

KÜKÜRTLÜ KAPLICALARI  
ATATÜRK REHABİLİTASYON MERKEZİNDEKİ  
RADON KONSANTRASYONUNUN BELİRLENMESİ

Nilüfer KILIÇ



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

**KÜKÜRTLÜ KAPLICALARI ATATÜRK REHABİLİTASYON  
MERKEZİNDEKİ RADON KONSANTRASYONUNUN BELİRLENMESİ**

**Nilüfer KILIÇ**

Prof. Dr. Z. Gökay KAYNAK  
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
FİZİK ANABİLİM DALI

BURSA-2011  
**Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ ONAYI

Nilüfer KILIÇ tarafından hazırlanan “Kükürtlü Kaplıcaları Atatürk Rehabilitasyon Merkezindeki Radon Konsantrasyonunun Belirlenmesi” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman** : Prof. Dr. Gökay KAYNAK

**Başkan:** Prof. Dr. Gökay KAYNAK  
Uludağ Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi,  
Nükleer Fizik Anabilim Dalı

İmza

**Üye:** Doç. Dr. Orhan GÜRLER  
Uludağ Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi,  
Nükleer Fizik Anabilim Dalı

İmza

**Üye:** Yrd. Doç. Dr. Remziye ERGÜL  
Uludağ Üniversitesi Eğitim Fakültesi,  
Fen Bilgisi Eğitimi Anabilim Dalı

İmza

**Yukarıdaki sonucu onaylarım**

**Prof. Dr. Kadri ARSLAN**  
**Enstitü Müdürü**

.../.../.....

**U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;**

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
  - görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
  - başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
  - atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
  - kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
  - ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı
- beyan ederim.**

.../.../....

**İmza**

**Adı ve Soyadı**

## ÖZET

Yüksek Lisans

### KÜKÜRTLÜ KAPLICALARI ATATÜRK REHABİLİTASYON MERKEZİNDEKİ RADON KONSANTRASYONUNUN BELİRLENMESİ

**Nilüfer KILIÇ**

Uludağ Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Nükleer Fizik Anabilim Dalı

**Danışman:** Prof. Dr. Z. Gökay KAYNAK

Radon (Rn-222) doğal olarak oluşan renksiz, kokusuz ve tatsız radyoaktif bir soy gazdır. İnsanların etkisinde kaldığı radyasyonun yaklaşık % 55'i radon kaynaklı olup kaya, toprak ve sudaki doğal uranyumun radyoaktif bozunması sonucu oluşur. Özellikle yeraltı suları olmak üzere, suda da çözünebilir. Su kaynaklarına radon geçişi arttıkça, bunların yanında veya yakınlarında bulunan binaların içindeki radon düzeyi yüksek derişimlere ulaşabilmektedir. Son zamanlarda yapılan çalışmalar radonun yüksek konsantrasyonda solunumuna bağılı olarak akciğer kanseri riskini arttırdığını göstermiştir. SPA olarak kullanılan termal ve mineral suların radona bağılı potansiyel sağılık riski sebebiyle, diğer ülkelerin benzer bölgelerinde radon seviyelerinin belirlenmesiyle ilgili çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalardan elde edilen radon konsantrasyon değerleri değişkenlik göstermekle birlikte, uluslararası sağılık örgütleri tarafından izin verilen değerleri aşan bulgular mevcuttur.

Bu çalışmanın amacı, Bursa'da bulunan Uludağ Üniversitesi Atatürk Rehabilitasyon Uygulama ve Araştırma Merkezi Kükürtlü Kaplıcaları'nda radon seviyesinin belirlenmesidir. Bu değerlerin bilinmesi hastaların ve çalışan personelin aldığı dozun hesaplanmasını sağlar. Merkezin farklı yerlerindeki iç ortamın, kullanılan termal su kaynağının ve havuz suyunun radon konsantrasyon değerleri belirlenmiştir. Radon konsantrasyon değerleri, Genitron Instruments tarafından üretilen AlphaGUARD PQ 2000PRO radon dedektörü ile analiz edilmiş ve bu çalışmada elde edilen sonuçlar diğer araştırmacıların değerleri ile karşılaştırılmıştır.

Bu çalışma sonucunda elde edilen ortalama radon konsantrasyon değerleri havada  $7,57 \pm 4,35$  Bq/m<sup>3</sup> ile  $179,09 \pm 46,50$  Bq/m<sup>3</sup> aralığında, termal su kaynağı için  $2,09 \pm 0,145$  Bq/L ve havuz suyu için ise  $0,599 \pm 0,115$  Bq/L olarak gözlenmiştir. Bunlara karşılık gelen doz değerleri  $0,10 \pm 0,06$  mSv/yıl ile  $2,38 \pm 0,61$  mSv/yıl aralığında, termal su kaynağı için  $0,0065 \pm 0,0004$  mSv/yıl ve havuz suyu için  $0,0019 \pm 0,0003$  mSv/yıl olarak hesaplanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Radon, radyasyon, termal sular, sağılık, AlphaGUARD 2011, xi + 94 sayfa.

## ABSTRACT

MSc Thesis

### DETERMINATION OF RADON CONCENTRATION AT KÜKÜRTLÜ SPA ATATÜRK REHABILITATION CENTER

**Nilüfer KILIÇ**

Uludağ University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Nuclear Physics

**Supervisor:** Prof. Dr. Z. Gökay KAYNAK

Radon (Rn-222) is natural occurring radioactivity noble gas which is odourless, colourless and tasteless. Radiation of about % 55 exposed to people is based on radon occurs as a result of the radioactive decay of natural uranium in rocks, soil and water. Radon is also water soluble, especially in ground water. When the radon migration increase on water sources, the level of radon in buildings next or near these sources can reach high concentrations. Recent studies had showed that lung cancer risk could have increased depend on inhalation of high radon concentrations. In similar areas of other countries, surveys for radon levels have been carried out based on the potential risk of the thermal and mineral waters used as spas. Radon concentrations obtained from these studies have been showed differences. At the same time some of the obtain results over the values allowed by international health organizations.

In this study, the aim was the investigation of the exposure to radon for patients and working personnel and we have carried out a survey of radon concentrations of spring water, water of pool and indoor air in different places in Kükürtlü Spas of Uludağ University Atatürk Rehabilitation Center, Bursa. Radon concentrations 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 average value of radon concentrations in the air is found to vary from 7,57 Bq/m<sup>3</sup> to 179,09 Bq/m<sup>3</sup>. The average value of radon was measured 2,09 Bq/L for spring water and 0,595 Bq/L for water of pool in the spa. The calculated dose values according to obtained concentration results are vary from 0,10 ± 0,06 mSv/y to 2,38 ± 0,061 mSv/y in indoor air. The calculated dose values for thermal water and water of pool are 0,0065 ± 0,0004 mSv/y and 0,0019 ± 0,0003 mSv/y, respectively.

**Key words:** Radon, radiation, thermal waters, health, AlphaGUARD 2011, xi + 94 pages.

## TEŞEKKÜR

Bu alıőmamda beni ynlendiren ve yardımcı olan danışman hocam Prof. Dr. Z. Gökay KAYNAK'a, çalıőmalarım sırasında bana yol gösteren Doç. Dr. Orhan GÜRLER'e çok teşekkür ederim.

Tez çalıőmam süresince yardımlarını esirgemeyen bölüm arkadaőım rkiye AKAR'a, Araő. Gör. Ayőegül KAHRAMAN'a, Araő. Gör. Gizem AKKAYA'ya, dolaylı da olsa bana destek veren Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü'ndeki bütün hocalarıma ve arkadaőlarıma teşekkür ederim.

Tezimin deney sürecinin gerekleőtđđ ve verilerinin alındđđđ Uludağ Üniversitesi Atatürk Rehabilitasyon Uygulama ve Araőtirma Merkezi Kükürtlü Kaplıcaları'nın müdürü Sayın Prof. Dr. Merih YURTKURAN'a ve tüm çalıőanlarına saygılarımı sunar, sağladıkları yardımlar için teşekkür ederim.

Ayrıca yüksek lisans dönemim boyunca desteklerini esirgemeyen ve tüm hayatım boyunca bana karőtđđ gösterdikleri zverilerden dolayı annem Meryem, babam Mehmet ve kardeőtđđ Fatma KILIÇ'a sonsuz teşekkür ederim.

Nilüfer KILIÇ

15/02/2011

## İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>iii</b>
<b>SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....	<b>vi</b>
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	<b>xi</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. KURAMSAL BİLGİLER</b> .....	<b>6</b>
2.1. Radyasyon ve Özellikleri .....	6
2.1.1. İyonlayıcı elektromanyetik radyasyon .....	6
2.1.2. İyonlayıcı parçacık radyasyonu.....	6
2.1.3. İyonlayıcı olmayan elektromanyetik radyasyon .....	6
2.1.4. Radyasyon kaynakları .....	7
2.1.4.1. Doğal radyasyon kaynakları.....	7
2.1.4.2. Yapay radyasyon kaynakları .....	9
2.1.5. Radyasyon birimleri .....	10
2.2. Radyoaktivite .....	12
2.2.1. Radyoaktif seriler .....	13
2.2.1.1. Doğal seriler .....	13
2.2.1.2. Yapay seriler .....	17
2.2.2. Radyoaktif bozunma türleri .....	18
2.2.2.1. Alfa bozunumu.....	18
2.2.2.2. Beta ( $\beta$ ) bozunumu .....	20
2.2.2.3. Gama ışını yayınlanması ( $\gamma$ - yayma).....	21
2.2.2.4. Elektron yakalama olayı.....	22
2.2.2.5. İç dönüşüm (IC) .....	23
2.2.2.6. Nötron yayınlanması (n-yayma) .....	24
<b>3. RADON VE ÖZELLİKLERİ</b> .....	<b>25</b>
3.1. Radon .....	25
3.2. Radonun Bozunum Ürünleri .....	28
3.3. Bina İçi Radon.....	30
3.4. Toprak Gazından Gelen Radon.....	32
3.5. İnşaat Malzemelerinden Gelen Radon .....	34
3.6. Sulardan Gelen Radon.....	34



3.7. Doğal Gazdan Gelen Radon.....	35
3.8. Bina İçi Radon Konsantrasyonunun Azaltılması İçin Alınabilecek Tedbirler .....	36
3.9. Radon Gazının Sağlık Üzerindeki Etkileri.....	37
3.10. Radon ve Deprem.....	40
3.11. Radon Ölçüm Teknikleri.....	41
3.11.1. Kısa dönem ölçüm teknikleri .....	42
3.11.1.1. Aktif karbon tekniği .....	42
3.11.1.2. Sıvı sintilasyon sayım sisteminde aktif karbon .....	43
3.11.1.3. Alfa iz detektörleri .....	43
3.11.1.4. Elektret iyon odaları .....	44
3.11.1.5. Sürekli monitörler .....	45
3.11.1.6. Radon Tuzağı (Grab Sampler) tekniği .....	46
3.11.2. Uzun dönem ölçüm teknikleri.....	46
<b>4. MATERYAL VE METOD.....</b>	<b>47</b>
4.1. Bölgenin Tanıtılması.....	47
4.2. Kükürtlü Kaplıcaları'nın Tanıtılması .....	47
4.3. AlphaGUARD Radon Detektörü .....	50
4.4.1. Detektörün dış yapısı.....	52
4.4.2. Detektörün iç yapısı .....	56
4.5. Detektörün Kaplıcaya Yerleştirilmesi .....	59
4.6. Kaplıcadaki Su Numunelerinin Alımı.....	60
4.7. Su Numunelerinin Analizi İçin Ölçüm Düzeneğinin Hazırlanması.....	60
4.8. AlphaGUARD PQ 2000PRO ile Sudaki Radon Ölçümü .....	61
4.9. Sudaki Radon Hesaplamaları .....	63
4.10. Sudaki Ortalama Radon Konsantrasyonu Hesaplamaları .....	64
4.11. Standart Hata.....	64
<b>5. BULGULAR.....</b>	<b>65</b>
5.1 AlphaGUARD Detektörü İle Yapılan Ölçümler.....	65
5.2. Kaplıca Merkezindeki Odaların Ortalama Radon Konsantrasyonları .....	81
5.3. Kaplıca Merkezindeki Kullanılan Suyun Ortalama Radon Konsantrasyonları .....	82
5.4. Yıllık Etkin Doz Eşdeğerleri.....	83
5.4.1. Kaplıcada ölçülen mekanlar için yıllık etkin doz eşdeğerleri .....	83
5.4.2. Kaplıcada kullanılan su için yıllık etkin doz eşdeğerleri .....	85
<b>6. TARTIŞMA VE SONUÇ.....</b>	<b>86</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>89</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>94</b>

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
Bq	Becquerel
C	Konsantrasyon değeri
Ci	Curie
emb	Elektrostatik yük birimi
Gy	Gray
L	Litre
m	Metre
mmHg	Milimetre civa
mL	Mililitre
mSv	Milisievert
n	Nötron
p	Proton
R	Röntgen
Rn	Radon
V	Hacim
°C	Santigrad derece
F	Denge Faktörü
$\alpha$	Alfa
$\beta^-$	Beta-negatif
$\beta^+$	Beta-pozitif
$\gamma$	Gama

$e^-$	Elektron
$\nu$	Nötrino
$\bar{\nu}$	Anti nötrino

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
AB	Avrupa Birliği
ADC	Analog-Digital Converter
DC	Direct Current
DSP	Digital Signal Processing
EEC	Equilibrium Equivalent Concentration
IAEA	International Atomic Energy Agency
IC	Internal Conversion
ICRP	International Commission on Radiological Protection
ICRU	International Commission on Radiation Units and Measurements
keV	Kilo elektron volt
KF	Kalite Faktörü
NRPB	National Radiological Protection Board
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

USA	United States of America
USEPA/EPA	U. S. Environmental Protection Agency
Y.E.D.E	Yıllık Etkin Biyolojik Doz Eşdeğeri
WHO	World Health Organization

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Dünya genelinde doğal ve yapay radyasyondan kaynaklarından alınan dozların oranları ( <a href="http://www.taek.gov.tr">http://www.taek.gov.tr</a> , 2010) .....	7
Şekil 2.2. Kozmik ışınlardan alınan radyasyon dozunun yüksekliğe göre değişimi (Kapdan 2009).....	8
Şekil 2.3. Doğal radyasyon kaynaklarından maruz kalınan küresel radyasyon dozlarının oransal değerleri (Anonim 1996) .....	9
Şekil 2.4. Yapay radyasyon kaynaklarından maruz kalınan küresel radyasyon dozunun oransal değerleri (Anonim 1996) .....	10
Şekil 2.5. Çekirdek kararlılığının nötron proton oranına bağlılığı (Turhan 2008).....	13
Şekil 2.6. Üranyum serisinin bozunum şeması (Kapdan 2009) .....	14
Şekil 2.7. Toryum serisinin bozunum şeması (Kapdan 2009) .....	15
Şekil 2.8. Aktinyum serisinin bozunum şeması (Kapdan 2009).....	15
Şekil 2.9. Neptinyum serisi ürünleri ve yarı ömürleri (Arya 1989).....	17
Şekil 2.10. Alfa bozunumu (Görür 2006) .....	19
Şekil 2.11. Örnek bir $\beta^-$ bozunumu (Görür 2006) .....	20
Şekil 2.12. Örnek bir $\beta^+$ bozunumu (Görür 2006).....	21
Şekil 2.13. Gama ışını yayınlanması (Görür 2006).....	22
Şekil 2.14. Elektron yakalama olayı (Görür 2006) .....	23
Şekil 3.1. Radon ve radon dışındaki kaynaklardan maruz kalınan radyasyon miktarları (Görür 2006).....	25
Şekil 3.2. $^{238}\text{U}$ bozunum serisinden gelen $^{222}\text{Rn}$ 'nin ve ürünlerinin bozunum aşamaları (Kapdan 2009).....	26
Şekil 3.3. Radon ailesinin üç temel izotopunun; (a) $^{222}\text{Rn}$ ; (b) $^{220}\text{Rn}$ ; (c) $^{219}\text{Rn}$ 'nin bozunum şemaları (Görür 2006'dan değiştirilerek alınmıştır).....	28
Şekil 3.4. Radonun binalara giriş yolları ( <a href="http://www.taek.gov.tr">http://www.taek.gov.tr</a> , 2010).....	31
Şekil 3.5. Topraktaki radon geçirgenliği (Kapdan 2009).....	33
Şekil 3.6. Radon konsantrasyonu havalandırmaya bağlı olarak değişimi (Kapdan 2009) .....	36
Şekil 3.7. Radon bozunum ürünleri tarafından akciğerlerde yapılan ışınlanma ( <a href="http://www.ilradondetection.com">http://www.ilradondetection.com</a> , 2010) .....	38
Şekil 3.8. 1966 Taşkent depremi öncesi kuyu sularında gözlenen radon konsantrasyon değişimleri (Kapdan 2009).....	41
Şekil 3.9. 1967 Taşkent depremi öncesi kuyu sularında gözlenen radon konsantrasyon değişimleri (Kapdan 2009).....	41
Şekil 4.1. Kükürtlü Kaplıcaları'nın Bursa'daki konumu .....	48
Şekil 4.2. Kükürtlü Kaplıcaları'nın imar planı ( <a href="http://www.kukurtlu.uludag.edu.tr">www.kukurtlu.uludag.edu.tr</a> , 2010)....	49
Şekil 4.3. AlphaGUARD PQ 2000PRO dedektörü.....	50
Şekil 4.4. AlphaGUARD ile hava, su, toprak ve yapı malzemelerinde radon ölçümü .52	
Şekil 4.5. AlphaGUARD cihazının önden görünüşü ve ebatları (Akyıldırım 2005)....	53
Şekil 4.6. AlphaGUARD cihazının arkadan görünüşü ve ebatları (Akyıldırım 2005) .53	
Şekil 4.7. AlphaGUARD cihazının alttan görünüşü ve ebatları (Akyıldırım 2005).....	54
Şekil 4.8. AlphaGUARD cihazının sol yandan görünüşü ve ebatları (Akyıldırım 2005) .....	55

Şekil 4.9. AlphaGUARD cihazının sağ yandan görünüşü ve ebatları (Akyıldırım 2005)	55
Şekil 4.10. AlphaGUARD dedektörünün iyonizasyon çemberinin şematik çizimi (Akyıldırım 2005)	57
Şekil 4.11. AlphaGUARD'ın sinyal işleme biriminin blok diyagramı (Akyıldırım 2005)	58
Şekil 4.12. Sudaki radon ölçüm düzeneği	61
Şekil 4.13. Radon yayılma katsayısının (k) değişim grafiği	64
Şekil 5.1. <sup>222</sup> Rn konsantrasyonu ölçümü örnek grafiği	65
Şekil 5.2. Sıcaklık ölçümü örnek grafiği	66
Şekil 5.3. Basınç ölçümü örnek grafiği	66
Şekil 5.4. Bağıl nem ölçümü örnek grafiği	67
Şekil 5.5. 5 nolu odaya ait bir günlük hava ölçümlerinin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri	68
Şekil 5.6. 9 nolu odaya ait bir günlük hava ölçümlerinin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri	69
Şekil 5.7. 19 nolu odaya ait bir günlük hava ölçümlerinin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri	70
Şekil 5.8. 23 nolu odaya ait bir günlük hava ölçümlerinin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri	71
Şekil 5.9. Poliklinik odasına ait bir günlük hava ölçümlerinin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri	72
Şekil 5.10. Havuz dışı hava ölçümlerinin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri	73
Şekil 5.11. Kapalı odaya ait bir günlük hava ölçümlerinin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri	74
Şekil 5.12. Kaynak suyunun 1 nolu numunesine ait ölçümlerin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri	75
Şekil 5.13. Kaynak suyunun 2 nolu numunesine ait ölçümlerin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri	76
Şekil 5.14. Kaynak suyunun 3 nolu numunesine ait ölçümlerin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri	77
Şekil 5.15. Havuz suyunun 1 nolu numunesine ait ölçümlerin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri	78
Şekil 5.16. Havuz suyunun 2 nolu numunesine ait ölçümlerin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri	79
Şekil 5.17. Havuz suyunun 3 nolu numunesine ait ölçümlerin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri	80
Şekil 5.18. Kaplıca merkezinde ölçülen mekanların ortalama radon konsantrasyon dağılımları	81

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

Çizelge 2.1. İyonlayıcı radyasyon birimleri ve dönüşüm faktörleri (Kam 2004) .....	10
Çizelge 2.2. Çeşitli radyasyonlar için kalite faktörleri (Kam 2004) .....	12
Çizelge 2.3. Doğada tek başına bulunan radyoizotoplar (Valkovic 2000) .....	16
Çizelge 2.4. Radyoaktif serilerin en kısa ve en uzun yarı ömürlü üyeleri .....	17
Çizelge 3.1. <sup>222</sup> Rn ve bozunum ürünlerinin özellikleri (Turner 1995).....	29
Çizelge 3.2. Farklı ülkelerde ev içi ortalama radon konsantrasyonları (Bq/m <sup>3</sup> ) (Akar 2010) .....	32
Çizelge 3.3. İnşaat malzemeleri içindeki <sup>226</sup> Ra ve <sup>222</sup> Rn değerleri (Çelebi 1995) .....	34
Çizelge 3.4. Evlerde ve işyerlerinde radon ve ürünleri için önerilen eylem seviyeleri (etkin doz) (Çelebi 1995) .....	39
Çizelge 3.5. Çeşitli ülkeler için radon konsantrasyon limitleri (Bq/m <sup>3</sup> ) (Çelebi 1995).....	39
Çizelge 5.1. Kaplıcada ölçülen mekanlar için standart hatası ile beraber ortalama <sup>222</sup> Rn konsantrasyonu ve ortalama sıcaklık, basınç ve nem değerleri .....	81
Çizelge 5.2. Havuz suyu numuneleri için ölçülen ve hesaplanan değerler .....	82
Çizelge 5.3. Kaynak suyu numuneleri için ölçülen ve hesaplanan değerler .....	83
Çizelge 5.4. Havuz ve kaynak suyu için ölçülen ve hesaplanan sonuçların ortalama değerleri .....	83
Çizelge 5.5. Kaplıcada ölçülen mekanların ortalama radon konsantrasyonları için hesaplanan yıllık etkin doz eşdeğerleri .....	84
Çizelge 5.6. Kaplıcadaki termal su ve havuz suyu için yıllık etkin doz eşdeğerleri .....	85

## 1. GİRİŞ

Yeryüzünde bütün canlılar radyasyonla birlikte yaşamaktadır. Kozmik ışınlar, yer kabuğunda bulunan radyoizotoplar, su ve gıdaların içerdiği radyoizotoplar ve yapay kaynaklar, etkisinde kaldığımız radyasyon kaynaklarından. Radyasyon kararsız elementlerin parçacıklar ya da elektromanyetik ışınlar yayımlamasıdır. Etki açısından iyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon olarak ikiye ayrılır (Akkurt 2006). Epidemolojik çalışmalar uzun süre radyasyona maruz kalmanın akciğer kanseri ve diğer organ kanserleri riskini artırdığını ortaya koymuştur ( Planiniç 2002).

Doza olan katkının büyük kısmı doğal radyoaktif kaynakların yayınladığı ışınlar nedeniyledir (Işık 2002). Doğal radyasyon yolu ile alınan ortalama yıllık etkin doz 2,4 mSv civarındadır (<http://www.taek.gov.tr>, 2010).

Yer kabuğunda bulunan  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  ve  $^{40}\text{K}$  çok uzun yarı ömürlü doğal radyoaktif kaynaklardır. Bu kaynaklar ve bozunum ürünleri yaşadığımız topraklarda, içtiğimiz sulara, soluduğumuz havada bulunmaktadır. Çevresel ortamdaki dağılımları düzgün bir dağılım göstermez. Bu nedenle iç ve dış ışınlanmalar sonucu alınan dozlar da büyük değişiklikler gözlenmektedir (Eisenbud 1987).

Radon ailesinin 35 izotopu vardır.  $^{226}\text{Ra}$ 'nın bozunması ile oluşan doğal radyoaktif bir soy gaz olan  $^{222}\text{Rn}$ , yarı ömrü 3,82 gün olup ailenin en uzun yarı ömürlü çekirdeğidir. Radon dendiğinde aslında  $^{222}\text{Rn}$  izotopu kastedilmektedir.  $^{222}\text{Rn}$ 'nin bozunumu sonucu insan sağlığı için önemli olan kısa yarı ömürlü dört radyoaktif izotop ( $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{214}\text{Po}$ ) oluşur. Bunların yarı ömürleri  $1,64 \times 10^{-4}$  s ile 26,8 dk arasında değişmektedir ([www.nndc.bnl.gov/nudat2/](http://www.nndc.bnl.gov/nudat2/), 2010). Solunum sonu radon ürünlerinin solunum sistemindeki davranışları üzerinde yapılan çalışmalar, ürünlerin akciğerlerdeki biyolojik yarı ömrünün birkaç saatten bir güne kadar olabileceğini göstermiştir. Bu nedenle radonun bozunum ürünleri akciğer kanseri yönünden radondan daha tehlikelidir (Küçüktaç 1996)



Toprakdan havaya sızan  $^{222}\text{Rn}$  önemli bir kapalı ortam kirletici faktör olarak belirmektedir.  $^{222}\text{Rn}$  suda çözünebilir, dolayısıyla sudan havaya geçişi de gerçekleşir. Kapalı ortamlarda veya radyoaktif su kaynaklı havuzların bulunduğu ortamlarda yüksek konsantrasyonlara ulaşabilir (Güler ve Çobanoğlu 1997). Potansiyel sağlık riski sebebiyle toprakta, havada ve suda radon konsantrasyon seviyelerinin belirlenmesi önem taşır. Bu amaçla farklı yerlerde ve kişiler tarafından araştırmalar yapılmıştır.

Akkurt tarafından 2006'da yapılan bir çalışmada, Afyonkarahisar ve civarındaki termal suların radon ve radyum konsantrasyonlarını AB-5R model radon detektörü ile analiz etmiştir. Elde ettiği verilerde radon konsantrasyonunu 0,085-73,62 Bq/L ve radyum konsantrasyonunu ise 0,062-2,97 Bq/L olarak bulmuştur (Akkurt 2006).

İzmir ilinin Çeşme ilçesinde, Barış'ın yapmış olduğu bir çalışmada 4 tane termal sudan ve 11 tane kuyu suyundan alınan örneklerin radon konsantrasyonlarını CR-39 detektörü ile tayin etmiştir. Termal sulardaki radon konsantrasyonu 0,073 ile 0,294 Bq/L aralığında, ortalama değeri 0,207 Bq/L olarak ve kuyu suları için bu değerleri 0,086 ile 0,493 Bq/L arasında, ortalama değeri de 0,303 Bq/L olarak hesaplamıştır (Barış 2006).

Çeşme bölgesi aktif fay hatlarındaki kaplıçalarda yapılan bir çalışmada Güloğlu, 6 farklı istasyonda radon konsantrasyonlarını ölçülmüştür. Sıcak su kaynaklarında radon kolektör yöntemi ile çevresindeki topraklarda ise nükleer iz kazıma yöntemi ile belirlemiştir. Sudaki radon seviyelerini 33,24 Bq/L ile 1,38 Bq/L aralığında, topraklarda ise 2 460 iz/cm<sup>2</sup>/hafta ile 250 iz/cm<sup>2</sup>/hafta aralığında bulmuştur (Güloğlu 2007).

Çin'de Song ve arkadaşları dört farklı kaplıca hotelinde radon ölçümlerini NR-667A (III) radon detektörü ile gerçekleştirmişlerdir. Sıcak su kaynaklarında radon konsantrasyonunu 53,4-292,5 Bq/L ve dışarıdaki havada 17,2-190,9 Bq/m<sup>3</sup> aralığında ölçmüşlerdir. Banyolarında kaplıca suyunun kullanıldığı odaların içerisindeki havada radon düzeyi değişimini 22-2 855 Bq/m<sup>3</sup>, banyosu olmayan odalarda ise 17-912 Bq/m<sup>3</sup> olarak bulmuşlardır (Song ve ark. 2005).

Vogiannis ve arkadaşları Yunanistan'da kaplıcalardaki tedavi süresince radon ve ürünlerinin değişimlerini görmek amacıyla yaptıkları çalışmada termal suların radon konsantrasyon değişimini 10 ile 304 Bq/L aralığında hesaplamışlar. Tedavi görenler için yıllık doz değişimini 0,0067-0,1279 mSv olarak, bu değer için çalışan personel için yıllık 20 mSv olarak hesaplamışlardır (Vogiannis ve ark. 2004).

Radolic ve arkadaşları Hırvatistan'da yaptıkları bir çalışmada 9 ayrı kaplıca havuzunun jeotermal sularındaki ve havadaki radon seviyelerini belirlemiş ve ortalama değerleri sırasıyla 40,3 Bq/m<sup>3</sup> ile 4,5 kBq/m<sup>3</sup> olduklarını görmüşlerdir. Belli bir kaplıca için personelin aldığı etkin doz değerini yılda 0,27 mSv bulmuşlardır. Ayrıca radonun termal su havuzundan havaya transfer faktörünü  $4,9 \pm 0,7 \times 10^{-3}$  olarak hesaplamışlardır (Radolic ve ark. 2005).

Horvath ve arkadaşları Venezuela'nın kuzey bölgesindeki termal suların <sup>222</sup>Rn konsantrasyonu ile ilgili olarak yaptıkları bir çalışmada değerlerin 1-500 Bq/L arasında değiştiğini görmüşlerdir. Kaplıcanın biri için, topraktaki ortalama radon konsantrasyonunu 122 kBq/m<sup>3</sup> değerine ulaştığını ve havadaki değerinin 54 kBq/m<sup>3</sup>'e kadar çıktığı gözlenmiştir. Suların doz hesaplamalarında değerler yılda 4 mSv'ye kadar ulaştığı bulunmuştur (Horvath ve ark. 2000).

Yunanistan'daki bir kaplıcada yapılan çalışmada Nikolopoulos ve arkadaşları, radon ve ürünlerinin tedavi gören hastalar ve çalışan personel üzerindeki etkisini belirlemeye çalışmışlardır. AlphaGUARD PQ2000 Pro ile yapılan ölçüm değerleri su örnekleri için  $54 \pm 10$  ile  $297 \pm 25$  Bq/L, tedavi odaları için 200-1 200 Bq/m<sup>3</sup> değerlerinde bulunmuştur. EQF3020 ile belirlenen değerleri ise <sup>222</sup>Rn için 0-3 160 Bq/m<sup>3</sup>, <sup>218</sup>Po 9-1 000 Bq/m<sup>3</sup>, <sup>214</sup>Pb 7-780 Bq/m<sup>3</sup>, <sup>214</sup>Bi 0-590 Bq/m<sup>3</sup> aralığında gözlemişlerdir (Nikolopoulos ve ark. 2010).

Polonya'da Koztowska ve arkadaşları likit sintilasyon sayacı WinSpectral 1414 kullanarak yeraltı sularında aktif radon konsantrasyonunu belirlemeye dayalı bir araştırma yapmışlardır. İncelenen su numunelerini 115 kaynak suyu, kuyu suyu ve başlangıç noktalarından almışlar ve çıkan sonuçları  $4,2 \pm 0,4$  ile  $1\ 703 \pm 55$  Bq/L

arasında gözlemişlerdir. Tüketim için kullanılan 50 yer altı kaynak suyu veya çeşme suyu için doz hesaplanmış ve yıllık 0,003 ile 1,1 mSv arasında değiştiğini görmüşlerdir (Koztowska ve ark. 2010).

Somlai ve arkadaşları Macaristanda'ki bir kaplıca merkezinde çalışanların ve hastaların  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{234}\text{U}$  ve  $^{238}\text{U}$ 'nun etkisiyle aldıkları radyasyon dozunu belirlemek için bir çalışma yapmışlardır. Su örneklerinde ortalama konsantrasyonlar  $^{222}\text{Rn}$  için 4,13-6,70 Bq/dm<sup>3</sup>,  $^{226}\text{Ra}$  442-793 mBq/dm<sup>3</sup>,  $^{234}\text{U}$  17,4-27,1 mBq/dm<sup>3</sup>,  $^{238}\text{U}$  17,8-28,1 mBq/dm<sup>3</sup> aralığında gözlenmiştir. Yapılan iç ortam radon değeri ise 340-625 Bq/m<sup>3</sup> çıkmıştır. Kaplıcada çalışan personelin aldığı yıllık dozu 2,15-3,95 mSv, tedavide banyoların kullanımını esnasında alınanını da yıllık 0,75 mSv olarak bulmuşlardır (Somlai ve ark. 2007).

İspanya'da Rodenas ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, kaplıca olarak kullanılan kaynak sularının potansiyel riski sebebiyle 82 kaplıcanın  $^{226}\text{Ra}$  ve  $^{222}\text{Rn}$  konsantrasyonları ölçülmüş ve değerleri  $^{226}\text{Ra}$  için <4 ile 3 660 mBq/L,  $^{222}\text{Rn}$  için ise <4 ile 1 868 Bq/L aralığında bulunmuştur (Rodenas ve ark. 2008).

Slovenya'da yapılan bir çalışmada Vaupotic ve Kobal, 26 hastanenin 201 odası için iç ortamın radon seviyelerini ve odalarda çalışan personelin yıllık etkin dozunu belirlemiştir. Sadece yedi oda için ulusal limit değeri olan 400 Bq/m<sup>3</sup>'ü aştığını, diğer odaların bu değerden daha düşük olduğunu gözlemişlerdir. Personelin % 94'ü için hesaplanan yıllık etkin dozun 1 mSv'den düşük olduğu; fakat 10 kişi için bu değer 2,1 ile 7,3 mSv arasında değiştiğini bulmuşlardır (Vaupotic ve Kobal 2006).

Soto ve arkadaşlarının İspanya'nın kaplıcalarında yaptıkları değerlendirmede bir kaplıcada ölçülen su radon konsantrasyonunu 824 Bq/L, oda havasında ise 5 000 Bq/m<sup>3</sup> üzerinde bulmuşlardır. Bu nedenle ülkedeki bütün radyoaktif su kaynaklarının radon konsantrasyonlarının ölçülmesi, burada çalışan tüm elemanların ise radyasyona karşı koruyucu önlem alınmaksızın çalıştırılmamasının gerektiğini belirtmişlerdir (Soto ve ark. 1995).

Bu alışmada Uludağ Üniversitesi Atatürk Rehabilitasyon Merkezi Kükürtlü Kaplıcalarını alışma alanı olarak seçilmiş, su ve hava ortamında çalışmalar yapılmıştır.

