

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ  
NÜKLEER BİLİMLER ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**BİNALARDA RADON GAZI KONSANTRASYONUNUN ÖLÇÜMÜ**

**Burcu Tuğba GÜL**

**MEDİKAL FİZİK ANABİLİM DALI**

**ANKARA  
2019**

**Her hakkı saklıdır**

## TEZ ONAYI

Prof. Dr. Ayşe KAŞKAŞ danışmanlığında, Burcu Tuğba GÜL tarafından hazırlanan “Binalarda Radon Gazı Konsantrasyonunun Ölçümü” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü Medikal Fizik Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman: *Prof. Dr. Ayşe KAŞKAŞ*

Jüri Üyeleri:

*Prof. Dr. Ayşe KAŞKAŞ*

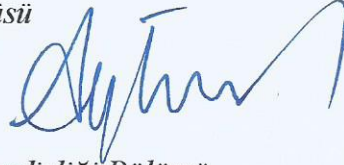
*Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü*

*Prof. Dr. Haluk YÜCEL*

*Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü*

*Prof. Dr. Aytunç ATEŞ*

*Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Malzeme Mühendisliği Bölümü*



**Yukarıdaki sonucu onaylarım.**



**Prof. Dr. Niyazi MERİÇ**

**Enstitü Müdürü**

Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik davranış ilkelerine uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu beyan ederim. Ayrıca, bu kurallar ve davranışların gerektirdiği şekilde, başka kaynaklardan aldığım tüm materyalleri ve sonuçları alıntı yaparak, bunları kaynak gösterdiğimi beyan ederim.

07/08/2019



Burcu Tuğba GÜL

## ÖZET

### Yüksek Lisans Tezi

## BİNALARDA RADON GAZI KONSANTRASYONUNUN ÖLÇÜMÜ

### BURCU TUĞBA GÜL

#### Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü

#### Medikal Fizik Anabilim Dalı

#### Sağlık Fiziği Yüksek Lisans Programı

#### Danışman: Prof. Dr. Ayşe KAŞKAŞ

Dünya üzerinde doğal radyasyon kaynakları nedeniyle alınan toplam radyasyon dozu 2,4 mSv/yıl civarında olup (UNSCEAR 2000 Raporu), bu değerin yaklaşık %48'si radon gazı kaynaklıdır. Bu nedenle ev ve işyerlerinde radon gazı konsantrasyonlarının ölçülmesi ve gerekli önlemlerin alınması önem taşımaktadır. Ülkemizde ev ve işyerlerinde radon gazı konsantrasyonu için limit değerler Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK) tarafından belirlenmektedir. Bu değerler Radyasyon Güvenliği Yönetmeliği'nde belirtildiği üzere evler için 400 Bq/m<sup>3</sup>, işyerleri için 1000 Bq/m<sup>3</sup>'tür. Bu çalışmada Ankara Üniversitesi 10.Yıl Yerleşkesi içerisinde bazı ofis ve laboratuvarlarda aktif bir cihaz olan dijital radon dedektörü ile 7-15 gün arasında kısa süreli ölçümler alınarak ortalama radon gazı konsantrasyonları belirlenmiştir. Ölçüm alınan ofis ve laboratuvarlarda en düşük konsantrasyon ortalama 14 ± 6 Bq/m<sup>3</sup>, en yüksek konsantrasyon ise ortalama 81 ± 12 Bq/m<sup>3</sup> olarak ölçülmüştür. Elde edilen sonuçların limit değerlerin altında olduğu görülmüştür. Radon gazı nedeniyle bina içerisinde alınan tahmini yıllık ortalama etkin doz eşdeğeri de UNSCEAR raporlarına göre hesaplanmıştır. Ayrıca çalışma kapsamında yerleşke içerisindeki toprak ve yapı malzemesi olarak kullanılan taş numunelerde HPGe dedektörleri ile gözlenen radyonüklitler için aktivite hesabı yapılmıştır.

**2019, 59 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Radon, doğal radyoaktif seriler, uranyum, radyum, radon konsantrasyonu, yıllık etkin doz eşdeğeri

## ABSTRACT

Master Thesis

### MEASUREMENTS OF RADON GAS CONCENTRATIONS IN BUILDINGS

Burcu Tuğba GÜL

Ankara University

Institute of Nuclear Sciences

Department of Medical Physics

Supervisor: Prof. Dr. Ayşe KAŞKAŞ

The world average annual dose from natural radiation sources is around 2,4 mSv/year (UNSCEAR 2000 Report) and approximately 48% of this value arises from radon gas. For this reason, it is important to measure radon gas concentrations in homes and workplaces. The maximum permissible limits of radon concentration in the indoor air recommended by Turkish Atomic Energy Authority are 400 Bq/m<sup>3</sup> for houses and 1000 Bq/m<sup>3</sup> for workplaces. In this thesis, the digital radon monitor, which is an active detector, was used for short-term measurements between 7 and 15 days in some offices and laboratories at Ankara University 10th Year Campus. In offices and laboratories, the lowest radon concentration was average  $14 \pm 6$  Bq/m<sup>3</sup> and the highest concentration was average  $81 \pm 12$  Bq/m<sup>3</sup>. The results are below the permissible limit values. The estimated annual effective dose equivalent from radon gas was calculated by using UNSCEAR reports. Additionally natural radioactivity levels in soil and building material samples collecting from Ankara University 10th Year Campus was measured by HPGe detectors.

**2019, 59 pages**

**Key Words:** Radon, natural radioactive series, uranium, radium, radon concentration, annual effective dose equivalent

## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının gerçekleşmesi için çalışmanın en başından sonuna kadar tüm olanakları sağlayan, değerli bilgilerini benimle paylaşan, beni yönlendiren, sabrı ve güler yüzü ile yüksek lisans eğitimim boyunca ilgisini esirgemeyen ve her koşulda bana zaman ayıran değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Ayşe KAŞKAŞ'a;

Çalışmam süresince laboratuvar çalışmalarımnda yardımlarını esirgemeyen, bilgi birikimini aktaran Sayın Prof. Dr. Haluk YÜCEL'e;

Tez çalışmasının yönlendirilmesinde katkıları olan ve numunelerin toplanmasından hazırlanması sürecinde bizzat ilgilenen Sayın Doç. Dr. Eren ŞAHİNER'e;

Laboratuvar çalışmaları süresince desteğinden ve yardımlarından dolayı Sayın Arş. Gör. Dr. Gizem AKKAYA'ya;

Laboratuvarda çalışan ve yardımlarını esirgemeyen tüm arkadaşlarıma;

Tüm hayatım boyunca her zaman yanımda olan ve beni her zaman destekleyen aileme

Sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Burcu Tuğba GÜL

Ankara, 2019

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR .....	iii
SİMGELER DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	3
2.1 Radon Gazı .....	4
2.2 Radon Gazı Kaynakları.....	8
2.3 Radon Gazı İçin Belirlenmiş Limit Değerler.....	13
2.4 Binalarda Radon Gazı Girişini Önleme ve Konsantrasyonunu Azaltma Yöntemleri .....	13
2.5 Binalarda Bulunan Radon Gazının İnsan Sağlığı Üzerindeki Etkileri.....	15
2.6 Radon Gazı Ölçüm Yöntemleri.....	16
2.6.1 Aktif kömür ile ölçüm.....	17
2.6.2 Alfa iz dedektörleri .....	17
2.6.3 Elektret iyon odaları .....	18
2.6.4 Sürekli ölçüm monitörleri .....	18
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	20
3.1 Radon Gazı Ölçümü.....	20
3.1.1 Ölçüm cihazının özellikleri.....	20
3.1.2 Ölçüm verilerinin elde edilmesi .....	21
3.2 Gama Spektrometresi ile Aktivite Ölçümü.....	23
3.2.1 Gama spektrometresi.....	23
3.2.2 Toprak ve yapı malzemelerinin analiz için hazırlanması .....	25
3.2.3 Aktivite analizi için kullanılan gama enerjileri .....	28

<b>3.2.4 Aktivite ölçümü .....</b>	<b>30</b>
<b>3.2.4.1 Aktivite ölçümlerinde kullanılan belirsizlik hesaplamaları .....</b>	<b>31</b>
<b>3.2.5 Enerji kalibrasyonu .....</b>	<b>32</b>
<b>3.2.6 Aktivite konsantrasyonları kullanılarak hesaplanabilen nicelikler .....</b>	<b>33</b>
<b>4. BULGULAR .....</b>	<b>35</b>
<b>4.1 Binalarda Ölçülen Radon Gazı Konsantrasyonları .....</b>	<b>35</b>
<b>4.2 Gama Spektrometresi ile Elde Edilen Aktivite .....</b>	<b>41</b>
<b>5. SONUÇ ve TARTIŞMA .....</b>	<b>52</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>56</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>59</b>



## SİMGELER DİZİNİ

<b>ADC</b>	<b>Analog-sayısal dönüştürücü</b>
<b><math>A_{Ra}</math></b>	<b>Radyum aktivite konsantrasyonu</b>
<b><math>A_{Th}</math></b>	<b>Toryum aktivite konsantrasyonu</b>
<b><math>A_K</math></b>	<b>Potasyum aktivite konsantrasyonu</b>
<b><math>A_x, A_s</math></b>	<b>Numune ve standart aktivitesi</b>
<b><math>N_p^x, N_p^s</math></b>	<b>Numune ve standart için net sayım</b>
<b>D</b>	<b>Soğurulan gama doz hızı</b>
<b>EEC</b>	<b>Equilibrium Equivalent Concentration (Denge Eşdeğer Konsantrasyonu)</b>
<b>F</b>	<b>Denge Faktörü</b>
<b>HPGe</b>	<b>Yüksek Saflıkta Germanyum (High Purity Germanium Detector)</b>
<b>ICRP</b>	<b>International Commission on Radiological Protection</b>
<b><math>m_x, m_s</math></b>	<b>Numune ve standart ağırlığı</b>
<b>NCRP</b>	<b>National Council on Radiation Protection and Measurements</b>
<b><math>Ra_{eq}</math></b>	<b>Radyum eşdeğer aktivitesi</b>
<b>TAEK</b>	<b>Türkiye Atom Enerjisi Kurumu</b>
<b>UNSCEAR</b>	<b>United Nation Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation</b>
<b><math>u(A_s)</math></b>	<b>Standart aktivitesindeki belirsizlik</b>
<b><math>u(A_x)</math></b>	<b>Numunenin aktivitesindeki belirsizlik</b>
<b><math>u(m_x), u(m_s)</math></b>	<b>Numune ve standart miktarındaki belirsizlik</b>
<b><math>u(N_p^x), u(N_p^s)</math></b>	<b>Numune ve standardın net sayımındaki belirsizlik</b>
<b>YEDE</b>	<b>Yıllık etkin doz eşdeğeri</b>
<b>WHO</b>	<b>World Health Organization (Dünya Sağlık Örgütü)</b>

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 $^{226}\text{Ra}$ 'nın $^{222}\text{Rn}$ 'ye bozunum şeması .....	7
Şekil 2.2 Çeşitli yapı malzemelerinin $^{226}\text{Ra}$ aktivite konsantrasyonlarının tavsiye edilen sınır değer ile karşılaştırılması.....	11
Şekil 2.3 Radon gazının bina içerisindeki giriş yolları .....	14
Şekil 2.4 Elektret iyon odası .....	18
Şekil 3.1 Radon gazı ölçüm cihazı.....	20
Şekil 3.2 Ankara Üniversitesi 10.Yıl Yerleşkesi.....	22
Şekil 3.3 CRA yazılımından elde edilen grafik .....	23
Şekil 3.4 Yüksek saflıkta germanyum (HPGe) dedektörünün çalışma düzeneği .....	24
Şekil 3.5 Toprak numunelerinin alındığı bölgeler.....	26
Şekil 3.6 Numunelerin toplanması a) B Blok b) Nükleer Bilimler Enstitüsü bahçesi ....	26
Şekil.3.7 Numunelerin hazırlanma süreci a) Çeneli kırıcı b) Çeneli kırıcıdan elde edilen numuneler c) Elekten geçirilerek kapalı kaplarda bekletilen numuneler .....	27
Şekil 3.8 Toprak numunede gözlenebilen gama enerjileri .....	29
Şekil 4.1 Farklı mevsimlerde tüm ofis ve laboratuvarlarda ölçülen radon gazı konsantrasyonları.....	38
Şekil 4.2 Farklı mevsimlerde aynı ofis ve laboratuvarlarda ölçülen radon gazı konsantrasyonları .....	38
Şekil 4.3 Solunum yolu ile alınan, radondan kaynaklanan tahmini yıllık etkin doz eşdeğerleri.....	41
Şekil 4.4 IODS1 toprak numunesindeki $^{226}\text{Ra}$ aktivite konsantrasyonu .....	44
Şekil 4.5 IODS1 toprak numunesindeki $^{232}\text{Th}$ aktivite konsantrasyonu .....	44
Şekil 4.6 NKD1 toprak numunesindeki $^{226}\text{Ra}$ aktivite konsantrasyonu.....	45
Şekil 4.7 NKD1 toprak numunesindeki $^{232}\text{Th}$ aktivite konsantrasyonu.....	45
Şekil 4.8 Ankara taşı numunesindeki $^{226}\text{Ra}$ aktivite konsantrasyonu .....	45
Şekil 4.9 Ankara taşı numunesindeki $^{232}\text{Th}$ aktivite konsantrasyonu .....	46
Şekil 4.10 CT1 taş numunesindeki $^{226}\text{Ra}$ aktivite konsantrasyonu .....	46
Şekil 4.11 CT1 taş numunesindeki $^{232}\text{Th}$ aktivite konsantrasyonu .....	46
Şekil 4.12 CT2 taş numunesindeki $^{226}\text{Ra}$ aktivite konsantrasyonu .....	47
Şekil 4.13 CT2 taş numunesindeki $^{232}\text{Th}$ aktivite konsantrasyonu .....	47
Şekil 5.1 Türkiye radon haritası .....	53

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 Dünya genelinde doğal radyasyon kaynakları nedeniyle alınan ortalama yıllık radyasyon dozları (UNSCEAR 2000 Raporu) .....	3
Çizelge 2.2 <sup>222</sup> Rn'nin özellikleri .....	5
Çizelge 2.3 Uranyum serisi .....	5
Çizelge 2.4 Toryum serisi .....	6
Çizelge 2.5 Aktinyum serisi .....	6
Çizelge 2.6 <sup>222</sup> Rn ve bozunum ürünlerinin yarı ömür ve enerjileri (ICRP 65 Raporu) ...	8
Çizelge 2.7 <sup>238</sup> U ve <sup>232</sup> Th'nin bazı materyallerdeki miktarları .....	9
Çizelge 2.8 Yapı malzemelerindeki <sup>226</sup> Ra konsantrasyonları.....	10
Çizelge 2.9 Radon konsantrasyonu limit değerleri .....	13
Çizelge 2.10 Radon gazı ölçüm yöntemleri .....	16
Çizelge 3.1 Radon gazı ölçüm cihazının genel özellikleri.....	21
Çizelge 3.2 Yüksek saflıkta germanyum (HPGe) dedektörün özellikleri.....	25
Çizelge 3.3 Hazırlanan numunelerin sınıflandırılması.....	27
Çizelge 3.4 Bazı radyonüklitlerin gama enerjileri ve yayınlanma olasılıkları.....	29
Çizelge 3.5 Kullanılan Standart Kaynaklar.....	32
Çizelge 3.6 Enerji kalibrasyonunda kullanılan standart kaynaklar .....	32
Çizelge 4.1 15 günlük ölçümler sonucunda elde edilen radon gazı konsantrasyonları ..	37
Çizelge 4.2 Mevsimsel değişikliklerin gözlenebilmesi için farklı mevsimlerde aynı ofis ve laboratuvarlarda ölçülen radon konsantrasyonları .....	39
Çizelge 4.3 Yıllık etkin doz eşdeğerleri .....	40
Çizelge 4.4 IODS1 toprak numunesinde kullanılan gama enerjileri ve aktivite konsantrasyonları .....	41
Çizelge 4.5 NKD1 toprak numunesinde kullanılan gama enerjileri ve aktivite konsantrasyonları .....	42
Çizelge 4.6 Ankara taşı için kullanılan gama enerjileri ve aktivite konsantrasyonları ...	42
Çizelge 4.7 CT1 kaldırım taşı taşı için kullanılan gama enerjileri ve aktivite konsantrasyonları .....	43
Çizelge 4.8 CT2 kaldırım taşı taşı için kullanılan gama enerjileri ve aktivite konsantrasyonları .....	43

Çizelge 4.9 Silindirik geometride numunelerdeki aktivite konsantrasyonları.....	48
Çizelge 4.10 Radyum eşdeğer aktivitesi (Raeq), soğurulan gama doz hızı (D) ve yıllık etkin doz eşdeğeri (YEDE) .....	49
Çizelge 4.11 $^{238}\text{U}$ , $^{232}\text{Th}$ ve $^{40}\text{K}$ için dünya genelinde topraktaki ortalama konsantrasyonları (UNSCEAR 2000 Raporu) .....	50



## 1. GİRİŞ

Doğada dört radyoaktif seri bulunmaktadır.  $^{238}\text{U}$  ile başlayan uranyum serisi,  $^{235}\text{U}$  ile başlayan aktinyum serisi ve  $^{232}\text{Th}$  ile başlayan toryum serisi doğal radyoaktif serileridir. Neptünyum ise yapay olarak üretilen bir seridir. Serilerde bulunan radyoaktif element olan uranyum üç farklı izotoptan oluşur; %99,3  $^{238}\text{U}$ , %0,7  $^{235}\text{U}$  ve % 0,005  $^{234}\text{U}$  (Cember ve Johnson 2009). Uranyum doğada bol miktarda bulunmaktadır. Toprakta ortalama olarak 3 ppm oranında bulunur ve bu değer de yaklaşık olarak 74 mBq/g aktivite konsantrasyonuna karşı gelir (Cember ve Johnson 2009). Uranyum fosfor ile son derece kararlı bileşikler oluşturduğundan, fosforca zengin topraklarda ortalamanın üzerinde uranyum konsantrasyonu bulunur (Cember ve Johnson 2009). Toryum da doğada bol miktarda bulunan diğer bir radyoaktif elementtir. Doğal serilerde gaz halinde radon izotopları mevcut olup uranyum serisinde  $^{222}\text{Rn}$  (radon), toryum serisinde  $^{220}\text{Rn}$  (toron) ve aktinyum serisinde  $^{219}\text{Rn}$  (aktinon) bulunmaktadır. Atmosferdeki radon konsantrasyonu, coğrafik olarak değişmekle birlikte toprakta bulunan uranyum ve toryum oranına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.

Radon gazı, uranyum içeren toprak ve kayalardan  $^{226}\text{Ra}$  bozunumu sonucu atmosfere yayılmaktadır. Yağmur yağdığı zaman, havadaki parçacıklar toprağa karışacağından topraktan gelen doğal fon radyasyonu artabilir. Ancak kar yağdığı zaman kar toprağı örteceğinden çevresel radyasyon dozu azalır. Dolayısıyla radon gazı ölçümlerinde mevsimsel değişimlerin incelenmesi önemlidir.

Epidemiyolojik çalışmalar kapalı ortamlarda radon gazının akciğer kanserine neden olabileceğini göstermektedir (ICRP Rapor No 65). Bu nedenle insanların zamanlarının çoğunu kapalı ortamlarda geçirdiği göz önüne alındığında evlerde, işyerlerinde radon gazı konsantrasyonunu belirlemek önem taşımaktadır.

Tez çalışması kapsamında Ankara Üniversitesi 10.Yıl Yerleşkesi içerisindeki binalarda çeşitli ofis ve laboratuvarlarda dijital radon dedektörü kullanılarak radon gazı ölçümü yapılmıştır. Bu tür bir çalışma yerleşke içerisinde ilk kez gerçekleştirilmiştir. Ayrıca ölçüm yapılan binaların dışından toprak ve taş numuneler alınarak HPGe (High Purity

Germanium Detector) dedektörü yardımıyla numunelerin radyoaktivite konsantrasyonları belirlenmiştir.

Bu tez çalışmasının giriş bölümünde kısaca tezin önemi, ikinci bölümde radon gazı ile ilgili kuramsal temeller, üçüncü bölümde radon gazının ölçümünde kullanılan materyal ve yöntemden bahsedilmiştir. Ayrıca bu bölümde taş ve toprak numunelerinin içeriğindeki radyonüklitlerin aktivite konsantrasyonlarını belirlemek için kullanılan materyal ve yöntemden de bahsedilmektedir. Dördüncü bölümde elde edilen verilere, beşinci bölümde ise literatürle karşılaştırma yapılmış ve sonuçlara yer verilmiştir.



