



T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BURSA-ÇEKİRGE BÖLGESİ TERMAL SULARINDA
RADON KONSANTRASYONUNUN TAYİNİ**

Ürkiye AKAR

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI**

BURSA-2010



T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BURSA-ÇEKİRGE BÖLGESİ TERMAL SULARINDA
RADON KONSANTRASYONUNUN TAYİNİ**

Ürkiye AKAR

**Doç. Dr. Orhan GÜRLER
(Danışman)**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI**

BURSA-2010

T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BURSA-ÇEKİRGE BÖLGESİ TERMAL SULARINDA RADON
KONSANTRASYONUNUN TAYİNİ


Ürkiye AKAR

YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

Bu Tez 11/01/2010 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu
ile kabul edilmiştir.


Doç. Dr. Orhan GÜRLER
Danışman


Prof. Dr. Z. Gökay KAYNAK


Yrd. Doç. Dr. Remziye ERGÜL

ÖZET

Radon, günlük hayatta sürekli maruz kaldığımız doğal radyasyonun yaklaşık %50'sini oluşturan ve kayaçlar ile topraktaki uranyumun bozunma zincirinin bir halkası olan renksiz, kokusuz ve duyu organlarıyla algılanamayan radyoaktif bir gazdır. Sudaki radon konsantrasyonu, halk sağlığında tehlike yarattığı için özellikle doğal sulardaki ölçüm çalışmaları güncelliğini koruyan bir araştırma konusudur. Bu çalışmalardan elde edilen Rn-222 konsantrasyon değerleri değişkenlik göstermekle birlikte, uluslararası sağlık örgütleri tarafından izin verilen değerleri aşan bulgular mevcuttur.

Bu çalışmanın amacı, Türkiye'nin kuzeybatısında yer alan Bursa ilinin sıcak su çıkışı bakımından zengin Çekirge bölgesinden toplanmış termal su örneklerinde radon konsantrasyonunun belirlenmesi ve risk yönünden değerlendirilmesidir. Su örnekleri, Genitron Instruments tarafından üretilen AlphaGUARD PQ 2000PRO radon dedektörü ile analiz edilmiştir ve bu çalışmada elde edilen sonuçlar uluslararası önerilen değerlerle kıyaslanmıştır.

Bu çalışma sonucunda elde edilen radon konsantrasyonu değerleri 2.513 ± 0.286 Bq/L ile 94.347 ± 4.361 Bq/L arasında değişmektedir.

Anahtar Kelimeler: Radon, radyasyon, termal sular, sağlık, AlphaGUARD.

ABSTRACT

Radon which is responsible approximately %50 of radiation from natural sources, we are exposed in daily life and in the decay chain of uranium available in rocks and soil, is a colourless, odourless and a radioactive gas that can not be observed by human sense. Especially, the radon in natural water sources is a major public health concern and still an active research area. Although different Rn-222 concentration results have been obtained in water samples in these studies, it is possible seeing many values which exceeded the permissible values of international health organizations.

The aim of this study is to determine radon concentrations in thermal waters in Çekirge region of the city of Bursa, rich in geothermal waters located in northwest part of Turkey and to evaluate its risk level for human health. Water samples were analyzed with the AlphaGUARD PQ 2000PRO radon detector produced by Genitron Instruments and the results obtained in this study were compared with the international recommended values.

The results obtained from this study for radon ranged from 2.513 ± 0.286 Bq/L to 94.347 ± 4.361 Bq/L.

Keywords: Radon, radiation, thermal waters, health, AlphaGUARD.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
SİMGELER DİZİNİ	v
KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL BİLGİLER	5
2.1. Radyoaktivite	5
2.1.1. Radyoaktivite birimleri	8
2.1.2. Radyoaktif bozunma ve bozunum türleri	8
2.1.2.1. Alfa bozunumu (α bozunumu)	9
2.1.2.2. Negatron bozunumu (β^- bozunumu)	10
2.1.2.3. Pozitron bozunumu (β^+ bozunumu)	10
2.1.2.4. Elektron yakalama olayı.....	11
2.1.2.5. İç dönüşüm (IC)	12
2.1.2.6. Gama ışını yayınlanması (γ -yayma).....	13
2.1.2.7. İzomerik geçiş	13
2.1.2.8. Nötron yayınlanması (n-yayma)	14
2.1.3. Radyoaktif seriler	14
2.1.3.1. Doğal seriler	14
2.1.3.2. Yapay Seriler	17
2.2. Radyasyon	19
2.2.1. İyonlaştırıcı radyasyon	20
2.2.2. İyonlaştırıcı olmayan radyasyon	20
2.2.3. Radyasyon kaynakları	20
2.2.3.1. Doğal radyasyon kaynakları	21
2.2.3.2. Yapay radyasyon kaynakları	22
2.3. Radon ve Özellikleri	23
2.3.1. Radon etkilenim kaynakları	26
2.3.2. Sularda radon	27
2.3.3. Radon ve sağlık	28
2.3.4. Radon ölçme yöntemleri	29
2.3.4.1. İyonizasyon odası	30
2.3.4.2. Kollektör yöntemi	30
2.3.4.3. Lucas hücresi	31
2.3.4.4. İz kazıma yöntemi	31
2.3.4.5. Elektrostatik toplama yöntemi	32

2.3.4.6.	Filtre yöntemi	32
3.	MATERYAL VE YÖNTEM.....	33
3.1.	İncelenen Su Kaynakları	33
3.2.	Numune Alımı.....	34
3.3.	AlphaGUARD Radon Cihazı.....	34
3.3.1.	Dedektörün dış yapısı.....	37
3.3.2.	Dedektörün iç yapısı	40
3.4.	Su Numunelerinin Analizi İçin Ölçüm Düzenineğinin Hazırlanması.....	43
3.5.	AlphaGUARD PQ 2000PRO ile Sudaki Radon Ölçümü	44
3.6	Sudaki Radon Hesaplamaları	46
3.6.1	Ortalama radon konsantrasyonu hesaplamaları	47
3.6.2	Standart hata.....	47
4.	ARAŞTIRMA VE SONUÇLAR.....	48
4.1.	AlphaGUARD Dedektörü İle Yapılan Ölçümler.....	48
4.2.	Kaynakların Ortalama Radon Konsantrasyonları	83
5.	TARTIŞMA	85
	KAYNAKLAR	87
	TEŞEKKÜR	90
	ÖZGEÇMİŞ.....	91

SİMGELER DİZİNİ

Bq	Becquerel
C	Konsantrasyon değeri
Ci	Curie
L	Litre
m	Metre
mL	Mililitre
mSv	Milisievert
n	Nötron
Rd	Rutherford
Rn	Radon
V	Hacim
°C	Santigrad derece
°K	Kelvin derece
°F	Fahrenayt derece
α	Alfa
β^-	Beta-negatif
β^+	Beta-pozitif
γ	Gama
e^-	Elektron
ν	Nötrino
$\bar{\nu}$	Anti nötrino

KISALTMALAR DİZİNİ

AB	Avrupa Birliği
ADC	Analog-Digital Converter
DC	Direct Current
DSP	Digital Signal Processing
IAEA	International Atomic Energy Agency
IC	Internal Conversion
ICRP	International Commission on Radiological Protection
MeV	Mega elektron volt
NRPB	National Radiological Protection Board
rH	Relative Humidity
SI	System International
TAEK	Türkiye Atom Enerjisi Kurumu
UNSCEAR	United Nations Scientific Committee On The Effects Of Atomic Radiation
USEPA	U. S. Environmental Protection Agency
WHO	World Health Organization

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1	Alfa (α), beta (β) ve gama (γ) gircilikleri (Davutoğlu 2008).	6
Şekil 2.2	Bir manyetik alan tarafından α ve β -parçacıkları ile γ -ışınlarının saptırılmalarını gösteren denel düzenek (Arya 1989).	7
Şekil 2.3	α (alfa) bozunumu (Davutoğlu 2008).	9
Şekil 2.4	β^- (negatron) bozunumu (Davutoğlu 2008).	10
Şekil 2.5	β^+ (pozitron) bozunumu (Davutoğlu 2008).	11
Şekil 2.6	Elektron yakalama olayı (Davutoğlu 2008).	12
Şekil 2.7	Gama ışını yayınlanması (Davutoğlu 2008).	13
Şekil 2.8	Dünya genelinde doğal ve yapay radyasyon kaynaklarından maruz kalınan radyasyon dozlarının oransal değerleri (IAEA 1996).	21
Şekil 2.9	Dünya genelinde doğal radyasyon kaynaklarından maruz kalınan radyasyon dozlarının oransal değerleri (IAEA 1996).	22
Şekil 2.10	Dünya genelinde yapay radyasyon kaynaklarından maruz kalınan radyasyon dozlarının oransal değerleri (IAEA 1996).	23
Şekil 2.11	Radon elementinin resmi (Davutoğlu 2008).	24
Şekil 2.12	^{238}U serisinin ^{222}Rn 'ye kadar olan bozunum şeması.	25
Şekil 2.13	Doğada en çok bulunan iki radon izotopunun bozunma zincirleri (Özdemir 2006).	26
Şekil 3.1	Örnekleme alanı.	33
Şekil 3.2	AlphaGUARD PQ 2000PRO dedektörü.	35
Şekil 3.3	AlphaGUARD ile hava, su, toprak ve yapı malzemelerinde radon ölçümü.	36
Şekil 3.4	AlphaGUARD cihazının önden görünüşü ve ebatları.	37
Şekil 3.5	AlphaGUARD cihazının arkadan görünüşü ve ebatları.	38
Şekil 3.6	AlphaGUARD cihazının alttan görünüşü ve ebatları.	38
Şekil 3.7	AlphaGUARD cihazının sol yandan görünüşü ve ebatları.	39
Şekil 3.8	AlphaGUARD cihazının sağ yandan görünüşü ve ebatları.	40
Şekil 3.9	AlphaGUARD dedektörünün iyonizasyon çemberinin şematik çizimi.	41
Şekil 3.10	AlphaGUARD'ın sinyal işleme biriminin blok diyagramı.	42
Şekil 3.11	Sudaki radon ölçüm düzeneği.	44
Şekil 3.12	Radon yayılma katsayısının (k) değişim grafiği.	47

Şekil 4.1	²²² Rn konsantrasyonu ölçümü örnek grafiği.....	48
Şekil 4.2	Sıcaklık ölçümü örnek grafiği.....	49
Şekil 4.3	Basınç ölçümü örnek grafiği.....	49
Şekil 4.4	Bağıl nem ölçümü örnek grafiği.....	50
Şekil 4.5	1 nolu kaynağa ait 1. numunenin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem ölçümleri; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri.....	51
Şekil 4.6	1 nolu kaynağa ait 2. numunenin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem ölçümleri; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri.....	52
Şekil 4.7	1 nolu kaynağa ait 3. numunenin (a) Radon konsantrasyonu ölçümü; (b) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri.....	53
Şekil 4.8	2 nolu kaynağa ait 1. numunenin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem ölçümleri; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri.....	54
Şekil 4.9	2 nolu kaynağa ait 2. numunenin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem ölçümleri; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri.....	55
Şekil 4.10	2 nolu kaynağa ait 3. numunenin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem ölçümleri; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri.....	56
Şekil 4.11	3 nolu kaynağa ait 1. numunenin (a) Radon konsantrasyonu ölçümü; (b) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri.....	57
Şekil 4.12	3 nolu kaynağa ait 2. numunenin (a) Radon konsantrasyonu ölçümü; (b) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri.....	57
Şekil 4.13	3 nolu kaynağa ait 3. numunenin (a) Radon konsantrasyonu ölçümü; (b) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri.....	58
Şekil 4.14	4 nolu kaynağa ait 1. numunenin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem ölçümleri; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri.....	59
Şekil 4.15	4 nolu kaynağa ait 2. numunenin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem ölçümleri; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri.....	60
Şekil 4.16	4 nolu kaynağa ait 3. numunenin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem ölçümleri; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri.....	61
Şekil 4.17	5 nolu kaynağa ait 1. numunenin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem ölçümleri; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri.....	62
Şekil 4.18	5 nolu kaynağa ait 2. numunenin (a) Radon konsantrasyonu ölçümü; (b) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri.....	63
Şekil 4.19	5 nolu kaynağa ait 3. numunenin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem ölçümleri; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri.....	64
Şekil 4.20	6 nolu kaynağa ait 1. numunenin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem ölçümleri; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri.....	65
Şekil 4.21	6 nolu kaynağa ait 2. numunenin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem ölçümleri; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri.....	66

Şekil 4.22	6 nolu kaynağa ait 3. numunenin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem ölçümleri; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri.....	67
Şekil 4.23	7 nolu kaynağa ait 1. numunenin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem ölçümleri; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri.....	68
Şekil 4.24	7 nolu kaynağa ait 2. numunenin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem ölçümleri; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri.....	69
Şekil 4.25	7 nolu kaynağa ait 3. numunenin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem ölçümleri; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri.....	70
Şekil 4.26	8 nolu kaynağa ait 1. numunenin (a) Radon konsantrasyonu ölçümü; (b) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri.....	71
Şekil 4.27	8 nolu kaynağa ait 2. numunenin (a) Radon konsantrasyonu ölçümü; (b) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri.....	71
Şekil 4.28	8 nolu kaynağa ait 3. numunenin (a) Radon konsantrasyonu ölçümü; (b) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri.....	72
Şekil 4.29	9 nolu kaynağa ait 1. numunenin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem ölçümleri; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri.....	73
Şekil 4.30	9 nolu kaynağa ait 2. numunenin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem ölçümleri; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri.....	74
Şekil 4.31	9 nolu kaynağa ait 3. numunenin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem ölçümleri; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri.....	75
Şekil 4.32	10 nolu kaynağa ait 1. numunenin (a) Radon konsantrasyonu ölçümü; (b) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri.....	76
Şekil 4.33	10 nolu kaynağa ait 2. numunenin (a) Radon konsantrasyonu ölçümü; (b) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri.....	76
Şekil 4.34	10 nolu kaynağa ait 3. numunenin (a) Radon konsantrasyonu ölçümü; (b) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri.....	77
Şekil 4.35	11 nolu kaynağa ait 1. numunenin (a) Radon konsantrasyonu ölçümü; (b) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri.....	77
Şekil 4.36	11 nolu kaynağa ait 2. numunenin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem ölçümleri; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri. ...	78
Şekil 4.37	11 nolu kaynağa ait 3. numunenin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem ölçümleri; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri. ...	79
Şekil 4.38	12 nolu kaynağa ait 1. numunenin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem ölçümleri; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri. ...	80
Şekil 4.39	12 nolu kaynağa ait 2. numunenin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem ölçümleri; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri. ...	81
Şekil 4.40	12 nolu kaynağa ait 3. numunenin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem ölçümleri; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri. ...	82
Şekil 4.41	Ortalama radon konsantrasyonlarının kaynaklara göre dağılımı.	84

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1	Uranyum serisi ürünleri ve yarı ömürleri (Arya 1989).....	15
Çizelge 2.2	Toryum serisi ürünleri ve yarı ömürleri (Arya 1989).	16
Çizelge 2.3	Aktinyum serisi ürünleri ve yarı ömürleri (Arya 1989).....	17
Çizelge 2.4	Neptinyum serisi ürünleri ve yarı ömürleri (Arya 1989).....	18
Çizelge 2.5	Radyoaktif serilerin en kısa ve en uzun yarı ömürlü üyeleri.	18
Çizelge 2.6	Radon Konsantrasyon Limitleri (Bq/m ³) (TAEK).....	29
Çizelge 4.1	Ölçümü yapılan suların kaynak kodları ve ortalama radon konsantrasyonları.	84

1. GİRİŞ

İçinde yaşadığımız dünya oluşumundan beri radyoaktiftir. Bu nedenle insanoğlu varoluşundan bu yana doğal radyasyona maruz kalmaktadır. Radyoaktif çekirdeklerin kararlı hale dönerken yaydıkları enerji olarak tanımlanan radyasyonla ilgili çalışmalar 1896 yılında Antoine Henri Becquerel tarafından başlatılmıştır. Doğal ve yapay olmak üzere ikiye ayrılan radyasyon, yaptığı etki bakımından da iyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon olarak ikiye ayrılır (Akkurt 2006). Genelde doğal kaynaklardan ortaya çıkan iyonlaştırıcı radyasyonun hücrelere nüfuz etme özelliği, atomlar arasında enerjinin gelişigüzel birikimini sağladığı için biyolojik harabiyete neden olan değişikliklere yol açabilmektedir (Özger 2005).

Doğal radyasyon, uzaydan gelen kozmik ışınlar ile yer kabuğunda yaygın bir şekilde bulunan ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{222}Rn , ^{40}K gibi radyoaktif elementlerden kaynaklanmaktadır ve doğal radyasyon kaynaklarından alınan radyasyon dozunun yaklaşık %50'sini radon ve onun kısa ömürlü ürünleri teşkil etmektedir (UNSCEAR 1993, IAEA 1996). Radon 1900 senesinde Friedrich Ernst Dorn tarafından keşfedilmiştir ve ^{238}U 'in radyoaktif bozunmasından oluşan, 1600 yıl yarı ömre sahip ^{226}Ra 'nın alfa yayınlaması sonucu oluşur. Birçok izotopu vardır fakat bunlardan sadece iki tanesi çevredeki radyasyon miktarına artırıcı etki yapmaktadır. Radonun bilinen izotopları toron (^{220}Rn) ve aktinon (^{219}Rn)'un yarı ömürleri çok kısa olup sırasıyla 55.1 s ve 3.96 s'dir. Bu nedenle radon elementi 3.82 günlük yarı ömre sahip ^{222}Rn tarafından domine edilmektedir (Özdemir 2006).

Uranyum radyoaktif serisi içinde yer alan radonun yeraltından havaya geçişi, toprak ile kayalardaki çatlaklardan ve yeryüzüne çıkan sular ile sağlanmaktadır (Villalba ve ark. 2005). Bu nedenle radonla ilgili çalışmalar daha çok sulardaki ve topraktaki radonu tespit etmeye yönelik olarak yapılmaktadır. Ancak kapalı ortamlarda radon konsantrasyonunun ölçülmesine yönelik araştırmalar da son yıllarda hız kazanmıştır.

Bilindiği üzere, canlıların yaşamlarını sürdürebilmesi için gerekli olan en önemli elemanlardan biri sudur. Bu nedenle suyun canlılar tarafından içilmesi ve kullanılması sağlık riski taşımayacak bir güvence içinde olmalıdır. İnsanoğlu, su ihtiyacını yüzeysel sular ve yeraltı su kaynaklarından temin etmektedir. Yeraltı suları yüzey sularına göre daha radyoaktiftir. Bu durum, yeraltı sularının yeraltında bulunan radyoaktif kütlelerle ya da minerallerle temas etmesinden kaynaklanmaktadır. Radyoaktivite konsantrasyonları, ortamın jeolojik ve kimyasal oluşumuna bağlı olarak, çok geniş bir aralıkta farklılıklar göstermektedir. Volkanik kütlelerle temas eden sulara radyoaktivite konsantrasyonu, tortul kütlelerle temas eden sulara göre daha yüksektir (Değerlier 2007). Granit bakımından zengin olan bölgelerin yeraltı sularında radon gazının ve uranyum ile toryum serisi ürünlerinin yüksek miktarlarda bulunduğu saptanmıştır (Dillon ve ark. 1991, Zelensky ve ark. 1993, Otwoma ve Mustapha 1998). Ayrıca, sismik faaliyet başlamadan önce yer kabuğundaki gerilmeler nedeniyle oluşacak genişlemeler, kayalardan yeraltı su sistemine radon geçişinin artmasına, dolayısıyla çevredeki kuyu ve kaynak sularındaki radon yoğunluğunda bir artış gözlenmesine neden olmaktadır (Akyıldırım 2005).

Dünyanın muhtelif bölgelerinde sulardaki radyoaktif kirliliğin başlıca nedeni olarak bilinen radon konsantrasyonunun belirlenmesine yönelik olarak yapılan çok sayıda çalışma mevcuttur. Son yıllarda su için yapılan bu çalışmalardan bazıları aşağıda verilmiştir.

Amerika'da Gosink ve arkadaşlarının içme ve kullanım suyunun karşılandığı birçok sondaj kuyusunda yapmış olduğu çalışmalarda ^{222}Rn konsantrasyonları ortalama olarak 39.96 Bq/L ölçülmüştür (Gosink ve ark. 1990).

Brezilya'da Lima ve Bonotto 1996 yılında yeraltı sularında radon konsantrasyonunu ölçmüş ve 25.47 Bq/L ile 784.11 Bq/L arasında değişen konsantrasyon değerleri elde etmişlerdir (Lima ve Bonotto 1996).

İngiltere’de Al-Masri ve Blackburn, akarsulardan alınan su örneklerinde radon ölçümleri yapmış ve bu ölçümlerin sonuçlarının 0.080 Bq/L ile 1.171 Bq/L aralığında değişen değerler olduğunu tespit etmişlerdir (Al-Masri ve Blackburn 1999).

Suudi Arabistan’da şebeke sularında yapılan radon ölçümleri 0.15 Bq/L ile 5.71 Bq/L arasında değişim gösterirken, yeraltı sularında bu değerler 0.89 Bq/L ile 35.44 Bq/L arasında gözlemlenmiştir (Alabdualaly 1999).

Venezuela’da Horvath ve arkadaşlarının kaynak sularında yaptıkları çalışmada 0.1 Bq/L ile 576 Bq/L, musluk sularında yaptıkları çalışmada ise 0 Bq/L ile 2 Bq/L arasında değişen radon konsantrasyonu değerleri elde edilmiştir (Horvath ve ark. 2000).

Polonya’da Kochowska ve arkadaşları 45 farklı kuyudan aldıkları su örneklerini incelemiş ve konsantrasyon değerlerinin hepsinin 12 Bq/L’nin altında olduğunu tespit etmişlerdir (Kochowska ve ark. 2004).

Marques ve arkadaşları Brezilya’da yeraltı suları, deniz suyu, musluk suları ve akarsularda radon konsantrasyonu ölçümleri yapmışlardır. Yeraltı sularında 0.95 Bq/L ile 36 Bq/L, deniz suyunda 0.3 Bq/L ile 0.54 Bq/L, musluk sularında 0.39 Bq/L ile 0.47 Bq/L ve akarsularda 0.43Bq/L ile 2.40 Bq/L değerleri arasında sonuçlar elde etmişlerdir (Marques ve ark. 2004).

İspanya’da Rodenas ve arkadaşları tarafından 82 farklı spa merkezinde kullanılan kaynak sularında radon konsantrasyonu ölçülmüş ve 4 Bq/L’nin altındaki değerlerden 1868 Bq/L’ye varan değişimler gözlenmiştir (Rodenas ve ark. 2007).

Romanya’da Comsa ve arkadaşları yüzey suları, kuyu suları ve kaynak sularında radon konsantrasyonu ölçümleri yapmışlardır. Yüzey sularında 0.5 kBq/m³ ile 10 kBq/m³, kuyu sularında 0.6 kBq/m³ ile 112.6 kBq/m³ ve kaynak sularında 2 kBq/m³ ile 129.3 kBq/m³ değerleri arasında sonuçlar elde etmişlerdir (Comsa ve ark. 2008).

Ülkemizde de bu konuda yapılmış çalışmalar mevcuttur.

İstanbul'da Karahan ve arkadaşlarının içme suları ve yüzey suları için yaptıkları çalışmada radon konsantrasyon değerleri $0.019 \text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1}$ ile $0.048 \text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1}$ arasında değişim göstermiştir (Karahan ve ark. 2000).

Çevik ve arkadaşları Doğu Karadeniz Bölgesi'nin 11 farklı yerleşim yerinden alınan su örneklerinin ^{222}Rn aktiflik konsantrasyonlarını tespit etmiş ve ortalama aktiflik konsantrasyonunu 10.82 Bq/L olarak bulmuşlardır (Çevik ve ark. 2006).

Denizli'de Erees ve arkadaşlarının depremler ile fay hattı üzerindeki termal suların radon konsantrasyonundaki değişimler arasında bağlantı kurmak amacıyla yaptıkları çalışmada konsantrasyon değerlerinin $0.67 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$ ile $25.90 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$ arasında değiştiği tespit edilmiştir (Erees ve ark. 2006).

Yarar ve arkadaşları İzmir-Dikili civarında jeotermal bir bölgeye ait su örneklerinde radon konsantrasyonu ölçümü yapmış, $29 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ile $3075 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ değerleri arasında sonuçlar elde etmişlerdir (Yarar ve ark. 2006).

Yalım ve arkadaşları 2007 yılında yaptıkları bir çalışmada Afyonkarahisar ili ve çevresindeki fay hattı boyunca bazı kuyu sularındaki radon konsantrasyonunu ölçmüşler ve değerlerin 0.7 Bq/L ile 31.7 Bq/L arasında değiştiğini gözlemlemişlerdir (Yalım ve ark. 2007).

Yukarıda verilen literatür bilgisinde olduğu gibi sulardaki radyoaktif kirliliğin başlıca sebebi olan radon konsantrasyonunun tespiti, düzenli aralıklarla takip edilmesi ve elde edilen sonuçların ilgili kurum ve kuruluşlarla paylaşılması büyük önem arz etmektedir. Bu gerekliliğin bir sonucu olarak, Alp-Himalaya kuşağında yer alan Türkiye'de, tektonik açıdan aktif olup, Kuzey Anadolu Fay Hattı ve Eskişehir Fay Hattı etkisinde bulunan Bursa'nın, Neojen teşekkülattan olan Çekirge bölgesine ait 12 farklı noktadan alınan termal su örneklerinde radon konsantrasyonu ölçülmüştür.

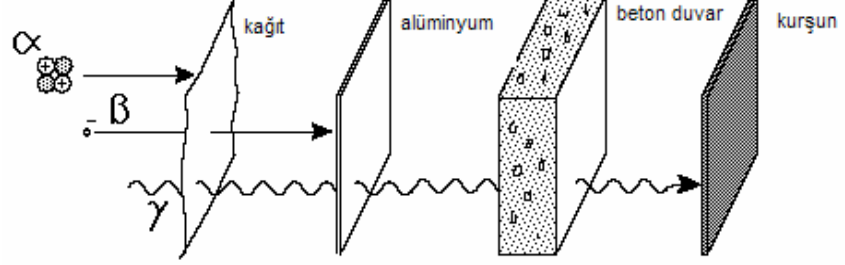
2. KURAMSAL BİLGİLER

2.1. Radyoaktivite

Radyoaktivite, 24 Şubat 1896'da Antoine Henri Becquerel tarafından keşfedilmiştir. Becquerel belirli floresans tuzlarının güneş ışınlarıyla aktifledikten sonra yayınladıkları radyasyonlar üzerinde çalışırken tesadüfen siyah bir kağıda sarılmış uranyum ve potasyum sülfattan ibaret numuneyi karanlık bir odada fotoğraf levhalarının yanında bırakmıştır (Enge 1966). Bu fotoğraf levhalarının banyo edildiklerinde ışığa karşı tamamen korunmuş oldukları halde ışıkta kalmış gibi sonuç verdiklerini görmüştür. Bu deneyi tekrarlayan Becquerel fotoğraf levhalarının etkilenmesinin floresans veya X-ışınları ile ilgisi olmadığını, sadece uranyum elementinin bir özelliği olduğunu göstermiştir. Fotoğraf levhalarını etkileyen bazı tür radyasyonların uranyum tuzundan yayımlandıkları neticesine varmıştır.

Becquerel'in keşfinden sonra radyasyonun özelliklerinin çalışılmasına yönelik büyük çabalar sarfedilmiştir. İlk araştırmaların birçoğu Curie'ler, William Crokes, Ernest Rutherford ve Rutherford'un Cambridge'teki arkadaşları tarafından yürütülmüştür. Doğal radyoaktif maddelerin radyasyonları, girme güçlerine bağlı olarak üç ayrı grupta sınıflandırılmışlardır. Birinci grup, girici güçleri çok zayıf olanları ihtiva etmektedir. Bunlar herhangi bir kağıt parçası tarafından bile durdurulabilmekte, fakat havada yoğun iyonlaşmalara sebep olmaktadır. Bu radyasyonlar alfa parçacıkları (α -parçacıkları) olarak adlandırılır. İkinci grubu teşkil edenlerin iyonlaştırma güçleri daha azdır ancak α -parçacıklarından daha büyük girici-güce sahiptirler ve birkaç mm kalınlığındaki metal levhalardan kolayca geçebilmektedirler. Bunlara da beta parçacıkları (β -parçacıkları) adı verilir. Üçüncü gruptakiler de az iyonlaşmaya sebep olurlar fakat farklı maddelerin santimetrelerce kalınlığından geçebilmektedirler. Bunlar da gama ışınları (γ -ışınları) adını alır. Gama ışınları çok yüksek enerjili, elektromanyetik dalgalardır ve ışık hızıyla hareket ederler. Alfa ve beta

parçacıklarından daha fazla giricidirler (Arya 1989). Bu radyasyonların giricilikleri Şekil 2.1’de şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.1 Alfa (α), beta (β) ve gama (γ) giricilikleri (Davutoğlu 2008).

Radyoaktivite, bir çekirdeğin bir ışın ya da parçacık yayınlarken başka bir çekirdeğe dönüşmesi olayıdır ve radyoaktif ışın yayan maddelere de radyoaktif maddeler denir.

