiyle oluşan yeraltı kaynaklarından ve yerüstünde bulunan deniz, göl, akarsu gibi birikintilerden elde edilebilir.

Özellikle yağışla gelen sular yeraltına süzülürken yeryüzünün alt tabakalarında bulunan kayalara temas ettiğinden radyonüklidlerle etkileşir. Taşıdığı bu radyonüklidler çeşitli yollarla, özellikle içme ve kullanma suyu olarak, başta insanlar olmak üzere tüm canlıların vücuduna giriş yapar. Bu yüzden insanlar dış etkilerden aldıkları radyasyonla birlikte iç ışınlanmaya da maruz kalırlar.

Yaşanılan çevredeki radyoaktif kirliliğin bilinebilmesi için ölçümler yapılması gerekir. Bütün bunlar düşünüldüğünde içme ve kullanma sularındaki radyoaktivite seviyesinin belirlenmesi ve belirli sınır değerler altında tutulması insan sağlığı için son derece önemlidir. Bu nedenle, bu çalışmamızın amacı, Trabzon ili ve ilçelerinde içme suyu ihtiyacının karşılandığı sondaj kuyularındaki içme sularının ve bu kuyulara gelen suların çıktığı toprak ve kayaçlardaki radyoaktivitenin (toplam alfa, toplam beta, radyonüklid konsantrasyonları ve doz değerleri, trityum, radon) belirlenmesi ve uluslararası kuruluşların öngördüğü sınır değerlere uygunluğunun saptanmasıdır. Bu bağlamda yapılan bu çalışma, radyoaktiviteden kaynaklanan yıllık etkin dozun hesaplanması ve incelenen içme sularının sindirilmesi sebebiyle oluşabilecek sağlık risklerinin değerlendirilmesi açısından önemlidir. Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ veya WHO) bu konuda toplam alfa aktivitesi için 100 mBq/l ve toplam beta aktivitesi için 1000 mBq/l büyüklüğünde sınır değerler belirlemiştir.

Literatürde içme ve kullanma suyu ihtiyacının karşılandığı şebekelerde ve bu şebekelere gelen suların çıktığı toprak ve kayaçlardaki radyoaktivitenin (toplam alfa, toplam beta, radyonüklid konsantrasyonları ve doz değerleri, trityum, radon) belirlenmesi amacıyla yapılan ulusal ve uluslararası birçok çalışmaya rastlamak mümkündür. Bu çalışmalardan bir kısmı aşağıda verilmiştir.

2004 yılında Arogunjo ve arkadaşları, Nijerya'nın Delta bölgesinden aldıkları 32 toprak numunesinde ^{40}K , ^{238}U ve ^{232}Th 'ye bağlı dış mekân gama doz oranlarını sırasıyla 1.5 ± 0.9 nGy/h, 6.9 ± 1.6 nGy/h 16.3 ± 3.1 nGy/h olarak belirlemişlerdir.

2007 yılında Osmanlıoğlu ve arkadaşları, Gaziantep ilinde yaptıkları çalışmada yüzey toprağındaki aktivite konsantrasyonlarını ^{238}U için 8.02 Bq /kg, ^{232}Th için 25.2 Bq/kg, ^{40}K için 23.7 Bq/kg, ve ^{137}Cs için 289.2 Bq/kg olarak belirlemişlerdir.

Zorer ve Şahan 2008 yılı yaz aylarında, Van Gölü yüzey sularında doğal radyoaktivite seviyelerini tespit etmek amacıyla yaptıkları çalışmada alınan su numunelerinin %44'ünde toplam alfa konsantrasyonu ölçememiş, %56'sında ise bu konsantrasyonu sınır değerler altında tespit etmiştir. Toplam beta konsantrasyonlarını tüm numuneler için ölçebilmiş, bu ölçümlerin %28'ini sınır değerler üzerinde belirlemiştir. Çalışmada bahsedilen yüksek beta konsantrasyonuna bölgenin jeolojik yapısının ve Çernobil nükleer kazasının sebep gösterilebileceği belirtilmiştir.

2008 yılında Ajayi ve arkadaşları, Güneybatı Nijerya'da kuyu sularından aldıkları numunelerde ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra ve ^{228}Ra aktivite konsantrasyonlarını belirlemiş ve üç yaş grubu için yıllık etkin dozları bebeklerde 0,02-76,84 mSv/y, çocuklarda 0,02-38,80 mSv/y, yetişkinlerde ise 0,05-481,60 mSv/y olarak hesaplamışlardır.

El-Daly ve Hussein 2008 yılında yayımlanan makalelerinde, Mısır'daki Nil Deltası'ndan aldıkları toprak örneklerinde ortalama 22.12 Bq/kg ^{238}U , ortalama 10,27 Bq/kg ^{232}Th , ortalama 180.04 Bq/kg ^{40}K ; sediment örneklerinde ortalama 5.47 Bq/kg ^{238}U , ortalama 0,92 Bq/kg ^{232}Th , ortalama 11,43 Bq/kg aktivite değerleri hesaplamışlardır.

2008 yılında Çevik ve arkadaşları, Afsin-Elbistan termik santrali etrafından aldıkları toprak numunelerinin ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K ortalama aktivite konsantrasyonlarını sırasıyla 167, 44 ve 404 Bq/kg tespit etmişlerdir.

Küçükömeroğlu ve arkadaşları 2009 yılında, Bayburt ilinde 4 şebekeden aldıkları su numunelerinde toplam alfa ve toplam beta aktivitelerinin sınır değerler altında olduğunu belirlemiştir. Sonuç olarak alınan numuneler de Ra^{226} , Th^{232} ve K^{40} aktivitesi ortalama değerleri sırasıyla 93 mBq/l, 30 mBq/l, 504 mBq/l olarak hesaplanmıştır.

Küçükönder 2009 yılında, hazırladığı doktora tezinde Kahramanmaraş ilçesinden aldığı su, toprak ve gıda örneklerinde radyoaktivite seviyeleri belirlemiştir. Su numuneleri kaynaklardan, suların depolandığı yerlerden, ev ve işyerlerinde kullanılan sulardan toplanmıştır. Numunelerin toplam alfa ve toplam beta seviyeleri sınır değerler altında olmakla birlikte; toplam alfa seviyeleri kaynak ve depo suları ile ev ve işyeri sularında birbirine yakın, toplam beta seviyeleri ise kaynak ve depo sularında ev ve işyerleri sularına göre daha yüksek çıkmıştır. Aynı çalışmada Kahramanmaraş il merkezinden alınan 14 toprak numunesinde toplam alfa ve toplam beta seviyelerinin sınır değerler altında kaldığı, ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın aktivite konsantrasyonlarının ise yalnızca bir numunede dünya ortalamasının üzerinde olduğu belirlenmiştir.

Koby 2009 yılında, doktora tezi kapsamında doğu Karadeniz bölgesinde kaynak sularında toplam alfa ve toplam beta konsantrasyonlarını 25,8 mBq/L ve 31 mBq/L olarak belirlemiştir.

Damla ve arkadaşları 2009 yılında, Batman ilinde su ve topraklarda radyoaktivite düzeyini belirlemek üzere yaptıkları çalışmada musluk sularında toplam alfa ve toplam beta konsantrasyonlarını sınır değerler altında belirlemiştir. 2010 yılında yayımlanan çalışmalarında ise aynı ilde sularda ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktivite konsantrasyonlarını

sırasıyla 42 ± 15 mBq/l, 35 ± 9 mBq/l, 524 ± 190 mBq/l; topraklarda ise ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K ve ^{137}Cs aktivite konsantrasyonlarını sırasıyla 35 ± 8 mBq/kg, 25 ± 10 mBq/kg, 274 ± 167 mBq/kg ve 12 ± 7 olarak tespit etmişlerdir.

2009 yılında Jia ve arkadaşları İtalya'da 17 farklı marka içme suyunda yaptıkları analizlerde ^{238}U aktivite konsantrasyonu 8.9 ± 15 mBq/l ve ^{232}Th aktivite konsantrasyonu 0.0013 ± 0.0006 mBq/l ve yetişkinler için alınan radyonüklid yıllık etkin dozu 2,81- 38,5 $\mu\text{Sv/y}$ aralığında tespit etmişlerdir.

2010 yılında Değerlier ve Karahan, Adana ilinde deniz, göl, nehir ve musluk sularından aldıkları 30 farklı örnekte ortalama toplam alfa konsantrasyonunu $0,0096$ Bq/l ortalama toplam beta konsantrasyonunu ise $0,086$ Bq/l olarak belirlemişlerdir.

Kırkpınar 2010 yılında hazırladığı yüksek lisans tezinde Ankara ve İzmir illerinde termal ve içme sularından aldığı numunelerin trityum, toplam alfa ve toplam beta seviyelerini Ankara ve İstanbul için karşılaştırmış ve tüm ölçümleri sınır değerler altında bulmuştur.

2010 yılında Wallner ve Jabbar Avusturya'da satılan mineralli sularda ^{228}Ra , ^{226}Ra , ^{238}U ve ^{234}U için etkin dozları sırasıyla bebeklerde $6,0 \cdot 10^{-6}$ Sv/Bq, $9,6 \cdot 10^{-7}$ Sv/Bq, $1,2 \cdot 10^{-7}$ Sv/Bq $1,3 \cdot 10^{-7}$ Sv/Bq, gençlerde $5,3 \cdot 10^{-6}$ Sv/Bq, $1,5 \cdot 10^{-6}$ Sv/Bq, $6,8 \cdot 10^{-8}$ Sv/Bq, $7,4 \cdot 10^{-8}$ Sv/Bq ve yetişkinlerde $6,7 \cdot 10^{-7}$ Sv/Bq, $2,8 \cdot 10^{-7}$ Sv/Bq, $4,5 \cdot 10^{-8}$ Sv/Bq, $4,9 \cdot 10^{-8}$ Sv/Bq olarak hesaplamışlardır.

2011 yılında Jobbagy ve arkadaşları Macaristan kaynak sularında toplam alfa ve toplam beta aktivite konsantrasyonlarını sırasıyla 60-1749 mBq/l ve 33-2015 mBq/l aralığında belirlenmiştir.

2011 yılında Tsiaili ve arkadaşları Kıbrıs'ta yeraltı sularının mevsimsel toplam alfa değişimlerini incelemiştir. Toplam alfa değerleri kış aylarında $0,7-0,9$ Bq/l olarak yaz aylarında ise $1,4$ Bq/l olarak hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda bu suların tüketim amaçlı kullanımının alınan radyasyon dozunu önemli ölçüde arttıracığı ancak sulama amaçlı olarak kullanılmasının bu dozu çok fazla etkilemeyeceği belirtilmiştir.

2012 yılında Taşkın ve arkadaşları Bursa ili içme sularından topladıkları numunelerde toplam alfa ve toplam beta aktivitelerini sırasıyla $68,5$ mBq/dm³ ve 6701 mBq/dm³ olarak tespit etmiş ve bu değerler için ortalama yıllık etkin doz değerini hesaplamışlardır.

2012 yılında Benedik ve Jeran Slovenya'da içme suları için radyonüklid analizi yapmış ve yıllık etkin doz değerlerini yetişkinler için 4-7 $\mu\text{Sv/y}$, çocuklar için 8-10 $\mu\text{Sv/y}$, bebekler için 6-7 $\mu\text{Sv/y}$ aralığında hesaplamıştır.

2013 yılında Demirel, Konya içme sularında ^{222}Rn konsantrasyonlarının ilkbahar ve yaz aylarında değişimlerini incelediği yüksek lisans tezinde 16 farklı kuyu suyundan örnekler toplamış 11 numunenin Birleşik Devletler Çevre Koruma Ajansı (USEPA) tarafından belirlenen sınırın üzerinde ancak tüm numunelerin WHO tarafından belirlenen sınırların çok altında olduğunu tespit etmiştir.

2015 yılında Turgay, doktora tezi olarak Hatay ilinde içme sularının radyoaktivite değerini hesaplamak üzere 39 su ve 55 farklı toprak numunesinin aktivite konsantrasyonlarını hesaplamıştır. Su numunelerinde toplam alfa konsantrasyonu 36.69 mBq/l ve toplam beta konsantrasyonu 116.36 mBq/l olarak ölçülmüş, tüm su numunelerinde ortalamam yıllık etkin dozların izin verilen değerlerde olduğu belirlenmiştir. Toprak numunelerinde ise ortalama ^{137}Cs aktivitesi $8,20 \pm 0,68$ Bq/kg, ^{232}Th aktivitesi $14,55 \pm 0,97$ Bq/kg, ^{226}Ra aktivitesi $23,35 \pm 1,40$ Bq/kg ve ^{40}K aktivitesi $242,36 \pm 20,12$ Bq/kg olarak hesaplanmıştır.

2015 yılında Kaya ve arkadaşları, Gümüşhane ili çevresinde 12 karayosunu ve 16 toprak numunesinde aktivite konsantrasyonlarını ^{226}Ra için 17,31-141,62 Bq/kg, ^{232}Th için 9,70-35,34 Bq/kg, ^{40}K için 236,83-1039,11 Bq/kg, ^{137}Cs için toprak örneklerinde 7,63-39,44 Bq/kg karayosunu örneklerinde ise 12,45-196,89 Bq/kg arasında bulmuşlardır.

2017 yılında Chen ve arkadaşları, Kanada genelinde 1975-2016 yılları arasında içme suyundaki doğal radyoaktiviteyi inceleyen çalışmaları araştırmışlardır ve içme suyundan yılda 4,3 μSv değerinden daha az etkin doz alındığını belirtmişlerdir.

2018 yılında Pillai ve arkadaşları Hindistan'ın Tamil Nadu eyaletinin güneydoğusunda son kırk yıldır doğal radyoaktivite seviyesini ölçen çalışmaları araştırmışlardır. Yapılan çalışmalarda hesaplanan aktivite değerleri ortalamaları ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K için sırasıyla 58.8 ± 28.7 Bq/kg, 465.2 ± 147.3 Bq/kg ve 311.2 ± 27.8 Bq/kg; yıllık maruz kalma oranı ise ortalama 3,7 mSv/y olarak UNSCEAR tarafından rapor edilen 2,4 mSv/y dünya ortalamasının üzerinde belirlenmiştir.

2007 yılında Palomo ve arkadaşları Katalonya'da yağmur, maden, içme ve musluk sularında aldıkları numunelerin trityum seviyelerinin birçoğunu ölçülebilir değerler altında bulmuşlardır. Ebo nehri ve bu nehirden beslenen musluk sularında 0.71 ve 6.44 Bq/l

arasında trityum aktivite değerleri belirlemişlerdir ancak bu değerlerde belirlenen sınırların altındadır.

2008 yılında Top hazırladığı yüksek lisans tezinde Eskişehir ve civarından aldığı 6 farklı su numunesinde sıvı sintilasyon cihazı kullanarak trityum seviyelerini $0,73\pm 0,70$ TU ile $8,10\pm 1,80$ TU arasında ve ieme suları için müsaade edilen st limit değerleri olan 839 TU'nun (100 Bq/L) ok altında olduğunu belirlemiştir.

2009 yılında Bülbül, Manisa ili Alaşehir jeotermal alanında yürüttüğü doktora tezinde 117 su numunesinin trityum değerlerini 0-5 TU arasında belirlemiştir.

2013 yılında Khorshid, Denizli ilinden aldığı 8 farklı numunede termal suların trityum içeriklerini 0,1 ile 6,36 TU arasında tespit etmiştir.

2013 yılında elik ve arkadaşları, Eskişehir ili Nasreddin Hoca Kaynağında trityum değerlerinin 1,3-4,25 TU arasında olduğunu tespit etmişlerdir.

2016 yılında yayınlanan makalesinde Arslan, Kütahya ili Kproşen Havzası'nda suların trityum içeriklerinin yağışlı dönemde 0-6,11 TU, kurak dönemde ise 0-7,87 TU arasında değiştiğini belirlemiştir.

2011 yılında Yalçın ve arkadaşları, Kastamonu'da ilkbaharda kaynak suları için $0.39\pm 0.02 \text{ Bq/l}$ ile $12.73\pm 0.39 \text{ Bq/l}$, musluk suları için $0.36\pm 0.04 \text{ Bq/l}$ ile $9.29\pm 0.45 \text{ Bq/l}$ aralığında; yaz aylarında kaynak suları için $0.50\pm 0.09 \text{ Bq/l}$ ile $19.21\pm 1.00 \text{ Bq/l}$, musluk suları için $0.31\pm 0.03 \text{ Bq/l}$ ile $13.14\pm 0.38 \text{ Bq/l}$ aralığında radon değerleri ölçmüşlerdir.

2011 yılında Tarım ve arkadaşları, Bursa ilinde 27 kuyu suyu numunesinde radon aktivite değerlerini 1,46-53,64 Bq/l ve 19 musluk suyun numunesinde 0,91-12,58 Bq/l arasında değerler ölçmüşlerdir. 7 kuyu suyu numunesinin radon aktivite değerleri USEPA tarafından belirlenen sınır değerin üzerindedir.

2014 yılında Koray ve arkadaşları, Zonguldak ilinde topladııkları su numunelerinde radon seviyelerini $0,32 \text{ Bq/l}$ ile $88,22 \text{ Bq/l}$ arasında değiştiğini belirlemiş ve bu değerlerin sınır değerler altında kaldığını belirtmişlerdir.

2014 yılında Wu ve arkadaşları, in'in Pekin şehrinde 89 ieme suyu numunesinde radon konsantrasyonları dedeksiyon limit ile 49 Bq/l arasına değişmektedir. Suların içilmesinden kaynaklanan ortalama yıllık etkin radon dozu $2.78 \mu\text{Sv}$ olarak hesaplanmıştır.

2015 yılında Srinivasa ve arkadaşları, Hindistan'ın Karnataka şehrinde 27 su numunesinde ^{222}Rn seviyesini $0,85\pm 0,2$ Bq/l ile $60,7473\pm 2,5$ Bq/l aralığında ve ortalama $26,573\pm 1,65$ Bq/l olarak belirlemişlerdir.

2016 yılında Kasic ve arkadaşları, Bosna ve Herzigovina Tuzla şehrinde içme sularındaki radon aktivite konsantrasyonunun 182 mBq/l ile 2368 mBq/l arasında olduğunu ve bu değerlerin USEPA'nın içme suları için tavsiye ettiği $11,1$ mBq/l'yi aşmadığını belirlemişlerdir.

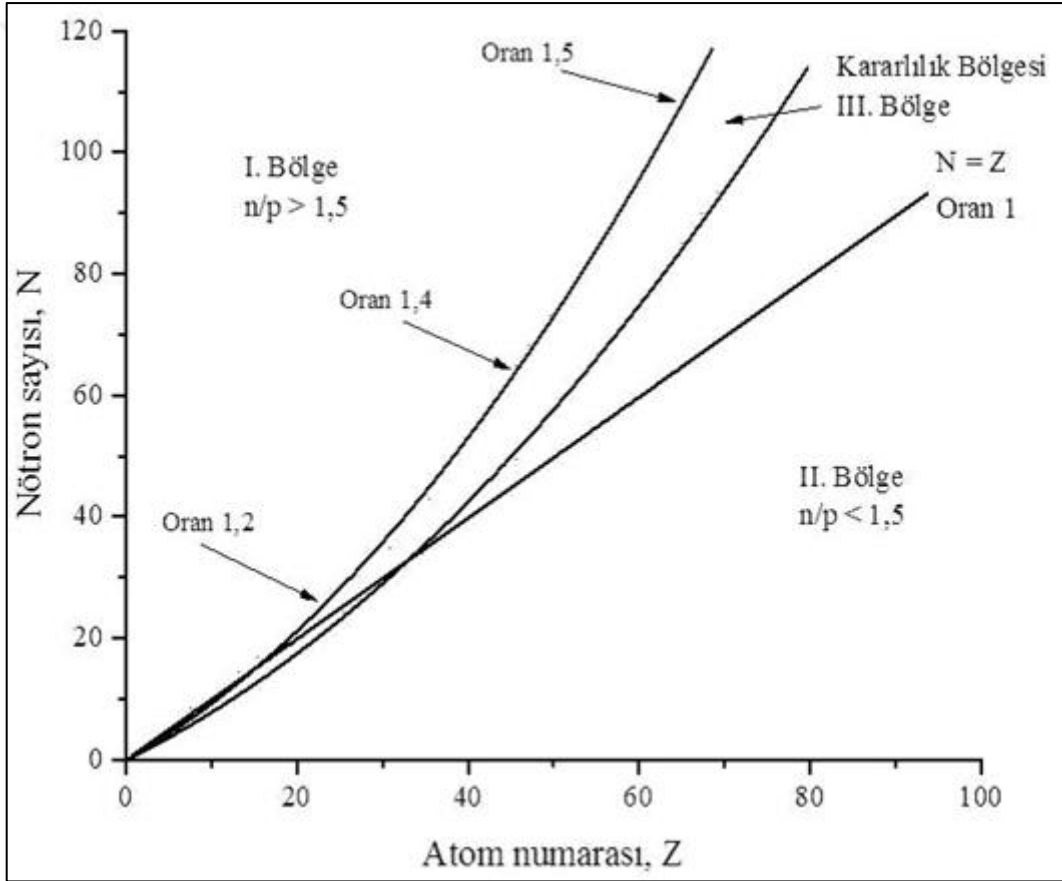
2017 yılında Erdoğan ve arkadaşları, Konya ilinin Seydişehir ilçesinde kaynak sularında radon aktivite konsantrasyonlarını $1,85-99,27$ Bq/l Arasında ölçmüşlerdir.

2017 yılında Wu ve arkadaşları ise Çin'de, topladıkları 73 yeraltı suyu örneği için radon seviyelerini $1,0-63,8$ Bq/l aralığında ve ortalamasını $11,8$ Bq/l; radondan kaynaklanan yıllık etkin doz değerini ise $72,6$ $\mu\text{Sv/y}$ olarak belirlemişlerdir.

1.2. Radyoaktivite

Maddenin yapıtaşı olan atomun çekirdeğinde yüksüz nötronlar (n) ve pozitif yüklü protonlar (P), çekirdek etrafında ise negatif yüklü elektronlar (e) bulunur. En basit atom olan hidrojen hariç genellikle atom çekirdeğinde protonlar ve nötronlar doğada bulunan temel kuvvetlerden olan güçlü nükleer kuvvet sayesinde bir arada bulunurlar. Bu durum hafif çekirdeklerde böyledir ve proton-nötron sayıları oranı 1'e yakın bu çekirdekler kararlı çekirdek olarak adlandırılır. Doğada kararlı çekirdeklerin sayısı azdır. $^{207}\text{Bi}_{83}$ en ağır kararlı çekirdektir. Daha ağır çekirdeklerde proton sayısının nötron sayısına göre çok fazla olması sebebiyle protonlar arasındaki Columb itme kuvveti atomun kararlı durumunu bozar. Ancak sayısının proton sayısına göre fazla olduğu durumlara kararsız atom denir. Kararsız atomların kararlı hale geçebilmek için kendiliğinden parçacık ya da elektromanyetik dalga yayınlamasına radyoaktivite, elektromanyetik dalgalar ve parçacıklar halindeki enerjinin yayılmasına ve aktarılmasına radyoaktif ışınım denir. Bu kararsız ve radyoaktif çekirdekler proton ve nötron sayıları oranı dengelenene kadar azalan bir hızla alfa (α), beta (β) ya da gama (γ) radyoaktif ışınları yapar ve kararlı hale gelir.