## 2. KURAMSAL TEMELLER

Bir insanın maruz kaldığı radyasyona iç ve dış etkenlerden gelen katkılar bulunmaktadır. Çevresel olarak hava, su, toprak ve yiyeceklerden, gün boyunca yaşanan ofis, ev, laboratuvar vb. kapalı ortamlardan ve kozmik radyasyondan kaynaklanan katkılar mevcuttur. Toprak ve kayalardan kaynaklanan (karasal) doğal radyasyon bölgesel ve mevsimsel olarak farklılıklar gösterir. Topraktan kaynaklanan radyasyon dozu yaklaşık 0,3 – 1,0 mSv/yıl aralığında olup ortalama olarak yıllık 0,48 mSv civarındadır (UNSCEAR 2017 Raporu). Karasal doğal radyasyon kaynaklarını oluşturan potasyum, uranyum, toryum ve bu elementlerin radyum ve radon gibi bozunum ürünleri maruz kalınan radyoaktif elementlerdir. Radon, tüm dünya yüzeyinde toprak, kayalar ve sulara bulunan uranyumun bozunumuyla doğal olarak oluşan radyoaktif bir gazdır. İnsanların bina içerisinde maruz kaldığı radyasyona en yüksek katkı radon konsantrasyonundan gelmektedir. Dünya genelinde doğal radyasyon kaynakları nedeniyle ortalama yıllık radyasyon dozları Çizelge 2.1’de verilmektedir.

Çizelge 2.1 Dünya genelinde doğal radyasyon kaynakları nedeniyle alınan ortalama yıllık radyasyon dozları (UNSCEAR 2000 Raporu)

Doğal radyasyon kaynakları	Yıllık etkin doz (mSv)	
	Ortalama	Değişim aralığı
Kozmik radyasyon	0,39	0,3 – 1,0 <sup>a</sup>
Karasal radyasyon	0,48	0,3 – 0,6 <sup>b</sup>
Solunum yolu ile		0,2 – 10 <sup>c</sup>
Uranyum ve toryum serileri	0,006	
<b>Radon (<sup>222</sup>Rn)</b>	<b>1,15</b>	
Toron ( <sup>220</sup> Rn)	0,10	
Toplam	1,26	
Beslenme yolu ile		0,2 – 0,8 <sup>d</sup>
Uranyum ve toryum serileri	0,12	
<sup>40</sup> K	0,17	
Toplam	0,29	
<b>Toplam</b>	<b>2,40</b>	<b>1 – 10</b>

<sup>a</sup> Deniz seviyesinden yüksekliğe bağlı, <sup>b</sup> Toprak ve yapı malzemelerinin bileşimine bağlı

<sup>c</sup> Kapalı alanda radon gazı birikimine bağlı, <sup>d</sup> Gıdaların ve içme sularının radyonüklit bileşimine bağlı

Bu bölümde radon gazı hakkında genel bilgiler verilerek, radon gazı kaynakları, radon gazını ölçme yöntemleri ve insan sağlığı üzerine etkileri tartışılacaktır.

## 2.1 Radon Gazı

1600'lerden önce Orta Avrupa madencileri arasında ortaya çıkan yüksek ölüm oranlarının nedeninin, 19.yy sonlarında akciğer kanserinin bir sonucu olduğu anlaşılmış ve 1924 yılında kanserlerin radon gazına maruz kalmaktan kaynaklanabileceği ileri sürülmüştür (ICRP Rapor No 65). Uranyum, toryum, radyum ve polonyumun keşfedilmesinin ardından radon, Alman bilim insanı Friedrich Ernest Dorn tarafından radyum tuzları ile çalışırken radyoaktif bir gaz gözlemlemesi sonucu 1900 yılında keşfedilen son soygaz olmuştur. Önceleri niton olarak adlandırılan radon, 1923 yılında International Committee on Chemical Elements tarafından radyum ile ilişkisini göstermek amacıyla radon olarak isimlendirilmiştir (Wilkening 1990). Radon gazı, normal koşullarda rengi, kokusu, tadı olmayan, dolayısıyla ölçülmediği sürece varlığı somut bir şekilde görülemeyen,  $9,73 \text{ kg/m}^3$  yoğunluğa sahip en ağır soy gazdır (Baskaran 2016).

Radon; periyodik cetvelin 86 atom numarası ile 8A grubunda yer alan, 36 radyoaktif izotopu bulunan ( $A=193 - 228$ ), düşük reaktiviteye sahip en ağır asal gazdır (Baskaran 2016). Radonun 36 izotopundan 4 tanesinin yarı ömrü 1 saatten fazladır. Asal gazlar kimyasal olarak soy gaz olmasına rağmen, bu gazların diğer türlerle olan etkileşimleri zayıftır.

$^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  ve  $^{232}\text{Th}$  serilerindeki üç radon izotopu doğada yaygın olarak bulunur, değişik toprak ve minarellerde farklı konsantrasyonlara sahiptir. Radon, toron ve aktinonun atmosferdeki oranları toprak ve kayalarındaki uranyum ve toryum miktarlarına bağlıdır.  $^{238}\text{U}$  serisinin ürünü olan  $^{222}\text{Rn}$  uzun yarı ömrü ile radonun en önemli izotopudur.  $^{222}\text{Rn}$ 'ye kıyasla daha kısa yarı ömre sahip  $^{219}\text{Rn}$  ve  $^{220}\text{Rn}$ 'nin yarı ömürleri topraktan atmosfere geçebilecek kadar uzun bir süreye sahip değildir ve bu nedenle atmosferdeki miktarları çok düşüktür. Bu çalışmada da  $^{222}\text{Rn}$ , radon gazı olarak adlandırılmaktadır. Çizelge 2.2'de  $^{222}\text{Rn}$ 'nin temel özellikleri verilmektedir.



Çizelge 2.2 <sup>222</sup>Rn'nin özellikleri (Baskaran 2016)

Özellik	
Atom numarası	86
Atomik ağırlık	222 akb
Yoğunluk	9,73 kg/m <sup>3</sup> (0 <sup>0</sup> C, 1,013x10 <sup>5</sup> Pa)
Erime noktası	202,0 <sup>0</sup> K = -71,15 <sup>0</sup> C
Kaynama noktası	208,2 <sup>0</sup> K = -64,95 <sup>0</sup> C
Dış kabuk elektron konfigürasyonu	6s <sup>2</sup> 6p <sup>2</sup>

Çizelge 2.3'te verilen ana çekirdeği <sup>238</sup>U olan uranyum serisinde 1600 ± 20 yıl yarı ömre sahip <sup>226</sup>Ra bozunumu sonucu 3,82 gün yarı ömürlü <sup>222</sup>Rn (radon) meydana gelmektedir.

Çizelge 2.3 Uranyum serisi (<https://www.nndc.bnl.gov/chart/>, 2019)

Nüklit	Sembol	Yarı ömür	Radyasyon Tipi
Uranyum-238	<sup>238</sup> U	4,468×10 <sup>9</sup> y	α
Toryum-234	<sup>234</sup> Th	24,10 gün	β <sup>-</sup>
Protaktinyum-234m	<sup>234m</sup> Pa	1,159 dak	β <sup>-</sup>
Uranyum-234	<sup>234</sup> U	2,455×10 <sup>5</sup> y	α
Toryum-230	<sup>230</sup> Th	7,538×10 <sup>4</sup> y	α
Radyum-226	<sup>226</sup> Ra	1600 y	α
<b>Radon-222</b>	<b><sup>222</sup>Rn</b>	<b>3,8235 gün</b>	<b>α</b>
Polonyum-218	<sup>218</sup> Po	3,098 dak	α
Kurşun-214	<sup>214</sup> Pb	27,06 dak	β <sup>-</sup>
Bizmut-214	<sup>214</sup> Bi	19,9 dak	β <sup>-</sup>
Polonyum-214	<sup>214</sup> Po	163,6 μs	α
Kurşun-210	<sup>210</sup> Pb	22,20 y	β <sup>-</sup>
Bizmut-210	<sup>210</sup> Bi	5,012 gün	β <sup>-</sup>
Polonyum-210	<sup>210</sup> Po	138,376 gün	α
Kurşun-206	<sup>206</sup> Pb	Kararlı	—

Ana çekirdeği  $^{232}\text{Th}$  olan toryum serisinde 3,63 gün yarı ömre sahip  $^{224}\text{Ra}$  bozunumu sonucu 55,6 s yarı ömürlü  $^{220}\text{Rn}$  (toron) oluşmaktadır (Çizelge 2.4).

Çizelge 2.4 Toryum Serisi (<https://www.nndc.bnl.gov/chart/>, 2019)

Nüklit	Sembol	Yarı ömür	Radyasyon Tipi
Toryum-232	$^{232}\text{Th}$	$14,0 \times 10^9$ y	$\alpha$
Radyum-228	$^{228}\text{Ra}$	5,75 y	$\beta^-$
Aktinyum-228	$^{228}\text{Ac}$	6,15 s	$\beta^-$
Toryum-228	$^{228}\text{Th}$	1,9125 y	$\alpha$
Radyum-224	$^{224}\text{Ra}$	3,6319 gün	$\alpha$
<b>Radon-220</b>	<b><math>^{220}\text{Rn}</math></b>	<b>55,600 s</b>	<b><math>\alpha</math></b>
Polonyum-216	$^{216}\text{Po}$	0,145 s	$\alpha$
Kurşun-212	$^{212}\text{Pb}$	10,640 saat	$\beta^-$
Bizmut-212	$^{212}\text{Bi}$	25,000 dak	$\alpha$
Polonyum-212	$^{212}\text{Po}$	$0,3 \times 10^{-6}$ s	$\alpha$
Talyum-208	$^{208}\text{Tl}$	3,053 dak	$\beta^-$
Kurşun-208	$^{208}\text{Pb}$	–	–

Son olarak ana çekirdeği  $^{235}\text{U}$  olan 11,43 gün yarı ömre sahip  $^{223}\text{Ra}$  bozunumu sonucu 3,96 s yarı ömürlü  $^{219}\text{Rn}$  (aktinon) oluşmaktadır (Çizelge 2.5).

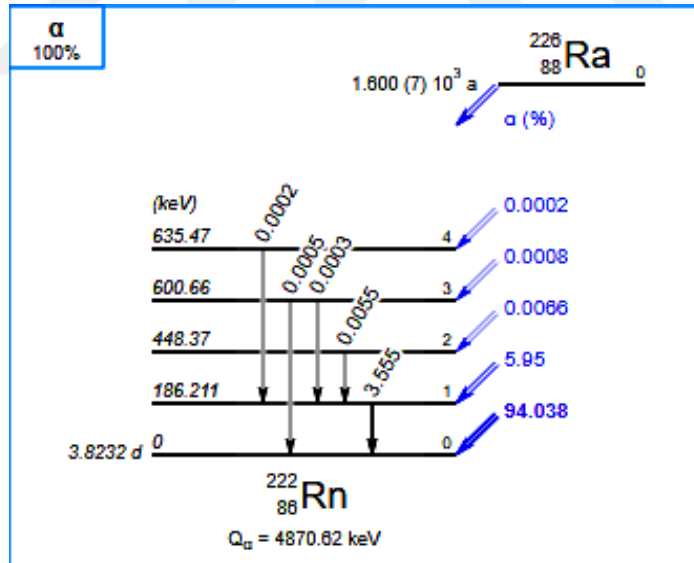
Çizelge 2.5 Aktinyum Serisi (<https://www.nndc.bnl.gov/chart/>, 2019)

Nüklit	Sembol	Yarı ömür	Radyasyon Tipi
Uranyum-235	$^{235}\text{U}$	$7,038 \times 10^8$ y	$\alpha$
Toryum-231	$^{231}\text{Th}$	25,52 saat	$\beta^-$
Protaktinyum-231	$^{231}\text{Pa}$	$3,276 \times 10^4$ y	$\alpha$
Aktinyum-227	$^{227}\text{Ac}$	21,772 y	$\beta^-$
Toryum-227	$^{227}\text{Th}$	18,68 gün	$\alpha$
Fransiyum-223	$^{223}\text{Fr}$	22,00 dak	$\beta^-$

Çizelge 2.5 Aktinyum Serisi (devam) (<https://www.nndc.bnl.gov/chart/>, 2019)

Radyum-223	$^{223}\text{Ra}$	11,43 gün	$\alpha$
Radon-219	$^{219}\text{Rn}$	3,96 s	$\alpha$
Bizmut-211	$^{211}\text{Bi}$	2,14 dak	$\alpha$
Talyum-207	$^{207}\text{Tl}$	4,77 dak	$\beta^-$
Kurşun-207	$^{207}\text{Pb}$	Kararlı	–

Radon ve bozunumu sonucu oluşan ürün çekirdekleri ortamda her yerde bulunmaktadır (Çizelge 2.6). Uranyum serisinde  $^{226}\text{Ra}$  bozunumu sonucu oluşan  $^{222}\text{Rn}$  (Şekil 2.1), 5,49 MeV'lik enerjiye sahip bir alfa parçacığı yayınlarken  $^{218}\text{Po}$ 'e bozunur. Yarı ömrü 3,098 dak olan  $^{218}\text{Po}$  ise 6,11 MeV alfa parçacığı yayınlarken  $^{214}\text{Pb}$ 'e dönüşür. Yarı ömürleri sırayla 27,06 dak ve 19,9 dak olan  $^{214}\text{Pb}$  ve  $^{214}\text{Bi}$ 'un beta bozunumu sonucu  $^{214}\text{Po}$  oluşur. 163,6  $\mu\text{s}$ 'lik oldukça kısa yarı ömre sahip  $^{214}\text{Po}$  ise 7,83 MeV enerjili alfa parçacığı yayınlarken  $^{210}\text{Pb}$ 'ye dönüşür.



Şekil 2.1  $^{226}\text{Ra}$ 'nın  $^{222}\text{Rn}$ 'ye bozunum şeması (<http://www.nucleide.org/Laraweb/index.php>, 2019)

Çizelge 2.6 <sup>222</sup>Rn ve bozunum ürünlerinin yarı ömür ve enerjileri (ICRP Rapor No 65)

Nüklit	Yarı ömür	Enerji (MeV)	Yayınlanma olasılığı (%)	Enerji (MeV)		Yayınlanma olasılığı (%)	
		$\alpha$		$\beta$		$\gamma$	
<sup>222</sup> Rn	3,82 gün	5,49	100	–	–	–	–
<sup>218</sup> Po	3,05 dak	6,00	100	–	–	–	–
<sup>214</sup> Pb	26,8 dak	–	–	1,02	6	0,35	35,60
				0,70	42	0,29	18,41
				0,65	48	0,24	7,26
<sup>214</sup> Bi	19,9 dak	–	–	3,27	18	0,61	45,49
				1,54	18	1,76	15,31
				1,51	18	1,12	14,91
<sup>214</sup> Po	164 $\mu$ s	7,69	100	–	–	–	–

## 2.2 Radon Gazı Kaynakları

Radon gazının topraktan atmosfere taşınımının ağırlıklı olarak moleküler difüzyon yolu ile meydana geldiği saptanmıştır (Nazaroff 1992). Bu gaz, toprak ve kayalardan bina zeminine sızarak yapı içerisinde birikebilmektedir. <sup>222</sup>Rn'nin topraktan havaya ölçülen akışı bölgesel olarak değişmektedir, ölçüm sırasındaki toprak özelliklerine, iklimsel ve mevsimsel değişikliklere vb. etkenlere bağlıdır. Radonun topraktan atmosfere toplam aktarım miktarı ~2 Bq/s dir (NCRP Rapor No 97).

Bina içerisinde radon gazının varlığı bina zemininde ve çevresinde bulunan toprak ve kayalar, bina yapımında kullanılan yapı malzemeleri, su, doğalgaz gibi kaynaklara bağlıdır. Açık hava da bina içerisine radon gazının girmesine neden olan etkenlerden birisidir.

Toprakta bulunan <sup>226</sup>Ra konsantrasyon değişikliklerine bağlı olarak radon ve ürünlerinin konsantrasyonu önemli ölçüde değişir. Atmosferik radon gazı konsantrasyonu, toprağın radyum bakımından zengin olduğu bölgelerde daha fazladır. Örneğin okyanuslarda

$^{226}\text{Ra}$  konsantrasyonunun düşük olması nedeniyle, üzerlerindeki radon gazı konsantrasyonu daha düşüktür. Yüksek radon konsantrasyon seviyeleri genellikle binalarda zemine en yakın katlarda, madenler ve mağaralar gibi yer altında bulunan alanlarda söz konusudur.

Çizelge 2.7  $^{238}\text{U}$  ve  $^{232}\text{Th}$ 'nin bazı malzemelerdeki miktarları (NCRP Rapor No 94)

Materyal	$^{238}\text{U}$ Uranyum		$^{232}\text{Th}$	
	ppm	Bq/kg	ppm	Bq/kg
Volkanik basalt	0,5–1,0	7–10	3–4	10–15
Granit	3,0	40	17	70
Şeyl, Kumtaşı	3,7	40	12	50
Toprak	1,8	66	9	37

Bina içerisindeki radon gazının temel kaynağı, bina zeminindeki toprak ve kayalardır. Yaşanılan bölgenin coğrafik yapısı bina içi radon konsantrasyonunu etkilemektedir ve bölgeden bölgeye değişiklik gösterebilmektedir. Topraktaki  $^{226}\text{Ra}$  konsantrasyonları 10-150 Bq/kg arasında değişmektedir ve ortalama 40 Bq/kg civarındadır (Wilkening 1990). Çizelge 2.7'de  $^{238}\text{U}$  ve  $^{232}\text{Th}$ 'nin bazı malzemelerdeki miktarları verilmiştir. Binaların üst katlarında ise zeminden kaynaklanan etki daha az önem taşırken, daha yüksek katlarda  $^{226}\text{Ra}$  içeren yapı malzemeleri  $^{222}\text{Rn}$  konsantrasyonuna daha fazla katkı sağlamaktadır (Nero vd. 1990). Ayrıca binaların içindeki havanın normalde dış ortamdaki havadan biraz daha düşük basınçta olması nedeniyle ortaya çıkan basınç farklılığı radon gazının bina içinde artmasına sebep olmaktadır.

Bina yapımında kullanılan yapı malzemelerin kaynağı toprak ve kayalık ürünleri olduğundan doğal radyonüklit içerirler. Bazı inşaat malzemeleri yüksek  $^{226}\text{Ra}$  içeriği ve radon gazının kaçmasına izin veren gözenekli yapıları nedeniyle kapalı ortamda radon gazının önemli birer kaynağı olabilirler (UNSCEAR 2006 Raporu).

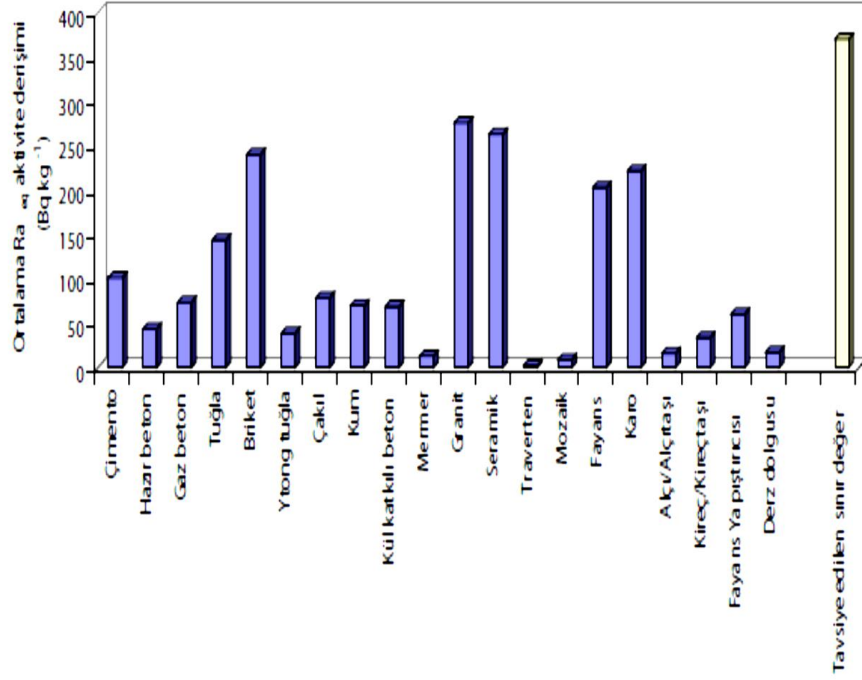
Ağaç malzemeler daha düşük  $^{226}\text{Ra}$  içeriğine sahip olmasına rağmen gözenekli yapısı nedeniyle fazla miktarda  $^{222}\text{Rn}$  ortama geçebilmektedir. Beton, kiremit gibi malzemeler ise daha yüksek miktarda  $^{226}\text{Ra}$  içerir ve bu malzemelerin bina içerisine olan katkısı radonun düşük kaçış oranı nedeniyle azdır (Wilkening 1990).