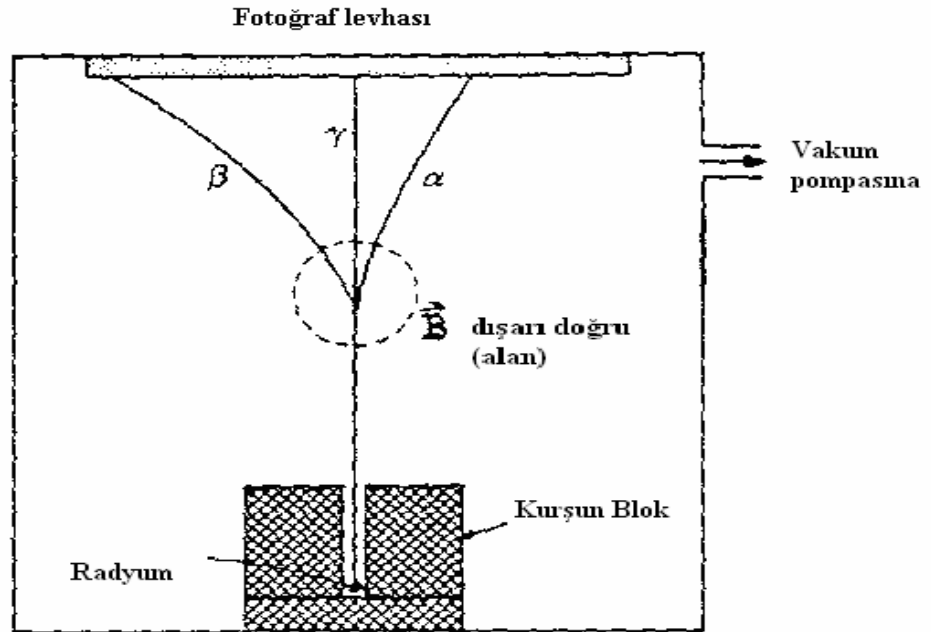
Dışarıdan herhangi bir etki olmadan bozulan elementlere doğal radyoaktif elementler; bu olaya da doğal radyoaktivite denir. Yani bozunuma uğrayan radyoizotop doğada mevcuttur veya doğada bulunan diğer radyoizotopların bozunması sonucu ortaya çıkar (Akyıldırım 2005).

1898 yılında Marie Curie ve eşi Pierre Curie, uranyumun radyoaktif bozunmasından ortaya çıkan polonyum (Po) ve radyum (Ra) radyoaktif elementlerini keşfetmişlerdir (Arya 1989). Pierre ve Marie Curie, Becquerel ile birlikte radyum elementinin doğal radyoaktifliği üzerine yaptıkları çalışma ile 1903 yılında Nobel Fizik Ödülü kazanmışlardır.

Doğal radyoaktifliğin yanı sıra laboratuarlarda nükleer reaksiyonlarla radyoaktif çekirdekler üretilmektedir. Bu olaya da yapay radyoaktivite denir. Bu ilk kez alüminyumun, 1934’te Irene Curie ve Pierre Joliot tarafından polonyumun doğal radyoaktif bozunmasından çıkan α -parçacıkları ile bombardıman edilmesi sonucunda ^{30}P izotopunun elde edilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Bu izotop 2.5 dakika yarı ömürle pozitron yayınlarken bozunur (Krane 2001).

Yapay radyoaktivitenin bulunuşundan ve fisyon olayının keşfinden sonra pek çok yapay radyoaktif madde üretilmiştir. Radyoaktif olarak bilinen atomların çekirdeği kararsız olduklarından radyoaktivite özelliğine sahiptirler. Kararsız çekirdekler parçalanır ve parçalanma sonucu yeni bir çekirdek meydana gelir. Atom çekirdeklerindeki bu değişiklikler sonucu radyasyon yayınlanır. Atomun uğradığı bu değişikliğe bozunma olayı adı verilir.

Tabiatta rastlanan radyoaktif elementler α , β ve γ yayınlayarak bozunuma uğrarlar. Bu parçacıklardan alfalar pozitif yüklü, betalar negatif yüklü ve gamalar yüksüzdür. Parçacıkların bu yüklerinin tespitini yapabilmek için kullanılan deney düzeneği Şekil 2.2’de görülmektedir. Bir manyetik alan tarafından α ve β -parçacıkları ile γ -ışınlarının saptırılmalarını gösteren denel düzenekte α -parçacıkları pozitif yüklü olduklarından sağa, β -parçacıkları negatif yüklü olduklarından sola saparlar. β -parçacıklarının α -parçacıklarına oranla kütlelerinin çok az, hızlarının çok yüksek oluşundan sapmaları α -parçacıklarından fazladır. γ -ışınları yüksüz olduklarından manyetik alan tarafından saptırılmazlar (Arya 1989).



Şekil 2.2 Bir manyetik alan tarafından α ve β -parçacıkları ile γ -ışınlarının saptırılmalarını gösteren denel düzenek (Arya 1989).

2.1.1. Radyoaktivite birimleri

Verilen bir numunede mevcut radyoaktif atomların mutlak sayısını bilmekten ziyade saniyede parçalanmış atom sayısını bilmek daha önemlidir. Bu nedenle radyoaktivite birimi genelde birim zamandaki parçalanma sayısı olarak tanımlanır.

Curie (Ci) : Bir saniyede $3.7 \cdot 10^{10}$ parçalanma veya bozunma gerçekleştiren radyoaktif çekirdeğin aktivitesi olarak tanımlanır.

Becquerel (Bq) : Bir saniyede bir parçalanma gerçekleştiren radyoaktif çekirdeğin aktivitesi olarak tanımlanır.

Rutherford (Rd) : Bir saniyede 10^6 bozunma gerçekleştiren radyoaktif çekirdeğin aktivitesi olarak tanımlanır (Arya 1989).

$$1\text{Bq} = 2.703 \cdot 10^{-11} \text{Ci} = 1 \text{ parçalanma / saniye}$$

$$1\text{Ci} = 3.7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \cdot 10^{10} \text{ parçalanma/saniye}$$

$$1\text{Rd} = 10^6 \text{ parçalanma/ saniye}$$

2.1.2. Radyoaktif bozunma ve bozunum türleri

Radyoaktif bozunma, kararsız atomların fazla enerjilerini vererek daha kararlı bir atom haline dönüşmek için kendilerini yeniden düzenlemelerine denir (TAEK). Kararsız atom bozunurken belirli birkaç yol takip eder, bazen kararsız atomların bozunması iki veya daha fazla yolla gerçekleşebilir. Bilinen radyoaktif bozunma şekilleri şunlardır:

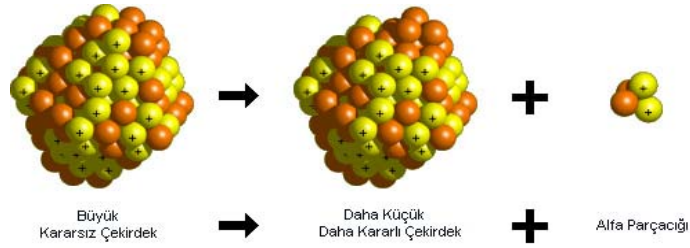
a) Alfa bozunumu (α bozunumu)

b) Negatron bozunumu (β^- bozunumu)

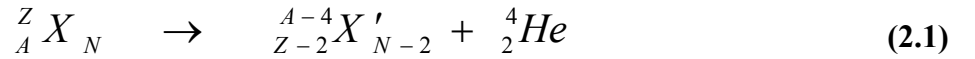
- c) Pozitron bozunumu (β^+ bozunumu)
- d) Elektron yakalama olayı
- e) İç dönüşüm (IC)
- f) Gama ışını yayınlanması (γ -yayma)
- g) İzomerik geçiş
- h) Nötron yayınlanması (n-yayma)

2.1.2.1. Alfa bozunumu (α bozunumu)

Çekirdeğin kararsızlığı hem proton hem de nötron fazlalığından ileri geliyorsa, çekirdek iki proton ve iki nötrondan oluşan bir alfa parçacığı yayınlamaya bozunur. (2.1) denkleminde verilen α bozunumu sürecinde bozunan çekirdeğin atom numarası 2, kütle numarası ise 4 azalır. Alfa parçacığı aslında helyum atomunun iki kere iyonlaşmış halidir. Alfa bozunumunun şematik gösterimi Şekil 2.3'te verilmiştir.



Şekil 2.3 α (alfa) bozunumu (Davutoğlu 2008).



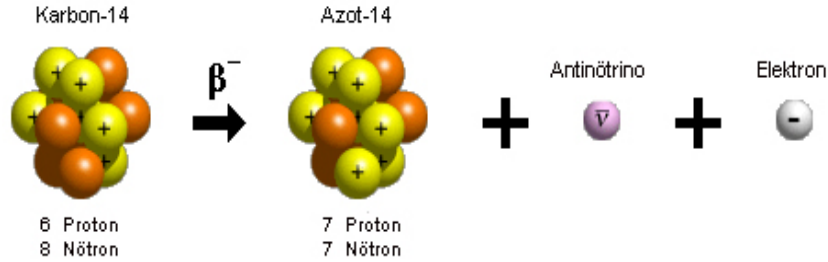
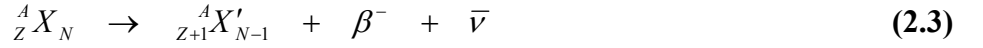
Bozunum nedeniyle ortaya çıkan enerjinin büyük bir kısmını, momentumun korunumu gereğince alfa parçacığı alır. Alfa bozunumu genellikle kütle numarası 190'dan büyük çekirdeklerde daha sık görülür.

2.1.2.2. Negatron bozunumu (β^- bozunumu)

Eğer bir radyonüklidin kararsızlığı çekirdekteki nötron fazlalığından meydana geliyorsa, çekirdeğindeki enerji fazlalığını gidermek için (2.2) denkleminde görüldüğü gibi nötronlardan birini protona dönüştürür ve elektronlarla aynı olan negatif beta parçacığı ile antinötrino ($\bar{\nu}$) adı verilen başka bir parçacık yayınlanır. Proton çekirdekte kalırken, elektron hızla atom çekirdeğinden fırlatılır.



Bu yüksek hızlı elektrona (negatif beta parçacığı) negatron adı verilir. Bu şekilde beta emisyonu yapan radyonüklidin (2.3) denkleminde görüldüğü gibi atom numarası da bir artarak kendinden bir sonraki elementin izobar atomuna dönüşür. Bu bozunuma da kütle sayısı değişmediği için izobarik bozunma adı verilmiştir. β^- bozunumunun şematik gösterimi Şekil 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2.4 β^- (negatron) bozunumu (Davutoğlu 2008).

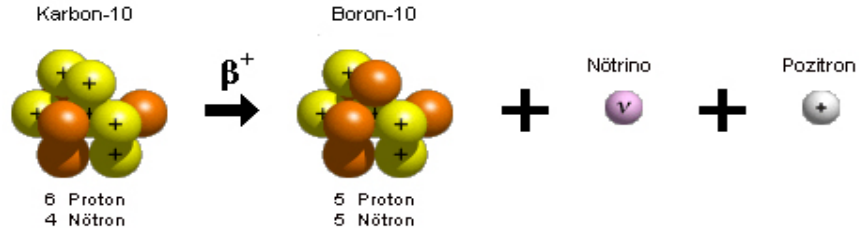
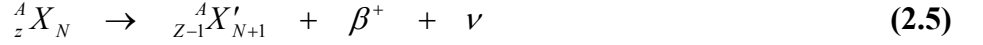
2.1.2.3. Pozitron bozunumu (β^+ bozunumu)

Atomun kararsızlığı nötron azlığından veya proton fazlalığından ileri geliyorsa denklem (2.4)'te görüldüğü gibi protonlardan biri nötrona dönüşür ve pozitif yüklü

elektron (pozitron) ile küçük nötron anlamına gelen nötrino olarak adlandırılmış bir parçacık yayınlanır.



Nötron çekirdekte kalır, pozitron dışarı fırlatılır. Böylece pozitron yayınlayan radyonüklidin kütle numarası değişmezken proton sayısı (atom numarası) bir eksilerek kendinden bir önceki elementin izobar atomuna dönüşür. Bu bozunma (2.5) denklemi ile temsil edilir ve bozunumun şematik gösterimi Şekil 2.5'te verilmiştir.

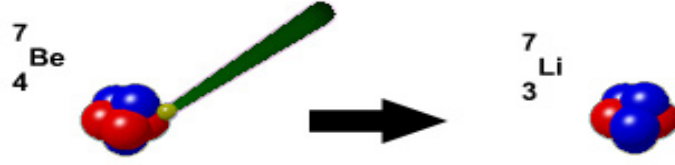


Şekil 2.5 β^+ (pozitron) bozunumu (Davutoğlu 2008).

2.1.2.4. Elektron yakalama olayı

Çekirdek proton fazlalığından dolayı kararsız ise atomun çekirdeğe yakın (K, L) yörüngelerinden elektron yakalanır. Elektron çekirdekteki bir protonla birleşerek nötrona dönüşür ve nötrino yayınlanır (Denklem (2.6)). Şematik gösterimi Şekil 2.6'da verilen bu bozunumda çekirdekten parçacık salınımı olmaz fakat proton sayısı bir eksilir. Kütle numarası ise denklem (2.7)'de görüldüğü gibi aynı kalır. Bu olayda boşalan elektron yörüngesine üst yörüngelerdeki başka bir elektron geçerek boşalan yörüngeyi doldurur (Davutoğlu 2008).





Şekil 2.6 Elektron yakalama olayı (Davutoğlu 2008).

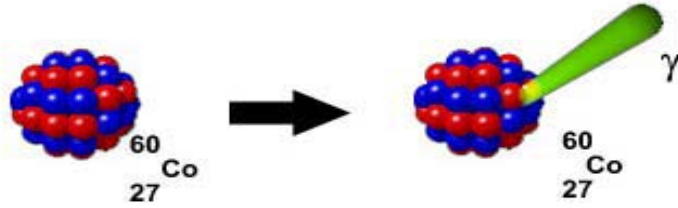
2.1.2.5. İç dönüşüm (IC)

Çekirdek, fazla enerjisini doğrudan yörüngedeki bir elektrona iletir ve bu elektronu yörüngeden fırlatır. Bu olayda elektron tarafından taşınan enerji, çekirdek tarafından salınan enerjiden daha küçüktür, çünkü enerjinin bir kısmı elektronu bulunduğu yörüngeden koparabilmek için harcanmıştır. Bu sebeple, elektron tarafından taşınan enerji, çekirdek tarafından salınan enerjiden, elektronun bağlanma enerjisinin çıkarılmasına eşittir. İç dönüşüm olayı genellikle K yörüngesi elektronları ile olursa da bazen diğer yörünge elektronları da bu olaya karışabilir. Bu olayda foton yoktur yani çekirdeğin enerjisi doğrudan atomun elektronlarına iletilir. Bu iletişim doğrudan sağlanır ve elektron yörüngeden fırlatılır. Dönüşüm sonunda yörüngede bir elektron boşluğu olur, bu boşluğu diğer yörüngelerden bir elektron gelerek doldurur ve bir X-ışını yayınlanır. Bu X-ışını, belirli atom ve yapıya bağlı olarak o elemente ait karakteristik ışındır. Yayınlanan karakteristik X-ışınları elektron yakalanmasında birinci ürünün karakteristiğidir. İç dönüşümde nükleer yükte bir değişim yoktur ve yayınlanan karakteristik radyasyon orijinal atoma aittir. İç dönüşümde yayınlanan elektron belli bir elementten aynı enerji ile salınır ve buna beta ışını çizgi spektrumu denir.

Belli bir β^- yayınlayan radyoaktif madde incelendiğinde, β^- parçacıklarının devamlı bir spektrumu olduğu ve bu belli spektrum üzerinde bir çizgi spektrumu varsa bunun da bir iç dönüşüm nedeniyle meydana gelen beta ışını çizgi spektrumu olduğu söylenir.

2.1.2.6. Gama ışını yayınlanması (γ -yayma)

Çekirdekteki enerji fazlalığı nedeniyle veya çekirdek bozunma olayı ile radyasyon yayınladıktan sonra hemen kararlı (temel enerji seviyesi) duruma geçemez, bozunmada oluşan çekirdek hala yarı kararlı durumdadır. Bu fazla kalan uyarılma enerjisini hemen elektromanyetik özellikte olan bir gama radyasyonu şeklinde yayınlar. Bu şekilde bozunan yarı kararlı çekirdeğin atom ve kütle numaralarında bir değişim olmaz, bu nedenle izomerik bozunma adı verilmiştir. Şekil 2.7’de gama ışını yayınlanmasının şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.7 Gama ışını yayınlanması (Davutoğlu 2008).

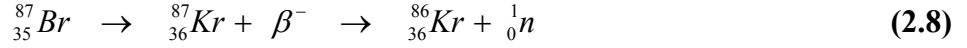
Gama yayınlanmasının yarı ömrü diğer bozunumlarla kıyaslandığında çok kısadır, genellikle 10^{-9} saniyeden daha küçüktür ama saat ve gün mertebesinde yarı ömürlü gama yayınlanması da vardır. γ -ışınlarının enerjileri 0,1 MeV ile 3 MeV arasında değişir (Davutoğlu 2008).

2.1.2.7. İzomerik geçiş

Bazı radyoaktif atomlar bozunmalardan sonra, uyarılmış durumda (yarı kararlı durum) kalırlar ve kararlı duruma geçmek için γ ışını yayarlar. Bu olaya izomerik geçiş adı verilir ve izomerik geçişe uğrayan bir atomun A (kütle numarası) ve Z (atom numarası)’si değişmez. İzomerik geçişlerde, uyarılmış atomun enerjisinin gama ışını halinde yayınlanması oldukça uzun bir zaman alır. Bu nedenle uyarılmış atom genellikle başka bir radyoaktif element olarak kabul edilir ve o şekilde muamele görür (Özdemir 2006).

2.1.2.8. Nötron yayınlanması (n-yayma)

Radyoaktif atomların bozunma olaylarında, sadece birkaç tanesi nötron yayınlar. En iyi bilinen örnek $^{87}_{35}\text{Br}$ izotopudur. Bu örnek bozunma (2.8) denklemi ile ifade edilmiştir (Özdemir 2006).



2.1.3. Radyoaktif seriler

Doğada 3'ü doğal ve 1'i yapay olmak üzere dört radyoaktif seri vardır. Z=81 ile Z=92 arasında olan radyoaktif izotoplar A kütle numaralarına bağlı olarak bu dört radyoaktif seriden birine dahildirler (Arya 1989).

2.1.3.1. Doğal seriler

Uranyum, toryum ve aktinyum serileri doğal radyoaktif serilerdir. Bu serilerin hepsi Pb'nin bir izotopu ile son bulurlar. Uzun ömürlü bir element ile başlarlar. Radon gazının bir izotopunu içerirler ve her üç serinin bazı elemanları hem α hem β^- çıkararak bozunurlar.

Uranyum serisi $^{238}_{92}\text{U}$ ile başlar. Alfa ve beta parçacıkları yayınlayarak RaG denilen ve kurşunun bir izotopu olan $^{206}_{82}\text{Pb}$ kararlı atomuna dönüşür. Bu serinin kütle numaraları $(4n+2)$ şeklindedir (n bir tamsayıdır) (Davutoğlu 2008). Çizelge 2.1'de uranyum serisi ürünleri ve yarı ömürleri verilmiştir.

Çizelge 2.1 Uranyum serisi ürünleri ve yarı ömürleri (Arya 1989).

Çekirdek	Yarı Ömür	Yayınladığı Parçacık Türü	Bozunum Ürünleri
^{238}U	$4.5 \cdot 10^9$ yıl	α	^{234}Th
^{234}Th	24.1 gün	β^-	^{234}Pa
^{234}Pa	6.7 saat	β^-	^{234}U
^{234}U	$2.67 \cdot 10^5$ yıl	α	^{230}Th
^{230}Th	$8 \cdot 10^4$ yıl	α	^{226}Ra
^{226}Ra	1620 yıl	α	^{222}Rn
^{222}Rn	3.82 gün	α	^{218}Po
^{218}Po	3.05 dakika	α β^-	^{214}Pb ^{218}At
^{218}At	1.5-2.0 saniye	α β^-	^{214}Bi ^{218}Rn
^{218}Rn	0.019 saniye	α	^{214}Po
^{214}Pb	26.8 dakika	β^-	^{214}Bi
^{214}Bi	19.7 dakika	β^- α	^{214}Po ^{210}Tl
^{214}Po	$15 \cdot 10^{-4}$ saniye	α	^{210}Pb
^{210}Tl	1.32 dakika	β^-	^{210}Pb
^{210}Pb	22 yıl	β^-	^{210}Bi
^{210}Bi	5 gün	β^- α	^{210}Po ^{206}Tl
^{210}Po	138.40 gün	α	^{206}Pb
^{206}Tl	4.2 dakika	β^-	^{206}Pb
^{206}Pb	kararlı	–	–

Toryum serisi $^{232}_{90}\text{Th}$ ile başlar. Çizelge 2.2'den de görüldüğü gibi alfa ve beta parçacıkları yayınlarak ThD denilen ve kurşunun bir izotopu olan $^{208}_{82}\text{Pb}$ 'a dönüşür. Bu serinin kütle numaraları (4n) şeklindedir.

Çizelge 2.2 Toryum serisi ürünleri ve yarı ömürleri (Arya 1989).

Çekirdek	Yarı Ömür	Yayınladığı Parçacık Türü	Bozunum Ürünleri
^{232}Th	$1.39 \cdot 10^{10}$ yıl	α	^{228}Ra
^{228}Ra	6.7 yıl	β^-	^{228}Ac
^{228}Ac	6.13 saat	β^-	^{228}Th
^{228}Th	1.910 yıl	α	^{224}Ra
^{224}Ra	3.64 gün	α	^{220}Rn
^{220}Rn	5.15 saniye	α	^{216}Po
^{216}Po	0.16 saniye	α	^{212}Pb
^{212}Pb	10.6 saat	β^-	^{212}Bi
^{212}Bi	60.5 dakika	β^- α	^{212}Po ^{208}Tl
^{212}Po	$3.0 \cdot 10^{-7}$ saniye	α	^{208}Pb
^{208}Tl	3.10 dakika	β^-	^{208}Pb
^{208}Pb	kararlı	–	–

Aktinyum serisi $^{235}_{92}\text{U}$ ile başlar. Alfa ve beta parçacıkları yayınlayarak AcD denilen ve kurşunun bir izotopu olan $^{207}_{82}\text{Pb}$ 'a dönüşür. Bu serinin kütle numaraları $(4n+3)$ şeklindedir. Aktinyum radyoaktif serisi ürünleri, bu ürünlerin yarı ömürleri ve yayınladıkları parçacık türleri Çizelge 2.3'te verilmiştir.

Çizelge 2.3 Aktinyum serisi ürünleri ve yarı ömürleri (Arya 1989).

Çekirdek	Yarı Ömür	Yayınladığı Parçacık Türü	Bozunum Ürünleri
^{235}U	$7.15 \cdot 10^8$ yıl	α	^{231}Th
^{231}Th	25.64 saat	β^-	^{231}Pa
^{231}Pa	$3.43 \cdot 10^4$ yıl	α	^{227}Ac
^{227}Ac	21.8 yıl	β^- α	^{227}Th ^{223}Fr
^{227}Th	18.4 gün	α	^{223}Ra
^{223}Fr	21 dakika	β^- α	^{223}Ra ^{219}At
^{223}Ra	11.68 gün	α	^{219}Rn
^{219}At	0.9 dakika	α β^-	^{215}Bi ^{219}Rn
^{219}Rn	3.92 saniye	α	^{215}Po
^{215}Bi	8 dakika	β^-	^{215}At
^{215}Po	$1.83 \cdot 10^{-2}$ saniye	α β^-	^{211}Pb ^{215}At
^{215}At	10^{-4} saniye	α	^{211}Bi
^{211}Pb	36.1 dakika	β^-	^{211}Bi
^{211}Bi	2.16 dakika	α β^-	^{207}Tl ^{211}Po
^{211}Po	0.52 saniye	α	^{207}Pb
^{207}Tl	4.78 dakika	β^-	^{207}Pb
^{207}Pb	kararlı	–	–

2.1.3.2. Yapay Seriler

Neptinyum serisi yapay bir seridir. Doğal serilerde olduğu gibi neptinyum serisinin bir asal gazı yoktur. Kütle numaraları $(4n+1)$ şeklindedir. Çizelge 2.4'ten de görülebileceği gibi bu seri $^{237}_{93}\text{Np}$ ile başlar ve serinin kararlı olan son elementi

$^{209}_{83}\text{Bi}$ 'dur.

Çizelge 2.4 Neptinyum serisi ürünleri ve yarı ömürleri (Arya 1989).

Çekirdek	Yarı Ömür	Yayınladığı Parçacık Türü	Bozunum Ürünleri
^{237}Np	$2.2 \cdot 10^6$ yıl	α	^{233}Pa
^{233}Pa	27.4 gün	β^-	^{233}U
^{233}U	$1.62 \cdot 10^5$ yıl	α	^{229}Th
^{229}Th	7340 yıl	α	^{225}Ra
^{225}Ra	14.8 gün	β^-	^{225}Ac
^{225}Ac	10 gün	α	^{221}Fr
^{221}Fr	4.8 ay	α	^{217}At
^{217}At	0.0185 saniye	α	^{213}Bi
^{213}Bi	47 ay	α	^{209}Tl
^{209}Tl	2.2 dakika	β^-	^{209}Pb
^{209}Pb	3.3 saat	β^-	^{209}Bi
^{209}Bi	$1.9 \cdot 10^{19}$ yıl	α	^{205}Tl
^{205}Tl	kararlı	–	–

Doğada varolan bu dört radyoaktif serinin ilk ve son çekirdekleri ile en kısa ve en uzun yarı ömürlü üyeleri Çizelge 2.5’te toplu şekilde gösterilmiştir.

Çizelge 2.5 Radyoaktif serilerin en kısa ve en uzun yarı ömürlü üyeleri.

Seri Adı	İlk Çekirdek	Son Çekirdek (Kararlı)	En kısa yarı ömürlü üye	En uzun yarı ömürlü üye
Uranyum Serisi	$^{238}_{92}\text{U}$	$^{206}_{82}\text{Pb}$	$15 \cdot 10^{-4}$ saniye	$4.5 \cdot 10^9$ yıl
Toryum Serisi	$^{232}_{90}\text{Th}$	$^{208}_{82}\text{Pb}$	$3.0 \cdot 10^{-7}$ saniye	$1.9 \cdot 10^{10}$ yıl
Aktinyum Serisi	$^{235}_{92}\text{U}$	$^{207}_{82}\text{Pb}$	10^{-4} dakika	$7.15 \cdot 10^8$ yıl
Neptinyum Serisi	$^{241}_{94}\text{Pu}$	$^{209}_{83}\text{Bi}$	0.0185saniye	$2.2 \cdot 10^6$ yıl

2.2. Radyasyon

Enerjinin dalga veya tanecik halindeki durumu veya bu şekilde yayılan enerji türüne *radyasyon* denir. Elektromanyetik radyasyonlar artan frekans sırasına göre; radyo dalgaları, mikrodalgalar, kızılötesi ışınlar, görünür ışık, morötesi ışınlar, X-ışınları, gama ışınları ve kozmik ışınlardır. Kaynakları farklı olan bu ışınların ortak yönü; maddeye ve insan vücuduna nüfuz edebilmeleridir. Farklı radyasyonların giricilikleri de farklıdır. Düşük enerjili ışınlar mesela görünür ışık girici değildir. Fakat X-ışınları ve gama ışınları, özelliklerinin görünür ışıkla tamamen aynı olmasına rağmen, giricilik yönüyle ondan ayrılırlar; çünkü enerjileri yüksek, dalga boyları kısadır.

Bahsi geçen bu radyasyonların küçük frekanslıları daha çok dalga karakteri taşırlar. Morötesi veya daha yüksek frekanslı radyasyonların tanecik olarak izahları daha faydalı olmaktadır. Tanecik karakterli radyasyonun en yaygın şekilleri radyoaktif bozunmada meydana gelen alfa ve beta radyasyonlarıdır (Özdemir 2006).

Radyasyon, madde üzerinde meydana getirdiği etki bakımından iki grupta incelenebilir (Davutoğlu 2008):

1. İyonlaştırıcı radyasyon
 - a) X-ışınları, gama ışınları
 - b) Alfa parçacıkları
 - c) Beta parçacıkları
 - d) Kozmik ışınlar
 - e) Nötronlar
2. İyonlaştırıcı olmayan radyasyon
 - a) Ultraviyole ışınlar
 - b) Kızılötesi ışınlar
 - c) Radyo dalgaları
 - d) Kozmik ışınlar
 - e) Baz istasyonları

- f) Cep telefonları
- g) Mikrodalga fırınlar
- h) Radarlar
- i) Yüksek gerilim hatları

2.2.1. İyonlaştırıcı radyasyon

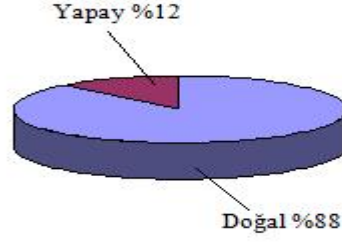
Atomla etkileşime girebilecek kadar güçlü enerji seviyesine sahip, alfa ve beta parçacığı gibi hareket eden yüklü parçacıkların meydana getirdikleri etki iyonlaştırma (iyonizasyon) olarak adlandırılmaktadır. Yüksek enerjili parçacıkların, atom yakınından geçerken oluşturdukları elektron yörüngesindeki değişimler ya da elektronun yörüngesinden çıkması iyonlaştırıcı radyasyonun etkileridir.

2.2.2. İyonlaştırıcı olmayan radyasyon

Atomla etkileşime girebilecek kadar güçlü olmayan enerji seviyelerindeki elektromanyetik dalgaların atomların yörüngesinde sebep olduğu değişim organizma üzerinde büyük bir hasara neden olmaz. Bunlar iyonlaştırıcı olmayan radyasyon olarak adlandırılır. Bu tür radyasyona mikrodalga, görünür ışık, radyo ve televizyon dalgaları örnek olarak verilebilir (Değerlier 2007).

2.2.3. Radyasyon kaynakları

Çevremizdeki başlıca radyasyon kaynakları doğal ve yapay olmak üzere ikiye ayrılır. Dünya genelinde bu radyasyon kaynaklarından dolayı maruz kalınan radyasyon dozlarının oransal değerleri Şekil 2.8’de gösterilmiştir.