## **2. KURAMSAL BİLGİLER**

### **2.1. Radyasyon ve Özellikleri**

Enerjinin, dalgalar veya tanecikler halindeki yayılma durumuna ‘radyasyon’ denir. İyonlayıcı ve iyonlayıcı olmayan elektromanyetik radyasyonlar ile iyonlayıcı tanecikler (partiküller) radyasyon başlıkları altında üç grup halinde incelenebilir.

#### **2.1.1. İyonlayıcı elektromanyetik radyasyon**

İyonize Işıklar, hücrelerdeki molekülleri bir arada tutan atomik bağları kırarak atomları ya da molekül parçalarını pozitif ya da negatif yüklü duruma getirebilecek yeterli enerjiye sahiptirler. X-ışınları, gama ışınları ve kozmik ışınlar iyonlayıcı elektromanyetik radyasyonlardır.

#### **2.1.2. İyonlayıcı parçacık radyasyonu**

İyonize parçacık radyasyonu, belli bir kütle ve enerjiye sahip çok hızlı hareket eden parçacıkları ifade eder. Etkileştiği atomları ya da molekülleri iyonlaştırabilen (pozitif veya negatif yüklü durum) enerjiye sahip olan parçacıklardır. Alfa parçacıkları, beta parçacıkları ve nötronlar örnek verilebilir.

İyon oluşumu dokularda da oluşabilir. İyonlayıcı radyasyonlar önlem alınmadığı takdirde canlılar için zararlı olabilecek radyasyon çeşitleridir. Enerjileri çok yüksek olan iyonlayıcı radyasyonlar moleküllerin yapısını yani yaşamsal işlevlerini bozar ve böylece olumsuz biyokimyasal tepkimeler sonucunda kanser oluşumunu kolaylaştırır.

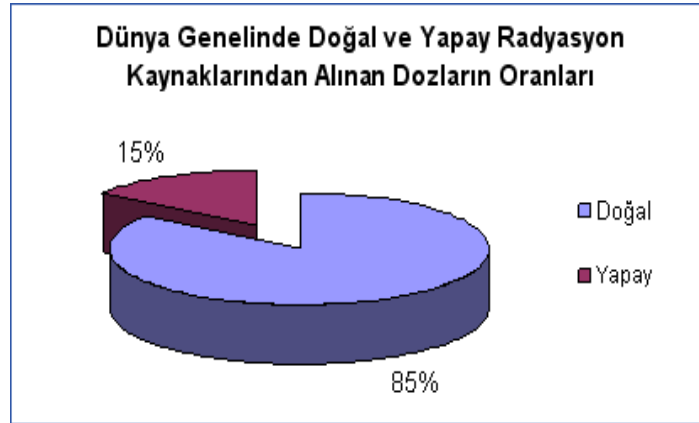
#### **2.1.3. İyonlayıcı olmayan elektromanyetik radyasyon**

Madde içinden geçerken iyon çifti oluşturabilmek için yeterli enerjiye sahip olmayan fotonları içeren elektromanyetik radyasyonlardır. Maddenin atom ya da molekül yapısını değişime uğratmadıklarından canlılar üzerinde büyük bir biyolojik hasara neden olmazlar. Bununla birlikte başka biyolojik etkileri görülebilir. Örneğin ısınmaya,

kimyasal reaksiyonlarda değişmeye ya da hücreler ve dokularda elektrik akımının indüklenmesine neden olabilirler. Görünür ışık, kızılötesi ve ultraviyole ışınlar, radarlar, mikrodalgalar, cep telefonları, baz istasyonları, yüksek gerilim hatları, radyo ve televizyon dalgaları iyonlayıcı olmayan radyasyon yayınlılar (Değerliler 2007).

#### 2.1.4. Radyasyon kaynakları

Dünyanın oluşumuyla birlikte tabiatta yerini alan uzun yarı ömürlü radyoaktif elementler yaşadığımız çevrede normal ve kaçınılmaz olarak kabul edilen doğal bir radyasyon düzeyi oluşturmuşlardır. Bu doğal düzey, nükleer denemeler ve bazı teknolojik ürünlerin kullanımı ile de artış göstermiştir. Bundan dolayı radyasyon kaynaklarını, doğal ve yapay olmak üzere, iki sınıfa ayırabiliriz. Ancak doğal kaynaklardan alınan radyasyon miktarı Şekil 2.1’ de görüldüğü gibi yapay kaynaklara oranla çok daha yüksektir.

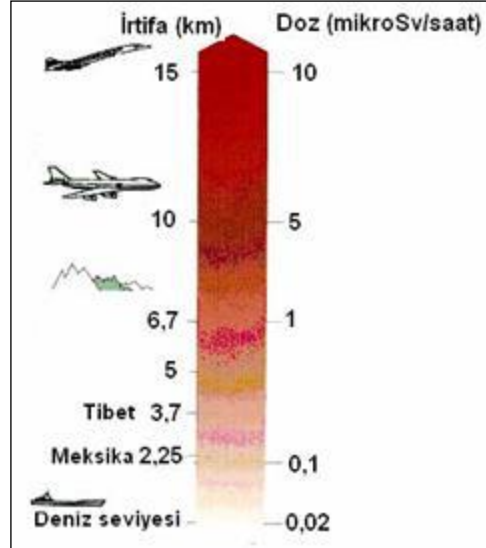


Şekil 2.1. Dünya genelinde doğal ve yapay radyasyondan kaynaklarından alınan dozların oranları (<http://www.taek.gov.tr>, 2010)

##### 2.1.4.1. Doğal radyasyon kaynakları

Yaşanılan yerin, bu yerin toprak yapısının, barınılan binalarda kullanılan malzemelerin, mevsimlerin, kutuplara olan uzaklığın ve hava şartlarının değişimi gibi nedenler radyasyon seviyesini etkiler.

Doğal radyasyonun bir kısmını da uzaydan gelen kozmik ışınlar oluşturur. Bu ışınların büyük bir kısmı dünya atmosferinden geçmeye çalışırken tutulurlar. Yüksekliğe bağlı olarak Şekil 2.2’de görüldüğü üzere kozmik ışınlardan alınan doz miktarı değişim gösterir. Günlük yaşantımızda, kozmik ışınlar nedeniyle maruz kaldığımız radyasyon dozunun dünya ortalaması 0,39 mSv/yıl’dır.



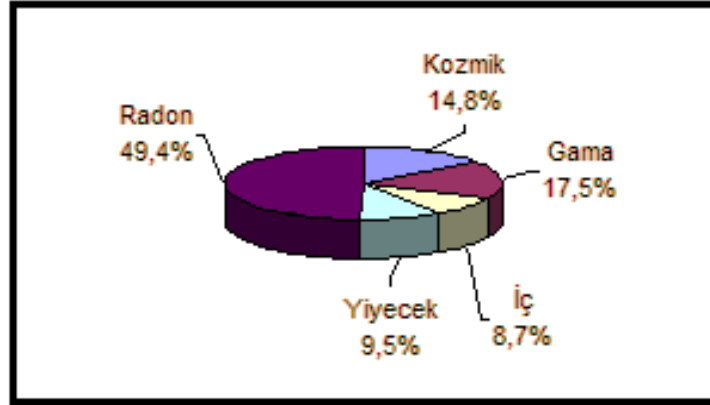
**Şekil 2.2.** Kozmik ışınlardan alınan radyasyon dozunun yüksekliğe göre değişimi (Kapdan 2009)

Fosil yakıtlar doğal ve uzun ömürlü radyoaktif elementler içerirler. Fosil yakıtlar yakıldıklarında bu elementler atmosfere yayılır ve daha sonra toprağa düşerek doğal radyasyon düzeyinde o bölgede az da olsa bir artışa neden olur. Doğada mevcut kısa ömürlü radyoaktif elementlerin yaydığı gama ışınlarının da katkısıyla topraktan maruz kaldığımız radyasyon dozunun dünya ortalaması 0,46 mSv/yıl’dır (Anonim 1996).

Vücudumuzda bulunan radyoaktif elementlerden (özellikle Potasyum-40 radyoaktif elementinden) dolayı da belli bir radyasyon dozuna maruz kalırız. Bir yıl boyunca bu şekilde maruz kaldığımız iç (dahili) radyasyon dozunun dünya ortalaması 0,23 mSv/yıl’dır (Anonim 1996).

Yiyecek, içecek ve teneffüs ettiğimiz havadan maruz kaldığımız dozun dünya ortalaması yaklaşık 0,25 mSv/yıl’dır.

Doğal radyasyon düzeyini arttıran en önemli sebeplerden biri, yer kabuğunda yaygın bir şekilde bulunan radyoaktif radyum elementinin ( $^{226}\text{Ra}$ ) bozunması sırasında salınan radon gazıdır. Radon gazından dolayı dünya genelinde maruz kalınan ortalama doz 1,3 mSv/yıl'dır (Anonim 1996). Şekil 2.3'te tüm bu kaynaklardan alınan radyasyon dozlarının dünya genelindeki oransal değerleri görülmektedir.



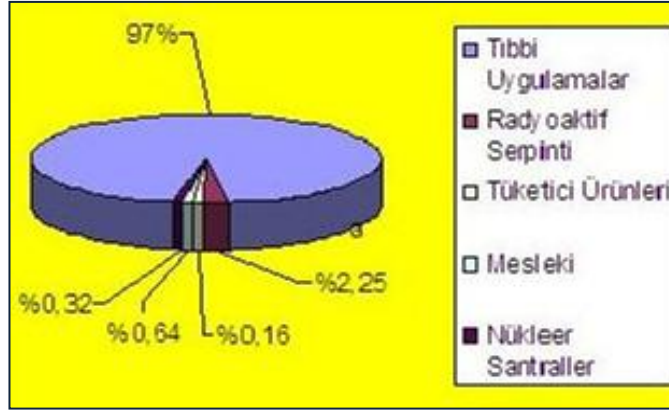
**Şekil 2.3.** Doğal radyasyon kaynaklarından maruz kalınan küresel radyasyon dozlarının oransal değerleri (Anonim 1996)

#### 2.1.4.2. Yapay radyasyon kaynakları

Gelişmiş endüstriyel ekonomiye ve yüksek yaşam standartlarına sahip olmak isteyen insanoğlu, teknolojik gelişiminin gereği olarak, bazı radyasyon kaynaklarını yapay yollarla üretme ve kullanma gereksinimini duymuştur. Bu kaynaklar, işin daha iyi, daha kolay, daha çabuk, daha ucuz ve daha basit yapılmasına olanak sağlar. Yapay radyasyon kaynaklarından alınan doz miktarı, doğal radyasyon kaynaklarından alınan doza göre çok daha düşük olmasına karşın kontrol altında kullanımları etkisi altında kalınacak doz miktarını belirleyebilme açısından önemlidir.

Tıbbi, zirai ve endüstriyel amaçla kullanılan radyoaktif maddeler, nükleer denemeler sonucu meydana gelen serpintiler, çok az da olsa nükleer güç üretiminden salınan radyoaktif maddeler ile bazı tüketici ürünlerinde kullanılan radyoaktif maddeler bilinen başlıca yapay radyasyon kaynakları olarak adlandırılır. Bunların dünyadaki oransal radyasyon doz değerleri Şekil 2.4'te gösterilmiştir.





**Şekil 2.4.** Yapay radyasyon kaynaklarından maruz kalınan küresel radyasyon dozunun oransal değerleri (Anonim 1996)

### 2.1.5. Radyasyon birimleri

İyonlayıcı radyasyonların zararlı etkilerini belirleyebilmek için radyasyon şiddetinin bilinmesi gerekir. İyonlayıcı radyasyonların etkileri radyasyonun geçtiği ortamda meydana getirdiği iyonlaşmaya bağlıdır. İyonlaşma da soğurulan radyasyonun enerjisine bağlıdır. Uluslararası Radyasyon Birimleri Komitesi (ICRU) radyasyon çalışmalarında kullanılan kavramlar olan radyoaktivite, ışınlama dozu, soğurulan doz ve biyolojik doz eşdeğeri için sırasıyla Curie (Ci), Röntgen (R), rad ve rem birimlerini tanımlamıştır (Gollnick 1988).

Uluslararası Birimler Sisteminin (International System of Unit, SI) tüm dünyada kabul edilmesiyle ICRU aynı kavramlar için SI birimlerini tanımlamıştır. Bunlar sırasıyla Becquerel (Bq), Coulomb/kg, Gray (Gy) ve Sievert (Sv) olarak belirlenmiştir. Çizelge 2.1’ de bunlar ve dönüşüm çarpanları verilmiştir.

**Çizelge 2.1.** İyonlayıcı radyasyon birimleri ve dönüşüm faktörleri (Kam 2004)

Büyüklik	SI Birimleri	Eski Birimler	Dönüşüm Faktörleri
Aktivite	Becquerel (Bq)	Curie (Ci)	1 Bq = $2,7 \times 10^{-11}$ Ci
Işınlanma	(Coulomb/kg)	Röntgen	1 C/kg = 3 876 R
Soğurulan Doz	Gray (Gy)	Rad (rad)	1 Gy = 100 rad
Eşdeğer Doz	Sievert (Sv)	Rem (rem)	1 Sv = 100 rem

Herhangi bir radyoizotop saniyede  $3,7 \times 10^{10}$  parçalanma hızına sahipse aktivitesi 1 Curie olarak tanımlanır. Saniye başına parçalanma ise Becquerel ile ifade edilir. Işınlanma birimi eski sistemde Röntgen (R), SI sisteminde ise Coulomb/kg (C/kg) olarak tanımlanır. Normal hava şartlarında ( $0^{\circ}\text{C}$  ve 760 mmHg basıncı) havanın 1 kg'ında  $2,58 \times 10^{-4}$  Coulomb'luk elektrik yükü oluşturan radyasyon miktarına 1 Röntgen denir.

Soğurulan doz her ortam ve her türdeki iyonlayıcı radyasyonlar için tanımlanmıştır. Bu birim, radyasyon demeti ile birlikte soğurucu maddenin de özelliğini belirtir. SI birim sisteminde soğurulan doz birimi gray (Gy) olup, gray; 1 kg'lık bir maddeye 1 Joule'luk enerji veren herhangi bir iyonlayıcı radyasyon dozudur. Eski birim rad (radiation absorbed dose) olup, 1 rad, herhangi bir maddenin gramı başına 100 erg'lik enerji soğurumuna eşdeğerdir.

Radyasyon etkisinde kalan bir insanda meydana gelebilecek zararlı biyolojik etkileri ölçebilen bir birime de ihtiyaç vardır. Vücudun kilogramı başına soğurduğu enerjinin meydana getirdiği biyolojik etki, maruz kalınan radyasyonun cinsine ve enerjisine göre farklılıklar gösterir. Örneğin alfa parçacıkları beta parçacıklarına göre daha ağır ve yüksek enerjili olduğundan vücut içinde geçtikleri birim yol başına daha fazla enerji bırakırlar, böylece geçtikleri bölgede daha fazla hasara yol açarlar. Ayrıca organların radyasyona karşı duyarlılıkları farklı olduğundan aynı doza karşı gelen biyolojik etki de farklıdır. Bütün bu faktörleri içine alan radyasyon doz birimi olarak eşdeğer doz birimi tanımlanmıştır.

Kalite faktörü (KF) biyolojik doz eşitliğini tayin etmede kullanılan bir değer olup, biyolojik etkilenmenin radyasyon türüne ve enerjisine bağımlılığını belirlemek üzere kullanılmaktadır. Pratik amaçlar için Çizelge 2.2'de gösterilen kalite faktörleri kullanılmaktadır. Bütün vücut için ise etkin biyolojik eşdeğer doz ifadesi kullanılır. Biyolojik eşdeğer doz veya etkin eşdeğer doz birimi Sievert (Sv), eski birimi ise rem (roentgen equivalent man) dir (Cember 1996).

Yıllık etkin biyolojik doz eşdeğeri (Y.E.D.E.), insanın farklı radyasyon kaynaklarından yayınlanan ışınlar gerektiren dışarıdan maruz kalmak suretiyle, gerekse yediği ve içtiği gıdalar veya teneffüs ettiği havada bulunan değişik radyonüklidlerden yayınlanan ışınlar içeriden maruz kalmak suretiyle bir yıl süresince alacağı radyasyon dozu olarak tanımlanır (Çelebi 1995).

**Çizelge 2.2.** Çeşitli radyasyonlar için kalite faktörleri (Kam 2004)

<b>Radyasyon Türü</b>	<b>Kalite Faktörü</b>
X ve gama ışınları	1
Elektronlar ve beta parçacıkları	1
Nötronlar, enerjileri<10Kev	3
Nötronlar, enerjileri>10Kev	10
Alfa parçacıkları	20

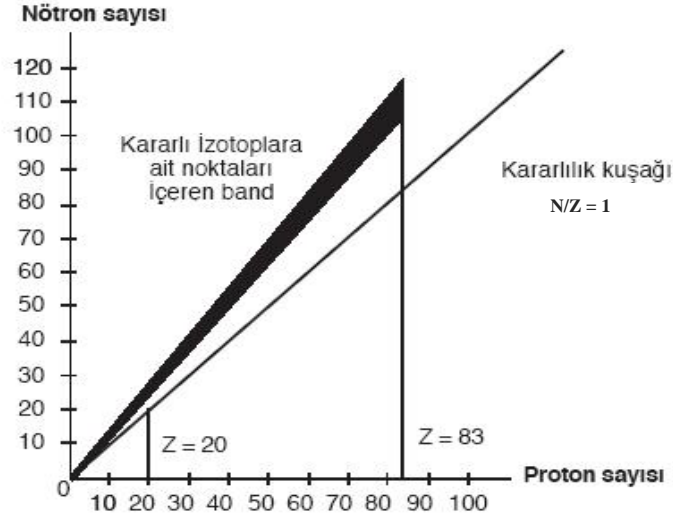
Yıllık etkin biyolojik doz eşdeğerinin hesaplanmasında her radyonüklidin yayınladığı radyasyon tipi ve enerjisi kullanılarak her radyonüklid için aktivite başına yayınladığı radyasyonun doz dönüşüm faktörleri belirlenmektedir. Birim hacim veya birim ağırlık başına tespit edilen aktivite konsantrasyonu ile doz dönüşüm faktörleri çarpılarak yıllık etkin biyolojik doz eşdeğeri (Y.E.D.E.) bulunur.

## **2.2. Radyoaktivite**

Radyoaktivite, kararsız olan bazı atom çekirdeklerinin, bazı parçacıklar ve/veya enerji yayınlamaya kendiliğinden bozunmasıdır. Olayın varlığı, ilk defa 1896'da Antoine Henry Becquerel tarafından keşfedilmiştir.

Hidrojen çekirdeğinin dışında bütün çekirdekler nötron ve protonlardan oluşur. Bir çekirdeğin kararlılığını, nötron (N) ve proton (Z) sayıları, düzenlenişleri ve birbirleri üzerine uyguladıkları kuvvetler belirler. N/Z oranı Şekil 2.5'te görüldüğü gibi hafif izotoplarda 1 iken, periyodik çizelgenin sonundaki ağır elementlere doğru gidildikçe bu oran artmaktadır. En ağır kararlı çekirdek  ${}_{83}\text{Bi}^{207}$ 'dir. Daha ağır çekirdekler sahip oldukları fazla enerjiden dolayı kararsızdırlar. Bunlar fazla enerjilerini radyasyon

yayınlayarak atmaya ve kararlı hale geçmeye çalışırlar. Bozunuma uğrayan radyoizotop doğada bulunuyor veya doğada bulunan diğer radyoizotopların bozunmasından ortaya çıkıyorsa buna doğal radyoaktivite, radyoizotop insan tarafından yapay olarak reaktörlerde veya hızlandırıcılarda üretiliyorsa buna da yapay radyoaktivite adı verilir (Murray 2001, Turner 1995).



Şekil 2.5. Çekirdek kararlılığının nötron proton oranına bağlılığı (Turhan 2008)

### 2.2.1. 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).

#### 2.2.1.1. Doğal seriler

Doğal radyoaktif elementler dünyanın oluşumundan ( $4,6 \times 10^9$  yıl önce) beri vardır. Bu radyoaktif elementler:

- doğal radyoaktif bozunum serisi içinde yer alanlar
- doğada tek başına bulunanlar

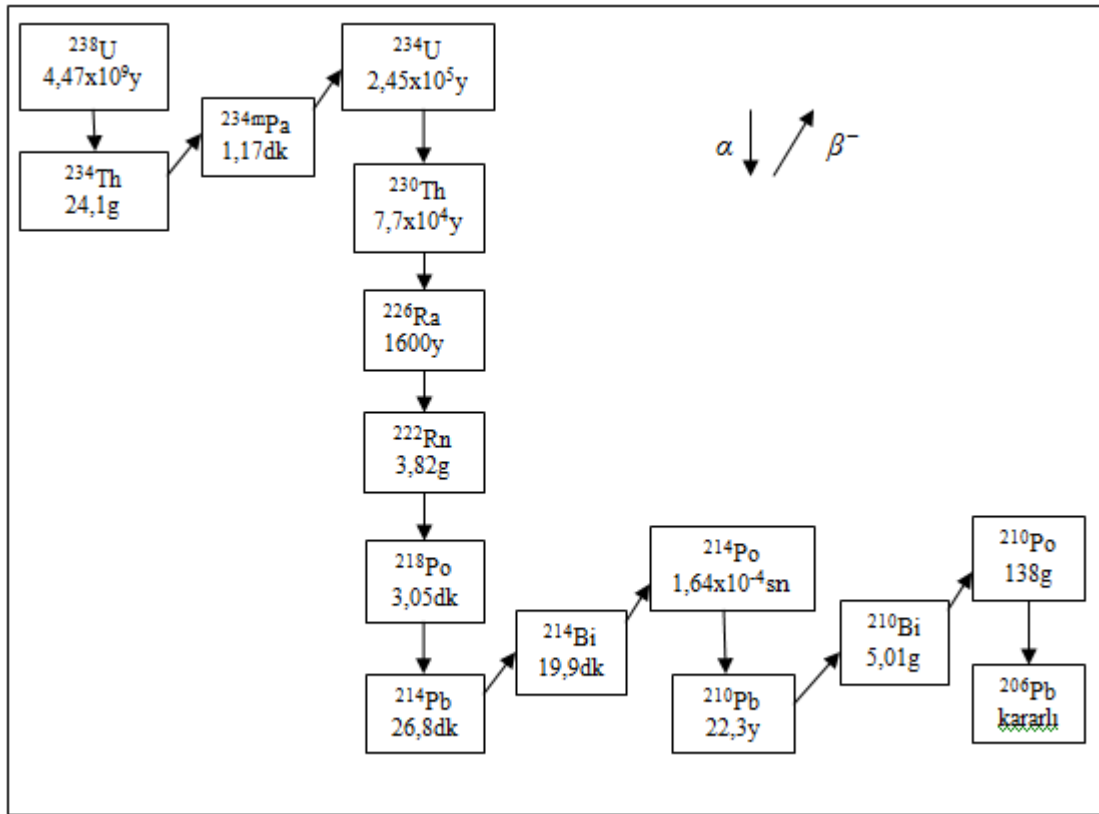
olmak üzere iki grupta toplanabilmektedir (Eisenbud 1987, Valkovic 2000).

Doğada her biri ağır bir radyoizotoptan başlayan üç radyoaktif bozunum serisi bulunmaktadır. Bunlar:

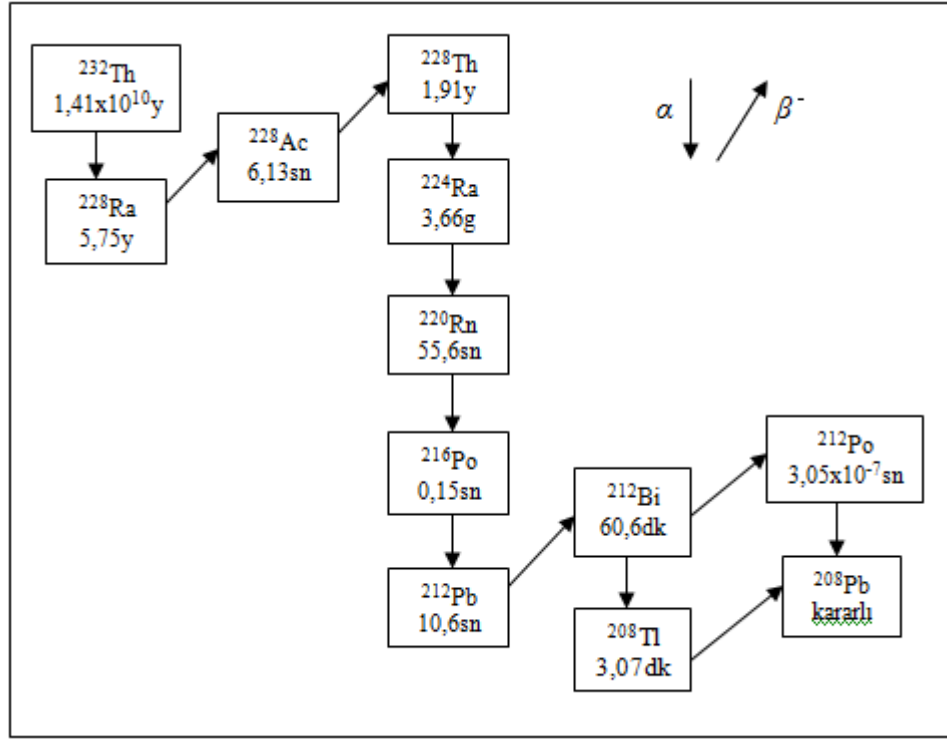
- Uranyum serisi (U-238 kaynaklı)
- Toryum serisi (Th-232 kaynaklı)
- Aktinyum serisi (U-235 kaynaklı) dir.

Her üç radyoaktif seride ortak olarak birçok uzun yarı ömürlü üye ile bir soy gaz üye bulunmakta ve her üç seri de bir kararlı kurşun izotopu ile sonlanmaktadır (Valkovic 2000).

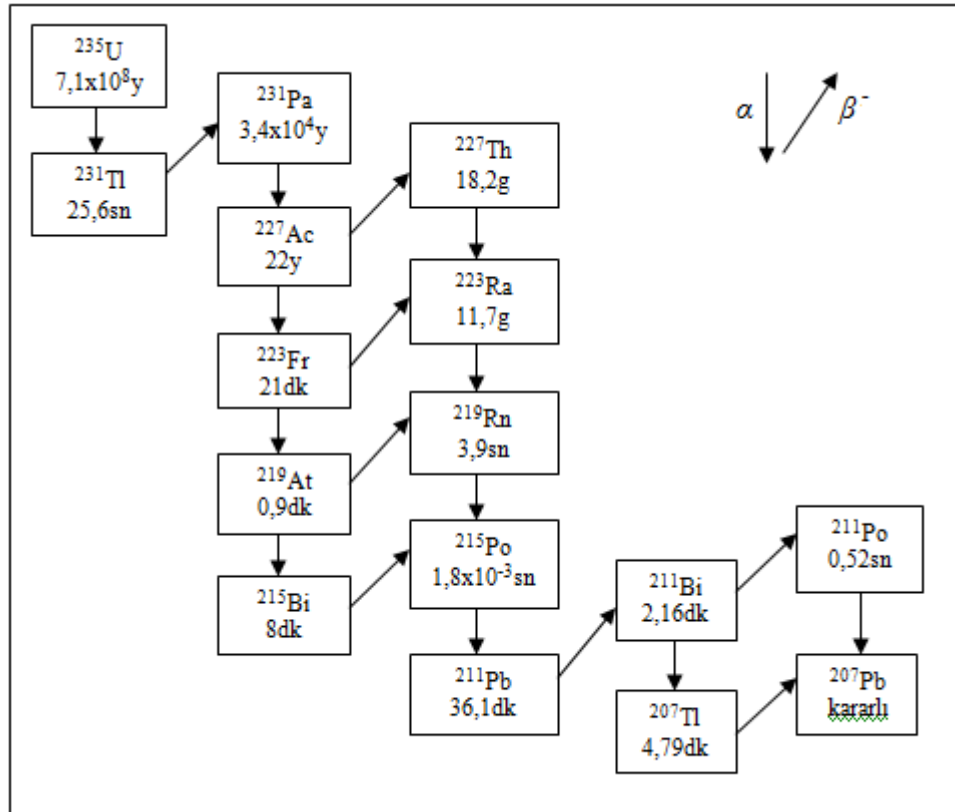
Üç serinin bozunum şemaları sırasıyla Şekil 2.6, Şekil 2.7 ve Şekil 2.8’de verilmektedir.



Şekil 2.6. Uranyum serisinin bozunum şeması (Kapdan 2009)



Şekil 2.7. Toryum serisinin bozunum şeması (Kapdan 2009)



Şekil 2.8. Aktinyum serisinin bozunum şeması (Kapdan 2009)

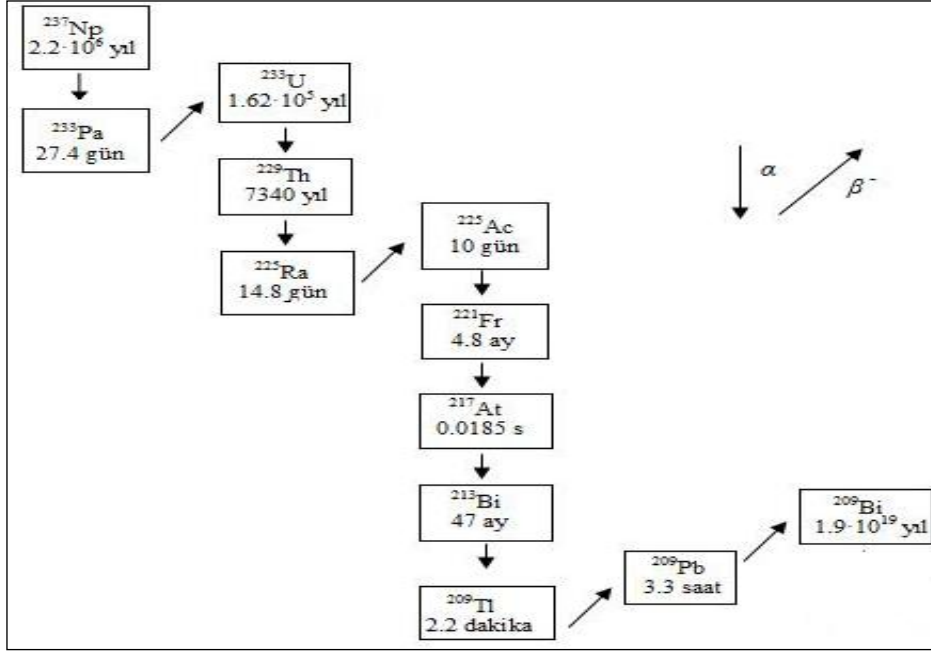
Doğada tek başına bulunan bazı radyonüklitler de vardır. Çizelge 2.3'te tabiatta tek başına var olan radyoizotopların bir listesi verilmektedir. Bunlar arasında en önemli olanlarından biri  $1,27 \times 10^9$  yıl yarı ömre sahip K-40'tır. Doğadaki potasyumun % 0,01'ini K-40 oluşturmaktadır (Eisenbud 1987, Gollnick 1988, Turner 1995, Valkovic 2000).

**Çizelge 2.3.** Doğada tek başına bulunan radyoizotoplar (Valkovic 2000)

Radyonüklit	Yarı ömür ( $10^9$ yıl)	Spesifik aktivite (Ci/gr)	Radyoaktivite
$^{40}\text{K}$	1,27	$8,3 \times 10^{-10}$	$\beta$
$^{50}\text{V}$	$6 \times 10^5$	$2,8 \times 10^{-14}$	$\beta$
$^{87}\text{Rb}$	47	$2,5 \times 10^{-8}$	$\beta$
$^{115}\text{In}$	$6 \times 10^5$	$5 \times 10^{-12}$	$\beta$
$^{138}\text{La}$	110	$2,1 \times 10^{-12}$	$\alpha$
$^{142}\text{Ce}$	$6 \times 10^6$	$5,7 \times 10^{-14}$	$\alpha$
$^{147}\text{Sm}$	110	$3,4 \times 10^{-9}$	$\alpha$
$^{148}\text{Sm}$	$1,2 \times 10^4$	$2,2 \times 10^{-11}$	$\alpha$
$^{149}\text{Sm}$	$4 \times 10^5$	$8,2 \times 10^{-13}$	$\alpha$
$^{152}\text{Gd}$	$1,1 \times 10^5$	$4,1 \times 10^{-12}$	$\alpha$
$^{174}\text{Hf}$	$4,3 \times 10^5$	$8,4 \times 10^{-14}$	$\alpha$
$^{144}\text{Nd}$	$5 \times 10^6$	$1,2 \times 10^{-13}$	$\alpha$
$^{190}\text{Pt}$	700	$3,3 \times 10^{-13}$	$\alpha$
$^{192}\text{Pt}$	$10^6$	$1,4 \times 10^{-14}$	$\alpha$
$^{204}\text{Pb}$	$1,4 \times 10^8$	$1,8 \times 10^{-16}$	$\alpha$
$^{232}\text{Th}$	14	$1,1 \times 10^{-7}$	$\alpha$
$^{235}\text{U}$	0,71	$1,5 \times 10^{-8}$	$\alpha$
$^{238}\text{U}$	4,5	$3,3 \times 10^{-7}$	$\alpha$

### 2.2.1.2. Yapay seriler

Neptinyum serisi yapay bir seridir. Doğal serilerde olduğu gibi neptinyum serisinin bir asal gazı yoktur. Kütle numaraları  $(4n+1)$  şeklindedir. Şekil 2.9'da da görüldüğü gibi bu seri  $^{237}_{93}\text{Np}$  ile başlar ve serinin kararlı olan son elementi  $^{209}_{83}\text{Bi}$  'dur.



Şekil 2.9. Neptinyum serisi ürünleri ve yarı ömürleri (Arya 1989)

Doğada var olan dört radyoaktif serinin ilk ve son çekirdekleri ile en kısa ve en uzun yarı ömürlü üyeleri Çizelge 2.4'te toplu biçimde gösterilmiştir.

Çizelge 2.4. 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	$^{238}_{92}\text{U}$	$^{206}_{82}\text{Pb}$	$15 \times 10^{-4}$ sn	$4,5 \times 10^9$ yıl
Toryum Serisi	$^{232}_{90}\text{Th}$	$^{208}_{82}\text{Pb}$	$3,0 \times 10^{-7}$ sn	$1,9 \times 10^{10}$ yıl
Aktinyum Serisi	$^{235}_{92}\text{U}$	$^{207}_{82}\text{Pb}$	$10^{-4}$ dk	$7,15 \times 10^8$ yıl
Neptinyum Serisi	$^{241}_{94}\text{Pu}$	$^{209}_{83}\text{Bi}$	0,0185 sn	$2,2 \times 10^6$ yıl



### 2.2.2. Radyoaktif bozunma türleri

Radyoaktif bozunma (parçalanma), radyonüklid olarak da adlandırılan kararsız çekirdeklerde görülür. Kararsız durumlarını foton ya da parçacık yayınlamaya giderirler. Parçacık yayımı sonucu yeni çekirdek oluşur.