Şekil 1 bilinen çekirdeklerin nötron ve proton sayılarının değişim grafiğidir. Bu şekilde, I. bölge proton ve nötron sayıları 1,5 ve üstü olan ağır, kararsız çekirdeklerin yer aldığı bölge, kararlılık bölgesi (III. Bölge) proton ve nötron sayıları bir olan kararlı çekirdeklerin yer aldığı bölgedir. Atom numarası arttıkça elementlerin kararlılık bölgesinden uzaklaştığı görülmektedir ve kararlı en ağır çekirdek için bu oranın yaklaşık 1,5 olduğu düşünülürse $N/Z > 1,5$ olan tüm çekirdeklerin kararsız olmaları anlaşılacaktır (Krane, 2001). Kararlılık kuşağının üstünde yer alan çekirdekler kararlılığa erişmek için nötron sayısını azaltmalı veya proton sayısını artırmalı, kararlılık kuşağının altında yer alan çekirdekler ise kararlılığa erişmek için nötron sayısını artırmalı veya proton sayısını azaltmalıdır.



Şekil 1. Çekirdeklerin proton ve nötron sayıları değişim grafiği (Krane, 2010).

1.3.1.1. İyonlaştırıcı Radyasyon

Radyasyon ile taşınan enerji bir atomdan elektron koparabilecek büyüklükteyse buna iyonlaştırıcı radyasyon denir. Atomdan elektron koparıldığında açığa çıkan enerji çevre atomlara yayılır. İyonlaştırıcı radyasyon atomlarla etkileşebildiği için canlı hücrelere de zarar verir.

İyonlaştırıcı radyasyon, kütleli yapıya sahip parçacık radyasyonu ve foton enerjili dalga karakterinde elektromanyetik radyasyon olmak üzere iki gruba ayrılır. Alfa (α) ve beta (β) parçacıkları, elektron, proton ve nötronlar parçacık türü iyonize radyasyon tiplerini oluşturur. Yüksek enerjili mor ötesi ışınlar, x ve γ ışınları ise, iyonlaştırıcı yeteneğe sahip yüksek enerjili fotonlardan oluşan elektromanyetik radyasyonlardır.

1.3.1.2. İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyon

Radyasyon ile taşınan enerji bir atomdan elektron kopararak iyonlaşmaya sebep olmuyorsa buna iyonlaştırıcı olmayan radyasyon denir. Atomla etkileşime girebilecek kadar büyük bir enerji taşımadığından (frekansı düşük olduğundan) canlılar üzerinde büyük bir hasara neden olmaz.

Radyo dalgaları, mikrodalgalar, kızılötesi ışınlar, görünür ışık ve mor ötesi ışınlar iyonlaştırıcı olmayan radyasyondur. İyonlaştırıcı olmayan tüm radyasyon çeşitleri elektromanyetik dalgalardır.

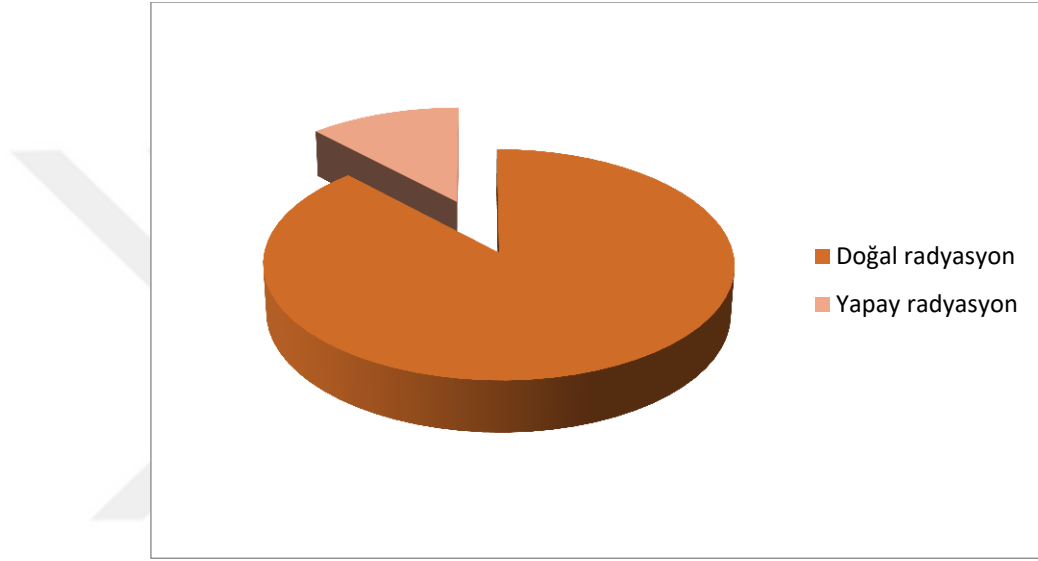
1.3.2. Türüne Göre Radyasyon Çeşitleri

Parçacık ve dalga tipindeki radyasyonların canlı hücrelere ve ortamlara gircilikleri, parçalanmaları, şiddetleri, yapıları birbirinden farklıdır. Her iki tür de iyonlaştırıcı radyasyondur.

Belirli bir kütlesi ve enerjisi olan çok küçük parçacıklar tarafından taşınan enerjiye “parçacık tipi radyasyon”, belirli bir enerjisi olan ancak kütlesi olmayan fotonlar tarafından taşınan enerjiye “iyonlaştırıcı olmayan radyasyon” denir.

1.3.3. Kaynağına Göre Radyasyon Çeşitleri

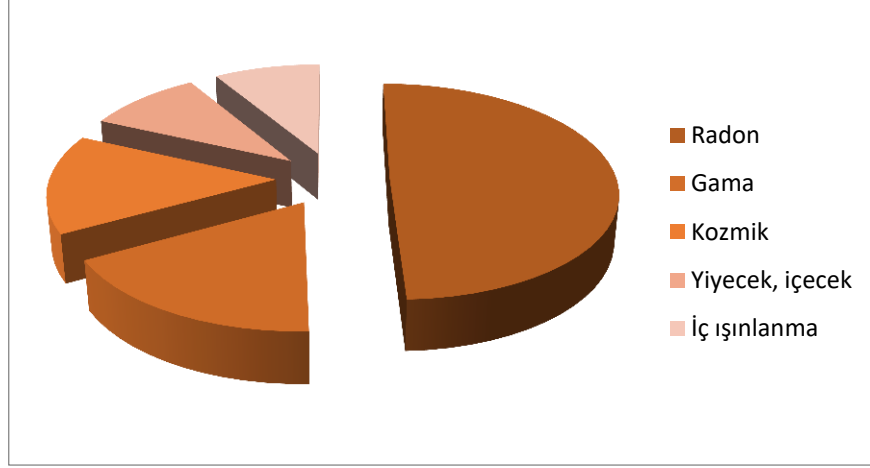
İnsanoğlu ve diğer tüm canlı-cansız varlıklar varoluşlarından bu yana radyasyonla etkileşmek zorunda kalmıştır ve varlıklarını sürdürdükleri müddetçe de bu etkileşme ve devam edecektir. Dünyanın oluşumundan beri var olan doğal, gelişen teknoloji ve enerji ihtiyacı sebebiyle insanlar tarafından üretilen yapay radyasyon kaynakları ünlük hayatta maruz kaldığımız radyasyon seviyesini belirler.



Şekil 3. Canlı ve cansız varlıkların maruz kaldığı doğal ve yapay radyasyon kaynaklarının oranı

1.3.3.1. Doğal Radyasyon Kaynakları

Dünyanın oluşumuyla birlikte çok uzun yarı ömürlü radyoaktif elementler yerküreye yayılmış ve doğal radyasyona sebep olmuşlardır. Bu doğal radyasyonun canlılar tarafından alınan dozu yaşanan yerin coğrafi konumuna, fiziksel özelliklerine (kullanılan malzemeler, hava akışı vb.) hava şartlarına, tüketilen besinlere, içme ve kullanma sularının özelliklerine bağlı olarak değişiklik gösterir. Dünyamızın temel enerji kaynağı olan güneş de önemli bir doğal radyasyon kaynağıdır. Birleşmiş Milletler Atomik Radyasyonun Etkileri Bilimsel Komitesi (UNSCEAR) doğal radyasyonu kozmik, karasal, solunan ve yiyeceklerle alınan olarak 4 temel bölümde incelemektedir.

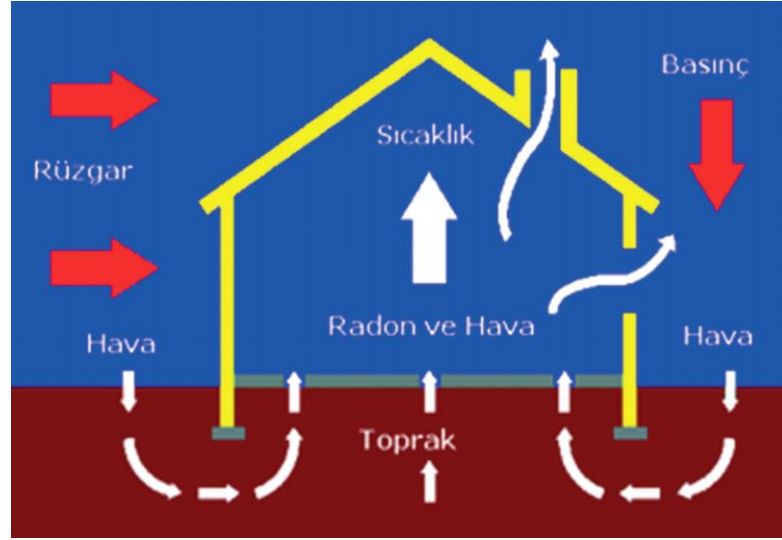


Şekil 4. Doğal radyasyon kaynakları

Güneşten gelen kozmik ışınlardan bir kısmı dünyamıza ulaştığında büyük bir kısmı atmosfer tarafından yansıtılır ancak bir kısmı da yüksek enerjili parçacıklar olarak atmosferden geçer. Bu yüksek enerjili parçacıklar kozmik radyasyon olarak adlandırılır. Kozmik radyasyonun yüksekliği deniz seviyesine olan uzaklığa bağlı olarak değişir. Yükseklik değişimi dikkate alındığında yıllık etkin doz ortalama 0,4 mSv civarında hesaplanmıştır (Seyrek, 2007).

Dünyanın oluşumu sırasında ortaya çıkan uzun yarı ömürlü radyoaktif maddelerden ^{238}U , ^{232}Th serisindeki radyonüklidler, ^{40}K toprakta ve kayalarda bulunan, buna bağlı olarak besinlerde ve sularda da görülen karasal radyasyonun sebepleridir.

Solunan radyasyonun sebebi ise renksiz, kokusuz bir soy gaz olan radon gazıdır. Uranyumun bozunarak önce radyuma dönüşmesi sonucu radyumun oluşturduğu radon gazının ağırlığı aynı hacimdeki havaya göre 8 kat fazladır. Toprak altındaki katmanların yapısına bağlı olarak uranyum ve radyum yoğunluğu farklılık gösterir. Radon gazı ev ve işyerlerinde her gün fark etmeden maruz kaldığımız bir radyasyon kaynağıdır. Bu yüzden bütün canlılar iç ışınlamalarla en büyük radyasyon dozunu radondan almaktadır. Uçucu bir gaz olduğundan kapalı mekanların havalandırılması radon gazından korunmak için iyi bir yöntemdir. Şekil 5’de radonun ev ve işyeri ortamlarına giriş yolları gösterilmektedir.



Şekil 5. Radon gazının kapalı ortamlara giriş yolları (Tufaner, 2005).

Yaşadığımız çevrede insanlar solunum ve sindirim yoluyla doğal radyonüklidlerden ^{40}K , ^{226}Ra , ^{238}U 'in bozunma ürünleri ve düşük oranda ^{14}C , ^3H vücutlarına alırlar.

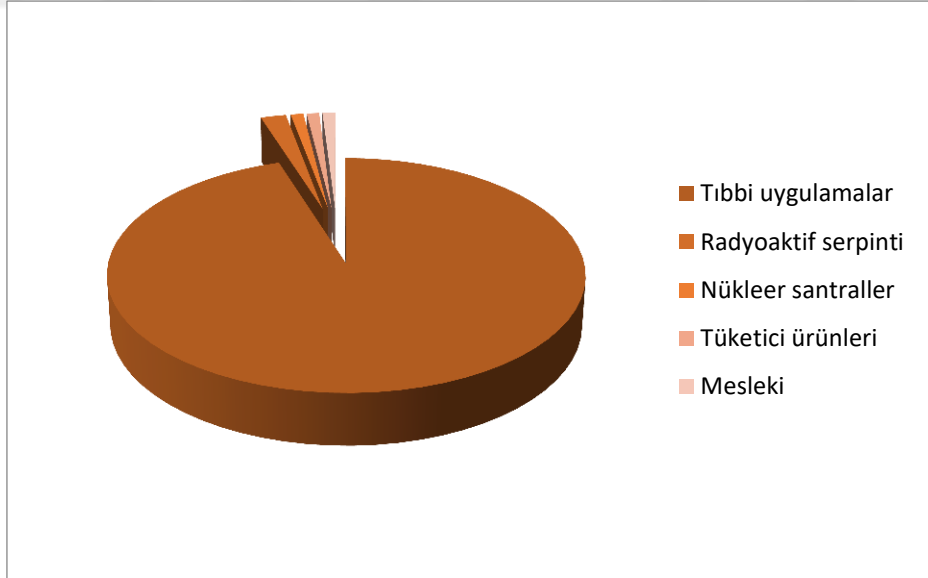
^{40}K ve ^{14}C elementleri hem DNA zincirimizde bulunan hem de gıdalarla vücudumuza aldığımız radyoaktif elementlerdir. Yiyeceklerden alınan radyasyon seviyesi yiyeceklerin yetiştirme ve hazırlanma biçimleri ile beslenme alışkanlıklarına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Vücudumuzda bulunan radyoaktif elementler nedeniyle bir yıl boyunca maruz kaldığımız iç ışınlama dozunun dünya ortalaması 0,23 mSv'dir (TAEK, 2009).

Tablo 1. İnsan Vücudunda Bulunan Doğal Radyoaktif Elementler

Radyoizotop adı	Vücuttaki toplam radyoizotop miktarı	Vücuttaki radyoizotopların toplam aktivitesi	Günlük alınan radyoizotoplar
Uranyum	90 μg	30 pCi	1,9 μg
Toryum	30 μg	3 pCi	3 μg
Potasyum-40	17 μg	120 nCi	0,39 mg
Radyum	31 μg	30 pCi	2,3 pg
Karbon-14	95 μg	0,49 μCi	1,8 μg
Polonyum	0,2 pg	1 nCi	0,6 μg
Tritiyum	0,06 pg	0,6 nCi	0,003 pg

1.3.3.2. Yapay Radyasyon Kaynakları

Gelişen teknoloji ve artan enerji ihtiyacı ile yapay radyasyon kaynaklarının oranı gittikçe artmaktadır. Gelişmiş endüstriyel ekonomilerin ve yüksek yaşam standartlarının, doğada mevcut olmayan bazı radyasyon kaynakları kullanılmadan süreklilik gösterebileceğini düşünmek şimdilik pek mümkün gözükmemektedir. Birçok ülke temiz ve verimli bir enerji kaynağı olduğu için nükleer enerji santralleri ile enerji üretmekte ve ülkemizde dahil olmak üzere bazı ülkeler nükleer enerji üretimine başlamaktadır. Bu santrallerden salınan radyoaktif maddeler yapay radyasyonun sebeplerindedir. Nükleer silah denemeleri sonucu oluşan serpintiler ise yapay radyasyonun bir başka sebebidir. Ancak yapay radyasyonun en önemli sebebi tıbbi kaynaklardır. Tıbbi görüntüleme, tanı ve tedavi amaçlı olarak radyoaktif maddeler kullanılmaktadır. Ayrıca X_ray cihazları gibi güvenlik uygulamaları da günlük hayatta maruz kaldığımız yapay radyasyona sebebiyet verir. Yapay radyasyonun doğal radyasyondan en önemli farkı kontrol altında olmasıdır. Şekil 6'da yapay radyasyon kaynaklarının dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 6. Yapay radyasyon kaynakları

1.4. Radyoaktivite Kanunları

1.4.1. Radyoaktif Bozunma Kanunu

Nükleer Fizik çalışmalarının başlama sebebi olarak radyoaktif maddelerin bozunumları gösterilebilir. Karasız çekirdekler kararlı hale gelebilmek için alfa (α), beta (β) tanecikleri ya da gama (γ) elektromanyetik dalgası yayınlar. Bu duruma radyoaktif bozunma, bu tip çekirdeklere de radyoaktif çekirdek denir. İlk bozunmaya uğrayan çekirdeğe “ana çekirdek”, peş peşe devam eden bozunmalara “radyoaktif seri”, bozunma sonucu oluşan ürüne “ürün çekirdek” adı verilir. Doğada bilinen dört farklı radyoaktif seri vardır.

Tablo 2. Radyoaktif Seriler

Radyoaktif Seri Adı	Ana Çekirdek	Ürün Çekirdek
Toryum	^{232}Th	^{208}Pb
Neptinyum	^{237}Np	^{209}Bi
Uranyum	^{238}U	^{206}Pb
Aktinyum	^{235}U	^{207}Pb

Eğer herhangi bir t anında N tane radyoaktif çekirdek varsa ve bu numuneye dışarıdan herhangi bir çekirdek ilave edilmiyorsa sonsuz küçük zaman aralığı içinde radyoaktif çekirdek sayısı ile orantılı bozunan çekirdek sayısından bahsedilir.

$$\frac{dN(t)}{dt} = -\lambda N(t) \quad (1)$$

Bu denklemin sol tarafı bir çekirdekte gerçekleşen bozunmanın temel istatistiksel teorisinin bir varsayıımıdır. Negatif olması ise radyoaktif atomların zamanla azaldığını göstermektedir. Bu denklemin integrali alınırsa;

$$\ln N = -t + C \quad (2)$$

$$N(t)=N_0e^{-\lambda t} \quad (3)$$

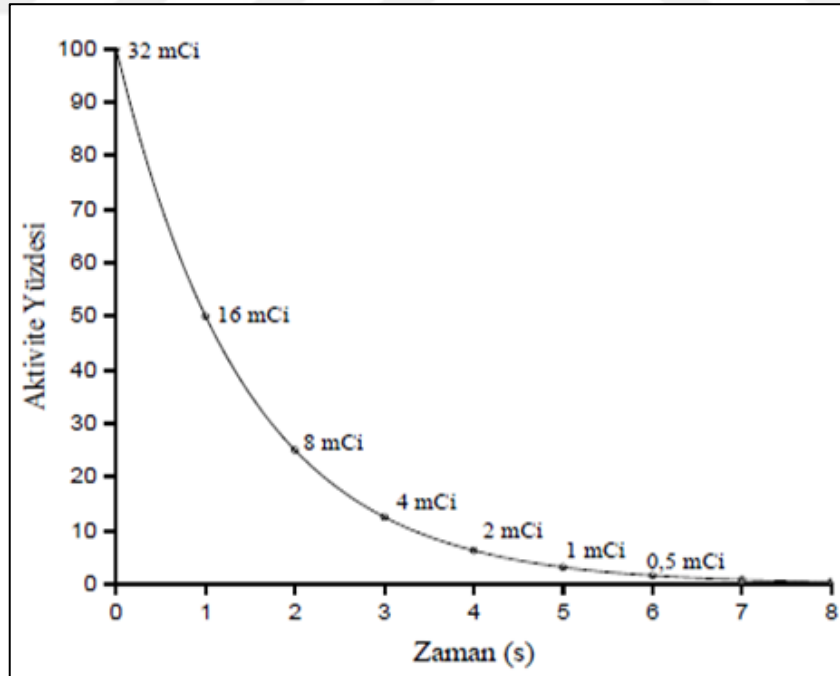
şeklinde üstel radyoaktif bozunma kanunu elde edilir. Burada $t=0$ anında bozunmamış çekirdeklerin sayısı N_0 integrasyon sabiti, t süre, λ radyoaktif bozunma sabiti, N ise t süre sonunda kalan çekirdek sayısını göstermektedir. Bu eşitliğin her iki tarafı da denklem 2. İle hesaplanan bozunma sabiti ile çarpıldığında aktivite denklemi elde edilir.

$$N\lambda=N_0\lambda e^{-\lambda t} \quad (4)$$

N tane atomdan oluşan topluluğun aktivitesi $N\lambda$ ile edilir ve I ile gösterilir. Aktivite birimi bozunma/saniye'dir. I , denklem 6'da yerine yazılırsa

$$I=I_0e^{-\lambda t} \quad (5)$$

ifadesi elde edilir.



Şekil 7. Aktivitenin zamanla değişimi (Krane, 2001).

1.4.2. Radyoaktif Bir Numunenin Ortalama Ömrü ve Yarı Ömrü

Radyoaktif çekirdeklerin miktarının yarıya düşmesi için geçen süreye ise “yarı ömür” denir ve her element için farklı değer alan, o elemente has bir özelliktir. Bir t anında bozunmadan kalan çekirdek sayısını ifade eden denklem (5) de $N=N_0/2$ kabul edildiğinde başlangıçta var olan radyoaktif çekirdeklerin yarısının bozunmuş yarısının ise bozunmadan kalmış olduğu ifade edilir. Bu durumda;

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda t} \quad (6)$$

denklemini elde edilir. Yarı ömür $t_{1/2}$ ile gösterilir ve $e^{-\lambda t}=1/2$ olarak denklem (8)'de yerine yazılırsa;

$$t_{1/2} = \frac{0,693}{\lambda} \quad (7)$$

şeklinde bir radyoaktif çekirdeğin yarı ömür süresini veren ifade elde edilir. Bir radyoaktif çekirdeğin bozunma sabiti ne kadar büyükse yarı ömrü o kadar küçük olur.

Bilinen en kısa yarı ömürlü çekirdek 10^{-21} sn ile He, en uzun yarı ömürlü çekirdek ise 1017 yıl ile ^{204}Pb 'dür.