Şekil 2.8 Dünya genelinde doğal ve yapay radyasyon kaynaklarından maruz kalınan radyasyon dozlarının oransal değerleri (IAEA 1996).

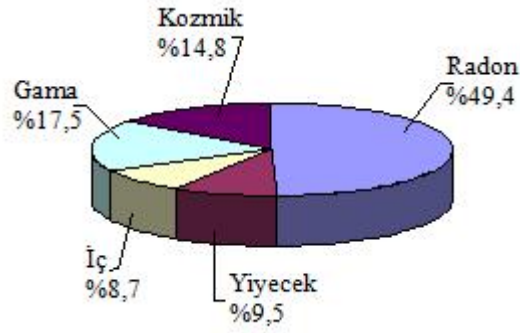
2.2.3.1. Doğal radyasyon kaynakları

Bütün canlılar radyasyonla birlikte yaşamakta, hayatın bir parçası olarak dış uzay ve güneşten gelen kozmik ışınlar ile yer kabuğunda bulunan radyoizotoplar dolayısıyla toprak ve yapı malzemeleri, su ve gıdalar gibi doğal kaynaklardan ışınlanmaktadır. İnsanlar yaşam standartlarına, yaşadıkları ortamın fiziksel özelliklerine ve coğrafi şartlara bağlı olarak ortalama toplam 2.4 mSv yıllık doğal radyasyon dozuna maruz kalmaktadırlar.

Doğal kaynaklardan alınan radyasyon dozunun en önemli bileşeni, radon gazı ve onun kısa yarı ömürlü bozunma ürünleridir. Radon gazından dolayı maruz kalınan doz %50 gibi bir paya sahip olup, yaklaşık yıllık doz 1.3 mSv'dir. Doğal radyasyon kaynaklarının başlıcaları şunlardır (UNSCEAR 1993):

- a) Kozmik radyasyon
- b) Gama radyasyonu
- c) Vücut içi ışınlanma
- d) Radon
- e) Yiyecekler

Dünya genelinde bu doğal radyasyon kaynakları nedeniyle maruz kalınan radyasyon dozlarının oransal değerleri Şekil 2.9'da verilmiştir.

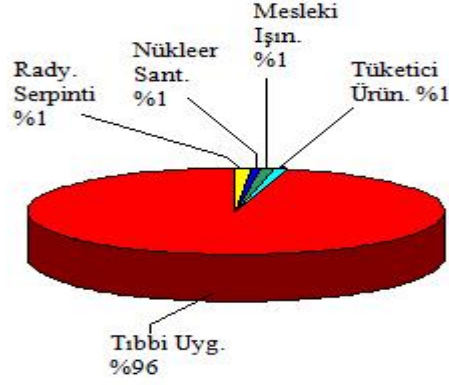


Şekil 2.9 Dünya genelinde doğal radyasyon kaynaklarından maruz kalınan radyasyon dozlarının oransal değerleri (IAEA 1996).

2.2.3.2. Yapay radyasyon kaynakları

Gelişmiş endüstriyel ekonomilerin ve yüksek yaşam standartlarının sürdürülebilmesi için doğada mevcut olmayan bazı radyasyon kaynaklarının yapay yollarla üretilmesi ve kullanılması kaçınılmaz olmuştur. Bu kaynaklar, birçok işin yapılma süresini kısaltmış, maliyetini de azaltmıştır. Yapay radyasyon kaynakları da tıpkı doğal radyasyon kaynakları gibi canlıların bu radyasyon kaynaklarından belli miktarlarda radyasyon dozuna maruz kalmasına neden olurlar. Ancak bu doz miktarı, ihtiyaca bağlı olarak artsa da, doğal kaynaklardan alınan doza göre çok daha düşüktür. Doğal radyasyon kaynaklarının aksine tamamen kontrol altında olmaları da maruz kalınacak doz miktarı açısından önemli bir özelliktir (Akkurt 2006). Bilinen başlıca yapay radyasyon kaynakları aşağıda liste halinde verilmiş ve bu kaynaklardan maruz kalınan radyasyon dozlarının oransal değerleri Şekil 2.10'da gösterilmiştir.

- a) Tıbbi uygulamalar
- b) Tanısal radyoloji
- c) Nükleer tıp
- d) Radyoterapi
- e) Endüstriyel uygulamalar
- f) Nükleer serpinti
- g) Nükleer güç santralleri
- h) Tüketici ürünleri.



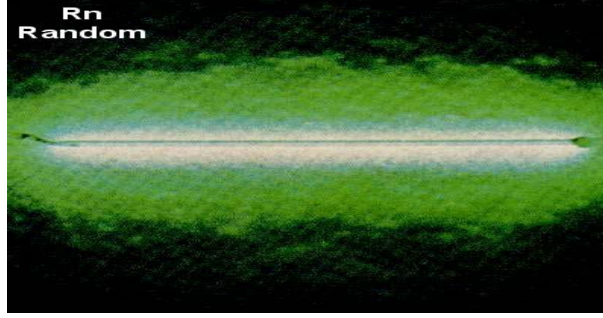
Şekil 2.10 Dünya genelinde yapay radyasyon kaynaklarından maruz kalınan radyasyon dozlarının oransal değerleri (IAEA 1996).

2.3. Radon ve Özellikleri

Doğal kaynaklardan alınan radyasyon dozunun en önemli bileşeni radondur. 1900 yılında Alman kimyacı Friedrich Ernst Dorn tarafından ilk kez bulunduğu kabul edilen radon aslında ilk kez 1898 yılında ünlü fizikçi Ernest Rutherford tarafından keşfedilmiştir. Friedrich Ernst Dorn bugünkü adıyla radona parıldayan manasına gelen *niton* adını vermiştir. 1923 yılına kadar bu adla anılan elemente radyumdan sonra keşfedildiği için *radon* denilmiştir.

Radon Elementlerin Periyodik Tablosunda Asal Gazlar grubu denilen 8A grubunda, 6. periyotta bulunmaktadır ve son keşfedilen asal gazdır. Normal sıcaklık ve atmosfer basıncında gözle görülemeyen, renksiz, tatsız ve kokusuz bir gazdır (Akkurt 2006).

Erime noktası $-71\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($202.15\text{ }^{\circ}\text{K}$, $-95.8\text{ }^{\circ}\text{F}$), kaynama noktası ise $-61.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($211.35\text{ }^{\circ}\text{K}$, $-79.24\text{ }^{\circ}\text{F}$)'dir. Bütün dünyada yalnız 100 ton, toprakta ise ortalama 1 pCi/L civarında bulunmaktadır (Özdemir 2006). Radon donma sıcaklığının altındaki sıcaklıklara kadar soğutulursa, sıcaklık düşüşüyle orantılı bir şekilde sarılığı artan parlak bir görünüm alır. Şekil 2.11'de radon elementine ait bir resim görülmektedir. Sıvı hava sıcaklığı olan $-195\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de turuncu-kırmızı arası bir renk alır (Davutoğlu 2008).



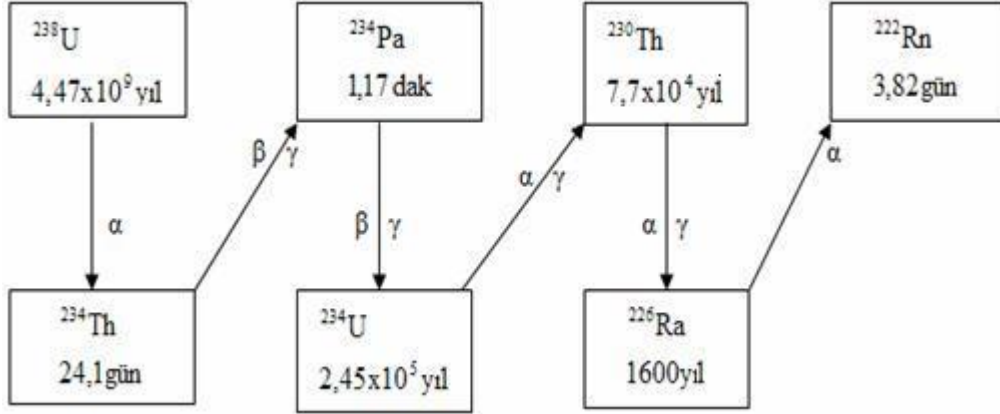
Şekil 2.11 Radon elementinin resmi (Davutoğlu 2008).

Radon gazı elektrik iletkenliği hiç olmayan ve ısı iletkenliği de $3.64 \cdot 10^{-5}$ W/cmK gibi çok düşük bir değere sahip olan bir asal gazdır. Radonun atomik yarıçapı $1.34 \cdot 10^{-10}$ m ve atomik kesitinin alanı $0.72 \cdot 10^{-24}$ cm²'dir (Akkurt 2006).

Havadan 7.5 kez, hidrojenden ise 100 kez daha ağırdır ve tek atomlu şekilde bulunur. Bu yüzden kağıt, deri, plastik, boya ve yapı malzemeleri gibi materyallere kolayca nüfuz eder. Elektron ilgisinin düşük ve iyonlaşma enerjisinin yüksek olması nedeniyle ²²²Rn diğer elementlerle kolayca bağ yapamaz. Ancak elektron ilgisi yüksek olan bazı atomlarla etkileşip kararlı bileşikler yapabilir. Suda ve organik çözücülerde iyi çözünür, çözünürlüğü artan sıcaklıkla azalır; sudaki çözünürlüğü 0 °C, 25 °C ve 50 °C'de sırasıyla 510, 220 ve 130 cm³·L⁻¹'dir (UNSCEAR 1993).

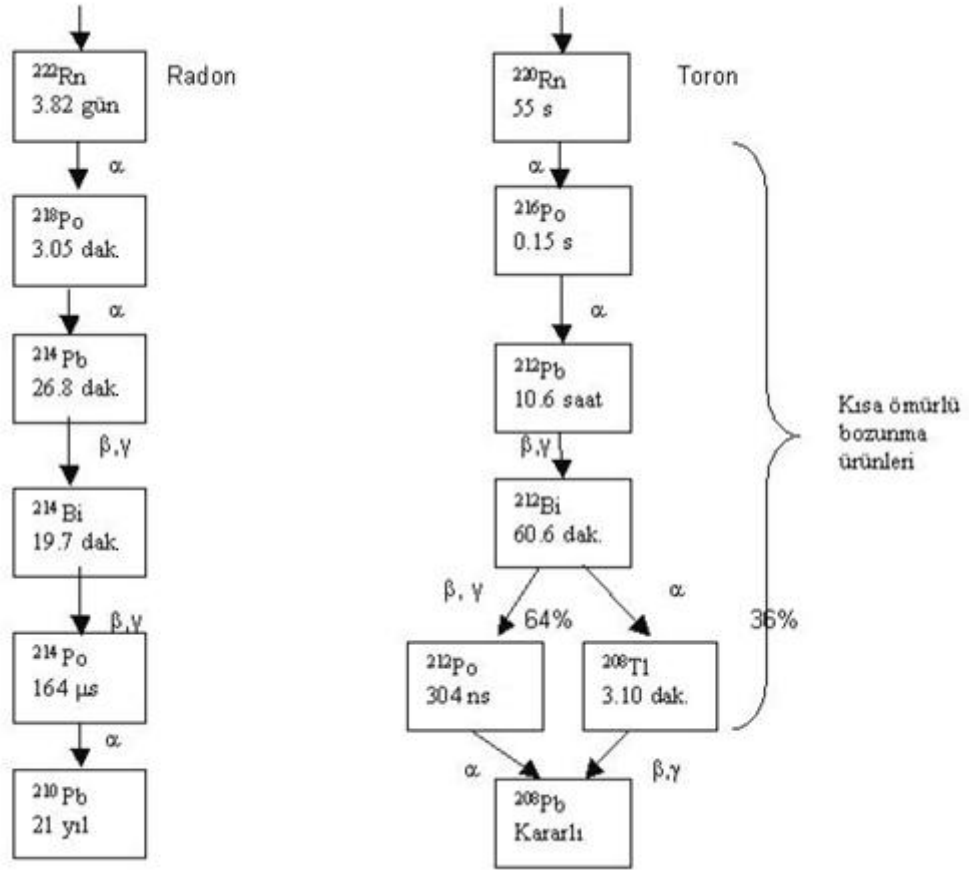
Radon elementinin çok çeşitli yarı ömürlere sahip 33 tane izotopu vardır. En uzun ömürlü üç izotopu ²²²Rn, ²²⁰Rn ve ²¹⁹Rn'dur. ²²²Rn, radon elementinin en uzun yarı ömürlü izotopudur. Uranyumun doğada en çok bulunan izotopu ve en ağır doğal radyoaktif element olan ²³⁸U'in bozunum zinciri içerisindedir. Diğer iki izotop ise ²³²Th ve ²³⁵U serilerine ait ürünlerdir. Bu izotoplar sırasıyla 55.1 saniye ve 3.96 saniye yarı ömürlüdürler. ²²⁰Rn (toron) ve ²¹⁹Rn (aktinon) kısa yarı ömürleri nedeniyle çok çabuk yok olacağından doğadaki radon radyasyonunun hemen hemen tamamı 3.82 gün yarı ömürlü ilk izotopun sonucudur. Bu yüzden radon denilince akla 222 atom numaralı izotop gelmektedir. ²³⁸U - ²²²Rn arasındaki bozunma zinciri ²³⁸U'in bir alfa (α) yayımlayarak ²³⁴Th'e bozunmasıyla başlar. ²³⁴Th, beta (β) ve foton (γ) salarak ²³⁴Pa'e (Protaktinyum-234) dönüşür. ²³⁴Pa yine β ve γ ile ²³⁴U'ü oluşturur. Oluşan ²³⁴U γ ve α bozunmasıyla ²³⁰Th'a; ²³⁰Th ise γ ve α ile ²²⁶Ra'ya bozunur. Son olarak ²²⁶Ra yine

bir γ ve α salarak ^{222}Rn 'ye dönüşür. Bu radyoaktif zincir Şekil 2.12'de görülmektedir (Akkurt 2006).



Şekil 2.12 ^{238}U serisinin ^{222}Rn 'ye kadar olan bozunum şeması.

Serinin bu kısmında ^{238}U , beş radyoaktif çekirdekle ^{222}Rn 'ye ulaşır. ^{222}Rn 'den hemen önce gelen ^{226}Ra , 1600 yıllık yarı ömürle 3.82 günlük yarı ömre sahip olan ^{222}Rn için sabit hızlı bir üreteç görevi yapmaktadır. ^{222}Rn , ^{238}U bozunma zincirinden gelirken, ^{220}Rn yine bir uranyum izotopu olan ^{232}Th 'den türer. Bu iki önemli radon izotopu da radyoaktiftir ve bir seri bozunmaya uğrarlar. Aslında bu seri uranyum serisi adı verilen doğal radyoaktif serinin devamını meydana getirir. Doğada en çok bulunan izotop ^{222}Rn arka arkaya iki kez alfa bozunumuyla önce ^{218}Po ve ^{214}Pb 'e dönüşür. Sonra iki kez beta ve gama bozunmalarıyla sırasıyla ^{214}Bi ve ^{214}Po 'ü oluşturur. Zincirin en sonunda bir alfa bozunumuyla ^{210}Pb meydana gelir. Bu zincirde en kararlı iki çekirdek ^{210}Pb ve ^{220}Rn 'dir. ^{210}Pb 'un yarı ömrü 21 yıldır. Arada kalan dört izotop ise oldukça kısa yarı ömürlere sahip olduklarından aktiviteye katkıları çok azdır. Diğer radon izotopu ^{220}Rn bozunma zincirinde ilk iki element ^{216}Po ve ^{212}Pb , alfa salınmasıyla oluşur. Sonra beta ve gama salınarak ^{212}Bi türer. Buradan sonra bu izotopun iki türlü bozunmaya uğrama ihtimali vardır. Ya alfa ve beta vererek ^{212}Po 'ye bozunur (%64); ya da alfa vererek ^{218}Tl 'e bozunur (%36). Her iki durumda da son ürün kararlı bir element olan ^{208}Pb 'dir. Radon izotoplarının bozunma zinciri ve izotopların yarı ömürleri Şekil 2.13'te verilmiştir (Akkurt 2006).



Şekil 2.13 Doğada en çok bulunan iki radon izotopunun bozunma zincirleri (Özdemir 2006).

2.3.1. Radon etkilenim kaynakları

Radon kaya, toprak ve sudaki doğal uranyumun radyoaktif bozunması sonucu oluştuğu için tüm yüzey kaya ve toprak parçaları ile yapı malzemelerinden ortama salınır. Yarı ömrü 3.82 gün olan ^{222}Rn , kısa yarı ömürlü bozunma ürünleri ile denge halinde bulunur. Dolayısıyla radon, az miktarda bile olsa uranyum içeren her toprak ve kaya ortamında mevcuttur. Radon atomlarının hareketi, yayılma veya taşınma ile olabilir (Özdemir 2006).

Radon salınımı bölgeye, zamana, yerden yüksekliğe ve meteorolojik şartlara bağlıdır. Atmosfer basıncının düşük olması durumunda, toprak havasında da basınç düşüşü gerçekleşeceğinden radon göçü artar. Sıcaklık yükselmesi toprağın kurumasına

ve gözeneklerin çoğalmasına neden olduğundan, radonun topraktan kaçması kolaylaşmaktadır. Yağışlı havalarda ise yüzeydeki topraklar nemlendiğinden toprak gözenekleri kapanır. Radonun yukarı doğru difüzyon yoluyla geçmesi zorlaşır ve toprak yüzeyindeki radon yoğunluğu azalır (Akkurt 2006). Radon konsantrasyonunun mevsimsel değişimi deniz seviyesinden yüksekliğe göre de farklılıklar göstermektedir. Radonun kaynağının toprak olmasından ve çok kısa yarı ömre sahip olmasından dolayı radon konsantrasyonu yükseklikle sabit bir şekilde azalma gösterir (Özdemir 2006).

Bu gaz coğrafi bölgenin, jeolojik yapısıyla da yakından ilişkili olarak çevreye yayılım göstermektedir. Granit ve volkanik topraklar, tortul şistler önemli radon kaynaklarını oluşturmaktadırlar. Sedimanter topraklarda ise radon konsantrasyonu düşüktür. Bazı tebeşir çökelti bölgelerinde de az miktarda olsa da radona rastlanmaktadır. Ayrıca yeraltı suları, doğal gazlar, kömür ve okyanuslar da sınırlı da olsa radon salınımı yapabilmektedir (Davutoğlu 2008).

2.3.2. Sularda radon

Radon, özellikle yeraltı suyu olmak üzere suda çözünebilir. Yeraltı uranyum yataklarının keşfi için yapılan çalışmalar genellikle kuyu, kaynak ve jeotermal sularında radon konsantrasyonu ölçülerek gerçekleştirilir. Bunun sebebi bu suların kaynağının, yeraltı, akarsular sistemi olması ve bu akarsu sisteminin de kollarının uranyum yataklarından geçme ihtimalinin yüksek olmasıdır. Eğer suların bir kolu uranyum yatağından geçiyorsa yatağı yıkayan sularda uranyum ile radyum çözünür ve radon bu sular ile içindeki taneciklere absorbe olur. Bu yüzden termal suların çıkış noktalarında radon gazı yoğunluğu artar. Termal suların sıcak olmaları, geçtikleri yerlerde daha fazla minerali, dolayısıyla uranyum tuzunu çözebilmeleri ve yerin daha derin noktalarından yeryüzüne çıkmalarından dolayı termal sularda radon miktarının daha fazla olması beklenmektedir.

Evlerde kullanılan musluk suları da tüm arındırma işlemlerine rağmen belirli bir miktar radon içermektedir. Bu miktar ev suyunun alındığı kaynağa ve ne kadar

artıldığına bağlıdır. Ayrıca ev içinde kullanılan bu suların püskürtülmesi ve çalkalanması da radon salınımına neden olur (Akkurt 2006).

2.3.3. Radon ve sağlık

Topraktan havaya sızan radon önemli bir kapalı ortam kirletici faktörü olarak belirmektedir. Radonun radyoaktivitesi zayıftır. Bu nedenle teneffüs edildiğinde dokulara kimyasal olarak bağlanmaz. Ayrıca, dokulardaki çözünürlüğü çok düşüktür; insan akciğerinde yarı ömrünü tamamlamadan geri atılır. Fakat radon bozunumuyla ortaya çıkan Po, Bi ve Pb elementlerinin radyoizotopları olan bozunum ürünleri radon gibi gaz halinde olmadıklarından, toz ya da havadaki diğer parçacıklara çok çabuk yapışırlar ve solunum yoluyla insan vücuduna alınırlar. Bu parçacıklar bozunmalarını kararlı hale gelinceye dek sürdürürler ve yerleştikleri bölgelerde alfa, beta veya gama ışınları yaparak ayrılırlar. Vücut içerisindeki bu ışınlardan en önemlisi alfa ışınlarıdır. Akciğer üzerinde beta parçacıkları ile gama ışınlarının etkileri, alfa parçacıklarının etkilerine göre ihmal edilebilir düzeydedir. Bozunma sürecinin her aşamasında salınan radyasyon, öncelikle akciğer dokusunda hasara, zamanla da akciğer kanserine neden olabilir (UNSCEAR 2000, Özdemir 2006). Bu nedenle radon ve bozunma ürünlerinin solunması önemli bir sağlık riski oluşturmaktadır. Epidemiyolojik çalışmalar, yüksek seviyede radon ve bozunma ürünleri dolayısıyla radyasyona maruz kalmış bireylerde akciğer kanseri oranlarının yüksek olduğunu göstermiştir. İngiltere Milli Radyasyondan Korunma Komitesi (NRPB), İngiltere'deki yıllık toplam 41,000 akciğer kanserinden en az 2,500'ünü, ABD Halk Sağlığı Servisi ise yıllık akciğer kanseri vakalarının, sigara içmeyenlerden 5,000, sigara içenlerden ise 15,000'ini, Uluslararası Radyasyondan Korunma Komitesi (ICRP 1994) ise toplam akciğer kanserlerinin %10'unu radona bağlamaktadırlar. Ancak bu durum yüksek dozda radona maruz kalmış herkesin akciğer kanserine yakalanacağı anlamına gelmemekte ve maruz kalınma ile hastalığın oluşması arasında geçen zaman yıllarca sürebilmektedir.

Çizelge 2.6'da, çeşitli ülkeler ve uluslararası kuruluşlar tarafından benimsenen kapalı ortamlar için müsaade edilebilir radon konsantrasyonları verilmektedir.

Çizelge 2.6 Radon Konsantrasyon Limitleri (Bq/m³) (TAEK).

A.B.D.	150	Hindistan	150	Norveç	200
Almanya	250	İngiltere	200	Rusya	200
Avustralya	200	İrlanda	200	Türkiye	400
Çin	200	İsveç	200	AB*	400
Danimarka	400	Kanada	800	ICRP**	400
Fransa	400	Lüksemburg	250	WHO***	100

*Avrupa Birliği

**Uluslararası Radyasyondan Korunma Komitesi

***Dünya Sağlık Örgütü

Radonun akciğer kanserine etkisi doğrudan radonun kendisine değil bozunum ürünlerine bağlıdır.

Radonun suda eriyebilme özelliği olduğundan, tüm canlıların yaşamı için gerekli unsurların başında yer alan su kaynakları ile çeşitli jeolojik olaylar sonucu dünyanın katmanları arasından kaynarak yeryüzüne ulaşan, kaplıca ve termal banyolarda doğal tedavi unsuru olarak kullanılan termal sular da radon içermektedir. Radon, bu sulara tedavi amacıyla girenlerin derilerinden kan dolaşımına girerken, suların içme olarak kullanılmasıyla da mide-bağırsak derisi yoluyla kan dolaşımına girmektedir (Atakan 2007).

2.3.4. Radon ölçme yöntemleri

Radon konsantrasyonunun ölçümüyle ilgili birçok araç, gereç ve yöntem vardır. Bunların büyük çoğunluğunda radon ve ürünlerinin ölçümünde genellikle alfa sayımı tercih edilmektedir. Alfa sayımının kullanıldığı teknikler arasında iyonizasyon odası, kollektör yöntemi, Lucas hücresi, iz kazıma yöntemi, elektrostatik toplama yöntemi ve filtre yöntemi sayılabilir.

2.3.4.1. İyonizasyon odası

İyonizasyon odası paslanmaz çelikten silindir şeklinde yapılmaktadır. Merkez ekseninde silindir şeklinde yapılmış bir elektrot bulunur. Radon konsantrasyonu belirlenmek üzere örneklenen hava iyonizasyon odasına aktarılarak, odanın duvarları (metal iç yüzeyleri) ile elektrot arasında bir potansiyel farkı uygulanır. Oluşan iyonizasyon akımı çok duyarlı elektrometre ile ölçülür.

2.3.4.2. Kollektör yöntemi

Bu yöntemin temel prensibi, bir kap içerisinde bulunan örnekteki radonun bozunumu ile oluşan radon ürünlerinin kollektör ve kap arasına uygulanan potansiyel yardımıyla kollektör yüzeyinde toplanması ve biriken ürünlerin toplam alfa aktivitesinin sayımıdır.

Kollektör yöntemi ölçüm sistemi 3 bölümden oluşur:

Köpürtme şişesi: İçinden basınçlı hava geçirilebilecek şekilde dizayn edilmiş 100 mL köpürtme şişesi ve en az 1 ay bekletilmiş basınçlı hava tüpünden oluşmaktadır. Burada havanın 1 ay bekletilmesinin sebebi havadaki radonun bozunmasını sağlamaktır. Köpürtme şişesinin içinde havanın dağılımını süngere benzeyen pümis taşı sağlar.

Gaz toplama odacığı: 2.8 L hacimli çelik kap ve vakum edilerek kapatılabilecek şekilde dizayn edilmiş çelik kapaktan oluşur. Çelik kapak içine 3 cm çapında bakır disk kollektör olarak asılmıştır. Kapağa biri giriş diğeri çıkış olmak üzere 2 vana bağlanmıştır. Gaz toplama odası vakum edilerek vanalar kapanır ve işleme hazır duruma getirilir.

Sayım sistemi: Yüksek güç kaynağı ile alfa radyasyon sayım cihazından oluşur. Kollektör yönteminde, suyun çıktığı ana kaynaktan şişelere 100 mL örnekler alınır, şişelere doldurulan su köpürtülerek radon gazı ve ürünleri, içinde bakır disk bulunan kollektör odasına aktarılır, 600 voltluk potansiyel uygulanarak radon ve ürünleri

arasındaki dengenin sağlanması için 4 saat bekletilir. Bu süre sonunda bakır disk üzerine biriken radon ve ürünleri dedektörde sayılır (Barış 2006).

2.3.4.3. Lucas hücresi

Lucas hücresi bir ucu düz ve açık, diğer ucu yarım küre olarak metal veya camdan yapılmış bir silindir biçimindedir. İç yüzeyinin duvarları sintilatör olarak gümüşle aktive edilmiş, çinko sülfürle kaplıdır. Lucas hücresi kullanılarak yapılacak radon ölçümlerinde, alfa aktivitesi ölçülecek havanın filtre edilerek hücreye alınması gerekir. Havadaki bütün radon ürünleri filtrede tutulur. Sistemden hücreye radyoaktif madde olarak yalnızca radon gazı girer. Radon gazı Lucas hücresi içinde bozunarak kısa zamanda ürünleriyle dengeye ulaşır. Radonun ve ürünlerinin yayınladıkları alfa radyasyonu hücrenin duvarlarına çarparak sintilasyon oluşturur. Bu olayda çıkan fotonlar fotoçoğaltıcı ve elektronik sistem kullanılarak sayılır.

2.3.4.4. İz kazıma yöntemi

Radyonüklidlerin yayınladıkları alfa parçacıkları bazı maddeler ve özellikle plastik filmler üzerinde etkilidirler. Alfa iz kazıma filmleri genel olarak dielektrik veya organik maddelerden yapılıdır. Alfa parçacığı bu filmlere çarptığı zaman onun yapısında bir hasar oluşturur. Bu hasar film üzerinde normal mikroskop altında görülemeyecek kadar küçük çukurlar şeklindedir. Bu olaya maruz kalmış bir film laboratuvarında belirli şartlar altında kimyasal işleme tabi tutulursa alfa parçacığının oluşturduğu izler normal mikroskop altında görülebilir hale gelir. Bu işlemlerden dolayı bu ölçüm sistemine iz kazıma tekniği adı verilmiştir. İz kazıma filmleri genelde üzerine gelen alfa parçacığının sayısını verir ve bu olay alfa parçacığının kendine özel bir durumdur. Çünkü filmler diğer radyasyon türlerine karşı duyarlı değildirler. Böylece uygun kalibrasyon ve hesaplama tekniği ile iz sayısından ortam radon konsantrasyonunu bulmak mümkün olmaktadır.

2.3.4.5. Elektrostatik toplama yöntemi

Bu yöntemde pozitif yüklü radon ürünleri, bir odacık içinde uygun voltaj altında hızlandırılarak yüzey engelli alfa dedektörü üzerine toplanır ve spektroskopik olarak ürün aktiviteleri ölçülür. Benzer bir yöntem olan kollektör yönteminde de su veya toprak gibi örneklerdeki radona ait ürünler vakum edilmiş bir kap içindeki kollektöre yüksek voltaj uygulanarak toplanır.

2.3.4.6. Filtre yöntemi

Bu yöntem, havadaki radon ürünleri konsantrasyonunu ölçen tek filtre yöntemi ile havadaki radon ve ürünlerini ayırarak radon bozunma oranını ölçen çift filtre yönteminden oluşur.