Bir model evde yapılan hesaplamalar yapı malzemelerinin kapalı ortamda bulunan radon konsantrasyonuna ortalama olarak  $\sim 10 \text{ Bq/m}^3$  oranında katkıda bulunduğunu göstermektedir. Bu sonuç, kapalı alanlardaki ortalama radon konsantrasyonunun yaklaşık % 25'ini temsil etmektedir. Avrupa'da yapı malzemelerinin kapalı ortamlardaki radon konsantrasyonuna olan tipik katkısının  $10 - 20 \text{ Bq/m}^3$  aralığında olduğu tahmin edilmektedir. Bu da  $0.3 - 0.6 \text{ mSv}$  aralığında yıllık bireysel etkin doza karşılık gelmektedir (IAEA No SSG-32 2015 Raporu). Yapı malzemelerindeki tahmini  $^{226}\text{Ra}$  konsantrasyonları UNSCEAR 1982 raporunda verilmiştir, Çizelge 2.8.

Çizelge 2.8 Yapı malzemelerindeki  $^{226}\text{Ra}$  konsantrasyonları (UNSCEAR 1982 Raporu)

Malzeme	Bq/kg	pCi/g
Ağaç	1	0.03
Beton	16–61	0.43–1.65
Tuğla	42–96	1.10–2.60
Kiremit	78	2.10
Yalıtım malzemesi Cam yünü	13–40	0.35–1.10
Doğal alçı	4–10	0.11–0.27
Fosfojips	27	0.73

Türkiye'de kullanılan bazı yapı malzemeleri için TAEK tarafından yapılan çalışmada radyum aktivite konsantrasyonu hesaplanmış ve sınır değer olan  $370 \text{ Bq/kg}$  altında değerler bulunmuştur (TAEK Teknik Rapor TR 2008-7).



Şekil 2.2 Çeşitli yapı malzemelerinin  $^{226}\text{Ra}$  aktivite konsantrasyonlarının tavsiye edilen sınır değeri ile karşılaştırılması (TAEK Teknik Rapor TR 2008-7)

Kapalı ortamda bulunan radon gazına bir diğer katkı bina içerisinde kullanılan sulardan gelmektedir. Radon gazı, suda çözünebildiğinden suyun kullanımı sonucu havaya karışabilmektedir. Solunum yoluyla yaklaşık 0,025 mSv/yıl ortalama etkin doz alınabilmektedir (IAEA No SSG-32 2015 Raporu). Genel olarak kapalı ortamdaki radon gazının % 2'sinin su kaynaklarından geldiği tahmin edilmektedir (Wilkening 1990).

Sudaki radon gazı konsantrasyonu bulunduğu yere göre değişiklik göstermektedir. Yeraltı sularında ve özel kaynaklardan çekilen sularda yüksek  $^{222}\text{Rn}$  konsantrasyonları bulunmaktadır. Genellikle kuyu sularında yüksektir ve yeraltı sularında ise kuyu suyuna göre daha düşüktür. Yüzey suları ise çok düşük konsantrasyonlarda  $^{222}\text{Rn}$  içerir. İçme sularından kapalı ortamdaki toplam  $^{222}\text{Rn}$  konsantrasyonuna katkı, açılan musluk ve duş nedeniyle sabit değildir ve kullanılan sudaki radon konsantrasyonuna bağlıdır. Su kullanımı sonucu binalarda açığa çıkan radon gazı, yüksek konsantrasyonlarda ölçülen

radonun çok daha az baskın kaynağı olmakla birlikte kısa vadede yüksek konsantrasyonlar da oluşturabilmektedir.

Doğal gaz, bazı durumlarda kapalı ortam için önemli bir radon kaynağı olarak görülmektedir. Üretim kuyularındaki radon konsantrasyonu 50 kBq/m<sup>3</sup> seviyelerine kadar değişmektedir (UNSCEAR 1988 Raporu). Ancak doğal gazın kullanım amacına uygun işlenmesinden sonra içeriğindeki radon konsantrasyonunun bir kısmı kullanım anına kadar azalmaktadır. Kapalı ortamlarda ısınma ya da yemek pişirme amacıyla doğal gaz kullanımı, ortamdaki radon gazı konsantrasyonuna katkı sağlamaktadır.

Kapalı ortamlarda radon gazı konsantrasyonu birçok etkene bağlı olarak sürekli değişkenlik göstermektedir. Bu alanları kullanan kişilerin yaşama şekilleri, mevsimsel değişimler, hava koşullarına bağlı değişimler, binanın doğal ya da yapay havalandırılma şekli, binanın yaşı, binanın bulunduğu zemin ve çevresindeki toprağın gözenekli yapısı gibi etkenler ortamın radon konsantrasyonunu etkilemektedir.

Yapılan çalışmalarda kapalı ortamlarda ölçülen radon gazı konsantrasyonunun genellikle kış mevsiminde yaz mevsimine kıyasla daha yüksek olduğu görülmüştür. Mevsimsel değişim etkileri, doğal havalandırma ile havalandırılması sağlanan alanlarda daha yüksektir. Yaz mevsiminde havalandırmanın daha sık ve daha uzun sürelerde olması nedeniyle düşük radon seviyeleri gözlenmektedir. Bina içerisindeki sıcaklık yaz mevsiminde, açık hava ile aynı seviyelerde olduğundan bina içerisindeki basınç farkı önemsiz olabilmektedir. Ancak kış mevsiminde bina içerisindeki sıcaklık arttığında bina içinde basınç azalması olur. Bu durum radon gazının basınç etkisiyle zeminden bina içerisine girişini arttırır. Hava koşullarına bağlı olarak bina içerisinde gözlenen radon seviyelerinde değişimler söz konusudur. Havanın rüzgârlı olması basıncın etkisiyle hava akımını arttıracığından bina içi radon seviyelerinde azalma gözlenir.

Binaların toprakla temas eden yüzeylerinde bulunan beton, radona karşı bariyer görevi görmektedir. Bununla birlikte, radon gazı, beton içerisinden yayılarak veya betonda meydana gelebilecek çatlaklardan binaya girebilir (Cember ve Johnson 2009).



Yüksek radon seviyelerine sahip binalarda, radon girişi için ana mekanizma, zemin çatlaklarından geçen toprak gazının basınçlı akışıdır. Bu durum binanın içi ve dışı arasındaki basınç farklılıkları nedeniyle ortaya çıkar (UNSCEAR 2006 Raporu). Ayrıca basınç farklılıklarına ek olarak bağıl nem ve toprak nemi de dâhil olmak üzere diğer faktörler de binalardaki radon seviyelerini etkileyebilir. Ancak bu etki daha çok zemine yakın katlar için geçerli olabilmektedir.

### 2.3 Radon Gazı İçin Belirlenmiş Limit Değerler

International Commission On Radiological Protection (ICRP), kapalı ortamda bulunan radon gazı konsantrasyonu için bazı limit değerler belirlemiştir (Çizelge 2.9). Bu değerler evler için 200-600 Bq/m<sup>3</sup>, işyerleri için 500-1500 Bq/m<sup>3</sup> olarak belirlenmiştir (ICRP Rapor No 65). Ülkemizde ise Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK) bu limit değerleri evler için 400 Bq/m<sup>3</sup>, işyerleri için 1000 Bq/m<sup>3</sup> olarak yayınlamıştır (TAEK Radyasyon Güvenliği Yönetmeliği Resmi Gazete 2000).

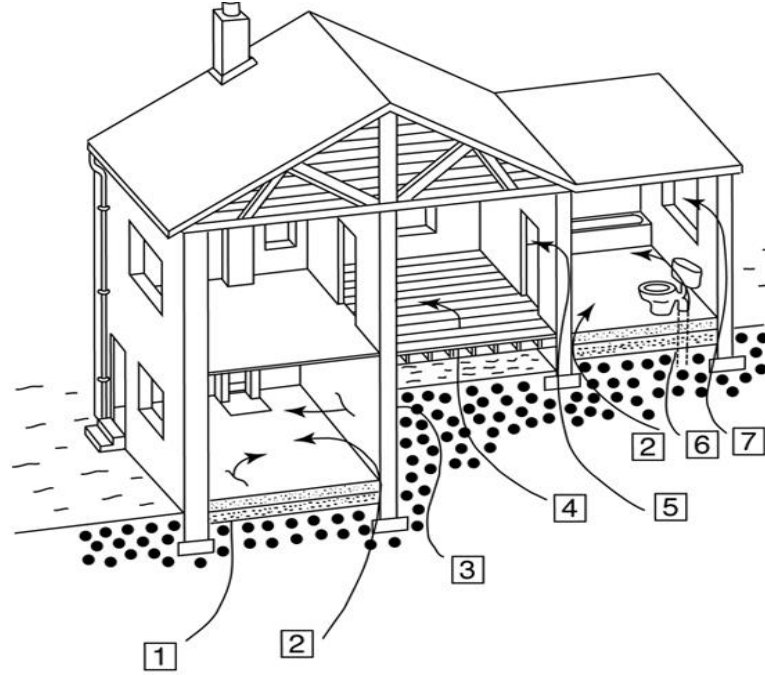
Çizelge 2.9 Radon konsantrasyonu limit değerleri (ICRP 65 raporu)

	<b>Yıllık Etkin Doz</b>	<b>Radon Konsantrasyonu*</b>
	<b>mSv</b>	<b>Bq m<sup>-3</sup></b>
<b>Ev</b>	3–10	200–600
<b>İşyeri</b>	3–10	500–1500

\* Yıllık ev için 7000 saat, işyerleri için 2000 saat ve denge faktörü 0,4 alınarak hesaplanan değerler

### 2.4 Binalara Radon Gazı Girişini Önleme ve Konsantrasyonunu Azaltma Yöntemleri

Şekil 2.4'te radon gazının giriş yolları ayrıntılı olarak verilmektedir.



Şekil 2.3 Radon gazının bina içerisindeki giriş yolları

(<http://www.radonawaregroup.ie/testing.html>, 2018) 1. Zeminde bulunan çatlaklar, 2.

Bağlantı noktaları, 3. Zemin seviyesinin altında bulunan duvarlardaki çatlaklar, 4. Asma

katlarda bulunan boşluklar, 5. Bina duvarlarında meydana gelen çatlaklar, 6. Tesisat borularının etrafındaki bulunan boşluklar, 7. Duvar Boşlukları

Belirlenen limit değerler üzerinde radon gazı konsantrasyonu bulunan ev ve işyerlerinde konsantrasyonu azaltmak için Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK) tarafından da önerilen bazı yöntemler uygulanmalıdır. En temel yöntem bina zemininden gelen radon gazının girişini engellemek ve binaların toprak ile temas eden kısımlarının iyi bir biçimde izole edilmesini sağlamaktır. Toprak ile bina zemini arasındaki hava basıncı farkı bina içerisine radon gazı girişinin temel nedeni olduğundan bu basınç farkını azaltacak yöntemler uygulanmalıdır. Bina içerisinde bulunan çatlaklar kapatılmalıdır. Ayrıca kapalı ortamların havalandırılması bina içerisindeki radon gazı konsantrasyonunu düşük seviyelere ulaştırması açısından oldukça önemlidir. Özellikle havalandırması güçlü olmayan ve yalıtımı yapılmış binalarda, yapıda bulunan çatlaklardan, inşaat malzemelerinden, kullanılan sulardan kaynaklanan radon gazının fazla miktarlarda birikmesi nedeniyle havalandırma süreleri uzatılmalıdır. Bazı durumlarda ise bina zemini yerine, bina yapımında kullanılan inşaat malzemelerinden gelen katkı çok daha fazla olabilmektedir. Radyoaktivite analizleri yapılan yapı

malzemelerinin tavsiye edilen değerler üzerinde çıkması durumunda bu malzemelerin ortamdaki uzaklaştırılması önemlidir (TAEK Teknik Rapor TR-2014-2). Yeni binaların yapımında ise bu malzemelerin kullanımından kaçınılmalıdır ve havalandırma sistemleri kurulmalıdır. Kapalı ortamlarda sigara içilmemesi de radon gazının yol açabileceği sağlık risklerini azaltmaktadır.

## **2.5 Binalarda Bulunan Radon Gazının İnsan Sağlığı Üzerindeki Etkileri**

Radon gazının alfa bozunumu sonucu oluşan ürün çekirdekleri gaz halinde değildirler. Bu ürün çekirdeklerinin bir kısmı sahip oldukları yük nedeniyle havada bulunan toz parçacıklarına yapışma eğilimindedirler, bir kısmı ise serbest radyoaktif atomlar olarak kalmaktadırlar. Solunum yoluyla akciğerlere alınan kısa yarı ömürlü radyoaktif ürünler kararlı hale gelinceye bozunmaya devam ederler. Yayınlanan alfa parçacıkları akciğer dokusuna zarar verebilmektedir. Açık havada da bulunan radon genellikle insan sağlığını tehdit edebilecek seviyelerde değildir ve ortalama konsantrasyonu 10 Bq/m<sup>3</sup> civarındadır. Bu risk <sup>222</sup>Rn maruziyetinin herhangi bir seviyesinde oluşabilmektedir. Bununla birlikte daha yüksek radon konsantrasyonlarının bulunduğu ortamda daha fazla zaman geçiren bir kişi için akciğer kanserine yakalanma riski diğer kişilere göre daha fazla olmaktadır (UNSCEAR 2000 Raporu).

İnsan kanserojeni olarak sınıflandırılan radon, sigaradan sonra akciğer kanserinin ikinci nedeni olarak görülmektedir. Dünya Sağlık Örgütü, bir ülkedeki ortalama radon konsantrasyonu ve sigara içiciliğine bağlı olarak ülkedeki tüm akciğer kanserlerinin %3 ile %14 aralığında radon kaynaklı olduğunu, ayrıca radonun neden olduğu zarar için bir eşik değerin bulunmadığını, düşük konsantrasyonlarda dahi akciğer kanseri riskini arttırdığını belirtmektedir (WHO 2009).

Radonun suda çözünmesi nedeniyle içme suyu olarak kullanıldığında olası bir maruziyete neden olmaktadır. Hem su tüketimi ile hem de sudan havaya karışan radon nedeniyle solunum yoluyla maruz kalınmaktadır. Dünya Sağlık Örgütü tarafından böbrek, mide ve derinin de radon nedeniyle yüksek dozlar alabildiği ancak akciğer kanseri dışındaki kanserlere kesin olarak neden olması ile ilgili güçlü kanıtlar

bulunamadığı belirtilmektedir. Doz-risk arasındaki ilişki lineerdir ve akciğer kanseri riski, yüksek radon konsantrasyonlarında ve kişinin bu ortamda geçirdiği süre uzadıkça artmaktadır (WHO 2009).

## 2.6 Radon Gazı Ölçüm Yöntemleri

Radon gazının ölçümünde çeşitli teknikler ve ölçüm cihazları kullanılmaktadır. Ölçümlerde genellikle istenilen amaca uygun ölçüm süreleri belirlenir. Ölçümler, kısa süreli ve uzun süreli ölçümler olmak üzere iki şekilde yapılabilmektedir.

Kısa süreli ölçümlerde amaç, kapalı ortamda bulunan radon gazı seviyesini en hızlı şekilde belirlemektir. Ölçümler, 48 saatten başlayarak 90 güne kadar alınabilir ve ortamda bulunan radon gazı hakkında bilgi verir. Kısa süreli ölçümler, alfa iz dedektörleri, aktif kömür cihazları, elektret iyon odaları ve sürekli monitörler ile yapılır.

Uzun süreli ölçümler ise 90 günden 1 yıla kadar yapılabilmektedir. Bu ölçümler, radon gazı konsantrasyonlarının zaman içerisindeki dalgalanmalarını ve mevsimsel değişiklikleri de görebilmek adına daha net sonuçlar verir. Uzun süreli ölçümler için genellikle alfa iz dedektörleri ve elektret iyon odaları kullanılır.

Ölçüm cihazları, aktif ve pasif cihazlar olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Radon ölçümleri için sıklıkla kullanılan yöntemler Çizelge 2.10 de verilmektedir.

Çizelge 2.10 Radon gazı ölçüm yöntemleri (WHO 2009)

Dedektör Tipi	Pasif/Aktif	Ölçüm Süresi
Aktif kömür dedektörleri	Pasif	2-7 gün
Alfa iz dedektörleri	Pasif	1-12 ay
Elektret iyon odaları	Pasif	5 gün-1 yıl
Sürekli ölçüm monitörleri	Aktif	1 saat-1 yıl

### 2.6.1 Aktif kömür ile ölçüm

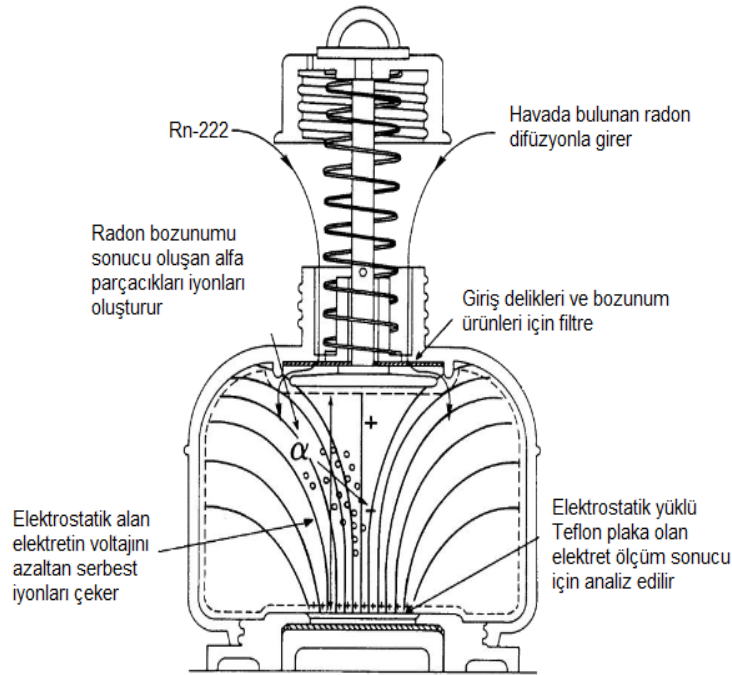
Bu yöntemde radon, kömür tarafından adsorbe edilir. Metal bir kutu aktif kömürle doldurulduktan sonra ölçüm yapılacak ortama yerleştirilinceye kadar sıkıca kapalı tutulur. Ölçüm alanına getirilen kutu, kapağı açılarak ortamda bulunan havanın kömür içine yayılması sağlanır, radon moleküler difüzyon yolu ile kömür gözeneklerine nüfuz eder. Genellikle 2-7 gün arası olan ölçüm periyodunun sonunda kutu tekrar sıkıca kapatılır ve analiz için laboratuvar ortamına gönderilir. Yüzeyde tutunan (adsorbe edilen) radon konsantrasyonu, gama spektrometresi yöntemi ile radon bozunum ürünlerinden gelen gamaların sayılmasıyla belirlenir. Aktif kömür tekniğinde, yüzeydeki tutunum sıcaklık ve nemden etkilendiğinden bu parametreler için düzeltmeler yapılması gerekmektedir. Radonun kısa yarı ömrü nedeniyle, ölçüm tamamlandıktan sonra mümkün olan en kısa sürede kabın içindeki numunenin analizlerinin yapılması gerekmektedir. Bu yöntemin duyarlılığı yaklaşık  $18,5 \text{ Bq} / \text{m}^3$  civarındadır (Cember ve Johnson 2009).