Radyoaktif çekirdeklerin bozunmasına kadar geçen süreye “ortalama ömür” denir. Radyoaktif bir çekirdeğin ne zaman bozunacağı tam olarak belirlenemez ve ömrü sonsuz değer alabilir. Bu yüzden ortalama ömür kavramında radyoaktif bütün radyoaktif çekirdeklerin ömürleri toplanıp çekirdek sayısına bölünerek çekirdeklerin ömürlerinin ortalaması belirlenir ve bozunma sabitinin tersidir.

$$\tau = \frac{t_1 dN_1(t) + t_2 dN_2(t) + \dots}{dN_1(t) + dN_2(t) + \dots} = \frac{t dN(t)}{dN(t)} \quad (8)$$

$$\tau = -\lambda \frac{\int_0^{\infty} t N_0 e^{-\lambda t}}{N_0} = \frac{1}{\lambda} \quad (9)$$

Burada τ ortalama ömrü temsil eder. Ortalama ömür genellikle yarı ömürden büyük olup aralarındaki bağıntı denklem (12) ile ifade edilir.

$$T_{1/2} = \frac{0,693}{\lambda} = 0,693 \tau \quad (10)$$

1.4.3. Peş Peşe Bozunma Kanunu

Kararsız bir çekirdeğin bozunmaya uğramasının temel sebebi kararlı hale geçme isteğidir. Kararsız çekirdek geçirdiği ilk bozunmadan sonra hemen kararlı duruma gelememiş olabilir. Bu durumda bozunma tekrarlanır ve çekirdek kararlı hale gelinceye kadar da bozunmalar peş peşe devam eder. Genellikle süreç ana çekirdeğin ürün çekirdeğe, ürün çekirdeğin de kararlı bir çekirdeğe bozunmasıyla sınırlıdır. Hem doğal hem de yapay radyoaktif çekirdeklerin davranışları bahsedilen şekilde gerçekleşir. Ürün çekirdeğe bozunacak olan λ_1 bozunma sabitli ana çekirdek sayısı N_1 , ürün çekirdek sayısı ile N_2 ile gösterilirsin. Kararlı hale gelebilmek için bu ürün çekirdekler de λ_2 bozuma sabitiyle başka bir çekirdeğe bozunacaktır. Bu kararlı elementteki çekirdek sayısına N_3 dersek belirli bir sayıda çekirdekle başlamış bozunmanın herhangi bir anda ürün çekirdeklerinin sayısını hesaplayabiliriz. Başlangıçta ($t = 0$) $N_1 = N_{10}$, $N_2 = N_{20}$, $N_3 = N_{30}$ olduğunu farz edelim.

Bu durumda;

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1 \quad (11)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \quad (12)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = \lambda_2 N_2 \quad (13)$$

denklem (13) ana çekirdeğin bozunma hızını, denklem (15) ise kararlı elementteki çekirdeklerin üretim hızını göstermektedir. Denklem (8)'de $t = 0$ ve $N_1 = N_{10}$ şartıyla integral alındığında;

$$N_1 = N_{10} e^{-\lambda_1 t} \quad (14)$$

elde edilir ve bu değer denklem (14)'de yerine yazılırsa;

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_{10} e^{-\lambda_1 t} - \lambda_2 N_2 \text{ veya } + \lambda_2 N_2 = \lambda_1 N_{10} e^{-\lambda_1 t} \quad (15)$$

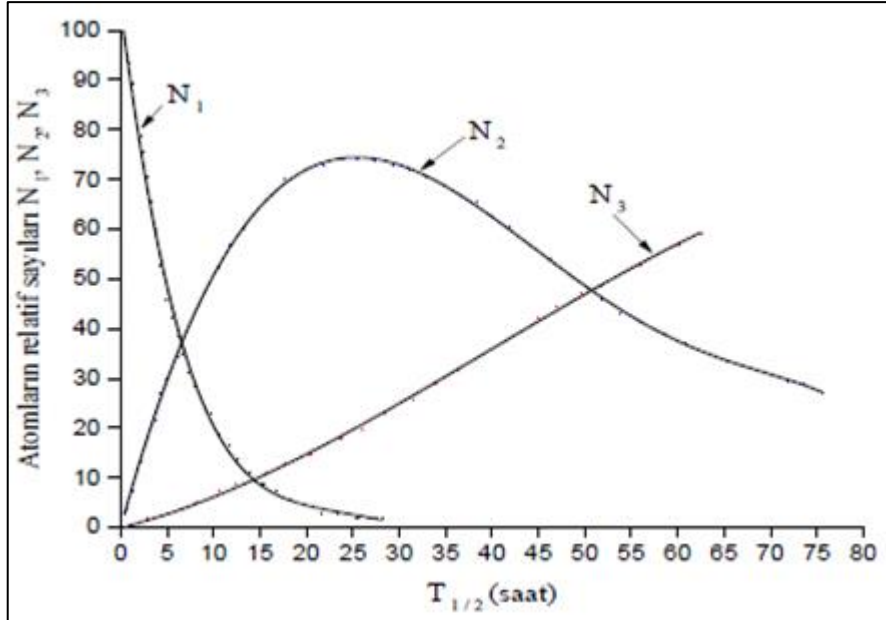
denklemi elde edilir ve $t = 0$ anında $N_2 = N_{20} = 0$ kabul edilerek denklemin integrali alındığında;

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} N_{10} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \quad (16)$$

denklem (15) de benzer biçimde $t = 0$ anında $N_3 = N_{30} = 0$ kabul edilerek çözümlerse;

$$N_3 = N_{10} \left(1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} e^{-\lambda_2 t} - \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} e^{-\lambda_1 t} \right) \quad (17)$$

elde edilir ve (16), (18), (19) denklemleri yardımıyla herhangi bir t anında mevcut olan çekirdek sayısı bulunabilir. $t=0$ da $N_1 = N_{10}$ ve $N_{20} = N_{30} = 0$ özel durumları için üretilen bu denklemlerden sonra belirtilen özel durumlar olmasa bile N_1 , N_2 ve N_3 için bağıntılar üretmek mümkündür (Arya,1999).



Şekil 8. Peş peşe bozunma grafiği

1.4.4. Geçici Denge

λ_1 bozunma sabitiyle bozulan bir ana çekirdekten oluşan birinci ürünü de λ_2 bozunma sabitiyle bozunduğunu ve bu iki çekirdeğin ortalama ömürlerinin yaklaşık olarak eşit ($\tau_1=\tau_2$) dolayısıyla $\lambda_1 = \lambda_2$ olduğunu düşünelim. Denklem (18)'de $\lambda_2 < \lambda_1$ olduğunda yeteri kadar uzun bir zaman sonunda $e^{-\lambda_1 t}$ terimi $e^{-\lambda_2 t}$ 'ye göre ihmal edilebilir olur ve böylece,

$$N_2 = N_{10} \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} e^{-\lambda_2 t} \quad (18)$$

şeklinde elde edilen denklem belli bir zamanda sonra birinci ürün elementinin kendisi için belirlenmiş olan λ_2 bozunma sabitiyle bozunacağını ifade eder.

1.4.5. Sürekli Denge

Denklem (17) çözüldürken $\lambda_1 \ll \lambda_2$ durumunu ele aldığımızda $e^{-\lambda_1 t} \approx 1$ ve $\lambda_2 - \lambda_1 = \lambda_2$ yazabiliriz. Çözüm yapıldığında;

$$N_2 = N_{10} \frac{\lambda_1}{\lambda_2} (1 - e^{-\lambda_2 t}) \quad (19)$$

elde edilir. Zamanın artmasıyla $e^{-\lambda_2 t}$ terimi sıfıra gideceğinden ürün çekirdeğin miktarı, bir denge durumuna yaklaşacak ve denge durumunda;

$$\lambda_1 N_{10} = \lambda_2 N_2 \quad (20)$$

λ_1 çok küçük olduğundan eşitliğin sol tarafı yaklaşık sıfır olacaktır. Buradan ana çekirdeğin ürün çekirdeklere göre çok büyük yarı ömre sahip olduğu anlaşılır.

1.5. Radyoaktif Bozunma Türleri

1.5.1. Alfa Bozunumu

1900'lü yılların başında Rutherford alfa parçacıklarının iki proton ve iki nötrondan oluşmuş bir helyum çekirdeği (He_2) olduğunu ortaya koymuştur. Ağır çekirdeklerde gözlenen alfa (α) bozunumu bir Coulomb itme kuvveti olayıdır. Temel bozunumu reaksiyonu



şeklinde ifade edilir. Burada X ana çekirdeği, Y ürün çekirdeği, A çekirdeklerin kütle numarasını, Z çekirdeklerin atom numarasını, N ise çekirdeklerin elektron sayısını göstermektedir. Alfa bozunumunun tam olarak anlaşılabilmesi için enerji, çizgisel momentum ve açısal momentum açısından incelenmesi gerekir.

Başlangıç anında ana çekirdek X durgun olduğundan ürün çekirdekler olan Y ve α parçacıklarının momentumları zıt yönlerde ve eşit büyüklükte olmalıdır.

$$m_Y v_Y = m_\alpha v_\alpha \quad (22)$$

E_i ve E_f sistemin bozunmadan önceki ve sonraki toplam enerjileri olmak üzere enerjinin korunumu yasası gereği $E_i = E_f$ olmalıdır. Bu durum dikkate alındığında $M(A, Z)$ bozunan, $M_Y(A-4, Z-2)$ ürün çekirdeğin, $M_\alpha(4, 2)$ ise α parçacığının kütlesi olmak üzere sistemin bozunma enerjisi (Q) aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$Q = [M(A, Z) - M_Y(A-4, Z-2) - M_\alpha(4,2)]c^2 \quad (23)$$

$Q > 0$ olması durumunda kendiliğinden bozunma gerçekleşir. Ayrıca Q değeri kinetik enerjideki artışa da eşit olduğundan, K_Y ve K_α ürün çekirdeğin ve α -parçacığının kinetik enerjileri olmak üzere (24) ifadesi şu şekilde yazılabilir:

$$Q = K\dot{U} + K\alpha \quad (24)$$

Bir bozunum sonrasında açığa çıkan alfa parçacığı mevcut momentumun mümkün olan en az, enerjinin ise mümkün olan en çok kısmını alır. Alfa parçacıkları bir madde içinden geçerken sahip oldukları elektrik yükleri dolayısıyla, madde içinde iyonlaşmaya sebep olurlar ve bundan dolayı enerjilerini çabuk kaybederler. Yine alfa parçacıkları, radyoaktif bir çekirdekten $1,6 \times 10^7$ m/sn gibi büyük bir hızla dışarı fırlatıldıkları için enerjileri fazla olmasına rağmen kütleleri diğer parçacıklara oranla büyük olduğundan erişim mesafeleri düşüktür. Ayrıca, doğal olarak bulunan radyoaktif maddelerin yayınladıkları alfa parçacıklarının enerjileri 9 MeV 'in altında ve dalga boyları küçük olması sebebiyle bunları çok küçük kalınlıktaki bir madde ile durdurmak mümkündür. Bu sebeple bir dış radyasyon tehlikesi yaratmamaktadırlar. Ancak bu parçacıkların sindirim, solunum vs. yollarıyla vücuda girmeleri halinde oluşturacakları iyonizasyon, önemli bir iç radyasyon tehlikesi yaratabilmektedir (BEIR VI, 1999). Elektrik ve manyetik alanda sapmaya uğrarlar.

Tablo 3. Alfa Parçacığı Yayımlayan Bazı Radyonüklidler

Radyonüklid	Alfa Enerjisi (MeV)	Oluşma yüzdesi	Yarı Ömür
^{232}Th	4,012	%77	$1,4 \times 10^{10}$ yıl
	3,953	%23	
^{238}U	4,196	%77	$4,5 \times 10^9$ yıl
	4,149	%23	
^{226}Ra	4,871	%100	1602 yıl
^{241}Am	5,48	%85,2	433 yıl
	5,44	%12,8	
^{242}Cm	6,11	%74	163 gün
	6,06	%26	
^{222}Rn	5,4	%100	3,8 gün

1.5.2. Beta Bozumu

1930'lu yıllarda çekirdeklerin elektron (e^-) yayınladığı gibi bir elektron (e^-) ya da pozitron (e^+) yakaladığı da keşfedilmiş ve bu olaylara beta (β) bozunumu adı verilmiştir. Radyoaktif bir çekirdek β parçacığı yayınladığı zaman atom numarası (Z) ve elektron sayısı (N) bir birim değişir. β parçacıklarının belirli bir yükü ve kütlesi olduğundan iyonizasyona sebep olurlar ancak bu yük ve kütle α parçacıklarına göre oranla küçük olduklarında iyonizasyon etkileri de daha küçüktür. β parçacıklarının hızları ışık hızına yaklaşabilir ve menzilleri çok uzundur. Elektrik ve manyetik alanda sapmaya uğrarlar.

1.5.2.1. β^- Bozunumu

Çekirdekteki kararsızlık nötron fazlalığından ileri geldiğinde fazla nötronlardan biri protona dönüşür ve bu esnada çekirdekten negatif yüklü bir elektron fırlatılır. Bu olaya β^- bozunumu denir. β^- bozunumu yapan bir radyonüklid kendinden bir sonraki elementin izobar atomuna dönüşür.



1.5.2.2. β^+ Bozunumu

Çekirdekteki kararsızlık proton fazlalığından ileri geldiğinde fazla protonlardan biri nötrona dönüşür ve bu esnada çekirdekten pozitif yüklü bir elektron (pozitron) fırlatılır. Bu olaya β^+ bozunumu denir. β^+ bozunumu yapan bir radyonüklid kendinden bir önceki elementin izobar atomuna dönüşür.



1.5.2.3. Elektron Yakalama

Çekirdekteki kararsızlık proton fazlalığından ileri geldiğinde β^+ bozunumundan başka çekirdeğe yakın yörüngelerdeki elektronlardan biri çekirdek tarafından yakalanarak

da çekirdek kararlı hale geçebilir. Bu bozunma olayında çekirdekten parçacık salınmaz ancak boşalan elektron yörüngesine üst yörüngelerdeki başka bir elektron geçtiği için X_ışınları yayınlanır.



Tablo 4. Beta Parçacığı Yayımlayan Bazı Radyonüklidler

Radyonüklid	Alfa Enerjisi	Yarı Ömür
${}^3\text{H}$	1,86 keV	12,3 yıl
${}^{85}\text{Kr}$	0,67 MeV	10,2 yıl
${}^{90}\text{Sr}$	0,54 MeV	28,5 yıl
${}^{90}\text{Y}$	2,27 MeV	64 saat
${}^{204}\text{Tl}$	0,77 MeV	3,8 yıl

1.5.3. Gama Bozunumu

Kararsız bir çekirdek ilk bozunmadan sonra genellikle hemen kararlı hale geçemez. Bu durumda yarı kararlı durumdaki çekirdek fazla enerjisinin bir elektromanyetik gama (γ) ışını (foton) şeklinde yayınlar ve kararlı hale geçer. Bu sırada yayınlanan gama γ radyasyonu nükleer durumlar arasındaki farka eşit bir enerji taşır. Gama ışını yayınlanmasından sonra atom, başka bir atoma dönüşmez. Gama yayınlanmasının yarı ömrü diğer bozunumlarla kıyaslandığında çok kısadır, genellikle 10^{-9} saniyeden daha küçüktür, ancak saat, hatta gün mertebesinde yarı ömürlü gama yayınlanması da vardır. Enerji spektrumları ise kesiklidir (Tüysüz, Yorulmaz, Bozkurt, 2004).

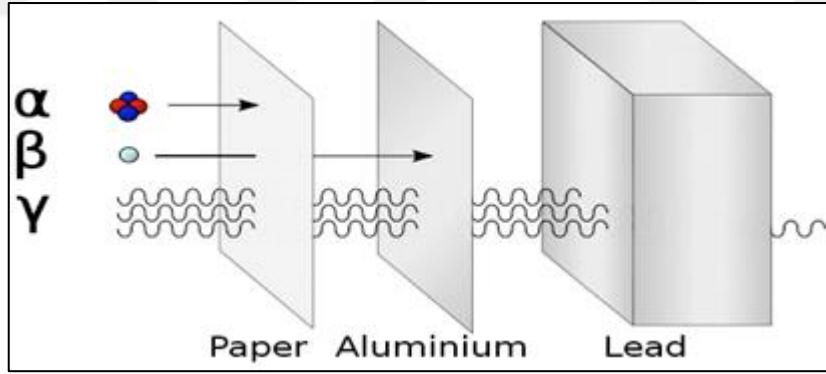


γ ışınları, elektriksel yükleri olmadığı için yüklü parçacıklarda olduğu gibi Coulomb kuvvetine maruz kalmazlar. Bu yüzden doğrudan iyonlaştırıcı etki yaratmazlar ancak kısa dalga boylu elektromanyetik bir dalga olduklarından elektromanyetik kuvvet taşımaları

sebebiyle madde ile iyonlaşmayla ve ortama enerji depolamayla etkileşme yaparlar. Madde ile etkileşmeleri α ve β parçacıklarına göre farklı olup bu taneciklere göre daha gericidirler. Belirli bir menzile sahip değildirler. Elektrik ve manyetik alanda sapmaya uğramazlar. γ ışınları madde ile etkileştiğinde enerjilerinin büyük bir kısmını bazı durumlarda ise tamamını kaybederler ve çoğunlukla Fotoelektrik olay, Compton saçılması (Thomson ve Rayleigh saçılması içeriyor) ve çift oluşumu şeklinde etkileşmeler yaparlar.

Tablo 5. Gama Işınması Yapan Bazı Radyonüklidler

Radyonüklid	Alfa Enerjisi	Yarı Ömür
^{60}Co	1,33 MeV	5,3 yıl
^{137}Cs	0,66 MeV	30 yıl
^{192}Ir	0,9 MeV	74 gün
^{225}Ra	2,5 MeV	1600 yıl
^{241}Am	60 keV	432 yıl



Şekil 9. α , β , γ radyasyonlarının giricilikleri (URL-2, 2008).

1.6. Aktivite ve Radyasyon Birimleri

Radyasyon dozu hedef kütle tarafından, belli bir sürede soğurulan veya alınan radyasyon enerjisi miktarıdır. Radyasyon dozunun hedef kütlede meydana getireceği etki radyasyonun çeşidine, doz hızına ve bu doza maruz kalış süresine bağlıdır. İyonlaştırıcı

radasyonlarla yapılan çalışmalarda sonuca ulaşabilmek ve zararlı biyolojik etkileri belirleyebilmek için radyasyon dozunun bilinmesi gerekir. Bu amaçla geliştirilecek ölüm yöntemleri için her Őeyden önce radyasyon dozunu lcek birtakım birimlerin tanımlarının yapılması zorunludur. Aktivite, ışınlama, absorblanan (soğurulan) doz ve eşdeğer doz Uluslararası Radyasyon Birimleri Komitesinin (ICRU) radyasyon çalışmalarında kullandığı kavramlardır. Bunların birimleri sırasıyla; Curie (Ci), Röntgen (R), Rad ve Rem' dir. Bu zel birimler, 1986 yılından itibaren terk edilmeye başlanmış ve yerine tüm dünyada kullanılan birimlerin aynı olması düşüncesi ile MKS sistemini esas alan "Uluslararası Birimler Sistemi (SI)" kullanılmaktadır. Aynı kavramlar için SI birimleri sırasıyla Becquerel (Bq), Coulomb/kg, Gray (Gy), ve Sievert (Sv) olarak seçilmiştir. Tablo 4'de radyasyon özel birimler ile SI birimleri arasındaki ilişki verilmiştir (Taşkın, 2011).

Tablo 6. Radyasyon Birimleri ve Dönüşümleri

Terim	Eski Birim	Yeni Birim	Dönüşüm
Aktivite	Curie, Ci	Becquerel, Bq	1 Ci = 3,7x10 ¹⁰ Bq
ışınlama Dozu	Röntgen, R	Coulomb/kilogram C/kg	1 R = 2,58x10 ⁻⁴ C/kg
Soğurulmuş Doz	Radiation absorbed dose, rad	Gray, Gy	1 Gy = 100 rad 1 Gy = 1 J/kg
Doz Eşdeğeri	Röntgen equivalentman, rem	Sievert, Sv	1 Sv = 100 rem

1.6.1. Aktivite Birimi

Aktivite, radyoaktif maddelerin belirli bir zaman aralığı içerisindeki bozunma miktarını anlatmaktadır. Eski aktivite birimi olan Curie (Ci) ok büyük bir birim olduğundan genellikle alt birimleri kullanılmaktaydı. Becquerel (Bq), maddenin bir saniyedeki bozunma sayısını göstermektedir. Curie ve Becquerel arasındaki bağıntı Őyledir:

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq} \quad (29)$$

1.6.2. Işınlama Birimi

Normal hava şartları içerisindeki ($0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve 760 mm_Hg) 1 kg havada bulunan $2.58 \times 10^{-4}\text{ C}$ 'luk elektrik yükü değerinde, negatif ve pozitif iyonlar oluşturmakta olan gama ve x ışını miktarı olarak tanımlanmaktadır. Eski ışınlama birimi Coulomb/Kilogram (C/kg), yeni ışınlama birimi ise Röntgen (R), olup aralarındaki bağıntı aşağıdaki gibidir.

$$1\text{ R} = 2,58 \times 10^{-4}\text{ C/kg} \quad (30)$$

1.6.3. Soğurulmuş Doz Birimi

Birim kütle başına depolanmış olan enerji ölçüsüne denmektedir. Bu doz her tür radyasyona uygulanabilmektedir. Soğurulmuş doz biriminin Gray (Gy) olup 1 Joule/kg yani her kilogramda 1 joule olması anlamına gelir. Gray birimine geçilmeden önce soğurulmuş doz birimi olarak Radiation Absorbed Dose (rad) herhangi bir maddenin 1 gramına 100 erg 'lik enerji aktarımı şeklinde tanımlanmaktaydı.

$$1\text{ Gy} = 100\text{ rad} \quad (31)$$

$$1\text{ Gy} = 1\text{ J/kg} \quad (32)$$

1.6.4. Eşdeğer Doz Birimi

1 Röntgenlik X veya gama ışını ile aynı biyolojik etkiyi oluşturan herhangi bir radyasyon miktarıdır. Eski birim Röntgen Equivalentman (rem) ile yeni birim Sievert (Sv) arasındaki bağıntı şöyledir. Radyasyonun biyolojik etkilerini ifade etmek için tanımlanan bu birim doku ve organlarda soğurulan enerji miktarı ile orantılıdır.

$$1\text{ Sv} = 100\text{ rem} \quad (33)$$

1.6.5. Yıllık Etkin Doz Eşdeğeri

Bu değer, insanın farklı radyasyon kaynaklarından yayılan ışınlarla gerek dışarıdan maruz kaldığı gerekse yediği gıdalar ve soluduğu havada bulunan değişik radyonüklitlerden yayınlanan ışınlarla içeriden maruz kalmak suretiyle bir yıl içerisinde alacağı radyasyon dozu olarak tanımlanır ve birimi Sievert (Si)' tir. Her radyonüklidin yayınladığı radyasyon tipi ve enerjisi kullanılarak, her radyonüklid için birim aktivite başına yayınladığı radyasyonun doz dönüşüm faktörleri belirlenir ve birim hacim veya ağırlık başına tespit edilen aktivite konsantrasyonu ile doz dönüşüm faktörleri çarpılarak yıllık etkin doz eşdeğeri bulunur.

$$AEDE = \text{Dönüşüm faktörü} \times \text{Aktivite konsantrasyonu}$$

1.7. Sularda ve Toprakta Radyoaktivite

1.7.1. Sularda Radyoaktivite

Tüm canlılar gerek içme ve kullanma suyu olarak, gerek tarım ürünlerinin sulamasında su ile temas halindedir. Su ise sürekli bir hidrolojik çevrim içerisinde. Bu yüzden su hem doğal hem de yapay radyasyondan etkilenmektedir.