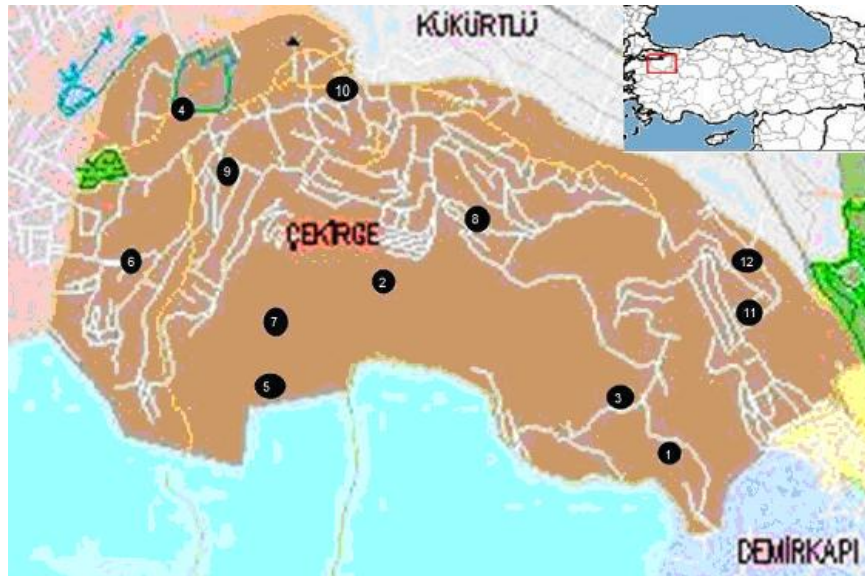
Tek filtre yönteminde havadaki radon ve ürünleri arasında radyoaktif dengenin olduğu kabul edilerek ölçümler alınır.

Çift filtre yönteminde ise havadaki radon ve ürünleri arasında radyoaktif dengeye bağlı olmaksızın ölçümler alınır (Barış 2006).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. İncelenen Su Kaynakları

Suları ve kaplıcaları yabancı Balneoloji kitaplarında yer alan, kaplıca şehri Bursa'daki termal sulara radon konsantrasyonlarını tayin etmek üzere 12 ayrı kaynak belirlenmiş ve bu kaynaklardan su örnekleri alınarak sayımlar gerçekleştirilmiştir. Numuneler 18 Temmuz 2008 ile 22 Ocak 2009 tarihleri arasında yaklaşık 6 aylık süre içinde, türlü konglomeralar, kumtaşları, killer, kalkerler, kuvars ve lavların görüldüğü, maden suyu ve sıcak su çıkışlarının yoğun olarak gözlemlendiği Çekirge bölgesindeki kaplıca ve sıcak su kaynaklarından alınmıştır (Şekil 3.1). Suların çoğu kireç taşları arasından çıkmakta ve sıcaklıkları 46 °C ile 78 °C arasında değişmektedir. Sıcak su kaynakları denizden 240 metre yükseklikte kuzey-güney istikametinde uzanan bir çatlak üzerinde bulunmaktadır (İstanbul Üniversitesi 1971, Hakkıdır 2007).



Şekil 3.1 Örnekleme alanı.

3.2. Numune Alımı

Çalışma kapsamında, su örneklemelerinde 500 mL'lik plastik şişeler kullanılmıştır. Kaynaklardan örnek almadan önce su bir süre dışarı akıtılmaya bırakılarak temiz su örneği elde edilmiştir. Temiz su elde edildikten sonra şişeler 3 kez su ile çalkalanarak ağzına kadar boşluk kalmayacak şekilde doldurulmuş ve radon gazı kaçışını önlemek için şişelerin kapağı su akışı altında sıkıca kapatılmıştır. Su örnekleri genellikle sabahları alınmış ve alınan su örnekleri ortalama 75 dakikalık bir sürede Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Nükleer Fizik laboratuvarına götürülerek ölçümler gerçekleştirilmiştir.

3.3. AlphaGUARD Radon Cihazı

Bu tez kapsamında radon ölçümleri için kullanılan, AlphaGUARD PQ 2000PRO, ^{222}Rn kaynaklı alfa radyasyonunu ölçmekte kullanılan taşınabilir nitelikte bir radyasyon dedektörüdür. Alfa radyasyonu maddeyi iyonize edici özelliğe sahip olduğundan dedektör buna uygun bir iyonizasyon odalı cihazdır. İyonizasyon odası paslanmaz çelikten, silindir şeklinde yapılmıştır ve dedektör besleme gerilimi (anot ve katot arası gerilim farkı) DC 750 voltur (Akyıldırım 2005). Dedektör toplam hacmi 0.62 litredir, ancak bunun 0.56 litrelik kısmı etkin dedektör olarak kullanılmaktadır.

AlphaGUARD ile uzun süreli ölçümler yapılabilen ve ölçümler esnasında doğrudan bir güç kaynağına bağlanabildiği gibi yüksek kapasiteli pilleri sayesinde, seçilen ölçüm moduna göre 10 güne kadar sürekli ölçüm alınabilmektedir. Şekil 3.2'de AlphaGUARD dedektörü görülmektedir.

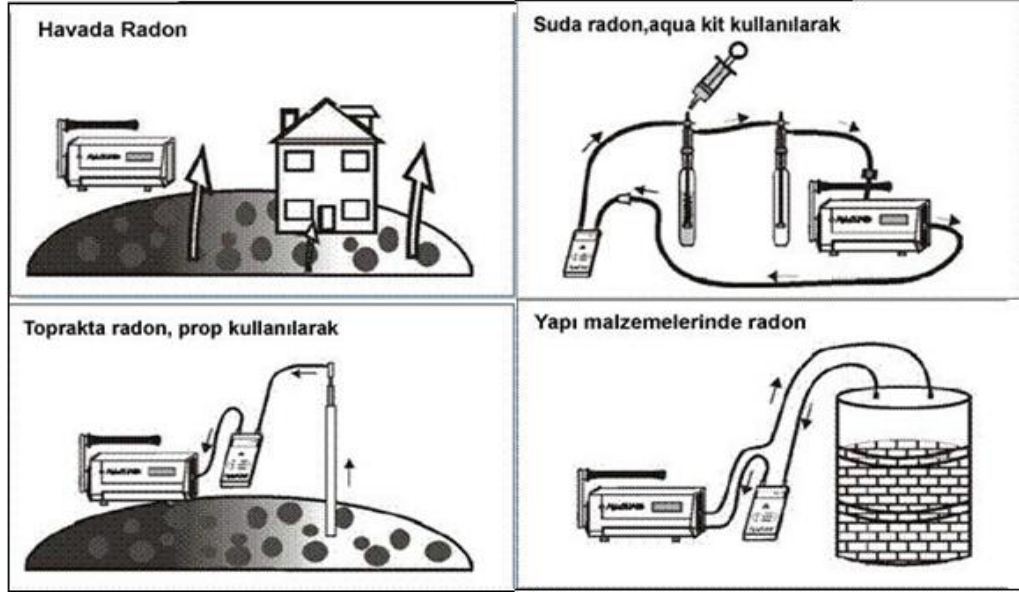


Şekil 3.2 AlphaGUARD PQ 2000PRO dedektörü.

Radon konsantrasyonu ölçümü bu dedektör ile $2 - 2 \cdot 10^6$ Bq/m³ aralığında yapılabilmektedir. Bu geniş aralığa rağmen sistemin kendisinden gelen %3 gibi bir doğrusallık hata payı bulunmaktadır.

Cihaz amaca ve zaman seçimine bağlı olarak ölçümleri difüzyon modu ve akış modu olmak üzere iki şekilde yapabilmektedir. Uzun süreli ve devamlı ölçümlerde difüzyon modu kullanılır. Bu modda cihaz dedektörü 10 dakikalık veya 1 saatlik döngülerle veri kaydeder. Akış modunda ise veri alma aralıkları 1 dakika veya 10 dakika olarak ayarlanabilir. Bu mod daha çok kısa süreli ölçümlerde çok sayıda veri elde etmek için seçilir.

AlphaGUARD ile havadaki, sudaki, topraktaki ve yapı malzemelerindeki radon ölçülebilmektedir. Havada yapılacak ölçümler için ayrıca bir aparat kullanmak gerekmezken su, toprak ve yapı malzemeleri için yapılacak ölçümlerde AlphaGUARD cihazı ile birlikte Şekil 3.3'te görülen ekipman ve düzenekler kullanılmaktadır. Ayrıca AlphaGUARD radon konsantrasyonu ile eşzamanlı olarak sıcaklık (-15 - +60 °C aralığında), atmosfer basıncı (800 – 1050 mbar aralığında) ve nem oranı (% 0-% 99 rH aralığında) gibi üç farklı iklimsel parametreyi de ölçebilmektedir.



Şekil 3.3 AlphaGUARD ile hava, su, toprak ve yapı malzemelerinde radon ölçümü.

AlphaGUARD, çeşitli lokasyonlarda veri toplanması için taşınabilir bir veri toplama sistemi ve aynı zamanda toplanan verilerin saklanabilmesi için bir veri depolama sistemidir. Depolanan verilerin bilimsel yorumlarının yapılabilmesi için veri analiz yazılımı ile birlikte çalışır.

Ayrıca yerinde aktif ölçümler yapılmasında kullanılan AlphaGUARD cihazı bilgisayara bağlanarak ölçüm sırasındaki değişimler gözlenebilmektedir.

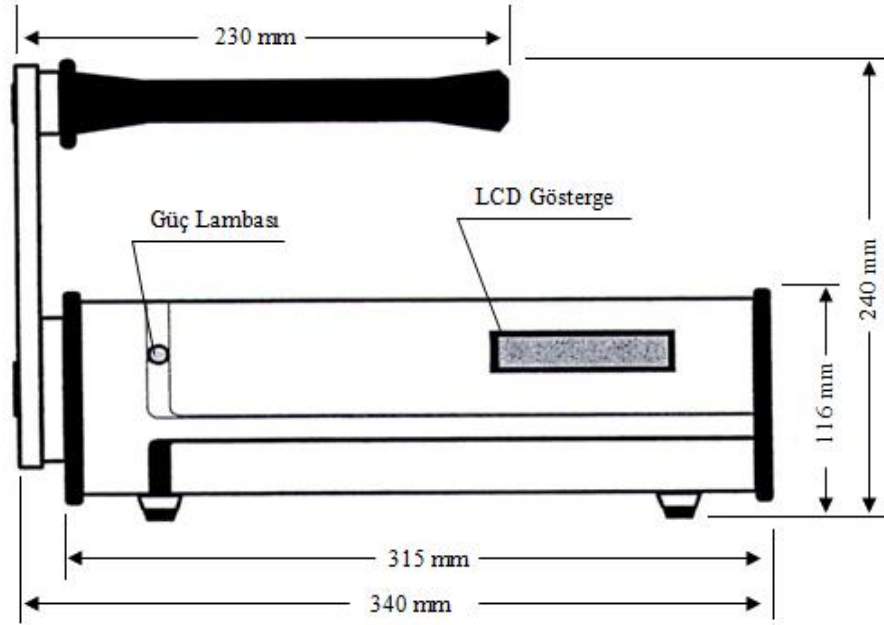
AlphaGUARD radon dedektörü ölçüm ünitesine tümleşik olan bir emme pompası yardımı ile havayı dedektör iyonlaşma odasına çeker. Emme sonucunda iyonlaşma odasına giren radon (^{222}Rn) bozunarak oda içerisinde iyonizasyona sebep olarak elektrik sinyalleri meydana getirir. Bu sürekli emme esnasında radon yan ürünleri bir plaka şeklindeki filtre tarafından tutulur ve filtre plakası üzerinde biriken radon yavru ürünlerinin alfa aktivitesi ise filtre plakasının diğer yüzüne yerleştirilmiş hassas bir sayısal işlemcili modülü olan, alfa duyarlı TN-WL-02 mikroçip modülü vasıtasıyla ölçülür (Akyıldırım 2005). Yapılan tüm ölçümlerden elde edilen elektrik sinyalleri, AlphaGUARD PQ 2000PRO'nun Counter-Module sayıcı birimine TTL sinyali olarak gönderilir ve dedektörün kalibrasyon bilgileri de kullanılarak yazılım tarafından anlamlı verilere dönüştürülür.

AlphaGUARD PQ 2000PRO radon dedektörünün yapısı iki temel kısma ayrılarak incelenebilir:

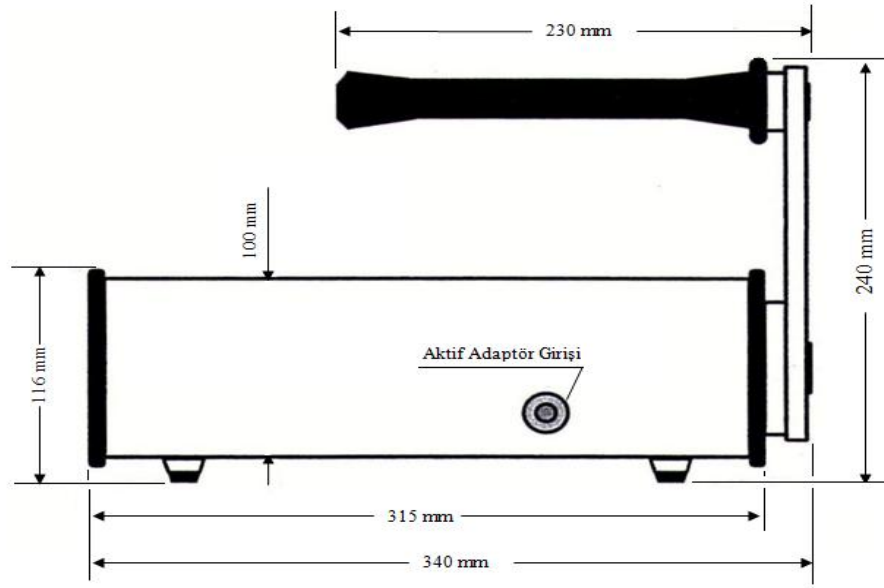
3.3.1. Dedektörün dış yapısı

AlphaGUARD PQ 2000PRO radon dedektörünün ölçüm yapmasını sağlayan ölçüm ve elektronik aksam bileşenleri dayanıklı bir alüminyum gövde içine yerleştirilmiştir. Şekil 3.4, Şekil 3.5, Şekil 3.6, Şekil 3.7 ve Şekil 3.8’de AlphaGUARD cihazının farklı görünüşleri ile bazı ebatları verilmiştir.

Cihazın ön kısmında, ölçüm sırasında radon konsantrasyonundaki ve iklimsel parametrelerdeki değişimleri ayrı iki satırda gösteren LCD gösterge ve güç lambası bulunmaktadır (Şekil 3.4).

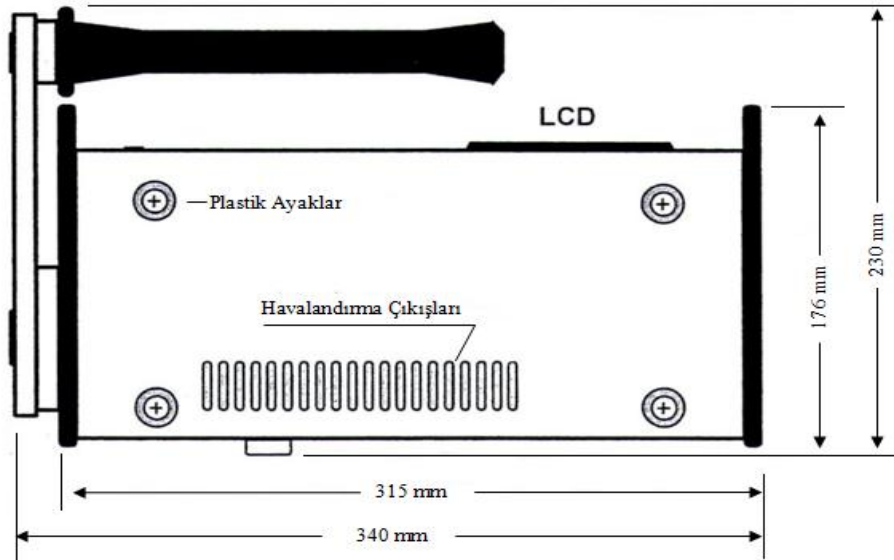


Şekil 3.4 AlphaGUARD cihazının önden görünüşü ve ebatları.



Şekil 3.5 AlphaGUARD cihazının arkadan görünüşü ve ebatları.

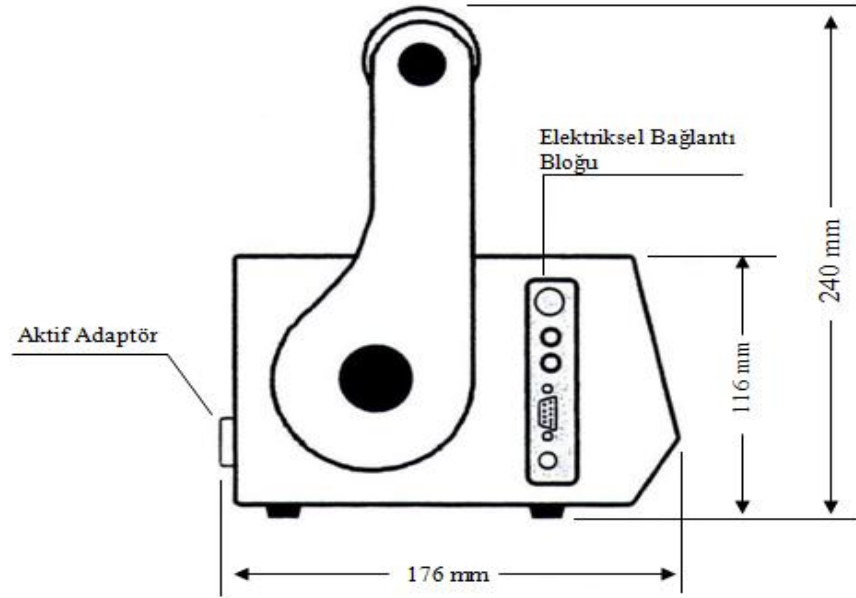
Cihazın arka kısmındaki vida yuvası plastik bir kapakla kapatılmıştır. AlphaGUARD PQ 2000PRO'da bu kapağın arkasında bulunan yuva cihazın iyonizasyon odasıyla buraya bağlanan etkin hava pompası arasındaki bağlantıyı sağlar. Yani buradan dedektör içine hava girişi sağlanmaktadır (Şekil 3.5).



Şekil 3.6 AlphaGUARD cihazının alttan görünüşü ve ebatları.

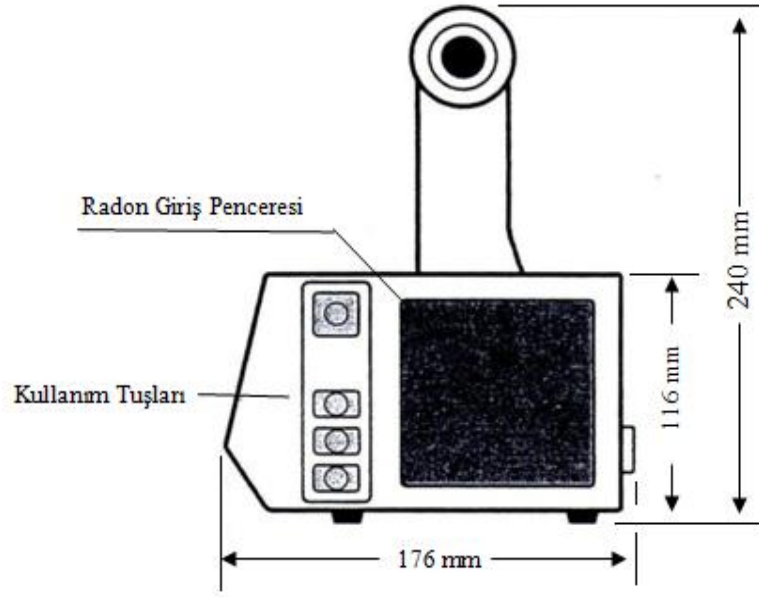
Alt kısımda alüminyum gövdenin yerle temasını kesen plastik ayaklar ve havalandırma çıkışları bulunmaktadır. İç kısımda bulunan bir fan sayesinde, özellikle uzun süreli kullanımlarda cihazın soğutulmasını sağlamak için sıcak hava buralardan dışarıya atılmaktadır (Akyıldırım 2005).

AlphaGUARD PQ 2000PRO'nun taşıma kolunun bağlı olduğu sol kısımda elektrik bağlantı girişleri bulunmaktadır. Burada harici sensör girişi için bir adet MINI-DIN-8S soketi, 2 adet 4mm'lik soket, PC ile bağlantıyı sağlamak için 1 adet RS-232 girişi ve 12 V DC adaptör girişi bulunmaktadır (Şekil 3.7).



Şekil 3.7 AlphaGUARD cihazının sol yandan görünüşü ve ebatları.

Cihazın sağ tarafında korumayla kapatılmış radon gazı giriş paneli ve AlphaGUARD menü kontrolünü sağlayan tuş takımı bulunmaktadır (Şekil 3.8).



Şekil 3.8 AlphaGUARD cihazının sağ yandan görünüşü ve ebatları.

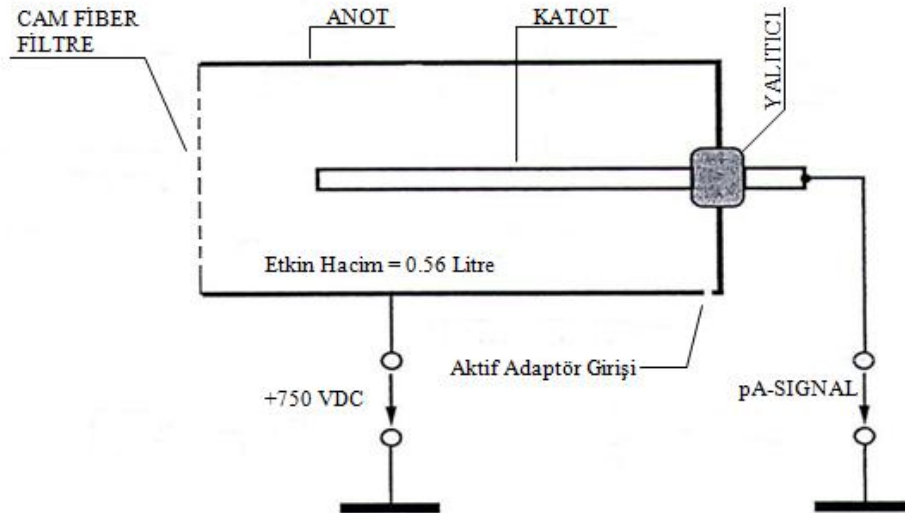
3.3.2. Dedektörün iç yapısı

Cihazın alüminyum korumasının altında ölçüm yapılmasını sağlayan dedektör (iyonizasyon çemberi) ve dedektörden gelen sinyalleri işleyip sayısal verilere dönüştüren sinyal işleme birimi DSP (Digital Signal Processing-Sayısal Sinyal İşleme) bulunmaktadır.

AlphaGUARD dedektörü, silindirik atma iyonizasyon çemberine sahiptir. Düzenli işletimde radon içeren hava iyonizasyon çemberi içerisine geniş yüzeyli bir cam fiber filtreden geçerek girmektedir. Burada radon bozunum ürünlerinin iyonizasyon odasına girmesi engellenerek sadece gaz halindeki ^{222}Rn 'nin geçmesine izin verilmektedir. Aynı zamanda filtre, çemberin iç kısmını toz parçacıklarının birikmesiyle oluşacak kirlenmeden korumaktadır.

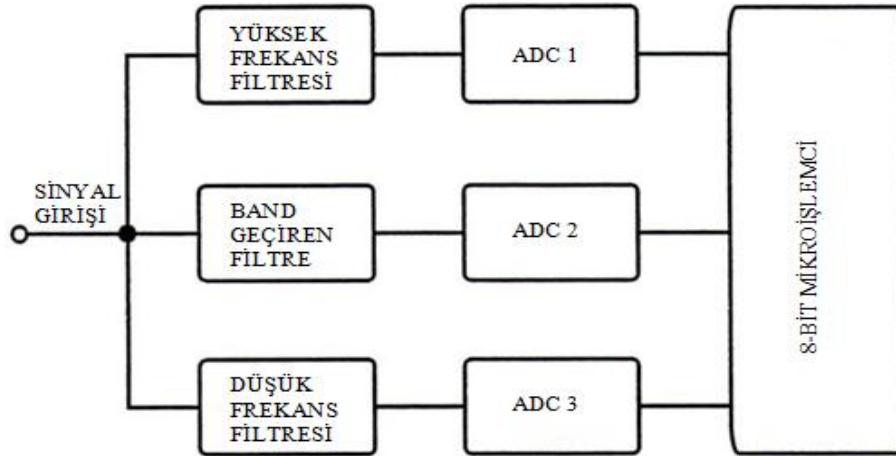
AlphaGUARD PQ 2000PRO'nun silindirik atma iyonizasyon çemberi 0.56 litrelik bir etkin hacime sahiptir. Cihaza güç verilmesiyle beraber iyonizasyon çemberinin metal iç yüzeyleri 750 voltluk bir iç gerilimle yüklenerek dedektörün anodu

(+ kutup) haline gelir. Buna karşılık dedektörün yatay eksenine denebilecek eksen boyunca yatay olarak uzanan paslanmaz çelikten yapılmış elektrot çubuk ise 0 volt seviyesindedir ve katot vazifesini görür. Anot ve katot arasındaki yalıtım elektrot çubuğunun iyonizasyon çemberi içerisine girdiği noktada bulunan plastik bir parçayla sağlanır. Anot ve katot arasındaki 750 voltluk gerilim farkı sayesinde dedektör etkin hacmi içerisindeki iyonizasyon sonucu ortaya çıkan iyonlardan katyonlar (- yüklü iyonlar) anoda, anyonlar (+ yüklü iyonlar) ise katoda hareket ederler. Böylece yüklerin hareketi sonucu devrede bir akım meydana gelir. Bu akım da AlphaGUARD PQ 2000PRO'nun elektronik birimi tarafından işlenerek anlamlı veriler haline getirilir (Akyıldırım 2005). Şekil 3.9'da AlphaGUARD PQ 2000PRO'nun atma iyonizasyon çemberinin şematik çizimi görülmektedir.



Şekil 3.9 AlphaGUARD dedektörünün iyonizasyon çemberinin şematik çizimi.

AlphaGUARD PQ 2000PRO'nun elektronik birimi dedektör tarafından elektrik sinyallerine dönüştürülen radon verilerini alıp işlemekle sorumlu birimdir. Sayısal sinyal işleme birimi DSP, birbirinden bağımsız üç sinyal işleme kanalına sahiptir. Her bir kanalın kendine ait analog-dijital çevirici devresi vardır. Böylece devreye dedektörden gelen her ön yükseltici sinyali üç farklı özelliğine göre aynı anda analiz edilebilmektedir. DSP birimine ait blok diyagram Şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.10 AlphaGUARD'ın sinyal işleme biriminin blok diyagramı.

Birinci kanal (ADC 1) AlphaGUARD PQ 2000PRO'nun spektroskopik kanalı olarak adlandırılır. Burada sinyaller sadece atma derinliklerine göre değil, aynı zamanda atma şekillerine göre de sınıflandırılmaktadır. DSP teknolojisine sahip olmayan iyonizasyon odalı dedektörlerde yüksek seviyedeki radon konsantrasyonlarında meydana gelen α olayları multiplere (üçlülere) ayrılma eğilimindedirler ve bu sinyalleri daha karmaşık hale getirmektedir. Ancak AlphaGUARD PQ 2000PRO'da da dedektör sisteminde kullanılan DSP teknolojisi bu durumu daha karmaşık bir matematiksel algoritma, çapraz korelasyon (cross-correlation) algoritması kullanarak meydana gelen gürültüyü seçerek radon sinyalinden ayırt edebilmektedir. Elde edilen sinyal (primer sinyal) kısa zaman aralıklarında örneklenir ve orijinal sinyalin sayısal değerler halinde örnekleri çıkarılarak AlphaGUARD elektronik devresinin son kısmı olan kontrol birimi (hızlı mikro kontrolör) tarafından işlenir.

ADC 1 yani spektroskopik kanalda örneklendirilen veriler mikro kontrol birim tarafından her α pikinden elde edilen atma genliği (= klasik alfa spektrumu) ve atmanın şekli için de tanımlama bilgileri şekline dönüştürülür. Dedektör tarafından toplanan bu bilgiler x eksenini α piki genliğini (= alfa enerjisini), y eksenini zaman birimi başına meydana gelen α bozunumu ve z eksenini de atma şekli olmak üzere üç eksenli bir spektrum halinde sunulabilir. ADC 2 yani ikinci kanal sadece yüksek radon seviyelerinde devreye girmektedir. Kanalin girişindeki bant geçiren filtre devresi doğru

boyutlandırıldığında gürültünün genliği çemberin toplam iyonizasyon akımının kareköküyle doğru orantılı olarak değişmekte ve bu bağıntı kullanılarak pikoamper seviyesindeki iyonizasyon akımı kesin olarak ölçülebilmektedir. ADC 3 yani üçüncü kanal ise klasik bir DC integratörlü akım ölçümü gerçekleştiren devredir (Akyıldırım 2005).