### 2.6.2. Alfa iz dedektörleri

Alfa iz dedektörleri, genellikle ortalama radon konsantrasyonlarını uzun süreli ölçümlerde belirlemek için kullanılmaktadır. Alfa iz dedektörlerinde filtre kaplı bir kaba yerleştirilen dedektörün içerisine havanın yayılması ile havadaki radon ve bozunum ürünlerinin yayınladığı alfa parçacıkları dedektöre çarpmaktadır. Bu alfa parçacıkları enerjiye duyarlı plastik bir filmde ancak mikroskop ile görülebilen izler meydana getirmektedir. Ölçüm süresinin sonunda kap sıkıca kapatılarak laboratuvar ortamına getirilmekte ve burada kap açılarak kimyasal iz kazıma yöntemiyle plastik üzerinde alfa parçacıkları tarafından meydana getirilen izler mikroskop yardımıyla sayılmaktadır. Plastik film üzerindeki izlerin yoğunluğu, toplam radon konsantrasyonu ile doğru orantılıdır. Sistemin hassasiyeti yaklaşık  $7,4 \text{ Bq/m}^3$ 'tür (Cember ve Johnson 2009).

### 2.6.3 Elektret iyon odaları

Elektret iyon odalarında kullanılan elektret, genellikle teflon gibi elektrostatik yüklü bir malzemedir. Atmosferik radon ölçümü için kullanılan ve hava girişi bulunan elektret, ölçümün başlangıcına kadar kapalı tutulur. Ölçüm boyunca hava girişi açıktır ve radon gazı, havadaki parçacıkların iyon odasına girmesini önleyen filtreden iyon odasına yayılır. Radondan ve bozunum ürünlerinden gelen alfa parçacıkları odadaki havayı iyonlaştırır ve iyonlar elektretin yüzeyindeki yükleri nötralize eder. Elektret yükü, radon gazına maruz kalmadan önce ve kaldıktan sonra ölçülerek yükteki değişim oranının belirlenmesiyle radon konsantrasyonu ölçülmüş olur (WHO 2009). Şekil 2.4'te elektret iyon odası verilmiştir.



Şekil 2.4 Elektret iyon odası ([https://www.radelec.com/radon\\_monitoring.html](https://www.radelec.com/radon_monitoring.html), 2019)

### 2.6.4 Sürekli radon monitörleri

Sürekli radon monitörleri, farklı sensör tiplerinin kullanıldığı aktif cihazlardır. Sintilasyon, iyon odaları ve katı hal silikon dedektörleri gibi farklı çeşitleri mevcuttur. Bu monitörler analiz için pompa kullanarak veya havanın bir sensör odasına yayılmasını sağlayarak havayı içine toplarlar. Genel olarak, bu cihazların ölçülebilen en düşük

konsantrasyonu yaklaşık 5 Bq/m<sup>3</sup>tür (MDC - Minimum Detectable Concentration). Sürekli monitörlerin düzgün çalışmasını ve güvenilir sonuçlar almasını sağlamak için rutin kalibrasyonlar gerekmektedir (WHO 2009).



### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1 Radon Gazı Ölçümü

Ankara Üniversitesi 10.Yıl Yerleşkesi içerisinde bulunan çeşitli binalarda yapılan ölçümler, özellikle bodrum ve zemin katlarda bulunan bazı ofis ve laboratuvarlarda gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde kullanılan cihaz Nisan 2018’de temin edilmiştir. Tez kapsamında daha fazla ölçüm alabilmek için kısa süreli ölçümlerin alınması tercih edilmiştir. Ölçümler için aktif dijital radon dedektörü kullanılmıştır.

##### 3.1.1 Ölçüm cihazının özellikleri

Radon gazı konsantrasyonunu belirlemek için kullanılan cihaz, Norveç’te bulunan Airthings firması tarafından üretilen Corentium Plus aktif dijital radon dedektörüdür. Bu dedektörler sürekli olarak dalgalanma gösteren radon konsantrasyonu hakkında bilgi vermektedir. Dedektör, silikon fotodiyottur ve  $^{222}\text{Rn}$  bozunumu sonucu açığa çıkan alfa parçacıklarının enerjisine duyarlı alfa spektrometresi yardımıyla radon gazı konsantrasyonu belirlenmektedir. Bu dedektörler, alfa iz dedektörlerin dijital versiyonudur ve havanın pasif difüzyonu sonucu radon gazı konsantrasyonu ölçümü gerçekleştirilmektedir (Anonim, PCE Instruments Corentium Plus Teknik Katalog). Bu işlemde radon gazının bozunumu sonucunda silikon fotodiyot üzerine gelen alfa parçacıkları küçük bir akım sinyali oluşturur ve bu akım yükselteç tarafından güçlendirilir (Anonim, PCE Instruments Corentium Plus Teknik Katalog). Şekil 3.1’de radon gazı ölçüm cihazı verilmiştir.



Şekil 3.1 Radon gazı ölçüm cihazı ( <https://www.airthings.com/>, 2019)



Sadece kapalı ortamlarda radon gazı konsantrasyonunu ölçebilen dedektör, üzerinde bulunan nem, basınç ve sıcaklık sensörleri yardımıyla, ölçüm süresi boyunca ortamın nem oranı (%RH), atmosfer basıncı (mbar) ve sıcaklığı (°C) gibi üç iklimsel parametre hakkında veriler içermektedir. Cihazın kalibrasyona gereksinimi yoktur. Çizelge 3.1’de ölçüm cihazının genel özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.1 Radon gazı ölçüm cihazının genel özellikleri (Anonymous, Corentium Plus User Manual)

<b>Örnekleme yöntemi</b>	Pasif difüzyon odası
<b>Dedeksiyon yöntemi</b>	Alfa spektrometresi
<b>Dedektör</b>	Silikon fotodiyot
<b>Ölçüm aralığı</b>	0 - 50 000 Bq/m <sup>3</sup>
<b>Örnekleme süresi</b>	1 saat
<b>Difüzyon zaman sabiti</b>	25 dak
<b>Hassasiyet</b>	7 günlük < 12 % 50-350 Bq/m <sup>3</sup> < 8 % > 350 Bq/m <sup>3</sup>
	1 aylık < 9 % 90-220 Bq/m <sup>3</sup> < 6 % > 220 Bq/m <sup>3</sup>
<b>Doğruluk</b>	100 Bq/m <sup>3</sup> altında ± 5 Bq/m <sup>3</sup> 100 Bq/m <sup>3</sup> üzerinde ± 5 %
<b>Güç kaynağı</b>	3 AAA pil
<b>Sıcaklık</b>	4 °C – 40 °C
<b>Nem</b>	5 % RH - 85 % RH
<b>Barometrik basınç</b>	50 kPa –115 kPa (500-1150 mbar)

### 3.1.2 Ölçüm verilerinin elde edilmesi

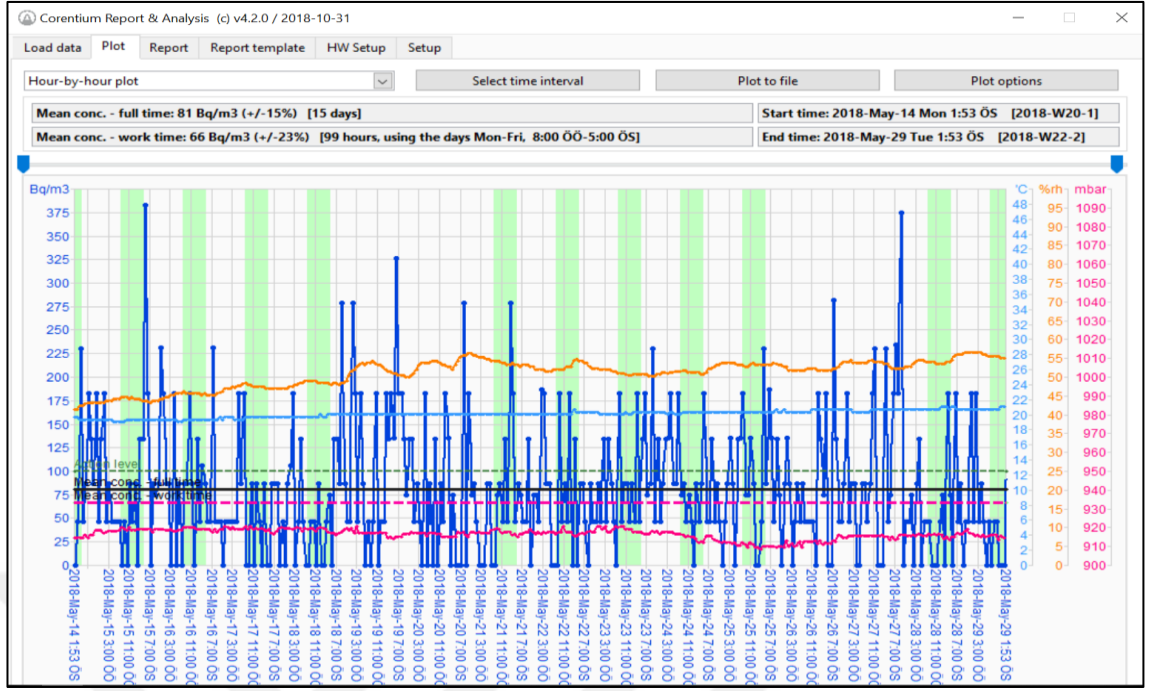
Ölçümler, Ankara Üniversitesi 10.Yıl Yerleşkesi içerisinde (Şekil 3.2), Fen Fakültesi B Blok ve Nükleer Bilimler Enstitüsü içerisinde bulunan ofis ve laboratuvarlardan

alınmıştır. Bilindiği kadarı ile yerleşkede ilk kez radon gazı konsantrasyonu ölçümü yapılmıştır. Ölçümler, dijital radon dedektörünün kullanım kılavuzunda belirtildiği şekilde yerden en az 50 cm yükseklikte, en yakın duvarlardan en az 25 cm, kapı, pencere veya havalandırma noktalarından en az 150 cm uzaklıkta olacak şekilde oda içerisinde uygun bir konuma yerleştirilerek alınmıştır. Her bir odanın hacmi ölçülmüştür.



Şekil 3.2 Ankara Üniversitesi 10.Yıl Yerleşkesi

Ölçüm süresinin sonunda elde edilen veriler, dedektör ile birlikte verilen CRA yazılımı ile bilgisayar ortamına aktarılarak radon konsantrasyonundaki dalgalanmaların detaylı bir şekilde analiz edilmesine olanak sağlamaktadır (Anonymous, Corentium Report and Analysis Software Manual version 4.2). Şekil 3.3’de yazılımdan elde edilen veriler gösterilmektedir.



Şekil 3.3 CRA yazılımından elde edilen grafik (YLLab)

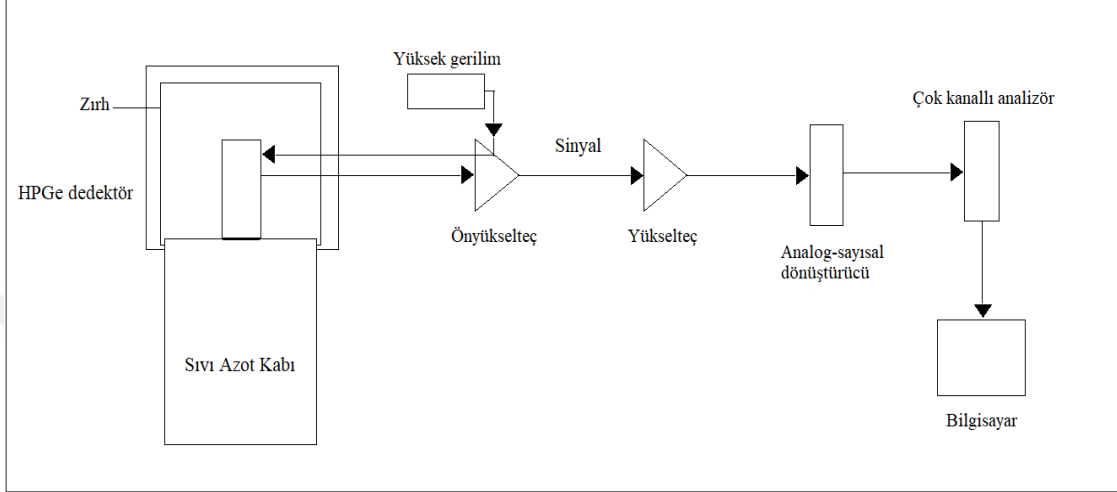
### 3.2 Gama Spektrometresi ile Aktivite Ölçümü

Toprak, su gibi numunelerde doğal radyoaktivite konsantrasyonunun ölçülmesi, çevresel radyasyon kaynaklarının belirlenmesi açısından önemlidir. Ankara Üniversitesi 10. Yıl Yerleşkesi'nde (Tandoğan Yerleşkesi) çeşitli binalarda radon gazı ölçümünün yapılmasına ek olarak, özellikle ölçümlerin alındığı ofis/oda/laboratuvarların civarında bina dışından alınan toprak ve bazı taş numunelerde doğal radyoaktivite konsantrasyonu ölçülmüştür. Özellikle toprak altında kalan ofis/oda/laboratuvarların civarından toprak numuneler alınmıştır. Gama spektrometresi ile ölçülen radyonüklitler  $^{238}\text{U}$  ve  $^{232}\text{Th}$  serilerinden gelen radyonüklitler ile  $^{40}\text{K}$ 'dır. Bu radyonüklitlerin gözlenmesi radon gazının kaynağının belirlenmesini açısından önem taşımaktadır. Numunelerdeki aktivite konsantrasyonları Nükleer Bilimler Enstitüsü Gama Spektroskopisi Laboratuvarında ölçülmüştür.

#### 3.2.1 Gama spektrometresi

Gama spektrometresi, aktivite belirlemede kullanılan yöntemlerden birisidir. Yüksek

saflıkta germanyum (HPGe) dedektörler ise bu yöntem için kullanılan yarı iletken dedektörlerdir. Bu dedektörler, yüksek oranda enerji ayırma gücü ve dedeksiyon verimlerinin olması sebebiyle aktivite ölçümlerinde sıklıkla kullanılmaktadırlar. Şekil 3.4'te HPGe dedektörlerinin çalışma düzeneği verilmektedir.



Şekil 3.4 Yüksek saflıkta germanyum (HPGe) dedektörünün çalışma düzeneği

Gama spektrometresinde gelen gama ışınları, dedektör içinde bulunan germanyum kristali ile etkileşerek elektron-deşik çiftleri oluşturur ve uygulanan elektrik alan ile oluşan akım, bir sinyal olarak gözlenir. Germanyum kristalinde bir elektron-deşik çifti oluşturmak için gerekli ortalama enerji 2,96 eV'tur. Germanyum dedektörlerin çalışması sıvı azot sıcaklığında (77 °K) gerçekleşmektedir ve bu şekilde gürültü sinyalinin minimum olduğu durum sağlanmaktadır (Yücel 2009).

Bu çalışmada kullanılan gama spektroskopisi sistemi Canberra GCW4023 model kuyu tipi HPGe dedektörüdür. Çizelge 3.2'de dedektörün teknik özellikleri verilmiştir. Dedektör, doğal fon radyasyonunun etkisini azaltmak için 9,5 mm kalınlığındaki çelik iskelet içerisine 10 cm kalınlığında kurşun konularak zırhlanmıştır. Zırhın iç kısmı ise x-ışınlarını önlemek için 1 mm kalay ve 1,6 mm bakır ile kaplıdır. Dedektörü soğutmak için 30 L hacimli sıvı azot kabı kullanılmaktadır. Dedektörün +3500 V olan çalışma gerilimi için yüksek gerilim güç kaynağı olarak Canberra 3106D, Canberra 2002CSL ön yükselteç ve Canberra 2025 yükselteç kullanılmaktadır. Spektrum analizi ise Canberra Genie<sup>TM</sup>2000 yazılımı ile yapılmaktadır (Yücel 2009).

Çizelge 3.2 Yüksek saflıkta germanyum (HPGe) dedektörün özellikleri

<b>Dedektör geometrisi ve kristal tipi</b>		Kapalı uçlu, eş eksenli, p-tipi
<b>Bağlı verimi</b>		% 44,8
<b>Aktif hacmi</b>		218 cm <sup>3</sup>
<b>Ge kristali</b>	<b>Çap</b>	66,5 mm
	<b>Yükseklik</b>	67,0 mm
<b>Dedektör kuyusu</b>	<b>Çap</b>	23,0 mm
	<b>Derinlik</b>	35,0 mm
<b>Kriyostat kuyusu</b>	<b>Çap</b>	16,0 mm
	<b>Derinlik</b>	40,0 mm
<b>Enerji ayırma gücü (FWHM)</b>	<b>122 keV (<sup>57</sup>Co)</b>	1,16 keV
	<b>1332,5 keV (<sup>60</sup>Co)</b>	2,00 keV
<b>Pik-Compton oranı</b>	<b>1332,5 keV (<sup>60</sup>Co)</b>	60,8:1

### 3.2.2 Toprak ve yapı malzemelerinin analiz için hazırlanması

Ankara Üniversitesi 10. Yıl Yerleşkesi içerisinde belirli noktalardan toprak ve taş numuneleri alınmıştır. Şekil 3.5'te toprak numunelerinin alındığı bölgeler işaretlenmiştir. Toprak numuneler radon gazı ölçülen oda/ofis/laboratuvarların civarından alınmıştır. Numunelerden ilki Fen Fakültesi B Bloktaki İleri Optik Laboratuvarının, diğeri ise Nükleer Bilimler Enstitüsü'nde bulunan karanlık odanın yakınındaki bir noktadan alınmıştır.



Şekil 3.5 Toprak numunelerinin alındığı bölgeler

Toprak örnekleri Şekil 3.6’da gösterildiği şekilde iki bölgeden de yaklaşık 20 cm derinlikten alınmıştır. Ayrıca yerleşke içerisinde kullanılan kaldırım taşları ve bina yapımında kullanılan Ankara andezit taşı olmak üzere toplamda üç farklı taş numunesi analiz için toplanmıştır.



(a)



(b)

Şekil 3.6 Numunelerin toplanması a) B Blok b) Nükleer Bilimler Enstitüsü bahçesi

Numune hazırlama safhasında (Şekil 3.7) taş örnekleri ilk olarak çeneli kırıcıda daha küçük boyutlara getirilmiştir. Örnekler eleme işleminden geçirilerek yaklaşık 5 gün boyunca Miprolab marka etüvde 60<sup>0</sup>C’de kurutulmuştur. Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü Gama Spektroskopisi Laboratuvarında örneklerin homojenliğini sağlamak amacıyla, numuneler Retsch PM100 marka bilyeli kırıcıdan, daha sonra Retsch AS300 marka elekten geçirilerek ebatları 0,85 mm’nin altına inecek şekilde toz haline getirilmiş, numune kaplarına doldurulmuştur. Örneklerin net ağırlıkları AND GR-

202 elektronik tartı ile belirlenerek, numune kapları silikon ve bant kullanılarak hava almayacak şekilde kapatılmıştır.  $^{226}\text{Ra}$ 'nın  $^{222}\text{Rn}$  ile radyoaktif dengeye gelebilmesi için örnekler, ölçümden önce en az dört hafta olacak şekilde bekletilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.7 Numunelerin hazırlanma süreci a) Çeneli kırıcı b) Çeneli kırıcıdan elde edilen numuneler c) Elekten geçirilerek kapalı kaplarda bekletilen numuneler

Hazırlanan numuneler hakkındaki bilgiler Çizelge 3.3'de verilmektedir.

Çizelge 3.3 Hazırlanan numunelerin sınıflandırılması

Numune Tipi	Numune Kodu	Hazırlanma tarihi	Net ağırlık (g)
Toprak	IODS1	16.08.18	95,9015
Toprak	NKD1	16.08.18	110,4551
Yapı malzemesi	ANKARA ANDEZİT TAŞI	15.08.18	142,7382
Kaldırım taşı	CT1	15.08.18	141,6739
Kaldırım taşı	CT2	14.08.18	142,0844

### 3.2.3 Aktivite analizi için kullanılan gama enerjileri

Radyum aktivitesini belirlemek için gama yayınlanma olasılıkları yüksek olan  $^{214}\text{Pb}$  ve  $^{214}\text{Bi}$  radyonüklitleri kullanılmıştır. Bu radyonüklitlerin gama ışını enerjileri, yayınlanma olasılıklarıyla birlikte  $^{214}\text{Pb}$  için % 35,60 351,5 keV,  $^{214}\text{Bi}$  için % 45,49 609,3 keV ve %14,91 1120,5 keV'dir.  $^{226}\text{Ra}$ 'nın 186,2 keV enerjili fotopiki  $^{235}\text{U}$  serisinden gelen 185,7 keV gama enerjisi ile aynı fotopik olarak gözlenir. Bu nedenle bu fotopik için Eşitlik 3.1 ile düzeltme yapmak gerekebilmektedir (Gilmore 2008, Yücel vd. 2009).

$$N_p [186,1 \text{ keV}, ^{226}\text{Ra}] \cong 0,571 \cdot N_p [185,7 \text{ keV } ^{235}\text{U} + 186,1 \text{ keV } ^{226}\text{Ra}] \quad (3.1)$$

Toryum aktivitesi, 911,2 keV ve 338,5 keV gama ışını enerjilerine sahip  $^{228}\text{Ac}$  ve 583,2 keV gama ışını enerjili  $^{208}\text{Tl}$  ile belirlenmiştir.