Yeraltı suları geçtikleri yerlerdeki kayaç ve toprakların içerdiği radyoaktif maddeleri içlerinde barındırırlar. Yeraltı sularında en çok rastlanan radyoaktif elementler ^{40}K , ^{87}Rb , ^{235}Th , ^{235}U ve ^{238}U 'dir. Ayrıca, ^{238}U 'in bozunumu sonucunda ortaya çıkan ^{222}Rn (radon), ^{226}Ra ile beraber kozmik ışınlardan etkisiyle radyoaktif özellik kazanan ^{14}N , ^{16}O ve ^{40}Ar da yer altı sularında bulunabilmektedir (Camgöz,2010).

Sulardaki radyasyon seviyesi yapay radyonüklidler sebebiyle de artmaktadır. Atmosfere yapılan nükleer silah denemelerinin serpintileri (^{137}Cs) ya da nükleer reaktörlerin atıkları sularda yapay radyonüklidler bulunmasına sebep olur.

Hidrojenin izotoplarından biri olan trityum ise atmosferde nötronların kozmik ışınların etkisiyle azot gazını bombardıman etmesiyle oluşur. Böylece doğal radyasyon kaynağı olarak sularda trityum bulunurken nükleer denemeler sonucu oluşan trityum da sularda bulunur.

Tablo 7. Sularda Radyoaktivite Sınır Değerleri (UNSCEAR, 2011).

Parametre	Sınır Değer (Bq/l)
Toplam Alfa	0,1
Toplam Beta	1
Trityum	100

1.7.2. Toprakta Radyoaktivite

Toprakta bulunan ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K gibi doğal radyoaktif çekirdekler toprağın radyoaktif hale gelmesine sebep olmaktadır (Damla, 2005). Bu radyonüklidlerin bulunma oranları toprağın ve kayacın yapısına göre değişiklik göstermektedir. Doğal radyoaktif çekirdekler volkanik, fosfat, granit ve tuz kayaçlarında yüksek konsantrasyonlarda bulunurlar.

Tablo 8. Toprakta Bulunan Radyonüklid Konsantrasyon Ortalamaları

Radyonüklid	Radyonüklid Konsantrasyonu (Bq/kg)			
	^{238}U	^{232}Th	^{226}Ra	^{40}K
Değişim Aralığı	16-110	11-64	17-60	140-850
Ortalama	35	45	35	400

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu çalışma kapsamında, Trabzon ili ile bağılı ilçelerine içme ve kullanma suyu sağlayan şebekelerde, ilçelerde kullanılan musluk sularında ve çevrelerindeki toprakta bulunan radyoaktivite düzeyinin belirlenmesi için çeşitli analizler yapılmıştır. Toplanan su numunelerinin toplam alfa, toplam beta, trityum ve kimyasal analizleri yapılmıştır. Bu numuneler için ayrıca radon konsantrasyonları da ölçülmüştür. Toprak ve su numunelerinde radyonüklid konsantrasyonları da belirlenerek doz eşdeğerleri hesaplanmıştır.

2.1. Numunelerin Toplanması

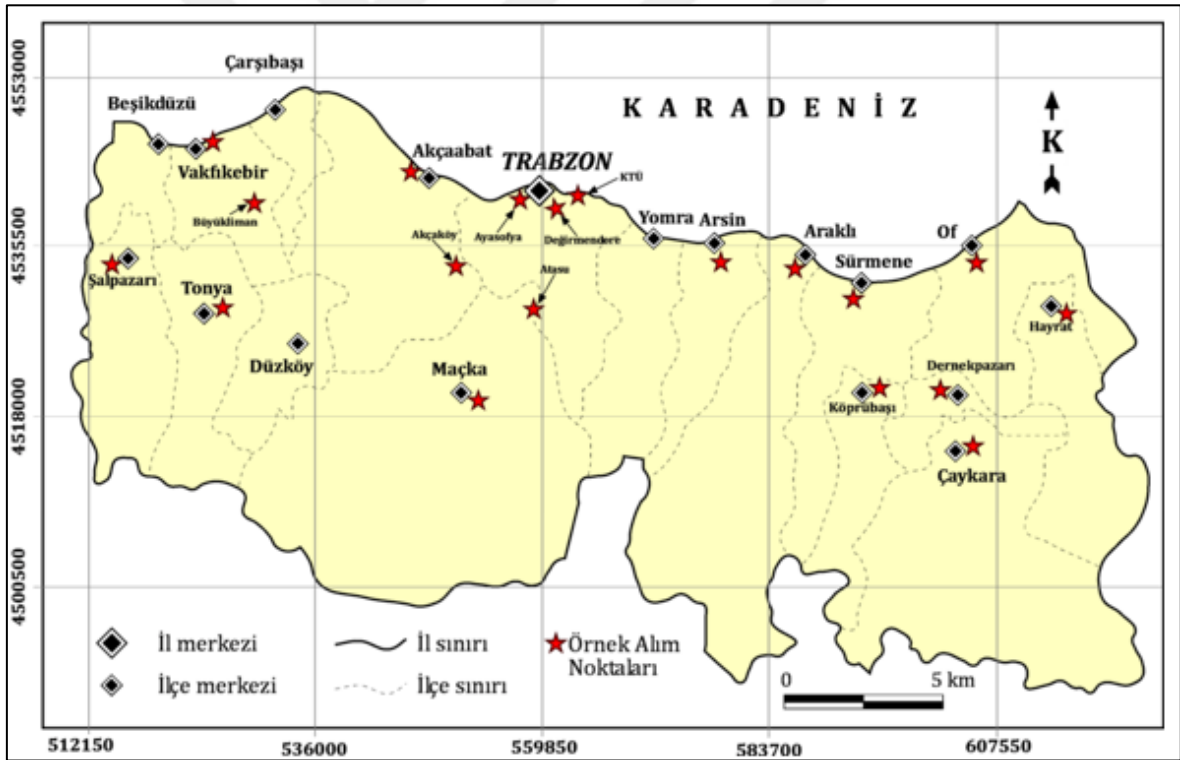
Toprak ve su numunelerinin toplanmasında örneklem bölgesi seçilirken Trabzon ilinde tüketilen içme ve kullanma suları evrenini kapsamaya dikkat edildi. Bu sebeple Trabzon iline içme ve kullanma suyu sağlayan ana şebekelerin yanı sıra ilçelerden de numuneler toplandı.

Trabzon il geneline içme ve kullanma suyu dört (4) ana şebekeden sağlanmaktadır. Devlet Su İşleri (DSİ)'den alınan verilere göre bazı ilçeler içme ve kullanma suyunu bu ana şebekeler dışında, ilçelerin kendi bünyelerinde bulunan şebekelerden sağlamaktadır. İl genelinde kullanılan suların bazıları yeraltı suyu bazıları ise yüzey suyudur. Tablo-9'da Trabzon ilinde bulunan dört ana şebeke ve bu şebekelerin içme ve kullanma suyu sağladığı ilçeler gösterilmiştir. *Numunelerin toplandığı dönemde KTÜ merkez kampüsü tükettiği suyu Değirmendere'de bulunan yer altı suyu kaynaklı şebekeden sağlamaktaydı. Ancak daha sonra KTÜ merkez kampüsünde tüketilen su Atasu Arıtma Tesisinden sağlanmaya başlamıştır.

Tablo 9. Trabzon İlinde Bulunan Ana Şebekeler ve Bu Şebekelerin Su Sağladığı İlçeler

Ana Şebekeler	Şebekelerin Su Sağladığı İlçeler
Akçaköy Arıtma Tesisi	Akçaabat, Yıldızlı, Söğütlü, Mersin, Darıca, Beşirli
Atasu Arıtma Tesisi	Ortahisar ve merkez ilçeler, Yomra, Kaşüstü, , KTÜ merkez kampüsü (yeni)
Büyükliman Arıtma Tesisi	Beşikdüzü, Çarşıbaşı, Düzköy, Vakfikebir
Değirmendere	Farabi Tıp Fakültesi, *KTÜ merkez kampüsü (eski)

Trabzon ilinde toplam 18 ilçe bulunmaktadır. Alfabetik sırayla ilçeler ve 2017 yılı nüfus sayımına göre bu ilçelerde yaşayan kişi sayıları Tablo 10'da verilmiştir. Şekil 10'da çalışma bölgesi ve ana şebekeler dahil ölçüm alınan istasyonlar gösterilmiştir.



Şekil 10. Çalışma bölgesi ve ölçüm alınan istasyonlar.

Tablo 10. Trabzon İline Bağlı İlçeler ve Bu İlçelerin Nüfusları

İlçeler	Toplam Nüfus
Akçaabat	121535
Araklı	47191
Arsin	28175
Beşikdüzü	21041
Çarşıbaşı	15022
Çaykara	12396
Dernekpazarı	3462
Düzköy	13985
Hayrat	6692
Köprübaşı	4275
Maçka	23439
Of	41248
Ortahisar (merkez ilçe)	332504
Şalpazarı	10774
Tonya	14008
Vakfikebir	26787
Yomra	38150
Toplam	786326

2.2. Toplam Alfa-Toplam Beta Analizi

Numunelerin konulacağı polietilen kaplar önce bikromik asitten geçirilip durulandıktan sonra çifte destile sudan geçirilerek hazırlanmıştır. Numunelerin toplanması sırasında bu kaplar içlerine konulacak kendi sularıyla üç defa çalkalanmıştır. Trabzon ilindeki 4 ana şebekeden ve su ihtiyacını bu şebekelerden sağlamayan ilçelerden steril plastik kaplara alınan 1.5 litrelik su numuneleri etiketlenerek, aynı gün içerisinde Atom Enerji Kurumu Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezine (ÇNAEM) getirildi. Burada su numunelerine az miktarda HNO₃ damlatılarak mikroorganizmalardan arındırıldı ve tortu oluşarak örnek kabının çeperlerine yapışması önlendi. Daha sonra filtreden

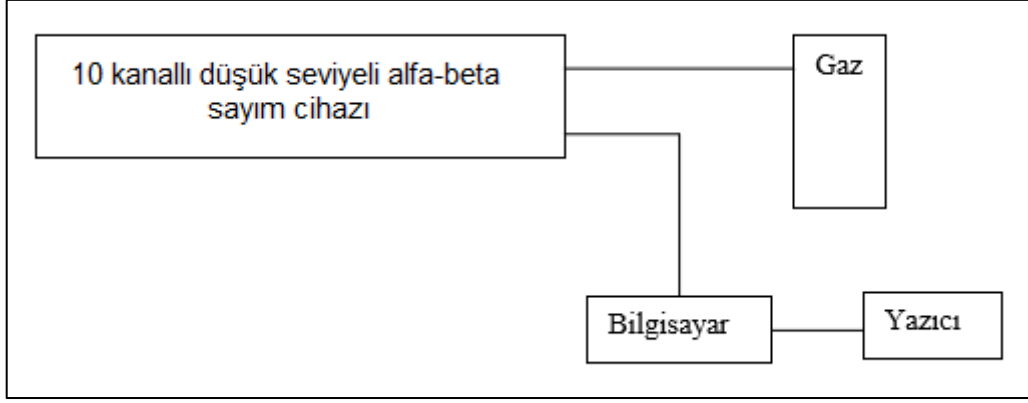
süzülerek 500 ml'lik beherlere aktarılan su numuneleri çeker ocakta (hot plate) kaynatılmadan buharlaştırıldı. Yaklaşık 100 ml kalan sular 20 cm³'lük paslanmaz çelik planşetlere aktarılarak tamamen buharlaştırıldı. Önceden darası alınmış planşetler tekrar tartılarak kalan tortu miktarları belirlendi. Daha sonra 105 0C'lik etüvde tamamen kurutulan numunelerin toplam alfa-toplam beta radyoaktiflik analizleri ÇNAEM Sağlık Fiziği Bölümü Labaratuvarında bulunan Berthold marka LB770 model 10 kanallı düşük seviyeli alfa-beta sayım cihazı kullanılarak yapıldı (Şekil 11).



Şekil 11. Berthold LB770 toplam alfa-toplam beta sayım cihazı.

2.2.1. Deneysel Sistem

Su numunelerinin toplam alfa-toplam beta ölçümlerinde kullanılan Berthold marka LB770 model cihaz aynı anda 10 numunenin radyoaktiflik ölçümlerini yapabilmektedir. Dedektörün çalışma voltajı 1650 V olup çapı 5 cm'dir. Dedeksiyon ortamı ve elektronik devre olmak üzere iki ana kısımdan oluşan bu cihaz istenilen süre ve sayıda yaptığı sayımları elektronik devre yardımıyla algılayıp bilgisayara iletmektedir. Şekil 12'de cihazın çalışma şeması görülmektedir.



Şekil 12. Toplam alfa-toplam beta sayım cihazının şeması.

Dedektörde düşük yoğunluklu (genellikle argon olmak üzere ksenon, izobütan, helyum ve metan) gazlar kullanılır. Sayım esnasında gelen yüksek enerjili radyoaktif parçacıklar dedektörde bulunan gazın iyonlaşmasını sağlar. Bu iyonlar elektrotlarda toplanır ve böylece bir elektrik akımı meydana gelir. Oluşan bu akım sayım cihazının elektronik devresine gelir ve pulslar oluşturur. Ancak sayımda kullanılan rezidü miktarının fazla olması durumunda yayınlanan radyoaktivitenin bir kısmı soğurulur ve parçacıkların bir kısmının detektöre ulaşmasını engeller. Ayrıca sayımı yapılacak numuneler ile cihazın kalibrasyonunda kullanılan kaynaklara ait alan, yoğunluk, kalınlık ve aktivite dağılımı özelliklerinin benzer olması da geri saçılmayı önleyerek cihazın verimi artırır. Toplam alfa beta aktivitesi tayin edilirken önemli olan bir konuda kullanılan ölçüm sistemi ile ölçülebilecek minimum aktivite miktarı (Minimum Detectable Activity, MDA) dır. Bu büyüklük hesaplanırken, aşağıdaki bağıntı kullanılır (NCRP 58, 1985):

$$MDA = \frac{B^{t/2}}{2,22 \times M \times E} (pCi/g) \quad (34)$$

Burada, MDA pCi/g cinsinden ölçülebilen minimum aktivite miktarı, B doğal fon (sayım/dakika), M örneğin gram cinsinden kütlesi, E= Sayım verimi, 2,22 çarpanı ise dakikadaki bozunma ile pCi arasındaki dönüşüm faktörüdür.

2.3. Kimyasal Analiz

Su, iyi bir çözücü olması nedeniyle doğada saf olarak bulunmaz, içerisinde az yada çok oranda çözülmüş maddeler bulunur. Suyun kalitesi, içinde erimiş halde bulunan bu maddelerin cinsine ve miktarına bağlıdır. İçme ve kullanma sularında olduğu gibi tarım ve sanayide kullanılacak sularda da suyun bileşimi oldukça önemlidir. Tuzlardan bazısı bazik olup, 'anyon' bazısı ise asidik olup 'katyon' adını alır. Sularda katyon olarak Kalsiyum, Demir, Bakır, Manganez, Alüminyum gibi elementlere ve anyon olarak da Florür, Klorür, Bromür, Nitrit, Nitrat, Fosfat, Sülfat' lara rastlanır. Suda bulunan anyon ve katyonlar çok az miktarda bulunabildiği gibi suyun kullanılmasına engel olacak boyutlarda da bulunabilir.

Belirlenen yerlerden temiz şişelere doldurulup etiketlenerek ÇNAEM'e getirilen numuneler içlerinde tortu kalmaması için süzülüp analize hazır hale getirilmiştir. 10 ml'lik kaplara alınan numuneler eş zamanlı ölçümler sağlayan Spectro Genesis marka ICP-OES kimyasal analiz cihazıyla analiz edilmiştir(Şekil 13).



Şekil 13. Spectro Genesis ICP-OES kimyasal ölçüm cihazı.

2.3.1. Deneysel Sistem

Bu cihazda, indüklenerek çiftlenmiş plazma uyarılmasını ve sıvıların nicelik ile yarı nicelik analizi için detektör sistemine dayalı bir yarı iletken kullanır. Sıvı örneği buharlaştırılır ve plazma içine bir aerosol olarak beslenir. Plazmanın yüksek sıcaklığı (6000K-8000K) numuneyi buharlaştırır ve numunenin içerisinde var olan moleküller,

atomlarına ayrılarak uyarılırlar ve kısmen iyonize edilirler. Uyarılmış atom ve iyonlar elemente özgü bir radyasyon yayarlar. Bir iletim optiği, optik sistemin içindeki bu radyasyonu besler. Yayılan radyasyon, optik sistemde bileşenlerine kırılır. Şiddet, yarı iletken detektörler kullanılarak ölçülür. Birim sinyal ölçme sürecinden sonra, ölçülen element şiddetleri Smart Analyzer yazılımı ile değerlendirilir. Yöntemler ölçümden önce ayarlanır. Her element için belirlenen kalibrasyon fonksiyonları ve konsantrasyonlar bu yöntemler kullanılarak, ölçülen şiddetlerden hesaplanır.

2.4. Radon Ölçüm Sistemi

2016-2017 yıllarında Trabzon ilinde bulunan ana şebekelerde ve ilçelerde mevsimsel olarak (ilkbahar, yaz, sonbahar, kış) radon gazı ölçümleri sistematik biçimde yapılmıştır. Kendi suyunda çalkalanmış 500 ml'lik cam şişelere doldurularak ağzı kauçuk tıpayla kapatılan numunelerin radon ölçümü, radon gazının kısa yarıömürlü olması nedeniyle yerinde (insitu) yapılmıştır. Ölçümler için KTÜ Fizik Laboratuvarında bulunan taşınabilir AlphaGUARD PQ 2000PRO aktif radon ölçüm cihazı kullanıldı (Şekil 15). Havada, suda ve toprakta radon yoğunluğunu belirleyebilen cihaz filtresinin üstündeki demir kafes çıkartılıp su ölçümünde kullanılan aparat takılarak ölçüme hazırlandı. AquaKit kutusunda bulunan cam su ölçme kapları, AlphaPump plastik hortumlarla cihaza bağlandı. Yine AquaKit kutusunda bulunan plastik şırıngalar ile numune kaplarındaki su örnekleri cam ölçme kaplarına aktarıldı. Cihaz 1 min flow modunda çalıştırılarak bir dakikalık periyotlarla yaklaşık 10'ar dakika ölçüm yapıldı. AlphaGUARD cihazı üzerindeki monitörden ölçülen radon gazı konsantrasyonu, radon hata payı, sıcaklık, nem ve basınç değerleri okunabilir. Ayrıca cihaz bu değerleri hafızasına kaydeder. Alınan veriler bilgisayara aktarıldıktan sonra çeşitli yazılım paketleri kullanılarak grafiksel olarak işlenir. Bu çalışmada en son geliştirilen DataEXPERT yazılımı kullanıldı.



Şekil 14. AlphaGUARD PQ 2000PRO aktif radon ölçüm cihazı.

2.4.1. Deneysel Sistem

AlphaGUARD PQ 2000PRO cihazı bir iyon odası detektörüdür. Cihazda bulunan iyon odası (alfa spektroskopisi pulse sayımı) vasıtasıyla ortamın o anki radon gazı yoğunluğunu, sıcaklığını, nemini ve basıncını ölçer. $2-2000000 \text{ Bq/m}^3$ aralığında radon gazı yoğunluğu ölçülebilen cihaz yoğunluk gradiyentleri ile küçük yoğunluk dalgalarını algılayabilecek derecede hassas elektronik yapıya sahiptir. Güç kaynağına bağlı olarak çalışan cihaz, kullanılan ölçüm moduna göre 6 aya kadar çıkabilen sürede bünyesindeki pille de çalışabilir.

AlphaGUARD Radon dedektörü ölçüm ünitesinde bulunan bir pompa yardımıyla havayı dedektörün iyonizasyon odasına alır. ^{222}Rn ve ^{220}Rn izotopları bu oda içerisinde bozularak iyonizasyona sebep olur ve elektrik sinyalleri oluştururlar. Bu esnada filtre üzerinde biriken radon yan ürünlerinin alfa aktivitesi, filtrenin diğer yüzünde bulunan, hassas sayısal bir işlemci modülü olan alfa duyarlı TN-WL.02 mikroçip ile ölçülür. Elde edilen elektrik sinyalleri cihazın sayıcı birimine (Counter-Module) sinyal olarak gönderilir ve dedektörün kalibrasyon bilgileri de kullanılarak yazılım tarafından okunabilir veriler haline dönüştürülür. Tablo 11’de AlphaGUARD monitörünün bazı teknik ve fiziksel özellikleri verilmiştir.