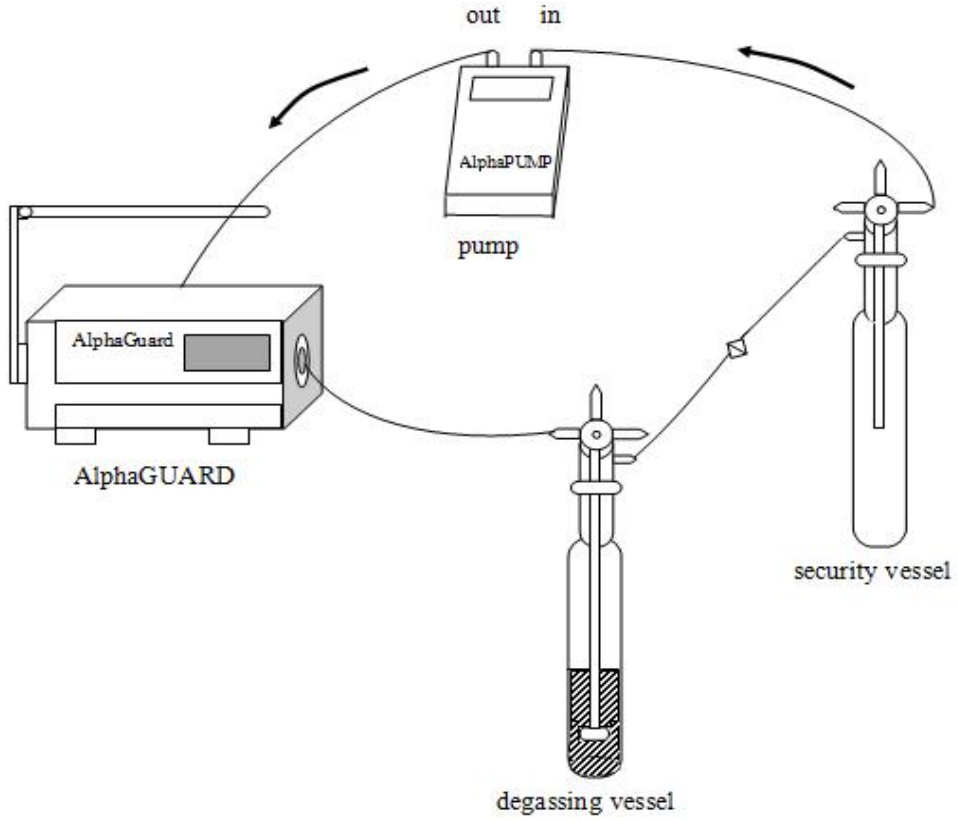
Bu üç sinyal karakteristiğinin temelinde altı değişik matematiksel algoritma yatmaktadır. Tüm işlemler sonucunda optimize edilmiş konsantrasyon prosedürü vasıtasıyla gerçek radon konsantrasyonu belirlenmektedir. Her bir radon değeri yaklaşık olarak 50 milyon matematiksel işlemin sonucunda elde edilir.

3.4. Su Numunelerinin Analizi İçin Ölçüm Düzeneginin Hazırlanması

Sudaki radon konsantrasyonu ölçümü için, ek bir donanım olan AquaKIT, pompa (AlphaPUMP) ve AlphaGUARD PQ 2000PRO'dan oluşan Şekil 3.11'de şematik olarak gösterilen düzenek aşağıdaki bağlantılar gerçekleştirilerek kurulur.

- 1) Arıtma şişesinin (degassing vessel) alt yan başlığı güvenlik şişesinin (security vessel) alt yan başlığına 150 mm'lik iki tane kilitli tüp ile bağlanır.
- 2) Güvenlik şişesinin üst yan başlığı pompanın 'IN' başlığına 400 mm uzunluğundaki tüp ile bağlanır.
- 3) Pompanın 'OUT' başlığı 500 mm uzunluğundaki tüp ile AlphaGUARD'ın arka kısmında bulunan 'Aktive Adapter (aktif adaptör)' girişine bağlanır.
- 4) AlphaGUARD'ın sağ tarafındaki 'Flow Adapter (akış adaptörü)' girişi 600 mm'lik tüp ile arıtma şişesinin üst yan başlığına bağlanır.

Yukarıda ifade edilen tüm bağlantılar gerçekleştirildiğinde su numunelerinde radon konsantrasyonu ölçümü için kullanılan 1098 mL dahili hacimli ölçüm düzeneği hazırlanmış olur.



Şekil 3.11 Sudaki radon ölçüm düzeneği.

3.5. AlphaGUARD PQ 2000PRO ile Sudaki Radon Ölçümü

- 1) Şekil 3.11’de verilen ölçüm düzeneği kurulur.
- 2) AlphaGUARD sayacı açılır ve ölçüm modu ‘1 min FLOW’ olarak seçilir (bu ayarlama AlphaGUARD menüsünden veya AlphaEXPERT yazılımı ile yapılabilir).
- 3) Arıtma şişesini örnekle doldurmadan önce 10 dakika süreyle ölçüm yapılır. Bu ölçüm değeri doğal fon değeri olarak kaydedilir (bu değer (3.1) eşitliğindeki C_0 değeridir).
- 4) Arıtma ve güvenlik şişelerinin başlıkları saat 3 konumuna getirilir.

- 5) Plastik enjektör, ölçümü yapılacak su örneği ile doldurulur.
- 6) Enjektör arıtma şişesinin düşey bağlantı başlığına takılır ve 100 mL'lik numune yavaşça arıtma şişesi içine boşaltılır.
- 7) Arıtma ve güvenlik şişelerinin saat 3 konumundaki başlıkları hızlı şekilde saat 6 konumuna getirilir. Böylece kapalı gaz çevrimi elde edilmiş olur.
- 8) Plastik enjektör, arıtma şişesinin düşey bağlantı başlığından çıkarılır.
- 9) Pompanın (AlphaPUMP) performans seviyesi '0.3 L/min' hava akış oranına ayarlanır ve pompa açılır. Böylece ölçüm başlar.
- 10) 10 dakikalık döngü işleminden sonra pompa kapatılır, fakat AlphaGUARD cihazı radon ölçümünün devam etmesi için 20 dakika daha açık bırakılır.
- 11) Ölçümü yapılan su örneği arıtma şişesi içinden boşaltılır ve düzenek tekrar kurulur. AlphaGUARD'ın arka kısmında bulunan aktif adaptörün tüp bağlantısı kesilir.
- 12) Pompanın performans seviyesi '1 L/min' hava akış oranına ayarlanır ve açılır (ölçüm düzeneği ortam havası ile temizlenir).
- 13) Ölçüm düzeneğinin temizlenme işlemi radon değeri ortam konsantrasyonuna erişinceye kadar devam eder. Bu aşamadan sonra başka bir örnek için ölçüm prosedürü başlatılabilir.
- 14) Ölçüm boyunca depolanan verilerin bilimsel yorumlarının yapılabilmesi için AlphaGUARD bilgisayara bağlanır ve veri analiz yazılımı (AlphaEXPERT) ile birlikte çalışır.

3.6 Sudaki Radon Hesaplamaları

Su örneklerindeki radon konsantrasyonu hesabı radon cihazında belirtilen radon konsantrasyonu üzerine kurulur. Yani ölçüm değeri, örneğin gerçek radon konsantrasyonu değildir. Çünkü su içindeki radon, dedektör içine düzenek içindeki hava ile sürüklenmektedir ve havanın da bu değere katkısı gerçekleşmektedir. Bu nedenle numunenin içindeki radon konsantrasyonu hesabı aşağıdaki eşitlik kullanılarak yapılır.

$$C_{water} = \frac{C_{air} \left(\frac{V_{system} - V_{sample}}{V_{sample}} + k \right) - C_0}{1000} \quad (3.1)$$

Burada,

C_{water} – su örneğinin radon konsantrasyonu (Bq/L);

C_{air} – ölçüm sonucunda cihazda belirtilen konsantrasyon değeri (Bq/m³);

C_0 – arka plan (doğal fon) konsantrasyonu (Bq/m³);

V_{system} – ölçüm düzeneğinin dahili hacmi (mL);

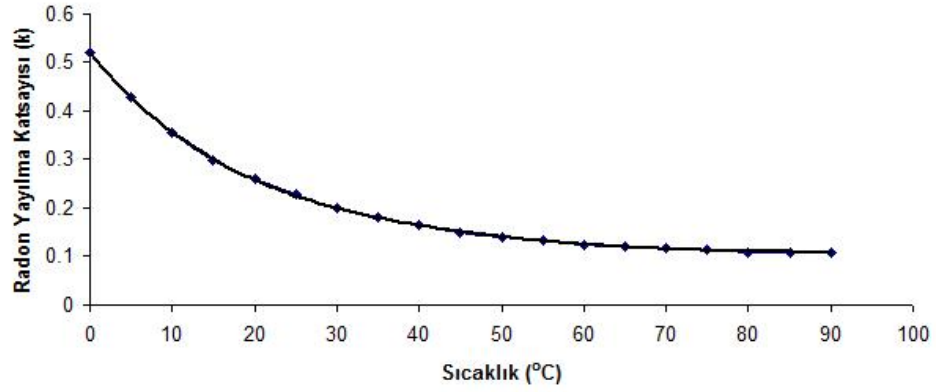
V_{sample} – su örneğinin hacmi (mL); ve

k - radon yayılma katsayısı'dır.

Radon yayılma katsayısı (k), sıcaklığa bağlı olarak değişim göstermekte ve artan sıcaklık değerlerine karşılık azalmaktadır (Şekil 3.12). Bunun nedeni sıcaklık artışı ile radon gazının sıvı fazdan gaz faza geçişinin hız kazanmasıdır. Burada k ,

$$k = \frac{\text{Sıvı Fazdaki Konsantrasyon Değeri}}{\text{Gaz Fazdaki Konsantrasyon Değeri}}$$

olarak tanımlanır.



Şekil 3.12 Radon yayılma katsayısının (k) değişim grafiği.

3.6.1 Ortalama radon konsantrasyonu hesaplamaları

Belirli zaman aralıklarında her kaynak için 3 numune alındı. Bu numuneler için ortalama radon konsantrasyonu değerleri (3.2) denklemiyle hesaplandı.

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^N \frac{x_i}{N} \quad (3.2)$$

3.6.2 Standart hata

Hesaplanan ortalama değerlerin standart hata hesabını bulmak amacıyla standart sapma hesaplamaları

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1}} \quad (3.3)$$

denklemleri kullanılarak yapıldı. Standart sapma hesaplandıktan sonra, ortalama değerlerin standart hata hesabı

$$S.H. = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad (3.4)$$

denklemleri kullanılarak yapıldı.

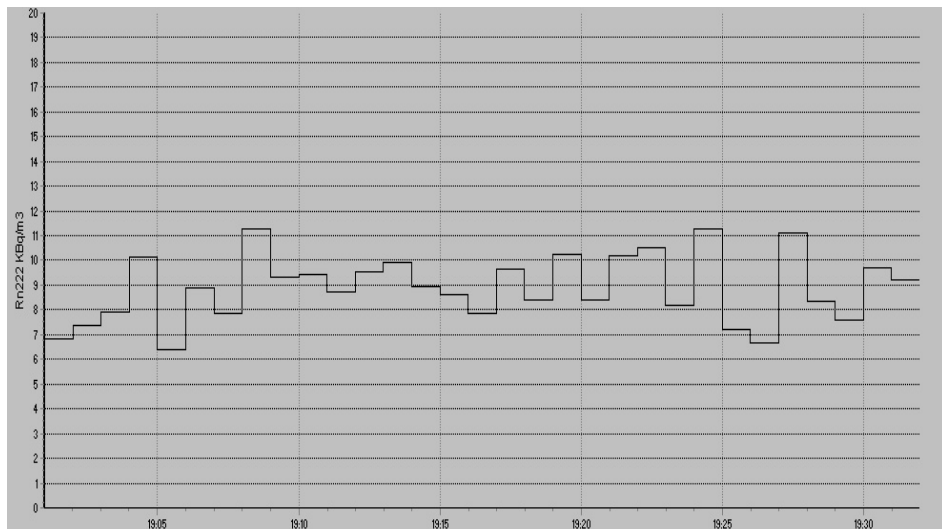
4. ARAŞTIRMA VE SONUÇLAR

Bursa'da Çekirge bölgesinden alınan termal su numuneleri için, AlphaGUARD PQ 2000PRO radon dedektörü kullanılarak gerçekleştirilen ölçümlere ait veriler; grafikler ve tablolar halinde verilmiştir. Her bir su numunesi için elde edilmiş olan veri seti; ^{222}Rn konsantrasyonu, sıcaklık, basınç ve bağıl nem parametrelerinden oluşmaktadır. ^{222}Rn konsantrasyonu ve iklimsel parametreler ayrı ayrı pencerelerde olmak üzere grafiksel olarak verilmiştir.

Her bir kaynaktan 3 adet 500 mL'lik su numunesi alınmış ve ölçümler 3 kez tekrarlanmıştır. Her ölçümden önce 10 dakikalık süre ile doğal fon (C_0) ölçümleri yapılmış ve 10 dakikalık ortalama değerler kaydedilmiştir.

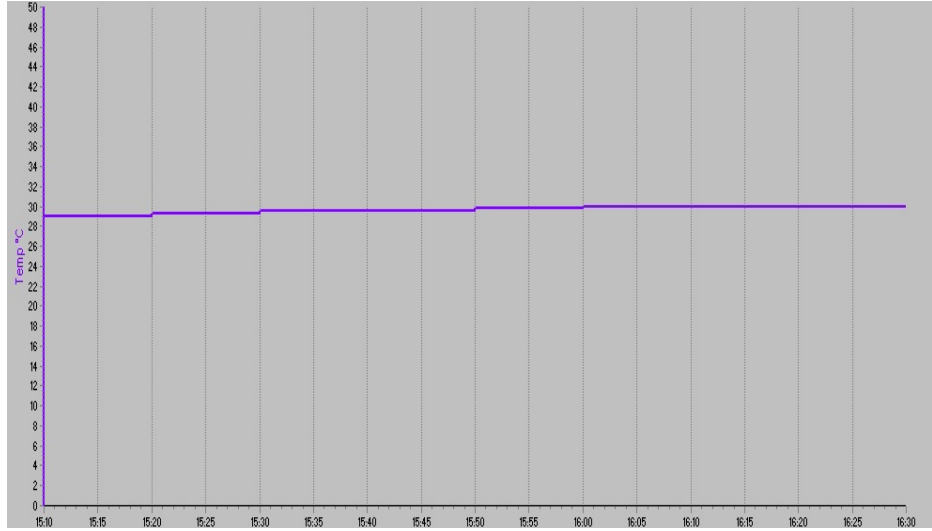
4.1. AlphaGUARD Dedektörü İle Yapılan Ölçümler

Şekil 4.1'de ölçümler sonunda AlphaGUARD için geliştirilmiş olan AlphaEXPERT yazılımında elde edilen grafiklerden bir örnek verilmiştir. Grafikte x eksenini zamanı saat cinsinden, y eksenini ise ^{222}Rn konsantrasyonunu Bq/m^3 biriminde göstermektedir.



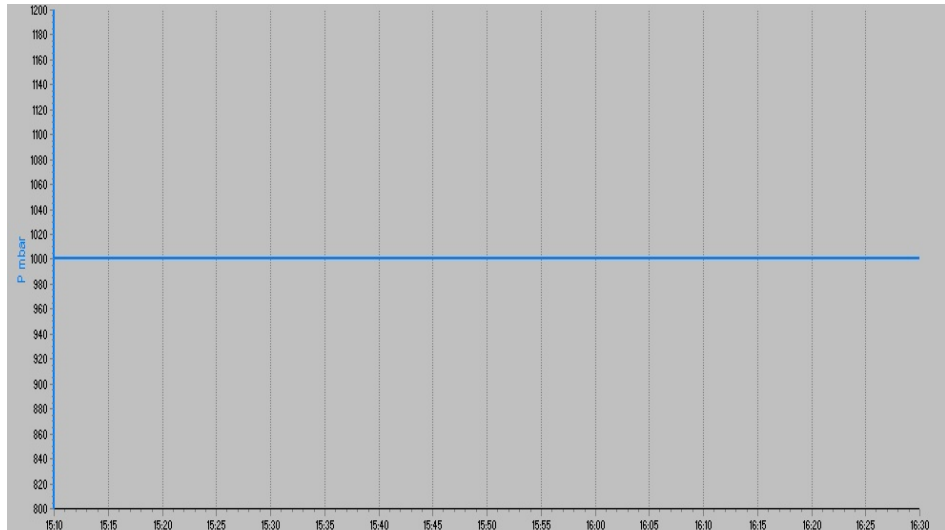
Şekil 4.1 ^{222}Rn konsantrasyonu ölçümü örnek grafiği.

Şekil 4.2’de ölçümler sırasında elde edilen sıcaklık verilerinin zamana karşı grafiklerinden bir örnek görülmektedir. x eksenini saat cinsinden zaman, y eksenini ise santigrad derece cinsinden sıcaklıktır.



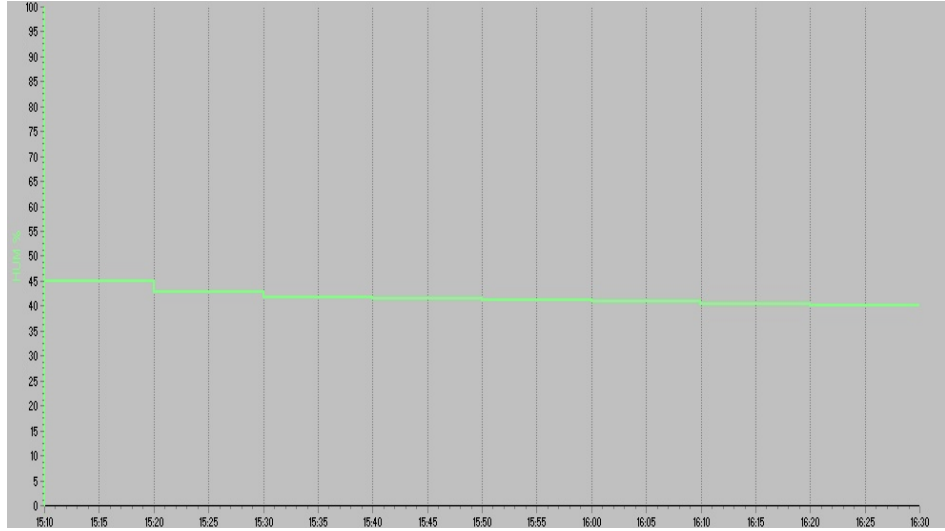
Şekil 4.2 Sıcaklık ölçümü örnek grafiği.

Şekil 4.3’te ölçümler sırasında elde edilen atmosferik basınç verilerinin zamana karşı grafiklerinden bir örnek görülmektedir. x eksenini saat cinsinden zaman, y eksenini ise mbar olarak verilmiştir.



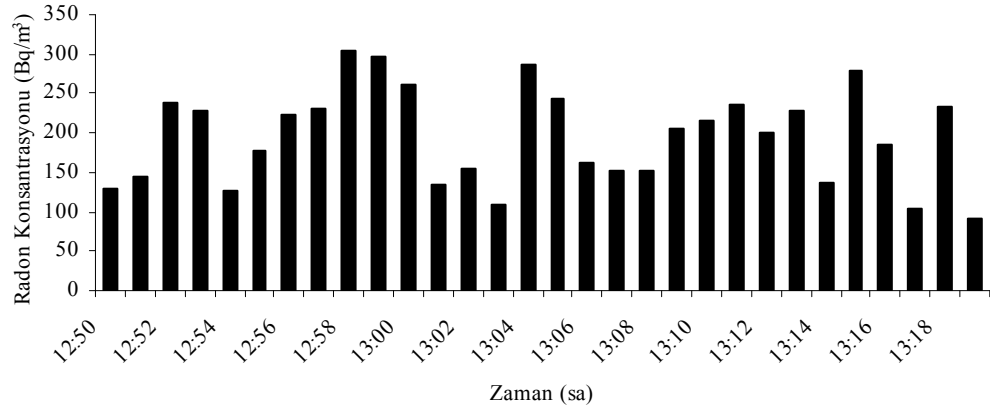
Şekil 4.3 Basınç ölçümü örnek grafiği.

Şekil 4.4'te ölçümler sırasında elde edilen bağıl nem verilerinin zamana karşı grafiklerinden bir örnek görülmektedir. x eksenini saat cinsinden zaman, y eksenini ise % rH olarak vermiştir.

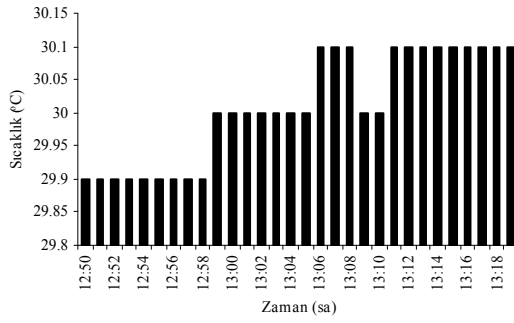


Şekil 4.4 Bağıl nem ölçümü örnek grafiği.

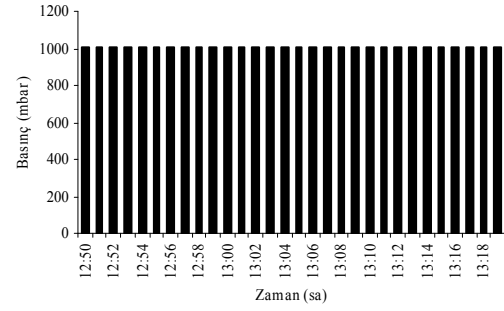
Çekirge bölgesinde termal suların çeşitli amaçlarla kullanıldığı kaplıca, termal banyo ve termal otel gibi 12 farklı kaynaktan (Şekil 3.1) 18 Temmuz 2008-22 Ocak 2009 tarihleri arasında yapılan örneklemelemlerde alınan su numunelerine ait verilerin grafiklerinin yanı sıra tablo halinde ortalama değerleri Şekil 4.5-Şekil 4.40'ta verilmiştir.



(a)



(b)



(c)

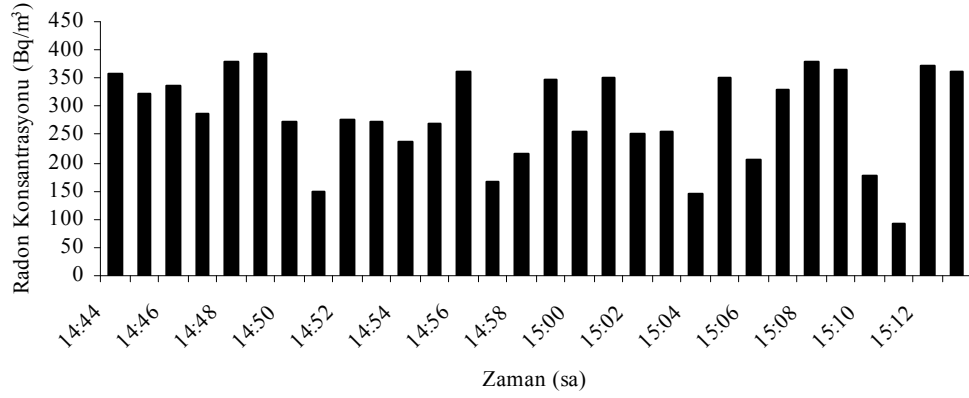


(d)

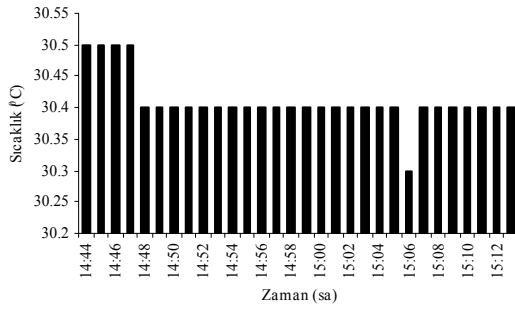
Parametre	Ortalama
Doğal Fon (C_0) (Bq/m^3)	44.949
^{222}Rn (Bq/m^3)	195.57
Sıcaklık ($^{\circ}C$)	30.01
Basınç (mbar)	1002
Bağıl Nem (% rH)	43.28

(e)

Şekil 4.5 1 nolu kaynağa ait 1. numunenin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem ölçümleri; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri.



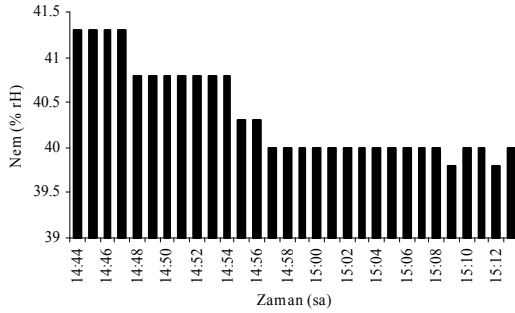
(a)



(b)



(c)

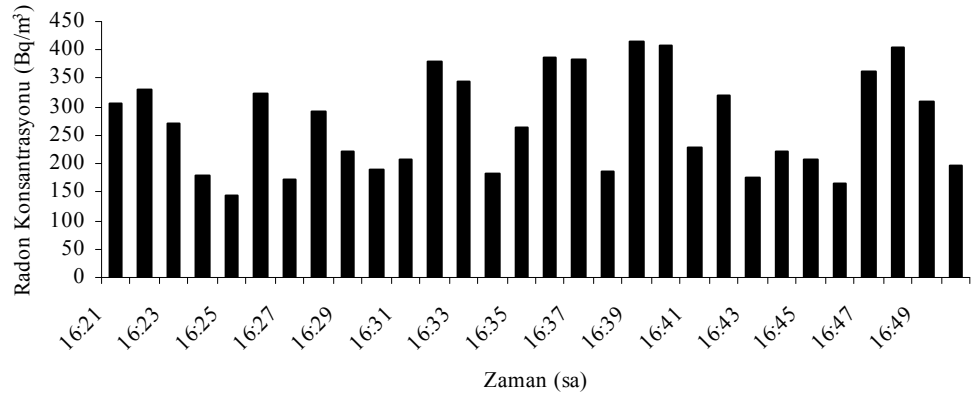


(d)

Parametre	Ortalama
Doğal Fon (C_0) (Bq/m^3)	32.225
^{222}Rn (Bq/m^3)	284.3
Sıcaklık (°C)	30.41
Basınç (mbar)	1001
Bağıl Nem (% rH)	40.37

(e)

Şekil 4.6 1 nolu kaynağa ait 2. numunenin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem ölçümleri; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri.

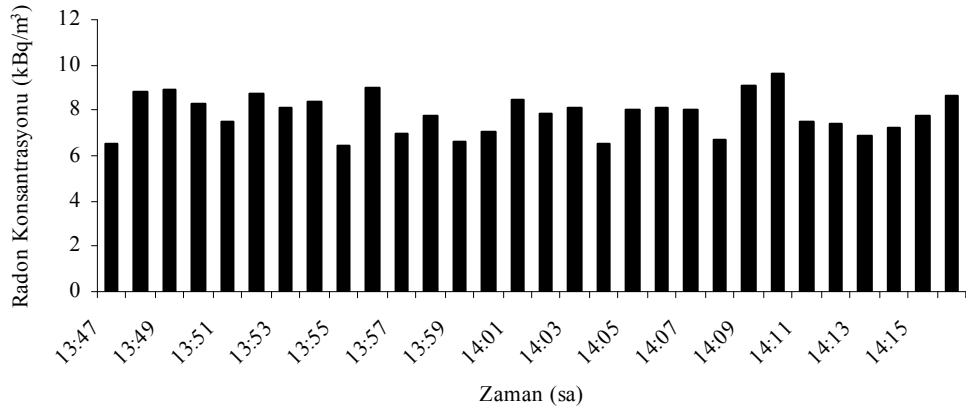


(a)

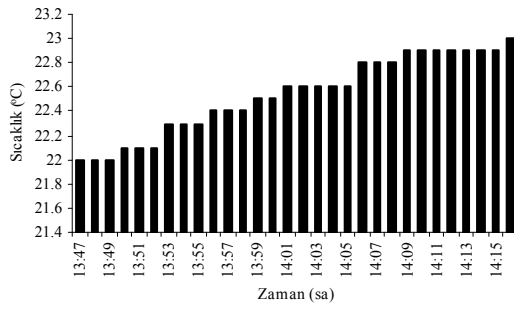
Parametre	Ortalama
Doğal Fon (C_0) (Bq/m^3)	36.64
^{222}Rn (Bq/m^3)	272.38
Sıcaklık ($^{\circ}C$)	30.3
Basmç (mbar)	1000
Bağıl Nem (% rH)	40.1

(b)

Şekil 4.7 1 nolu kaynağa ait 3. numunenin (a) Radon konsantrasyonu ölçümü; (b) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri.



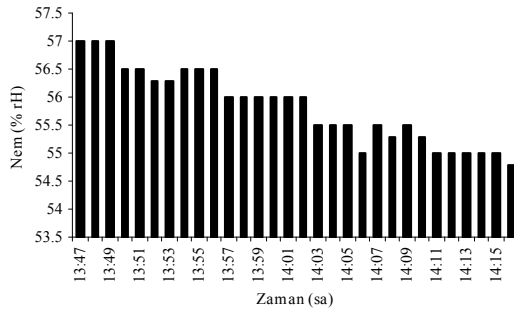
(a)



(b)



(c)

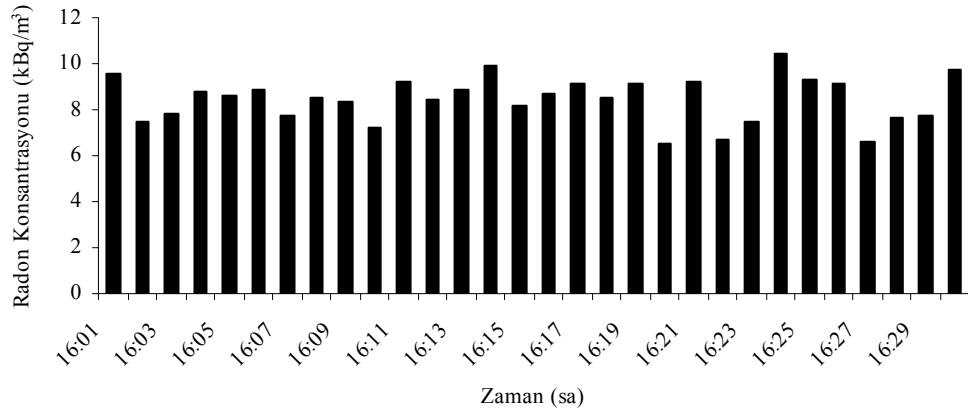


(d)

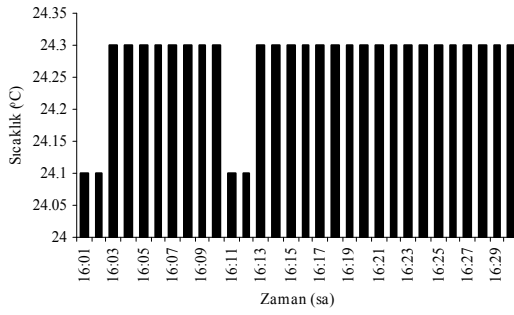
Parametre	Ortalama
Doğal Fon (C_0) (Bq/m^3)	13.23
^{222}Rn (kBq/m^3)	7.835
Sıcaklık ($^{\circ}C$)	22.54
Basınç (mbar)	1011
Bağıl Nem (% rH)	55.83

(e)

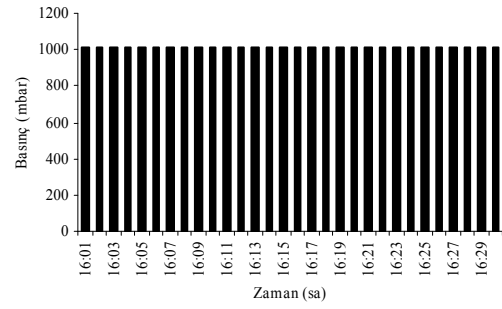
Şekil 4.8 2 nolu kaynağa ait 1. numunenin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem ölçümleri; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri.