Potasyum aktivitesinin ölçümü için kullanılan gama enerjisi 1460,8 keV'dir ve bu fotopik için bazı durumlarda düzeltme yapılması gerekmektedir.  $^{40}\text{K}$  radyonüklitinin bu enerjisinde,  $^{232}\text{Th}$  serisinde bulunan  $^{228}\text{Ac}$  radyonüklitinin 1459,2 keV enerjili fotopiki aynı fotopik olarak gözlenmektedir ve çoğu durumda hata değeri %1'den küçük olmasına rağmen yüksek olduğu durumlar da söz konusudur (Groppi vd. 2005).  $^{40}\text{K}$  aktivitesindeki yüzde hata  $\varepsilon = 9,3 \times [A(^{232}\text{Th})/A(^{40}\text{K})]$  ile hesaplanır ve hatanın %1'den küçük olduğu durumlarda potasyum aktivitesindeki hata ihmal edilebilir (Groppi vd. 2005).  $^{40}\text{K}$  için düzeltilmiş aktivite  $A(^{40}\text{K}) - 0,093 \times A(^{232}\text{Th})$  ile verilir.

$^{137}\text{Cs}$ , yapay olarak elde edilen fisyon ürünüdür ve aktivite konsantrasyonu 661,7 keV'lik gama enerjisi kullanılarak hesaplanmaktadır.

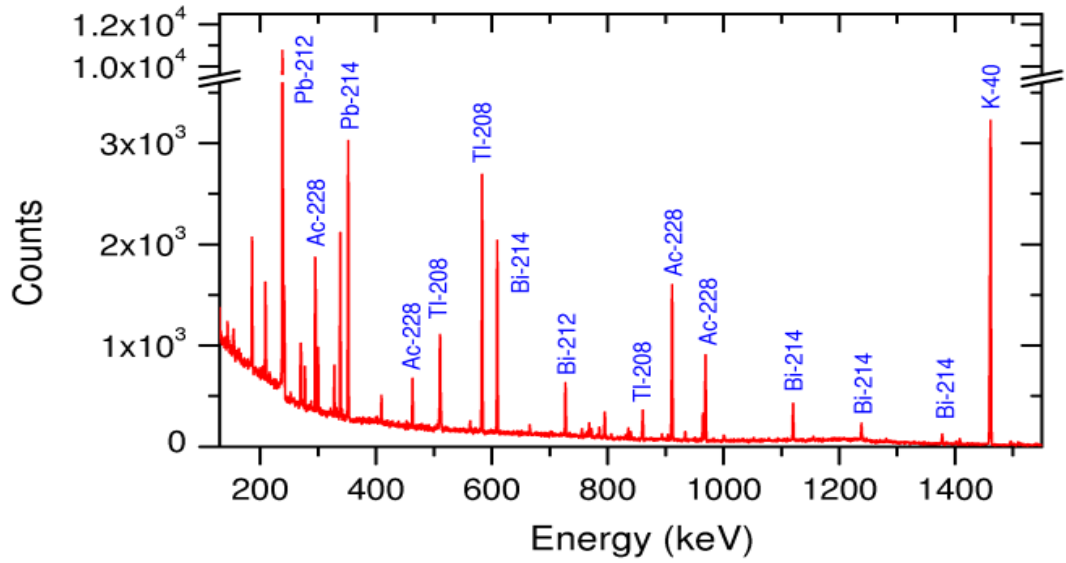
Çizelge 3.4'te numunelerde gözlenebilen bazı radyonüklitlerin yayınlanma olasılıkları ve gama ışını enerjileri verilmiştir. Şekil 3.8'de ise bir örnek teşkil etmesi açısından toprak numunelerde gözlenebilen gama ışını enerjileri verilmiştir.



Çizelge 3.4 Bazı radyonüklitlerin gama enerjileri ve yayınlanma olasılıkları

Nüklit	Enerji (keV)	Gama yayınlanma olasılığı* $f_\gamma$ (%)	
$^{40}\text{K}$	1460,8	10,55	
$^{238}\text{U}$ serisi	$^{214}\text{Bi}$	1764,3	15,31
		1120,5	14,91
		609,3	45,49
$^{214}\text{Pb}$		351,6	35,60
		295,0	18,41
$^{226}\text{Ra}$	186,2	3,555	
$^{232}\text{Th}$ serisi	$^{228}\text{Ac}$	969,2	15,90
		911,2	26,20
		338,5	11,40
$^{212}\text{Bi}$	727,4	6,65	
$^{208}\text{Tl}$	583,0	30,54	

\*Nucleide Lara database (<http://www.nucleide.org/Laraweb/index.php>, 2019)



Şekil 3.8 Toprak numunede gözlenebilen gama enerjileri ([http://www-np.ucy.ac.cy/radio\\_isotopes/wwwen/gamma/gamma\\_setup.html](http://www-np.ucy.ac.cy/radio_isotopes/wwwen/gamma/gamma_setup.html), 2019)

### 3.2.4 Aktivite ölçümü

Gama ışınları yayınlayan numunelerdeki radyonüklitlerin aktivitelerinin belirlenmesi için iki yöntem kullanılmaktadır. Doğrudan ve standartla karşılaştırma yöntemi ile numunelerin aktiviteleri belirlenebilmektedir.

Doğrudan aktivite hesabında numunedeki ilgilenilen enerjideki aktivite;

$$A = \frac{\left[ \frac{N_p}{t_c} - \frac{N_d}{t_d} \right]}{\varepsilon(E) \cdot f_\gamma(E) \cdot m} \cdot K \quad (3.2)$$

eşitliği ile verilmektedir (Yücel 2009). Burada  $N_p$ , numunenin ilgilenilen enerjide Compton sürekliliği çıkarılmış net sayımı;  $t_c$ , numunenin sayım süresi (s);  $N_d$ , doğal fon spektrumunda elde edilen ilgilenilen enerjide Compton sürekliliği çıkarılmış net sayımı;  $t_d$  doğal fon için sayım süresi (s);  $f_\gamma(E)$ , ilgilenilen enerjinin gama ışını yayınlama olasılığı;  $\varepsilon(E)$ , ilgilenilen enerjide fotopik verimi,  $m$  numune miktarı (kg),  $K$  ise düzeltme faktörlerinin bir bileşimidir.

Bu tez çalışmasında numunelerin aktiviteleri standartla karşılaştırma yöntemi ile hesaplanmıştır. Numunenin aktivitesini belirlemede kullanılan bu yöntemde, hazırlanan numuneler ile aynı geometride olan standart kaynaklar kullanılmaktadır. Numunedeki radyonüklitlerin aktivitesini belirlemek için standart kaynak ve numunenin sayım hızları oranlanarak bir hesaplama yapılmaktadır. Oranlama sonucunda dedektörün verimini içeren terim ortadan kalktığından dedektör verimi kullanılmamaktadır.

Numunelerin ilgilenilen enerjilerdeki aktiviteleri;

$$A_x = A_s \cdot \frac{\left[ \frac{N_p^x}{t_x} - \frac{N_d}{t_d} \right]}{\left[ \frac{N_p^s}{t_s} - \frac{N_d}{t_d} \right]} \cdot \frac{m_s}{m_x} \cdot \frac{K_x}{K_s} \quad (3.3)$$

eşitliğinden hesaplanmaktadır (Yücel 2009). Burada  $A_s$  standart kaynağın aktivitesi (Bq);  $N_p^x$  numunenin ilgilenilen enerjide Compton sürekliliği çıkarılmış net sayımı;  $t_x$  numunenin sayım süresi (s);  $N_d$  doğal fon spektrumunda elde edilen ilgilenilen enerjide Compton sürekliliği çıkarılmış net sayımı;  $t_d$  doğal fon için sayım süresi (s);  $N_p^s$  standardın ilgilenilen enerjide Compton sürekliliği çıkarılmış net sayımı;  $t_s$  standardın sayım süresi (s);  $m_s$  standart ağırlığı (kg);  $m_x$  numune ağırlığı (kg);  $K_x$  numune için düzeltme faktörlerinin bileşimi ve  $K_s$  standart için düzeltme faktörlerinin bir bileşimidir.

### 3.2.4.1 Aktivite ölçümlerinde kullanılan belirsizlik hesaplamaları

Standartla karşılaştırma yöntemi kullanılarak belirlenen aktivitedeki belirsizlik;

$$u(A_x) = A_x \cdot \sqrt{\left(\frac{u(N_p^x)}{N_p^x}\right)^2 + \left(\frac{u(N_p^s)}{N_p^s}\right)^2 + \left(\frac{u(A_s)}{A_s}\right)^2 + \left(\frac{u(m_x)}{m_x}\right)^2 + \left(\frac{u(m_s)}{m_s}\right)^2 + \left(\frac{u(K_x)}{K_x}\right)^2 + \left(\frac{u(K_s)}{K_s}\right)^2} \quad (3.4)$$

eşitliği ile hesaplanır (Yücel 2009). Burada  $A_x$  numunenin aktivitesi;  $N_p^x$  numunede ilgilenilen enerjide doğal fon ve Compton sürekliliği çıkarılan net sayımı;  $u(N_p^x)$  numunenin net sayımındaki belirsizlik;  $N_p^s$  standartta ilgilenilen enerjide doğal fon ve Compton sürekliliği çıkarılan net sayımı;  $u(N_p^s)$  standardın net sayımındaki belirsizlik;  $A_s$  standardın aktivitesi;  $u(A_s)$  standart aktivitesindeki belirsizlik;  $m_x$  numune ağırlığı;  $u(m_x)$  numune miktarındaki belirsizlik;  $m_s$  standart ağırlığı;  $u(m_s)$  standart miktarındaki belirsizlik;  $K_x$  numune için düzeltme faktörlerinin bileşimi;  $u(K_x)$  numune için düzeltme faktörlerinin bileşimindeki belirsizlik;  $K_s$  standart için düzeltme faktörlerinin bileşimi;  $u(K_s)$  standart için düzeltme faktörlerinin bileşimindeki belirsizliktir.

Standart kaynakların ve hazırlanan numunelerin ağırlıklarındaki belirsizlik, AND marka elektronik terazi için;

$$u(m) = [0,0002 + 0,0001215 \times m(g)]/2 \quad (3.5)$$

eşitliğinden hesaplanır.

Standartla karşılaştırma yönteminde kullanılan, Gama Spektroskopisi Laboratuvarında mevcut olan referans standart kaynaklar Çizelge 3.5'te verilmiştir.

Çizelge 3.5 Kullanılan Standart Kaynaklar

Standart Kaynak	Nüklit	Aktivite/Derişim $A \pm u(A)^*$
IAEA -RGK-1	$^{40}\text{K}$	$\% 44,8 \pm 0,3$
IAEA -RGU-1	$^{238}\text{U}$	$400 \pm 2 \mu\text{g g}^{-1}$
IAEA -RGTh-1	$^{232}\text{Th}$	$800 \pm 16 \mu\text{g g}^{-1}$
IAEA-TEL-PT Sample 04	$^{137}\text{Cs}$	$64,9 \pm 1,2 \text{Bq kg}^{-1}$

\*Belirsizlikler %95 güven aralığında verilmiştir.

### 3.2.5 Enerji kalibrasyonu

Dedektörde foton enerjilerine göre elde edilen pulslar, yüksekliklerine bağlı olarak ADC tarafından sıralanıp çok kanallı analizörde, her bir gama enerjisinin değeri bir kanala karşılık gelecek şekilde sayım olarak kaydedilir. Ancak dedektörün yüksek çalışma gerilimi ve yükseltecin kazanç ayarı nedeniyle her bir kanala karşı gelen enerji değeri değişmektedir (Yücel 2009). Bu nedenle, enerji kalibrasyonu yapılması gerekmektedir. Enerji kalibrasyonu, enerjisi bilinen standart kaynaklar kullanılarak gerçekleştirilir. Çizelge 3.6'de enerji kalibrasyonunda kullanılan kaynaklar gösterilmektedir.

Çizelge 3.6 Enerji kalibrasyonunda kullanılan standart kaynaklar

Radyonüklit	Enerji (keV)
$^{60}\text{Co}$	1173,23 1332,49
$^{137}\text{Cs}$	661,66
$^{57}\text{Co}$	122,06 136,47
$^{241}\text{Am}$	59,54

Çizelge 3.6 Enerji kalibrasyonunda kullanılan standart kaynaklar (devam)

$^{109}\text{Cd}$	88,03
$^{54}\text{Mn}$	834,85
$^{65}\text{Zn}$	1115,54
$^{22}\text{Na}$	1274,54

### 3.2.6 Aktivite konsantrasyonları kullanılarak hesaplanabilen nicelikler

Numunelerde bulunan  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  aktivite konsantrasyonlarının farklı olması nedeniyle tek bir parametre ile belirlenmesi amacıyla radyum eşdeğer aktivitesi hesaplanmaktadır.

Radyum eşdeğer aktivitesi;

$$Ra_{eq}(Bq/kg) = A_{Ra} + 1,43 \cdot A_{Th} + 0,077 \cdot A_K \quad (3.6)$$

eşitliğinden hesaplanır. Burada  $A_{Ra}$ ,  $A_{Th}$  ve  $A_K$  sırasıyla radyum, toryum ve potasyum aktivite konsantrasyonlarıdır. Radyum eşdeğer aktivitesi için tavsiye edilen sınır değer  $370 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ 'dir (NEA-OECD 1979).

Açık havada 1 metre yükseklikteki soğurulan gama doz hızı D;

$$D(nGy/saat) = 0,462 \cdot A_{Ra} + 0,604 \cdot A_{Th} + 0,0417 \cdot A_K \quad (3.7)$$

eşitliğinden hesaplanır. Burada 0,462, 0,604 ve 0,0417 sırasıyla  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  aktivite konsantrasyonları için doz katsayılarıdır ( $\text{nGy} \cdot \text{saat}^{-1}/\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) (UNSCEAR 2000 Raporu).

Yetişkin bir kişinin gama ışınları nedeniyle açık havada alacağı yıllık etkin doz eşdeğeri;

$$YEDE (\mu Sv/y) = D (nGy/saat) \times 8760 (saat/yıl) \times 0,2 \times 0,7 (Sv/Gy) \times 10^{-3} \quad (3.8)$$

eşitliği ile hesaplanır (UNSCEAR 2000 Raporu). Burada 0,2 açık havadaki meşguliyet faktörüdür; 0,7 ise soğurulan dozun etkin doza dönüşüm katsayısıdır (Sv/Gy).



## 4. BULGULAR

### 4.1 Binalarda Ölçülen Radon Gazı Konsantrasyonları

Yapılan bu çalışmada, özellikle bodrum ve zemin katlarda bulunan gün içerisinde kullanılan ofis ve laboratuvarlarda radon konsantrasyonları ölçülmüştür. Radon gazı dedektörünün temini Nisan 2018 tarihinde gerçekleştiği için, tez süresi kapsamında daha fazla ortamda radon gazı konsantrasyonunu belirleyebilmek için 15 günlük ve 7 günlük kısa süreli ölçümler alınmıştır. Ankara Üniversitesi 10. Yıl Yerleşkesi içerisinde bulunan binalarda Mayıs 2018 - Temmuz 2019 tarihleri arasında yapılan 15 günlük ölçümlerden elde edilen sonuçlar Çizelge 4.1'de verilmiştir. Çizelge 4.1'de ortalama radon konsantrasyonları ile birlikte her bir ölçüm alanı için en yüksek radon konsantrasyonları, ortamın sıcaklık, nem ve basınç parametreleri de verilmektedir. Şekil 4.1'de tüm ofis ve laboratuvarlarda farklı mevsimlerde ölçülen radon konsantrasyonları verilmiştir.

Radon gazı konsantrasyonunun mevsimsel değişimini gözlemleyebilmek için yedi ofis ve laboratuvarlarda farklı aylarda birer haftalık ölçümler alınmıştır, Çizelge 4.2. Yapılan çalışmalarda, genelde en yüksek radon konsantrasyonlarının kış ve sonbahar aylarında, en düşük konsantrasyonların ise ilkbahar ve yaz aylarında olduğu belirlenmiştir. Şekil 4.2'de mevsimsel değişimleri gözlemek için farklı mevsimlerde ölçülen radon konsantrasyonları verilmiştir.

Radon ve bozunumu sonucu oluşan ürünleri nedeniyle solunum yoluyla alınan yıllık etkin doz hesaplamaları bazı özel birimler kullanılarak yapılmaktadır. International Commission on Radiological Protection 65 (ICRP Rapor No 65) ve United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 2000 (UNSCEAR 2000 Raporu) raporunda verilen değerlere göre radon gazının solunum ile alınan Yıllık Etkin Doz Eşdeğeri (YEDE) Eşitlik 4.1 ile hesaplanmaktadır. Yerleşke içerisinde ölçüm alınan ofis ve laboratuvarlardan elde edilen radon gazı konsantrasyonu kullanılarak hesaplanan yıllık etkin doz eşdeğerleri Çizelge 4.3'te verilmektedir. İşyerleri için, çalışan kişilerin

günde 8 saat olmak üzere bina içerisinde geçirdikleri süre 2000 saat/yıl olarak alınmıştır. Bu ICRP 65 raporunda da işyerleri için hesaplanan süredir.

$$YEDE = \text{Radon Konsantrasyonu (Bq/m}^3) \times F \times EEC \times t \quad (4.1)$$

Burada F, radon ve kısa ömürlü bozunma ürünleri arasındaki denge faktörüdür ve denge eşdeğer radon konsantrasyonunun radon gazı konsantrasyonuna oranı olarak tanımlanır (ICRP 65 Raporu). F değeri, kapalı ortam için 0,4; açık alanlar için 0,6 olarak verilmektedir (UNSCEAR 2000 Raporu). Denge eşdeğer radon konsantrasyonu (Equilibrium Equivalent Concentration, EEC), aynı potansiyel alfa enerjisine sahip kısa yarı ömürlü bozunum ürünleri ile radyoaktif dengede olan radonun aktivite konsantrasyonu olarak tanımlanır (UNSCEAR 2006 Raporu). Denge eşdeğer konsantrasyonu (EEC) Eşitlik 4.2 ile hesaplanmaktadır (UNSCEAR 2006 Raporu).

$$EEC (^{222}\text{Rn}) = 0,105 \cdot (^{218}\text{Po}) + 0,516 \cdot (^{214}\text{Pb}) + 0,379 \cdot (^{214}\text{Bi}) \quad (4.2)$$

Denge eşdeğer konsantrasyonunu etkin doza çevirme katsayısı,  $1 \text{ Bq} \cdot \text{saat} \cdot \text{m}^{-3}$  denge eşdeğer radon konsantrasyonunun solunması ile alınan etkin doz cinsinden 9 nSv olarak belirlenmiştir. Doz dönüşüm faktörü,  $9 \text{ nSv (Bq} \cdot \text{saat} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$  olarak ortalama etkin doz hesaplamalarında kullanılmaktadır (UNSCEAR 2000 Raporu). Şekil 4.3'te solunum yolu ile alınan, radondan kaynaklanan tahmini yıllık etkin doz eşdeğerleri verilmektedir.