Tablo 11. AlphaGUARD Monitörünün Bazı Teknik ve Fiziksel Özellikleri

Toplam ağırlık	4,5 kg
Rn dedektör tipi	İyonizasyon odası
Dedektör gerilimi	DC 750 V
İşletim modu	Akım modu ve 3D α spektroskopisi
Toplam dedektör hacmi	0,62 l
Etkin dedektör hacmi	0,56 l
Dedektör dolum mekanizması	Hızlı pasif difüzyon veya aktif adaptörle otomatik doldurma
Dedektör sinyal işleme birimi	3 ayrı ADC kanallı hızlı sinyal işleme
Spektral sinyal üretme birimi	DSP (Digital Signal Processing), on-line çapraz korelasyon algoritması
Dedektör hassaslığı	1 CPM/20 Bq/m ³
²²² Rn ölçüm alt sınır	2 Bq/m ³
²²² Rn ölçüm üst sınır	2.10 ⁶ Bq/m ³
LCD ekran çözünürlüğü	1 Bq/m ³
Sistem doğrusallık hatası	< %3
²²² Rn kalibrasyon hatası	± %3
Difüzyon modu ölçüm sıklığı	10 veya 60 dak
Akış modu ölçüm sıklığı	1 veya 10 dak
Veri depolama kapasitesi	1 dak döngüyle 3 gün 10 dak döngüyle 1 ay 60 dak döngüyle 6 ay
Dahili batarya kapasitesi	10 gün
Sıcaklık	-10 °C - +50 °C
Atmosfer basıncı	700 mbar – 1100 mbar
Nem	0 %rH – 95 %rH

2.5. Radyonüklid Analizi

Toprak ve su numunelerinde ^{238}U , ^{232}Th , ^{137}Cs , ^{40}K radyonüklidlerinin konsantrasyonlarını belirlenip bu radyonüklidlerin sebep olduğu soğurulan dozlar, yıllık etkin dozlar ve dış tehlike indeksi hesaplanmıştır. Numunelerin radyonüklid analizleri için KTÜ Fizik Bölümü Laboratuvarında bulunan Ortec marka GEM25P4-76 model yüksek saflıkta coaxial Ge dedektörü (HPGe) kullanılarak yapılmıştır. Farklı şiddette ve enerjide gama ışınları yayan radyoaktif maddelerin analizinde kullanılan bu cihaz, radyasyon dedektörü, sıvı azot bazlı soğutma mekanizması, üretilen sinyalleri algılayan elektronik sistem ve yükselteçlerden oluşmuştur. Bu dedektörün ayırma gücü 1,33 MeV'de 1,7 keV rezölüsyona ve %33 relatif verime sahiptir.

2.5.1. Su Numunelerinin Radyonüklid Analize Hazırlanması

Trabzon iline içme ve kullanma suyu sağlayan dört ana şebekeden ve ilçelerden, 30'ar litre su, temiz ve ağzı kapalı şişelere doldurularak alındı. KTÜ Fizik Bölümüne getirilen bu sular 10 litrelik temiz cam beherlere konuldu. Su miktarları 100 mL kalıncaya kadar yaklaşık $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta tutulan ocaklar ile sular buharlaştırıldı. Buharlaştırma işlemi esnasında beher çeperlerine madde yapışmasını önlemek amacıyla sulara birkaç damla HCl eklendi. Kalan sular tortularıyla birlikte, daha önceden boş sayımları alınmış olan steril plastik numune kaplarına dolduruldu. Hazırlanan numuneler radyoaktif dengeye gelmeleri için bir ay süreyle bekletildi. Yapılan işlemlerin her basamağında numuneler dikkatle etiketlendi. Daha sonra bu numuneler KTÜ fizik laboratuvarında bulunan Ortec marka HPGe gama spektrometresi kullanılarak 80000 s süreyle sayıldılar.

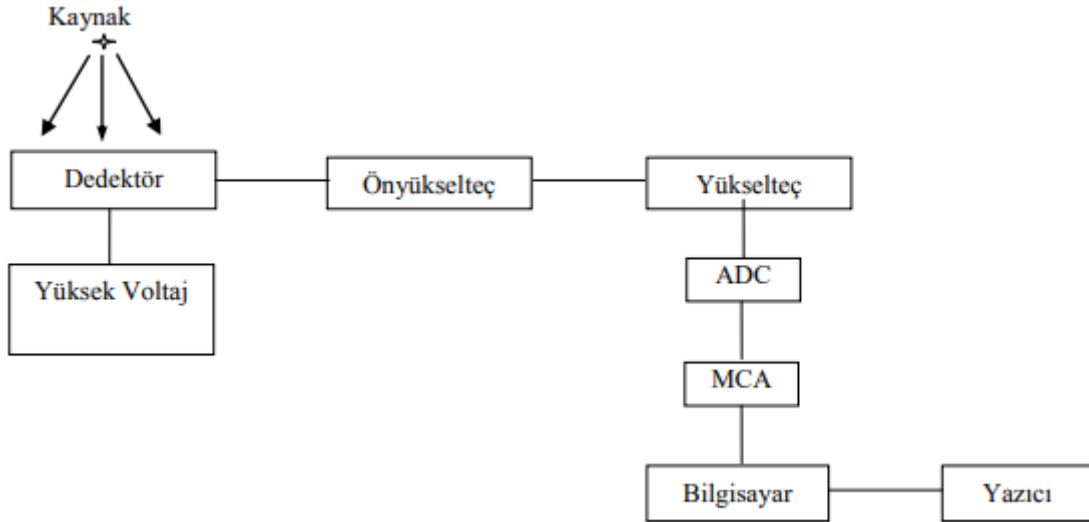
2.5.2. Toprak Numunelerinin Radyonüklid Analize Hazırlanması

Trabzon iline içme ve kullanma suyu sağlayan dört ana şebekeden ve ilçelerden toprak numuneleri toplandı. Toprak numuneleri su numunesi alınan kaynaklar civarındaki birkaç farklı noktadaki ekili-dikili olmayan topraklardan ve yaklaşık 10 cm derinlikten alındı. Toplanan numuneler özenle etiketlenip ve oda sıcaklığında tamamen kurutuldu. Kuruyan topraklardan yabancı maddeler ve bitki kalıntıları ayıklanıp ince elekten geçirilerek steril plastik numune kaplarında bir ay süreyle radyoaktif dengeye gelmeleri

için bekletildi. Analize hazır hale gelen toprak numunelerinin gama spektroskopik ölçümleri 30000 s süreyle su numunelerinin analizinde kullanılan HpGe dedektörü ile yapıldı.

2.5.3. Deneysel Sistem

HpGe dedektörleri yarı iletken dedektör çeşitlerindedir ve genellikle radyasyonun enerjisini ölçmek için kullanılırlar. Yarı iletken detektörler bir p-n eklemi olarak düşünülebilirler. Ters besleme altında detektörde elektron ve delik (hole) arınmış bir hassas bölge oluşur. Gama ölçümlerinde kullanılan bu dedektörlerde gelen foton soğurular ve bunun sonucunda elektron ve pozitif boşluk birlikte ortaya çıkar. Elektrik alanı sayesinde birbirinden ayrılırlar ve foto diot sayesinde de sayılırlar.



Şekil 15. Gama spektrometre sistemine ait blok şeması.

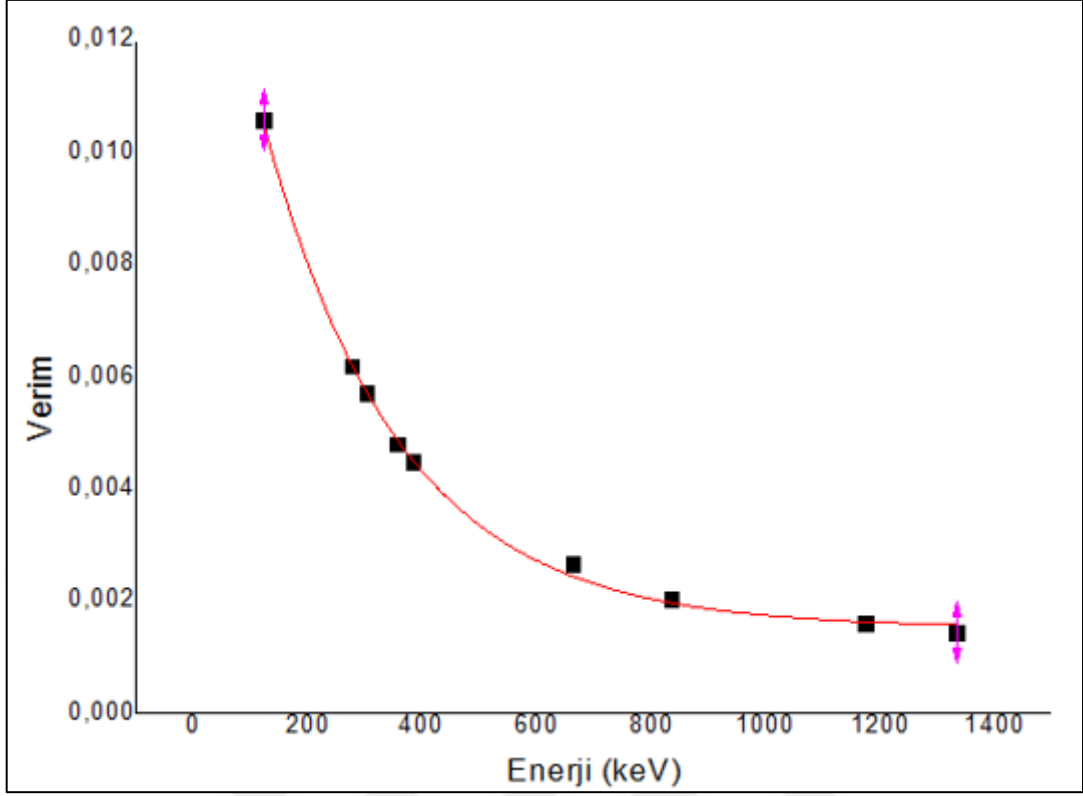
Bu dedektörlerde safsızlık az, direnç yüksek dolayısıyla çözme gücü çok yüksektir. Diğer bir avantajı da saf germanyum detektörlerinin besleme gerilimi uygulanmadığı zaman oda sıcaklığında tutulabilir olmasıdır. Dezavantajları ise çalışırken sıvı azot sıcaklığında tutma gereği ve düşük verim göstermesidir. Bu tiplerde ortalama verim %7 en iyilerinde %18 dir. HPGe detektörler $3\text{keV} \leq E \leq 1\text{MeV}$ lik enerji aralığında mükemmel enerji ayırım karakteristiklerine sahiptir (URL-5, 2006).

Dedektörde yapılan ölçümlerin hassasiyeti dedektörün verimine bağlıdır. Verim bir gamanın detektör tarafından sayılma olasılığıdır ve her bir gama için farklıdır. Gamanın geniş doğrultusuna, açısına ve detektöre girdiği yere bağlıdır. Bununla birlikte verimi ortalama bir sayılma olasılığı gibi kabul edebiliriz. Deneysel fiziksel verim bir aletin yanıtı ile ölçülen fiziksel niceliğin değeri arasındaki orandır (Krane, 2011).

“Ayırma gücü” detektör tarafından ayırt edilebilen birbirine yakın enerji değerine sahip iki fotonun ΔE enerji farkının fotonun E enerjisine oranı ($\Delta E/E$) olarak tanımlanır. Detektörün saydığı aynı enerjili fotonların spektrometrede gözlenen enerjileri aynı değerli değildir. Spektrometreyi oluşturan basamakların her birinden gelen istatistiksel sapmalar nedeniyle fotonların enerji dağılımı yaklaşık bir Gauss eğrisi gibidir. Gauss eğrisinin genişliği spektrometrenin ayırma gücünün ölçüsüdür. Deneysel olarak ayırma gücü Gauss eğrisinin yarı yüksekliğinin tam genişliğinin (FWHM) tepe noktasındaki enerjiye oranı ($\Delta E / E$) olarak verilir (Krane, 2001)

2.5.4. Dedektörün Verim Eğrisi

Dedektör verimi, dedektörde sayılabilir büyüklükte puls üreten fotonların sayısının, detektöre gelen fotonların sayısına oranı ya da dedektörde sayılabilir büyüklükte puls üreten fotonların yüzdesi olarak tanımlanır. Dedektörün saydığı gama sayımlarının gerçek değerini bulabilmek için deektöre ait verim düzeltmesinin yapılması gerekir. Verim tayini için genellikle standart kaynaklar kullanılır. Kaynağın şekli farklı olduğunda, kaynak homojen olarak foton yayımlayamayacağından bu durum dedektör verimini etkiler. Bunun için kaynağın en çok fotonları yaydığı bölgesi dedektörün ortasına gelecek şekilde yerleştirilmeli ve kaynak sabitlenmelidir. Ölçümlerde kullanılacak verim eğrişi Şekil 16'dadır.



Şekil 16. Dedektörün verim eğrisi.

^{238}U bozunma ürünü $^{214}\text{Pb}(295,2\text{ keV})$, $^{214}\text{Pb}(352\text{ keV})$ $^{214}\text{Bi}(609,4\text{ keV})$; ^{232}Th bozunma ürünü $^{212}\text{Pb}(238,6\text{ keV})$, $^{208}\text{Tl}(583,1\text{ keV})$, $^{228}\text{Ac}(911,1\text{ keV})$, $^{137}\text{Cs}(661,6\text{ keV})$, $^{40}\text{K}(1460\text{ keV})$ pikleri belirlenmiştir. Piklerin alanları belirlenirken en küçük hata ve en büyük alan işaretlenmiş daha sonra piklerde görülen enerji değerlerinin hangi radyonüklide ait olduğu belirlenmiştir.

3. BULGULAR

3.1. Toplam Alfa-Toplam Beta Analizi Bulguları

Ana şebekeden ve bu şebekelerden beslenmeyen diğer ilçelerin musluklarından alınan su numuneleri Türkiye Atom Enerji Kurumu (TAEK) Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi (ÇNAEM)'ne götürülerek burada toplam alfa ve toplam beta ölçümleri yapılmıştır.

$$A_{\alpha} (Bq/l) = \frac{C_a - C_b}{\epsilon \cdot V} \quad (35)$$

$$A_{\beta} (Bq/l) = \frac{N}{60 \times \text{Eff} \times V} \quad (36)$$

Burada A_{α} , numunenin toplam alfa radyoaktivitesi (Bq/l); ϵ , sayım sisteminin verimi (cpm/Bq); V , analiz edilen örneğin hacmi (l); C_a , dakikada örnek sayımı (cpm); C_b , dakikada blank sayımı (cpm); A_{β} , numunenin toplam beta radyoaktivitesi (Bq/l); N , numunenin net sayım hızı (cpm); Eff , β standardından (Sr-90) elde edilen sistemin sayım verimi (cpm/dpm); 60 dakikadan saniyeye olan dönüşüm katsayısıdır. Denklem (31) ve denklem (32) kullanılarak hesaplanan toplam alfa ve toplam beta aktivite değerleri Tablo 12'de verilmektedir.

Tablo 12. Trabzon İli içme sularında toplam alfa ve toplam beta sonuçları

NUMUNE ADI	TOPLAM ALFA	TOPLAM BETA
	(Bq/l)	(Bq/l)
ATASU	0,029±0,008	0,032±0,013
AKÇAKÖY	0,039±0,009	0,032±0,015
BÜYÜK LİMAN	0,016±0,006	0,051±0,024
DEĞİRMENDERE	0,036±0,008	0,079±0,014
ARAKLI	0,020±0,007	0,085±0,016
ARSİN	0,017±0,007	0,059±0,022
ÇAYKARA	0,021±0,007	0,029±0,011
DERNEKPAZARI	0,014±0,006	0,028±0,010
HAYRAT	0,013±0,006	0,051±0,025
KÖPRÜBAŞI	0,011±0,005	0,040±0,015
MAÇKA	0,008±0,005	0,031±0,012
OF	0,015±0,006	0,034±0,011
SÜRMENE	0,007±0,005	0,039±0,011
ŞALPAZARI	0,017±0,006	0,022±0,010
TONYA	0,011±0,006	0,041±0,013
ORTALAMA	0,018±0,006	0,043±0,015

Tablo 12’de Trabzon iline içme ve kullanma suyu sağlayan dört ana şebeke (Atasu, Büyükliman, Akçaköy, Değirmendere) ve ilçelerde toplam alfa ve toplam beta sonuçları görülmektedir. Toplam alfa ortalaması 0,018±0,006 (Bq/l) olup en küçük değer 0,007±0,005 (Bq/l) ile Sürmene’de en büyük değer ise 0,039±0,009 (Bq/l) ile Akçaköy Arıtma Tesisi’ndedir. Toplam beta ortalaması 0,043±0,015 (Bq/l) olup en küçük değer 0,022±0,010 (Bq/l) ile Şalpaazarı’nda en büyük değer ise 0,085±0,016 (Bq/l) ile Araklı’dadır. WHO tarafından belirlenen sınır değerler toplam alfa için 0,5 (Bq/l) toplam beta için 1 (Bq/l)dir. Tablo 12 incelendiğinde tüm numunelerde toplam alfa ve toplam beta aktivitelerinin bu sınır değerlerden düşük olduğu görülmektedir.

Toplam alfa ve toplam beta sonuçlarından faydalanılarak her bir radyoizotop için yıllık etkin doz eşdeğeri hesaplanabilmektedir (USA-EPA, 1988).

$$DR_W = A_W \times IR_W \times IDF \quad (37)$$

Burada DR_W $\mu\text{Sv/yıl}$ cinsinden yıllık etkin doz eşdeğeri, A_W mBq/L cinsinden toplam alfa ya da toplam beta aktivitesi, IR_W doz dönüşüm katsayısı, IDF yılda bir kişi tarafından tüketilen su miktarıdır. Doz dönüşüm katsayıları ^{238}U için $4,5 \times 10^{-5}$, ^{234}U için $4,9 \times 10^{-5}$, ^{230}Th için $2,1 \times 10^{-4}$, ^{226}Ra için $2,8 \times 10^{-4}$, ^{210}Po için $1,2 \times 10^{-3}$, ^{232}Th için $2,3 \times 10^{-4}$, ^{210}Pb için $6,9 \times 10^{-4}$ ve ^{228}Ra için $6,9 \times 10^{-4}$ alınmıştır (WHO Sağlık Raporu, 2004). IDF yetişkinler için 730 L, çocuklar için 350 L, bebekler için 250 L olarak kabul edilmektedir. Yetişkinlerin, çocukların ve bebeklerin yıl içinde su tüketim miktarları farklı olduğundan her bir grup için yıllık etkin doz eşdeğeri ayrı ayrı hesaplanarak aşağıda verilmiştir.

Yetişkinler için (>17 yaş) bir yılda tüketilen su miktarı 730 litre kabul edilerek hesaplanan yıllık etkin doz eşdeğerleri Tablo 13' de verilmektedir.

Tablo 13. Yetişkinler İçin Yıllık Etkin Doz Eşdeğerleri

NUMUNE ADI	TOPLAM ALFA ($\mu\text{Sv/y}$)						TOPLAM BETA($\mu\text{Sv/y}$)	
	^{238}U	^{234}U	^{230}Th	^{226}Ra	^{210}Po	^{232}Th	^{210}Pb	^{228}Ra
ATASU	0,95	1,04	4,45	5,93	25,40	4,87	16,12	16,12
AKÇAKÖY	1,28	1,40	5,98	7,97	34,16	6,55	16,12	16,12
BÜYÜK LİMAN	0,53	0,57	2,45	3,27	14,02	2,69	25,69	25,69
DEĞİRMENDERE	1,18	1,29	5,52	7,36	31,54	6,04	39,79	39,79
ARAKLI	0,66	0,72	3,09	4,11	17,63	3,38	43,06	43,06
ARSİN	0,57	0,62	2,65	3,53	15,13	2,90	29,59	29,59
ÇAYKARA	0,70	0,76	3,26	4,34	18,62	3,57	14,75	14,75
DERNEKPAZARI	0,48	0,52	2,22	2,96	12,67	2,43	14,07	14,07
HAYRAT	0,44	0,47	2,03	2,71	11,60	2,22	25,83	25,83
KÖPRÜBAŞI	0,37	0,41	1,74	2,32	9,93	1,90	19,96	19,96
MAÇKA	0,26	0,28	1,21	1,61	6,92	1,33	15,82	15,82
OF	0,49	0,53	2,29	3,05	13,07	2,50	16,93	16,93
SÜRMENE	0,23	0,25	1,07	1,43	6,13	1,18	19,69	19,69
ŞALPAZARI	0,56	0,61	2,61	3,47	14,89	2,85	11,08	11,08
TONYA	0,37	0,40	1,73	2,31	9,89	1,90	20,70	20,70
ORTALAMA	0,60	0,66	2,82	3,76	16,11	3,09	21,95	21,95

Tablo 13’de görüldüğü gibi yetişkinler için yıllık etkin doz eşdeğerlerinde ^{238}U ortalaması 0,60 ($\mu\text{Sv/y}$), ^{234}U ortalaması 0,66 ($\mu\text{Sv/y}$), ^{230}Th ortalaması 2,82 ($\mu\text{Sv/y}$), ^{226}Ra ortalaması 3,76 ($\mu\text{Sv/y}$), ^{210}Po ortalaması 16,11 ($\mu\text{Sv/y}$), ^{232}Th ortalaması 3,09 ($\mu\text{Sv/y}$), ^{210}Pb ve ^{228}Ra ortalaması 21,95 ($\mu\text{Sv/y}$) olarak hesaplanmıştır. En düşük doz değerleri Sürmene’de en yüksek doz değerleri ise Akçaköy Arıtma Tesisinde görülmektedir. Yetişkin bir bireyin yılda aldığı toplam doz ortalaması 70.94 $\mu\text{Sv/y}$ olup WHO tarafından izin verilen 100 $\mu\text{Sv/y}$ değerinden düşüktür.

Çocuklar için (1-17 yaş) bir yılda tüketilen su miktarı 350 litre kabul edilerek hesaplanan yıllık etkin doz eşdeğerleri Tablo 14’te verilmektedir.

Tablo 14. Çocuklar İçin Yıllık Etkin Doz Eşdeğerleri;

NUMUNE ADI	TOPLAM ALFA ($\mu\text{Sv/y}$)						TOPLAM BETA($\mu\text{Sv/y}$)	
	^{238}U	^{237}U	^{230}Th	^{226}Ra	^{210}Po	^{232}Th	^{210}Pb	^{228}Ra
ATASU	0,46	0,50	2,13	2,84	12,18	2,33	7,73	7,73
AKÇAKÖY	0,61	0,67	2,87	3,82	16,38	3,14	7,73	7,73
BÜYÜK LİMAN	0,25	0,27	1,18	1,57	6,72	1,29	12,32	12,32
DEĞİRMENDERE	0,57	0,62	2,65	3,53	15,12	2,90	19,08	19,08
ARAKLI	0,32	0,35	1,48	1,97	8,45	1,62	20,64	20,64
ARSİN	0,27	0,30	1,27	1,69	7,25	1,39	14,19	14,19
ÇAYKARA	0,33	0,36	1,56	2,08	8,93	1,71	7,07	7,07
DERNEKPAZARI	0,23	0,25	1,06	1,42	6,07	1,16	6,75	6,75
HAYRAT	0,21	0,23	0,97	1,30	5,56	1,07	12,38	12,38
KÖPRÜBAŞI	0,18	0,19	0,83	1,11	4,76	0,91	9,57	9,57
MAÇKA	0,12	0,14	0,58	0,77	3,32	0,64	7,58	7,58
OF	0,23	0,26	1,10	1,46	6,27	1,20	8,12	8,12
SÜRMENE	0,11	0,12	0,51	0,69	2,94	0,56	9,44	9,44
ŞALPAZARI	0,27	0,29	1,25	1,67	7,14	1,37	5,31	5,31
TONYA	0,18	0,19	0,83	1,11	4,74	0,91	9,92	9,92
ORTALAMA	0,29	0,32	1,35	1,80	7,72	1,48	10,52	10,52

Çocuklar için yıllık etkin doz eşdeğerlerinde ^{238}U ortalaması 0,29 ($\mu\text{Sv/y}$), ^{234}U ortalaması 0,32 ($\mu\text{Sv/y}$), ^{230}Th ortalaması 1,35 ($\mu\text{Sv/y}$), ^{226}Ra ortalaması 1,80 ($\mu\text{Sv/y}$), ^{210}Po ortalaması 7,72 ($\mu\text{Sv/y}$), ^{232}Th ortalaması 1,48 ($\mu\text{Sv/y}$), ^{210}Pb ve ^{228}Ra ortalaması 10,52 ($\mu\text{Sv/y}$) olarak hesaplanmıştır. En düşük doz değerleri Sürmene’de, en yüksek doz değerleri ise Akçaköy Arıtma Tesisinde görülmektedir. Bir çocuğun yılda aldığı toplam doz ortalaması 34 $\mu\text{Sv/y}$ ’dir.