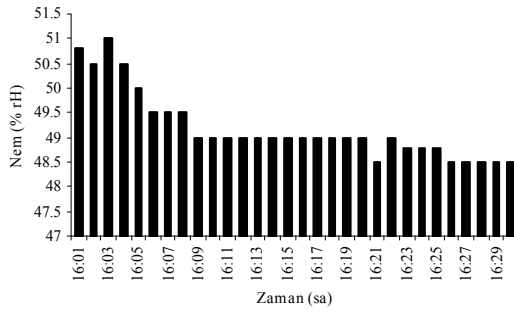
(a)



(b)



(c)

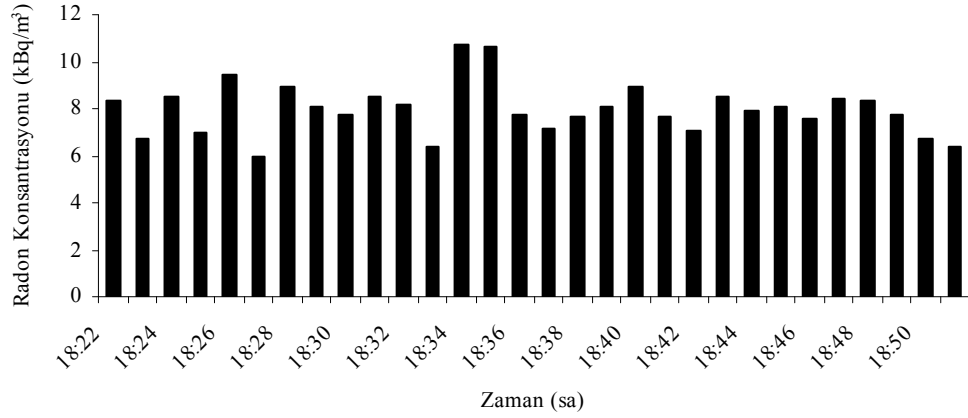


(d)

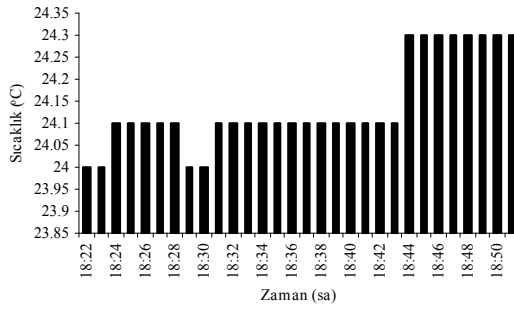
Parametre	Ortalama
Doğal Fon (C_0) (Bq/m^3)	5.13
^{222}Rn (kBq/m^3)	8.457
Sıcaklık (°C)	24.27
Basınç (mbar)	1009
Bağıl Nem (% rH)	49.19

(e)

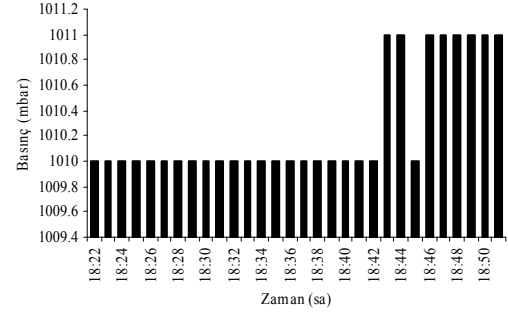
Şekil 4.9 2 nolu kaynağa ait 2. numunenin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem ölçümleri; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri.



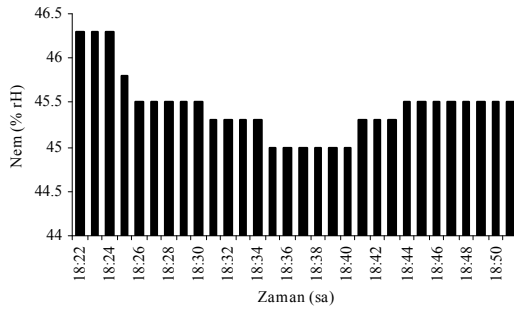
(a)



(b)



(c)

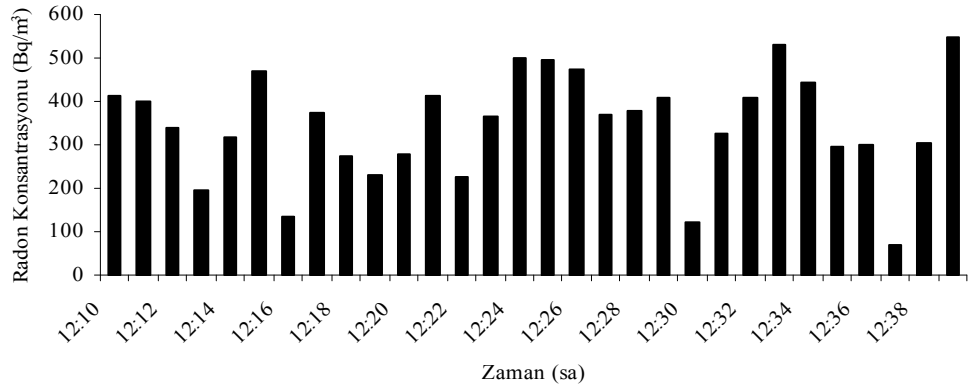


(d)

Parametre	Ortalama
Doğal Fon (C_0) (Bq/m^3)	7.88
^{222}Rn (kBq/m^3)	7.964
Sıcaklık (°C)	24.14
Basınç (mbar)	1010.3
Bağıl Nem (% rH)	45.44

(e)

Şekil 4.10 2 nolu kaynağa ait 3. numunenin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem ölçümleri; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri.

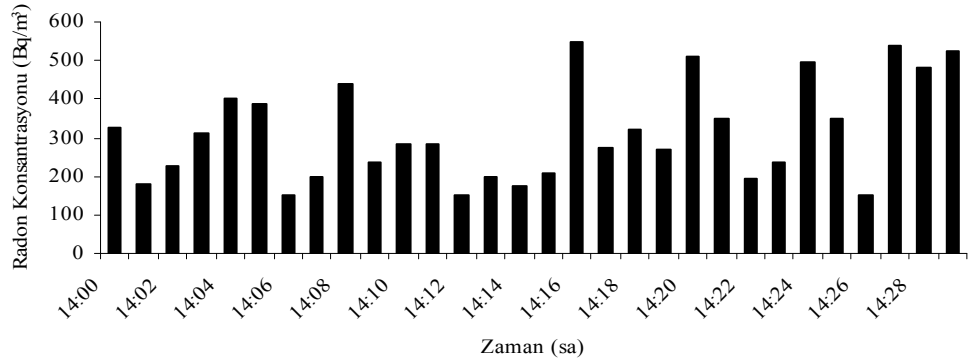


(a)

Parametre	Ortalama
Doğal Fon (C_0) (Bq/m^3)	0.65
^{222}Rn (Bq/m^3)	346.29
Sıcaklık ($^{\circ}C$)	29.6
Basınç (mbar)	998
Bağıl Nem (% rH)	46.2

(b)

Şekil 4.11 3 nolu kaynağa ait 1. numunenin (a) Radon konsantrasyonu ölçümü; (b) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri.



(a)

Parametre	Ortalama
Doğal Fon (C_0) (Bq/m^3)	2.66
^{222}Rn (Bq/m^3)	313.37
Sıcaklık ($^{\circ}C$)	30.6
Basınç (mbar)	997
Bağıl Nem (% rH)	46.18

(b)

Şekil 4.12 3 nolu kaynağa ait 2. numunenin (a) Radon konsantrasyonu ölçümü; (b) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri.

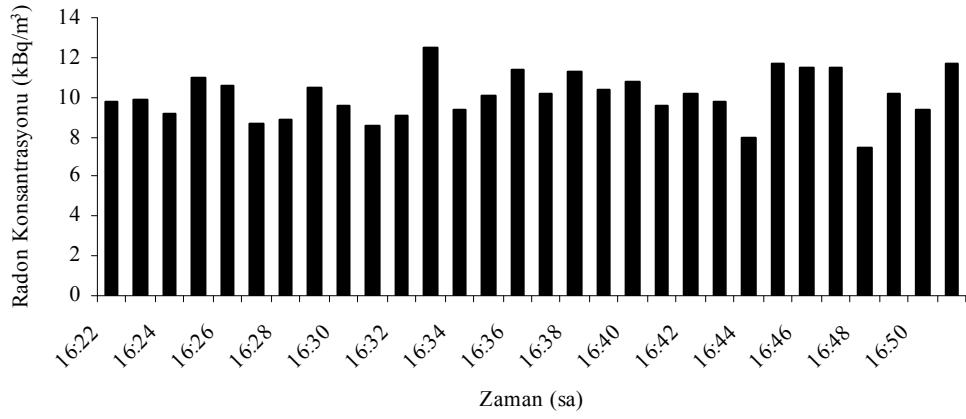


(a)

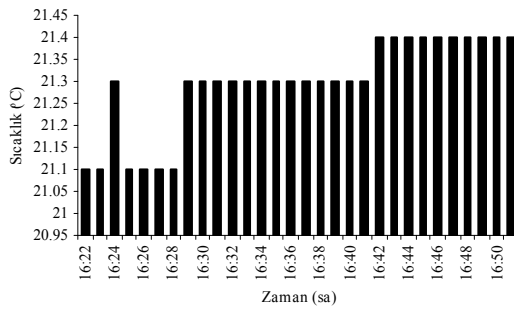
Parametre	Ortalama
Doğal Fon (C_0) (Bq/m ³)	2.43
²²² Rn (Bq/m ³)	317.73
Sıcaklık (°C)	30.6
Basınç (mbar)	997
Bağıl Nem (% rH)	40.9

(b)

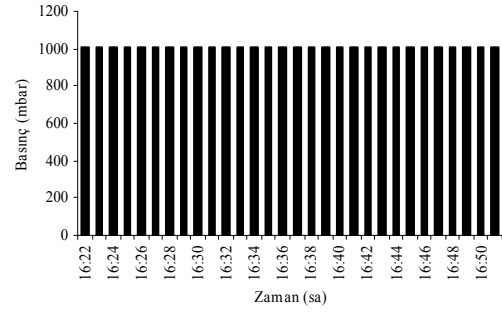
Şekil 4.13 3 nolu kaynağa ait 3. numunenin (a) Radon konsantrasyonu ölçümü; (b) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri.



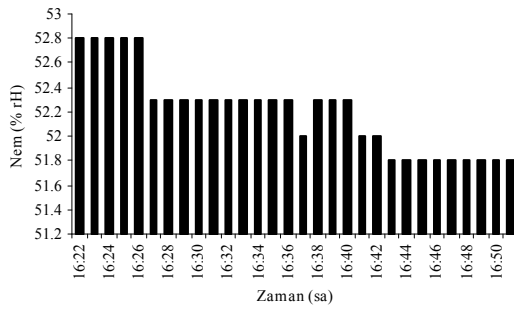
(a)



(b)



(c)

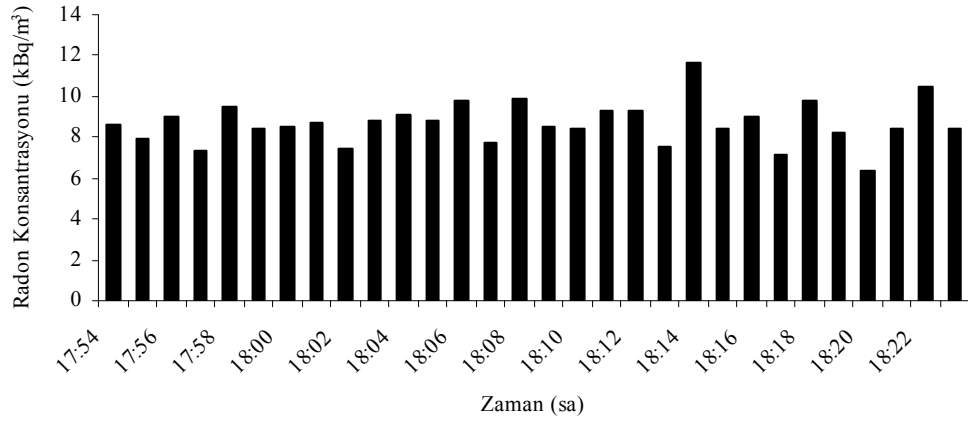


(d)

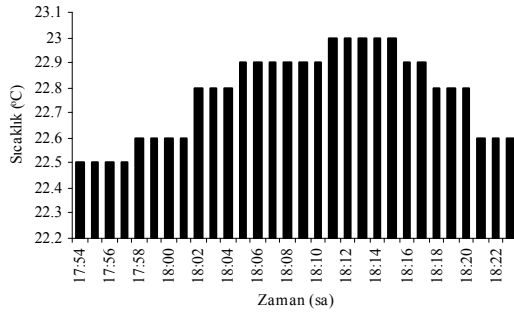
Parametre	Ortalama
Doğal Fon (C_0) ($Bq \cdot m^{-3}$)	62.94
^{222}Rn ($kBq \cdot m^{-3}$)	10.069
Sıcaklık ($^{\circ}C$)	21.3
Basınç (mbar)	1011
Bağıl Nem (% rH)	52.2

(e)

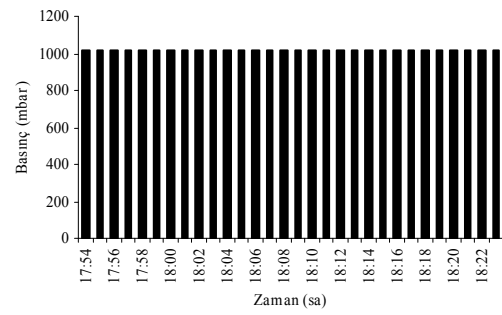
Şekil 4.14 4 nolu kaynağa ait 1. numunenin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem ölçümleri; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri.



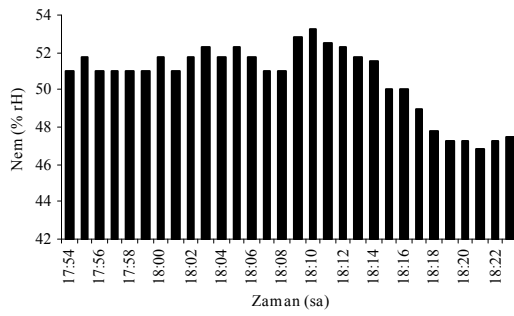
(a)



(b)



(c)

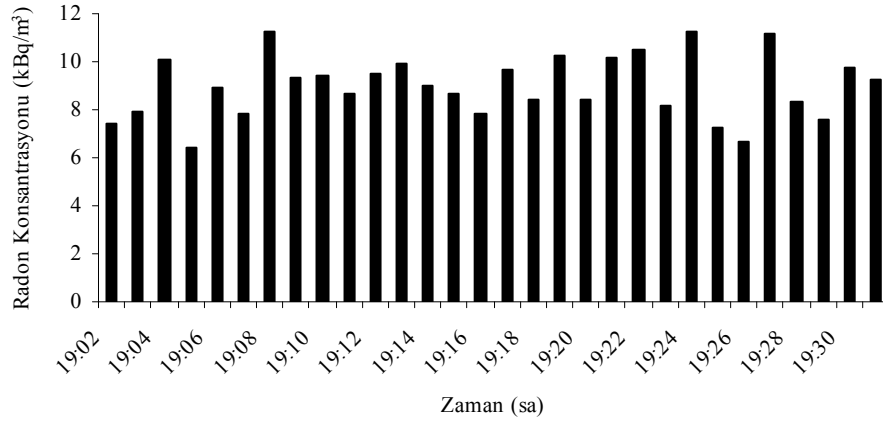


(d)

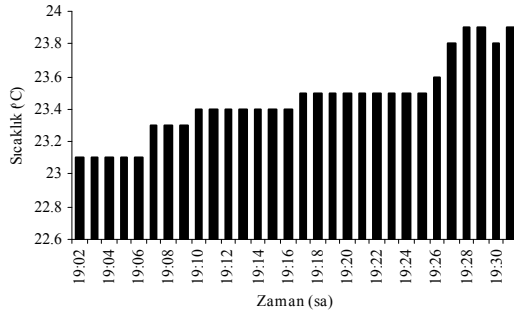
Parametre	Ortalama
Doğal Fon (C_0) (Bq/m^3)	54.89
^{222}Rn (kBq/m^3)	8.683
Sıcaklık (°C)	22.8
Basınç (mbar)	1012
Bağıl Nem (% rH)	50.6

(e)

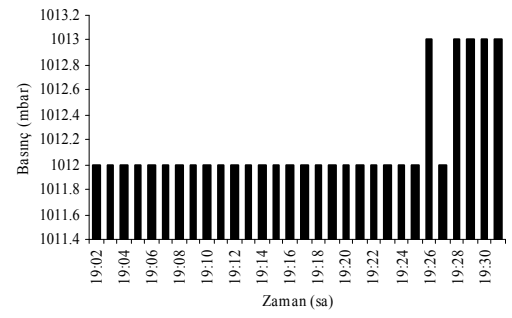
Şekil 4.15 4 nolu kaynağa ait 2. numunenin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem ölçümleri; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri.



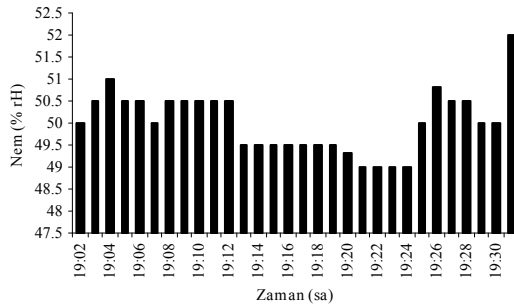
(a)



(b)



(c)



(d)

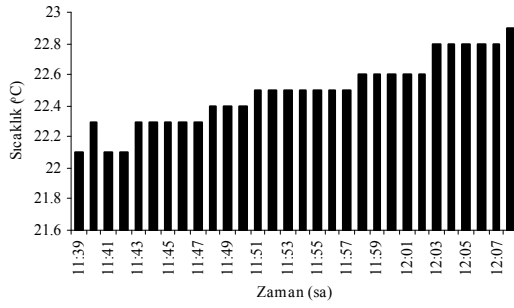
Parametre	Ortalama
Doğal Fon (C_0) ($Bq\ m^{-3}$)	47.05
^{222}Rn ($kBq\ m^{-3}$)	8.962
Sıcaklık ($^{\circ}C$)	23.4
Basınç (mbar)	1012.17
Bağıl Nem (% rH)	50.02

(e)

Şekil 4.16 4 nolu kaynağa ait 3. numunenin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem ölçümleri; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri.



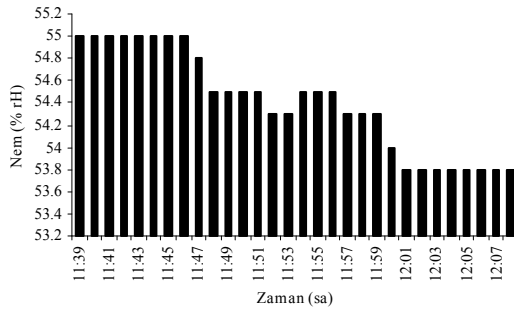
(a)



(b)



(c)

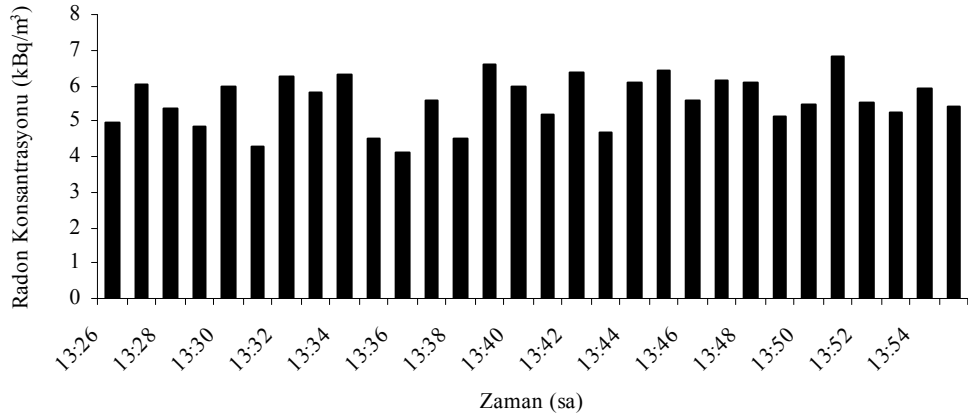


(d)

Parametre	Ortalama
Doğal Fon (C_0) (Bq/m^3)	18.2
^{222}Rn (kBq/m^3)	5.882
Sıcaklık ($^{\circ}C$)	22.5
Basınç (mbar)	1013
Bağıl Nem (% rH)	54.4

(e)

Şekil 4.17 5 nolu kaynağa ait 1. numunenin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem ölçümleri; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri.

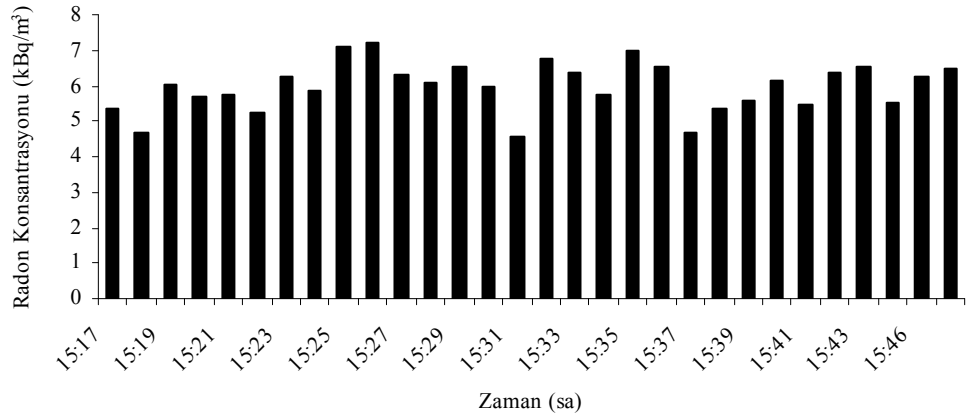


(a)

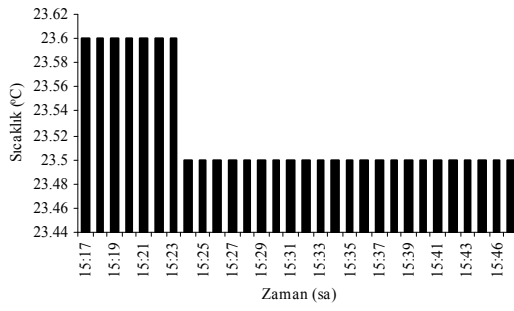
Parametre	Ortalama
Doğal Fon (C_0) (Bq/m^3)	21.90
^{222}Rn (kBq/m^3)	5.572
Sıcaklık ($^{\circ}C$)	23.6
Basınç (mbar)	1012
Bağıl Nem (% rH)	53.0

(b)

Şekil 4.18 5 nolu kaynağa ait 2. numunenin (a) Radon konsantrasyonu ölçümü; (b) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri.



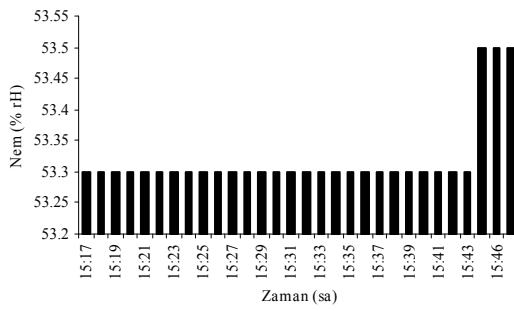
(a)



(b)



(c)



(d)

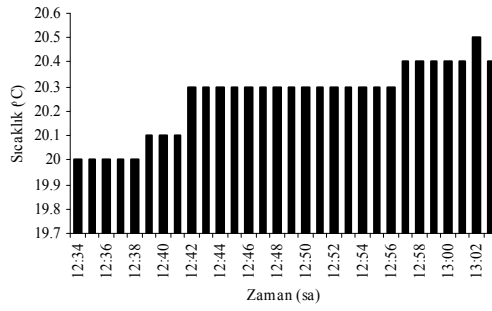
Parametre	Ortalama
Doğal Fon (C_0) (Bq/m^3)	19.98
^{222}Rn (kBq/m^3)	5.976
Sıcaklık ($^{\circ}C$)	23.5
Basınç (mbar)	1011
Bağıl Nem (% rH)	53.3

(e)

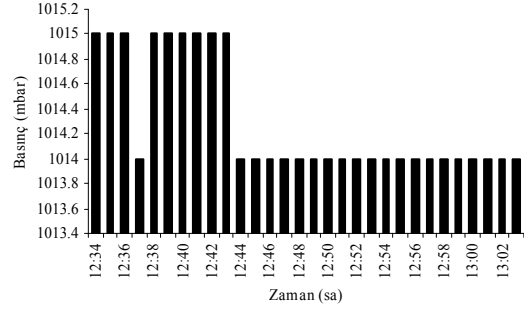
Şekil 4.19 5 nolu kaynağa ait 3. numunenin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem ölçümleri; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri.



(a)



(b)



(c)

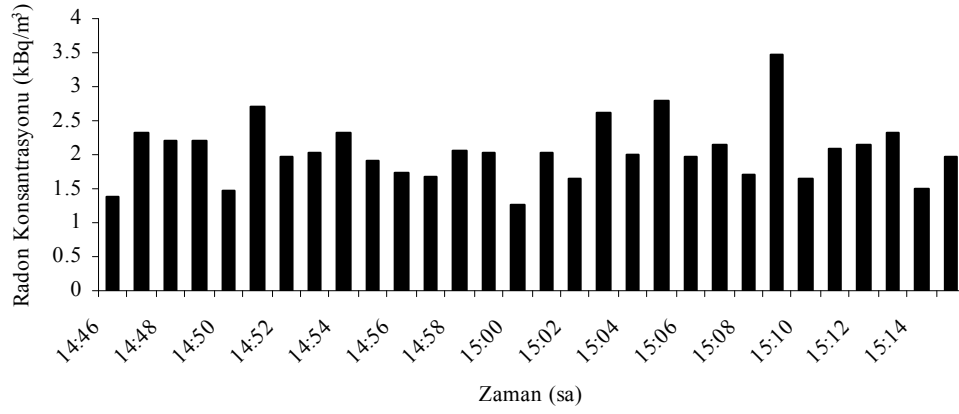


(d)

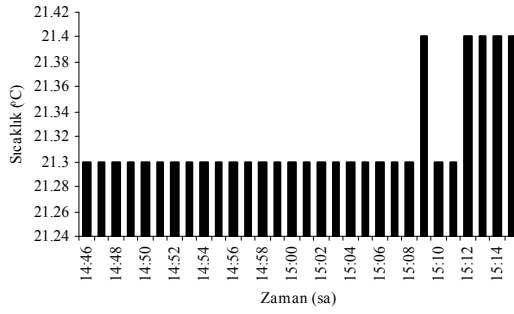
Parametre	Ortalama
Doğal Fon (C_0) (Bq/m^3)	16.63
^{222}Rn (kBq/m^3)	1.336
Sıcaklık ($^{\circ}C$)	20.2
Basınç (mbar)	1014
Bağıl Nem (% rH)	59.1

(e)

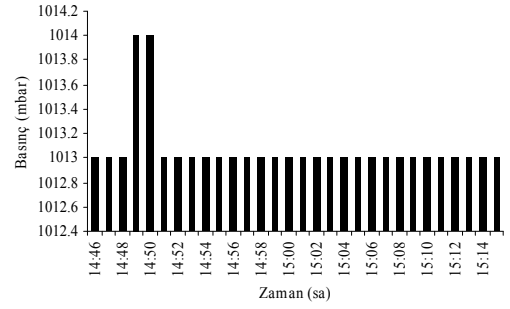
Şekil 4.20 6 nolu kaynağa ait 1. numunenin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem ölçümleri; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri.