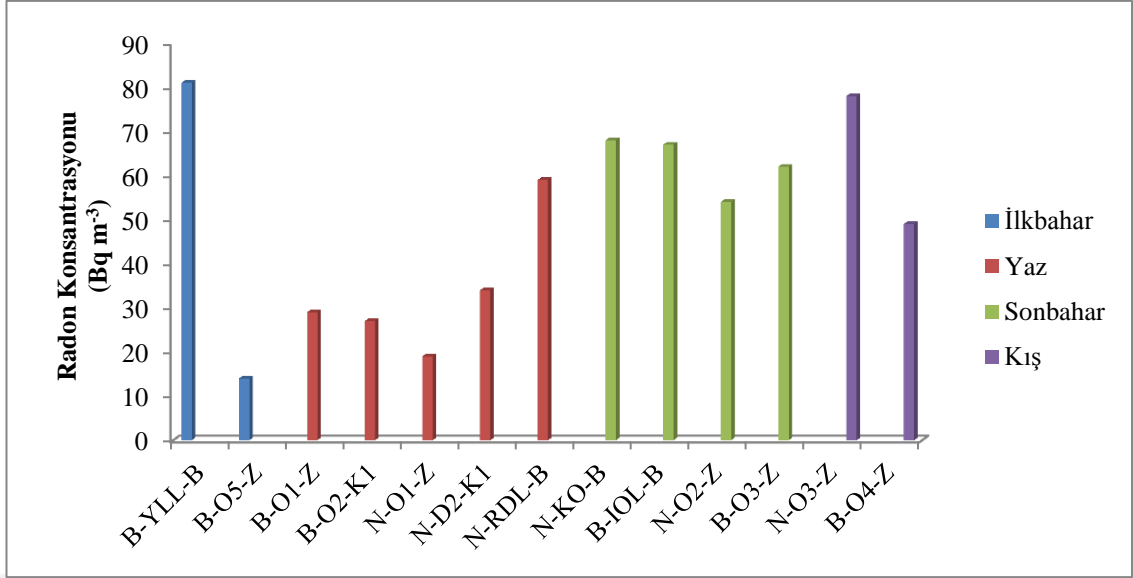


Çizelge 4.1 15 günlük ölçümler sonucunda elde edilen radon gazı konsantrasyonları

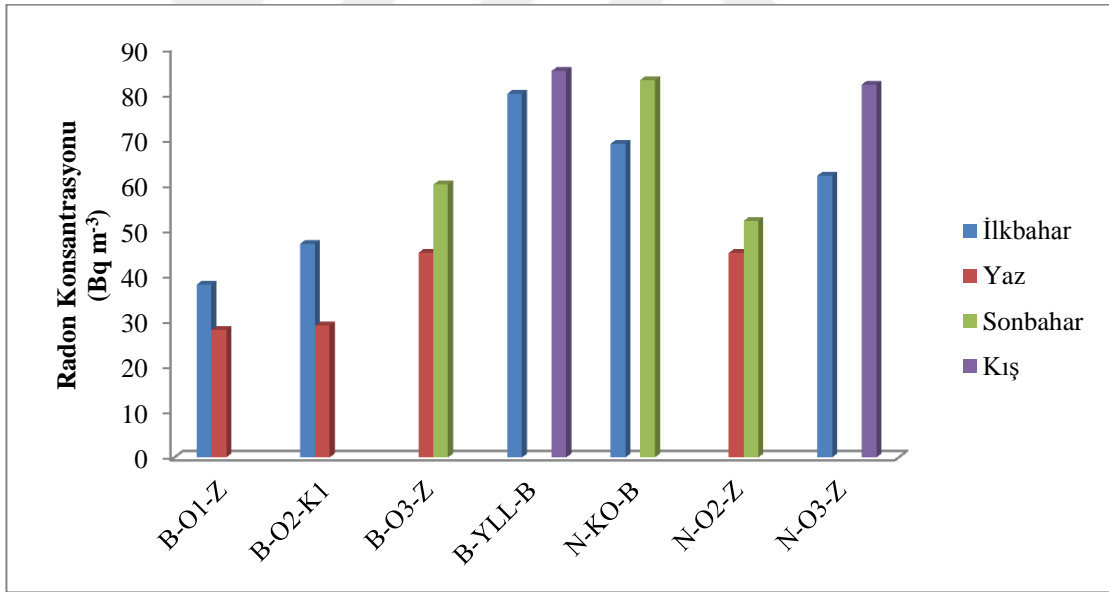
Konum*	Kod	Kat**/ Oda Hacmi (m <sup>3</sup> )	Tarih	En Yüksek Radon Konsantrasyonu (Bq/m <sup>3</sup> )	Ortalama Radon Konsantrasyonu (Bq/m <sup>3</sup> )	Sıcaklık (°C)	Nem (RH%)	Basınç (mbar)
YLLab/B	B-YLL-B	B/144	Mayıs'18	383	81 ± 12	20,1	51	916,7
BKOfis/B	B-O1-Z	Z/60	Haziran'18	214	29 ± 7	25,1	40	912,3
BYOfis/B	B-O2-K1	1/64	Temmuz'18	272	27 ± 7	29,6	31	911,6
EŞOfis/N	N-O1-Z	Z/36	Temmuz'18	263	19 ± 7	25,5	44	910,8
TAEKD2/N	N-D2-K1	1/146	Ağustos'18	271	34 ± 8	27,8	32	914,5
KO/N	N-KO-B	B/23	Eylül'18	442	68 ± 12	22,4	73	915,7
IOLab/B	B-IOL-B	B/41	Eylül'18	413	67 ± 11	22,1	39	919,3
NMOfis/N	N-O2-Z	Z/71	Ekim'18	355	54 ± 10	20,7	51	917,0
NMOfis/B	B-O3-Z	Z56	Kasım'18	271	62 ± 11	16,8	38	919,5
AKOfis/N	N-O3-Z	Z/58	Aralık'18	324	78 ± 12	21,3	27	918,4
AUYOfis/B	B-O4-Z	Z/59	Ocak-Şubat'19	411	49 ± 9	22,7	23	914,4
AKOfis/B	B-O5-Z	Z/60	Nisan'19	155	14 ± 6	21,4	26	916,0
RDLab/N	N-RDL-B	B/94	Haziran'19	248	59 ± 10	22,0	55	915,9

\*N: Nükleer Bilimler Enstitüsü, B: Fen Fakültesi B Blok

\*\*B: Bodrum kat, Z: Zemin kat



Şekil 4.1 Farklı mevsimlerde tüm ofis ve laboratuvarlarda ölçülen radon gazı konsantrasyonları



Şekil 4.2 Farklı mevsimlerde aynı ofis ve laboratuvarlarda ölçülen radon gazı konsantrasyonları

Çizelge 4.2 Mevsimsel değişikliklerin gözlenebilmesi için farklı mevsimlerde aynı ofis ve laboratuvarlarda ölçülen radon konsantrasyonları

Konum	Kod	Kat/ Oda Hacmi (m <sup>3</sup> )	Tarih	En Yüksek Radon Konsantrasyon (Bq/m <sup>3</sup> )	Ortalama Radon Konsantrasyonu (Bq/m <sup>3</sup> )	Sıcaklık (°C)	Nem (RH%)	Basınç (mbar)
YLLab/B	B-YLL-B	B/144	Mayıs'18	383	80 ± 14	19,7	49	918,1
			Şubat'19	339	85 ± 11	21,6	23	916,9
BKOfis/B	B-O1-Z	Z/60	Haziran'18	214	28 ± 9	24,7	41	912,2
			Mart'19	210	38 ± 10	25,3	21	916,9
BYOfis/B	B-O2-K1	1/64	Temmuz'18	272	29 ± 9	28,8	33	912,2
			Mart'19	259	47 ± 11	23,7	21	919,2
KO/N	N-KO-B	B/23	Eylül'18	442	83 ± 15	23,2	74	915,5
			Mayıs'19	440	69 ± 12	18,1	59	914,6
NMOfis/N	N-O2-Z	Z/71	Ekim'18	199	52 ± 11	21,7	49	919,7
			Haziran'19	264	45 ± 10	24,4	51	915,7
NMOfis/B	B-O3-Z	Z/56	Kasım'18	271	60 ± 13	16,3	39	920,5
			Haziran'19	321	45 ± 11	24,6	47	912,8
AKOfis/N	N-O3-Z	Z/58	Aralık'18	274	82 ± 15	20,9	33	919,2
			Nisan'19	397	62 ± 12	19,9	25	913,2

\*N: Nükleer Bilimler Enstitüsü, B: Fen Fakültesi B Blok

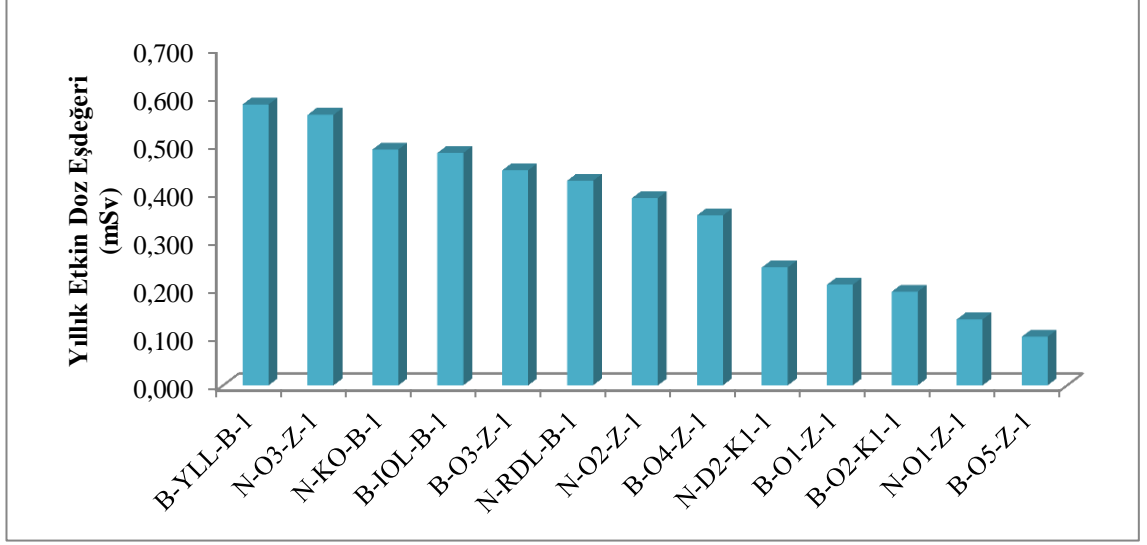
\*\*B: Bodrum kat, Z: Zemin kat

Çizelge 4.3 Yıllık etkin doz eşdeğerleri

Konum	Kod	Bina Yapısı	Ortalama Radon Konsantrasyonu (Bq/m <sup>3</sup> )	Yıllık Etkin Doz Eşdeğeri (mSv), Eşitlik (4.1)	
				1000 saat	2000 saat
YLLab/B	B-YLL-B	Betonarme	81 ± 12	0,292	0,583
BKOfis/B	B-O1-Z	Betonarme	29 ± 7	0,104	0,209
BYOfis/B	B-O2-K1	Betonarme	27 ± 7	0,097	0,194
EŞOfis/N	N-O1-Z	Betonarme	19 ± 7	0,068	0,137
TAEKD2/N	N-D2-K1	Betonarme	34 ± 8	0,122	0,245
KO/N	N-KO-B	Betonarme	68 ± 12	0,245	0,490
IOLab/B	B-IOL-B	Betonarme	67 ± 11	0,241	0,482
NMOfis/N	N-O2-Z	Betonarme	54 ± 10	0,194	0,389
NMOfis/B	B-O3-Z	Betonarme	62 ± 11	0,223	0,446
AKOfis/N	N-O3-Z	Betonarme	78 ± 12	0,281	0,562
AUYOfis/B	B-O4-Z	Betonarme	49 ± 9	0,176	0,353
AKOfis/B	B-O5-Z	Betonarme	14 ± 6	0,050	0,101
RDLab/N	N-RDL-B	Betonarme	59 ± 10	0,212	0,425

\*N: Nükleer Bilimler Enstitüsü, B: Fen Fakültesi B Blok

\*\*B: Bodrum kat, Z: Zemin kat



Şekil 4.3 Solunum yolu ile alınan, radondan kaynaklanan tahmini yıllık etkin doz eşdeğerleri

#### 4.2 Gama Spektrometresi ile Elde Edilen Aktivite

En az dört hafta bekletilen numunelerin radyoaktivite konsantrasyonlarının belirlenebilmesi için HPGe dedektörü yardımıyla ölçümleri alınmıştır. Analiz için seçilen gama ışını enerjilerinin özellikleri Çizelge 4.4, 4.5 ve 4.6’da verilmiştir.

Çizelge 4.4 IODS1 toprak numunesinde kullanılan gama enerjileri ve aktivite konsantrasyonları

IODS1	Enerji (keV)	Gama yayınlanma olasılığı* f <sub>γ</sub> (%)	Aktivite (Bq kg <sup>-1</sup> ) Eşitlik (3.3-4)
<sup>40</sup> K	1460,8	10,55	371,66 ± 13,10
<sup>238</sup> U serisi			
<sup>214</sup> Bi	1120,5	14,91	21,31 ± 3,61
<sup>214</sup> Bi	609,3	45,49	27,72 ± 1,87
<sup>214</sup> Pb	351,9	35,60	26,89 ± 1,96
<sup>226</sup> Ra	186,2	3,555	23,45 ± 3,22
<sup>232</sup> Th serisi			
<sup>228</sup> Ac	911,2	26,2	35,42 ± 5,46
<sup>208</sup> Tl	583,2	85,0	36,44 ± 5,03
<sup>228</sup> Ac	338,3	11,4	39,91 ± 2,23

\*Nucleide Lara database (<http://www.nucleide.org/Laraweb/index.php>, 2019)

Çizelge 4.5 NKD1 toprak numunesinde kullanılan gama enerjileri ve aktivite konsantrasyonları

NKD1	Enerji (keV)	Gama yayınlanma olasılığı* f <sub>γ</sub> (%)	Aktivite (Bq kg <sup>-1</sup> ) Eşitlik (3.3-4)
<sup>40</sup> K	1460,8	10,55	400,58 ± 13,74
<sup>238</sup> U serisi			
<sup>214</sup> Bi	1120,5	14,91	24,21 ± 3,85
<sup>214</sup> Bi	609,3	45,49	24,57 ± 1,66
<sup>214</sup> Pb	351,9	35,60	24,32 ± 1,77
<sup>226</sup> Ra	186,2	3,555	12,05 ± 1,64
<sup>232</sup> Th serisi			
<sup>228</sup> Ac	911,2	26,2	35,55 ± 5,45
<sup>208</sup> Tl	583,2	85,0	33,88 ± 4,67
<sup>228</sup> Ac	338,3	11,4	32,74 ± 1,89

\*Nucleide Lara database (<http://www.nucleide.org/Laraweb/index.php>, 2019)

Çizelge 4.6 Ankara taşı için kullanılan gama enerjileri ve aktivite konsantrasyonları

Ankara Taşı	Enerji (keV)	Gama yayınlanma olasılığı* f <sub>γ</sub> (%)	Aktivite (Bq kg <sup>-1</sup> ) Eşitlik (3.3-4)
<sup>40</sup> K	1460,8	10,55	508,10 ± 16,66
<sup>238</sup> U serisi			
<sup>214</sup> Bi	1120,5	14,91	18,53 ± 2,98
<sup>214</sup> Bi	609,3	45,49	19,83 ± 1,34
<sup>214</sup> Pb	351,9	35,60	19,79 ± 1,44
<sup>226</sup> Ra	186,2	3,555	8,97 ± 1,27
<sup>232</sup> Th serisi			
<sup>228</sup> Ac	911,2	26,2	36,00 ± 5,47
<sup>208</sup> Tl	583,2	85,0	37,28 ± 5,09
<sup>228</sup> Ac	338,3	11,4	33,14 ± 1,80

\*Nucleide Lara database (<http://www.nucleide.org/Laraweb/index.php>, 2019)

Çizelge 4.7 CT1 kaldırım taşı taşı için kullanılan gama enerjileri ve aktivite konsantrasyonları

CT1	Enerji (keV)	Gama yayınlanma olasılığı* f <sub>γ</sub> (%)	Aktivite (Bq kg <sup>-1</sup> ) Eşitlik (3.3-4)
<sup>40</sup> K	1460,8	10,55	80,18 ± 3,45
<sup>238</sup> U serisi			
<sup>214</sup> Bi	1120,5	14,91	3,93 ± 0,95
<sup>214</sup> Bi	609,3	45,49	5,91 ± 0,50
<sup>214</sup> Pb	351,9	35,60	6,46 ± 0,55
<sup>226</sup> Ra	186,2	3,555	2,70 ± 0,44
<sup>232</sup> Th serisi			
<sup>228</sup> Ac	911,2	26,2	3,22 ± 0,72
<sup>208</sup> Tl	583,2	85,0	5,56 ± 0,88
<sup>228</sup> Ac	338,3	11,4	5,04 ± 1,16

\*Nucleide Lara database (<http://www.nucleide.org/Laraweb/index.php>, 2019)

Çizelge 4.8 CT2 kaldırım taşı taşı için kullanılan gama enerjileri ve aktivite konsantrasyonları

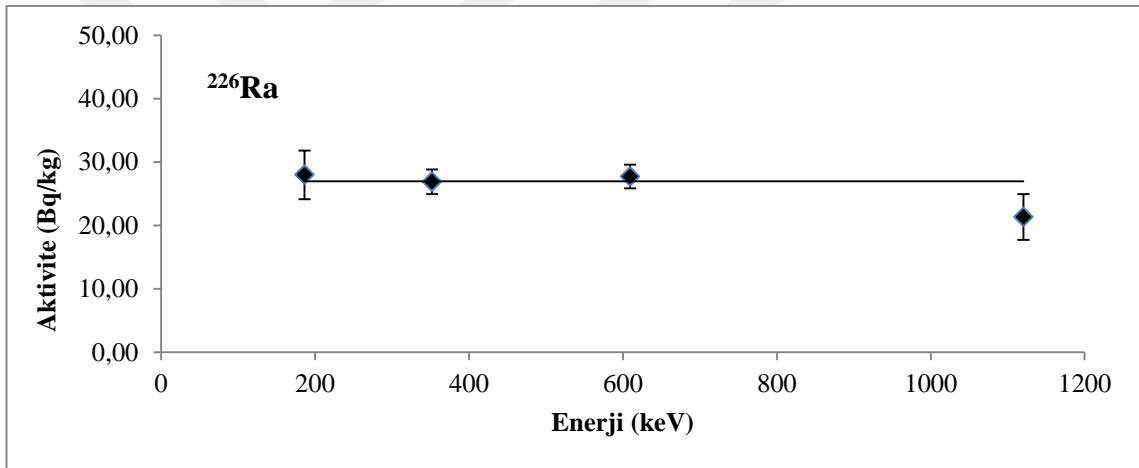
CT2	Enerji (keV)	Gama yayınlanma olasılığı* f <sub>γ</sub> (%)	Aktivite (Bq kg <sup>-1</sup> ) Eşitlik (3.3-4)
<sup>40</sup> K	1460,8	10,55	88,62 ± 3,38
<sup>238</sup> U serisi			
<sup>214</sup> Bi	1120,5	14,91	10,24 ± 1,63
<sup>214</sup> Bi	609,3	45,49	10,67 ± 2,21
<sup>214</sup> Pb	351,9	35,60	10,82 ± 0,79
<sup>226</sup> Ra	186,2	3,555	4,89 ± 0,65
<sup>232</sup> Th serisi			
<sup>228</sup> Ac	911,2	26,2	10,68 ± 1,68
<sup>208</sup> Tl	583,2	85,0	9,04 ± 1,29
<sup>228</sup> Ac	338,3	11,4	10,47 ± 6,27

\*Nucleide Lara database (<http://www.nucleide.org/Laraweb/index.php>, 2019)

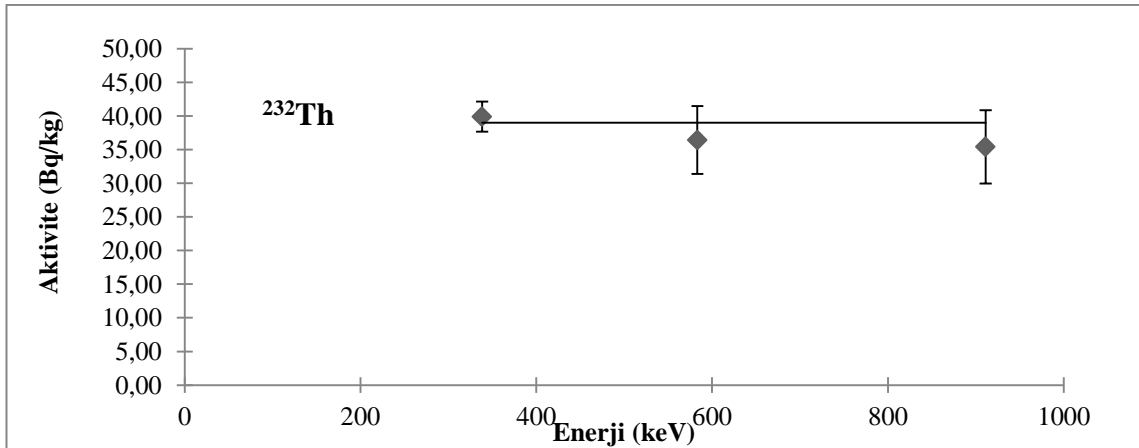
Numunelerdeki  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  radyonüklitlerin aktivite konsantrasyonları ağırlıklı ortalamaları alınarak hesaplanmıştır. Hesaplamalar Çizelge 4.9'da verilmiştir. Bu radyonüklitlerin dışında üç numunede  $^{137}\text{Cs}$ 'ye rastlanmıştır ve aktivite konsantrasyonları hesaplanmıştır.