Çocuklar için (<1 yaş) bir yılda tüketilen su miktarı 250 litre kabul edilerek hesaplanan yıllık etkin doz eşdeğerleri Tablo 15’de verilmektedir.

Tablo 15. Bebekler İçin Yıllık Etkin Doz Eşdeğerleri

NUMUNE ADI	TOPLAM ALFA ($\mu\text{Sv/y}$)						TOPLAM BETA($\mu\text{Sv/y}$)	
	^{238}U	^{234}U	^{230}Th	^{226}Ra	^{210}Po	^{232}Th	^{210}Pb	^{228}Ra
ATASU	0,33	0,36	1,52	2,03	8,70	1,67	5,52	5,52
AKÇAKÖY	0,44	0,48	2,05	2,73	11,70	2,24	5,52	5,52
BÜYÜK LİMAN	0,18	0,20	0,84	1,12	4,80	0,92	8,80	8,80
DEĞİRMENDERE	0,41	0,44	1,89	2,52	10,80	2,07	13,63	13,63
ARAKLI	0,23	0,25	1,06	1,41	6,04	1,16	14,74	14,74
ARSİN	0,19	0,21	0,91	1,21	5,18	0,99	10,13	10,13
ÇAYKARA	0,24	0,26	1,12	1,49	6,38	1,22	5,05	5,05
DERNEKPAZARI	0,16	0,18	0,76	1,01	4,34	0,83	4,82	4,82
HAYRAT	0,15	0,16	0,70	0,93	3,97	0,76	8,84	8,84
KÖPRÜBAŞI	0,13	0,14	0,60	0,79	3,40	0,65	6,84	6,84
MAÇKA	0,09	0,10	0,41	0,55	2,37	0,45	5,42	5,42
OF	0,17	0,18	0,78	1,04	4,48	0,86	5,80	5,80
SÜRMENE	0,08	0,09	0,37	0,49	2,10	0,40	6,74	6,74
ŞALPAZARI	0,19	0,21	0,89	1,19	5,1	0,98	3,79	3,79
TONYA	0,13	0,14	0,59	0,79	3,39	0,65	7,09	7,09
ORTALAMA	0,21	0,23	0,97	1,29	5,52	1,06	7,51	7,51

Bebekler için yıllık etkin doz eşdeğerlerinde ^{238}U ortalaması 0,21 ($\mu\text{Sv/y}$), ^{234}U ortalaması 0,23 ($\mu\text{Sv/y}$), ^{230}Th ortalaması 0,97 ($\mu\text{Sv/y}$), ^{226}Ra ortalaması 1,29 ($\mu\text{Sv/y}$), ^{210}Po ortalaması 5,52 ($\mu\text{Sv/y}$), ^{232}Th ortalaması 1,06 ($\mu\text{Sv/y}$), ^{210}Pb ve ^{228}Ra ortalaması 7,51 ($\mu\text{Sv/y}$) olarak hesaplanmıştır. En düşük doz değerleri Sürmene’de, en yüksek doz değerleri ise Akçaköy Arıtma Tesisinde görülmektedir. Bir bebeğin yılda aldığı toplam doz ortalaması 24,3 $\mu\text{Sv/y}$ ’dir.

Alınan numunelerin trityum analizleri de Türkiye Atom Enerji Kurumu (TAEK) Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi (ÇNAEM)’de yapılmış ve bütün numunler için trityum değerlerinin dedeksiyon limiti olan 2 Bq/l’den küçük olduğu belirlenmiştir.

3.2. Kimyasal Analiz Bulgular

Tablo 16. Trabzon İli İçme Suyu Şebekelerindeki Kimyasal Element Analiz Değerleri (µg/L)

ELEMENT	ATASU	AKÇAKÖY	BÜYÜKLÜMAN	DEĞİRMENDERE
As	2,06±0,49	1,66±0,15	2,90±0,06	≤MDL
Be	0,15±0,02	0,11±0,04	0,11±0,04	0,15±0,02
Cd	≤MDL	≤MDL	≤MDL	≤MDL
Co	0,32±0,02	0,29±0,07	0,33±0,04	0,29±0,03
Cu	7,13±0,06	3,52±0,10	3,31±0,16	2,63±0,04
Fe	18,55±1,71	27,95±0,45	7,97±0,05	20,85±0,04
Mn	0,75±0,02	1,52±0,03	1,44±0,04	15,99±0,11
Ni	1,15±0,01	1,39±0,02	1,23±0,01	1,31±0,04
Cr	≤MDL	≤MDL	≤MDL	≤MDL
Pb	0,51±0,28	≤MDL	≤MDL	≤MDL
Sb	≤MDL	≤MDL	≤MDL	≤MDL
Sr	74,26±0,98	38,95±0,42	70,51±0,76	230,4±1,19
Zn	≤MDL	11,83±0,06	≤MDL	5,70±0,19
Ag	0,33±0,02	0,37±0,02	0,28±0,01	0,19±0,08
Al	69,54±1,07	57,60±0,04	46,76±0,24	≤MDL
Se	≤MDL	≤MDL	≤MDL	2,72±0,51
Ba	17,14±0,07	4,07±0,04	3,80±0,05	9,76±0,02

Tablo 17. Trabzon İli Su Numunelerinde Anyon Sonuçları (µg/L)

Numune Adı	F	Cl	Br	NO ₃	SO ₄ ²⁻	PO ₄ ³⁻	NO ₂
Atasu	37,02±2,01	3576,66±1,86	< MDL	4204,66±4,26	12875,1±5,01	< MDL	< MDL
Akçaköy	67,10±0,07	3317,83±6,66	< MDL	3893,79±8,30	4147,53±7,95	< MDL	< MDL
Büyük Liman	31,15±0,98	3621,23±2,56	< MDL	5012,91±4,09	2805,63±7,74	< MDL	< MDL
Değirmendere	66,09±0,47	10571,45±2,97	< MDL	5996,76±8,61	30397,5±8,71	< MDL	< MDL
Araklı	26,7 ± 1,5	4453,6 ± 3,9	21,9 ± 0,6	5820,1 ± 16,2	18145,2 ± 4,0	< MDL	< MDL
Arsin	42,5±0,5	2289,3 ± 4,4	33,9±0,8	2961,2±9,8	8513,6± 3,1	< MDL	< MDL
Çaykara	36,7 ±0,1	304,7 ± 0,4	< MDL	3450,2±2,3	780,1 ± 3,0	< MDL	< MDL
Dernekpazarı	46,1 ±0,3	2316,3 ± 2,2	62,5 ± 0,3	8359,4±1,9	7877,8 ± 2,3	< MDL	< MDL
Hayrat	35,2 ±0,3	1713,4 ± 1,0	18,1±0,7	9868,6±9,0	2856,2±6,2	< MDL	< MDL
Köprübaşı	39,2 ±0,3	1272,4 ± 0,5	17,6±0,2	5089,3±2,0	957,8±1,1	< MDL	< MDL
Maçka	46,8 ± 0,0	2757,5 ± 2,8	< MDL	3889,5±1,8	11497,3±2,8	< MDL	< MDL
Of	36,1±0,3	4284,1 ± 1,9	< MDL	10624,1±9,5	14744,2±6,9	< MDL	< MDL
Sürmene	22,2 ± 0,3	2842,6 ± 1,8	29,0±0,5	1886,6±2,8	6247,5±14,8	< MDL	< MDL
Tonya	26,8 ± 0,7	4322,7 ± 2,4	< MDL	14232,1±18,1	15059,8±11,1	< MDL	< MDL
Şalpazarı	43,7±0,8	4043,17±1,9	< MDL	6525,97±,9	1222,8 ±1,2	< MDL	< MDL

3.3. Mevsimsel Radon Analizi Bulguları

İçme suyundaki radon konsantrasyonu, yağışların ve mevsim şartlarının sulara oluşturabileceği değişiklikler sebebiyle, 2016-2017 yılında mevsimsel olarak üç aylık periyotlar ile ölçülmüştür. Su örneklerinde radon konsantrasyonunun belirlenmesi kullanılan denklem aşağıda verilmiştir (Saphymo, 2014).

$$C_{su} = \frac{\left(\frac{C_{hava}(V_{sistem} - V_{numune})}{V_{numune}} + k \right) - C_0}{10000} \quad (38)$$

Bu denklemde C_{su} , su örneğinin radon konsantrasyonunu (Bq/l); C_{hava} , ölçüm sonucunda belirtilen konsantrasyon değerini (Bq/m³); C_0 , doğal fon konsantrasyonunu (Bq/m³); V_{sistem} , ölçüm düzeneğinin dahili hacmini (ml); V_{numune} , numunenin hacmini (ml); k ise radon yayılma katsayısını göstermektedir.

Ayrıca radonlu suların içilmesi durumunda insanlar sindirim sistemi yoluyla bir içi ışınlanmaya da maruz kalmaktadır. Radonlu suyun içilmesinden dolayı alınan yıllık etkin doz eşdeğerleri de Nikolov ve diğerleri (2012) tarafından aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır

$$AEDE = K.C.KM.t \quad (39)$$

Burada AEDE radonlu suyu içmekten kaynaklanan yıllık etkin doz eşdeğeri (Sv/yıl); K , ²²²Rn için doz dönüşüm faktörü (yetişkinler için 10⁻⁸ Sv/Bq ve çocuklar için 2.10⁻⁸ Sv/Bq); C sudaki ²²²Rn konsantrasyonu (Bq/l), KM günlük su tüketimi (2 l/gün), t ise tüketim süresi (1 yıl için 365 gün) dir (Todorovic vd., 2012).

İçme suyu şebekelerinde radon gazı değerleri ve bu değerler göz önüne alınarak günde 2 L su içen bir yetişkinin alacağı hesaplanan yıllık etkin doz eşdeğerleri Tablo 18'de verilmiştir.

Tablo 18. Ana Şebekeler ve İlçelerin Musluk Sularında Radon Gazı Değerleri ve Bu Değerler Göz Önüne Alınarak Hesaplanan Yıllık Etkin Eşdeğerleri

	İLKBAHAR	YAZ	SONBAHAR	KIŞ	ORTALAMA	DOZ
	Bq/l	Bq/l	Bq/l	Bq/l	Bq/l	µSv/y
ATASU	0,63±0,18	0,36±0,2	0,89±0,42	0,36±0,12	0,56±0,51	4,1
AKÇAKÖY	1,43±0,50	0,52±0,2	1,99±0,69	0,35±0,15	1,07±0,8	7,8
BÜYÜK LİMAN	5,03±1,70	0,35±0,15	2,90±0,90	0,15±0,05	2,11±1,9	15,4
DEĞİRMENDERE	16,45±3,25	8,7±2,1	14,00±3,13	10±0,42	12,3±3,8	90
ARAKLI	16,50±2,5	11,5±4	16,00±2,83	9,06±1,43	13,3±5	97
ARSİN	12,31±1,6	2,6±1,3	8,30±2,01	4,71±1,02	7±3	51
ÇAYKARA	0,68±0,07	1,2±0,5	2,11±0,56	5,04±0,79	2,26±1,2	16,5
DERNEKPAZARI	10,40±2,30	6±2,2	5,08±1,05	3,11±0,66	6,15±3,4	45
HAYRAT	1,53±1,1	0,5±0,2	0,78±0,04	0,29±0,14	0,78±1,1	5,7
KÖPRÜBAŞI	2,16±0,64	8±3,5	4,60±0,45	0,64±0,10	3,85±3	28,1
MAÇKA	13,40±2,9	4,4±1,3	8,10±2,01	3,8±1,1	7,4±3,9	54
OF	9,5±2,60	12,5±3,2	5,08±1,40	3,33±1,02	7,6±4,5	55
SÜRMENE	10±0,75	13±4	12,00±3,46	11±1,23	11,5±5,5	84
ŞALPAZARI	0,85±0,3	0,7±0,35	1,3±0,4	0,42±0,17	0,82±2	6
TONYA	3,60±1,5	0,4±1,1	1,89±0,79	1,57±0,41	1,86±2	14

Mevsimsel ortalamaya bakıldığında en yüksek radon gazı seviyesi 13,3 Bq/l olarak Araklı'da, en düşük radon gazı seviyesi 0,56 Bq/l olarak Atasu'da ölçülmüştür. Yıllık alınan etkin doz eşdeğerleri de buna paralel olarak en yüksek Araklı 'da 97 µSv/y, en düşük Atasu'da 4,1 µSv/y olarak hesaplanmıştır.

3.4. Radyonüklid Analizi Bulguları

3.4.1. Su Numunelerinde Radyonüklid Analizi Bulguları

Dört ana şebeke ve ilçelerin musluklarından alınan su numunelerinin gama spektroskopik analizleri yapılmıştır. ^{238}U bozunma ürünü ^{214}Pb (295,2 keV), ^{214}Pb (352 keV), ^{214}Bi (609,4 keV); ^{232}Th bozunma ürünü ^{212}Pb (238,6 keV), ^{208}Tl (583,1), ^{228}Ac (911,1 keV); ^{137}Cs (661,6 keV) ve ^{40}K (1460 keV) pikleri belirlenmiştir. Bu piklerin alanları belirlenirken en büyük alan ve en küçük hatayı verecek şekilde işaretlenmiştir.

Yapılan enerji kalibrasyonundan yararlanılarak radyoizotoplar tespit edilmiştir. Belirlenen radyonüklidlerin aktivitelerini hesaplamak için aşağıdaki bağıntı kullanılmıştır.

$$\text{Aktivite} = \frac{N}{V \times \mathcal{E} \times P \times t} \quad (40)$$

Burada N net sayım alanı (işaretlenen toplam alandan background alanı çıkartılarak hesaplanır), V numunenin hacmi, \mathcal{E} verim, p olasılık, t (80000 s) sayım zamanıdır. Aktivite değerleri hesaplandıktan sonra ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K değerleri kullanılarak soğurulan doz hesaplanmıştır.

$$D(\text{nGy/s}) = (0,462 \times ^{238}\text{U}) + (0,604 \times ^{232}\text{Th}) + (0,0417 \times ^{40}\text{K}) \quad (41)$$

Hesaplanan soğurulan doz değerlerinden faydalanılarak yıllık etkin doz eşdeğeri hesaplanmıştır.

$$\text{AEDE } (\mu\text{Sv/y}) = \text{Soğurulan Gama Dozu} \times \text{Çevresel Gama Dozu Dönüşüm Faktörü} \times \text{Meşguliyet Faktörü} \times \text{Zaman} \quad (38)$$

Bu eşitlikte Çevresel Gama Dozu Dönüşüm Faktörü 0,7 Sv/Gy, Meşguliyet Faktörü açık ortamlar için 0,2, zaman bir yıldaki saat sayısıdır (8760 s/y) olarak alınır (UNSCEAR, 2000).

Trabzon ili ve ilçelerine ait içme sularında radyonüklid konsantrasyonları, soğurulan doz değerleri ve yıllık etkin doz eşdeğerleri Tablo 19'da verilmiştir.

Tablo 19. Trabzon İli ve İlçelerinin İçme Sularında Radyonüklid Konsantrasyonları ve Doz Değerleri

NUMUNE ADI	²³⁸ U	²³² Th	¹³⁷ Cs	⁴⁰ K	D	AEDE
	(mBq/l)	(mBq/l)	(mBq/l)	(mBq/l)	(nGy/s)	(μSv/y)
ATASU	654,34±16,89	66,75±6,14	-	-	0,34	0,42
AKÇAKÖY	41,64±1,55	31,13±2,95	0,20±0,64	10,04±0,27	0,04	0,05
BÜYÜK LİMAN	236,25±7,87	14,55±1,39	23,49±5,23	-	0,12	0,14
DEĞİRMENDERE	67,22±3,03	16,39±1,54	-	218,38±5,90	0,05	0,06
ARAKLI	8,79±0,35	40,01±4,14	11,04±2,46	80,23±2,10	0,03	0,04
ARSİN	77,36±3,12	19,22±1,83	6,22±1,58	47,69±1,25	0,05	0,06
ÇAYKARA	117,20±4,64	13,33±1,50	40,15±6,37	0	0,06	0,08
DERNEKPAZARI	8,43±0,32	25,86±2,70	3,61±0,95	215,87±5,59	0,03	0,03
HAYRAT	39,60±2,30	6,61±0,52	15,46±2,96	57,73±1,52	0,02	0,03
KÖPRÜBAŞI	218,72 ±8,12	7,31 ±0,82	9,43 ±2,32	-	0,11	0,13
MAÇKA	355,62±11,77	26,61±2,91	6,02±1,70	-	0,18	0,22
OF	319,18±4,96	25,25±2,36	56,20 ±6,85	-	0,08	0,10
SÜRMENE	20,4±1,12	24,12±2,33	5,82±1,64	135,55±3,50	0,03	0,04
ŞALPAZARI	22,80±1,44	15,16±1,98	4,06±1,12	50,10±1,94	0,02	0,02
TONYA	21,26±0,79	36,77±3,25	4,01 ±1,32	336,36±8,64	0,05	0,06
ORTALAMA	147,25±4,55	24,61±2,42	12,38±2,34	76,80±2,05	0,08	0,10

Tablo 19'dan görüldüğü gibi su numulerinde yıllık etkin doz değeri ortalaması 0,10 $\mu\text{Sv/y}$ olup, en küçük değer 0,02 $\mu\text{Sv/y}$ ile Sürmene ve Şalpazarı'nda, en büyük değer ise 0,42 $\mu\text{Sv/y}$ ile Atasu'da hesaplanmıştır. En küçük değer Sürmene'de $8,43 \pm 0,32$ mBq/l, en büyük değer Atasu'da $654,34 \pm 16,89$ mBq/l olarak ölçülmüş ve ^{238}U izotopu ortalaması $147,25 \pm 4,55$ mBq/l olarak hesaplanmıştır. ^{232}Th aktivite değeri ortalaması $24,61 \pm 2,42$ mBq/l olarak hesaplanmış, en küçük değer Hayrat'ta $6,61 \pm 0,52$ mBq/l en büyük değer Atasu'da $66,75 \pm 6,14$ Bq/kg olarak belirlenmiştir. ^{137}Cs aktivite değeri ortalaması $12,38 \pm 2,34$ mBq/l olarak hesaplanmış, en büyük değer Of'ta $56,20 \pm 6,85$ mBq/l olarak belirlenmiş, Atasu ve Değirmendere'de ^{137}Cs radyoizotopu ölçülebilir değerlerin altında kalmıştır. ^{40}K aktivite değeri ortalaması $76,80 \pm 2,05$ mBq/l olarak hesaplanmış en büyük değer Tonya'da $336,36 \pm 8,64$ mBq/l olarak belirlenmiş olup Atasu, Büyük Liman, Çaykara, Köprübaşı, Maçka ve Of'ta ^{40}K değerleri hesaplanabilir limitin altındadır.

3.4.2. Toprak Numunelerinde Radyonüklid Analizi Bulguları

Radyoaktivite seviyesinin belirlenebilmesi için Trabzon iline içme ve kullanma suyu sağlayan dört ana şebekeden (Atasu, Büyükliman, Akçaköy, Değirmendere) ve çevresindeki birkaç farklı nokta ile ilçelerden alınan toprak numunelerinin gama spektrometrik analizleri yapılmıştır. Aktivite hesabı için kullanılan denklem (38)'de V (numune hacmi) yerine m (numune kütlesi) kullanılmış ve t sayım süresi 30000 s olarak alınmıştır. Daha sonra denklem 6 ile soğurulan doz eşdeğerleri, denklem 7 ile de yıllık etkin doz eşdeğerleri hesaplanmıştır. Dış tehlike indeksinin hesaplanması için ise aşağıdaki bağıntı kullanılmıştır.

$$H_{\text{ex}} = A_{\text{Ra}}/370 + A_{\text{Th}}/259 + A_{\text{K}}/4810 \quad (42)$$

Burada, A_{Ra} , A_{Th} ve A_{K} sırasıyla, ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'nin Bq/kg biriminde aktivite konsantrasyonlarıdır.

Trabzon ili dört ana şebekesi ve ilçelerinin içme suyu şebekeleri etrafından alınan toprak numunelerinde radyonüklid konsantrasyonları Tablo 20 de gösterilmiştir.