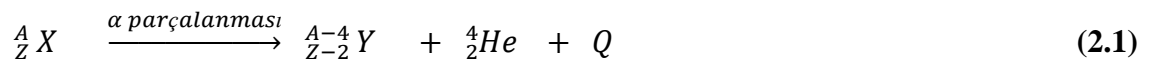
Radyoaktif bozunma kontrol edilemeyen bir durumdur. Yavaşlatılamaz ya da durdurulamaz ve radyoaktif madde tükeninceye kadar sürer. Bilinen radyoaktif bozunma türleri şunlardır:

- a) Alfa bozunumu ( $\alpha$  bozunumu)
- b) Beta bozunumu ( $\beta^-$  ve  $\beta^+$  bozunumu)
- c) Gama ışını yayınlanması ( $\gamma$ -yayma)
- d) İç dönüşüm olayı (IC)
- e) Elektron yakalama olayı
- f) Nötron yayınlanması

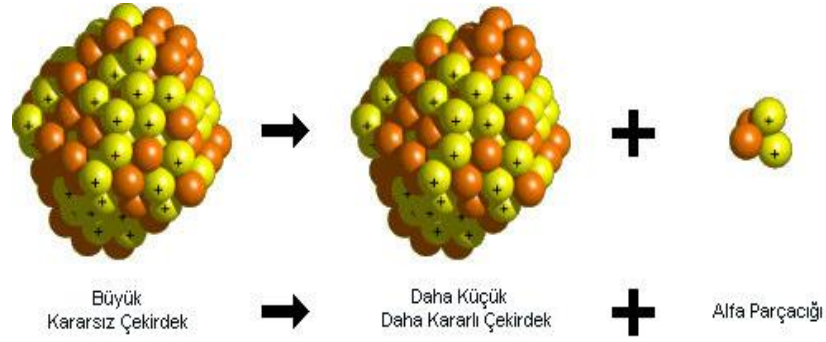
#### 2.2.2.1. Alfa bozunumu

Alfa ( $\alpha$ ) ışınlarının elektrik ve manyetik alan içindeki sapmasından faydalanarak hesaplanmış, alfa parçacıkları için yükün kütleye oranı  $e/m = 4\ 823\ \text{emb/g}$ 'dir. Hidrojen iyonları için  $e/m = 9\ 660\ \text{emb/g}$ 'dir. Bu alfa parçacığının kütlesinin hidrojenin iki katı olduğunu veya alfa parçacığının yükünün hidrojenin iki katı, kütlesinin ise hidrojen iyonunun dört katı olduğunu gösterir. Böylece alfa parçacıklarının gerçekten hızlı hareket eden ve iki kere iyonlaşmış helyum atomlarından ( $\text{He}^{++}$ ) olduğu ortaya çıkar.

Bir element bir alfa parçacığı çıkardığı zaman atom numarası iki, kütle numarası da dört değerinde azalır. Yani bir elementi  ${}^A_Z X$  şeklinde gösterdiğimizde alfa parçalanmasından sonra;



(2.1) denklemine göre yeni bir elemente dönüşür. Q parçalanma sonucu açığa çıkan enerjidir. Bu alfa parçacığının ve yeni oluşan çekirdeğin kinetik enerjisi şeklinde kendini gösterir.



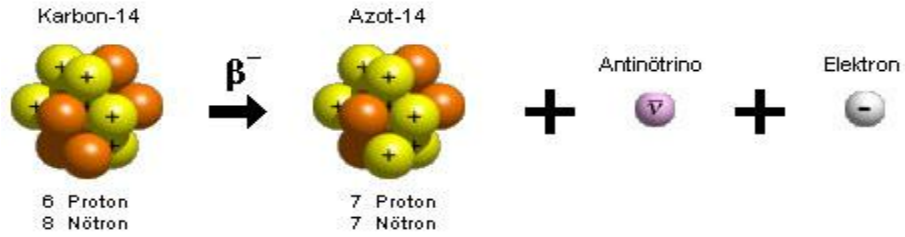
**Şekil 2.10.** Alfa bozunumu (Görür 2006)

Atom numarası büyük olan izotoplar Şekil 2.10'da görüldüğü gibi genellikle alfa çekirdeği yayarak bozunurlar. Hem doğal hem de yapay radyoaktif maddelerden salınabilirler. Doğal olarak bulunan radyoaktif maddelerden yayınlanan alfaların ortalama enerjileri 5 MeV civarındadır. Bu ışınların en enerjik olanları 9 MeV civarında bir enerjiye sahiptirler. Alfa parçacıkları şiddetli iyonlayıcı parçacıklardır ve havadaki yolları en fazla 6-7 cm, dokuda (veya ince kağıt) yaklaşık 44  $\mu\text{m}$  civarında yol alır. Bunun nedeni, büyük elektrik yüküne sahip olmaları ve madde içinden geçerken fazla miktarda iyonlaşma meydana getirmelerinden dolayı enerjilerini çok çabuk kaybetmeleridir.

Bu parçacıkların çevresel etkileri önemsizdir, ancak canlılar için iç yayıcı olarak oldukça önemlidirler. Özellikle solunum sisteminden geçerken, kemik yüzeylerinde ve kırmızı kemik iliğinde büyük tahribatlara neden olurlar. Bu parçacıkların enerjileri çok kısa yollar boyunca birikirler ve hassas bölge yüzeylerinde sınırlandırılmış yüksek dozlara neden olurlar. Bu nedenle radyasyondan korunma açısından özellikle, su, toprak ve havada alfa radyoaktivitesi sürekli izlenmelidir.

### 2.2.2.2. Beta ( $\beta$ ) bozunumu

Radyoaktif maddeler tarafından salınan diğer bir çeşit ışımaya beta ışınlarıdır. Bu ışınlar da parçacık özelliği gösterirler. Yük ve kütleleri elektronun yük ve kütlesine eşittir. Kısacası beta parçacıkları elektronlardır. Ancak, doğal ve yapay radyoaktif maddeler tarafından yayınlanan bu parçacıklar pozitif yüklü de olabilirler. Beta bozunumu, çekirdeğin kararsızlığına göre protonların veya nötronların fazlalığından meydana gelir. Nötron fazlalığı olan çekirdekler (2.2) denkleminde gösterildiği gibi nötronun protona dönüşümü ile bozunur. Bu bozunum şematik olarak Şekil 2.11’de gösterilmiştir. Bozunum sonrası elektron ve antinötrino ( $\bar{\nu}$ ) açığa çıkar.



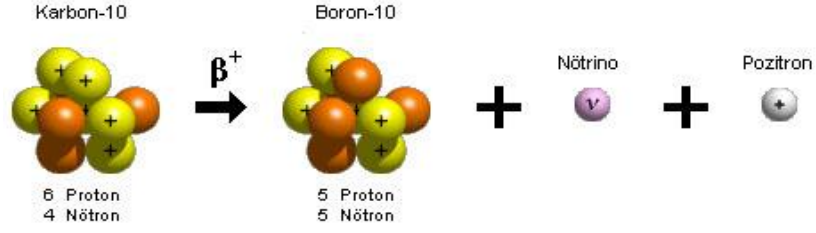
Şekil 2.11. Örnek bir  $\beta^-$  bozunumu (Görür 2006)

Yayınlanan elektronlar beta parçacıkları veya “Negatron” olarak adlandırılıp  $\beta$  veya  $\beta^-$  şeklinde gösterilirler. Beta bozunumu yapan çekirdek (2.3) bağıntısında görüldüğü gibi atom numarası bir artarak kendinden bir sonraki elementin izobar atomuna dönüşür.



Eğer çekirdekteki proton fazlalığından ileri gelen bir beta yayımlanması var ise parçacık pozitif yüklüdür ve “Pozitron” adını alır. Sembolik gösterimi  $\beta^+$  şeklindedir. Bu bozunumda denklem (2.4)’te gösterildiği gibi pozitronla beraber yüksüz olan nötrino ( $\nu$ ) da açığa çıkar.

$$p \rightarrow n + \beta^+ + \nu \quad (2.4)$$



**Şekil 2.12.** Örnek bir  $\beta^+$  bozunumu (Görür 2006)

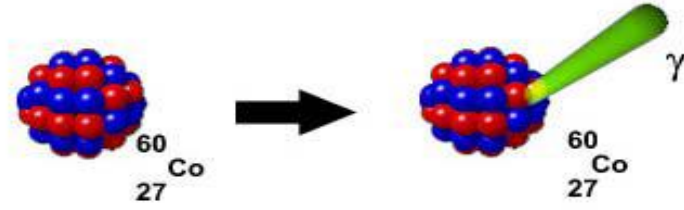
Böylece pozitron yayınlayan çekirdeğin kütle numarası değişmezken proton sayısı bir eksilerek Şekil 2.12’de gösterildiği ve (2.5) denkleminde de temsil edildiği gibi kendinden önceki elementin izobar atomuna dönüşür.

$${}^A_Z X_N \rightarrow {}^A_{Z-1} Y_{N+1} + \beta^+ + \nu \quad (2.5)$$

Sürekli enerji dağılımına sahip beta ışınlarının enerjisi 0,01 MeV’den 5 MeV’e kadar değişebilirken ortalama enerjileri 1 MeV civarında değişir. Havada 3m ve dokuda yaklaşık 3 mm civarında erişim mesafelerine sahiptirler. Çevresel etki bakımından dış ışınlamada, havadaki erişim mesafelerinden dolayı, önemli bir radyasyon riski oluşturabilirler. Alfa parçacıkları gibi iç ışınlamada da hasara neden olabilirler.

### 2.2.2.3. Gama ışını yayınlanması ( $\gamma$ - yayma)

Bir çekirdek alfa ve beta parçacığı yayınladıktan sonra genellikle kararlı hale geçemez, kısacası çekirdek uyarılmış halde kalabilir. Bu çekirdek fazla enerjisini elektromanyetik özellikte olan gama ışını şeklinde yayınlar. Çekirdek ne kadar yüksek enerji seviyesinde uyarılmış halde kalmışsa, çıkacak gama ışınlarının enerjisi o kadar yüksek olur. Bu şekilde bozunan çekirdeklerin atom ve kütle numaralarında bir değişme olmaz, bu nedenle izomerik bozunma adı verilmiştir. Şekil 2.13’te  ${}^{60}\text{Co}$  gama ışını yayınlamasının şematik gösterimi verilmiştir.



**Şekil 2.13.** Gama ışını yayınlanması (Görür 2006)

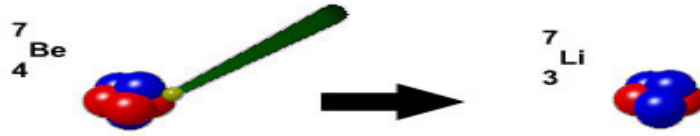
Radyoaktif çekirdeklerin gama yayımlamasının özel bir hali de vardır. Buna “gama aktifliği hali” de denir. Radyoaktif bir parçalanmadan sonra geride kalan ya da yeni oluşan çekirdek, her zaman olduğu gibi kısa yarı ömürlü olmayabilir. Yüksek enerji seviyesinde uzun yarı ömürlü olarak kalabilir. Buna “metastabil” hal denir. Çekirdek, birbirinden farklı, biri temel halde kararlı, diğeri daha yüksek enerji seviyesinde kararsız olmak üzere iki halden birinde bulunabilir. Bu çekirdekler aynı kütle ve atom numaralarına sahip oldukları halde çekirdek yapılarında köklü farklılıklar vardır. Böyle aynı sayılarla temsil edilen fakat farklı radyoaktif özellik gösteren çekirdeklere ‘izomer çekirdekler’ denir.

Gama ışınları, beta ışınlarından daha yüksek enerjili ve daha girici (nüfuz edici) ışınlardır. Bir atom çekirdeğinin çapından daha küçük dalga boylu dalgalar içerirler. Gama yayımlanmasının yarı ömrü diğeri bozunumlarla kıyaslandığında çok kısadır, genellikle  $10^{-9}$  saniyeden daha küçüktür ama saat ve gün mertebesinde yarı ömürlü gama yayımlanması da vardır.  $\gamma$ -ışınlarının enerjileri 0,1 MeV ile 3 MeV arasında değişir (Davutoğlu 2008).

#### 2.2.2.4. 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 yayımlanır (Denklem (2.6)). Bu bozunumda çekirdekten parçacık salınımı olmaz fakat proton sayısı bir eksilir (Şekil 2.14). 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 2.14.** Elektron yakalama olayı (Görür 2006)



#### 2.2.2.5. İç dönüşüm (IC)

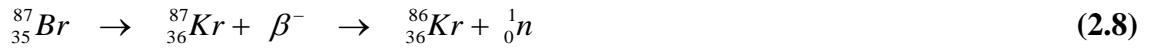
Çekirdek, fazla enerjisini doğrudan yörüngedeki bir elektrona iletir ve bu elektronu yörüngeden fırlatır. Bu olayda elektron tarafından taşınan enerji, çekirdek tarafından salınan enerjiden daha küçüktür, çünkü enerjinin bir kısmı elektronu bulunduğu yörüngeden koparabilmek için harcanmıştır. Bu sebeple, 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 ışıdır. 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  $\beta^-$  yayınlayan radyoaktif madde incelendiğinde,  $\beta^-$  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 (Akar 2010).

#### 2.2.2.6. Nötron yayınlanması (n-yayma)

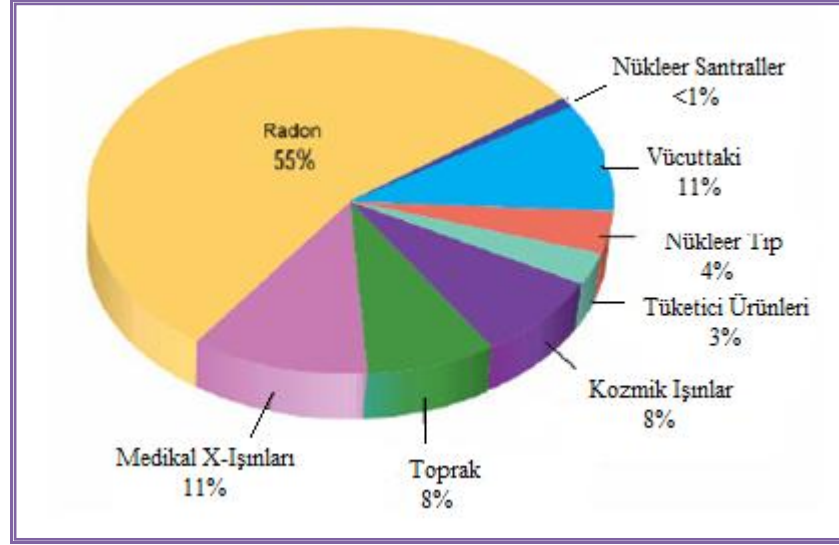
Radyoaktif atomların bozunma olaylarında, sadece birkaç tanesi nötron yayınlar. En iyi bilinen örnek  ${}_{35}^{87}\text{Br}$  izotopudur. Bu örnek bozunma (2.8) denklemi ile ifade edilmiştir (Özdemir 2006).



### 3. RADON VE ÖZELLİKLERİ

#### 3.1. Radon

$^{222}\text{Rn}$  1900 yılında E. Darn tarafından keşfedilmiş ve havadaki varlığı, ilk olarak 1901 yılında Elsterve Geitel tarafından bulunmuştur. Simgesi Rn, atom numarası 86 olan radon renksiz, kokusuz ve tatsız asal radyoaktif bir gazdır. Diğer elementlerle kimyasal tepkimeye girmez. Havadan yedi buçuk kez, hidrojenden ise 100 kez daha ağırdır, -61,8°C 'de sıvılaşır ve -71°C'de donar. Yoğunluğu 0°C'da 9,72 g/l'dir. Daha çok soğutulacak olursa yumuşak sarı bir renk vererek parlar. Sıvı hava sıcaklığı olan -195°C'de turuncu-kırmızı arası bir renk alır. Radyoaktif radyumun ( $^{226}\text{Ra}$ ) stabil özellikteki kurşuna ( $^{206}\text{Pb}$ ) dönüşümü sırasında meydana gelir (Güler ve Çobanoğlu 1997). Şekil 3.1'de görülebileceği gibi radon, yeryüzünde bulunan radyasyon kaynakları içerisinde en yüksek orana sahip olan doğal radyasyon kaynağıdır.

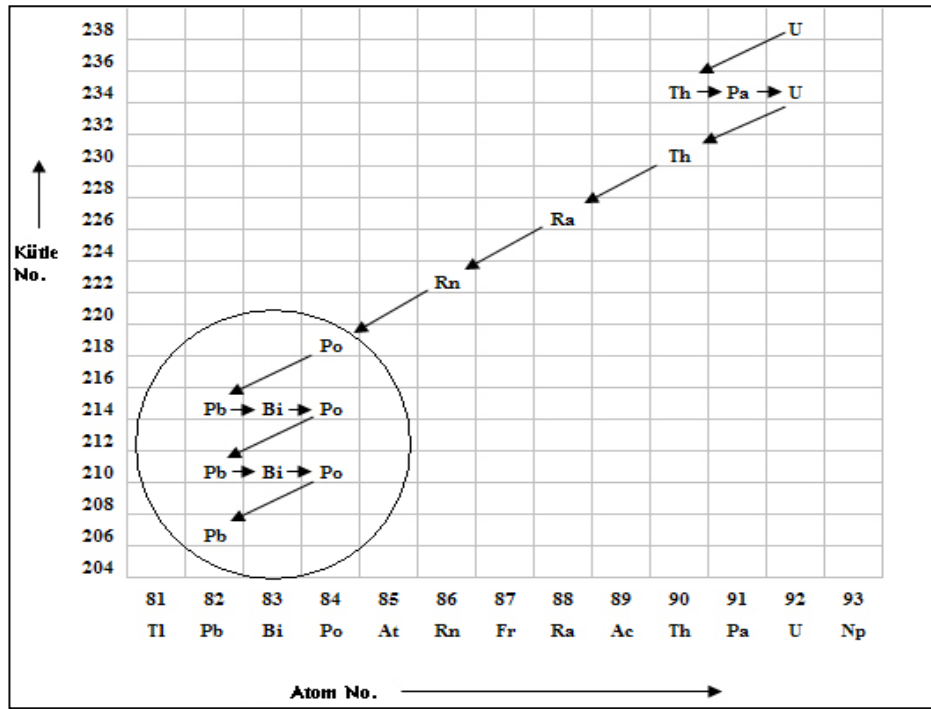


**Şekil 3.1.** Radon ve radon dışındaki kaynaklardan maruz kalınan radyasyon miktarları (Görür 2006)

$^{222}\text{Rn}$ , doğal radyasyon kaynaklarından olan 4,5 milyar yıl yarı ömre sahip  $^{238}\text{U}$  serisinin bir elemanıdır. Uranyum serisi içinde yer alan, yarı ömrü 1 600 yıl olan alfaaktif  $^{226}\text{Ra}$ 'nın bozunumu sonucunda ortaya çıkar.



$^{226}\text{Ra}$ , uranyum serisinin bir elemanı olduğundan toprakta, kayalarda, yapı malzemelerinde, su ve gıdalarda bulunmakta ve yeryüzünde oldukça geniş bir dağılım göstermektedir.  $^{226}\text{Ra}$ , uzun yarı ömürlü olması nedeniyle,  $^{222}\text{Rn}$  oluşumunda bir üretic görevi yapar. Genellikle, kısa yarı ömürlü bozunum ürünleri ( $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{214}\text{Po}$ ) ile denge halinde bulunur (Thomas 1985).  $^{222}\text{Rn}$  ve bozunum ürünleri Şekil 3.2’de görülmektedir.

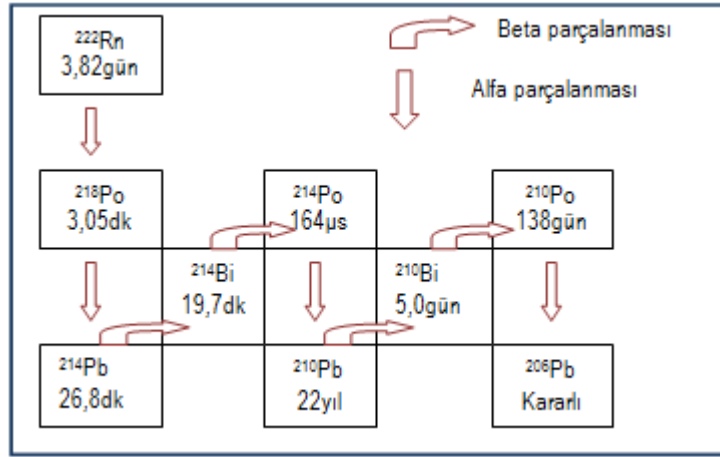


**Şekil 3.2.**  $^{238}\text{U}$  bozunum serisinden gelen  $^{222}\text{Rn}$ 'nin ve ürünlerinin bozunum aşamaları (Kapdan 2009)

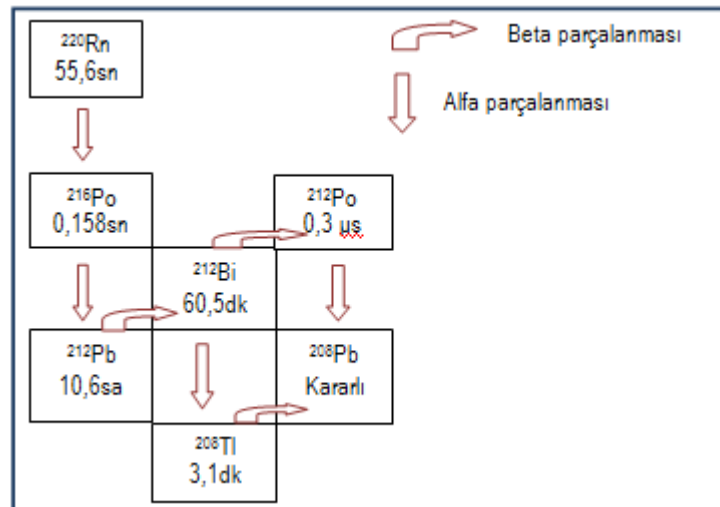
35 izotopa sahip radon ailesinin üç temel izotopu  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{220}\text{Rn}$  ve  $^{219}\text{Rn}$ 'dir. Bunlar radyoaktif soy gazlar olup sırasıyla *radon*, *toron* ve *aktinon* olarak adlandırılır. *Radon* ( $^{222}\text{Rn}$ ) uranyum serisinin, *toron* ( $^{220}\text{Rn}$ ) toryum serisinin ve *aktinon* ( $^{219}\text{Rn}$ ) ise aktinyum serisinin üyeleridir. Uranyum, toryum ve aktinyum zincirine ait  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  ve  $^{232}\text{Th}$  başlangıç radyoizotopları toprakta, kayalarda ve bazı inşaat malzemelerinde çok fazla miktarda bulunmaktadır. Bu nedenle radon, toron ve aktinon tüm kaya ve toprak parçalarından ve yapı malzemelerinden ortama salınırlar (Evans 1968, Durrani ve Ilic 1997).

$^{238}\text{U}$  elementinin doğadaki izotopik bolluğu diğer izotoplarına göre çok daha yüksektir. Bu nedenle  $^{222}\text{Rn}$  ortamda diğer izotoplarına göre daha yüksek oranda bulunmaktadır. Bununla birlikte  $^{222}\text{Rn}$  daha uzun yarı ömürlü olması nedeni ile konsantrasyon ölçümlerinde ön planda tutulmaktadır (Evans 1968).

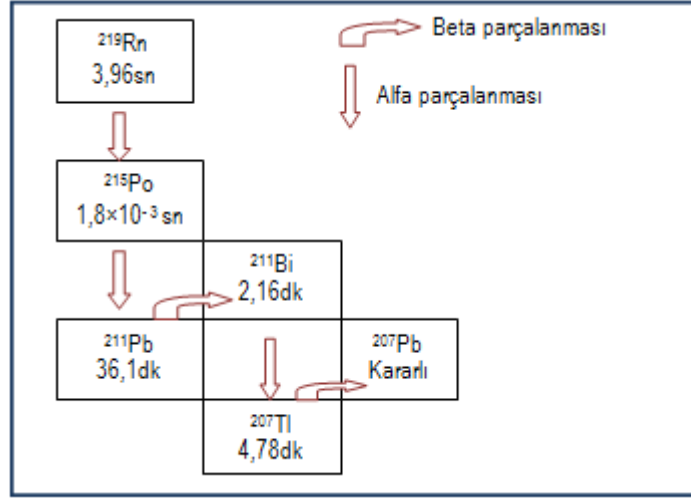
$^{220}\text{Rn}$  ve  $^{219}\text{Rn}$ ' un yarı ömürlerinin çok kısa olması nedeniyle ortam havasına karışarak oluşturabilecekleri aktivite düşüktür. Doğada  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{220}\text{Rn}$  den 20 kat daha bol bulunmaktadır. Bu izotopların bozunum şemaları Şekil 3.3'te görülmektedir ve yarı ömürleri sırasıyla 3,82 gün, 55,6 sn ve 3,96 sn ortalama ömürleri ise 5,51 gün, 80,2 sn ve 5,71 sn'dir .



(a)



(b)



(c)

**Şekil 3.3.** Radon ailesinin üç temel izotopunun; (a)  $^{222}\text{Rn}$ ; (b)  $^{220}\text{Rn}$ ; (c)  $^{219}\text{Rn}$ 'nin bozunum şemaları (Görür 2006'dan değiştirilerek alınmıştır)

$^{222}\text{Rn}$ , topraktaki radyumun bozunumuyla oluştuğundan sonra atmosfere yayılır. Radonun, kuru topraktaki bozunmadan önce ortalama yayılma mesafesi yaklaşık 1 m'dir. Toprakta bulunan radonun yaklaşık % 50'si, yüzeyden 1 m derinlikte ve yaklaşık % 75'i de 2 m içinde oluşur (Kapdan 2009).  $^{222}\text{Rn}$  havadaki yayılma hızı yüksek olup radon ve ürünleri atmosferin her yerinde bulunur. Bu nedenle radon konsantrasyonlarının yüksek olduğu bölgeler olası uranyum rezervi madenlerinin ipuçlarını vermektedir (Kumbur 1997).

### 3.2. Radonun Bozunum Ürünleri

$^{222}\text{Rn}$ 'un bozunması ile kısa yarı ömürlü  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$  ve  $^{214}\text{Po}$  radyoaktif çekirdekleri meydana gelir.  $^{222}\text{Rn}$  ve bozunum ürünlerinin özellikleri Çizelge 3.1'de verilmektedir (Turner 1995).

**Çizelge 3.1.**  $^{222}\text{Rn}$  ve bozunum ürünlerinin özellikleri (Turner 1995'den değiştirilerek alınmıştır)

İzotop	Yarı Ömür	Bozunma Sabiti ( $\text{s}^{-1}$ )	Temel Radyasyon Enerjileri (MeV)		
			$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
$^{222}\text{Rn}$	3,825 gün	$2,1 \cdot 10^{-6}$	5,49		
$^{218}\text{Po}$	3,06 dk	$3,79 \cdot 10^{-3}$	6,00		
$^{214}\text{Pb}$	26,8 dk	$4,31 \cdot 10^{-4}$		0,65	0,27
$^{214}\text{Bi}$	19,7 dk	$5,86 \cdot 10^{-4}$		3,27	0,61
$^{214}\text{Po}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$ sn	$4,62 \cdot 10^3$	7,69		
$^{210}\text{Pb}$	22,3 yıl	-	-	-	-

$^{222}\text{Rn}$  kendisinin sağlığa olumsuz etkisi oldukça azdır denebilir. Bir soygaz olarak radon, solunum edildiğinde dikkate değer ölçüde vücut tarafından tutulmaz (Turner 1995). Çünkü radon nefes alma süresiyle kıyaslandığında daha uzun bir yarı ömre sahip bir soy gaz olduğundan yine solunum yoluyla dışarı atılır.  $^{222}\text{Rn}$  kimyasal tepkimeye girmediği için solunum sonucu dokulara kimyasal olarak bağlanmaz. Dokulardaki çözünürlüğü de çok düşüktür. Sadece bir miktar radon gazı vücut sıvılarında çözünerek kan dolaşımına girmektedir. Kan dolaşımına giren radon ve bozunmasıyla oluşacak radon ürünleri çeşitli organların ışınlanmasına neden olsalar dahi bu olasılık ihmal edilebilecek düzeydedir (Durrani ve Ilic 1997, Fişne 2002).

Potansiyel sağlık zararı  $^{222}\text{Rn}$ 'nin gaz olmayan radyoaktif bozunum ürünlerinden kaynaklanmaktadır.  $^{222}\text{Rn}$ 'nin bozunum ürünlerinin bir kısmı atmosfer içindeki herhangi bir parçacığa tutunmak, bazıları ise serbest radyoaktif atomlar olarak kalma eğilimindedirler. Her iki şekilde de havanın içerisinde bulunan radonun bozunum ürünleri solunum yoluyla alındığında, üst solunum yollarında ve akciğerlerde kararlı hale gelinceye kadar parçalanmaya devam ederler. Bozunum ürünlerinin bazılarının saniye ile dakika mertebesinde yarılanma ömürlerinin olması nedeniyle de akciğerlerin doğal temizleme sürecinden önce bozunmaya başlarlar. Bu parçacıkların bozunması

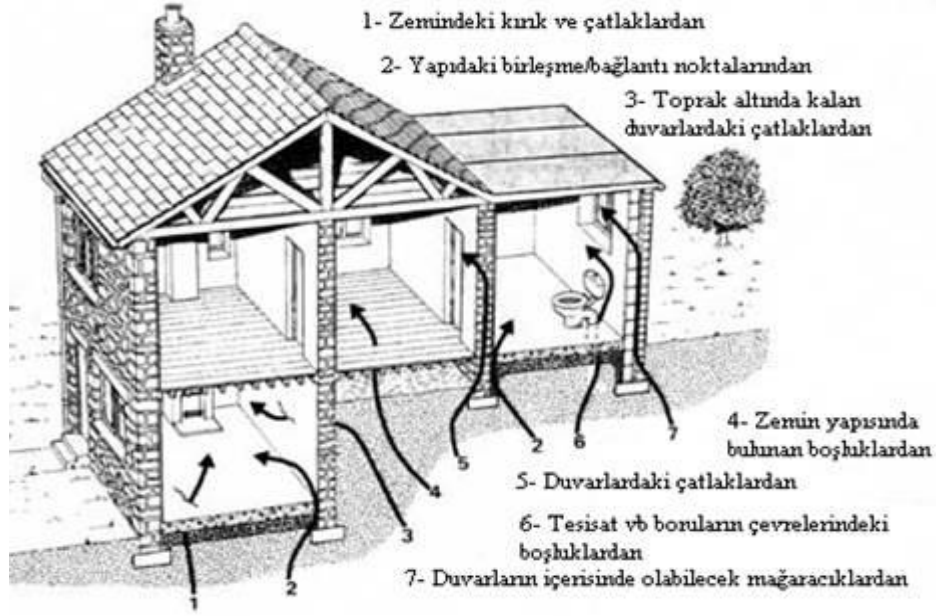
devam ettiğinde ortaya çıkan enerji, akciğer dokusunda hasara, dolayısıyla zaman içerisinde kansere neden olur (Fişne 2002, Turner 1995).

### **3.3. Bina İçi Radon**

İnsanlar zamanlarının yaklaşık % 90'ı gibi büyük bir bölümünü kapalı mekânlarda geçirdikleri düşünülünce, radon ve ürünlerinden kaynaklı radyasyonun zararlı etkisiyle yüz yüze olmaları önemli bir problem olarak ortaya çıkmaktadır. Evlerde radon ölçümü ilk kez 1956 yılında İsveç'te yapılmıştır. Bazı evlerde çok yüksek konsantrasyonda radon bulunmasına rağmen bunun söz konusu ölçüm bölgesine özel istisnai bir durum olduğu düşünülmüştür. Ancak 20 yıl kadar sonra tüm dünyada değişik ülkelerde geniş ölçekli sistematik çalışmalar başlatılmıştır (Güler ve Çobanoğlu 1997).

Radonun binalara girişi toprak, binanın civarı veya altındaki kayalar, bina malzemeleri, su kaynakları, doğal gaz ve dışarıdaki hava gibi farklı kaynaklardan olmaktadır. Radon binalara, inşaatta kullanılan malzemelerdeki açıklıklar arasından ya da binanın altındaki topraktan difüzyon yoluyla girmektedir. Şekil 3.4'te radonun bina içine giriş yolları görülmektedir. Bununla birlikte binalardaki radon konsantrasyonu coğrafi yerleşime, zamana (gece-gündüz, mevsimsel), yerden yüksekliğe ve meteorolojik şartlara bağlı olarak değişmektedir. Ölçüm olmaksızın evlerde radon değerinin tahmini mümkün değildir. Binaların altında bulunan topraklardaki farklı radyum konsantrasyonları başta olmak üzere birçok faktöre bağlı olarak bina içindeki radon konsantrasyonu değişim göstermektedir. Buna bağlı olarak birbirine çok yakın mesafelerde bulunan evlerde bile farklı değerler elde edilebilmesi mümkündür (Eisenbud 1987, Çelebi 1995, Güler ve Çobanoğlu 1997, Harley 1990).

Radon ve diğer gazlar, toprak boyunca yükselerek binanın altında sıkışarak basınç oluştururlar. Topraktaki basınç evlerdeki hava basıncından genelde daha yüksektir. Binanın altındaki bu yüksek basınç nedeniyle gazlar çatlak ve boşluklardan, bina içlerine sızarlar (Çelebi 1995).



**Şekil 3.4.** Radonun binalara giriş yolları (<http://www.taek.gov.tr>, 2010)

Radon havadan 7-8 kat daha ağırdır ve yerden genellikle 50 santimetre mesafede kalma eğilimindedir. Bu nedenle kapalı ortamdaki hava binada kalma eğilimindedir. Günümüzde artan bina yalıtım işlemi de söz konusu basınç farkının daha da artmasına neden olmaktadır (Güler ve Çobanoğlu 1997). Bununla birlikte binaların üst katlarındaki radon yoğunlukları, zemin katlardakinden daha az olmaktadır (Köksal 1997).