Aktivite konsantrasyon değerleri kullanılarak radyum eşdeğer aktiviteleri, açık havada soğurulan gama doz hızı ve yıllık etkin doz eşdeğerleri hesaplanarak Çizelge 4.10'da verilmiştir.

Şekil 4.4-13'te numunelerin  $^{226}\text{Ra}$  ve  $^{232}\text{Th}$  aktivite konsantrasyonlarının ağırlıklı ortalamaları verilmiştir.

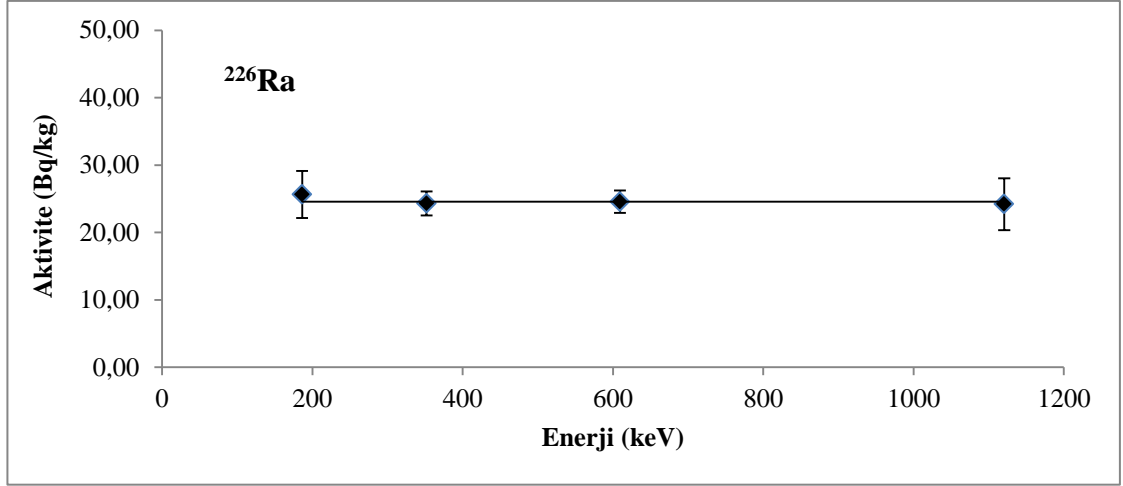


Şekil 4.4 IODS1 toprak numunesindeki  $^{226}\text{Ra}$  aktivite konsantrasyonu

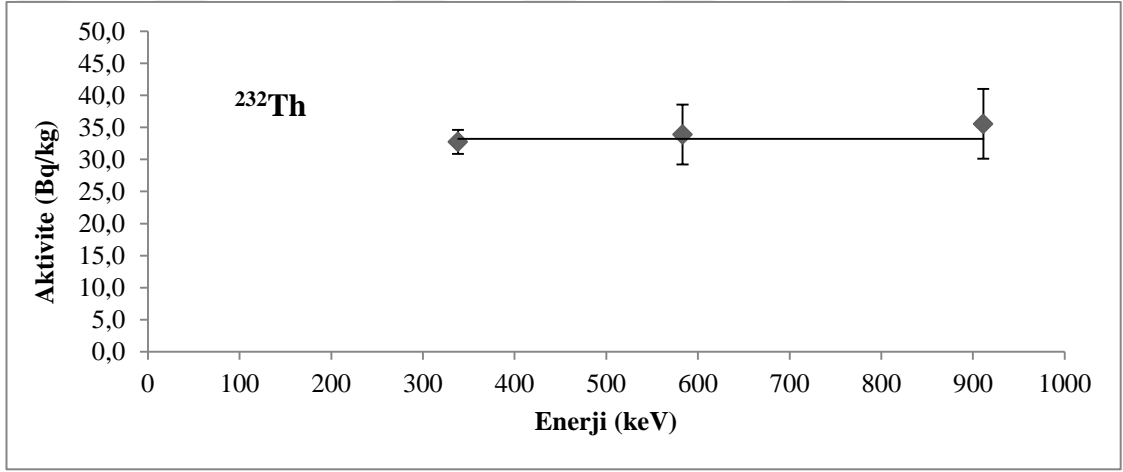


Şekil 4.5 IODS1 toprak numunesindeki  $^{232}\text{Th}$  aktivite konsantrasyonu

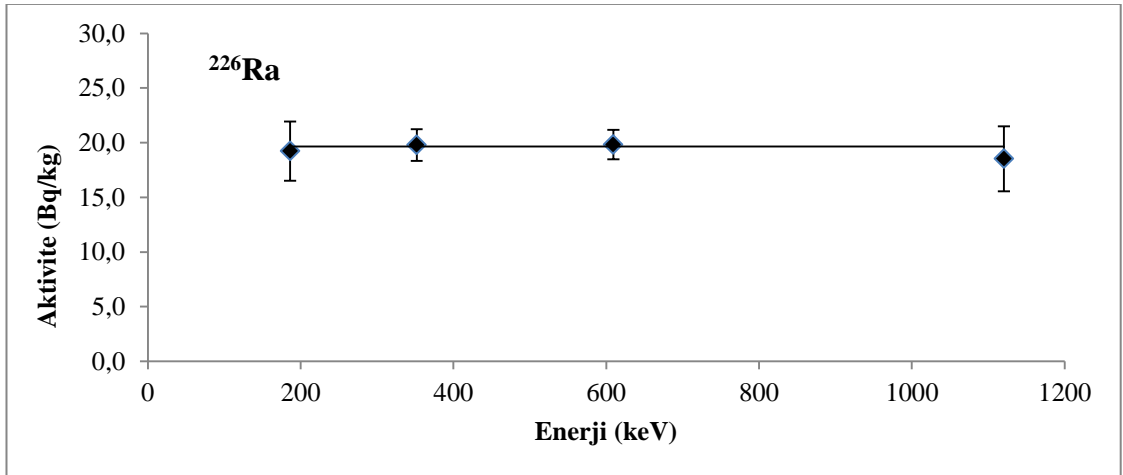




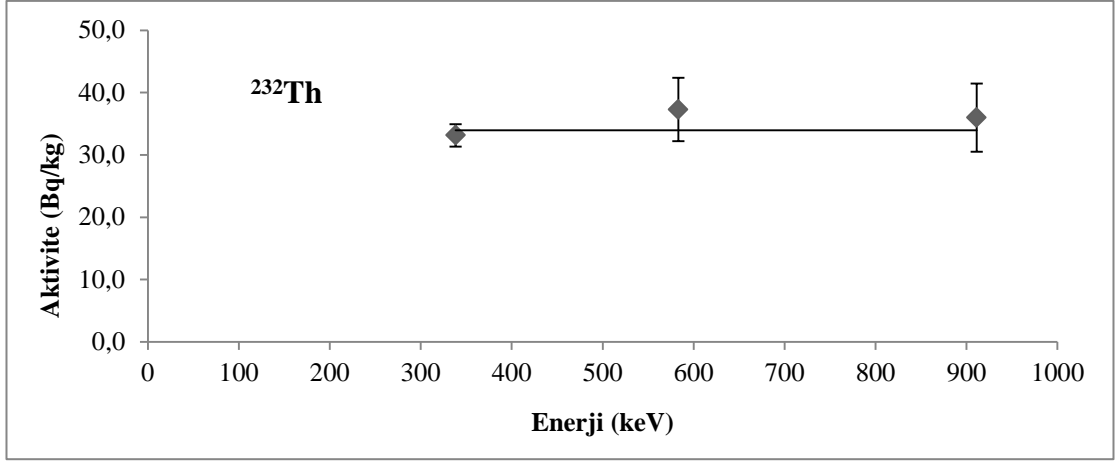
Şekil 4.6 NKD1 toprak numunesindeki  $^{226}\text{Ra}$  aktivite konsantrasyonu



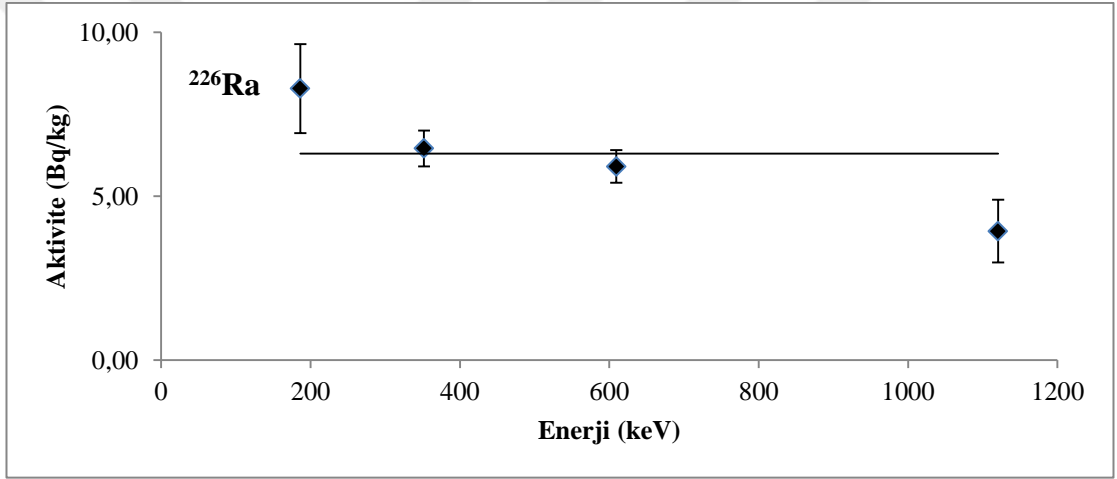
Şekil 4.7 NKD1 toprak numunesindeki  $^{232}\text{Th}$  aktivite konsantrasyonu



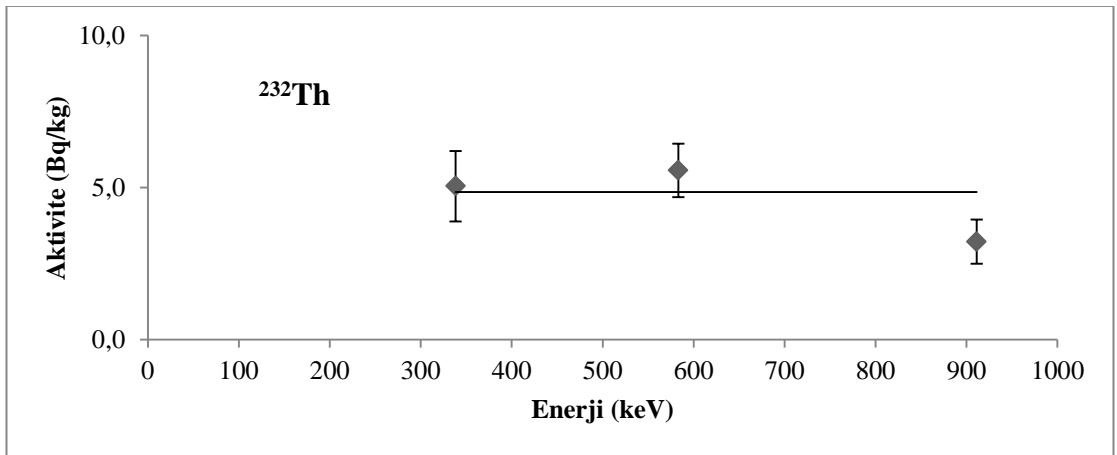
Şekil 4.8 Ankara taşı numunesindeki  $^{226}\text{Ra}$  aktivite konsantrasyonu



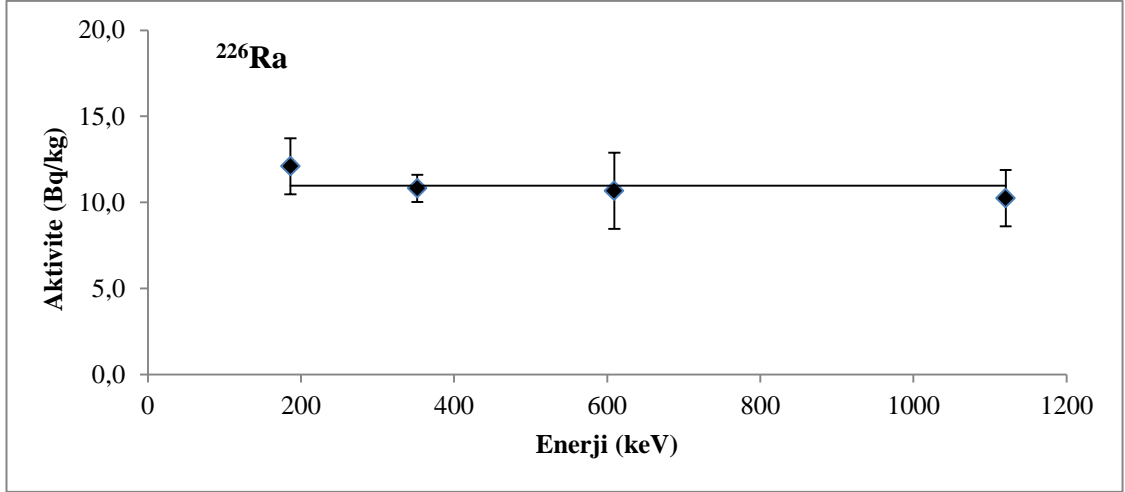
Şekil 4.9 Ankara taşı numunesindeki  $^{232}\text{Th}$  aktivite konsantrasyonu



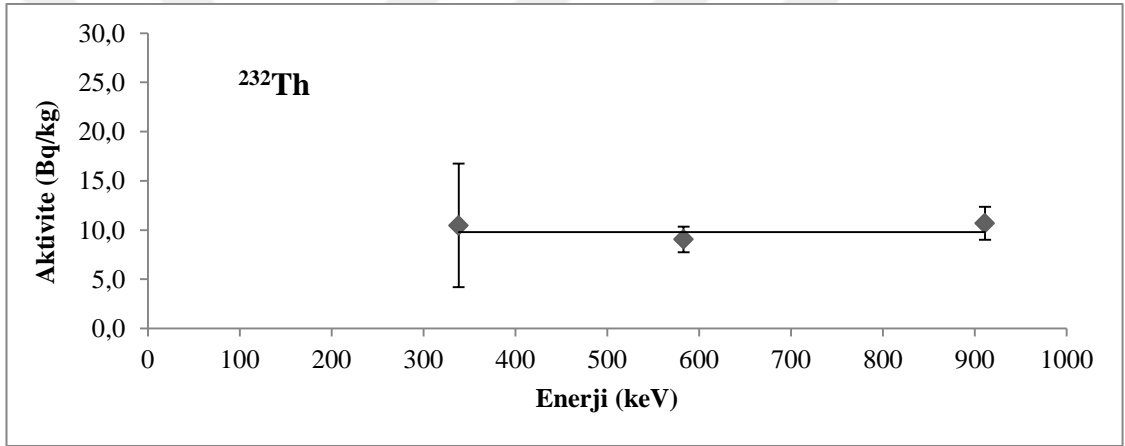
Şekil 4.10 CT1 taşı numunesindeki  $^{226}\text{Ra}$  aktivite konsantrasyonu



Şekil 4.11 CT1 taşı numunesindeki  $^{232}\text{Th}$  aktivite konsantrasyonu



Şekil 4.12 CT2 taş numunesindeki <sup>226</sup>Ra aktivite konsantrasyonu



Şekil 4.13 CT2 taş numunesindeki <sup>232</sup>Th aktivite konsantrasyonu

Çizelge 4.9 Silindirik geometride numunelerdeki aktivite konsantrasyonları

Numune Kodu	Numune Tipi	Aktivite Konsantrasyonları (Bq/kg)			
		<sup>226</sup> Ra	<sup>232</sup> Th	<sup>40</sup> K	<sup>137</sup> Cs
IODS1	Toprak	26,98 ± 1,21	39,01 ± 4,92	371,66 ± 13,10	8,33 ± 0,44
NKD1	Toprak	24,56 ± 1,10	33,19 ± 1,67	400,58 ± 13,74	3,17 ± 0,31
Ankara Andezit Taşı	Yapı malzemesi	19,65 ± 0,88	33,93 ± 1,63	508,10 ± 16,66	0,95 ± 0,23
CT1	Parke taşı	6,30 ± 0,34	4,85 ± 0,55	80,18 ± 3,45	-
CT2	Parke taşı	10,97 ± 0,63	9,80 ± 1,02	88,63 ± 3,34	-

Minimum detectable activity (MDA) : <2 Bq/kg <sup>226</sup>Ra, <3 Bq/kg <sup>232</sup>Th, <7 Bq/kg <sup>40</sup>K (Gökmen 2014)

\* Belirsizlikler ±2σ aralığında verilmiştir.

Çizelge 4.10 Radyum eşdeğer aktivitesi ( $Ra_{eq}$ ), soğurulan gama doz hızı (D) ve yıllık etkin doz eşdeğeri (YEDE)

<b>Numune Kodu</b>	<b>Numune Tipi</b>	<b><math>Ra_{eq}</math> (Bq/kg)</b>	<b>D (nGy/saat)</b>	<b>YEDE (<math>\mu</math>Sv/y)</b>
IODS1	Toprak	111,39	51,53	63,19
NKD1	Toprak	102,87	48,10	58,99
Ankara Andezit Taşı	Yapı malzemesi	107,30	50,76	62,26
CT1	Parke Taşı	19,41	9,18	11,26
CT2	Parke taşı	31,88	14,72	18,06

Tez çalışması kapsamında, radon gazı konsantrasyonlarının belirlenmesinin yanı sıra yerleşke içerisinde iki noktadan alınan toprak numuneleri ile yerleşke içerisinde kullanılan üç farklı taş numunenin içeriğindeki uranyum, toryum ve potasyum aktiviteleri gama spektrometresi yöntemi ile belirlenmiştir. Toprak numunelerdeki  $^{226}\text{Ra}$  aktivite konsantrasyonları  $26,98 \pm 1,21$  Bq/kg ve  $24,56 \pm 1,10$  Bq/kg,  $^{232}\text{Th}$  aktivite konsantrasyonları  $39,01 \pm 4,92$  Bq/kg ve  $33,19 \pm 1,67$  Bq/kg,  $^{40}\text{K}$  aktivite konsantrasyonları  $371,66 \pm 13,10$  Bq/kg ve  $400,58 \pm 13,74$  Bq/kg olarak bulunmuştur. İki toprak numunesindeki  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  aktivite konsantrasyonları, UNSCEAR 2000 raporunda bu radyonüklitler için verilen dünya ortalamasına uygun değerler çıkmıştır (Çizelge 5.1). Ayrıca toprak numunelerde belirlenen  $^{137}\text{Cs}$  aktivite konsantrasyonları ise  $8,33 \pm 0,44$  Bq/kg ve  $3,17 \pm 0,31$  Bq/kg olarak bulunmuştur.

Çizelge 4.11  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  için dünya genelinde topraktaki ortalama konsantrasyonları (UNSCEAR 2000 Raporu)

<b>Radyonüklit</b>	<b>Topraktaki Ortalama Konsantrasyon (Bq/kg)</b>
$^{40}\text{K}$	400
$^{238}\text{U}$	35
$^{232}\text{Th}$	30

Yapı malzemelerinde ise  $^{226}\text{Ra}$  aktivite konsantrasyonları sırayla  $19,65 \pm 0,88$  Bq/kg,  $6,30 \pm 0,34$  Bq/kg,  $10,97 \pm 0,63$  Bq/kg,  $^{232}\text{Th}$  aktivite konsantrasyonları  $33,93 \pm 1,63$  Bq/kg,  $4,85 \pm 0,55$  Bq/kg,  $9,80 \pm 1,02$  Bq/kg,  $^{40}\text{K}$  aktivite konsantrasyonları  $508,10 \pm 16,66$  Bq/kg,  $80,18 \pm 3,45$ ,  $88,63 \pm 3,34$  Bq/kg olarak bulunmuştur. Taş numunelerde sadece Ankara taşında  $0,95 \pm 0,23$  Bq/kg  $^{137}\text{Cs}$ 'ye rastlanmıştır.