Tablo 20. Trabzon İli Toprak Numunelerinde Radyonüklid Konsantrasyonları

NUMUNE ADI	²³⁸ U	²³² Th	¹³⁷ Cs	⁴⁰ K	D	AEDE	H _{ex}
	(Bq/kg)	(Bq/kg)	(Bq/kg)	(Bq/kg)	(nGy/s)	(μSv/y)	
ATASU 1	74,66±2,48	12,38±1,19	1,80±0,44	279,64±6,52	53,63	65,78	0,31
ATASU 2	27,50±1,02	17,53±1,43	4,51±0,75	314,88±7,37	36,42	44,67	0,21
ATASU 3	11,48±0,50	15,73±1,13	3,49±0,68	152,96±3,83	21,18	25,98	0,12
ATASU 4	-	20,15±1,91	8,52±1,39	374,77±8,89	27,80	34,10	0,16
AKÇAKÖY 1	50,41±1,98	26,76±2,31	11,25±2,40	213,81±5,26	48,37	59,32	0,28
AKÇAKÖY	-	11,55±1,05	17,18±1,61	208,76±5,06	15,68	19,23	0,09
BÜYÜK LİMAN 1	77,87±2,44	21,53±1,54	16,02±2,02	322,40±7,32	62,42	76,56	0,36
BÜYÜK LİMAN 2	-	9,51±1,13	9,83±1,09	289,71±6,55	17,83	21,86	0,10
BÜYÜK LİMAN 3	29,48±1,03	21,11±1,57	10,87±1,63	547,93±11,46	49,22	60,36	0,28
DEĞİRMENDERE 1	55,69±2,03	22,62±1,61	2,98±0,78	270,16±6,62	50,66	62,13	0,29
DEĞİRMENDERE 2	44,61±1,74	20,08±1,52	1,12±0,34	277,59±6,61	44,31	54,35	0,26
ARAKLI	114,64±3,65	29,71±2,81	2,14±0,61	242,97±5,96	81,04	99,39	0,48
ARSİN	48,45±1,79	30,04±2,10	1,45±0,43	241,04±5,93	50,57	62,03	0,30
ÇAYKARA	86,67±2,96	13,59±1,37	1,14±0,37	309,36±7,28	61,15	75,00	0,35
DERNEKPAZARI	53,11±1,86	13,77±1,02	4,89±0,74	228,30±5,55	42,37	51,97	0,24
HAYRAT	52,58±1,93	48,73±2,90	0,86±0,32	345,07±8,08	68,12	83,54	0,40
KÖPRÜBAŞI	52,52±1,84	19,82±1,83	12,61±1,92	304,06±7,21	48,92	59,99	0,28
MAÇKA	98,74±3,12	27,30±2,24	6,79±1,34	185,92±4,58	69,86	85,67	0,41
OF	32,42±1,35	8,50±0,87	3,47±0,89	250,21±6,04	30,54	37,46	0,17
SÜRMENE	103,24±3,26	15,85±1,26	201,39±4,64	375,53±8,88	72,93	89,44	0,42
ŞALPAZARI	14,37±1,87	12,86±1,46	6,39±1,41	239,64±8,03	24,40	29,92	0,14
TONYA	86,03±2,96	38,41±3,03	15,69±2,61	312,97±7,49	75,99	93,20	0,45
ORTALAMA	50,66±1,81	20,80±1,69	15,65±1,29	285,80±6,84	47,88	58,72	0,28

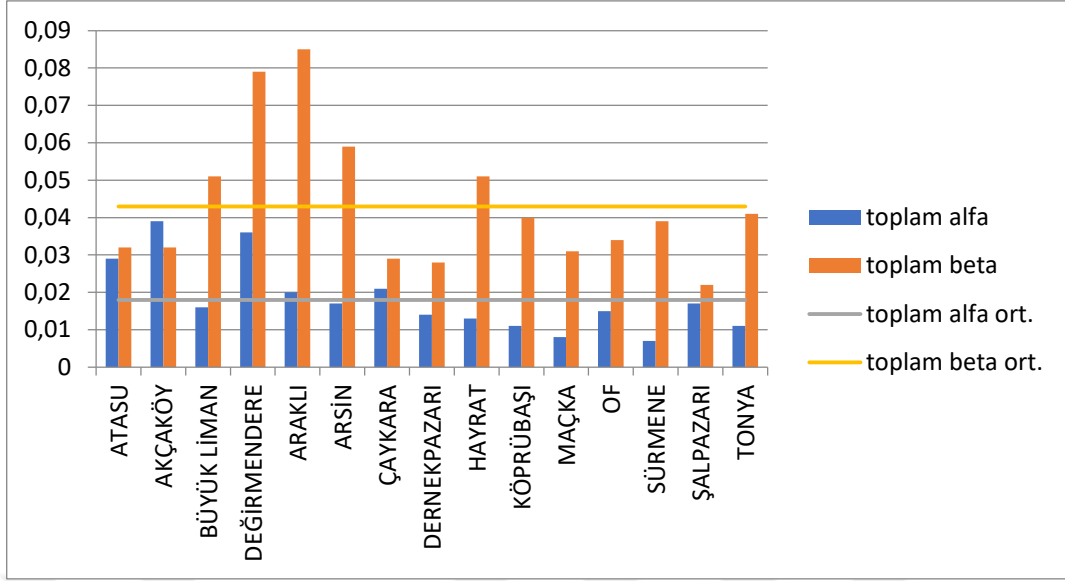
Tablo 20'den görüldüğü gibi toprak numunelerinde yıllık etkin doz eşdeğeri ortalaması 58,72 $\mu\text{Sv/y}$ olup, en küçük değer 19,23 $\mu\text{Sv/y}$ ile Akçaköy 2'de en büyük değer ise 99,39 $\mu\text{Sv/y}$ ile Araklı'da hesaplanmıştır. Atasu 4, Akçaköy 2 ve Büyük Liman 2 numunelerinde ^{238}U izotopu hesaplanabilir değer in altında kalmış, en büyük değer Araklı'da $114,64 \pm 3,65$ Bq/kg olarak ölçülmüş ve ortalama değer $50,66 \pm 1,81$ Bq/kg olarak hesaplanmıştır. ^{232}Th aktivite değeri ortalaması $20,80 \pm 1,69$ Bq/kg olarak hesaplanmış, en küçük değer Of'ta $8,50 \pm 0,87$ Bq/kg en büyük değer Hayrat'ta $48,73 \pm 2,90$ Bq/kg olarak belirlenmiştir. ^{137}Cs aktivite değeri ortalaması $15,65 \pm 1,29$ Bq/kg olarak hesaplanmış, en küçük değer Değirmendere 2'de $1,12 \pm 0,34$ Bq/kg en büyük değer Sürmene'de $201,39 \pm 4,64$ Bq/kg olarak belirlenmiştir. ^{40}K aktivite değeri ortalaması $285,80 \pm 6,84$ Bq/kg olarak hesaplanmış, en küçük değer Atasu 3'te $152,96 \pm 3,83$ Bq/kg en büyük değer Vakfikebir 3'te $547,93 \pm 11,46$ Bq/kg olarak belirlenmiştir. Trabzon iline içme suyu sağlayan dört ana şebeke çevresinden alınan toprak numuneleri incelendiğinde Atasu Arıtma Tesisi'nde ^{238}U aktivite ortalaması $28,41 \pm 1,00$ Bq/kg, ^{232}Th aktivite ortalaması $16,45 \pm 1,42$ Bq/kg, ^{40}K aktivite ortalaması $280,56 \pm 6,65$ Bq/kg, yıllık etkin doz değeri ortalaması ise $42,63$ $\mu\text{Sv/y}$ olarak hesaplanmıştır. Akçaköy Arıtma Tesisi'nde ^{238}U aktivite ortalaması $25,21 \pm 0,99$ Bq/kg, ^{232}Th aktivite ortalaması $19,16 \pm 1,68$ Bq/kg, ^{40}K aktivite ortalaması $211,29 \pm 5,16$ Bq/kg, yıllık etkin doz değeri ortalaması ise $39,26$ $\mu\text{Sv/y}$ olarak hesaplanmıştır. Büyük Liman Arıtma Tesisi'nde ^{238}U aktivite ortalaması $35,78 \pm 1,16$ Bq/kg, ^{232}Th aktivite ortalaması $17,38 \pm 1,41$ Bq/kg, ^{40}K aktivite ortalaması $2386,68 \pm 8,44$ Bq/kg, yıllık etkin doz değeri ortalaması ise $52,93$ $\mu\text{Sv/y}$ olarak hesaplanmıştır. Değirmendere kuyusunda ise bu değerler için ^{238}U aktivite ortalaması $50,15 \pm 1,89$ Bq/kg, ^{232}Th aktivite ortalaması $21,35 \pm 1,57$ Bq/kg, ^{40}K aktivite ortalaması $273,88 \pm 6,62$ Bq/kg, yıllık etkin doz değeri ortalaması ise $58,24$ $\mu\text{Sv/y}$ olarak hesaplanmıştır.

4. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Bu çalışma 2016-2017 yılları arasında Trabzon ili içme suyu şebekelerinde ve çevresinde radyoaktivite düzeyini belirlemek üzere yapılmıştır. Çalışma bölgesi olarak Trabzon iline içme suyu sağlayan dört ana şebeke ve su ihtiyacını bu şebekelerden sağlamayan Trabzon ilçeleri alınmıştır. KTÜ merkez kampüsüne su sağlayan şebeke Değirmendere kuyusundan Atasu Barajı'na taşınmıştır. Ancak Atasu Barajı'ndan da numuneler alındığı için çalışma açısından herhangi bir sorun oluşturmamıştır. Trabzon ili ve ilçelerindeki içme suları radyoaktif kirlilik (toplam alfa, toplam beta, radyonüklit, radon), trityum radyoaktifliği ve kimyasal elementler açısından incelenerek, bölge değerlerinin izin verilen sınır değerlere ve daha önce yapılan çalışmalara göre kıyaslaması yapılmıştır.

4.1. Su Numunelerinde Toplam Alfa-Toplam Beta Analizi

İçme sularındaki radyonüklid aktivite değerlerinden hesaplanan yıllık etkin doz değeri ortalama 0,10 $\mu\text{Sv/y}$ 'dir. Bu değer WHO'nun müsaade ettiği değer olan 100 $\mu\text{Sv/y}$ değerinden küçüktür. Şekil 18'de toplam alfa ve toplam beta değerlerinin il ortalamalarıyla ve birbirleriyle karşılaştırılması görülmektedir. Atasu, Akçaköy, Değirmendere, Araklı ve Çaykara il ortalamasının üzerinde toplam alfa aktivitesine sahipken, bütün değerler WHO'nun 2006 raporunda bildirdiği 0,5 Bq/L toplam alfa aktivitesi değerinden küçüktür. Büyükliman, Değirmendere, Araklı, Arsin ve Hayrat'ta toplam beta aktiviteleri il ortalamasından yüksek ancak tüm numunelerin aktiviteleri WHO'nun 2006 raporunda bildirdiği 1 Bq/L toplam beta değerlerinden küçüktür.



Şekil 17. Toplam alfa ve toplam beta değerlerinin karşılaştırılması (Bq/ml).

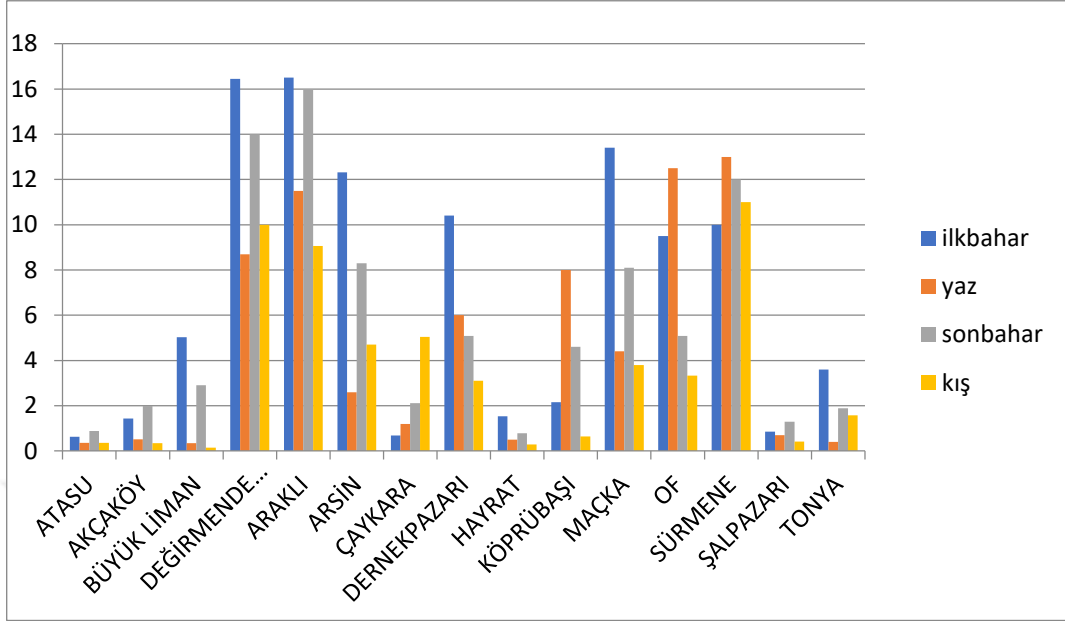
Yapılan çalışmadan elde edilen değerlerin hem ülkemizde hem de dünyada yapılan diğer çalışmalarla karşılaştırılması ise Tablo 21’de gösterilmiştir.

Tablo 21. Türkiye’de ve Dünyada Bazı İçme Sularında Toplam Alfa ve Toplam Beta Konsantrasyonu

BÖLGE	TOPLAM ALFA (mBq/l)	TOPLAM BETA (mBq/l)	REFERANS
İspanya	30-880	40-2280	Palomaet vd., (2007)
Sırbistan	8,0	86,8	Jankovic vd.,(2012)
İtalya	8-349	25-273	Forte vd., (2007)
Batman	33,8	80,3	Damla vd., (2009)
Adana	9,6	86,0	Değerlier vd., (2010)
Hatay	36,69	116,36	Turgay (2015)
Bursa	68,5	67,1	Taşkın vd., (2012)
İstanbul	30,0	70,0	Karahan vd., (2000)
Samsun	51,9	77,8	Görür vd., (2011)
Kastamonu	8,9	271	Kam vd., (2007)
Trabzon	6,5	100,8	Damla vd., (2006)
Giresun	7,1	97,1	Damla vd., (2006)
Doğu Karadeniz	25,8	31	Kobyay (2009)
Trabzon	18	43	Bu Çalışma
WHO	500	1000	İzin verilen sınır değer
UNSCEAR	100	1000	İzin verilen sınır değer

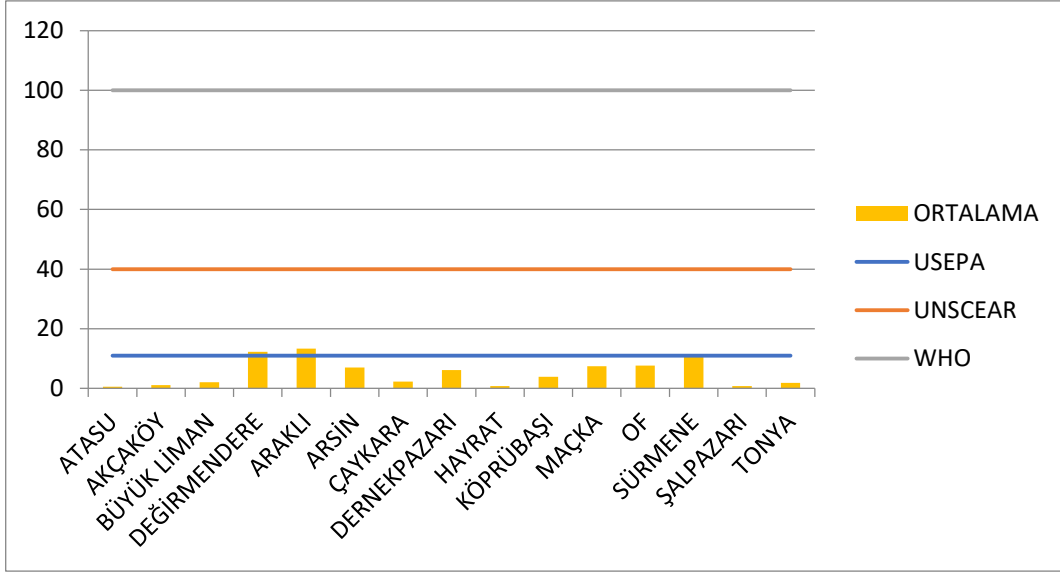
Alınan tüm su numunelerinde yapılan ölçümlerin sonuçları ölçülebilir limit (dedeksiyon limiti) olan 2 Bq/l değerinden küçüktür. UNSCEAR tarafından belirlenen sınır değer ise 100 Bq/l’dir.

4.2. Mevsimsel Radon Analizi Sonuçları



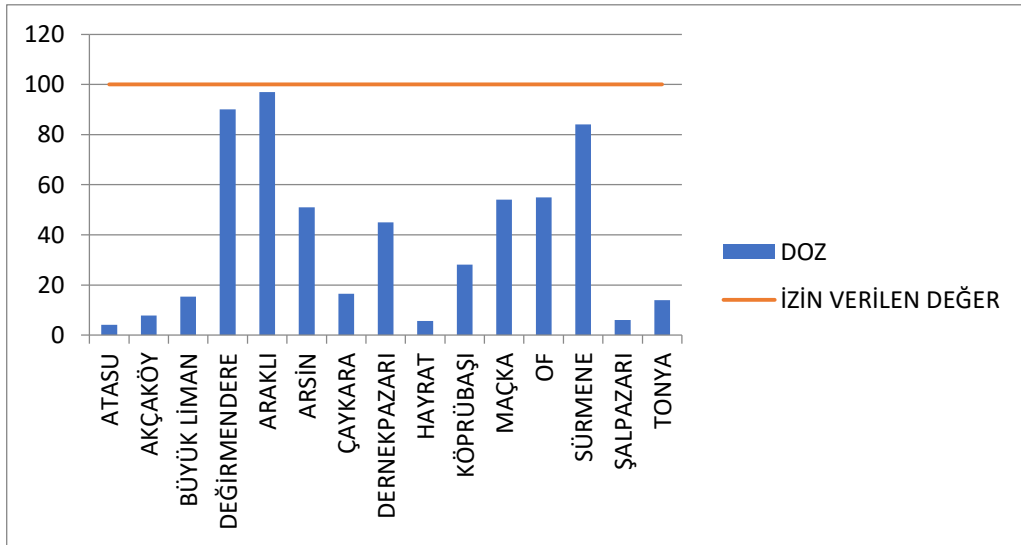
Şekil 18. Trabzon ili mevsimsel radon değişimleri (Bq/l).

Şekil 18 incelendiğinde ilçelerin çoğunda en yüksek radon konsantrasyonunun ilkbahar ayında ölçüldüğü görülmektedir. Değirmendere, Araklı, Sürmene içme suyu şebekelerinde ölçülen ortalama radon gazı seviyesi sırası ile 12,3 Bq/L, 13,3 Bq/L ve 11,50 Bq/L dir. İçme suları için uluslararası maksimum izin verilen sınır değer USEPA tarafından 11 Bq/L dir. UNSCEAR ve WHO için ise sırasıyla 40Bq/L ve 100Bq/L dir. Bu üç içme suyu şebekesinde suda ölçülen radon gazı değerleri USEPA için sınır seviyesinin biraz üzerindedir (Şekil 19).



Şekil 19. Ortalama radon konsantrasyonlarının izin verilen değerler ile karşılaştırılması (40Bq/l).

Elde edilen yıllık etkin doz eşdeğerlerinin WHO'nun belirlediği yıllık etkin doz eşdeğeri için sınır değer olan 0,1 mSv/y ile karşılaştırıldığında tüm içme suyu şebekeleri için hesaplanan değerler bu seviyeden düşük olduğu, Araklı, için değerler limit seviyeye yakın olduğu görülmektedir. Yapılan ayrıntılı ölçüm ve hesaplamalardan Trabzon İli içme suyu şebekelerinde radon gazı seviyesinin insan sağlığı için bir tehlike arz etmediği anlaşılmaktadır (Şekil 20).



Şekil 20. Hesaplanan yıllık etkin doz eşdeğerlerinin WHO tarafından belirlenen sınır değerler ile karşılaştırılması (µSv/y).

Tüm elde edilen bu değerler hem ülkemizde hem de dünyada yapılan diğer çalışmalarla karşılaştırılarak, uluslararası kuruluşlar tarafından izin verilebilir seviyelerde olup olmadıkları tartışılmıştır.

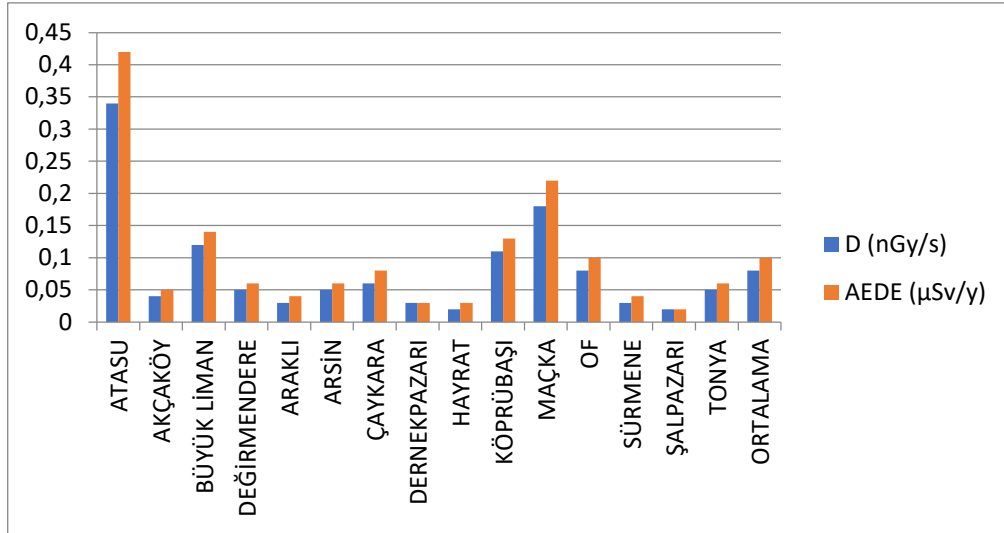
Tablo 22. Türkiye’de ve Dünyada Bazı İçme Sularında Radon Konsantrasyonu

BÖLGE	Radon Bq/L	Referans
Amerika	39,96	Gosing vd., (1990)
Venezuela	0-2	Harvath vd., (2000)
Brezilya	0,39-0,47	Marques vd., (2004)
İran	0,08 -17,99	Fakhri vd., (2015)
Pekin	0,32-88,22	Wu vd., (2014)
(Hindistan)	26,573	Srinivasa vd., (2015)
Bosna Hersek	0,182-2,368	Kasic vd., (2016)
Bursa	0,91-12,58	Tarım vd., (2012)
Konya	1,44-24,75	Erdoğan vd., (2013)
Konya	1,85-99,27	Erdoğan vd., (2017)
Kastamonu	0,31-13,14	Yalçın vd., (2011)
Zonguldak	1,14-13,75	Koray vd., (2014)
Trabzon	0,56-13,3	Bu çalışma

4.3. Radyonüklid Analizi Sonuçları

4.3.1. Su Numunelerinde Radyonüklid Analizi Sonuçları

Su numunelerinde ^{238}U izotopu ortalaması $147,25 \pm 4,55$, ^{232}Th aktivite değeri ortalaması $24,61 \pm 2,42$ mBq/l, ^{137}Cs aktivite değeri ortalaması $12,38 \pm 2,34$ mBq/l, ^{40}K aktivite değeri ortalaması $76,80 \pm 2,05$ mBq/l olarak hesaplanmıştır. Trabzon ilin soğurulan doz (D) ortalaması 0,08 (nGy/s), yıllık etkin doz eşdeğeri (AEDE) ortalaması 0,10 ($\mu\text{Sv/y}$)’dir. Elde edilen yıllık etkin doz eşdeğerleri WHO’nun belirlediği yıllık etkin doz eşdeğeri için sınır olan 0,1 mSv/y değerinden küçüktür. En yüksek yıllık etkin doz eşdeğeri Atasu’da, en düşük yıllık etkin doz eşdeğeri Şalpazarı’nda hesaplanmıştır (Şekil 21).



Şekil 21. Trabzon ilinde hesaplanan soğurulan doz ve yıllık etkin doz eşdeğerleri.