Norveç'te yapılan bir araştırmada, ağaçtan gelen radon gazı salınımı olmamasına rağmen, ağaçtan yapılan evlerin, diğer evlerden daha çok radon gazı içerdiği gözlenmiştir. En önemli neden ise ağaç evlerin genel olarak daha alçak ve dolayısıyla odaların toprağa daha yakın olmasıdır. Diğer taraftan Chicago'da yapılan bir araştırmada; tabanı kaplanmamış ve çıplak toprak üzerine kurulmuş evlerde, topraktaki radon yoğunluğu normal olmakla birlikte, evlerde ölçülen radon miktarının, dış radon seviyelerinin 100 katından fazla olduğu gözlenmiştir.

Ilıman bölgelerde evlerin içindeki radon konsantrasyonunun, dışarıdaki radon konsantrasyonundan 8 kez fazla olduğu belirlenmiştir. Bugüne kadar, tropik ülkelerde bir radon seviyesi ölçümü yapılmamıştır. Bunun nedeni, bu bölgelerde havanın çok

sıcak olması ve binaların daha açık bir şekilde olması nedeniyle iç ve dış radon yoğunlukları arasında fazla bir fark olmamasıdır. 1970’li yılların sonlarına doğru İsveç ve Finlandiya’daki evlerde yapılan ölçümlerde, açık havadaki radon seviyesinden 5 000 kat daha fazla radon bulunmuştur (Kapdan 2009). Çizelge 3.2’de değişik ülkelerde ölçülen ortalama ev içi radon konsantrasyonları verilmektedir.

**Çizelge 3.2.** Farklı ülkelerde ev içi ortalama radon konsantrasyonları (Bq/m<sup>3</sup>) (Akar 2010)

ABD	46	Fransa	62	Macaristan	107
Almanya	50	Hindistan	57	Mısır	9
Arjantin	37	Hollanda	23	Norveç	73
Avustralya	11	İngiltere	20	Polonya	41
Belçika	48	İran	82	Portekiz	62
Cezayir	30	İspanya	86	Romanya	45
Çek Cum.	140	İsveç	108	Slovakya	87
Çin	24	İsviçre	70	Suriye	87
Danimarka	53	İtalya	75	Tayland	44
Ermenistan	104	Japonya	16	<b>Türkiye</b>	52
Finlandiya	120	Kanada	34	Yunanistan	73

### 3.4. Toprak Gazından Gelen Radon

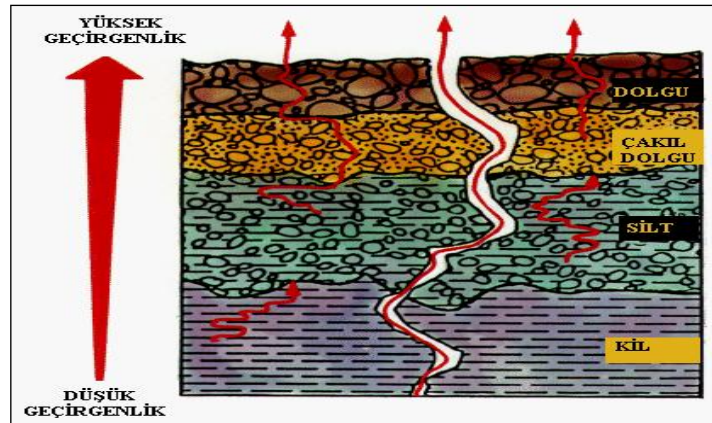
Konuta giren radonun asıl kaynağı, binanın inşa edildiği arazide bulunan toprak ve kayalardır. Radon, uranyumun mevcut olduğu tüm kayalardan ve topraktan gelmekte olup gaz olması nedeniyle bulunduğu ortamın boşluklarında ilerleyerek atmosfere kaçma eğilimi göstermektedir. Radonun değişik bölgelerde salınım bakımından farklılık gösterdiği bilinmektedir. Aynı yerleşim bölgesinde bile zamana bağlı olarak değişim söz konusudur. Granit ve volkanik kayaçlar, tortul şistler en önemli radon kaynaklarını oluşturmaktadır. Sedimenter topraklarda ise konsantrasyon daha düşüktür.

$^{226}\text{Ra}$ 'nın toprakta bozunmasıyla oluşan radon gazı, önce toprak partiküllerinden hava dolu gözeneklere kaçar ve gözenekler arasından yukarılara doğru hareket ederek atmosfere geçişi gerçekleşir. Bazı radon atomları, kapalı gözeneklerin içine girerler ve buralardan kaçamazlar. Radonun çıkış hızı; toprak-hava arakesitinde birim alan başına, radyoaktivite aktarımı oranı olarak tanımlanmaktadır. Toprakta gelen aktivitenin yalnızca küçük bir yüzdesi, çatlağı olmayan 0,2 m kalınlığındaki betona aktarılır. Beton tabakada çatlak varsa, topraktan gelen aktivitenin % 25'inin yayılma yolu ile beton tabakaya aktarılacağı hesaplanmıştır.

Radon konsantrasyonları için coğrafi yerleşim önemlidir. Adalar ve Kutup Bölgesi gibi radon çıkışını sağlayan toprağın azaldığı yerleşim bölgelerinde, radon konsantrasyonu düşüktür (Kapdan 2009).

Toprakta radon salınımı:

- Topraktaki radyum konsantrasyonuna,
- Yayılma gücüne,
- Toprağın gözenekliliğine, geçirgenliğine ve nem içeriğine (Şekil 3.5).
- Toprağın permeabilitesine (yoğunluk, porozite, granülometrik özelliklerine)
- Toprağın durumuna (kuruluk, suyla tıkanmış olma, donma, karla örtülü olma)
- Meteorolojik koşullara (toprak ve hava sıcaklığı, hava basıncı, rüzgar hızı, rüzgarın yönü)
- Bölgenin yüksekliğine bağlıdır.



Şekil 3.5. Topraktaki radon geçirgenliği (Kapdan 2009)



### 3.5. İnşaat Malzemelerinden Gelen Radon

Uranyum ve radyum yapı malzemesinin kökenini oluşturan toprak ve kumda bulunmaktadır. İnşaat sektöründe kullanılan yapı malzemelerinde bulunan eser miktardaki uranyum binalardaki radon düzeyini artırıcı etkenlerden birisidir (Çelebi 1995). Bu nedenle duvarlardan sürekli olarak radon gazı çıkar ve bina içi ortamda artan bir yoğunluk oluşturur. Duvarlardan radonunun yayılımında başlıca mekanizma difüzyondur. Kullanılan çimento karışımıyla bağlantılı olarak radon miktarı değişebilmektedir (Güler ve Çobanoğlu 1997).

Çizelge 3.3'te bazı inşaat malzemeleri için radyum konsantrasyonları ve radon çıkış hızları verilmektedir. Beton ve tuğla, en yaygın kullanılan inşaat malzemeleridir. Yapılan çalışmalar sonucunda betondaki  $^{226}\text{Ra}$  konsantrasyonunun, tuğlaya göre daha az,  $^{222}\text{Rn}$  çıkış oranının ise betonda tuğladan daha yüksek olduğu belirlenmiştir. (Çelebi 1995).

**Çizelge 3.3.** İnşaat malzemeleri içindeki  $^{226}\text{Ra}$  ve  $^{222}\text{Rn}$  değerleri (Çelebi 1995)

İnşaat Malzemeleri	$^{226}\text{Ra}$ konsantrasyonu (Bq kg <sup>-1</sup> )	$^{222}\text{Rn}$ çıkış hızı (µBq kg <sup>-1</sup> sn <sup>-1</sup> )
Tahta	-	0,2
Beton	9-32	2,5-20
Tuğla	45	1,0
Alçı taşı	12	6,3
Fosfattan elde edilen alçı taşı	580-740	0,13-0,20
Çimento	50	1,0
Kum	10	3,0

### 3.6. Sulardan Gelen Radon

Radon özellikle yeraltı suyu olmak üzere, suda da çözünebilir. Tipik olarak, musluktan akan su içindeki radonun 10 000'de biri havaya yayılır. Sudaki radon miktarı arttıkça,

bina içindeki radon düzeyi de artacaktır (Çelebi 1995). Sularda bulunan radon ev içlerine, sular kullanıldığı zaman girer. Suyun sıcaklığı arttıkça, ortama verilen radon miktarı da artar (Anonim 1993). Suda ölçülen radon, sadece suyun içerisinde bulunan radyumdan kaynaklanmamakta, aynı zamanda suyun geçtiği yerlerdeki toprak ve kayalarda bulunan radyumdan da ileri gelmektedir.

Evdeki alışkanlıklar ve uygulamalar; duş, çamaşır ve bulaşık makinesi gibi suyun püskürtülmesi veya çalkalanması büyük miktar radonun salınmasına neden olur. Sudaki radon seviyesi, ev içi radon seviyesini yüksek oranda etkileyebilecek kadar önemlidir. Bazı bölgelerde evlere ulaşan sular özel kuyulardan gelir. Yer altı sularındaki radon konsantrasyonu, yüzeysel sulardan daha yüksektir. İnşaat malzemesinden gelen ışınlamalara, yüzeysel sulardan katkı % 0,2, yeraltı sularından ise % 20'dir (Anonim 1982).

Ev içi havasına, musluk suyundan radon transferi çalışmalarında bir günde kişi başına ortalama 0,2-0,4 m<sup>3</sup> su kullanıldığı varsayılarak, bu miktarın transfer veriminin % 0,5-0,6 olduğu rapor edilmiştir (Gesell 1980). Sudaki en yüksek konsantrasyonlar Kanada'da 14 MBq/m<sup>3</sup>, Finlandiya'da 77 MBq/m<sup>3</sup>, ABD'de 20 MBq/m<sup>3</sup> bulunmuştur. Yapılan çalışmalar 370 Bq/L radon konsantrasyonuna sahip bir suyun, ev içi radon konsantrasyonuna katkısının 37 mBq/L olduğunu ortaya koymuştur (Anonim 1988).

### **3.7. Doğal Gazdan Gelen Radon**

Doğal gazın endüstriyel işlemleri, saflaştırma ve hidrokarbonlardan ayırıştırma işlemleri içerir. Bu hidrokarbonların bazıları yakıt olarak kullanılırken, bazıları sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG) olarak, basınç altında şişelenerek satılmaktadır. Doğal gazın üretimi ve depolanması esnasında doğal gazın bozunumu ile ortama radon gazı verilir. Doğal gazın üretim kuyularındaki radon konsantrasyonu, dedekte edilemeyen seviyelerden, 50 kBq/m<sup>3</sup> seviyesine kadar değişik değerler vermektedir (Kapdan 2009).

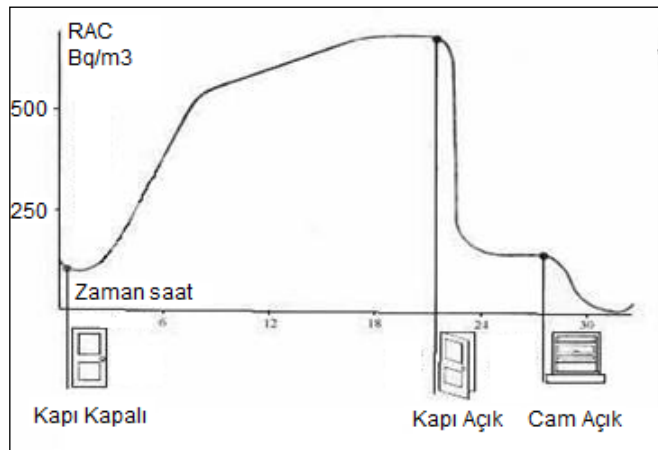
Doğal gazın önemli bir ev içi radon kaynağı olduğu bilinmektedir. Doğal gaz, evlerde ısıtma ve yemek pişirmede kullanıldığında da radon gazı ortaya çıkarak, ev içi radon

seviyesini artırır. Eğer yanma ürünleri havalandırma ile dışarı atılırsa, radon kaynağı ihmal edilebilir (Çelebi 1995).

### 3.8. Bina İçi Radon Konsantrasyonunun Azaltılması İçin Alınabilecek Tedbirler

Bina içi radon konsantrasyonunun azaltılması için alınabilecek tedbirler şöyle sıralanabilir:

- Yapı malzemelerinin radyoaktivite analizleri ve doz değerlendirmeleri yapılarak, değerlendirme sonuçları tavsiye edilen radyoaktivite düzeylerinin üzerinde olan malzemeler bina yapımında kullanılmamalıdır.
- Binaların, özellikle bodrum katlarının toprakla izolasyonu iyi yapılmalıdır. Bodrum katların ve zemin katların tabanına şap, beton vb. dökülmelidir. Toprak ile temas eden yüzeyler sızıntıya imkan vermeyecek şekilde izole edilmelidir.
- Radon düzeyi yüksek olabileceğinden, 20 yıldan eski olan evlerde çatlaklar kapatılmalı, izolasyon ile bakımı sürekli yapılmalıdır. Yerden ve duvarlardan bina içine sızan radon gazı bina dışına çıkamazsa bina içindeki konsantrasyon artacaktır. Bu nedenle kapalı ortamların havalandırılmasına özen gösterilmelidir (Şekil 3.6).
- Evlerde, kapı ve pencerelerde izolasyon yapıldıysa havalandırma süresi arttırılmalıdır.
- Radon kanser riskini arttırdığından, kapalı ortamlarda sigara içilmemelidir.



**Şekil 3.6.** Radon konsantrasyonunun havalandırmaya bağlı olarak değişimi (Kapdan 2009)

### 3.9. Radon Gazının Sağlık Üzerindeki Etkileri

Uranyum madenlerindeki radon ve bozunum ürünlerinin solunması üzerine yapılan epidemiyolojik çalışmalar, uranyum madencilerinin en yüksek kanser riskine maruz meslek grubu olduğunu ortaya çıkarmıştır (Anonim 1988). Madenlerde çalışanlarda radona bağlı akciğer kanser riskinin arttığını gösteren epidemiyolojik çalışmalar özellikle kapalı ortamda radon kirliliği ile ilgili endişelerin artmasına neden olmuştur. Ancak hayvan deneyleri ve epidemiyolojik çalışmaların yapılmasına kadar radonla ilgili kesin bir risk değerlendirme şansı olmamıştır.

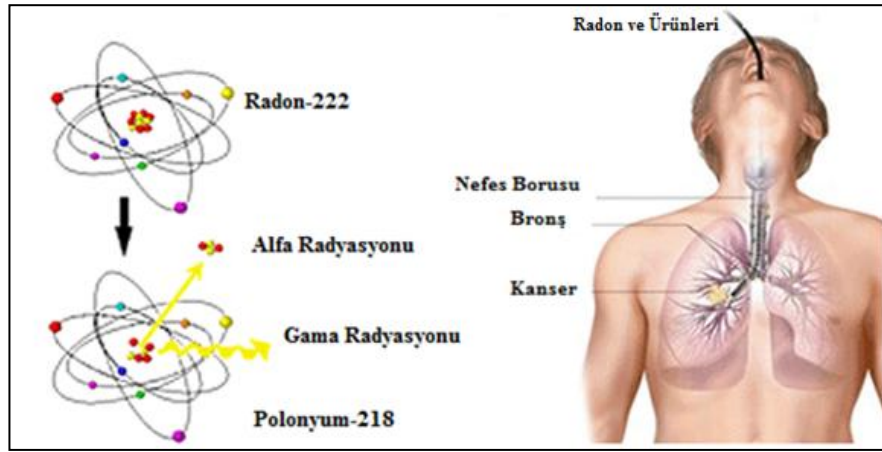
Günümüze kadar yapılan hayvan deneyleri ve epidemiyolojik değerlendirmeler radonla akciğer kanseri arasında doğrudan ilişki kurulmasını sağlamıştır (Güler ve Çobanoğlu 1997).

Epidemiyolojik çalışmalar, yüksek seviyede radon ve bozunum 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 yıllık akciğer kanseri vakalarının, sigara içmeyenlerden 5 000, sigara içenlerden 15 000'ini, Uluslararası Radyasyondan Korunma Komitesi (ICRP) 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 (Kapdan 2009).

Radon soy gaz olduğundan dolayı teneffüs edildiğinde dokulara kimyasal olarak bağlanmaz. Ayrıca, dokulardaki çözünürlüğü çok düşüktür. Ancak, radonun bozunum ürünleri, toz ve diğer parçacıklara tutunarak radyoaktif aerosoller oluştururlar. Bu nedenle, taşınarak solunum yoluyla alınabilirler. Bozunum ürünleri kararlı hale gelinceye kadar bozunma devam eder ve bozunma sürecinin her aşamasında radyasyon açığa çıkar (Çelebi 1995). Radon gazından dolayı dünya genelinde maruz kalınan ortalama doz 1,3 mSv/yıl'dır (Anonim 1996).

Radon gazının teneffüs edilmesi, solunum yetmezliği, baş ağrısı, öksürük gibi akut etkilere neden olmaz. Radyoaktif bozunmaya uğrayan radon gazı, teneffüs edildiğinde akciğerler tarafından tutulabilecek yeni ürünlerin oluşumuna neden olur ki bunların bozunması devam ettiğinde ortaya çıkan alfa veya beta parçacıkları akciğer dokusunda hasara, dolayısıyla zaman içerisinde kansere neden olabilir (Şekil 3.7).

Solunum borusunda olan bozunma sonucunda, bronşal epiteldeki radyasyon dozu artar. Bozunma ürünlerinin bazılarının alfa yayıcı olmaları nedeniyle alfa radyoaktivitesinin biyolojik etkileri önem kazanmaktadır.



**Şekil 3.7.** Radon bozunum ürünleri tarafından akciğerlerde yapılan ışınlanma ([http://www.ilradondetection.com/radon\\_health\\_effects.html](http://www.ilradondetection.com/radon_health_effects.html), 2010)

Sigara, kanser riskini arttırmaktadır. Sigara içen ve bunun yanı sıra yüksek dozda radona maruz kalmış kişilerde kansere yakalanma riski oldukça yüksektir. Sigaranın bırakılıp, maruz kalınan radon seviyesinin düşürülmesiyle kanser riski azalacaktır. Ancak, sigara içiminin az bilinen bir zararı da içindeki radyoaktif maddelerin soluma yoluyla insan vücuduna alınmasından kaynaklanmaktadır.

Uluslararası Radyasyon Korunma Komitesi radona maruz kalma konusunu inceleyerek “Evde ve işte Radon-222’ye karşı korunma” konusunda 65 nolu bir rapor yayınlamıştır. Bu raporda radona maruz kalma sınırlandırılarak, limit değerler tavsiye edilmiş ve yıllık doz için bir eylem seviyesi tespit edilmiştir (Çizelge 3.4). Eylem seviyesinin, 3-10 mSv arasında sınırlandırılması tavsiye edilmiştir. Bu doz değerlerine karşılık gelen radon

konsantrasyonu evler için 200–600 Bq/m<sup>3</sup> (evde geçirilecek süre 7000 saat ve denge faktörü 0,4 alınarak), iş yerlerinde ise 500-1500 Bq/m<sup>3</sup> arasında bir değer tespit edilmesi önerilmiştir (Kapdan 2009).

**Çizelge 3.4.** Evlerde ve işyerlerinde radon ve ürünleri için önerilen eylem seviyeleri (etkin doz) (Çelebi 1995)

Eylem Seviyesi (Etkin doz)	3 mSv/yıl	10 mSv/yıl
Evler için Eylem Seviyesi (Radon Konsantrasyonu)	200 Bq/m <sup>3</sup>	600 Bq/m <sup>3</sup>
İş Yerleri için Eylem Seviyesi (Radon Konsantrasyonu)	500 Bq/m <sup>3</sup>	1500 Bq/m <sup>3</sup>

Radonun asıl kaynağının uranyum olması nedeniyle radon konsantrasyonu yer kabuğu üzerinde bölgeden bölgeye değişiklikler göstermektedir. Bu nedenle farklı ülkeler için izin verilen radon konsantrasyonlarının limit değerleri de değişiklikler göstermektedir. İngiltere’de bu değer 200 Bq/m<sup>3</sup>, Avrupa ülkelerinde 400 Bq/m<sup>3</sup>, yeni inşa edilecek binalarda 200 Bq/m<sup>3</sup>, Kanada’da ise 800 Bq/m<sup>3</sup> olarak kabul edilmiştir (Ayotte 1998). Türkiye’de ise bu değer Radyasyon Güvenliği Yönetmeliği’nde 400 Bq/m<sup>3</sup> olarak belirlenmiştir (TAEK 2000). Çizelge 3.5’te çeşitli ülkeler ve uluslararası kuruluşlar tarafından belirlenen kapalı ortamlar için müsaade edilen radon konsantrasyonları verilmektedir.

**Çizelge 3.5.** Çeşitli ülkeler için radon konsantrasyon limitleri (Bq/m<sup>3</sup>) (Çelebi 1995)

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

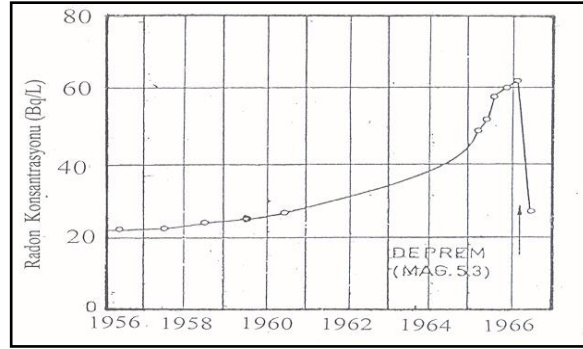
Ülkemizde ev içi radon gazı konsantrasyonları henüz yeterince ölçülmemiş olduğundan, evlerde radon gazı seviyeleri ile radonun mevsimsel ve bölgesel değişimleri bilinmemektedir. 1984 yılında Türkiye Atom Enerji Kurumu, Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi, Sağlık Fiziği Bölümünce ‘‘Türkiye’de Ev İçi Radon Ölçümü Projesi’’ kapsamında radon ölçüm çalışmaları başlatılmış olup çalışmalar halen sürdürülmektedir (Taşkın 2006).

### **3.10. Radon ve Deprem**

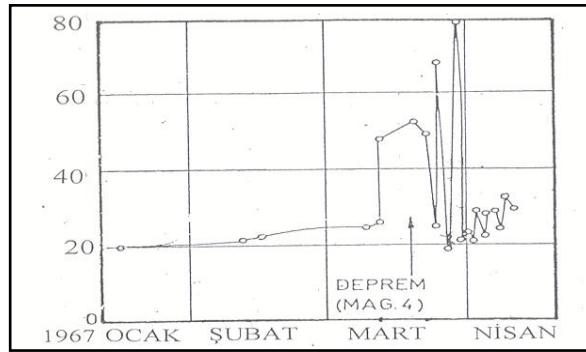
Depremlerin önceden saptanması konusunda yapılan çalışmalarda, depremlerin istatistiksel analizleri ve jeofiziksel öncüler olarak bilinen iki temel öncü yöntem ortaya konmuştur. Yeraltından sızan Radon yoğunluğundaki değişimler jeofiziksel öncüler arasında yer almaktadır. Rusya, Japonya ve Çin’de yapılan çalışmalar radon gazıyla sismik faaliyetler arasında doğrudan bir ilişki olduğunu saptamıştır. Radon sızıntısının, aktif faylar üzerinde daha fazla olduğu; atmosferik koşullara ve sismik faaliyetlere bağlı değişiklikler gösterdiği de bilinenler arasındadır. Yer kabuğundaki gerilmeler nedeniyle oluşacak genleşmeler, kayalardan yeraltı su sistemine radon geçişinin artmasına; bu yüzden de, sismik faaliyet başlamadan önce, çevredeki kuyu ve kaynak sularındaki radon yoğunluğunda bir artış gözlenmesine neden olmaktadır. Fay hattı üzerine çok sayıda açılan kuyularda radon gazı değişimlerinin aktif yöntemlerle kesintisiz izlenmesi, depremi önceden saptamada en etkin yöntemdir. Radon ölçümleri fay hattı üzerindeki toprakta veya fay hattı üzerinde bulunan kuyu sularında yapılmalıdır.

Deprem araştırmalarına yönelik çalışmaların özellikle çevredeki kuyu ve kaynak sularında yapılmasıyla çok daha doğru sonuçlar elde edilebilmektedir. 1966 ve 1967 Taşkent depremi öncesi radon konsantrasyonundaki değişiklikler Şekil 3.8 ve Şekil 3.9’da verilmektedir (Press 1975). Şekil 3.8’de görüldüğü gibi, radon konsantrasyonu yıllarca kararlı bir şekilde artış göstermiş, deprem öncesi artış hızlanmış 1966 da deprem esnasında aniden düşmüştür. Depremler için yapılan radon değişim gözlemleri, yeraltı sularında sürekli izleme sisteminin oluşturulmasına öncülük etmiştir. Japonya’da

depremi önceden saptamayı hedefleyen bir radon izleme sistemi kullanılmaktadır. Sistem 60 kuyu içinde 17 m derinlikte radon değişimlerini kaydetmektedir (Igarashi 1995).



**Şekil 3.8.** 1966 Taşkent depremi öncesi kuyu sularında gözlenen radon konsantrasyon değişimleri (Kapdan 2009)



**Şekil 3.9.** 1967 Taşkent depremi öncesi kuyu sularında gözlenen radon konsantrasyon değişimleri (Kapdan 2009)

### 3.11. Radon Ölçüm Teknikleri

Günümüzde kullanılan pek çok radon ölçüm tekniği bulunmaktadır. Bu ölçüm teknikleri değişik şekilde sınıflandırılabilir. Radon ve bozunum ürünlerini ölçmek için

- aktif ölçüm yöntemi,
- pasif ölçüm yöntemi

olmak üzere iki temel yöntem geliştirilmiştir. Aktif ölçüm yöntemi, elektronik sistemler, pompalar, güç kaynakları gibi cihazlar gerektirmektedir. Aktif sistemde iyon odaları, sintilasyon hücreleri veya spektroskopik sayım cihazları kullanılmaktadır. Pasif ölçüm



yönteminde ise termoluminesans dedektörler veya katı hal nükleer iz dedektörleri selüloz nitrat (LR-115) veya alil diglikol karbonat (Cr-39) kullanılır. Pasif alfa dedektörü kullanılarak yapılan radon dozimetreleri 3 farklı yolla oluşturulabilir:

- a-) Dedektörün önünde bulunan bir filtre üzerinde radon ürünlerinin toplandığı gaz akışlı aktif cihazlarla
- b-) Gaz akışı olmayan difüzyon yoluyla radon girişi olan ağzı kapaklı odacıklarla
- c-) Açık bir dedektör üzerinde, havadaki radon ve ürünlerinden gelen alfa parçacıklarının kaydedildiği pasif aygıtlarla.

Radon ölçüm teknikleri, ölçüm sonuçlarının alınma süresine bağlı olarak ise:

- kısa dönem ölçüm teknikleri
- uzun dönem ölçüm teknikleri

olmak üzere iki grupta incelenebilmektedir (Anonim 1987).

### **3.11.1. Kısa dönem ölçüm teknikleri**

Kısa dönem ölçümlerde amaç bir an önce sonuçları almaktır. En sık kullanılan kısa dönem ölçüm teknikleri aktif kömür, alfa iz dedektörleri, sıvı sintilasyon sayım sisteminde aktif kömür, elektret iyon odaları, radon tuzağı örnekleri ve sürekli monitörleridir (Anonim 1987).

#### **3.11.1.1. Aktif karbon tekniği**

Bu teknik bir adsorblayıcı ortamda (kömür gibi) radon gazının adsorbe olmasına ve daha sonrada bu malzemenin analiz edilmesiyle radonun bozunum ürünleri olan Pb- 214 ve Bi-214'ün yayımladığı gama ışınlarının aktivitelerinin ölçülmesi esasına dayanmaktadır (Durrani ve Ilic 1997). Bu sayede radon miktarı tespit edilmiş olur. Bu amaçla metal bir kap içerisine birkaç gram aktif karbon yerleştirilir. Uygun bir kapakla metal kap kapatılır. Metal kap ölçüm yapılacak yere yerleştirilir ve radon yüklü havanın kömüre yani karbon yatağına difüze edebilmesi için kapağı açılır (Durrani ve Ilic 1997, Kapdan 2009). Kabın bu şekilde kalma süresi birkaç gün kadardır. Ölçüm süresi sonunda kabın kapağı tekrar kapatılır ve analiz için laboratuara götürülür. Laboratuarda

genellikle NaI sayıcıları kullanılarak gama aktivite ölçümü gerçekleştirilir (Eisenbud 1987). Kullanılan metal kaplar farklı boyutlarda ve şekillerde olabilir. Bazı metal kaplarda toron girişini engellemek ya da nemi en aza indirmek için difüzyon bariyerleri kullanılabilir (Garcia-Leon ve Madurga 1988).

### **3.11.1.2. Sıvı sintilasyon sayım sisteminde aktif karbon**

Aktif karbon tekniği gibi radon gazının aktif karbon üzerinde adsorblanması esasına dayanmaktadır. Fakat analiz için farklı bir ekipman kullanılır. Dedektör tipik olarak içerisinde 1-3 gram kömür bulunan 20 ml'lik sıvı sintilasyon şişesinden oluşur. Ölçüm için sintilasyon şişesi açılarak radonun kömüre difüze etmesi sağlanır. Difüzyon sonrasında sintilasyon şişesi tekrar kapatılır ve analiz etmek için laboratuara götürülür. Analize hazırlamak için radon yayını tekniği kullanılır. Bu teknik kullanılarak kömür üzerine adsorbe olmuş radonun büyük bir kısmı sıvı sintilasyon şişesindeki özel sıvıya transfer edilir. Radon ve radonun bozunum ürünlerinin çözündüğü sıvıyı içeren sintilasyon şişesi sıvı sintilasyon sayıcısına yerleştirilir ve sayım alınır (Çile 2004).

### **3.11.1.3. Alfa iz detektörleri**

Katı hal nükleer iz detektörleri uzun süreli radon ölçümleri için kullanılmaktadır (Durrani ve Ilic 1997). Daha önce anlatıldığı üzere radon ve radonun bozunum ürünleri genelde alfa aktiftirler. Radon ve radonun bozunum ürünlerinin yayınladıkları bu alfa parçacıkları tespit edilerek (sayılarak) radon konsantrasyonu bulunabilir. Çünkü yayınlanan alfa parçacıklarıyla radon konsantrasyonu arasında doğrudan bir orantı vardır (Garcia-Leon ve Madurga 1988).

Bu amaçla radonun yayınladığı enerji aralığındaki özellikle alfa parçacıklarına hassas olan plastik filmler kullanılır. Alfa parçacıkları bu filmler üzerinde bir iz bırakır. Radonun bozunum ürünleri alfa parçacığı dışında beta ve gama ışınları da yayınlamaları. Fakat bu filmler büyük ölçüde beta ve gama ışınlarına hassas değildir. Beta ve gama ışınları bu filmler üzerinde iz bırakmazlar (Durrani ve Ilic 1997). Alfa parçacıklarının bu filmler üzerinde bıraktıkları izler daha sonra kimyasal iz kazıma yöntemiyle açığa

çıkartılarak mikroskop yardımıyla sayılır. Gerekli hesaplamalardan sonra radon konsantrasyonu belirlenir.

Kullanılan filmler selüloz nitrat, selüloz asetat, polikarbonat, allil diglikol karbonat gibi plastik maddelerden yapılmıştır. Kimyasal iz kazıma esnasında alkali (NaOH ya da KOH) ya da asit çözeltileri (HF veya HNO<sub>3</sub>) kullanılır (Durrani ve Ilic 1997).

Nükleer iz dedektörlerinin avantajları;

- Küçüktürler (1cm x1cm ve yaklaşık 100-500 mikrometre kalınlığında)
- Kullanılması kolaydır.
- Elektronik bir cihaza gerek yoktur.
- Taşınması kolaydır.
- İşlenmesi ve okunması kolaydır.
- Ucuzdur.
- Uzun süreli radon ölçümüne müsaittir.
- Nemden, makul seviyedeki ısıdan ve ışıktan etkilenmezler.

Nükleer iz dedektörlerinin dezavantajları ise;

- Radon konsantrasyonu yüksek değilse anlık ölçüm almaya uygun değildir.
- Düşük konsantrasyonlarda hata oranı yüksektir (Durrani ve Ilic 1997).

#### **3.11.1.4. Elektret iyon odaları**

Elektret, kalıcı elektriksel yük gösterebilen bir dielektrik malzemedir. Çelik bir kap içerisine elektret malzemesi (teflon gibi) yerleştirilir. Bu güçlü bir elektrostatik alan oluşturur. Kabin tabanındaki küçük bir giriş radon gazının içeri girmesini sağlar. Radon ve radonun bozunum ürünleri bozunduğu zaman alfa, beta ve gama ışınları yayımlayabilirler. Bu parçacıklar hava içerisinde ilerlerken havadaki oksijen, azot gibi atomlarla çarpışırlar ve kap içerisinde iyonize parçacıklar üretirler. Bu iyonlar elektret tarafından oluşturulmuş olan elektrik alan tarafından çekilerek toplanır ve elektretin toplam yükü değişir (Durrani ve Ilic 1997). Bu değişimden yararlanarak radon konsantrasyonu bulunur.

### 3.11.1.5. Sürekli monitörler

Radon ölçümleri için kullanılan üç çeşit sürekli radon monitörü vardır. Bunlar; alfa sintilasyon, iyonizasyon odası ve katı hal dedeksiyonudur.

Sürekli radon monitörlerinin avantajları;

- Çoğu çeşidi taşınabilirdir.
- Sahada sonuç almak mümkündür.
- Radon konsantrasyonunun gerçek zamanlı değişimi görülebilir.
- Ölçüm aralıklarında esneklik sağlar.

Sürekli radon monitörlerinin dezavantajları;

- Pahalı sistemlerdir.
- Bazı modelleri büyük ve ağırdır.
- Düzenli kalibrasyon gereklidir.
- Yetişmiş elemana ihtiyaç vardır.
- İyonizasyon odası sürekli monitörü bazı durumlarda neme karşı hassas olabilir (Çile 2004).

#### •Alfa sintilasyon sürekli radon monitörleri

Bir alfa sintilasyon hücresi ile foto çoğaltıcı tüp sayım sistemine bağlı zamanlama devresi ve kontrol sisteminden meydana gelir. Pasif difüzyon yoluyla ya da aktif difüzyon yoluyla hava numuneleri alınır. Belirli bir zaman aralığı için alınan sayımlar hafızaya kaydedilir ve bir sonraki zaman aralığı için yeni sayım alınır. Ve bu şekilde devam eder. Kısa dönem alınan bu sonuçlar zamanla radon konsantrasyonunun değişimini yansıtır.

#### •İyonizasyon odaları sürekli radon monitörleri

Bir elektrometre ve veri kaydedicisine bağlı iyonizasyon odasından meydana gelir. Pasif difüzyon ya da aktif difüzyonla alınan hava numunesi dedektöre yollanır. Radonun bozunum ürünleri elektrostatik olarak yok edilir ve böylece dedektöre girmesi engellenir. Radon, iyonizasyon odasının hacmi içerisinde bozunur ve iyonlar oluşturur. Bunlar elektrik sinyallerine dönüştürülür. Bu sinyaller sayılır, yüklenir, elektrometre ve data kaydedici tarafından görüntülenir.