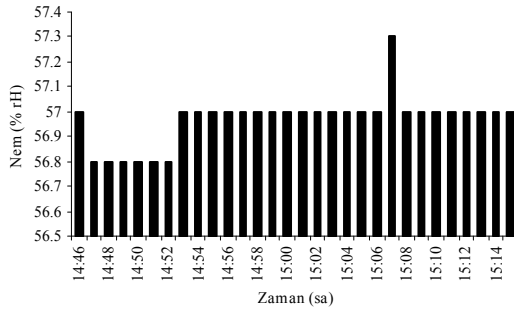
(a)



(b)



(c)

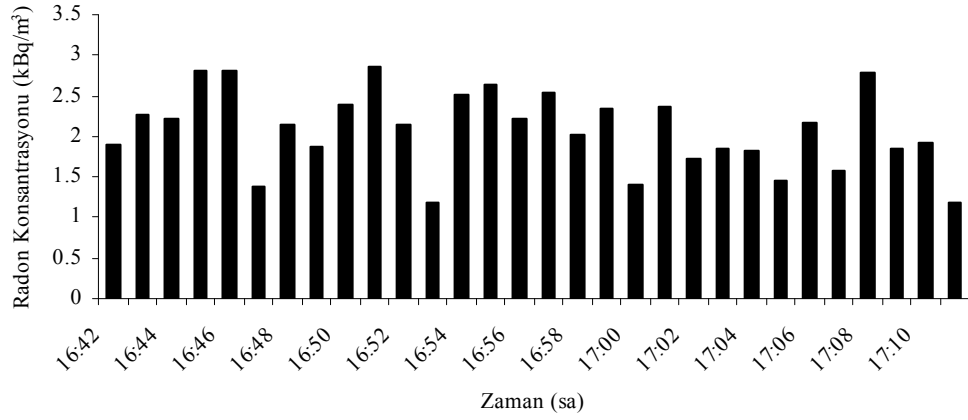


(d)

Parametre	Ortalama
Doğal Fon (C_0) (Bq/m^3)	18.15
^{222}Rn (kBq/m^3)	2.047
Sıcaklık ($^{\circ}C$)	21.3
Basınç (mbar)	1013
Bağıl Nem (% rH)	56.97

(e)

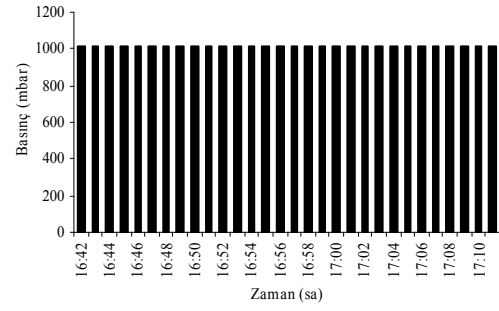
Şekil 4.21 6 nolu kaynağa ait 2. numunenin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem ölçümleri; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri.



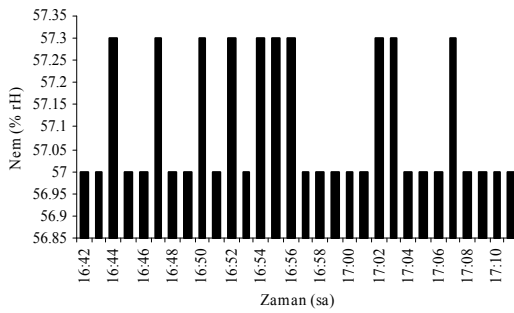
(a)



(b)



(c)



(d)

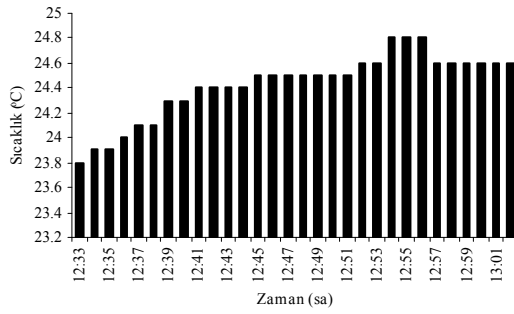
Parametre	Ortalama
Doğal Fon (C_0) ($Bq \cdot m^{-3}$)	17.6
^{222}Rn ($kBq \cdot m^{-3}$)	2.078
Sıcaklık ($^{\circ}C$)	21.4
Basınç (mbar)	1013
Bağıl Nem (% rH)	55.2

(e)

Şekil 4.22 6 nolu kaynağa ait 3. numunenin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem ölçümleri; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri.



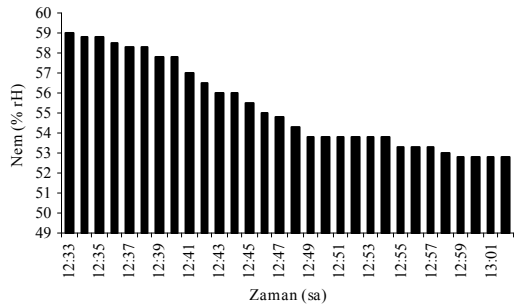
(a)



(b)



(c)

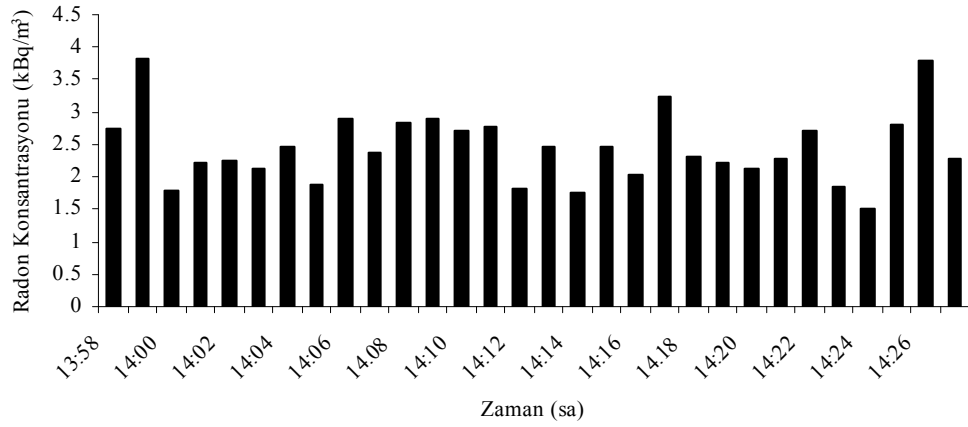


(d)

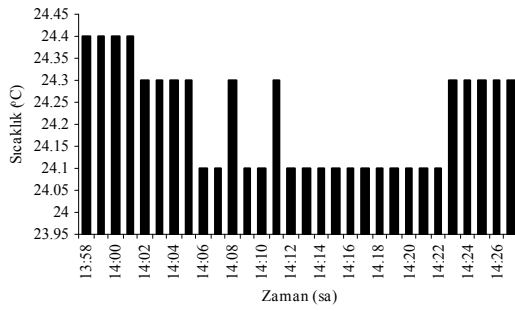
Parametre	Ortalama
Doğal Fon (C_0) (Bq/m^3)	16.35
^{222}Rn (kBq/m^3)	1.651
Sıcaklık ($^{\circ}C$)	24.4
Basınç (mbar)	1006
Bağıl Nem (% rH)	55.3

(e)

Şekil 4.23 7 nolu kaynağa ait 1. numunenin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem ölçümleri; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri.



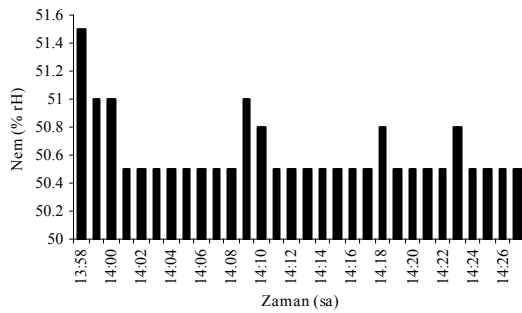
(a)



(b)



(c)



(d)

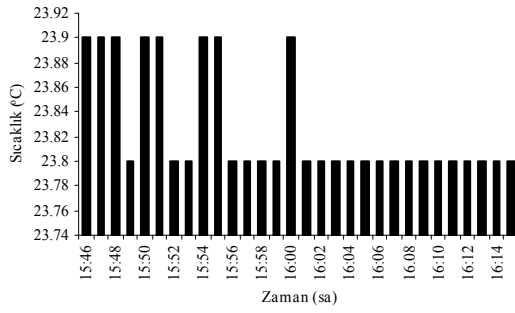
Parametre	Ortalama
Doğal Fon (C_0) (Bq/m^3)	15.58
^{222}Rn (kBq/m^3)	2.451
Sıcaklık ($^{\circ}C$)	24.2
Basınç (mbar)	1005
Bağıl Nem (% rH)	50.6

(e)

Şekil 4.24 7 nolu kaynağa ait 2. numunenin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem ölçümleri; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri.



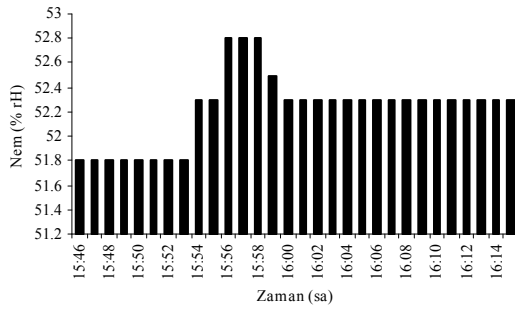
(a)



(b)



(c)

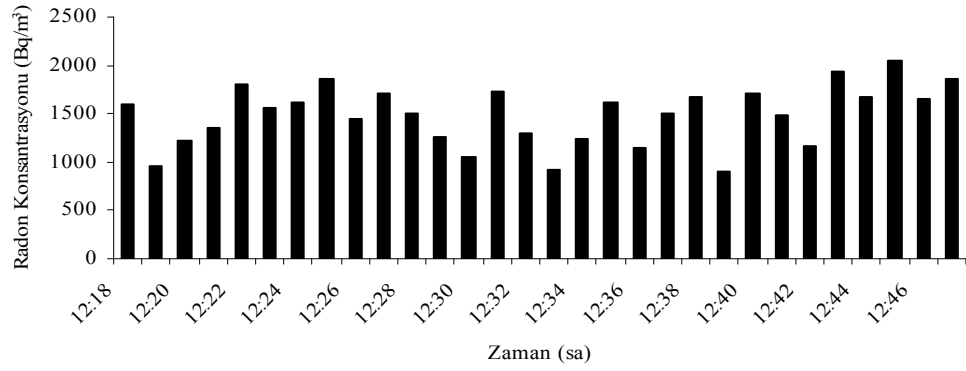


(d)

Parametre	Ortalama
Doğal Fon (C_0) (Bq/m^3)	14.55
^{222}Rn (kBq/m^3)	2.686
Sıcaklık ($^{\circ}C$)	23.8
Basınç (mbar)	1004
Bağıl Nem (% rH)	52.2

(e)

Şekil 4.25 7 nolu kaynağa ait 3. numunenin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem ölçümleri; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri.

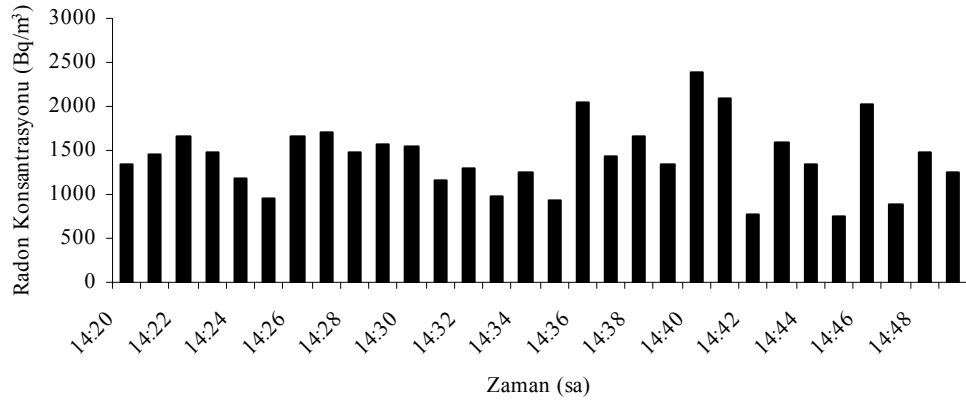


(a)

Parametre	Ortalama
Doğal Fon (C_0) (Bq/m ³)	16.60
²²² Rn (Bq/m ³)	1483.38
Sıcaklık (°C)	30
Basınç (mbar)	1000
Bağıl Nem (% rH)	46

(b)

Şekil 4.26 8 nolu kaynağa ait 1. numunenin (a) Radon konsantrasyonu ölçümü; (b) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri.

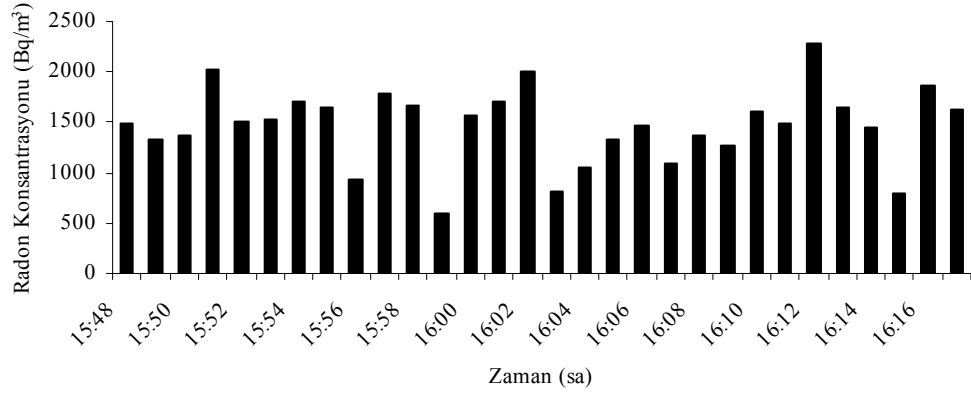


(a)

Parametre	Ortalama
Doğal Fon (C_0) (Bq/m ³)	15.54
²²² Rn (Bq/m ³)	1423
Sıcaklık (°C)	31
Basınç (mbar)	1001
Bağıl Nem (% rH)	43

(b)

Şekil 4.27 8 nolu kaynağa ait 2. numunenin (a) Radon konsantrasyonu ölçümü; (b) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri.

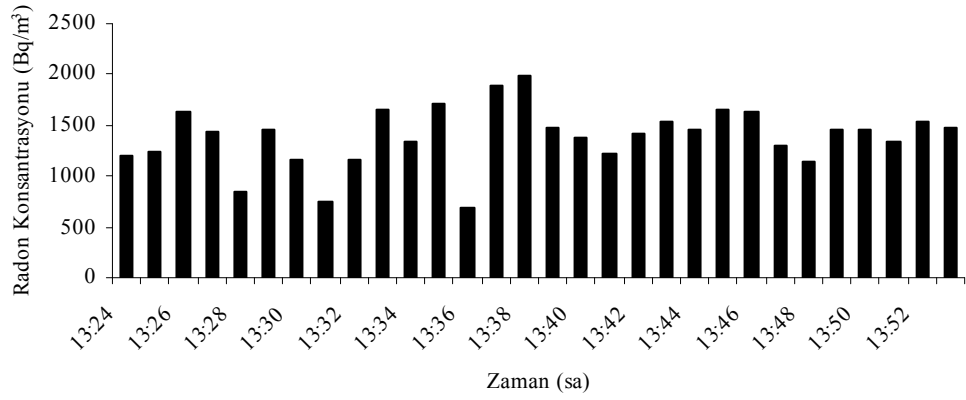


(a)

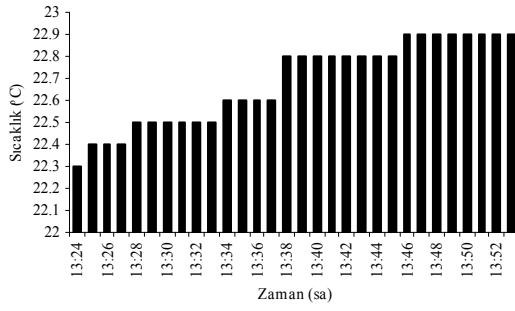
Parametre	Ortalama
Doğal Fon (C_0) (Bq/m ³)	14.453
²²² Rn (Bq/m ³)	1412.40
Sıcaklık (°C)	31
Basınç (mbar)	1000
Bağıl Nem (% rH)	44

(b)

Şekil 4.28 8 nolu kaynağa ait 3. numunenin (a) Radon konsantrasyonu ölçümü; (b) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri.



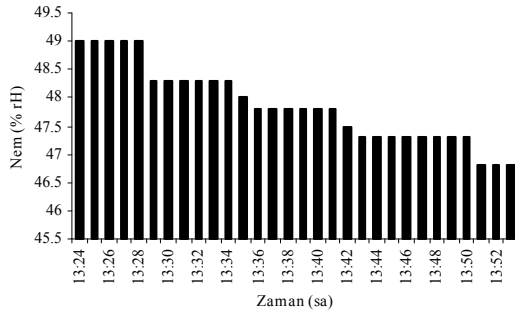
(a)



(b)



(c)

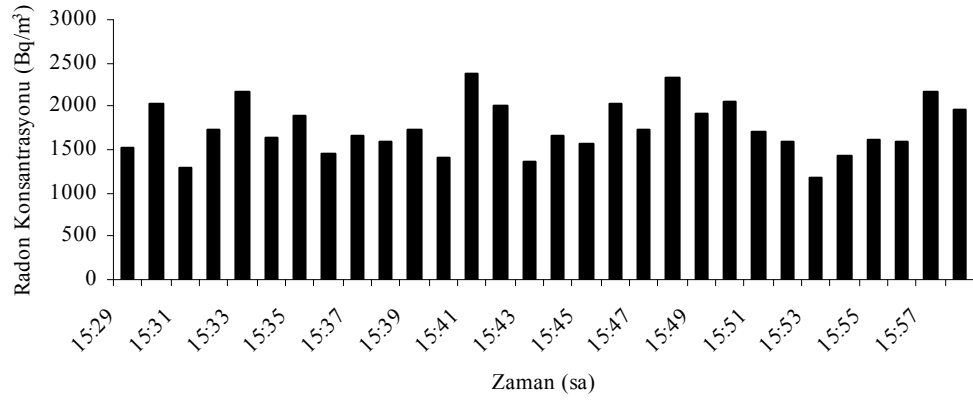


(d)

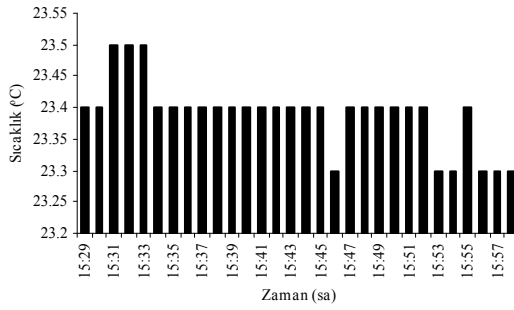
Parametre	Ortalama
Doğal Fon (C_0) ($Bq \cdot m^{-3}$)	28.298
^{222}Rn ($Bq \cdot m^{-3}$)	1387.15
Sıcaklık (°C)	22.6
Basınç (mbar)	1005
Bağıl Nem (% rH)	47.9

(e)

Şekil 4.29 9 nolu kaynağa ait 1. numunenin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem ölçümleri; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri.



(a)



(b)



(c)

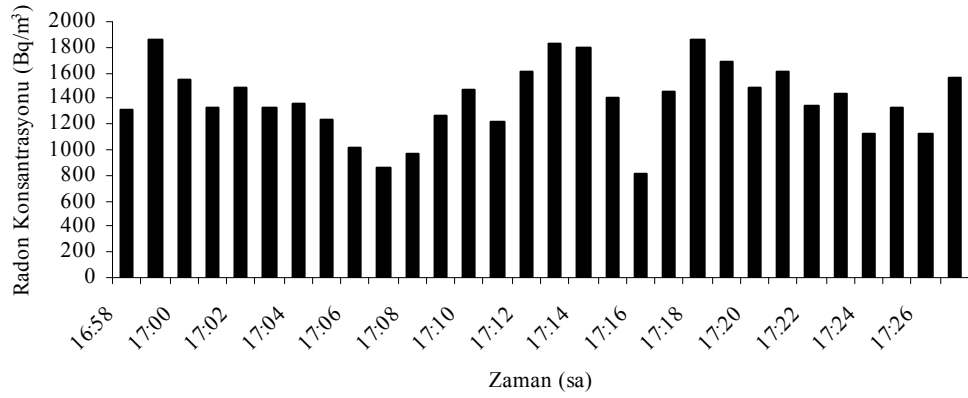


(d)

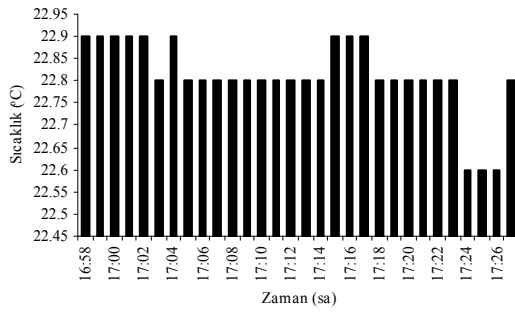
Parametre	Ortalama
Doğal Fon (C ₀) (Bq/m ³)	29.54
²²² Rn (Bq/m ³)	1746.93
Sıcaklık (°C)	23.4
Basınç (mbar)	1003
Bağıl Nem (% rH)	43.7

(e)

Şekil 4.30 9 nolu kaynağa ait 2. numunenin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem ölçümleri; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri.



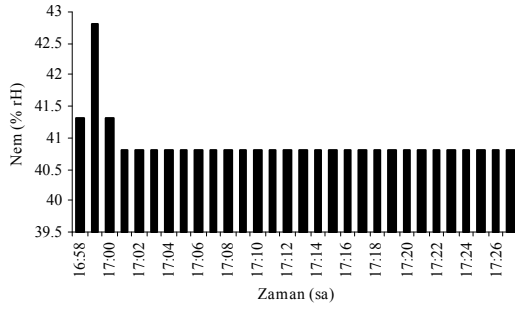
(a)



(b)



(c)

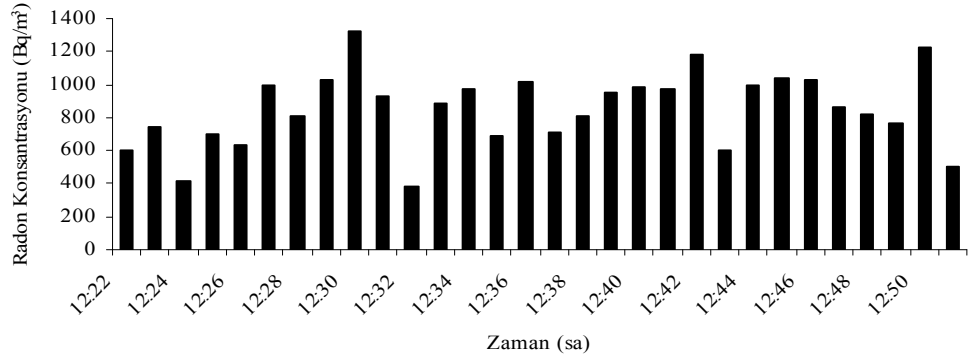


(d)

Parametre	Ortalama
Doğal Fon (C_0) ($Bq \cdot m^{-3}$)	25.35
^{222}Rn ($Bq \cdot m^{-3}$)	1390.73
Sıcaklık ($^{\circ}C$)	22.8
Basınç (mbar)	1003
Bağıl Nem (% rH)	40.9

(e)

Şekil 4.31 9 nolu kaynağa ait 3. numunenin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem ölçümleri; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri.

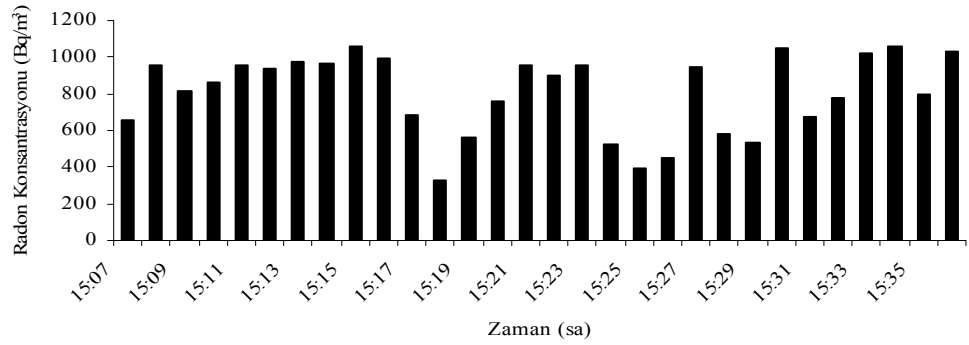


(a)

Parametre	Ortalama
Doğal Fon (C_0) (Bq/m ³)	27.69
²²² Rn (Bq/m ³)	853.03
Sıcaklık (°C)	30
Basınç (mbar)	995
Bağıl Nem (% rH)	47

(b)

Şekil 4.32 10 nolu kaynağa ait 1. numunenin (a) Radon konsantrasyonu ölçümü; (b) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri.

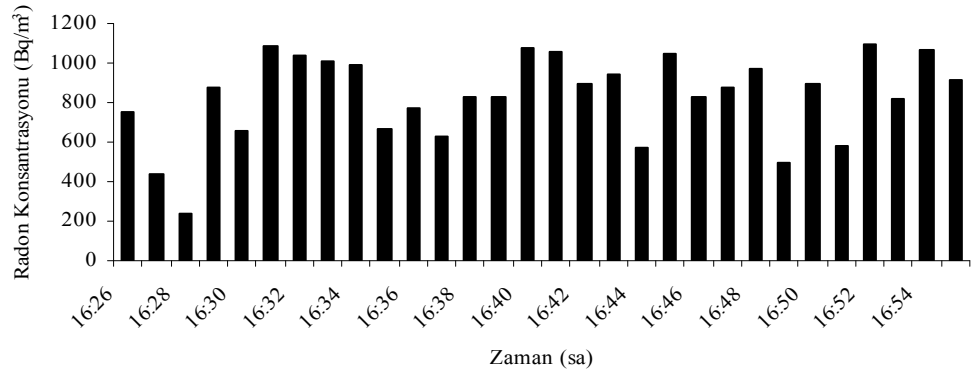


(a)

Parametre	Ortalama
Doğal Fon (C_0) (Bq/m ³)	27.80
²²² Rn (Bq/m ³)	806.18
Sıcaklık (°C)	31
Basınç (mbar)	994
Bağıl Nem (% rH)	42

(b)

Şekil 4.33 10 nolu kaynağa ait 2. numunenin (a) Radon konsantrasyonu ölçümü; (b) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri.

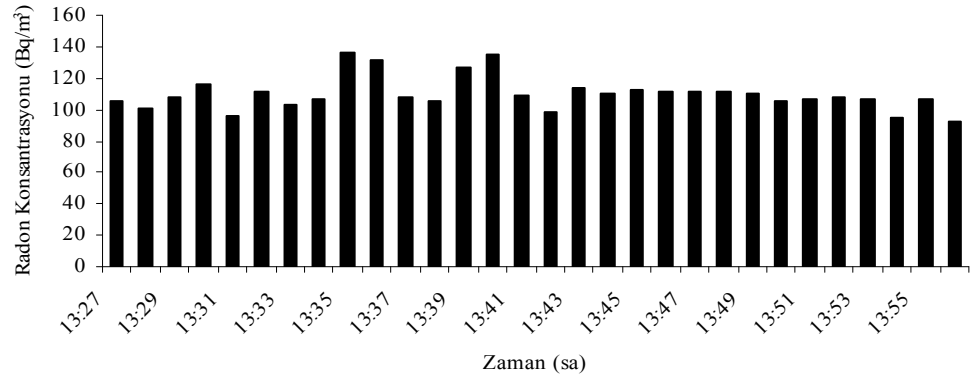


(a)

Parametre	Ortalama
Doğal Fon (C_0) (Bq/m^3)	25.45
^{222}Rn (Bq/m^3)	831.56
Sıcaklık ($^{\circ}C$)	31
Basınç (mbar)	994
Bağıl Nem (% rH)	37

(b)

Şekil 4.34 10 nolu kaynağa ait 3. numunenin (a) Radon konsantrasyonu ölçümü; (b) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri.

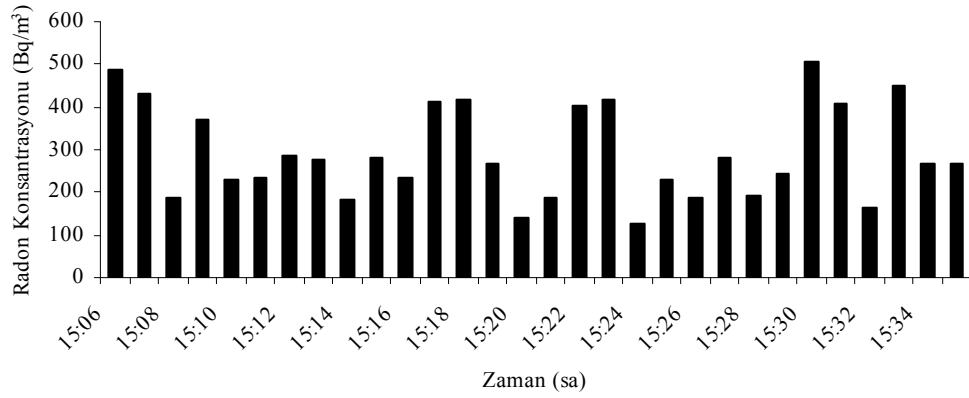


(a)

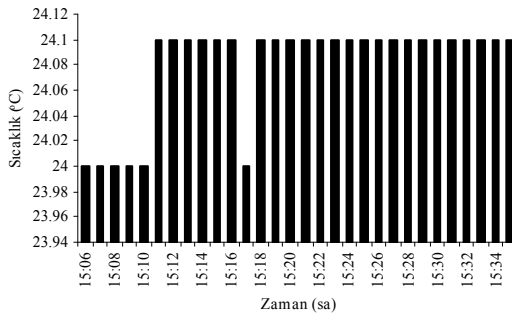
Parametre	Ortalama
Doğal Fon (C_0) (Bq/m^3)	0.75
^{222}Rn (Bq/m^3)	110.06
Sıcaklık ($^{\circ}C$)	22.9
Basınç (mbar)	1002
Bağıl Nem (% rH)	40.7

(b)

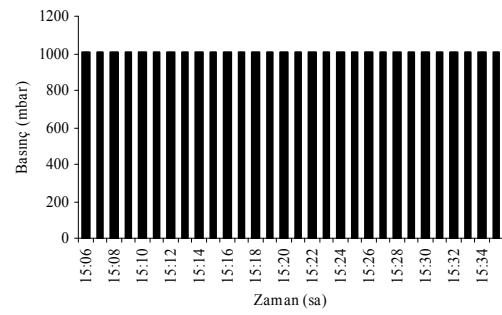
Şekil 4.35 11 nolu kaynağa ait 1. numunenin (a) Radon konsantrasyonu ölçümü; (b) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri.