Toprak numunelerinden ölçülen aktivite konsantrasyonları kullanılarak yıllık etkin doz değeri IODS1 numunesi için  $0,063$  mSv, NKD1 numunesi için  $0,058$  mSv olarak hesaplanmıştır. Topraktan kaynaklanan radyasyon dozunun ortalama olarak yıllık  $0,48$

mSv civarında olduğu düşünülürse, ölçümlerden elde edilen sonuçlarından gelen katkının oldukça düşük olduğu görülmektedir (UNSCEAR 2017 Raporu).

Yapı malzemeleri için radyum eşdeğer aktivitesinin 370 Bq/kg limit değerinin aşılmaması gerekmektedir. Yapılan hesaplamalar sonucu bu değerin aşılmadığı görülmektedir.

Toprak ve yapı malzemelerindeki radyonüklitlerin aktivite konsantrasyonlarını belirlemek için Türkiye’de farklı bölgelerde birçok çalışma yapılmıştır.

Öztürk ve arkadaşları tarafından Çanakkale’de yapılan çalışmada toprak örneklerinde ilgili radyonüklitlerin aktivite konsantrasyonları  $^{226}\text{Ra}$  20 – 521 Bq/kg;  $^{232}\text{Th}$  11 – 499 Bq/kg,  $^{40}\text{K}$  126 – 3181 Bq/kg aralıklarında,  $^{137}\text{Cs}$  aktivite konsantrasyonu ise  $1,2 \pm 0,3$  ile  $68,6 \pm 0,6$  Bq/kg aralığında bulunmuştur (Öztürk vd. 2013).

Türkiye’nin batı ve güney kıyılarında Varinlioğlu ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada topraktaki  $^{226}\text{Ra}$  değerleri 23 – 27 Bq/kg, için 8,  $^{232}\text{Th}$  değerleri 8 – 244 Bq/kg,  $^{40}\text{K}$  değerleri ise 86 – 1162 Bq/kg aralığında bulunmuştur (Varinlioğlu ve Köse 2005).

## 5. SONUÇ ve TARTIŞMA

Bu tez kapsamında, Ankara Üniversitesi 10.Yıl Yerleşkesi içerisinde bulunan binalarda belirlenen bazı ofis ve laboratuvarlarda radon gazı konsantrasyonu ölçümü yapılmıştır. Bu ölçümler yerleşke içerisinde ilk kez gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde, Corentium Plus aktif dijital radon dedektörünün aldığı verilerin aktarılabildiği CRA 4.2 yazılım programı kullanılarak ortalama konsantrasyonlar belirlenmiştir. Bu alanları kullanan kişilerin radon gazına bağlı olarak solunum yolu ile aldıkları yıllık etkin doz eşdeğeri için Eşitlik (4.1) kullanılarak bir tahmin yapılmıştır. Yüksek radon gazı konsantrasyonu ölçülen alanlar genellikle havalandırma süresi az ya da hiç havalandırılmayan alanlar olduğundan yapılan kısa süreli ölçümler, ortalama radon konsantrasyonunu yüksek oranda verebilmektedir. Uzun süre veya sıklıkla havalandırılan alanlarda alınan kısa süreli ölçümler, ortalama radon gazı konsantrasyonunun olduğundan daha düşük elde edilmesine neden olabilmektedir. Ölçüm alınan ofis ve laboratuvarlarda en yüksek radon gazı konsantrasyonu  $81 \pm 12 \text{ Bq/m}^3$  olarak bulunmuştur. Bu değer bodrum katında uzun süre kapalı tutulan bir laboratuvarda tespit edilmiştir. Tüm alanlar için bulunan değerler ortalama  $14 \pm 6 \text{ Bq/m}^3$  ile  $81 \pm 12 \text{ Bq/m}^3$  aralığındadır. Sonuçlar, Dünya Sağlık Örgütü tarafından belirlenen kapalı ortamlar için  $100 \text{ Bq/m}^3$  (WHO 2009) ve Türkiye Atom Enerjisi Kurumu tarafından belirlenen işyerleri için  $1000 \text{ Bq/m}^3$  (TAEK Radyasyon Güvenliği Yönetmeliği Resmi Gazete 2000) limit değerlerinin altındadır. Bu limit değerlerinin üstü müdahale sınırındadır ve gerekli önlemler alınmalıdır.

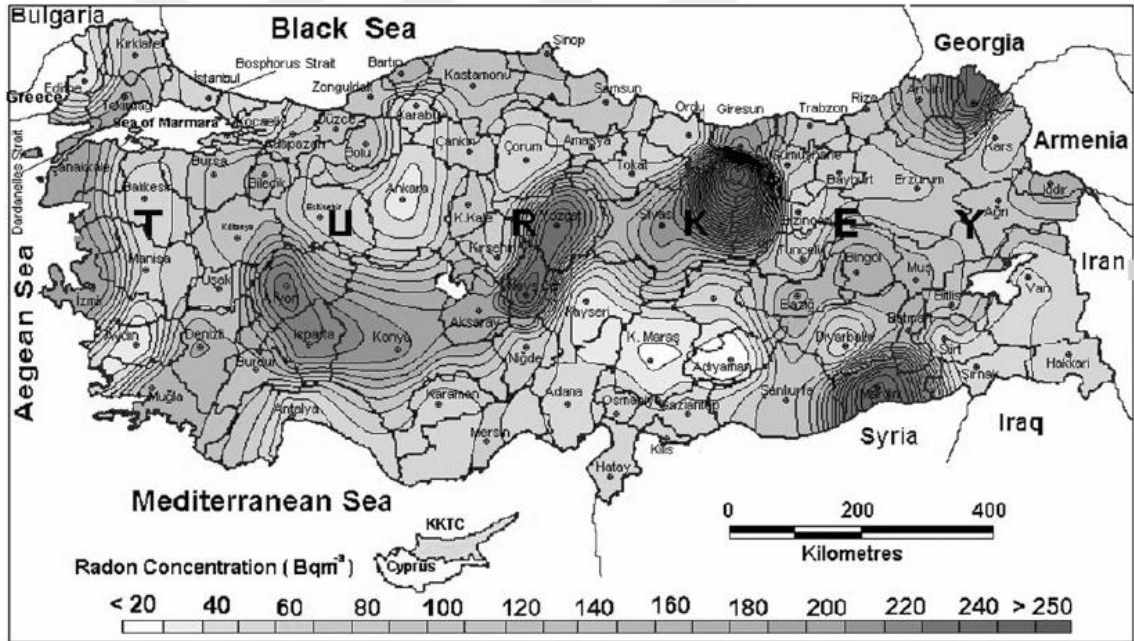
Radon gazı nedeniyle dünya genelinde ortalama olarak alınan yıllık etkin doz  $1,15 \text{ mSv}$  olarak belirlenmiştir (UNSCEAR 2000 Raporu). Tüm doğal radyasyon kaynakları tarafından alınan yıllık etkin dozun ortalama  $2,4 \text{ mSv}$  olduğu göz önüne alınırsa, radon gazı nedeniyle alınan radyasyon dozunun yıllık etkin dozun yaklaşık olarak yarısını oluşturduğu görülmektedir (UNSCEAR 2000 Raporu). Yapılan çalışmada ölçüm alınan alanlar için ICRP 65 ve UNSCEAR 2000 raporları göz önüne alınarak yıllık etkin doz eşdeğerleri hesaplanmıştır. Hesaplamalarda bir kişinin aldığı yıllık etkin doz eşdeğeri hesaplanırken işyerleri için kapalı bir ortamda kişinin günlük ortalama 8 saat bulunduğu göz önüne alınarak, yıllık 2000 saat üzerinden hesaplanmıştır. Tüm ofis ve laboratuvarlarda  $0,10 - 0,58 \text{ mSv}$  arası yıllık etkin doz eşdeğerleri hesaplanmıştır. En



yüksek değer, bodrum katta bulunan ve havalandırılma süresi kısa olan laboratuvarında ~ 0,6 mSv olarak bulunmuştur.

Dünya genelinde radon gazı ile ilgili birçok çalışma yapılmaktadır. Amaca yönelik farklı ölçüm teknikleri kullanılarak yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen veriler kullanılarak ülkelerin radon gazı haritaları çıkarılmakta, ayrıca risk alanları belirlenerek gerekli önlemler alınabilmektedir.

Türkiye’de Ulusal Radon İzleme Programı çerçevesinde 81 ilde 7293 konutta CR–39 dedektörleri ile yapılan çalışmada ortalama değeri  $81 \text{ Bq/m}^3$  olan,  $1 - 1400 \text{ Bq/m}^3$  aralığında radon gazı konsantrasyonları elde edilmiştir ve bunun sonucunda Türkiye radon haritası hazırlanmıştır, Şekil 5.1 (Çelebi vd. 2014).



Şekil 5.1 Türkiye radon haritası (Çelebi vd. 2014)

Isparta ilinde ve Süleyman Demirel Üniversitesi içinde yapılan ölçümlerde sürekli radon dedektörü (AlphaGUARD) kullanılarak alınan ölçümlerde ortalama  $^{222}\text{Rn}$  yoğunluğu  $372 \pm 74 \text{ Bq/m}^3$  olarak bulunmuştur. Havalandırmanın az olduğu ortamlarda radon gazı yoğunluğunda artış olduğu belirtilmektedir (Özkorucuklu vd. 2006).

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi'nde LR115 katı hal iz dedektörleri kullanılarak fakülte içerisinde farklı alanlarda radon gazı konsantrasyonları 40 – 334 Bq/m<sup>3</sup> arasında ölçülmüş olup, ortalama 161 Bq/m<sup>3</sup> bulunmuştur. Fakülte personelinin aldığı yıllık etkin doz 0,79 – 4,27 mSv arasında hesaplanmıştır (Alkan ve Karadeniz 2014).

İstanbul'da bulunan bir hastanede farklı katlarda sürekli aktif radon dedektörü (AlphaGUARD) ile kısa süreli ölçümler yapılmıştır. Ölçüm sonuçlarının 19 – 53 Bq/m<sup>3</sup> arasında değiştiği ve bina içerisinde günde altı saat kalan kişiler için yıllık radyasyon dozunun 0,150 – 0,402 mSv arasında olduğu belirlenmiştir (Günay vd. 2018).

Japonya'da 2000 - 2003 yılları arasında yapılan çalışmada, içerisinde okul ve hastane gibi işyerleri bulunan 705 kapalı alanda pasif dedektörler kullanılarak 1,40 – 182 Bq/m<sup>3</sup> aralığında değişen <sup>222</sup>Rn konsantrasyonları elde edilmiştir (Oikawa vd. 2006).

Nijerya'da bulunan en eski üniversite kampüsünde nükleer iz dedektörü olan pasif CR-39 dedektörleri kullanılarak 24 ofiste alınan üç aylık ölçümler sonucunda 157 – 495 Bq/m<sup>3</sup> aralığında değişen radon gazı konsantrasyonları elde edilmiştir. Ortalama değer standart sapmasıyla birlikte 293,3 ± 79,6 Bq/m<sup>3</sup>'tür. Bu değerlerden yola çıkılarak çalışanlar için tahmini etkin doz 0,99 – 3,12 mSv aralığında elde edilmiş olup, ortalama yıllık 1,85 mSv/yıl olarak bulunmuştur (Obed vd. 2010).

Bilindiği üzere radon gazı konsantrasyonu, birçok etkene bağlı olarak değişmektedir ve değerlendirme yapılırken tüm bu etkenleri göz önünde bulundurmak gerekmektedir. Yapılan çalışma süresince ölçüm alınan noktalarda, yüksek radon konsantrasyonuna sahip alanların genellikle laboratuvar gibi daha az kullanılan ve havalandırma süresi daha az ya da hiç havalandırılmayan alanlar olduğu belirlenmiştir. Düşük radon konsantrasyonu bulunan odaların ise sürekli olarak havalandırılma yapılan odalar olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca ölçüm alınan aylar içinde en yüksek konsantrasyonlar kış ve sonbahar aylarında, en düşük konsantrasyonlar ise ilkbahar ve yaz aylarında elde edilmiştir. Örneğin kış ve ilkbaharda yapılan ölçümler karşılaştırıldığında ilkbahar aylarındaki radon gazı konsantrasyonu düşük oranda gözlenmiştir. Bu durumun ortamın

ilkbaharda daha sık havalandırılmasına bağlı olduğu düşünölmektedir. Ancak ilkbahar ve yaz aylarında da sürekli olarak kapalı tutulan ortamlarda konsantrasyonun yüksek olduğu gözlenmiştir. Bu sonuçlar, radon gazı ile ilgili yapılan çalışmalarla paralellik göstermektedir.

Çalışmada bulunan sonuçlar belirlenen limit değerlerin altında çıkmıştır. Radon gazı kaynaklı sağlık risklerini en aza indirmek için yapılabilecek en basit uygulama, kişilerin zaman geçirdikleri ortamları sıklıkla havalandırmalarıdır.

Tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçların limit değerlerin altında kaldığı görölmüştür.

## KAYNAKLAR

- Alkan, T., Karadeniz, Ö. 2014. Indoor  $^{222}\text{Rn}$  Levels and Effective Dose Estimation of Academic Staff in Izmir – Turkey. Biomedical and Environmental Sciences. 27, 4; 259 – 267.
- Anonymous. 2016. Corentium Plus User Manual. Airthings AS.
- Anonymous. Corentium Report and Analysis Software Manual version 4.2. Airthings.
- Anonim. PCE Instruments Corentium Plus Teknik Katalog.
- Airthings. Web sitesi. <https://www.airthings.com/>. Erişim Tarihi: 14.06 2019.
- Baskaran, M. 2016. Radon: A Tracer for Geological, Geophysical and Geochemical Studies. Springer.
- Cember, H., Johnson, T.E. 2009. Introduction to Health Physics Fourth edition. McGraw-Hill.
- Çelebi N., Ataksoy B., Taşkın H. and Albayrak Bingoldağ N. 2014. Indoor radon measurements in Turkey dwellings. Radiation Protection Dosimetry, November 11; 1-7.
- Gilmore, G. 2008. Practical Gamma-ray Spectrometry Second Edition. Wiley.
- Gökmen, H. 2014. Binalarda Kaplama Malzemesi Olarak Kullanılan Seramik Ve Mermer Örneklerinin EDXRF Yöntemiyle Kimyasal Bileşiminin Belirlenmesi Ve Radyasyon Dozu Değerlendirmesi İçin Gama Spektrometrik Yöntemle Radyoaktivite İçeriklerinin Ölçülmesi. Yüksek Lisans Tezi.
- Groppi, F., Lavi, N., Alfassi, B., Bonardi, M., Birattari, C. 2005. On the High-Resolution Gamma-ray Spectrometric Measurement of  $^{40}\text{K}$  in Natural and Synthetic Materials. Radiation Protection Dosimetry, 115, 1-4; 441-444.
- Günay, O., Aközcan, S., Kulalı, F. 2018. Bina İçi Radon Konsantrasyonlarının Belirlenmesi. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, Sayı 13; 91-97.
- ICRP. International Commission on Radiological Protection. 1993. Protection against  $^{222}\text{Rn}$  at home and at work, ICRP publication, ICRP 23, No 65, Ann. P20.
- IAEA, Safety Standards for protecting people and the environment Specific Safety Guide, No. SSG-32. 2015. Protection of the Public against Exposure Indoors due to Radon and Other Natural Sources of Radiation, VIENNA.

- National Nuclear Data Center. Web sitesi. <https://www.nndc.bnl.gov/chart/>. Erişim Tarihi: 12.07.2019.
- Nazaroff, W.W. 1992. Radon Transport from Soil to Air. *Reviews of Geophysics*. 30, 2 ; 137-160.
- NEA-OECD. 1979. Exposure to radiation from natural radioactivity in building materials. Report by Group of Experts of the OECD Nuclear Energy Agency. Paris.
- Nero, A.V., Gadgil, A.J., Nazaroff, W.W., Revzan, K.L. 1990. Indoor Radon and Decay Products: Concentrations, Causes, and Control Strategies.
- Nuclear Physics Laboratory University of Cyprus Experimental Technique. Web sitesi. [http://www-np.ucy.ac.cy/radio\\_isotopes/wwwen/gamma/gamma\\_setup.html](http://www-np.ucy.ac.cy/radio_isotopes/wwwen/gamma/gamma_setup.html). Erişim Tarihi: 14.07.2019.
- Nucléide – Lara : Library for gamma and alpha emissions, Web sitesi. <http://www.nucleide.org/Laraweb>. Erişim Tarihi: 15.07.2019.
- NCRP Report No. 94, 1987. Exposure of the Population in the United States and Canada from Natural Background Radiation.
- NCRP Report No. 97, 1988. Measurement of Radon and Radon Daughters in Air.
- Obed, R.I., Lateef, H.T., Ademola, A.K. 2010. Indoor radon survey in a university campus of Nigeria. *Journal of Medical Physics*, 35(4); 242-246.
- Oikawa, S., Kanno, N., Sanada, T., Abukawa, J., Higuchi, H. 2006. A survey of indoor workplace radon concentration in Japan. *Journal of Environmental Radioactivity*. 87(3); 239-245.
- Özkorucuklu, S., Akyıldırım H., Çapalı, V. 2006. Isparta İli'nde Radon Yoğunluk Ölçümleri. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 10-3; 323-327.
- Öztürk, B., Çam, N.F., Yaprak, G. 2013. Reference levels of natural radioactivity and <sup>137</sup>Cs in and around the surface soils of Kestanbol pluton in Ezine region of Çanakkale province, Turkey. *Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*. 48; 1522–1532.
- Rad Elec Inc. Radon Measurement Systems. Web sitesi. [https://www.radelec.com/radon\\_monitoring.html](https://www.radelec.com/radon_monitoring.html). Erişim Tarihi: 13.08.2019.
- Radon Aware Group. Web sitesi. <http://www.radonawaregroup.ie/testing.html>. Erişim Tarihi: 19.03.2018.

- TAEK. Türkiye Atom Enerjisi Kurumu. Radyasyon Güvenliği Yönetmeliği Resmi Gazete, 24.03.2000/23999.
- TAEK. Türkiye Atom Enerjisi Kurumu. 2008. Türkiye’de kullanılan yapı malzemelerindeki doğal radyoaktiviteden kaynaklanan radyasyon dozunun değerlendirilmesi. Teknik Rapor TAEK TR 2008-7.
- TAEK. Türkiye Atom Enerjisi Kurumu. Konutlarda Radon Ölçümleri. Teknik Rapor TAEK TR-2014-2.
- UNSCEAR 1982. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. New York.
- UNSCEAR 1988. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. New York.
- UNSCEAR 2000. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiation. New York
- UNSCEAR 2006. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiation. New York.
- UNSCEAR 2017. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. New York.
- WHO, World Health Organization. 2009. An Evaluation World Health Organization, Handbook on indoor radon: a public health perspective, edited by Hajo Zeeb and Ferid.
- Wilkening, M. 1990. Radon in the Environment. Elsevier.
- Varinlioğlu, A., Köse, A. 2005. Determination of Natural and Artificial Radionuclide Levels in Soils of Western and Southern Coastal Area of Turkey. Water, Air, and Soil Pollution, 164; 401–407. Springer.
- Yücel, H., Solmaz, A.N., Köse, E., Bor, D. 2009. Spectral interference corrections for the measurement of  $^{238}\text{U}$  in materials rich in thorium by a high resolution  $\gamma$ -ray spectrometry. Applied Radiation and Isotopes, 67; 2049-2056.
- Yücel, H. 2009. İleri gama spektroskopisi laboratuvar föyü, Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü.

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı :Burcu Tuğba GÜL  
Doğum Yeri : Bafra  
Doğum Tarihi : 03/09/1987  
Medeni Hali : Bekar  
Yabancı Dili : İngilizce

### Eğitim Durumu:

Lise : Ayvalık Lisesi, (2001-2004)  
Lisans : Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü, (2009-2014)  
Yüksek Lisans : Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü Medikal Fizik  
Anabilim Dalı, (2015-2019)