### •Katı hal sürekli radon monitörleri

Difüzyon örnekleme esasına dayanır. Alfa bozunumuna hassas bir katı hal silikon dedektörü kullanılır. Sürekli alınan verilerin yazıcıyla çıkışı alınır ve böylece radon konsantrasyonu görüntülenmiş olur. Diğer sürekli ölçüm monitörlerine göre daha az duyarlı olmasına rağmen kullanımı kolay ve nispeten ucuz olmaları nedeniyle tercih edilebilmektedir.

#### 3.11.1.6. Radon Tuzağı (Grab Sampler) tekniği

Bu teknikte Lucas Hücresi olarak da bilinen bir alfa sintilasyon hücresi ve bir veya iki fototüp kullanılır. Sintilasyon hücresinin duvarları ZnS(Ag) fosfor ile kaplanmıştır. Sintilasyon hücresi bir veya iki vanalı olabilir. Hava numunesi toplamak için bu vana (veya vanalar) açılır. Numune alındıktan sonra vana kapatılarak radonun bozunum ürünleriyle radyoaktif dengeye gelebilmesi için yaklaşık olarak dört saat beklenir. Bu süre sonunda sintilasyon hücresi sayım için fototüpün ağzına yerleştirilir. Radon ve radonun bozunum ürünlerinin yayınladığı alfa parçacıkları sintilasyon hücresinin duvarlarındaki ZnS ile etkileşimi sonucu çıkan pulslar (elektrik sinyalleri) sayılır ve gerekli hesaplamalar yapılarak radon konsantrasyonu belirlenir (Garcia-Leon ve Madurga 1988).

#### 3.11.2. Uzun dönem ölçüm teknikleri

Radon seviyesi günden güne, mevsimden mevsime göre değişebileceği için yıllık ortalama radon seviyesini tespit edebilmek adına uzun dönem radon ölçümü gerçekleştirilir. En sık kullanılan uzun dönem ölçüm teknikleri alfa iz dedektörleri ve elektret iyon dedektörleridir.

## **4. MATERYAL VE METOD**

### **4.1. Bölgenin Tanıtılması**

Bursa ili kaplıca ve maden suları bakımından yurdumuzun en zengin bölgelerinden biridir. Uludağ'ın eteklerinde sıralanmış olan bu suların çoğu eski tarihlerden beri birer şifa kaynağı olarak tanınmaktadır. Bursa'nın merkezinde iki termal su kaynağı bölgesi vardır; bunlar Çekirge ve Kükürtlü bölgeleridir.

Bursa merkezinin Çekirge bölgesi neojen yapıdadır. Burada türlü konglomeralar, kumtaşları, killer, kalkerler, kuvars ve lavlar görülmektedir. Kaplıca kaynakları denizden 240 metre yükseklikte kuzey-güney istikametinde uzanan bir çatlak üzerinde bulunmaktadırlar.

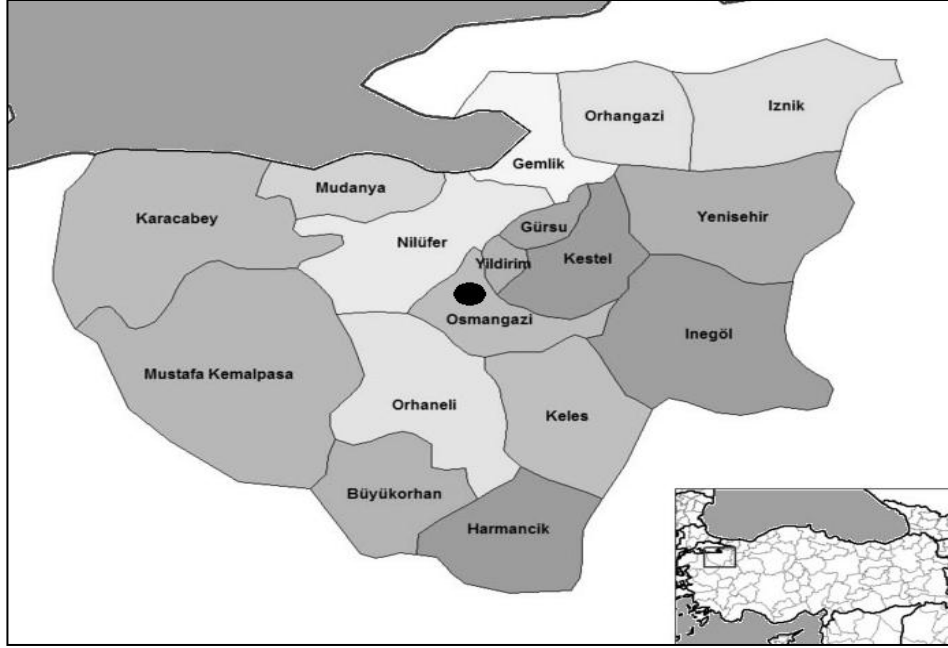
Bursa'nın Bademlibahçe bölgesinde birkaç şifalı su kaynağı bulunmaktadır. Bu şifalı sular bir kilometre karelik bir saha üzerinde dağılmışlardır. Suların çoğu kireç taşları arasından çıkmaktadır. Çalışma alanımız olan Kükürtlü Kaplıcaları Merkezi bu bölgede yer almakta olup kaplıca kaynaklarının en önemlilerinden biridir ([www.mta.gov.tr/mta\\_web/kutuphane/mtadergi/36\\_9.pdf](http://www.mta.gov.tr/mta_web/kutuphane/mtadergi/36_9.pdf), 2010).

### **4.2. Kükürtlü Kaplıcaları'nın Tanıtılması**

Uludağ Üniversitesi Atatürk Rehabilitasyon Uygulama ve Araştırma Merkezi Kükürtlü Kaplıcaları Bursa'nın kuzeybatısında Çekirge semtinde 23,173 m<sup>2</sup>'lik bir alan üzerinde yer almakta ve büyük bölümünü bahçe ve yeşil alan oluşturmaktadır. Kükürtlü Kaplıcaları, Uludağ Üniversitesine bağlı olarak balneoterapinin etkileri hakkında çalışmalar yürüten Türkiye'nin ilk ve tek bilimsel kaplıca merkezidir (Erer 2004).

Merkezin özelliğini ortaya koyan tarihsel kaplıca binası iki bölümdür. Büyük kükürtlü kaplıcası, çok eski ve büyük bir yapıdır. Küçük kükürtlü kaplıcası ise birincisinden 500 yıl sonra inşa edilmiştir. Binalara 19. Yüzyıl ortalarında bazı otel odaları ilave edilmiştir. Daha sonra 19. Yüzyıl sonlarında otel olarak üç yönden büyütülmüş, 14. Yüzyılda inşa edilen kaplıcanın kuzeyine bir yıkanma bölümü daha, güneyine uzun sıra

banyolar dairesi ilave edilmiştir. Böylece son şeklini alan kükürtlü kaplıcaları günümüze kadar otel olarak kullanılmıştır. Kaplıca Merkezinin Bursa'daki konumu Şekil 4.1'de görülmektedir.

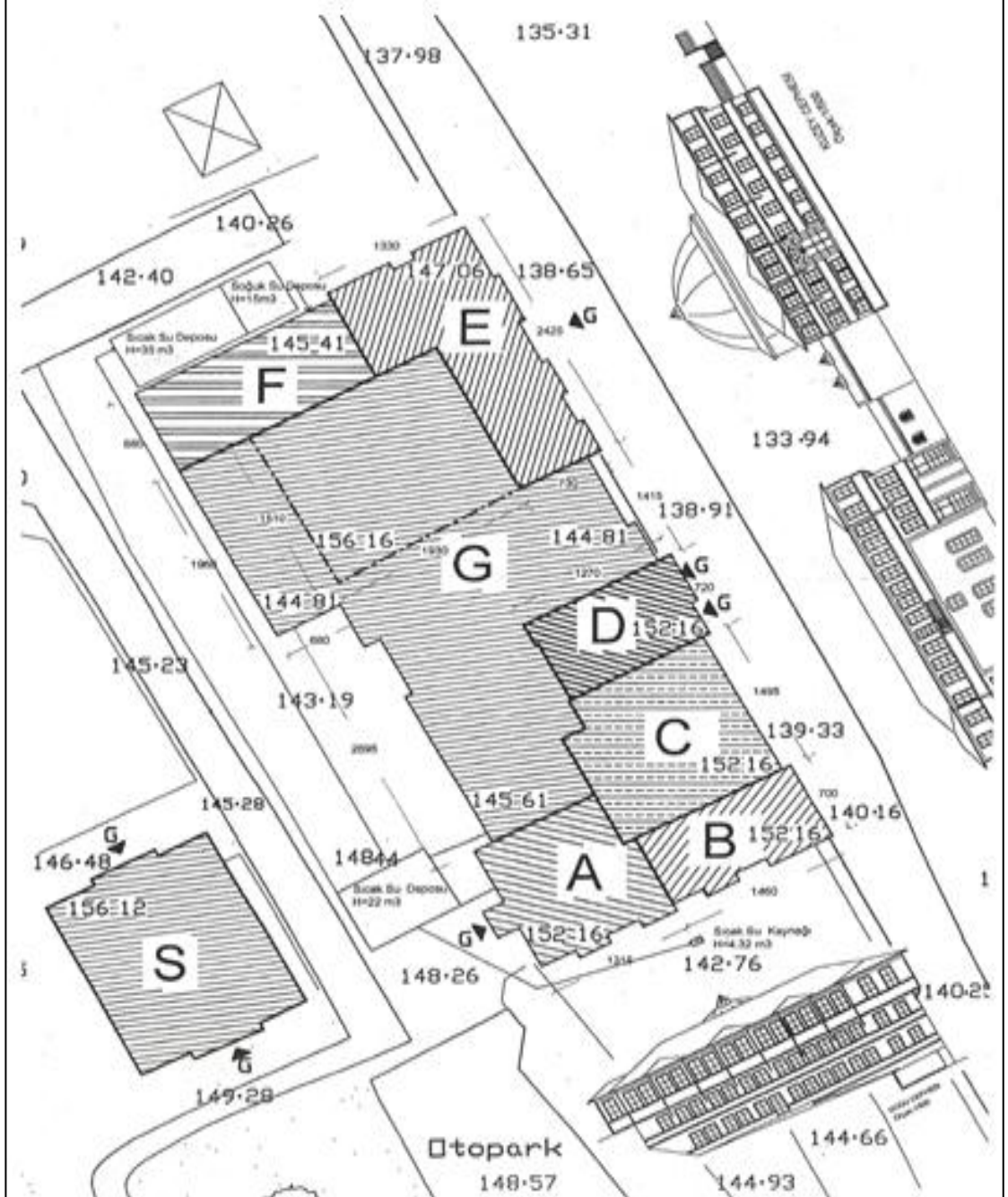


**Şekil 4.1.** Kükürtlü Kaplıcaları'nın Bursa'daki konumu

Merkezde 2 poliklinik, 3 tedavi salonu, yatarak tedavi gören hastalar için 25 oda, 1 terapötik havuz ile hidroterapi amacıyla kullanılan banyolar mevcuttur. Ancak banyolar ölçüm sürecimiz boyunca tadilat dolayısıyla kullanılmamaktaydı. Ayrıca havuzun bulunduğu bölmenin yanında yer alan hidroterapi bölümünde 8 dinlenme kabini bulunmaktadır (<http://kukurtlu.uludag.edu.tr/tanitim.html>, 2010).

Kükürtlü Kaplıcaları Merkezinin imar planı görülen Şekil 4.2'de E ve F bölmelerinde idari personele ait odalar, G bölümünde havuz ve banyolar, D bölümünde personele ait odalar yer almaktadır. A,B ile C bölmelerinde ise hasta odaları, tedavi salonları ve poliklinikler konumlanmıştır. S harfiyle belirtilen bölüm misafirhane olarak kullanılmaktadır.

Şekil 4.2’de Sıcak su kaynağının A ile B bölmelerinin hemen yanında bulunduğu görülmektedir. Kaynak suyu çıkış noktasında bekletilmekte ve daha sonra da sıcak su depolarına gönderilmektedir.



Şekil 4.2. Kükürtlü Kaplıcaları’nın imar planı (<http://kukurtlu.uludag.edu.tr>, 2010)



### 4.3. AlphaGUARD Radon Detektörü

Radon ölçümlerinde kullanılan AlphaGUARD PQ 2000PRO temel olarak  $^{222}\text{Rn}$  (Radon),  $^{220}\text{Rn}$  (Thoron) ve Radon yan ürünlerine ait radyasyon yoğunlukları ile Gamma ( $\gamma$ ) doz oranını ölçmekte kullanılan taşınabilir bir radyasyon detektörüdür. AlphaGUARD havada, suda, toprakta ve yapı malzemelerinde radyasyon ölçümleri yapabilmektedir. Ölçüm sonuçlarını Bq (Bequerel) yani  $\text{Bq}/\text{m}^3$  cinsinden veren AlphaGUARD detektörü, eş zamanlı olarak sıcaklık, atmosfer basıncı ve nem oranı gibi üç farklı iklimsel parametreyi de ölçebilmektedir: Bu parametrelerin birimleri sırasıyla  $^{\circ}\text{C}$ , mbar ve %rH'dir. AlphaGUARD Radon detektörü gelişmiş bir 'atma (puls) iyonlaşma çemberi' veya alfa ( $\alpha$ ) spektroskopisi yöntemi kullanmaktadır. Yüksek Radon ölçüm hassasiyetine sahiptir ve yoğunluk gradientleri ile küçük yoğunluk dalgalanmalarını algılayabilecek derecede hassas elektronik yapıya sahiptir. Uzun süreli ölçümler yapabilmektedir ve ölçümler esnasında doğrudan bir güç kaynağına bağlanabildiği gibi yüksek kapasiteli pilleri sayesinde seçilen ölçüm moduna göre 6 aya kadar ölçüm yapabilmektedir. Bunların yanı sıra AlphaGUARD olumsuz sayılabilecek koşullarında, mesela yüksek nem, yüksek sıcaklık, yüksek titreşim gibi, bakım gerektirmeden ölçüm yapabilmektedir. Şekil 4.3'de AlphaGUARD detektörü görülmektedir.



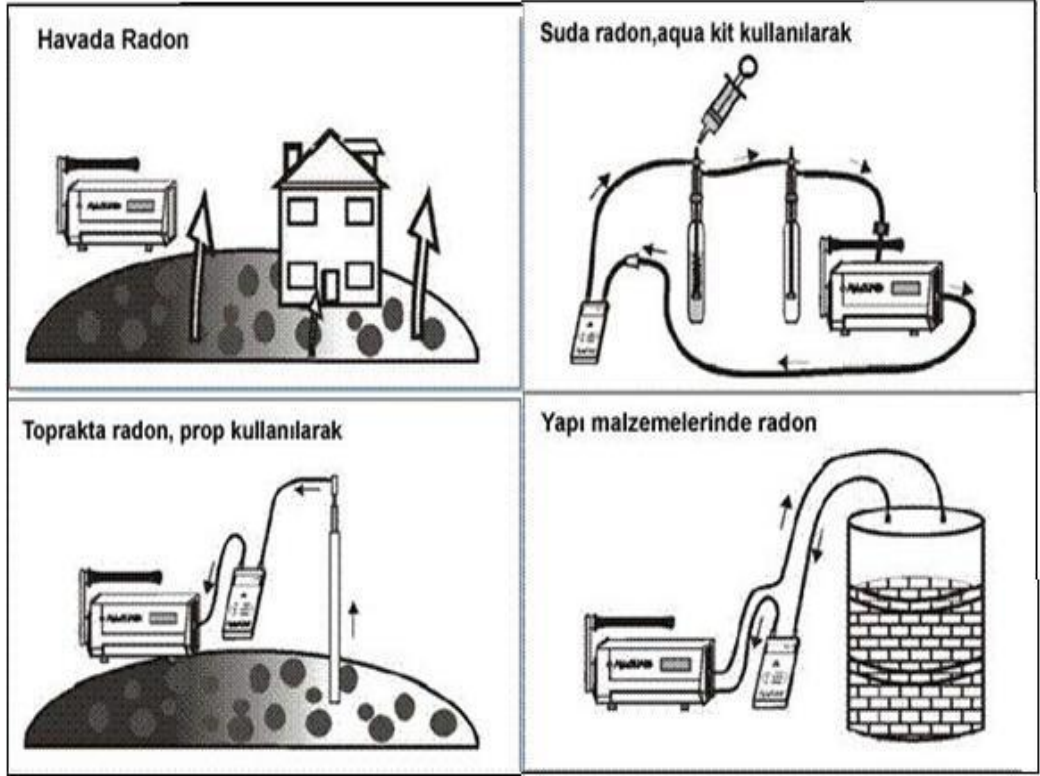
Şekil 4.3. AlphaGUARD PQ 2000PRO detektörü

AlphaGUARD Radon detektörü ölçüm ünitesine tümleşik olan bir emme pompası yardımı ile havayı detektör iyonlaşma odasına çeker. Emme sonucunda iyonlaşma odasına giren Radon-222 ve Radon-220 izotopları bozunarak oda içerisinde iyonizasyona sebep olarak bir elektrik sinyalleri meydana getirirler. 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. Yapılan tüm ölçümlerden elde edilen elektrik sinyalleri, AlphaGUARD PQ 2000PRO'nun Counter-Module sayıcı birimine TTL sinyali olarak gönderilir ve detektörün kalibrasyon bilgileri de kullanılarak yazılım tarafından okunabilir veriler haline dönüştürülür.

Alınan verilerin grafiksel olarak işlenmesi, geliştirilmesi, arşivlenmesi ve sanal ortamda sunulması için ise AlphaGUARD için geliştirilmiş çeşitli yazılım paketleri kullanılmıştır. Bunlar AlphaVIEW, AlphaEXPERT ve en son geliştirilmiş olan DataEXPERT yazılımlarıdır. İlk iki yazılım türü sadece DOS ortamında çalışmaktadır ve AlphaGUARD detektörü ile bir RS232 port ile haberleşmektedirler.

Bu çalışma süresince kullanmış olduğumuz DataEXPERT ise Windows ve Linux gibi işletim sistemleri altında çalıştırılabilmektedir ve RS232 bağlantısına ek olarak internet üzerinden de detektör haberleşme sağlanabilmektedir.

AlphaGUARD'ın atmosferde veya havada yapacağı ölçümler için ayrıca bir aparat kullanmak gerekmemektedir. Ancak suda, toprakta ve yapı malzemelerinde Radon ve yan ürünlerin yoğunluklarının tayin edilebilmesi için bazı aparatlar kullanılması gerekmektedir. Suda yapılacak ölçümler için AquaKit, toprakta yapılacak ölçümler için Soil Gas Probe (Toprak Gaz Sondası) kullanılmaktadır (Şekil 4.4). Ayrıca AlphaGUARD ile gerek sudaki, gerek topraktaki ve gerekse yapı malzemelerindeki ölçümlerin yanı sıra kalibrasyon işlemlerinde de kullanılması gerekli olan AlphaPUMP, cihaz iyonizasyon odasına hava pompalayan bir diğer alettir. Bahsi edilen bu bileşenlerle ilgili daha ayrıntılı bilgi daha sonraki kesimlerde verilmiştir.



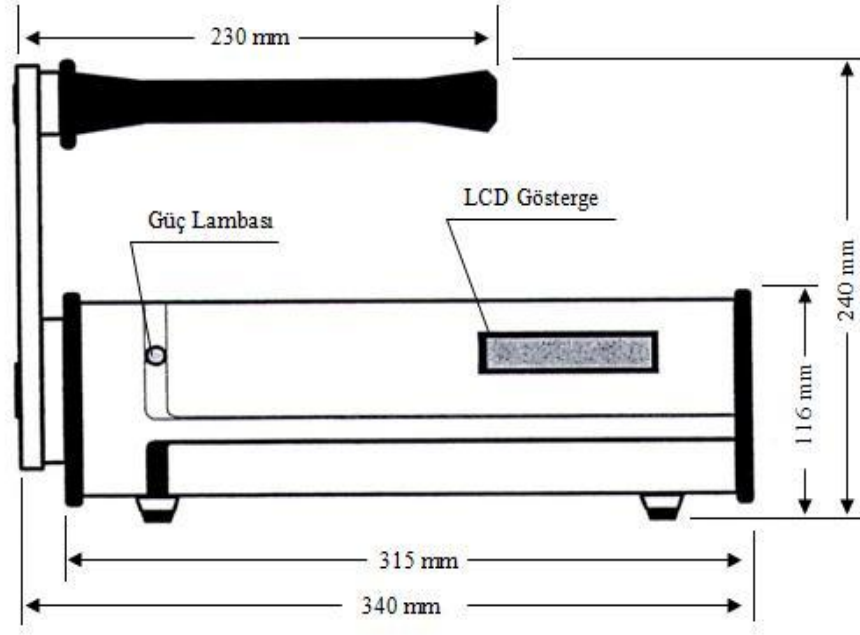
**Şekil 4.4.** AlphaGUARD ile hava, su, toprak ve yapı malzemelerinde radon ölçümü

#### 4.4. AlphaGUARD Detektörünün Yapısı ve Çalışma İlkesi

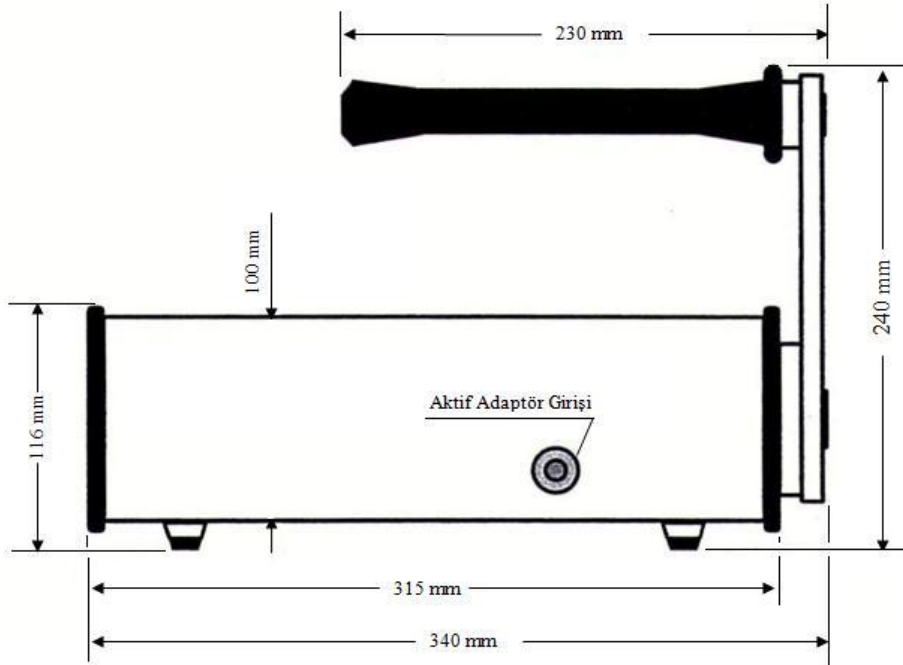
AlphaGUARD PQ 2000PRO Radon detektörünün yapısı iki temel kısma ayrılarak incelenebilir: 1) Detektörün dış yapısı, ebatları ve dışarıdan görülen bazı özellikleri. 2) Detektörün iç yapısı ki iç yapısını oluşturan iki ana bileşen olan ölçüm ve veri işleme birimleri.

##### 4.4.1. Detektörün dış yapısı

AlphaGUARD PQ 2000PRO Radon detektörünün ölçüm yapmasını sağlayan ölçüm ve elektronik aksam bileşenleri dayanıklı bir alüminyum dış gövde içine yerleştirilmiştir. Şekil 4.5, Şekil 4.6, Şekil 4.7, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’de AlphaGUARD cihazının farklı görünüşleri ile bazı ebatları verilmiştir.



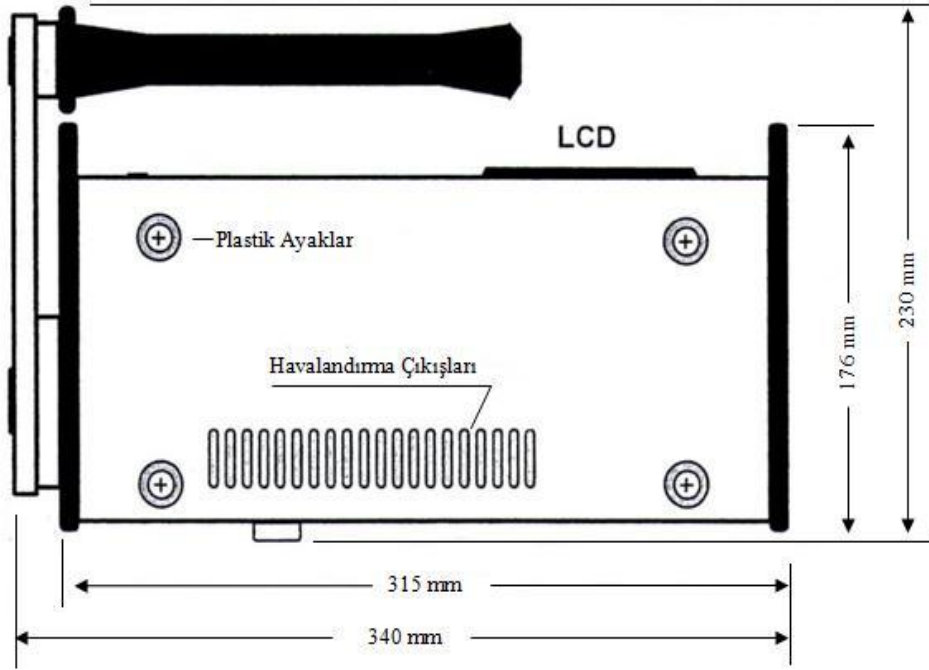
Şekil 4.5. AlphaGUARD cihazının önden görünüşü ve ebatları (Akyıldırım 2005)



Şekil 4.6. AlphaGUARD cihazının arkadan görünüşü ve ebatları (Akyıldırım 2005)

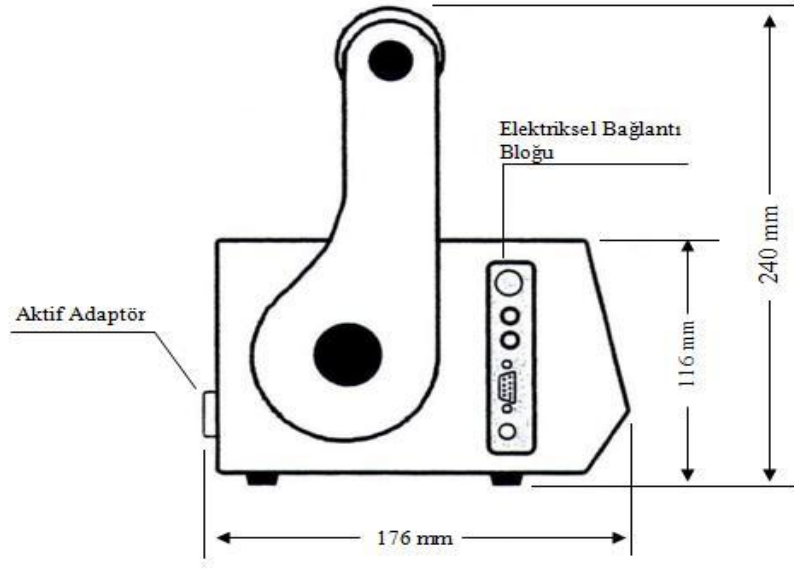
Cihazın arka kısmındaki vida yuvası plastik bir kapakla kapatılmıştır. AlphaGUARD PQ 2000PRO’da bu kapağın arkasında bulunan yuva cihazın iyonizasyon odasıyla buraya bağlanan etkin hava pompası arasındaki bağlantıyı sağlar. Yani buradan dedektör içine hava girişi sağlanmaktadır (Şekil 4.6).

Alt kısımda alüminyum gövdenin yerle temasını kesen plastik ayaklar ve havalandırma çıkışları bulunmaktadır (Şekil 4.7). İç kısımda bulunan bir fan sayesinde, özellikle uzun süreli kullanımlarda cihazın soğutulmasını sağlamak için sıcak hava buralardan dışarıya atılmaktadır (Akyıldırım 2005).



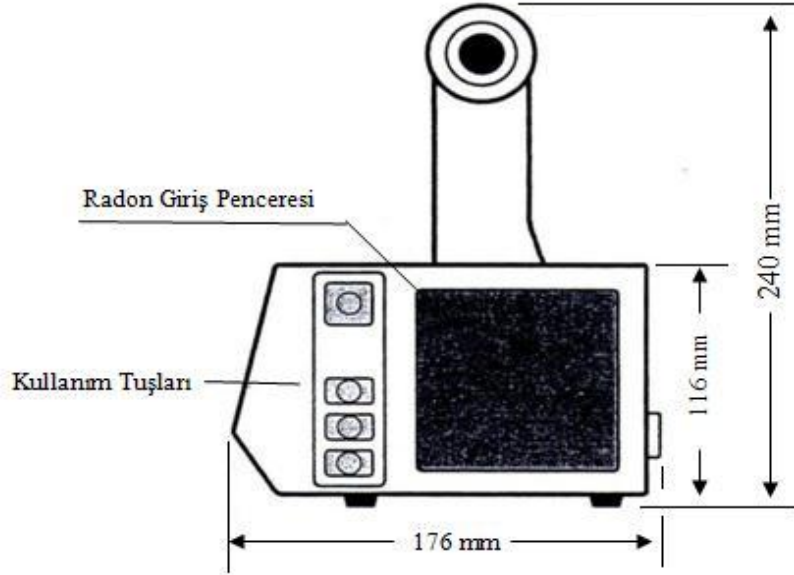
**Şekil 4.7.** AlphaGUARD cihazının alttan görünüşü ve ebatları (Akyıldırım 2005)

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 4 mm’lik soket, PC ile bağlantıyı sağlamak için 1 adet RS-232 girişi ve 12 V DC adaptör girişi bulunmaktadır (Şekil 4.8).



**Şekil 4.8.** AlphaGUARD cihazının sol yandan görünüşü ve ebatları (Akyıldırım 2005)

Cihazın sağ tarafında korumayla kapatılmış radon gazı giriş paneli ve AlphaGUARD menü kontrolünü sağlayan tuş takımı bulunmaktadır (Şekil 4.9).



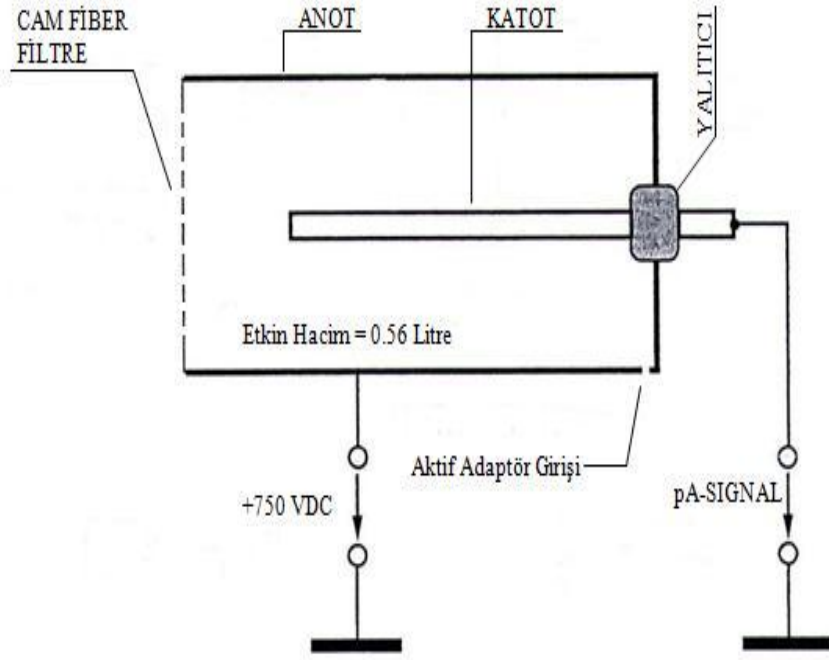
**Şekil 4.9.** AlphaGUARD cihazının sağ yandan görünüşü ve ebatları (Akyıldırım 2005)

#### 4.4.2. Detektörün iç yapısı

AlphaGUARD PQ 2000PRO Radon detektörünün asıl önemli kısmı iç yapısıdır. Cihazın alüminyum korumasının altında ölçüm yapılmasını sağlayan detektör (atma iyonizasyon çemberi) ve detektörden gelen sinyalleri işleyip sayısal veri haline getiren sinyal işleme birimi DSP (Digital Signal Processing-Sayısal Sinyal İşleme) bulunmaktadır. Radon<sup>222</sup>, Radon<sup>220</sup> (Toron) ve bunların yan ürünlerinin sürekli ölçülmesini amaçlayan birçok cihaz ve bunların kullandıkları çeşitli tiplerde detektörler mevcuttur. Seçilecek detektörler ölçümün amacına, hassasiyet sınırlarına, ölçümün yapılacağı yerlere ve buralardaki radyasyon yoğunluğuna ve maliyete göre belirlenmektedir. Örneğin radyasyon yoğunluğunun fazla olduğu yerlerde ölü zamanı daha küçük bir detektör seçilmesi gerekmektedir. Bir radyasyon detektörü için ‘ölü zaman’ detektörün algılayabileceği iki en yakın bozunma arasındaki zaman aralığı olarak tanımlanabilir.

Düzenli işletimde Radon içeren hava iyonizasyon çemberi içerisine geniş yüzeyli bir cam fiber filtreden geçerek girmektedir. Burada sadece Radon<sup>222</sup>,nin geçmesine izin verilirken yan ürünlerin iyonizasyon odasına girmesi engellenmektedir. Aynı zamanda filtre, çemberin iç kısmının toz zerreciklerinin birikmesiyle oluşacak kirlenme ve paslanmadan etkilenmemesini sağlamaktadır. Buna destek olarak cihaz içine dışarıdan miktarı kontrol edilebilen temiz hava girişi sağlayacak bir pompa (AlphaPUMP) da kullanılmaktadır. AlphaGUARD PQ 2000PRO’nun silindirik atma iyonizasyon çemberi 0,56 Litrelik bir etkin hacme sahiptir. Cihaza güç verilmesiyle beraber iyonizasyon çemberinin metal iç yüzeyleri 750 Voltluk bir iç gerilimle yüklenerek detektörün anodu (+ kutup) haline gelir. Buna karşılık detektörün yatay ekseni denebilecek eksen boyunca yatay olarak uzanan paslanmaz çelikten yapılmış çubuk ise 0 Volt seviyesindedir ve katot vazifesini görür. Anot ve katot arasındaki yalıtım elektrot çubuğun iyonizasyon çemberi içerisine girdiği noktadaki bir plastik parçayla sağlanır. Anot ve katot arasındaki 750 Voltluk gerilim farkı sayesinde detektör 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. Aşağıdaki şekilde (Şekil 4.10)

AlphaGUARD PQ 2000PRO'nun atma iyonizasyon odasının şematik bir çizimi görülmektedir.