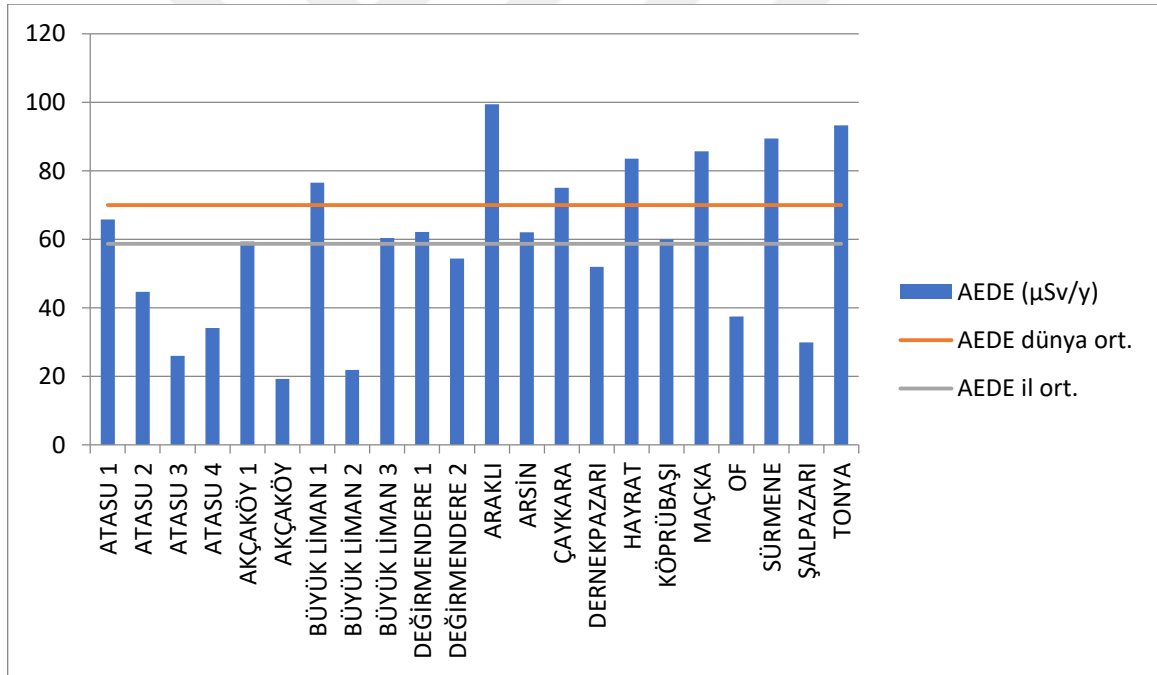
Ülkemizde ve dünyada sulara radyonüklid analizi yapılan bazı çalışmalar Tablo23'te gösterilmiştir.

Tablo 23. Türkiye'de ve Dünyada Sularında Radyonüklid Seviyeleri

BÖLGE	Ra-226(U-238) mBq/L	Th-232 mBq/L	K-40 mBq/L	Cs-137 mBq/L	Referans
İtalya	0,2-1200	-	-	-	Sgorbati vd., (1997)
İtalya	8,9	0,0013	-	-	Jia vd., (2009)
Hindistan	58,8	465,2	311,2	-	Pillai vd., (2018)
Pakistan	8-15	4-6	92-216	-	Fatima vd., (2006)
Bosna Hersek	1,1-791	-	12-346	-	Kasic vd., (2015)
Macaristan	1,3-231,6	-	-	-	Jobbagy vd., (2010)
Yunanistan	0,6-22,1	-	-	-	Kararmanis vd. (2007)
Batman	42	35	524	-	Damla vd., (2009)
Gümüşhane	4,6-5,5	2,1-3,6	91,25-117,9	-	Kaya vd., (2016)
Bayburt	93	30	504	-	Küçükömeroğlu vd., (2008)
D. Karadeniz	52	23	279	24	(Kobyva vd., 2010)
Trabzon	147,25±4,55	24,61±2,42	76,80±2,05	12,38±2,34	Bu çalışma

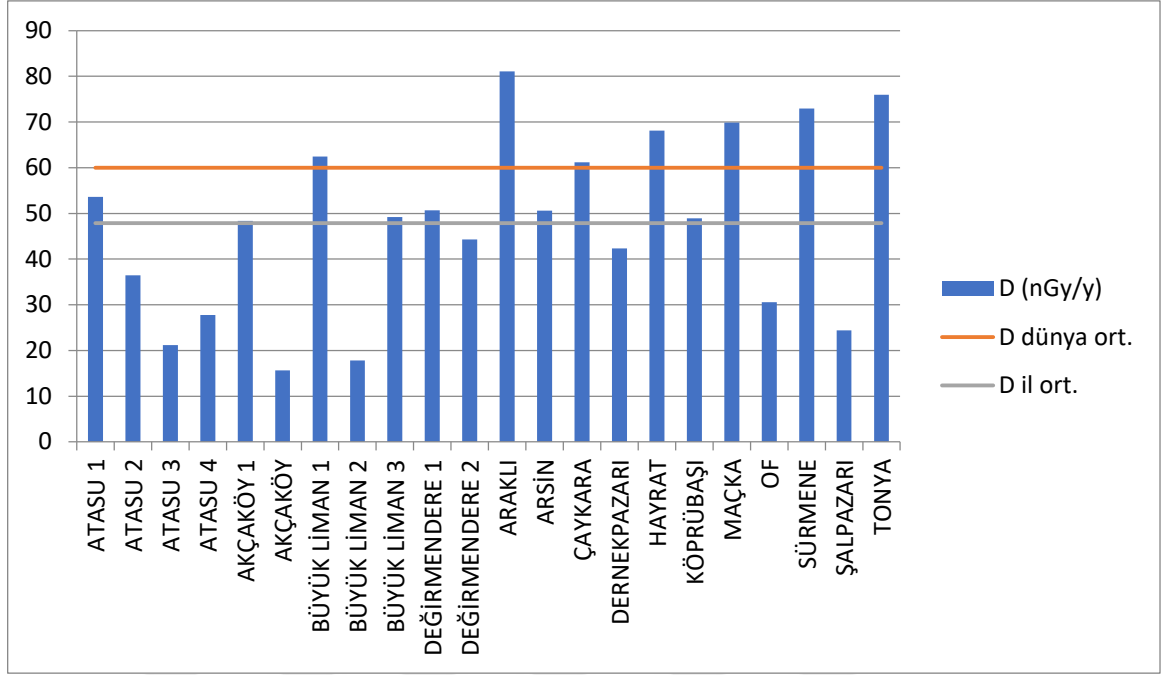
4.3.2. Toprak Numunelerinde Radyonüklid Analizi Sonuçları

İçme sularının alındığı yerlerdeki toprak örneklerinin radyonüklid analizlerine göre aktivitesi ortalama $50,66 \pm 1,81$ Bq/kg, ^{232}Th aktivitesi $20,80 \pm 1,69$ Bq/kg, ^{40}K aktivitesi ortalama $285,80 \pm 6,84$ Bq/kg, ve ^{137}Cs ortalama aktivitesi $15,65 \pm 1,29$ Bq/kg, olarak bulunmuştur. Literatürde ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K aktivite konsantrasyonu için dünya ortalama değerleri sırası ile 35,30 ile 400 Bq/kg olarak verilmektedir (UNSCEAR, 2000). Trabzon ili ve ilçelerinden alınan toprak örneklerinin ortalama değerleri bu literatür bilgisi ile kıyaslandığında ^{238}U dünya ortalamasının dünya ortalamasının biraz üzerindedir. Topraktaki radyonüklit aktivite değerlerinden hesaplanan ortalama yıllık etkin doz değeri $58,72 \mu\text{Sv/y}$ olup bu değer yıllık etkin doz eşdeğeri (AEDE) için dünya ortalaması olarak belirlenen $70 \mu\text{Sv/y}$ değerinden küçüktür (Şekil 22).



Şekil 22. Yıllık etkin doz eşdeğerlerinin dünya ortalaması ile karşılaştırılması.

Toprak örneklerinde belirlenen radyonüklidlerin aktivite değerleri kullanılarak hesaplanan gama dozu (D) ortalama $48,88$ nGy/s olup, bu değer, gama dozu için dünya ortalaması olarak belirlenen 60 nGy/s değerinden daha düşüktür (Şekil 23).



Şekil 23. Gama dozu eşdeğerlerinin dünya ortalaması ile karşılaştırılması.

Çernobil de 1986 yılında yaşanan radyoaktif sızıntı sonucu salınan yapay radyoaktivite ürünü ^{137}Cs nin izine rastlanmakta olup, çalışma kapsamında alınan içme suyu ve toprak örneklerinde az da olsa ^{137}Cs aktivite ortalaması içme sularında 12.38 ± 2.34 Bq/L, toprak örneklerinde $15,65 \pm 1,29$ Bq/kg olarak bulunmuştur.

Yapılan çalışmadan elde edilen değerler hem ülkemizde hem de dünyada yapılan diğer çalışmalarla karşılaştırılması Tablo 24'de verilmiştir.

Tablo 24. Türkiye’de ve Dünyada Bazı Bölge Topraklarında Radyonüklid Seviyeleri

BÖLGE	Ra-226 Bq/kg	Th-232 Bq/kg	K-40 Bq/kg	Cs-137 Bq/kg	Referans
Hindistan	30.24	29.89	291.06	-	Amanjeet vd., (2017)
Nijerya	18	22	210	-	Agbalagba vd., (2011)
Mısır	22,12	10,27	180,24	-	El-Daly ve Hussein (2008)
İstanbul	21	37	342	18	Karahan vd., (2000)
Gaziantep	8,02	25,2	23,7	289,2	Osmanlıoğlu vd., (2007)
Gaziantep	28,9	29,5	255	-	Zuhur vd., (2017)
Batman	35	25	274	12	Damla vd., (2009)
Hatay	23,35	14,55	242,36	8,20	Turgay (2015)
Manisa	28,5	27	340	-	Ereeş vd., (2006)
Nevşehir	60,2	50,1	631	3,1	Turhan vd., (2016)
Ardahan	36	31	341	14	Küçükömeroğlu vd., (2011)
Erzincan	52	26	649	9	Küçükömeroğlu vd., (2016)
Rize	11-188	10-105	105-1235	19-232	Kurnaz vd., (2007)
Bayburt	14-100	6-150	216-1263	-	Küçükömeroğlu vd., (2009)
Gümüşhane	17,31	9,70	236,83	7,63	Kaya vd., (2015)
Samsun	31	22	341	16	Küçükömeroğlu vd., (2012)
Artvin	22	19	358	54	Küçükömeroğlu vd., (2011)
Giresun	33	43	733	318	Çelik vd., (2008)
Trabzon	50,66	20,80	285,80	15,65	Bu Çalışma

5. ÖNERİLER

^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K , ^{137}Cs radyonüklidleri ve radon gazı ile bozunum ürünleri, içme suyu yoluyla doğrudan insan vücuduna etki etmektedirler. Böylece bütün canlılarda iç ışınlanmaya sebep olmaktadır. Bu sebeple yapılan bu çalışma, radyoaktiviteden kaynaklanan yıllık etkin dozun hesaplanması ve incelenen içme sularının sindirilmesi sebebiyle oluşabilecek sağlık risklerinin değerlendirilmesi açısından önemlidir.

Çalışma bölgesi Çernobil nükleer kazasından etkilenmiş bir bölgedir. Yapay bir radyoaktif element olan ^{137}Cs izotopunun araştırılması ise bahsedilen kazanın etkilerinin devam edip etmediğinin bilinmesi ve dünyanın birçok yerinde yapılan nükleer denemelerden kaynaklı radyasyon etkisinin takibi açısından önemlidir. Çalışmadaki bulgular olabilecek Çernobil nükleer kazası benzeri durumlarda radyasyon takibi bakımından yararlı olacaktır.

Çevreden aldığımız radyasyon dozunun takip edilmesi ve belirli değerler altında tutulabilmesi için belirli aralıklarla bu çalışma gibi çalışmaların tekrarlanması ve diğer bölgelerde de yaygınlaştırılması gerekmektedir. Özellikle radon değerlerinin değişim gösterebileceği göz önünde tutularak sistematik olarak radon ölçümleri tekrarlanmalıdır.

6. KAYNAKLAR

- Arogunjo, A. M., Farai, I. P. ve Fuwape, I. A., 2004. Dose rate assessment of terrestrial gamma radiation in the Delta region of Nigeria. *Radiation Protection Dosimetry*, 108, 73-77.
- Arslan, Ş., 2016. Köprüören Havzası (Kütahya) Su Kaynaklarının Çevresel İzotoplar İle İncelemesi. *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, 153, 169-184.
- Arya A. P. (Edit: Şahin, Y.), 1999. Çekirdek Fiziğinin Esasları, Aktif Yayın, Dağıtım LTD. ŞTİ., İstanbul.
- BEIR VI, 1999. Health Effects of Exposure to Radon. Committee on Health Risks of Exposure to Radon. Board on Radiation Effects Research (BEIR VI). National Academy Press.
- Benedik, L. ve Jeran, Z., 2012. Radiological of Natural and Mineral Drinking Waters in Slovenia, *Radiation Protection Dosimetry*, 151,2, 306-313.
- Bülbül, A., 2009. Alaşehir (Manisa) Sıcak Ve Soğuk Su Sistemlerinin Hidrojeolojik Ve Hidrojeokimyasal Açından İncelenmesi. Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Camgöz, B., Saçı M.M., Bolca M., Özen F., Oruç Ö.E., ve Demirel N., 2010. Termal Suların Radyoaktivite ve Kimyasal İçeriklerinin İncelenmesi; İzmir, Seferihisar Bölgesi Örneği. *Ekoloji* 19-76, 78-87.
- Chen, J., Cooke, M. W. ve Mercier, J. F., 2017. A Review Of Natural Radionuclides In Canadian Drinking Water (1975–16), *Radiation Protection Dosimetry*, 179,1, 26-36.
- Çevik, U., Damla, N., Koz, B. ve Kaya, S., 2008. Radiological Characterization Around the Afsin-Elbistan Coal-Fired Power Plant in Turkey, *Energy Fuels*, 22,1, 428–432.
- Damla, N., 2005. Doğu Karadeniz Bölgesi İçme Sularında Toplam Alfa, Toplam Beta ve Gama Aktivitesi. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Damla, N. ve Çevik, U., 2009. Determination of Gross Alpha and Beta Activities in Waters of Batman, Turkey. *Desalination*, 244, 208-214.
- Değerlier, M ve Karahan, G., 2010. Natural Radioactivity in Various Surface Waters in Adana, Turkey. *Desalination*, 261, 126-130.

- Demirel, S., 2013. Konya'nın İçme Suyunun Sağlandığı Bazı Kuyu Sularında ^{222}Rn Konsantrasyonu Değişimlerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- El-Daly, T.A. ve Hussein, A. S., 2008. Natural Radioactivity Levels in Environmental Samples in North Western Desert of Egypt. 3. Çevre Fiziği Konferansı'nda sunulan bildiri, Aswan, Egypt.
- Erdoğan, M., Manisa, K. ve Zedef, V., 2017. Radon in Spring Water in the Region of Seydişehir of Konya Province, Turkey, Radiation Protection Dosimetry, 177,1-2, 194-197.
- Jia, G., Torri, G. ve Magro, L., 2009. Concentrations of ^{238}U , ^{234}U , ^{235}U , ^{232}Th , ^{230}Th , ^{228}Th , ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{224}Ra , ^{210}Po , ^{210}Pb and ^{212}Pb in Drinking Water in Italy: Reconciling Safety Standards Based on Measurements of Gross α and β . Journal Of Environmental Radioactivity, 100,11, 941-949.
- Jobbágy, V., Kávási, N., Somlai, J., Dombovári, P., Gyöngyösi, C. ve Kovács, T., 2011. Gross Alpha and Beta Activity Concentrations in Spring Waters in Balaton Upland, Hungary. Radiation Measurements, 46,1, 159-163.
- Kasic, A., Adrovic, F., Kasumovic, A. ve Hankic, E., 2016. Levels of Natural Radioactivity in Mineral and Thermal Waters of Bosnia and Herzegovina, Nukleonika, 60,3, 503-508.
- Kaya, S., Karabıdak, M. ve Çevik, U., 2015. Gümüşhane İli Çevresinde Toplanan Toprak ve Karayosunu Örneklerinde Doğal (^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K) ve Yapay (^{137}Cs) Radyoaktivite Konsantrasyonlarının Belirlenmesi. Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 5,1, 24-33.
- Khorshid, T., 2013. Yenicekent Gölemezli Çevresindeki Jeotermal Alanların Hidrojeolojik ve Hidrojeokimyasal İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Kırkpınar, A., 2010. İzmir ve Ankara İli Çevrelerindeki Termal Su ve İçme Sularının Radyoaktivite Açısından İncelenerek, Bölgelerin Kendi İçerisinde ve Bölgeler Arasında Termal Su ve İçme Sularının Radyoaktivite Açısından Karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Kobyay, Y., 2009. Doğu Karadeniz Bölgesindeki Doğal Kaynak ve Maden Sularında Radyoaktiflik Tayini. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Koray, A., Akkaya, G., Kahraman, A. ve Kaynak, G., 2014. Measurements of Radon Concentrations in Waters and Soil Gas of Zonguldak, Turkey. Radiation Protection Dosimetry, 162,3) 375-381.

- Krane, S. K. (Edit: Şarer, B.), 2001. Nükleer Fizik 1. Cilt Ders Kitabı, Birinci Baskı, Palme Yayın Dağıtım LTD. ŞTİ., Ankara.
- Küçükömeroğlu, B., Kurnaz, A., Damla, N., Cevik, U., Celebi, N., Ataksor, B. ve Taskin, H., 2009. Environmental Radioactivity Assessment for Bayburt, Turkey, *Journal of Radiological Protection*, 29,3, 417-428.
- Küçükönder, E., 2009. Kahramanmaraş Yöresinde Doğal Radyoaktivitenin Tayini. Doktora Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.
- NCRP, 1985. A Handbook Of Radioactivity Measurements Procedures, Second Edition. NCRP Report No:58, Washington.
- Nikolov, J., Todorovic, N., Petrovic, P. T., Forkapic, S., Mrdja, D., Bikit, I., Krmar, M. ve Veskovic, M., 2012. Exposure to radon in the radon spa Niska Banja, Serbia Radiation Measurements, 47,443-450.
- Osmanlıoğlu, A. E., Kam, E. ve Bozkurt, A., 2007. Assessment of background radioactivity level for Gaziantep region of southeastern Turkey. *Radiation Protection Dosimetry*, 124, 407-410.
- Palomo, M., Peñalver A., Aguilar, C. ve Borrull F., 2007. Tritium Activity Levels in Environmental Water Samples from Different Origins. *Applied Radiation and Isotopes*, 65,9, 1048-1056.
- Saphymo GmbH, AlphaGUARD AquaKIT el kitabı, 2014, Almanya.
- Srinivasa, E., Rangaswamy, D. R. ve Sannappa, J., 2015. Determination of Radon Activity Concentration in Drinking Water and Evaluation of the Annual Effective Dose in Hassan District, Karnataka State, India, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 305,2, 665-673
- TAEK, 2009. Çevresel Radyoaktivitenin İzlenmesi, 2007, TAEK TR 2009-1, Ankara.
- Tarım U. A., Gürler, O., Akkaya, G., Kılıç, N. ve Kaynak, G., 2011. Evaluation of Radon Concentration in Well and Tap Waters in Bursa, Turkey, *Radiation Protection Dosimetry*, 150,2, 207-212.
- Taşkın, H., 2011. Erzincan İl Merkezi ve Yakın Yerleşim Alanlarındaki İçme ve Kullanma Sularında Doğal Radyasyon Tayini. Yüksek Lisans Tezi, Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzincan.
- Taşkın, H. ve Kam, E., 2012. Determination of Gross Alpha and Beta Activity Concentrations in Drinking Waters in Bursa Region of North-Western Turkey. *Desalination and Water Treatment*, 45, 1-3.

- Tufaner, F., 2011. Doğal Radon Emisyonunun İnsan Sağlığına Etkileri ve Alınması Gereken Tedbirler. *Çankırı Araştırmaları Dergisi*, 75-87.
- Todorovic, N., Nikolov, J., Forkapic, S., Bikit, I., Mrdja, D., Krmar, M. ve Veskovic, M., 2012. Public Exposure to Radon in Drinking Water in Serbia. *Applied Radiation and Isotopes*, 70,543-549.
- Top, G., 2008. Sıvı Sintilasyon Cihazı İle İçme Sularında Tritiyum Seviyelerinin Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Tsiaili, A., Kiliari, T. ve Pashalidis, I., 2011. Seasonal Variation of the Alpha-Radioactivity Concentration in Natural Water Systems in Cyprus. *Radiation Measurements*, 46,1, 145-148.
- Turgay, M. E. 2015. Assessment of the Environmental Radioactivity in Hatay Region. Doktora Tezi, Gaziantep Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gaziantep.
- URL-1, <http://www.electrosense.com.tr/sss/Iyonlastirici-radyasyon>, 13 Eylül 2018.
- URL-2, <https://tr.wikipedia.org/wiki/Radyasyon>, 29 Ekim 2018.
- UNSCEAR, 2000. Report, United Nations Scientific Committee on The Effects of Atomic Radiation Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiations, NewYork.
- Yalçın, S., Gurler, O., Akar, U. T., İncirli, F., Kaynak, G. ve Gündoğdu O., 2011. Measurements of Radon Concentration in Drinking Water Samples From Kastamonu, Turkey. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 47, 438-445.
- Wallner, G. ve Jabbar, T., 2010. Natural radionuclides in Austrian bottled mineral waters. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 286,2, 329-334.
- Wu, Y., Ma, Y., Cui, H. Liu, J., Sun, Y., Shang, B. ve Su, X., 2014. Radon Concentrations in Drinking Water in Beijing City, China and Contribution to Radiation Dose. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 11,11, 11121-11131.
- Zorer, Ö. S. ve Şahan, T. 2011. The Concentration of ^{238}U and the Levels of Gross Radioactivity in Surface Waters of the Van Lake (Turkey). *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 288,2F, 417-421.

ÖZGEÇMİŞ

1986 yılında İstanbul Fatih ilçesinde doğdu. İlkokul, ortaokul ve lise öğrenimi burada tamamladı. 2005 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fatih Eğitim Fakültesi Fizik Öğretmenliği Bölümünü kazandı. 2010 yılında mezun oldu. 2015 Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde Yüksek Lisans öğrenimine başladı. Aynı yıl fizik öğretmeni olarak atanıp göreve başladı.

Halen Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünün Yüksek lisans eğitimine devam eden Ayşegül ŞEN orta derecede İngilizce bilmekte ve şu an Ankara Evren Çok Programlı Anadolu Lisesinde görev yapmaktadır.