(a)



(b)



(c)



(d)

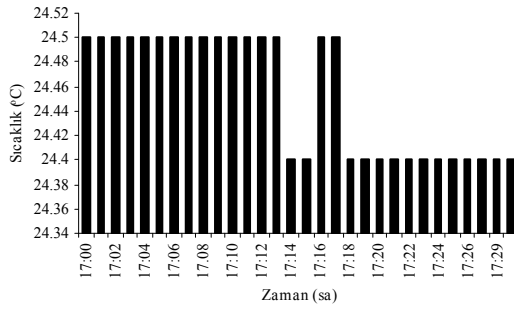
Parametre	Ortalama
Doğal Fon (C_0) ($Bq\ m^{-3}$)	2.58
^{222}Rn ($Bq\ m^{-3}$)	292.45
Sıcaklık (°C)	24.1
Basınç (mbar)	1002
Bağıl Nem (% rH)	40.8

(e)

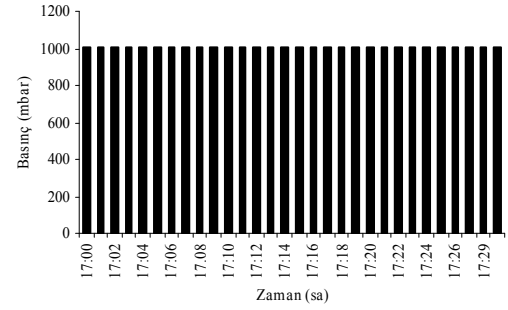
Şekil 4.36 11 nolu kaynağa ait 2. numunenin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem ölçümleri; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri.



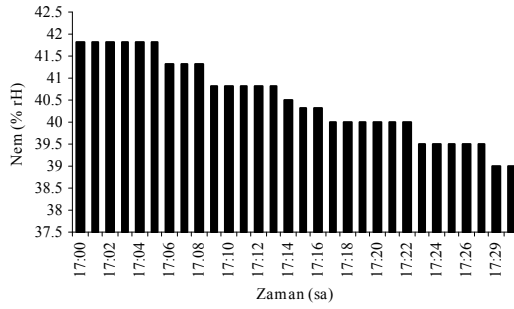
(a)



(b)



(c)

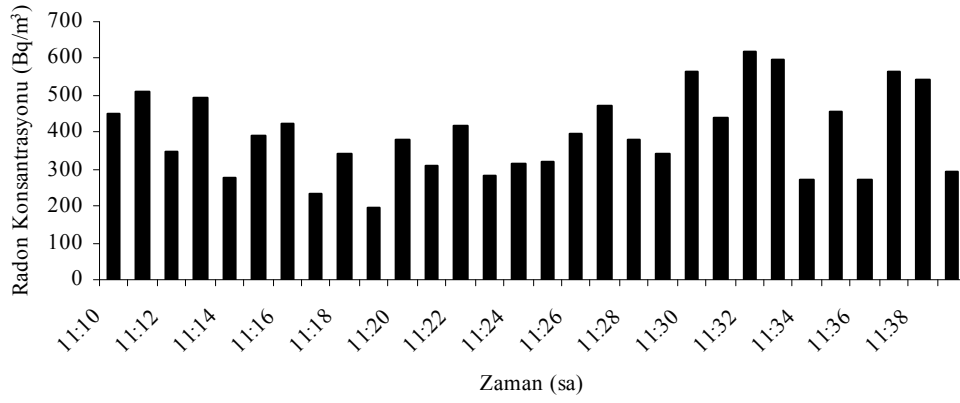


(d)

Parametre	Ortalama
Doğal Fon (C_0) ($Bq \cdot m^{-3}$)	1.778
^{222}Rn ($Bq \cdot m^{-3}$)	533.18
Sıcaklık ($^{\circ}C$)	24.4
Basınç (mbar)	1003
Bağıl Nem (% rH)	40.5

(e)

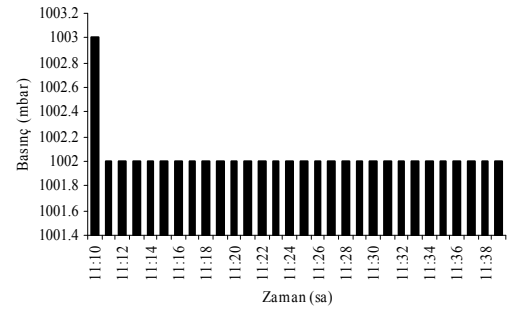
Şekil 4.37 11 nolu kaynağa ait 3. numunenin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem ölçümleri; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri.



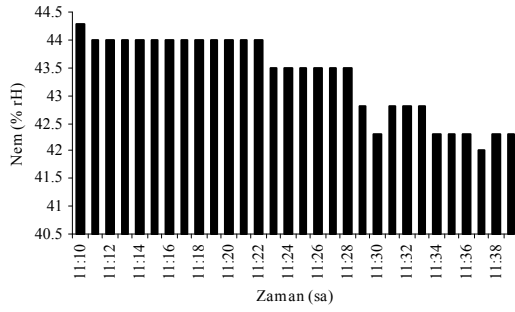
(a)



(b)



(c)

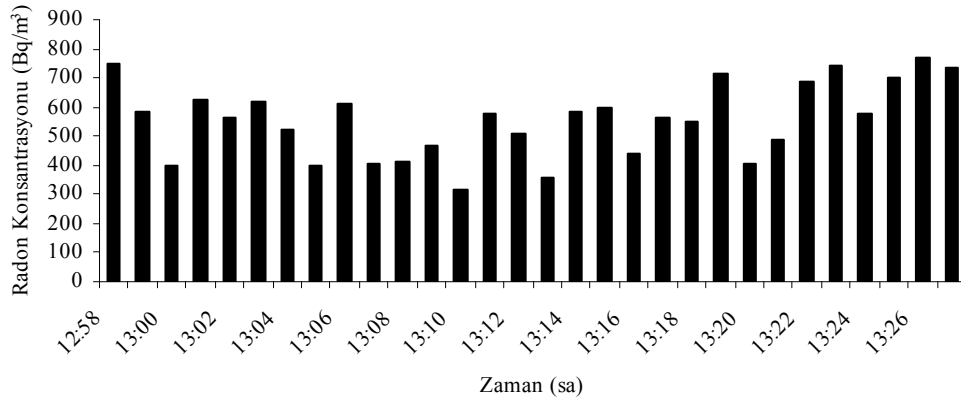


(d)

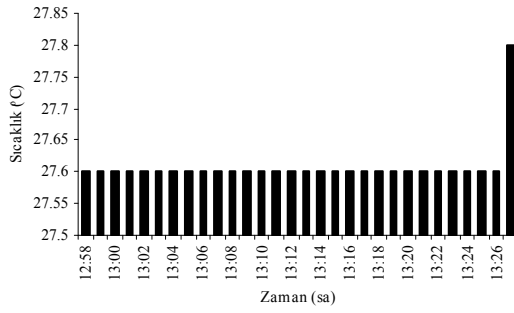
Parametre	Ortalama
Doğal Fon (C_0) (Bq/m^3)	6.77
^{222}Rn (Bq/m^3)	396.12
Sıcaklık (°C)	27.3
Basınç (mbar)	1002
Bağıl Nem (% rH)	43.3

(e)

Şekil 4.38 12 nolu kaynağa ait 1. numunenin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem ölçümleri; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri.



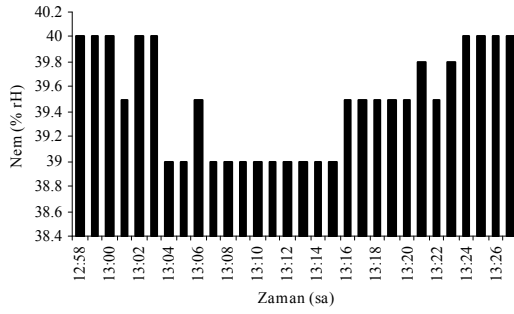
(a)



(b)



(c)

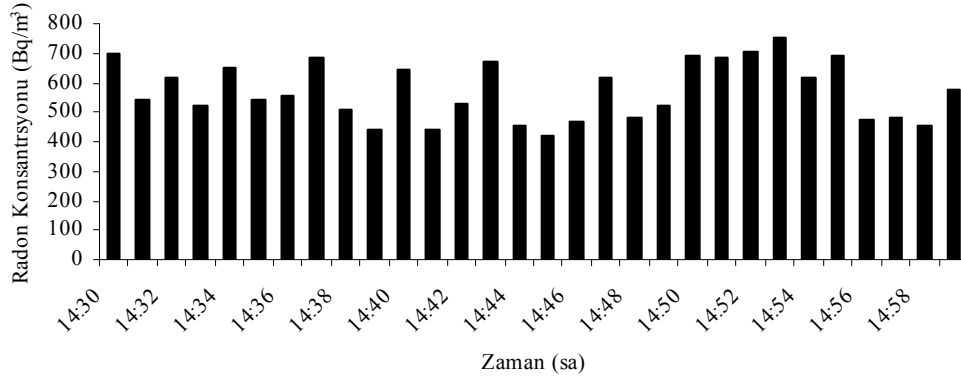


(d)

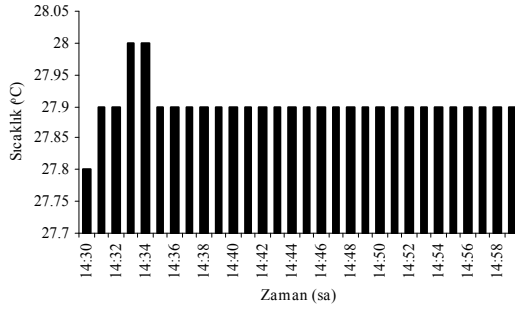
Parametre	Ortalama
Doğal Fon (C_0) (Bq/m^3)	7.261
^{222}Rn (Bq/m^3)	556.53
Sıcaklık (°C)	27.6
Basınç (mbar)	1002
Bağıl Nem (% rH)	39.5

(e)

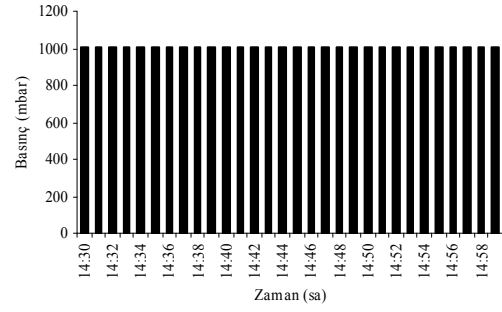
Şekil 4.39 12 nolu kaynağa ait 2. numunenin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem ölçümleri; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri.



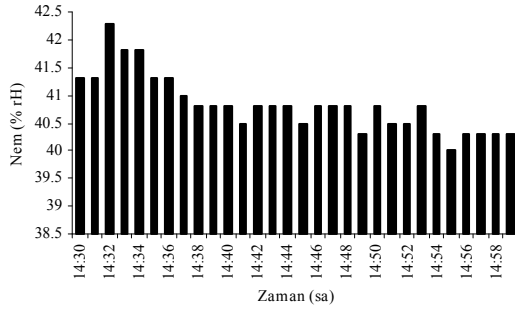
(a)



(b)



(c)



(d)

Parametre	Ortalama
Doğal Fon (C_0) (Bq/m^3)	10.22
^{222}Rn (Bq/m^3)	570.68
Sıcaklık (°C)	27.9
Basınç (mbar)	1002
Bağıl Nem (% rH)	40.8

(e)

Şekil 4.40 12 nolu kaynağa ait 3. numunenin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem ölçümleri; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri.

4.2. Kaynakların Ortalama Radon Konsantrasyonları

Su numuneleri için gerçekleştirilen 30 dakikalık ölçümler sonucu elde edilen ve Şekil 4.5-Şekil 4.40'ta verilen ^{222}Rn konsantrasyonu (C_{air}) ve doğal fon (C_0) değerleri ile sıcaklığa bağlı olarak değişen k radon yayılma katsayısı, ölçüm düzeneğine ait dahili hacim değeri ve su örneğine ait hacim değeri (3.1) eşitliğinde yerlerine yazılarak her bir kaynak için ölçümü yapılan her 3 numunenin radon konsantrasyonu hesaplanmış ve sudaki radon konsantrasyonları Bq/L cinsinden bulunmuştur. Elde edilen değerler kullanılarak her kaynak için radon konsantrasyonunun ortalama değeri (3.2) denklemi kullanılarak hesaplanmıştır. Ölçüm sonuçlarına ait standart hata hesaplamasının yapılabilmesi için öncelikle standart sapma hesaplamaları (3.3) denklemi kullanılarak yapılmış ve sonra standart hatalar (3.4) denklemi kullanılarak bulunmuştur.

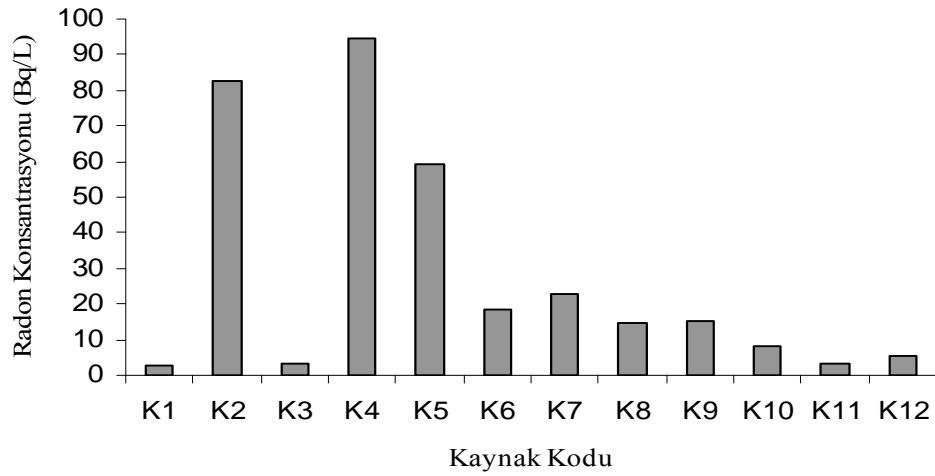
Radon konsantrasyonu, iklimsel parametrelere bağlı olarak değişim gösterdiğinden ölçüm süresince bu parametrelerdeki değişimler takip edilmiştir. Ölçümler kısa süreli olduğundan ölçüm süresi boyunca sıcaklık, basınç ve nem değerlerinde Şekil 4.5-Şekil 4.40'tan da görüldüğü gibi ihmal edilebilir değişimler gözlenmiştir.

Hesaplamalar neticesinde elde edilen sonuçlar Çizelge 4.1'de verilmiştir. Kaynakların radon konsantrasyonu değerleri 2.513 ± 0.286 Bq/L ile 94.347 ± 4.361 Bq/L aralığında değişim göstermiştir. Ayrıca bu çizelgede, radon konsantrasyonu ölçümü yapılan K2, K4, K7, K8, K10 ve K11 kodlu suların esas çıkış noktalarında, 1971 yılında İstanbul Üniversitesi tarafından yapılmış bir çalışma sonucu elde edilen radon konsantrasyonu değerleri de sunulmuştur.

Çizelge 4.1 Ölçümü yapılan suların kaynak kodları ve ortalama radon konsantrasyonları.

Kaynak Kodu	Radon Konsantrasyonu ±Standart Hata (Bq/L)	İstanbul Üniversitesi (1971) (Bq/L)
K1	2.513 ± 0.286	---
K2	82.553 ± 1.919	123.173
K3	3.340 ± 0.104	---
K4	94.347 ± 4.361	178.969
K5	59.329 ± 1.253	---
K6	18.604 ± 2.476	---
K7	23.086 ± 3.200	2.553
K8	14.628 ± 0.227	123.173
K9	15.379 ± 1.216	---
K10	8.418 ± 0.174	13.431
K11	3.182 ± 1.249	2.553
K12	5.165 ± 1.394	---

Çizelge 4.1’de verilen ortalama radon konsantrasyonlarının kaynaklara göre dağılımı çizilerek Şekil 4.41’de gösterilmiştir.



Şekil 4.41 Ortalama radon konsantrasyonlarının kaynaklara göre dağılımı.

5. TARTIŞMA

Bursa ilinin jeolojik bakımdan önemli Çekirge bölgesinden 18 Temmuz 2008 ile 22 Ocak 2009 tarihleri arasında alınan 12 farklı kaynağa ait numuneler için radon konsantrasyonu ölçümü yapılmıştır. Su numyelerinin analizleri Uludağ Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Nükleer Fizik laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

Bursa ili Çekirge bölgesindeki kaynaklarda yapılan bu çalışmada maksimum radon konsantrasyonu 94.347 Bq/L ve minimum radon konsantrasyonu 2.513 Bq/L olarak bulunmuştur. Elde edilen sonuçlarda, en düşük ve en yüksek radon konsantrasyonu değerleri arasındaki farklılığın sebeplerinden biri, havuzların içindeki jeotermal suların her gün değiştirilmemesi, diğeri ise termal suyun havuzlarda, radon konsantrasyonu daha düşük olan başka bir su ile karıştırılması olabilir.

Bu çalışmanın sonuçları ile 1971 yılında İstanbul Üniversitesi tarafından gerçekleştirilen radon konsantrasyonu ölçüm çalışmalarının sonuçları karşılaştırıldığında değerlerin genelinde yüksek oranda düşüş gözlenmektedir. Buna bağlı olarak, kentin altyapısal (su, kanalizasyon vb.) eskimişlik sorunları, termal alanların korunmadan yapılaşmaya açılması ve kaçak kullanımların, Bursa'daki jeotermal sistemin hassas dengesi için önemli bir tehdit oluşturduğu yorumu yapılabilir.

Her deneysel çalışmada olabileceği gibi bu çalışma sırasında da kişisel veya sistemden kaynaklanan bazı hatalar olmuş olabilir. Bunlardan başlıcaları, kaynaklardan numune alımı sırasında şişelerin ağzının kapatılmasında geç kalınması, şişedeki suyun ölçümün yapılacağı hücreye aktarımı esnasındaki gaz kaçakları, ölçüm sırasındaki radon emilimi işlemlerinden kaynaklanan hatalar olarak belirtilebilir.

Bu çalışmada elde edilen bulgular, Bursa ve çevresinde de doğal radyoaktivitenin belirlenmesi gerektiğini göstermektedir. Çünkü elde edilen radon konsantrasyonu değerleri değişkenlik göstermekle birlikte, özellikle bazı kaynaklara ait konsantrasyon değerlerinin USEPA (U.S. Environmental Protection Agency) tarafından

içme olarak kullanılan sular için izin verilen 11 Bq/L değerini geçtiği görülmektedir (USEPA 1991). Bu değer dikkate alındığında K2, K4, K5, K6, K7, K8 ve K9 kodlu suların içilmemesi önerilir.

Suyun radyolojik yönden incelenmesi ve doğal radyasyon seviyelerinin belirlenmesi insan sağlığını doğrudan ilgilendirdiği için önemlidir. Bilindiği gibi insanların maruz kaldığı radyasyonun yaklaşık %88'i doğal ortamdan kaynaklanmakta ve bu doğal radyasyona en önemli katkıyı radon gazı yapmaktadır. Lokal bir bölgede yapılan bu çalışmanın sonuçları bu çalışma kapsamında incelenen bölge için aynen geçerli olmamakla birlikte yaklaşık olarak benzerlik göstermesi gerektiği söylenebilir. Bu durum dikkate alındığında, doğal radyasyona en önemli katkıyı yapan radon konsantrasyonunun ve hatta mümkünse bütün radyoaktif madde konsantrasyonlarının her bölgede belirlenmesi büyük önem arz etmektedir.

Bölgenin tektonik açıdan aktif olması, Kuzey Anadolu Fay Hattı ile Eskişehir Fay Hattı etkisinde bulunması ve termal kaynaklar bakımından zengin olmasından dolayı radon konsantrasyonunun sistematik olarak takip edilmesi, en kısa sürede bu bölgenin doğal radyasyon haritasının çıkarılmasına katkıda bulunulması için sürekli olarak ölçümlerin yapılması ve özellikle uzun süreli olarak yüksek konsantrasyon değerleri elde edilmesi durumunda yetkili kurum ve kuruluşların bilgilendirilmesi tavsiye edilir.

KAYNAKLAR

AKKURT, A. 2006. Afyon Jeotermal Sularında Radon (Rn-222) Aktivitesi Tayini. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Afyonkarahisar. 57 s.

AKYILDIRIM, H. 2005. Isparta İli'nde Radon Yoğunluğunun Ölçülmesi ve Haritalandırılması. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Isparta. 99 s.

ALABDULA'ALY, A.I. 1999. Occurrence Of Radon In The Central Region Groundwater Of Saudi Arabia. Journal Of Environmental Radioactivity 44, 85-95.

AL-MASRİ, M.S. ve R. BLACKBURN. 1999. Radon-222 And Related Activities In Surface Waters Of The English Lake District. Applied Radiation and Isotopes 50, 1137-1143.

ARYA, A.P. 1989. Çekirdek Fizikinin Esasları. Aktif Yayıncılık, Erzurum. Çeviren: Yusuf Şahin. 407 s.

ATAKAN Y. 2007. Bol Radonlu İçmeler ve Halk Sağlığı. <http://www.ekolojistler.org/bol-radonlu-icmeler-ve-halk-sagligi-dr.yuksel-atakan.html>

BARIŞ, C. 2006. İzmir-Çeşme Yeraltı-Termal Suları Ve Çevresindeki Topraklarda Radyoaktivite Araştırmaları. Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Manisa. 70 s.

BAYKARA, O. ve M. DOĞRU. 2006. Measurements of Radon and Uranium Concentration In Water and Soil Samples From East Anatolian Active Fault Systems (Turkey). Radiation Measurements 41, 362-367

COMSA, C., M. MOLDOVAN, T. DİCU, T. KOVACS. 2008. Radon In Water From Transylvania (Romania). Radiation Measurements 43, 1423-1428.

ÇEVİK, U., N. DAMLA, G. KARAHAN, N. ÇELEBİ, A.İ. KOBYA. 2006. Natural Radioactivity In Tap Waters of Eastern Black Sea Region of Turkey. Radiation Protection Dosimetry 118, 1, 88-92

DAVUTOĞLU, H. 2008. Radon Gazını Ölçme Metotları. Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kütahya. 62 s.

DEĞERLİER, M. 2007. Adana İli Ve Çevresinin Çevresel Doğal Radyoaktivitesinin Saptanması Ve Doğal Radyasyonların Yıllık Etkin Doz Eşdeğerinin Bulunması, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Adana. 175 s.

- DİLLON, M.E., G.L. CARTER, R. ARORA, B. KAHN. 1991. Rn Concentrations In Ground Water of Georgia Piedmont. *Health Physics*. 60, 229-236.
- ENGE, H.A. 1966. *Introduction to Nuclear Physics*. Addison-Wesley Publishing Company, Inc. USA. 582 s.
- EREES, F.S., G. YENER, M. SALK, Ö. ÖZBAL. 2006. Measurements of Radon Content in Soil Gas and in the Thermal Waters in Western Turkey. *Radiation Measurements* 41, 354-361
- GİLLMORE, G.K., P.S. PHILLIPS, A.R. DENMAN, D.D. GILBERTSON. 2002. Radon in the Creswell Crags Permian Limestone Caves. *Journal of Environmental Radioactivity* 62, 165–179.
- GOSİNK, T.A., M. BASKARAN, D.F. HOLLEMAN. 1990. Radon in the Human Body From Drinking Water. *Health Physics*. 59, 6, 919-920
- HAKLIDIR, F.S.T. 2007. Bursa İli ve Çevresindeki Termal, Maden ve Yeraltı Sularının Jeokimyasal İncelenmesi. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İzmir. 282 s.
- HORVATH, A., L.O. BOHUS, F. URBANI, G. MARX, A. PIROTH, E.D. GREAVES. 2000. Radon concentrations in hot spring waters in northern Venezuela. *Journal of Environmental Radioactivity* 47, 127-133.
- ICRP, International Commission on Radiological Protection. 1994. *Protection Against Radon-222 at Home and at Work*. Pergamon Press ICRP Publication 65, 45 pp.
- IAEA, International Atomic Energy Agency. 1996. *Radiation Safety*, IAEA Division of Public Information, 96-00725.
- İstanbul Üniversitesi. 1971. Türkiye Maden Suları - Marmara Bölgesi [Cilt: 2] VI+213+f S., Tıp Fakültesi, Hidro-Klimatoloji Kürsüsü
- KARAHAN, G., N. ÖZTÜRK, A. BAYÜLKEN. 2000. Natural Radioactivity in Various Surface Waters in İstanbul. *Water Research* 34, 4367-4370.
- KOCHOWSKA, E., J. MAZUR, K. KOZAK, M. JANİK. 2004. Radon in Well Waters in the Kraków Area. *Isotopes in Environmental and Health Studies* 40, 207-212.
- KRANE, S.K. 2001. *Nükleer Fizik*. 1. Cilt. Palme Yayıncılık, Ankara. No: 173. 404 s.
- LİMA, J.L.N., D.M. BONOTTO. 1996. Etapas analíticas para mensurao de radonio-222 e uso na avaliaao da radioatividade das aguas de. *Aguas da Prata (sp)*. *Geochim. Brasiliensis* 10 (2), 283–295.

MARQUES, A.L., W.D. SANTOS, L.P. GERALDO. 2004. Direct Measurements of Radon Activity in Water From Various Natural Sources Using Nuclear Track Detectors. *Applied Radiation and Isotopes* 60, 801-804

OTWOMA, D., A.O. MUSTAPHA. 1998. Measurement of Rn-222 Concentration in Kenyan Groundwater. *Health Physics* 74, 1, 91-95.

ÖZDEMİR, F.B. 2006. Afyon ve Çevresindeki Kuyu Sularında Radon (Rn-222) Aktivitesi Tayini. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Afyonkarahisar. 112 s.

ÖZGER, A.G. 2005. Ceyhan, Yumurtalık ve Pozantı Bölgelerinin Doğal Radyoaktivite Düzeylerinin Belirlenmesi. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Adana. 93 s.

RODENAS, C., J. GOMEZ, J. SOTO, F. MARAVER. 2007. Natural radioactivity of spring water used as spas in Spain. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 277, 3, 625-630.

TAEK, Türkiye Atom Enerjisi Kurumu. <http://www.taek.gov.tr>.

UNSCEAR, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. 1993. Sources and Effects of Ionizing Radiation United Nations, New York. Annex A.

UNSCEAR, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. 2000. Exposure Due to Natural Radiation Sources. United Nations, New York.

USEPA, U.S. Environmental Protection Agency. 1991. National Primary Drinking Water Regulations for Radionuclides. EPA/570/9-91/700.

VİLLALBA, L., L.C. SUJO, M.E.M. CABRERA, A.C. JIMENEZ, M.R. VİLLALOBOS, C.J.D. MENDOZA, L.A.J. TENORİO, I.D. RANGEL, E.F.H. PERAZA. 2005. Radon Concentrations in Ground and Drinking Water in the State of Chihuahua, Mexico. *Journal of Environmental Radioactivity* 80, pp. 139-151

YALIM, H.A., A. SANDIKÇIOĞLU, R. ÜNAL, Ö. ORHUN. 2007. Measurements of Radon Concentrations in Well Waters Near the Akşehir Fault Zone in Afyonkarahisar, Turkey. *Radiation Measurements* 42, 505-508

YARAR, Y., T. GÜNAYDI, N. ÇELEBİ. 2006. Determination of Radon Concentrations of the Dikili Geothermal Area in Western Turkey. *Radiation Protection Dosimetry* 118, 1, 78-81.

ZELENSKY, A.V., M.G. BUZİNNY, I.P. LOS. 1993. Measurements of Ra, Rn and U in Ukrainian Groundwater Using Ultra-Low-Level Liquid Scintillation Counting. pp.405-411.

TEŞEKKÜR

Öncelikle bu çalışmayı, yüksek lisans tezi olarak bana öneren ve çalışmalarım sırasında yardımlarını esirgemeyen, bilgi ve tecrübeleri ile beni yönlendiren danışman hocam Sayın Doç. Dr. Orhan GÜRLER'e çok teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasının gerçekleşmesi için gerekli ekipmanların teminini sağlayan Sayın Prof. Dr. Z. Gökay KAYNAK'a, numune alım yerlerinin belirlenmesinde ve deneylerin gerçekleştirilmesinde bana yardımcı olan Arş. Gör. Ayşe Gül KAHRAMAN'a, tezimin yazım aşamasında yardımlarını esirgemeyen dönem arkadaşım Atakan TEKGÜL ve Arş. Gör. Özkan ŞAHİN'e, dolaylı da olsa bana destek veren Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü'ndeki bütün hocalarıma teşekkür ederim.

Ayrıca tez çalışmam sırasında ve tüm hayatım boyunca bana karşı gösterdikleri özverilerden dolayı değerli aileme sonsuz teşekkür ederim.

ÖZGEÇMİŞ

13 Ocak 1985 tarihinde Bursa'nın Karacabey ilçesinde doğdu. İlköğrenimini Karacabey Uluabatlıhasan İlköğretim Okulu'nda ve ortaöğrenimini Karacabey Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2003 yılında Uludağ Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü'nü kazandı ve lisans eğitimini 2007 yılında tamamladı. 2007-2008 Eğitim-Öğretim yılı süresince Karacabey Anadolu Teknik ve Endüstri Meslek Lisesi'nde vekil öğretmenlik yaptı. 2007-2008 Bahar Yarıyılı'nda Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Bölümü'nde Yüksek Lisans eğitimine başladı.