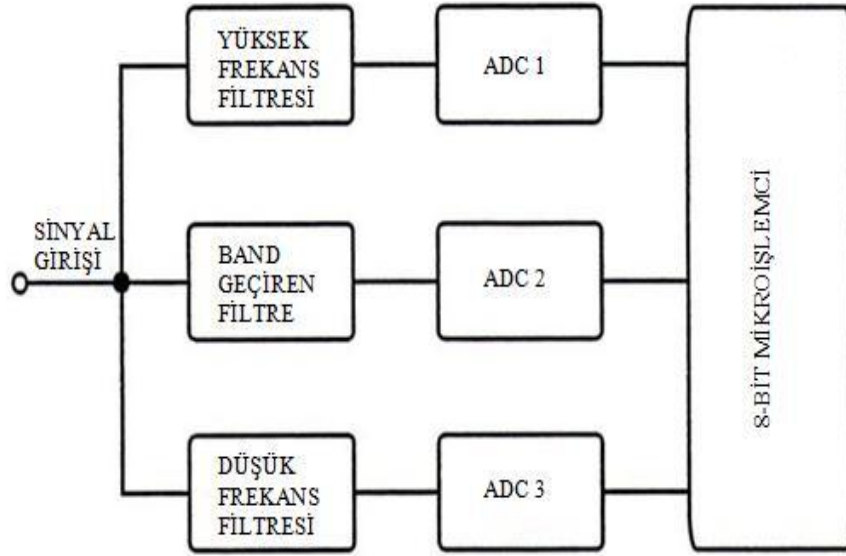
**Şekil 4.10.** AlphaGUARD dedektörünün iyonizasyon çemberinin şematik çizimi (Akyıldırım 2005)

Cihazın iyonizasyon odası içinde Radon ve Toron bulunduğu zaman detektör her ikisine de aynı algılama hassasiyetini göstermektedir. Detektör odasının dolması sürecinde Radon yoğunluğunda herhangi bir değişiklik olmamasına karşın Toron'un neredeyse tamamı bozunacaktır çünkü 10 dakikalık bir gecikmeye sahiptir. Pratikte AlphaGUARD PQ 2000PRO'nun Toron'a karşı hassaslığı Radon'a karşı hassaslığının % 1'i ile % 10'u arasındadır.

Cihazının iç yapısının ikinci temel bileşeni elektronik birimdir. Bu elektronik birim detektör 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 detektörden gelen her ön yükseltici sinyali üç farklı özelliğine göre aynı anda analiz edilebilmektedir. DSP birimine ait blok diyagram Şekil 4.11’de verilmiştir.



**Şekil 4.11.** AlphaGUARD’ın sinyal işleme biriminin blok diyagramı (Akyıldırım 2005)

Bir numaralı kanal AlphaGUARD PQ 2000PRO’nun spektroskopik kanalı olarak adlandırılır. Burada sadece sinyallerin atma derinliklerine göre değil, aynı zamanda atma şekillerine göre de bir sınıflandırmaktadır. Bu sinyal analizi sonucunda üç boyutlu bir görüntü elde edilir. DSP teknolojisine sahip olmayan iyonizasyon odalı detektörlerde yüksek seviyedeki Radon yoğunluklarında meydana gelen  $\alpha$  olayları multiplletlere (üçlülere) ayrılma eğilimdedirler ve bu sinyalleri daha karmaşık hale getirmektedir. Ancak AlphaGUARD PQ 2000PRO’da da detektör 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 (prime sinyal) kısa zaman aralıklarında örneklenir ve orijinal sinyalin sayısal değerler halinde örnekleri çıkarılarak AlphaGUARD elektronik devresinin son kısmı olan hızlı mikro kontrolör tarafından işlenir.

ADC1 yoluyla spektroskopik kanalda örneklendirilen veriler mikro kontrol birim tarafından her  $\alpha$  pikinden elde edilen atma genliği (= klasik alfa spektrumu) ve atmanın şekli için de tanımlama bilgileri şekline dönüştürülür. Detektör tarafından toplanan bu bilgiler x eksenini  $\alpha$  piki genliğini (= alfa enerjisini), y eksenini zaman birimi başına meydana gelen  $\alpha$  bozunumu ve z eksenini de atma şekli olmak üzere üç eksenli bir spektrum halinde sunulabilir. ADC2 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 değişmektedir ve bu bağımlılığı kullanarak piko amper seviyesindeki iyonizasyon akımı kesin olarak ölçülebilmektedir. ADC3'lü üçüncü kanal ise klasik bir DC integratörlü akım ölçümü gerçekleştiren devredir.

Bu üç sinyal karakteristiğinin temelinde altı değişik matematiksel algoritma yatmaktadır. Tüm işlemler sonucunda optimize edilmiş yoğunluk prosedürü vasıtasıyla gerçek Radon yoğunluğu belirlenmektedir. Her bir Radon değeri yaklaşık olarak 50 milyon matematiksel işlemin sonucunda elde edilir ve bu işlemler için AlphaGUARD PQ 2000PRO'nun ihtiyaç duyduğu akım ise sadece 3 mA'dir (Akyıldırım 2005).

#### **4.5. Detektörün Kaplıcaya Yerleştirilmesi**

Tez çalışmasında kaplıcanın toplam 7 ayrı noktasında, iç ortamın radon konsantrasyonu ölçülmüştür. Ölçümlerin yapılacağı yerler tayin edilirken binanın farklı katlarında bulunan farklı odaların olması tercih edilmiştir. Deneysel çalışma esnasında detektör 10 dakikalık difüzyon modunda bir gün boyunca bu noktalara konumlanmıştır. Bunların 4 tanesi tedavileri süresince hastaların kullanmış oldukları odalardır. Buralardaki ortamın havalandırılması tamamen kalan hastalara bağlı olarak kapı ve pencereler sayesinde yapılmaktadır. Odalardan ikisi ikinci katta, diğer ikisi de birinci katta bulunurken zemin katta yer alan polikliniklerden biri de ölçülmüştür. Detektör bu odalara yerden yaklaşık 1,5-2 m yükseklikte, kapı ve pencerelerden uzak olacak şekilde yerleştirilmiştir. Poliklinik ve odalar, kaplıcada kullanılan termal su kaynağının hemen yanında bulunmaktadır. Ayrıca binanın havuz bölmesinin yanında bulunan, dinlenme kabinlerinin olduğu bir mekan da gözlenmiş ve burası "havuz dışı" olarak adlandırılmıştır. Çünkü burası hem havuza yakın olup hem de havuz tedavisi sonrası

hastalar tarafından kullanılmaktadır. Havalandırmanın önemini anlamak amacıyla da kullanılmayan ve uzun süredir kapalı bulunan bir oda da ölçümlere dahil edilmiştir.

#### **4.6. Kaplıcadaki Su Numunelerinin Alımı**

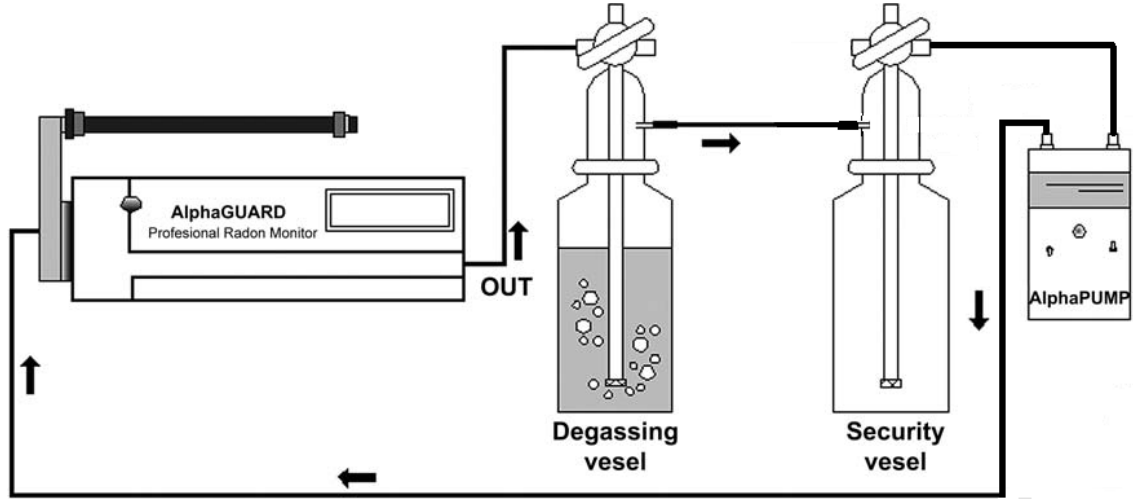
Termal su kaynağından ve havuz suyundan numune alımı için 500 mL'lik plastik şişeler kullanılmıştır. Kaynaktan örnek almadan önce su bir süre dışarı akıtılmaya bırakılarak temiz su örneği elde edilmiştir. Temiz su elde edildikten sonra şişe 3 kez su ile çalkalanarak ağzına kadar boşluk kalmayacak şekilde doldurulmuş ve radon gazı kaçışını önlemek için şişenin kapağı su akışı altında sıkıca kapatılmıştır. Havuzdan alınan örnek ise havuzun alt kısmında kaynak suyunun girişini sağlayan noktaya yakın bir yerden alınmıştır. Su örnekleri sabahları alınmış ve alınan su örnekleri ortalama 60 dakikalık bir sürede Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Nükleer Fizik laboratuvarına götürülerek ölçümler gerçekleştirilmiştir.

#### **4.7. 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 4.12'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 4.12. Sudaki radon ölçüm düzeneği

#### 4.8. AlphaGUARD PQ 2000PRO ile Sudaki Radon Ölçümü

- 1) Şekil 4.12’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 (4.1) 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 düzeneğe 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.

#### 4.9. 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.

$$C_{water} = \frac{C_{air} \left( \frac{V_{system} - V_{sample}}{V_{sample}} + k \right) - C_0}{1000} \quad (4.1)$$

Burada,

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

$C_{air}$  – ölçüm sonucunda cihazda belirtilen konsantrasyon değeri (Bq/m<sup>3</sup>);

$C_0$  – arka plan (doğal fon) konsantrasyonu (Bq/m<sup>3</sup>);

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

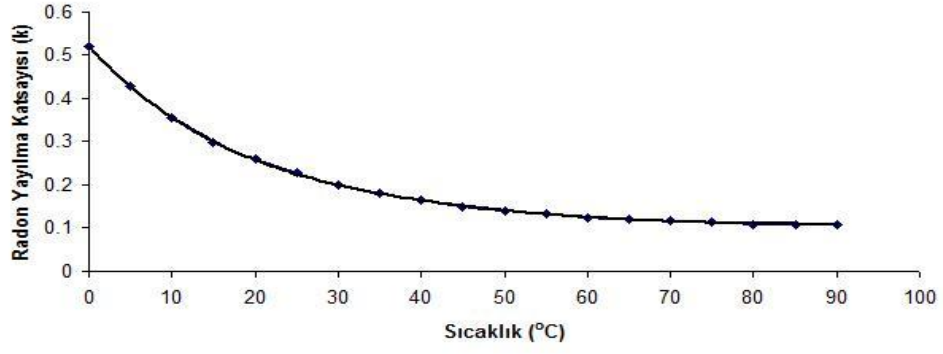
$V_{sample}$  – su örneğinin hacmi (mL); ve

$k$  - radon yayılma katsayısı'dır.

Radon yayılma katsayısı ( $k$ ), sıcaklığa bağlı olarak değişim göstermekte ve artan sıcaklık değerlerine karşılık azalmaktadır (Şekil 4.13). 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 4.13. Radon yayılma katsayısının (k) değişim grafiği

#### 4.10. Sudaki Ortalama Radon Konsantrasyonu Hesaplamaları

Belirli zaman aralıklarında termal kaynak suyu ve havuz suyu için 3 numune alındı. Bu numuneler için ortalama radon konsantrasyonu değerleri (4.2) denkleminle hesaplandı.

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^N \frac{x_i}{N} \quad (4.2)$$

#### 4.11. Standart Hata

Hesaplanan ortalama değerlerin standart hata hesabını bulmak amacıyla standart sapma hesaplamaları

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}} \quad (4.3)$$

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

$$S.H. = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad (4.4)$$

denkleminle kullanılarak yapıldı.

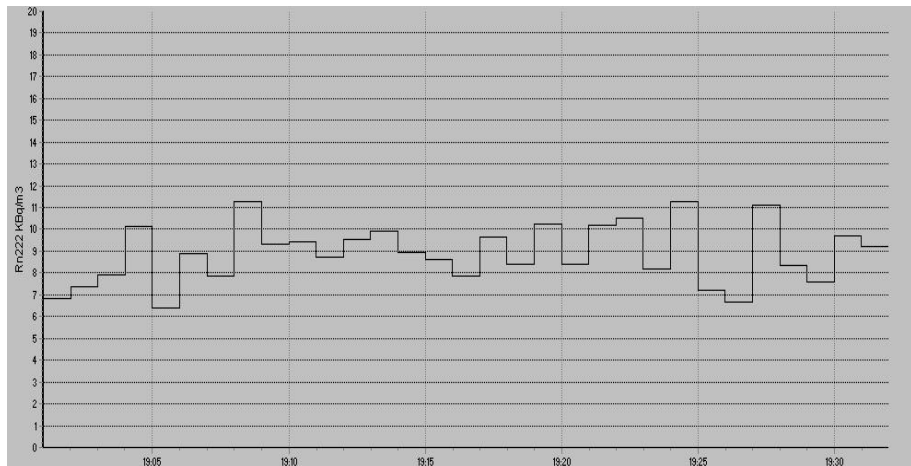
## 5. BULGULAR

Bursa'nın Çekirge bölgesinde yer alan Kükürtlü Kaplıcaları'nda hava ve su için, AlphaGUARD PQ 2000PRO radon detektörü kullanılarak gerçekleştirilen ölçümlere ait veriler; grafikler ve tablolar halinde verilmiştir. Hava ve sudaki ölçümler için elde edilmiş olan veri seti;  $^{222}\text{Rn}$  konsantrasyonu, sıcaklık, basınç ve bağıl nem parametrelerinden oluşmaktadır.  $^{222}\text{Rn}$  konsantrasyonu ve iklimsel parametreler ayrı ayrı pencerelerde olmak üzere grafiksel olarak verilmiştir.

Kaplıcanın farklı mekanlarındaki hava ölçümleri için detektör difüzyon modunda bırakılarak; tam bir gün süresince 10 dakikalık aralıklarla ortalama  $^{222}\text{Rn}$  konsantrasyon değerleri kaydedilmiştir. Kaplıcadan alınan suların ölçümleri için ise 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.

### 5.1 AlphaGUARD Detektörü İle Yapılan Ölçümler

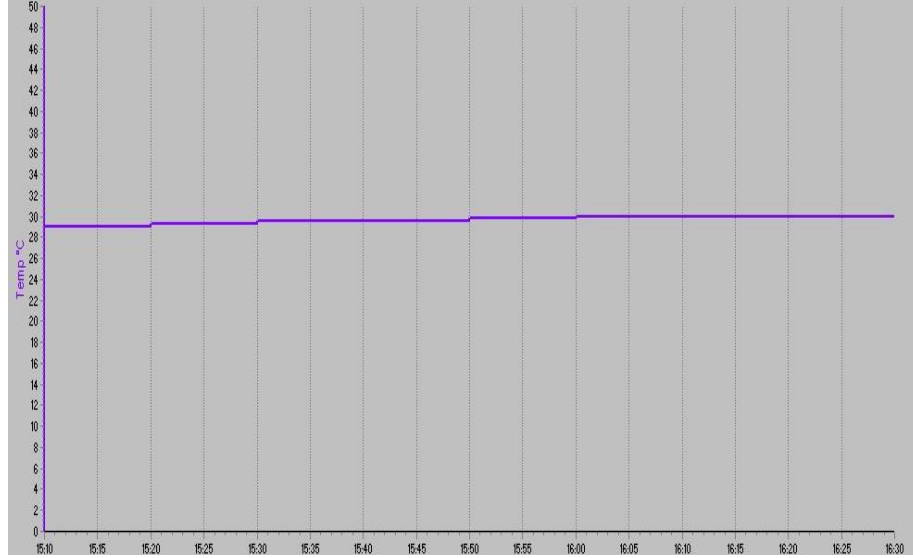
Şekil 5.1'de ölçümler sonunda AlphaGUARD için geliştirilmiş olan AlphaEXPERT yazılımında elde edilen grafiklerden bir örnek verilmiştir. Grafikte x eksenini zamanı saat cinsinden, y eksenini ise  $^{222}\text{Rn}$  konsantrasyonunu  $\text{Bq/m}^3$  biriminde göstermektedir.



Şekil 5.1.  $^{222}\text{Rn}$  konsantrasyonu ölçümü örnek grafiği

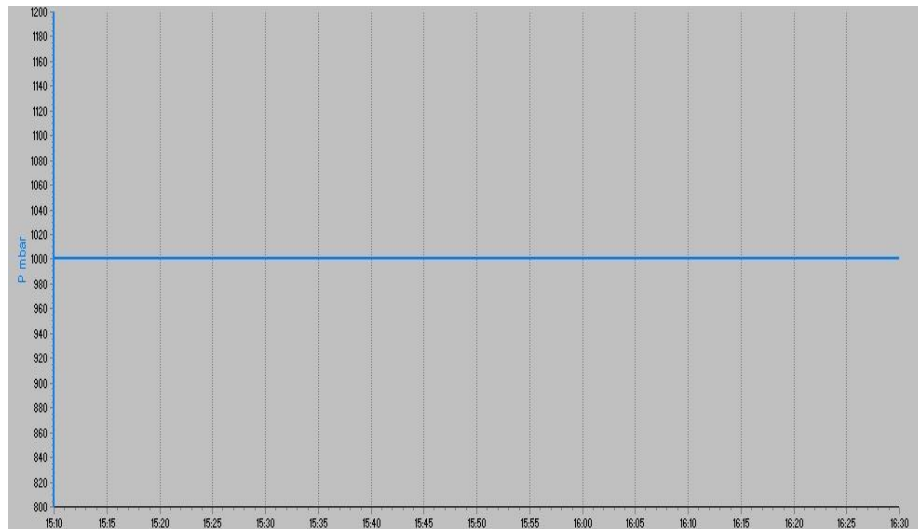


Şekil 5.2’de ölçümler sırasında elde edilen sıcaklık verilerinin zamana karşı grafiklerinden bir örnek görülmektedir. x eksenini saat cinsinden zaman, y eksenini ise santigrad derece cinsinden sıcaklıktır.



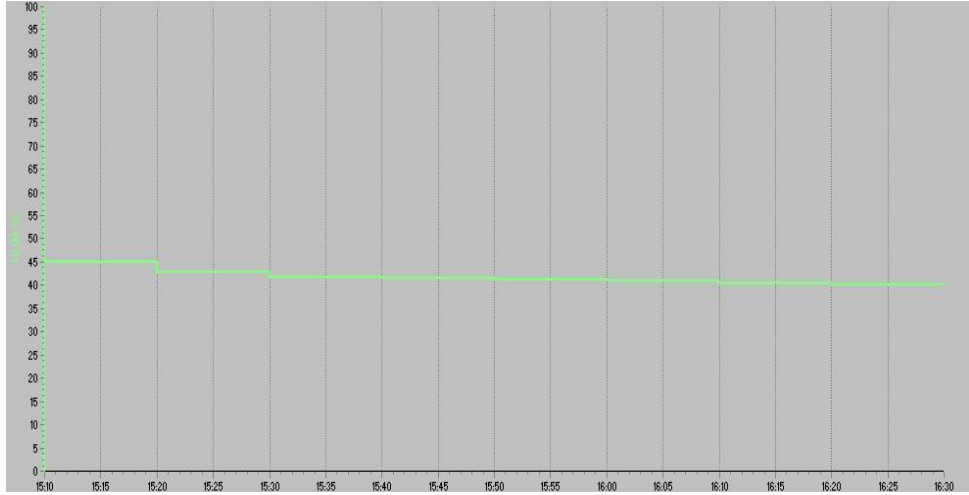
Şekil 5.2. Sıcaklık ölçümü örnek grafiği

Şekil 5.3’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 5.3. Basınç ölçümü örnek grafiği

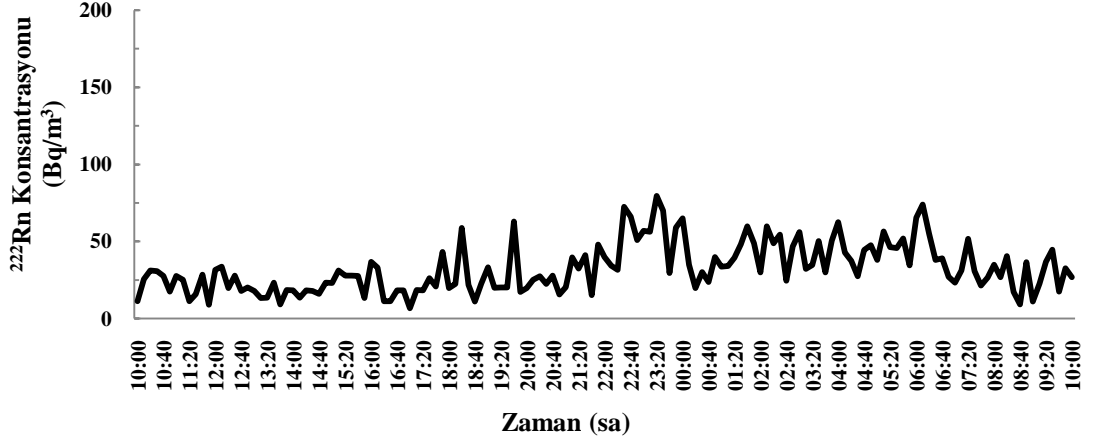
Şekil 5.4'te ölçümler sırasında elde edilen bağıl nem verilerinin zamana karşı grafiklerinden bir örnek görülmektedir. x eksenini saat cinsinden zaman, y eksenini ise % rH olarak vermiştir.



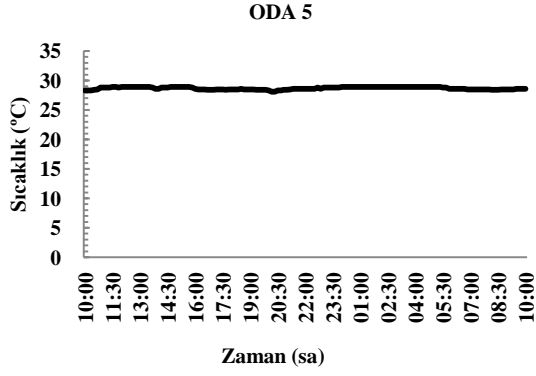
**Şekil 5.4.** Bağıl nem ölçümü örnek grafiği

Uludağ Üniversitesi Atatürk Rehabilitasyon Uygulama ve Araştırma Merkezi Kükürtlü Kaplıcaları'nın, hava ve sudaki radon konsantrasyonları için 15 Temmuz 2009-25 Ağustos 2009 tarihleri arasında yapılan ölçümlere ait verilerin grafiklerinin yanı sıra tablo halinde ortalama değerleri Şekil 5.5-Şekil 5.17'de verilmiştir. Oda 5 ve Oda 9 binanın ikinci katında, Oda 19 ve Oda 23 birinci katında, Poliklinik ise zemin katta yer almaktadır. Böylelikle binanın farklı katların için radon konsantrasyon dağılımının gözlenmesi amaçlanmıştır. "Havuz dışı" olarak tanımlanan mekan havuzun bulunduğu bölmenin hemen yanında olup, havuz tedavisi sonrası hastaların kullandığı oldukça yüksek bir bölmedir. "Kapalı oda" olarak adlandırılan yer ise zemin katta, uzun süredir kullanılmayan ve havalandırılması yapılmayan bir odadır.

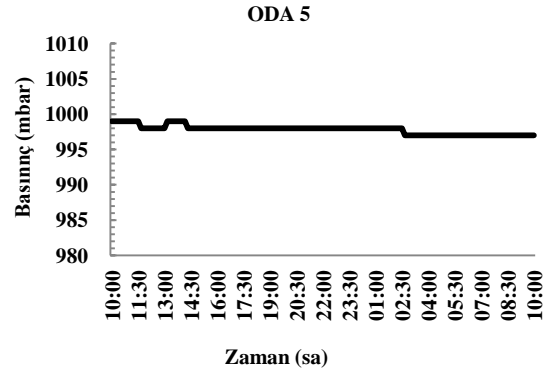
### ODA 5



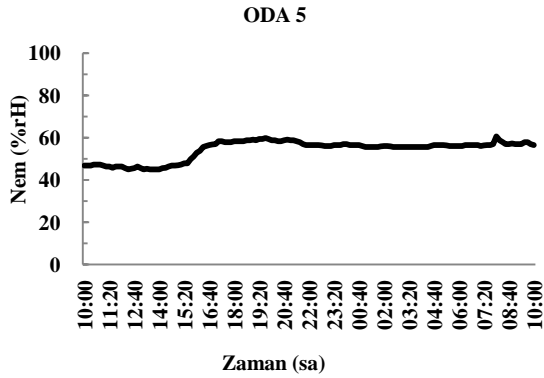
(a)



(b)



(c)



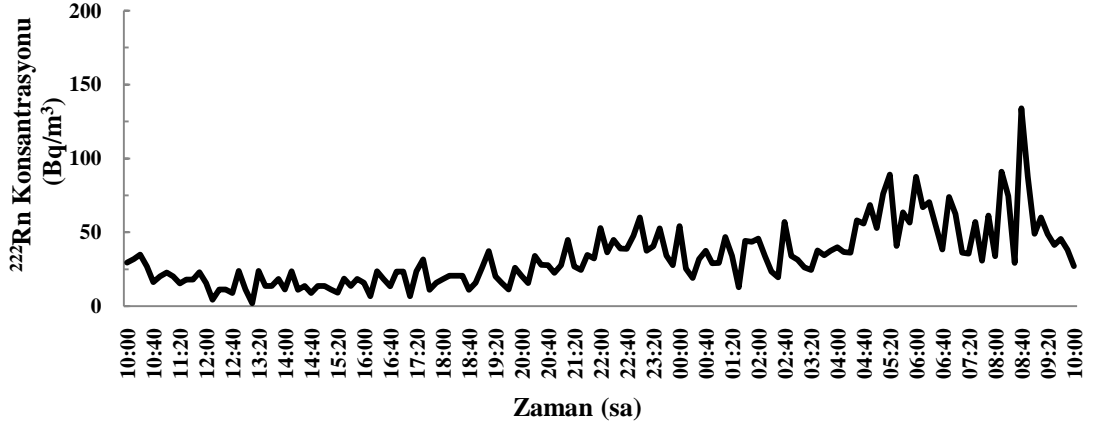
(d)

Parametre	Ortalama
<sup>222</sup> Rn (Bq/m <sup>3</sup> )	32,52
Sıcaklık (°C)	28,7
Basınç (mbar)	998
Bağıl Nem (%rH)	54,4

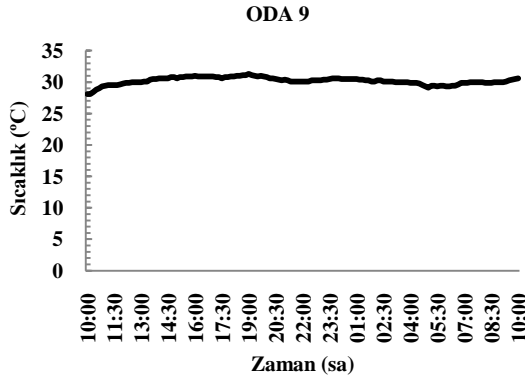
(e)

**Şekil 5.5.** 5 nolu odaya ait bir günlük hava ölçümlerinin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri

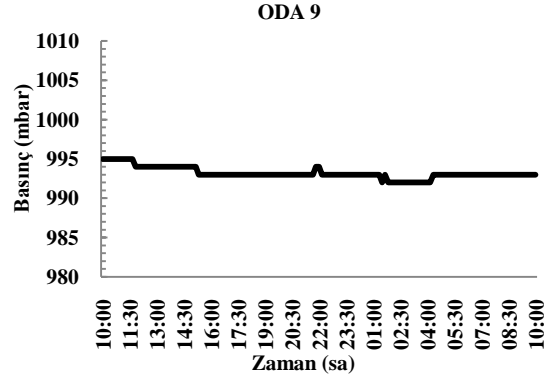
### ODA 9



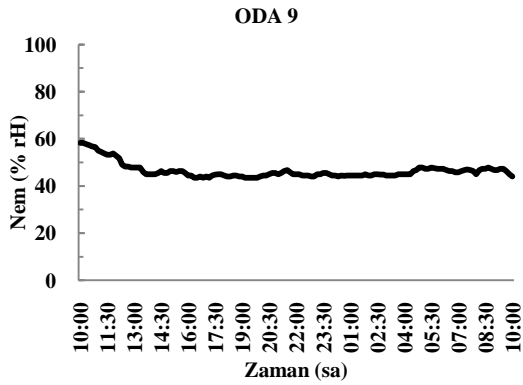
(a)



(b)



(c)



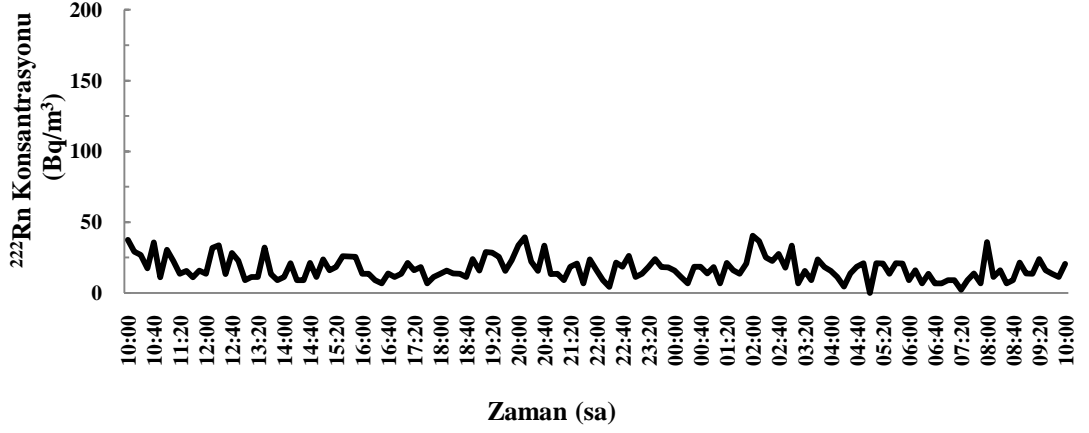
(d)

Parametre	Ortalama
$^{222}\text{Rn}$ (Bq/m <sup>3</sup> )	33,37
Sıcaklık (°C)	30,2
Basınç (mbar)	993
Bağıl Nem (%rH)	46,2

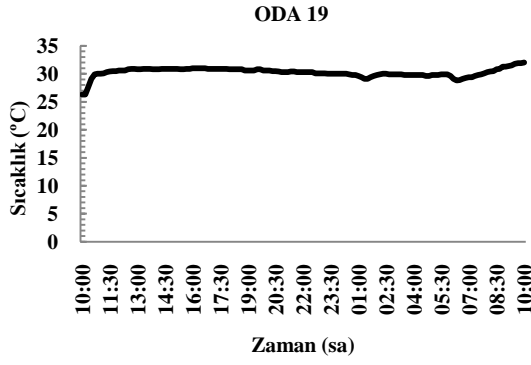
(e)

Şekil 5.6. 9 nolu odaya ait bir günlük hava ölçümlerinin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri

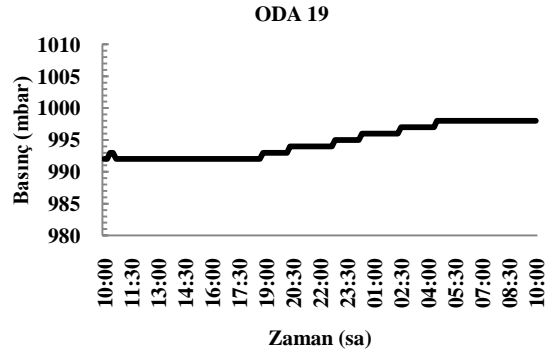
### ODA 19



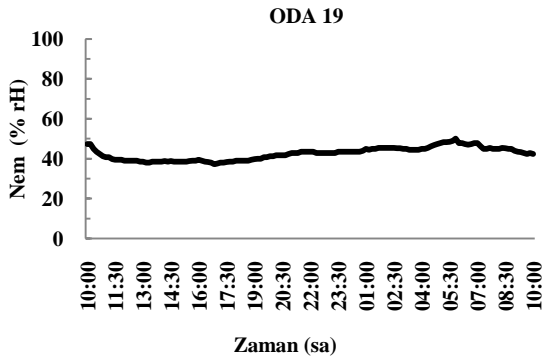
(a)



(b)



(c)



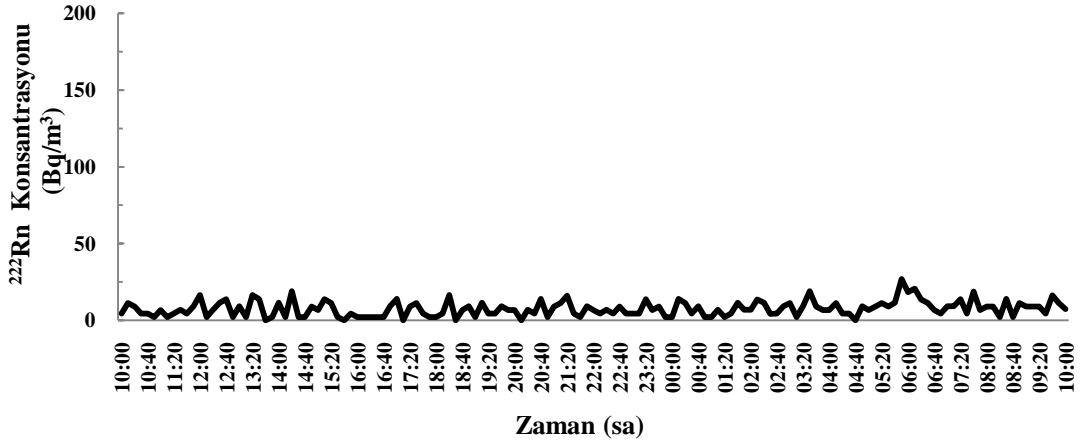
(d)

Parametre	Ortalama
<sup>222</sup> Rn (Bq/m <sup>3</sup> )	17,31
Sıcaklık (°C)	30,3
Basınç (mbar)	995
Bağıl Nem (% rH)	42,5

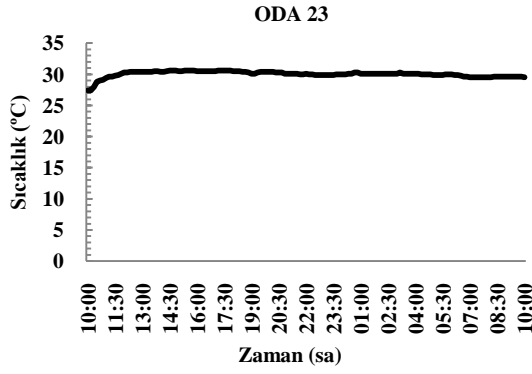
(e)

**Şekil 5.7.** 19 nolu odaya ait bir günlük hava ölçümlerinin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri

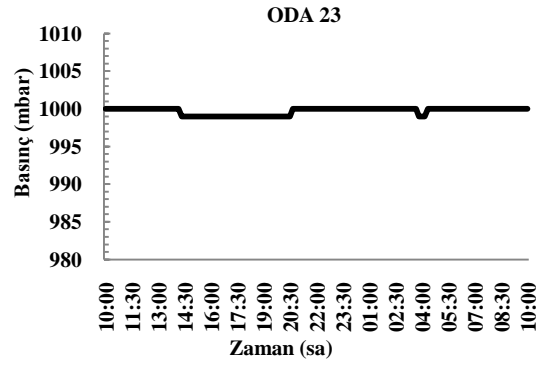
### ODA 23



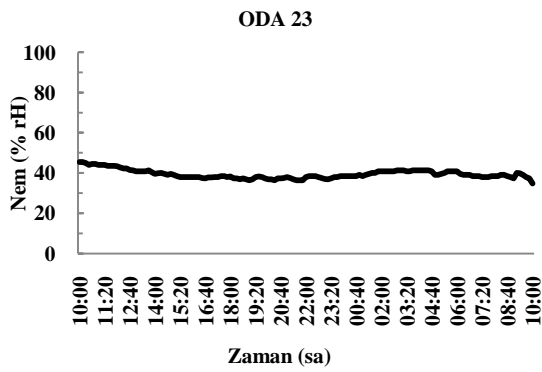
(a)



(b)



(c)



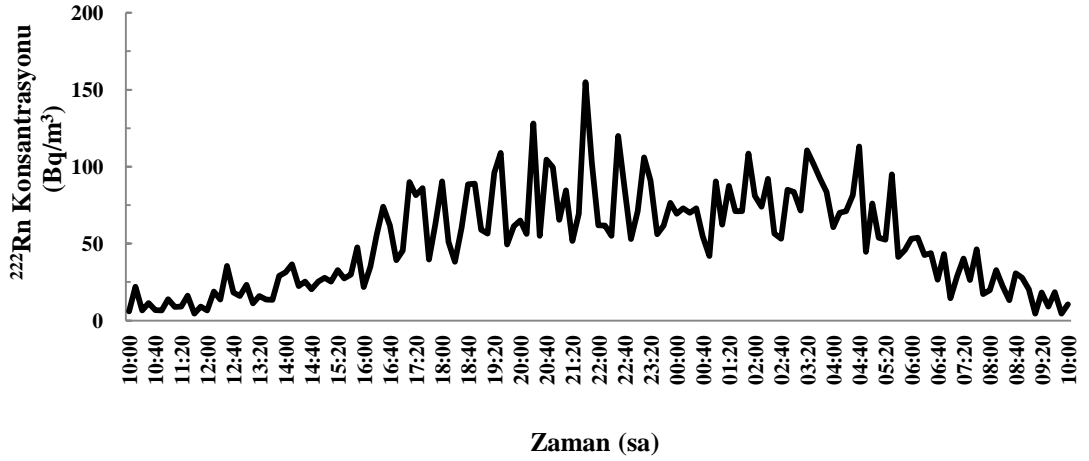
(d)

Parametre	Ortalama
$^{222}\text{Rn}$ ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ )	7,57
Sıcaklık ( $^{\circ}\text{C}$ )	30,1
Basınç (mbar)	1000
Bağıl Nem (%rH)	39,2

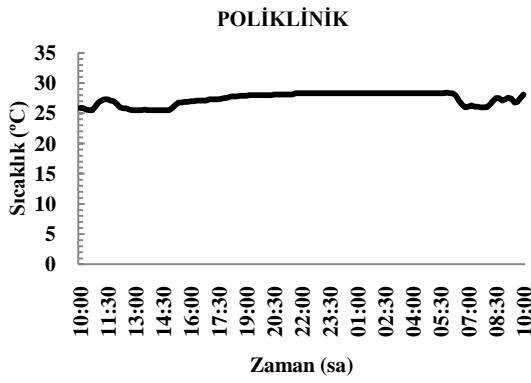
(e)

**Şekil 5.8.** 23 nolu odaya ait bir günlük hava ölçümlerinin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri

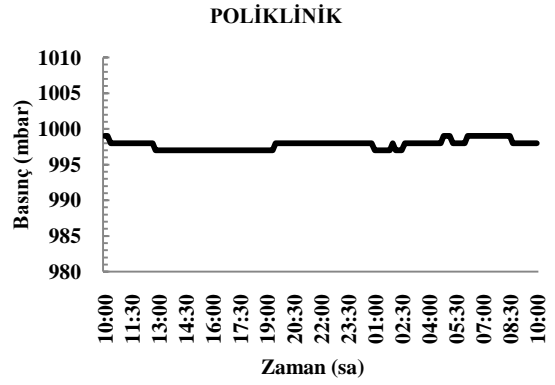
## POLİKLİNİK



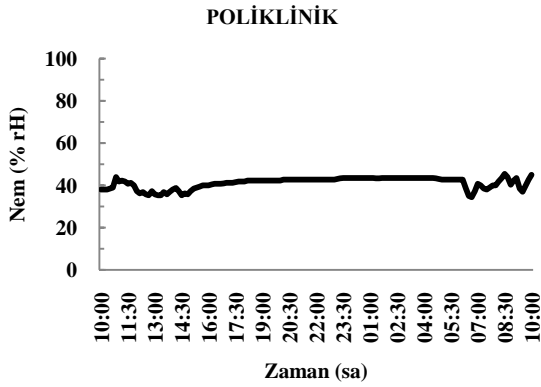
(a)



(b)



(c)



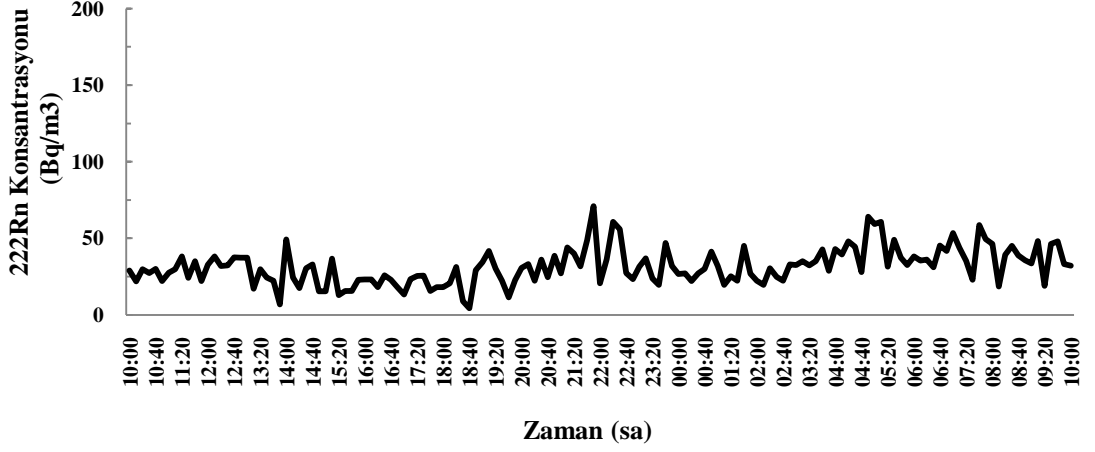
(d)

Parametre	Ortalama
<sup>222</sup> Rn (Bq/m <sup>3</sup> )	51,71
Sıcaklık (°C)	27,4
Basınç (mbar)	998
Bağıl Nem (%rH)	41,2

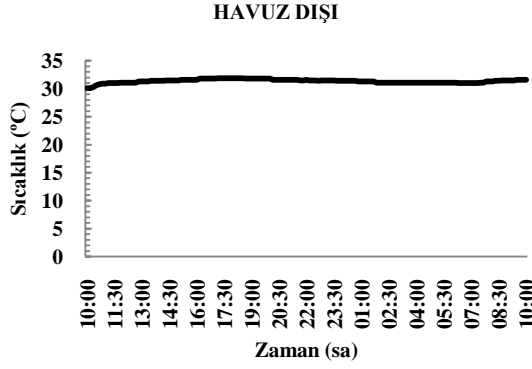
(e)

**Şekil 5.9.** Poliklinik odasına ait bir günlük hava ölçümlerinin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri

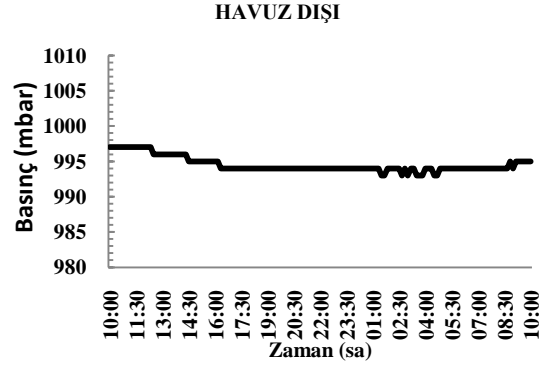
### HAVUZ DIŞI



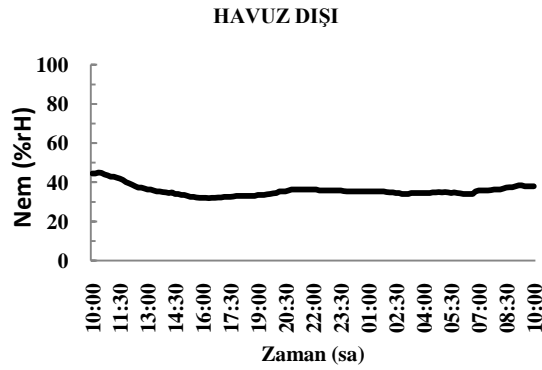
(a)



(b)



(c)



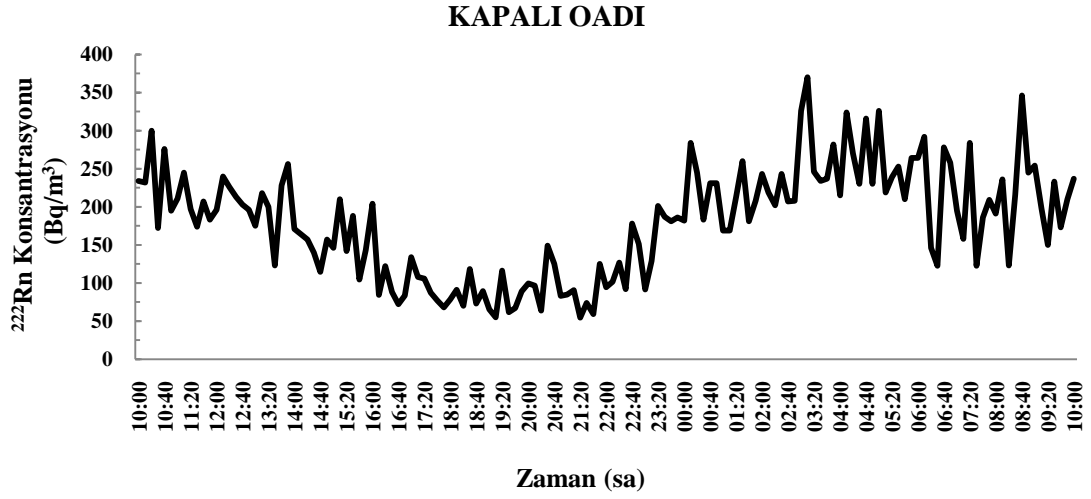
(d)

Parametre	Ortalama
<sup>222</sup> Rn (Bq/m <sup>3</sup> )	31,59
Sıcaklık (°C)	31,4
Basınç (mbar)	995
Bağıl Nem (%rH)	35,5

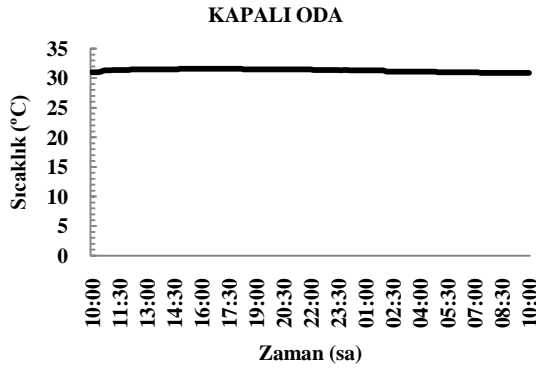
(e)

Şekil 5.10. Havuz dışı hava ölümlerinin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem; (e) lm verilerinin ortalama değerleri

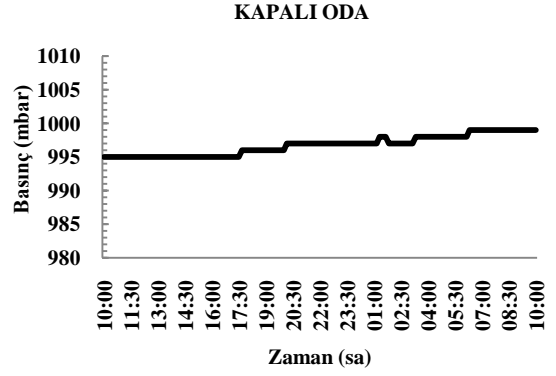




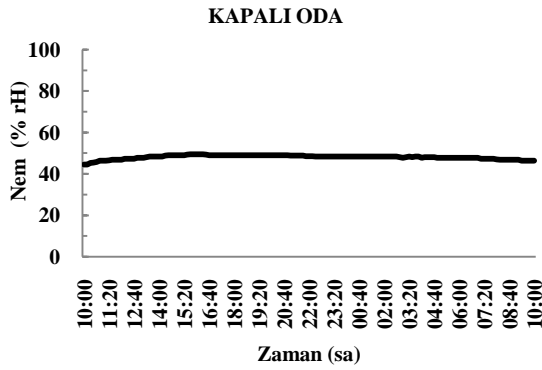
(a)



(b)



(c)

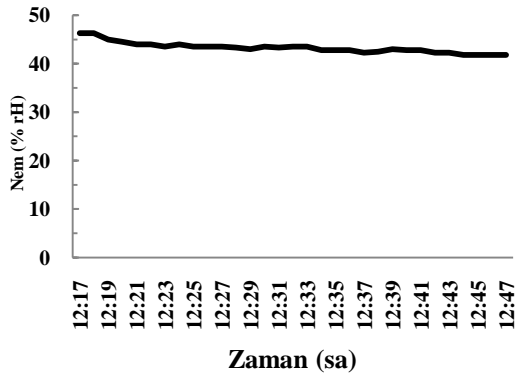
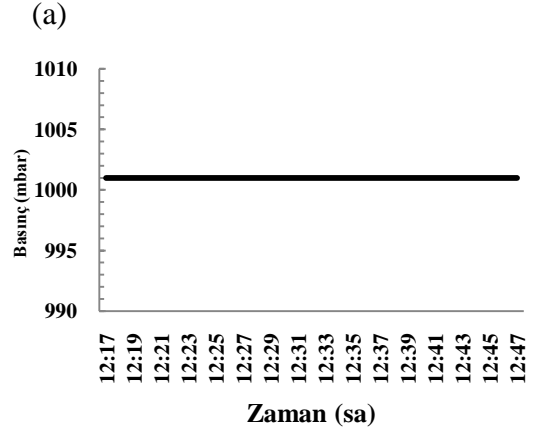
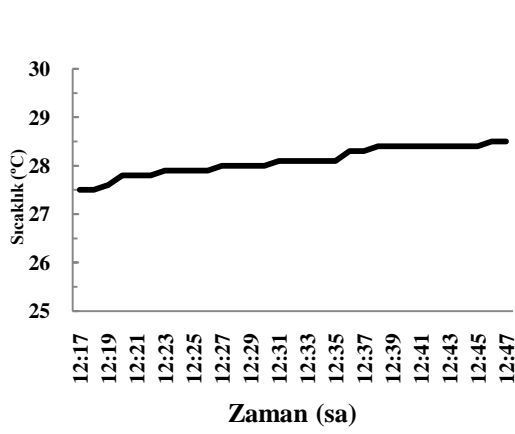
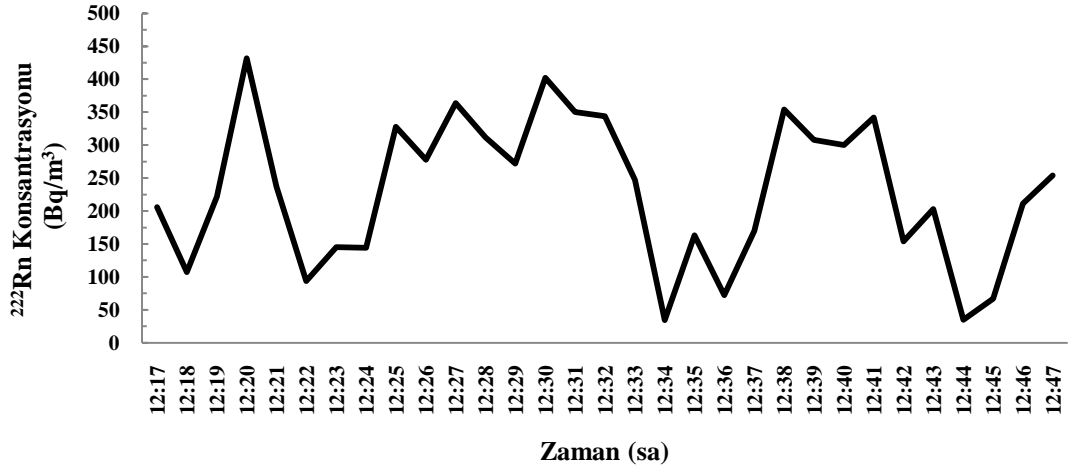


(d)

Parametre	Ortalama
$^{222}\text{Rn}$ (Bq/m <sup>3</sup> )	179,09
Sıcaklık (°C)	31,3
Basınç (mbar)	997
Bağıl Nem (%rH)	48,0

(e)

**Şekil 5.11.** Kapalı odaya ait bir günlük hava ölçümlerinin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri

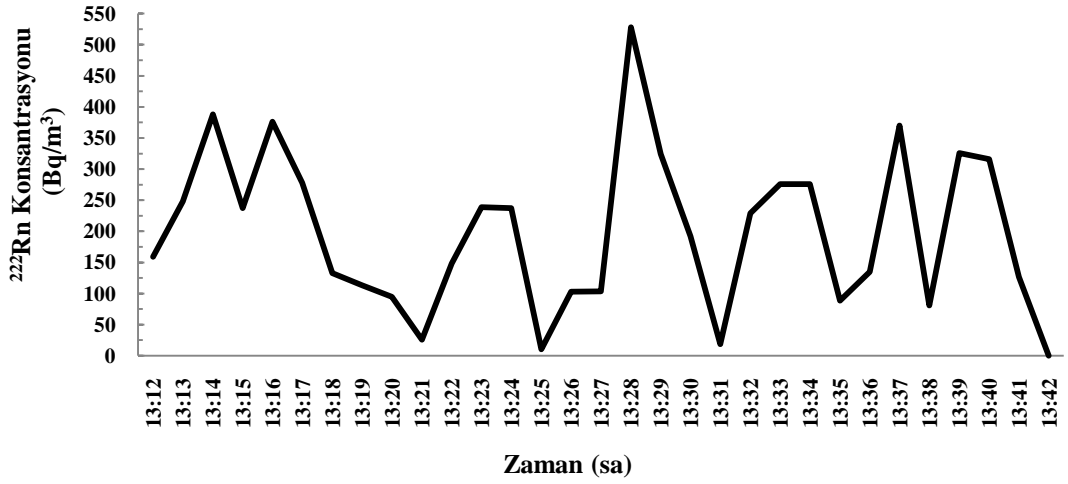


Parametre	Ortalama
Doğal fon (C <sub>0</sub> ) (Bq/m <sup>3</sup> )	10,12
<sup>222</sup> Rn (Bq/m <sup>3</sup> )	232,81
Sıcaklık (°C)	28,2
Basınç (mbar)	1001
Bağıl Nem (%rH)	42,8

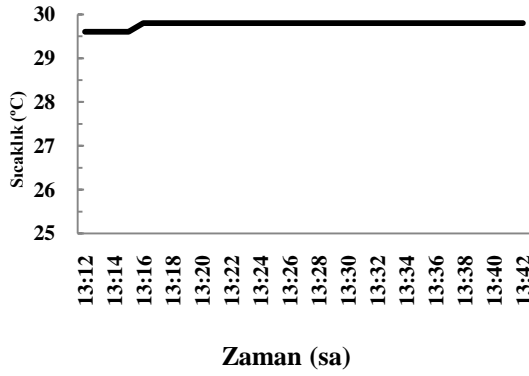
(d)

(e)

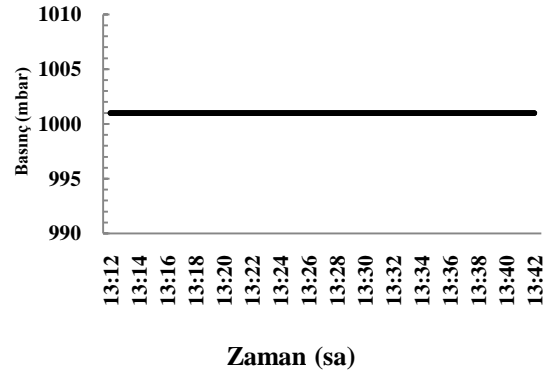
**Şekil 5.12.** Kaynak suyunun 1 nolu numunesine ait ölçümlerin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri



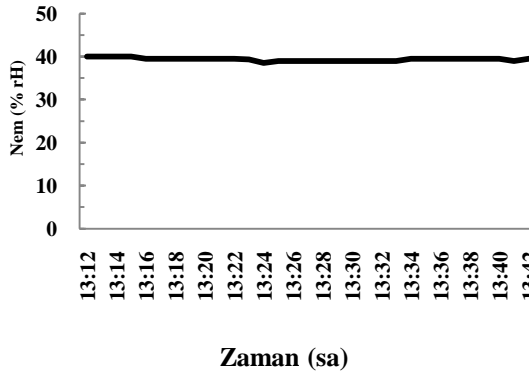
(a)



(b)



(c)

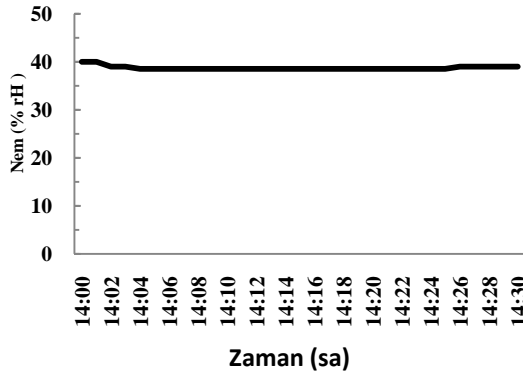
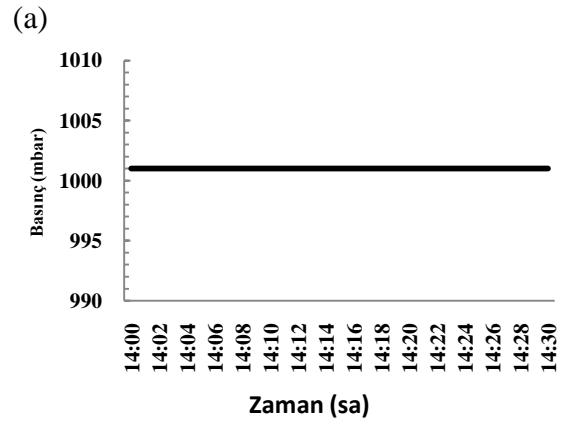
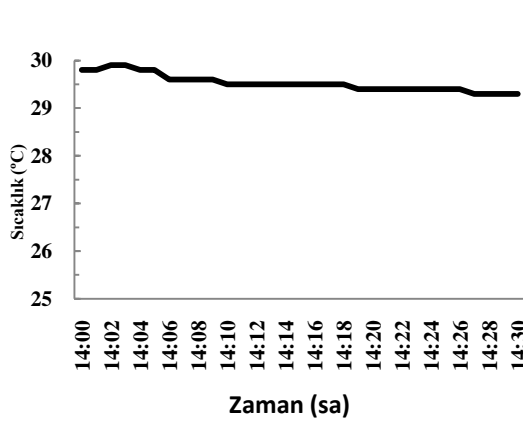
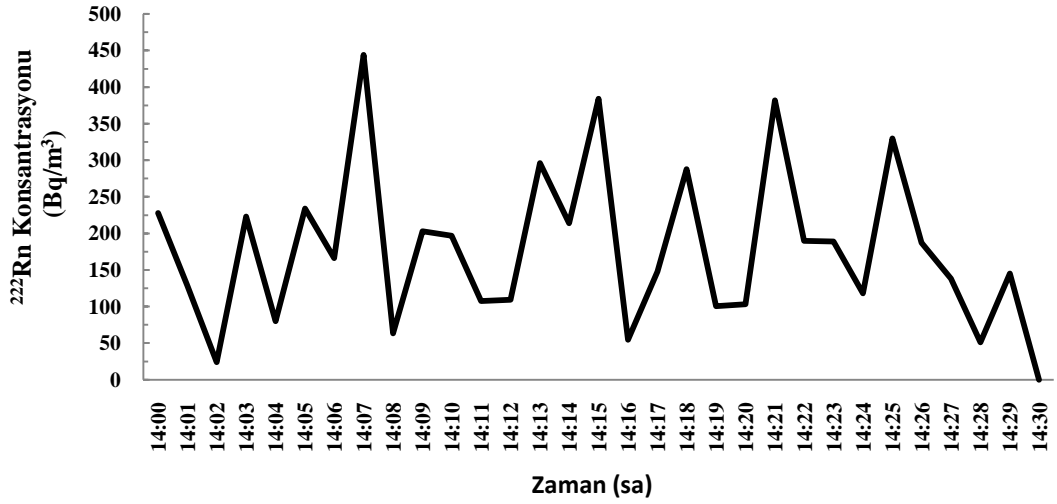


(d)

Parametre	Ortalama
Doğal fon (C <sub>0</sub> ) (Bq/m <sup>3</sup> )	15,34
<sup>222</sup> Rn (Bq/m <sup>3</sup> )	204,92
Sıcaklık (°C)	29,7
Basınç (mbar)	1001
Bağıl Nem (%rH)	39,3

(e)

**Şekil 5.13.** Kaynak suyunun 2 nolu numunesine ait ölçümlerin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri

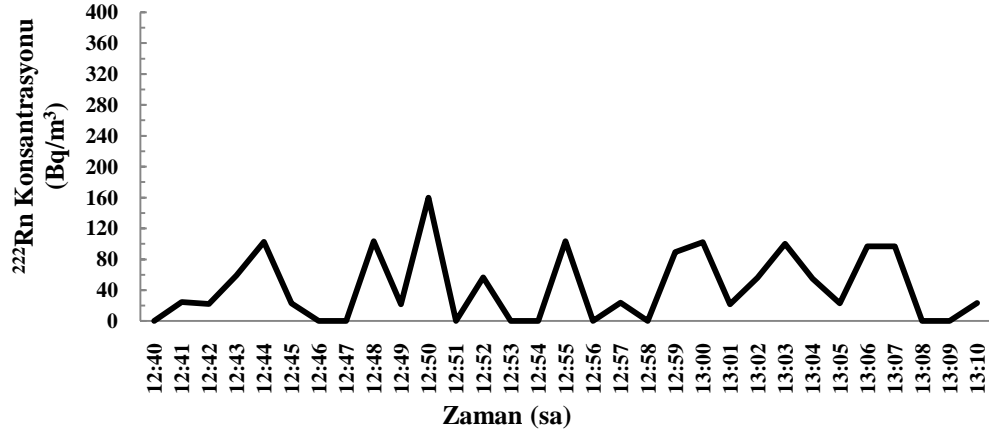


Parametre	Ortalama
Doğal fon ( $C_0$ ) (Bq/m <sup>3</sup> )	20,86
<sup>222</sup> Rn (Bq/m <sup>3</sup> )	184,21
Sıcaklık (°C)	29,5
Basınç (mbar)	1001
Bağıl Nem (%rH)	38,6

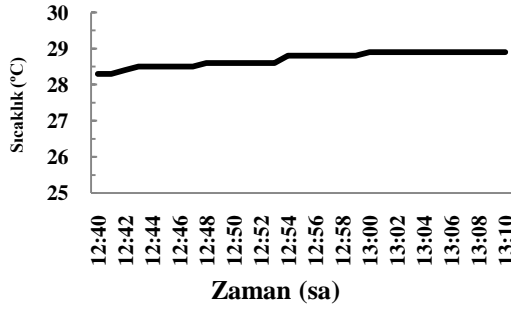
(d)

(e)

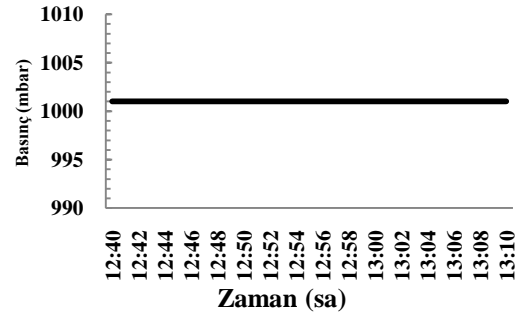
**Şekil 5.14.** Kaynak suyunun 3 nolu numunesine ait ölçümlerin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri



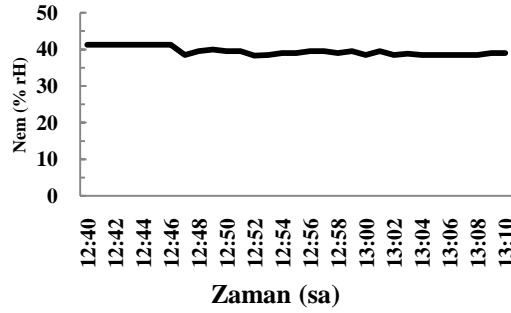
(a)



(b)



(c)

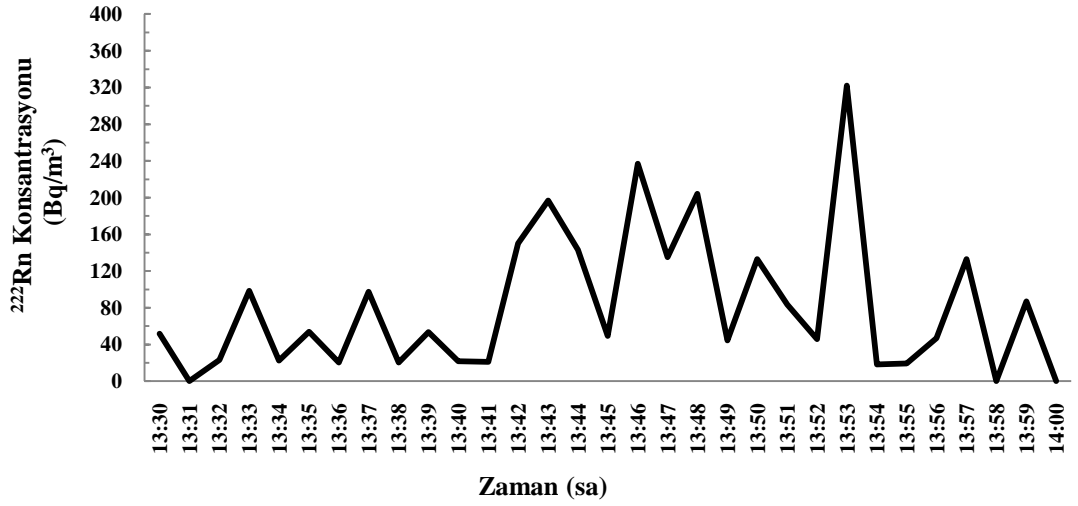


(d)

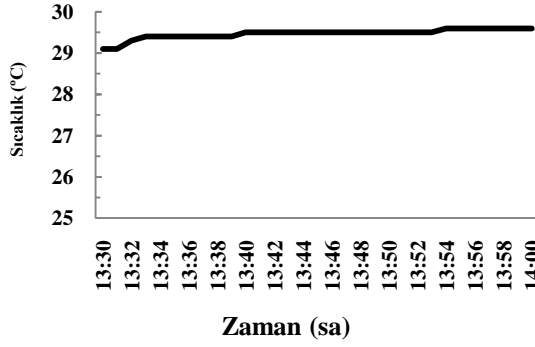
Parametre	Ortalama
Doğal fon ( $C_0$ ) (Bq/m <sup>3</sup> )	12,71
$^{222}\text{Rn}$ (Bq/m <sup>3</sup> )	42,62
Sıcaklık (°C)	28,7
Basınç (mbar)	1001
Bağıl Nem (%rH)	39,3

(e)

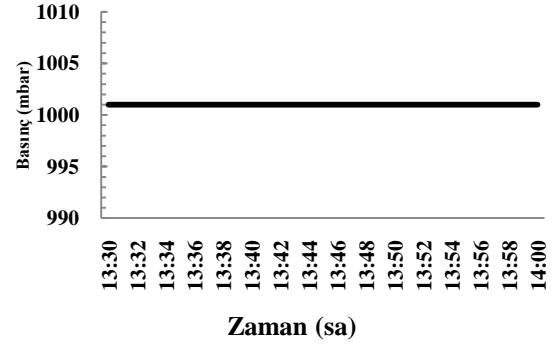
Şekil 5.15. Havuz suyunun 1 nolu numunesine ait ölçümlerin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri



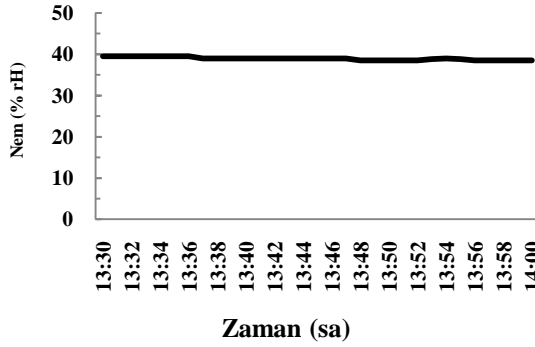
(a)



(b)



(c)

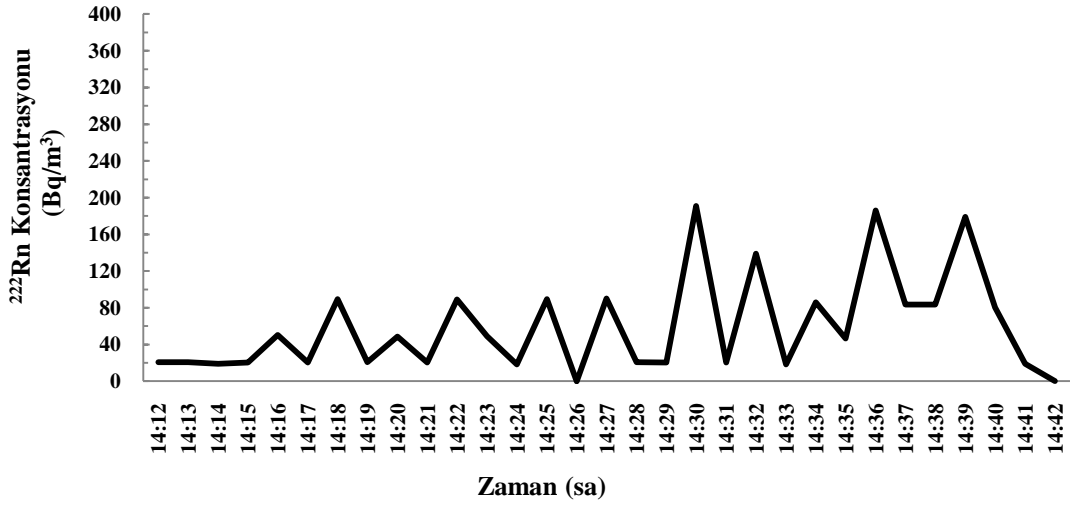


(d)

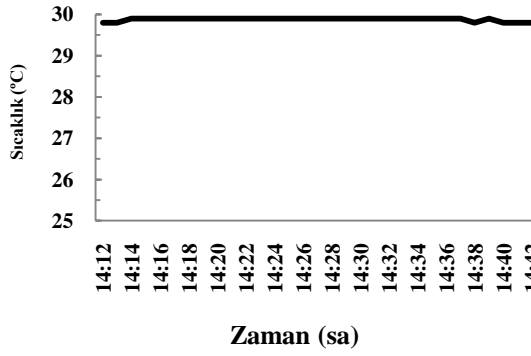
Parametre	Ortalama
Doğal fon ( $C_0$ ) (Bq/m <sup>3</sup> )	18,40
<sup>222</sup> Rn (Bq/m <sup>3</sup> )	81,71
Sıcaklık (°C)	29,5
Basınç (mbar)	1001
Bağıl Nem (%rH)	38,8

(e)

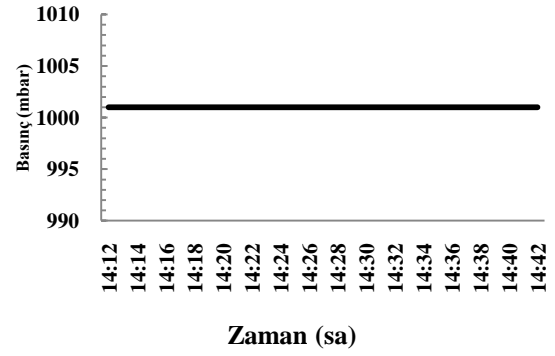
**Şekil 5.16.** Havuz suyunun 2 nolu numunesine ait ölçümlerin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri



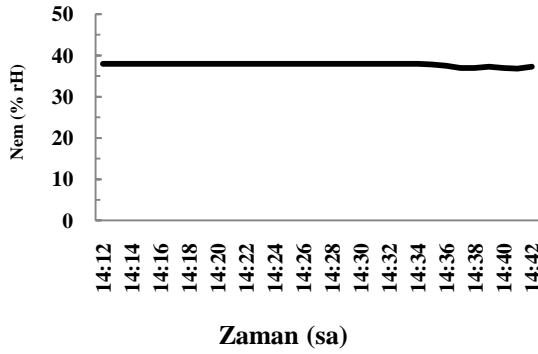
(a)



(b)



(c)



(d)

Parametre	Ortalama
Doğal fon ( $C_0$ ) (Bq/m <sup>3</sup> )	17,09
$^{222}\text{Rn}$ (Bq/m <sup>3</sup> )	61,35
Sıcaklık (°C)	29,8
Basınç (mbar)	1001
Bağıl Nem (%rH)	37,7

(e)

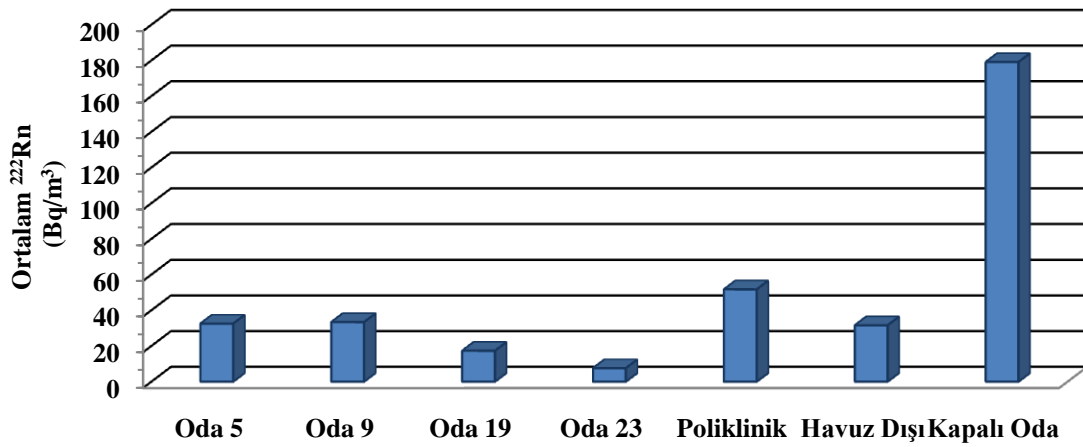
**Şekil 5.17.** Havuz suyunun 3 nolu numunesine ait ölçümlerin (a) Radon konsantrasyonu; (b) Sıcaklık; (c) Basınç; (d) Nem; (e) Ölçüm verilerinin ortalama değerleri

## 5.2. Kaplıca Merkezindeki Odaların Ortalama Radon Konsantrasyonları

Kükürtlü Kaplıcaları merkezinde, seçilmiş bazı odalar için AlphaGUARD cihazı ile belirlenen bir günlük ortalama  $^{222}\text{Rn}$  konsantrasyonları hatalarıyla ve diğer parametreleriyle birlikte Çizelge 5.1’de verilmektedir. 15.07.2009 tarihi ile 27.07.2009 tarihi arasında elde edilen ortalama radon konsantrasyon değerlerinin grafik üzerinde dağılımı ise Şekil 5.18’de ayrıca gösterilmektedir.

**Çizelge 5.1.** Kaplıcada ölçülen mekanlar için standart hatası ile beraber ortalama  $^{222}\text{Rn}$  konsantrasyonu ve ortalama sıcaklık, basınç ve nem değerleri

Mekan	Ort $^{222}\text{Rn}$ (Bq/m <sup>3</sup> )	Standart Hata (Bq/m <sup>3</sup> )	Ort Sıcaklık (°C)	Ort Basınç (mbar)	Ort Nem (%rH)
Oda 5	32,55	11,35	28,7	998	54,4
Oda 9	33,41	11,70	30,2	993	46,2
Oda 19	17,28	7,05	30,3	995	42,5
Oda 23	7,57	4,35	30,1	1000	39,2
Poliklinik	51,99	17,87	27,4	998	41,2
Havuz Dışı	31,58	11,14	31,4	995	35,5
Kapalı Oda	178,69	46,50	31,3	997	48,0



**Şekil 5.18.** Kaplıca merkezinde ölçülen mekanların ortalama radon konsantrasyon dağılımları



### 5.3. Kaplıca Merkezindeki Kullanılan Suyun Ortalama Radon Konsantrasyonları

Kaplıca merkezinde, tedavi amaçlı kullanılan termal su kaynağı ve havuz suyundaki radon konsantrasyonları da ayrıca belirlenmiştir. Alınan su numuneleri için gerçekleştirilen 30 dakikalık ölçümler sonucu elde edilen ve Şekil 5.12-Şekil 5.17’de verilen  $^{222}\text{Rn}$  konsantrasyonu ( $C_{\text{air}}$ ) ve doğal fon ( $C_0$ ) değerleri ile sıcaklığa bağlı olarak değişen k radon yayılma katsayısı, ölçüm düzeneğine ait dâhili hacim değeri ve su örneğine ait hacim değeri (4.1) 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 (4.2) denklemi kullanılarak hesaplanmıştır. Ölçüm sonuçlarına ait standart hata hesaplamasının yapılabilmesi için öncelikle standart sapma hesaplamaları (4.3) denklemi kullanılarak yapılmış ve sonra standart hatalar (4.4) 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 5.12-Şekil 5.17’den de görüldüğü gibi ihmal edilebilir değişimler gözlenmiştir.

Ölçümler ve hesaplamalar neticesinde elde edilen sonuçlar ayrı olarak Çizelge 5.2-Çizelge 5.3’te ve toplu olarak Çizelge 5.4’te verilmektedir.

**Çizelge 5.2.** Havuz suyu numuneleri için ölçülen ve hesaplanan değerler

Havuz suyu	Ort $^{222}\text{Rn}$ (Bq/m <sup>3</sup> )	Ort $^{222}\text{Rn}$ (Bq/L)	Ort Sıcaklık (°C)	Ort Basınç (mbar)	Ort Nem (%rH)
Numune 1	42,62	0,422	28,7	1001	39,3
Numune 2	81,71	0,816	29,5	1001	38,8
Numune 3	61,35	0,609	29,8	1001	37,7

**Çizelge 5.3.** Kaynak suyu numuneleri için ölçülen ve hesaplanan değerler

Kaynak suyu	Ort <sup>222</sup> Rn (Bq/m <sup>3</sup> )	Ort <sup>222</sup> Rn (Bq/L)	Ort Sıcaklık (°C)	Ort Basınç (mbar)	Ort Nem (%rH)
Numune 1	232,81	2,37	28,2	1001	42,8
Numune 2	204,92	1,98	29,7	1001	39,3
Numune 3	184,21	1,76	29,5	1001	38,6

**Çizelge 5.4.** Havuz ve kaynak suyu için ölçülen ve hesaplanan sonuçların ortalama değerleri

Su Örnekleri	Ort <sup>222</sup> Rn (Bq/m <sup>3</sup> )	Ort <sup>222</sup> Rn (Bq/L)	Ort Sıcaklık (°C)	Ort Basınç (mbar)	Ort Nem (%rH)
Havuz suyu	61,89 ± 11,29	0,616 ± 0,114	29,3	1001	38,6
Kaynak suyu	207,31 ± 14,08	2,04 ± 0,178	29,1	1001	40,2

#### 5.4. Yıllık Etkin Doz Eşdeğerleri

##### 5.4.1. Kaplıcada ölçülen mekanlar için yıllık etkin doz eşdeğerleri

Kükürtlü kaplıcasında yaz mevsiminde ölçülen sadece bir güne ait radon konsantrasyonu sonuçları belirlenmiştir. Bu değerlerden yararlanılarak yıllık etkin biyolojik doz eşdeğerinin yaklaşık olarak bulunması yoluna gidilmiştir. Radon ve bozunum ürünlerinin yıllık etkin biyolojik doz eşdeğerini hesaplamak için denge eşdeğer radon konsantrasyonu (Equilibrium Equivalent Concentration, EEC) değerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu değer, Denklem 5.1’de verilen F “denge faktörü” eşitliğinden yararlanılarak hesaplanabilir.

$$F=(EEC) / (\text{Ortalama Radon Konsantrasyonu}) \quad (5.1)$$

F değeri, UNSCEAR 2000 raporunda, ev içi ışınlanmalar için 0,4 olarak verilmektedir (UNSCEAR 2000). Denge eşdeğer konsantrasyonu, etkin doza çevirme katsayısı ise; 1 Bqsaat/m<sup>3</sup> (EEC) denge eşdeğer radon konsantrasyonununun solunması ile alınan etkin doz 9 nSv olarak belirlenmiştir. Binada zaman geçirme faktörü, zamanın % 42'si (günde 10 saat) kadar bina içinde en fazla süre geçiren kaplıca personeli düşünülerek 0,42 olarak alınmıştır. Bu durumda yıl içinde binada geçirilen süre 3 680 saat olmaktadır.

Ortalama radon konsantrasyon değerleri kullanılarak kaplıcada çalışan personel ve hastalar için radondan alınan toplam yıllık etkin doz eşdeğerleri (Y.E.D.E) Denklem 5.2'ye göre hesaplanmıştır.

$$Y.E.D.E = (EEC) \times (\text{Etkin Doza Çevirme Katsayısı}) \times (\text{Binada geçirilen süre}) \quad (5.2)$$

Çizelge 5.5'te kaplıca merkezinde ölçülen mekanlar için hesaplanan yıllık etkin doz eşdeğerleri verilmektedir.

**Çizelge 5.5.** Kaplıcada ölçülen mekanların ortalama radon konsantrasyonları için hesaplanan yıllık etkin doz eşdeğerleri

Mekan	Ort <sup>222</sup> Rn (Bq/m <sup>3</sup> )	Y.E.D.E (mSv/yıl)
Oda 5	32,55 ± 11,35	0,43 ± 0,15
Oda 9	33,41 ± 11,70	0,44 ± 0,16
Oda 19	17,28 ± 7,05	0,23 ± 0,09
Oda 23	7,57 ± 4,35	0,10 ± 0,06
Poliklinik	51,99 ± 17,87	0,69 ± 0,24
Havuz Dışı	31,58 ± 11,14	0,42 ± 0,15
Kapalı Oda	178,69 ± 46,50	2,38 ± 0,61

#### 5.4.2. Kaplıcada kullanılan su için yıllık etkin doz eşdeğerleri

Termal su ve havuz suyundaki ortalama radon konsantrasyonuna karşılık gelen doz eşdeğerleri için de denklem 5.1 ve 5.2 kullanılarak hesaplanmıştır. Fakat burada sudaki radon konsantrasyonunun  $1,0 \times 10^{-4}$  oranında havaya geçtiği varsayılan bir kabul göz önüne alınarak hesaplamalar yapılmaktadır (Xinwei 2006). Bu nedenle sular için, Çizelge 5.4'te verilen ortalama radon konsantrasyonları  $1,0 \times 10^{-4}$  değeriyle çarpılarak yıllık etkin doz eşdeğerleri bulunmuştur. Denklem 5.2'deki zaman faktörü için bir yıla denk gelen 8 760 saat değeri alınmıştır. Hesaplanan değerler Çizelge 5.6'da verilmektedir.

**Çizelge 5.6.** Kaplıcadaki termal su ve havuz suyu için yıllık etkin doz eşdeğerleri

<b>Su Örnekleri</b>	<b>Ort <sup>222</sup>Rn konsantrasyonu (Bq/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Y.E.D.E (mSv/yıl)</b>
<b>Havuz Suyu</b>	61,89 ± 11,29	0,0019 ± 0,0003
<b>Kaynak Suyu</b>	207,31 ± 14,08	0,0065 ± 0,0004

## 6. TARTIŞMA VE SONUÇ

Yapılan bu tez çalışması ile Bursa ilinin jeolojik bakımdan önemli olan Çekirge bölgesinde bulunan Uludağ Üniversitesi Atatürk Rehabilitasyon Uygulama ve Araştırma Merkezi Kükürtlü Kaplıcaları'nda radon konsantrasyon seviyeleri ve bunlara karşı gelen doz eşdeğerleri belirlenmiştir. Kaplıca merkezinde iç mekan hava ölçümleri 15 Temmuz 2009 ile 27 Temmuz 2009 tarihleri arasında yapılmıştır. Merkezde kullanılan termal suyun ve havuz suyunun analizleri Uludağ Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Nükleer Fizik laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada Atatürk Rehabilitasyon Merkezi Kükürtlü Kaplıcaları'nın 7 farklı noktasında belirlenen ortalama radon konsantrasyon değerleri  $7,57 \pm 4,35$  ile  $178,69 \pm 46,50$  Bq/m<sup>3</sup> arasında değişim göstermiştir. Elde edilen bu sonuçlara göre yıllık etkin doz eşdeğerleri de  $0,10 \pm 0,06$  ile  $2,38 \pm 0,61$  mSv/yıl aralığında bulunmuştur.

Evler için radon konsantrasyon limiti değerleri olarak, ICPR ve Avrupa Birliği tarafından 400 Bq/m<sup>3</sup>, Dünya Sağlık Örgütü tarafından 100 Bq/m<sup>3</sup> değeri üst sınır olarak benimsenmiştir. Türkiye'de ise bu değer 400 Bq/m<sup>3</sup> olarak belirlenmiştir. Bu durumda kaplıcadaki radon konsantrasyonları ICPR, AB ve TAEK tarafından müsaade edilen değerleri aşmamıştır. WHO'ya göre ise yalnız tek bir mekan (kapalı oda) sınır değerini aşmaktadır. Fakat burası kullanılmayan bir oda olduğundan risk değeri taşımamaktadır. Doz değerleri göz önüne alındığında ICRP'nin evler için önerdiği yıllık etkin doz değeri olan 3 mSv'lik sınır değer aşılmamıştır. Ancak araştırma dönemi havalandırmanın çok olduğu yaz mevsiminin seçilmesinin, ortalama radon konsantrasyon miktarının diğer mevsimlere göre daha düşük değerde çıkmasına yol açtığı düşünülmektedir.

Mekanları ayrı olarak değerlendirdiğimizde üst katlardaki odaların <sup>222</sup>Rn değerlerinin birbirine yakın olduğu, ancak Oda 23 (Çizelge 5.1)'ün daha düşük konsantrasyona sahip olduğu görülmüştür. Ölçüm süresince Oda 23'te tedavi gören bir hasta olmadığından, kapı ve pencereler devamlı açık tutulmuş bu da radon gazı miktarının düşük çıkmasına neden olmuştur. Kısacası farklılığın nedeninin havalandırma olduğu söylenebilir. Ayrıca odaların havalandırılması tamamen burada tedavi gören kişilere bağlı

olduğundan konsantrasyondaki dağılımların da buna bağlı olarak değiştiği sonucu çıkarılabilir.

Poliklinik odasındaki ölçümde, radon yoğunluğunun sürekli bir artıştan sonra ani azalmasının (Şekil 5.9) gözlenmesi grafiklerde görülen en önemli özelliklerden biridir. Sürekli artışın nedeni ölçüm yapılan odada bu zaman içerisinde havalandırılmamasıdır. Böylece içerde biriken radon gazı miktarı artmakta ve daha fazla sayıda bozunma gerçekleşmektedir. Azalmanın sebebi de bu saatlerde ortamın havalandırılmasıdır. Ayrıca termal su kaynağının hemen yanında ve zemin katta bulunan poliklinikteki değerler diğer odalara göre daha yüksek çıktığı da Şekil 5.18'de görülmektedir. Çünkü ilk katlar zeminden gelen radon gazıyla ilk temasın sağlandığı yerlerdir. Dolayısıyla yukarılara çıktıkça radon miktarı azalma göstermiştir. Havuz dışı olarak adlandırılan mekan da zemin katta bulunmasına karşın, burada çıkan değer polikliniğe göre daha düşüktür (Çizelge 5.5). Bu sonuç ortamın çok daha yüksek ve büyük bir alan olmasına bağlı olarak değerlendirilmiştir. Böylelikle birim hacim başına düşen radon gazı miktarını azalacak ve dedektörün daha küçük yoğunluklar kaydetmesine sebep olacaktır.

Yapılan ölçümlerde tez süresince gözlenen önemli bir nokta radon konsantrasyonlarının uzun süre kapalı kalmış veya havalandırılmayan mekanlar ile havalandırılması iyi olan mekanlar karşılaştırıldığında ortaya çıkmaktadır. Kapalı oda olarak adlandırılan mekân özellikle bu durumu gözlemek için ölçülmüş ve değerler diğer yerlere göre çok daha yüksek olduğu görülmüştür (Şekil 5.18). Kapalı ve iyi havalandırılmayan mekanlarda sürekli olarak gaz birikeceği için daha fazla radyoaktif bozunma olacaktır.

Havuz suyu ve kaynak suyu için ortalama radon konsantrasyonu sırasıyla  $61,89 \pm 11,29$  Bq/m<sup>3</sup> ile  $207,31 \pm 14,08$  Bq/m<sup>3</sup> olarak ölçülmüştür. Değerlerin oldukça düşük çıkmasının sebeplerinden birinin, termal kaynak suyunun çıktığı noktada açıkta bekletiliyor olması ve bu suyun bir depoya gönderildikten daha sonra havuza gönderilmesi olduğu düşünülmektedir. Diğer bir neden ise su ölçüm metodundan kaynaklanabilir. Çünkü su numunelerinin ölçüm düzeneğine yerleştirilmeleri esnasında radon gazı kaçışları olabilmektedir.

Termal kaynak suyundan radonun solunması ile alınacak yıllık etkin doz  $0,0065 \pm 0,0004$  mSv/yıl, havuz suyu için ise  $0,0019 \pm 0,0003$  mSv/yıl olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçların UNSCEAR tarafından, radon ve ürünlerinin solunmasıyla alınacak ortalama yıllık etkin doz olan 1,15 mSv/yıl değerinin çok altında oldukları görülmektedir (Xinwei 2006).

Tez çalışmasında elde edilen veriler sonucunda, Uludağ Üniversitesi Atatürk Rehabilitasyon Merkezi Kükürtlü Kaplıcaları'ndaki hastalar ve çalışan personel için radon kaynaklı sağlık riski olmadığı söylenebilir. Ancak yapılan bu tez çalışması bir ön çalışma olup daha uzun bir döneme yayılarak ve bölgede yer alan diğer kaplıcalarda da bu ölçümler gerçekleştirilerek daha kapsamlı ve daha doğru veriler elde edilebilir. Böylece termal su kaynaklarının sağlık sebebiyle kullanıldığı bu tür merkezler için, radon kaynaklı radyasyon riski hakkında daha kapsamlı verilerle daha doğru sonuçlar ortaya konabilir.

## KAYNAKLAR

- Akar, Ü. 2010.** Bursa-Çekirge Bölgesi Termal Sularında Radon Konsantrasyonunun Tayini. *Yüksek Lisans Tezi*, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Akkurt, A. 2006.** Afyon Jeotermal Sularında Radon (Rn-222) Aktivitesi Tayini. *Yüksek Lisans Tezi*, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar.
- Akyıldırım, H. 2005.** Isparta İli'nde Radon Yoğunluğunun Ölçülmesi ve Haritalandırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Anonim, 1982.** Ionizing Radiation: Sources and Biological Effects. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR 1982 Report to the General Assembly, United Nations sales publication No E.82. IX.8, New York.
- Anonim, 1987.** Radon Reference Manual. United States Environmental Protection Agency, EPA/USEPA, EPA 520/1-87-20, Washington, D.C.
- Anonim, 1988.** Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR 1988 Report to the General Assembly, United Nations sales publication No E.88. IX.7, New York.
- Anonim, 1993.** Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 1993 Report to the General Assembly, United Nations sales publication No.E. 94.IX.2, New York.
- Anonim, 1996.** IAEA, Radiation Safety, IAEA Division of Public Information, 1996. International Atomic Energy Agency, 96-00725.
- Anonim, 2000.** Sources, Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with scientific annexes, New York.
- Anonim, 2000.** Radyasyon Güvenliği Yönetmeliği, Türkiye Atom Enerjisi Kurumu, TAEK, 24.03.2000, Sayı: 23999, Madde 37.
- Anonim, 2010.** Radon Decay Products. [http://www.ilradondetection.com/radon\\_health\\_effects.html](http://www.ilradondetection.com/radon_health_effects.html)-(19.10.2010).
- Anonim, 2010.** Uludağ Üniversitesi Atatürk Rehabilitasyon Merkezi Kükürtlü Kaplıcaları. <http://kukurtlu.uludag.edu.tr/tanitim.html>-(06.07.2010).
- Anonim, 2010.** Türkiye Maden Suları ve Kaplıcalarının Etüt ve Analiz Sonuçları. [www.mta.gov.tr/mta\\_web/kutuphane/mtadergi/36\\_9.pdf](http://www.mta.gov.tr/mta_web/kutuphane/mtadergi/36_9.pdf)-(12.08.2010).
- Anonim, 2010.** Nuclear Structure & Data. <http://www.nndc.bnl.gov/nudat2/>-(23.09.2010).



- Arya, A.P. 1989.** Çekirdek Fiziğinin Esasları. Aktif Yayıncılık, Erzurum, 407 s.
- Ayotte, P. 1998.** Indoor Exposure to 222Rn. A Public Health Perspective, *Health Physics*, 75(3): 297-302.
- Barış, C. 2006.** İzmir-Çesme Yeraltı-Termal Suları ve Çevresindeki Topraklarda Radyoaktivite Arastirmaları. *Yüksek Lisans Tezi*, Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.
- Cember, H. 1996.** Introduction to Health Physics. McGraw Hill, USA, 733 pp.
- Çelebi, N. 1995.** Çevresel Örneklerde Uranyum, Radyum ve Radon Ölçüm Tekniklerinin Geliştirilmesi. *Doktora Tezi*, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Çile, S. 2004.** Soma ve Tavşanlı Yer Altı Linyit Maden Ocaklarında Radon Gazı Konsantrasyon Seviyelerinin Belirlenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü., Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- Davutoğlu, H. 2008.** Radon Gazını Ölçme Metotları. *Yüksek Lisans Tezi*, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.
- Değerlier, M. 2007.** Adana İli Ve Çevresinin Çevresel Doğal Radyoaktivitesinin Saptanması Ve Doğal Radyasyonların Yıllık Etkin Doz Eşdeğerinin Bulunması. *Doktora Tezi*, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Durrani, S.A., Ilic, R., 1997.** Radon Measurements by Etched Track Detectors. Applications in Radiation Protection, Earth Sciences, and The Environment. World Scientific Publ. Co., Ltd., London, 416 pp.
- Eisenbud, M. 1987.** Environmental Radioactivity : from natural, industrial, and military sources. Academic Press, San Diego, 475 pp.
- Erer, S. 2004.** Bursa Kükürtlü Kaplıcalarının Tarihsel Gelisimi ve Türk Tıp Tarihi Açısından Önemi. *Türkiye Klinikleri Tıp Etiği-Hukuku-Tarihi Dergisi* 12(2): 189-195.
- Evans, R.D. 1968.** Engineers' Guide to the Elementary Behavior of Radon Daughters. *Health Physics* 38: 1173–1197.
- Evans, R.D. 1969.** Engineers' Guide to the Elementary Behavior of Radon Daughters. *Health Physics*. 17(2): 229-252.
- Fişne, A. 2002.** Yeraltı Madenlerinde Radon Gazı Konsantrasyon Seviyelerinin Belirlenmesi ve İşçi Sağlığı Üzerine Etkilerinin Araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

**Garcia-Leon, M. ve Madurga, G. (Editor). 1988.** Low-Level Measurements and Their Application to Environmental Radioactivity: Proceedings. World Scientific Pub. Co., 577 pp.

**Gollnick, D. A. 1988.** Basic Radiation Protection Technology, Pacific Radiation Corporation, California, 636 pp.

**Görür, Ş. 2006.** Çevresel Radyoaktivite ile Bu Çevrede Yasayanlara Ait Diş Örneklerindeki Radyoaktivite Arasındaki İlişkinin Araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.

**Güler, Ç., Çobanoğlu, Z. 1997.** Radon Kirliliği. T. C. Sağlık Bakanlığı, Sağlık Projesi Genel Koordinatörlüğü, Çevre Sağlığı Temel Kaynak Dizisi No:44, Ankara.

**Güloğlu, A. 2007.** Çeşme Bölgesi Aktif Fay Hatlarındaki Kaplıçalarda Radon Anomalileri ile Sismik Aktiviteler Arasındaki İlişkilerin İncelenmesi. *Yüsel Lisans Tezi*, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

**Harley, N. H., Harley, J. H. 1990.** Potential Lung Cancer Risk From Indoor Radon Exposure. *CA: A Cancer Journal for Clinician*, 40(5): 265-275.

**Horvahth, A., Bohus, L.O., Urbani, F., Marx, G., Pirohth, A., Greaves, E.D. 2000.** Radon Concentrations in Hot Spring Waters in Northern Venezuela. *Environmental Radioactivity*, 47(2): 127-133.

**Igarashi, G., Saek, N., Takahata, K. 1995.** Ground-Water Radon Anomaly Before the Kobe Earthquake in Japan. *Science*, 269(5220): 60-61.

**Kam, E. 2004.** Tekirdağ'ın Çevresel Doğal Radyoaktivitesinin Tayini. *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

**Kapdan, E. 2009.** Adapazarı Merkezi Kış Dönemi Radon Ölçüm ve Analizleri. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, İstanbul.

**Kozłowska, B., Walencik, A., Dorda, J., Zipper, W. 2010.** Radon in Groundwater and Dose Estimation for Inhabitants in Spas of The Sudety Mountain Area, Poland. *Applied Radiation and Isotopes*, 68(4-5): 854-857.

**Köksal, M.E., Çelebi, N., Özçınar, B. 1993.** Indoor Rn-222 Concentrations in Istanbul Houses, *Health Physics*, 65(1): 87-88

**Kumbur, H., Zeren, O., Köksal, M., Özçınar, B. 1997.** İçel'de Evlerde Radon Düzeylerinin Araştırılması, *Ekoloji Çevre Dergisi*, 7(25): 25-31.

**Küçüktaş, E. 1996.** Maden Ocaklarındaki Radyonüklid Konsantrasyonlarının Birikimi Etkileyen Parametrelere Bağlı Olarak Ölçülmesi, Maruz Kalınan Dozların Analitik Bir Yöntem Geliştirilerek Hesaplanması. *Doktora Tezi*, Ege Üniversitesi, Nükleer Enerji Enstitüsü, İzmir.

**Murray, R. L. 2001.** Nuclear Energy: An Introduction to the Concepts, Systems, and Applications of Nuclear Processes. Butterworth-Heinemann, USA, 490 pp.

**Nikolopoulos, D., Vogianis, E., Petraki, E., Zisos, A., Louizi, A. 2010.** Investigation of The Exposure to Radon and Progeny in The Thermal Spas of Loutraki (Attica-Greece): Results From Measurements and Modelling. *Science of The Total Environment* 408(3): 495-504.

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

**Planiniç, J.F., Vucoviç, D., B. Faj, Z. Radoliç, V., B. Suveljak. 2002.** Radon Exposure and Lung Cancer. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 256(2): 349-352.

**Press, F. 1975.** Earthquake Prediction. *Scientific American*, 232(5): 14-23.

**Radolic, V., Vukovic, B., Smit, G., Stanic, D., Planinic, J. 2005.** Radon in The Spas of Croatia. *Journal of Environmental Radioactivity*, 83(2): 191-198.

**Ródenas, C., Gómez, J., Soto, J., Maraver, F. 2008.** Natural Radioactivity of Spring Water Used as Spas in Spain. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 277(3): 625-630.

**Somlai, J., Torma, Á., Dombóvári, P., Kávási, N., Nagy, K., Kovács, T. 2007.** Contribution of  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{234}\text{U}$  and  $^{238}\text{U}$  Radionuclides to The Occupational and Patient Exposure in Heviz-Spas in Hungary. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 272(1): 101-106.

**Song, G., Zhang, B., Wang, X., Gong, J., Chan, D., Bernett, J., Lee, S.C. 2005.** Indoor Radon Levels In Selected Hot Spring Hotels in Guangdong, China. *Science of The Total Environment*, 339(2005): 63-70.

**Soto J., Fernandez, P.L., Quindos, L.S., Gomez-arozamena, J. 1995.** Radioactivity in Spanish Spas. *Science of The Total Environment*, 162(2-3):187-192.

**Taşkın, H. 2006.** İnsan Sağlığı ve Çevre Kirliliği Açısından Kırklareli İlinin Fon Radyasyonunun Belirlenmesi ve Haritalandırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, Marmara Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

**Thomas, D.C., Mcneill, K.G., Dougherty, C. 1985.** Estimates of Life-Time Lung Cancer Risks Resulting from Rn Progeny Exposure. *Health Physics*, 45(5): 825-846.

**Turhan, A. 2008.** Borlamanın Paslanmaz Çeliğin Radyasyon Zırlama Özelliğine Etkisinin Araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.

**Turner, J. E. 1995.** Atoms, Radiation, and Radiation Protection. John Wiley & Sons, Inc., New York, USA, 555 pp.

**Valkovic, V. 2000.** Radioactivity in the Environment. Elsevier Science, New York, USA, 696 pp.

**Vaupotic, J., Kobal, I. 2006.** Radon Survey and Exposure Assessment in Hospitals. *Radiation Protection Dosimetry*, 121(2): 158-167.

**Vogiannis, E., Nikolopoulos, D., Louizi B A., Halvadakis. C.P. 2004.** Radon Variations During Treatment in Thermal Spas of Lesvos Island (Greece). *Journal of Environmental Radioactivity*, 75(2004): 159-170.

**Xinwei, L. 2006.** Analysis of Radon Concentration in Drinking Water in Baoji (China) and the Associated Health Effects. *Radiation Protection Dosimetry*, 121(4): 452-455.

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Nilüfer KILIÇ  
Doğum Tarihi : 06 / 05 / 1981  
Doğum Yeri : Kırcaali / BULGARİSTAN  
Medeni Hali : Bekar  
Uyruğu : T.C.  
e-posta : nifame4@gmail.com

### Eğitim Bilgileri

Lise : Osmangazi Lisesi – Bursa  
Fen Bilimleri – 25/06/1999 – Mezuniyet

Üniversite : Uludağ Üniversitesi – Bursa  
Fizik – 21/01/2008 – Mezuniyet

Yüksek Lisans : Uludağ Üniversitesi – Bursa  
Nükleer Fizik – 05/09/2008 – 23/02/2011