

**AFYONKARAHİSAR MERKEZDEKİ KONUTLARDA
RADON KONSANTRASYONU VE YILLIK ETKİN DOZ
ORANLARININ BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Duygu AÇIL

DANIŞMAN

Doç. Dr. Hüseyin Ali YALIM

FİZİK ANABİLİM DALI

Temmuz, 2014

Bu tez çalışması A5.H1.P1.06 numaralı proje ile Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK) ve 12.FEN.BİL.14 numaralı proje ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AFYONKARAHİSAR MERKEZDEKİ KONUTLARDA
RADON KONSANTRASYONU VE YILLIK ETKİN DOZ
ORANLARININ BELİRLENMESİ

Duygu AÇIL

DANIŞMAN

Doç. Dr. Hüseyin Ali YALIM

FİZİK ANABİLİM DALI

Temmuz, 2014

TEZ ONAY SAYFASI

Duygu AÇİL tarafından hazırlanan “AFYONKARAHİSAR MERKEZDEKİ KONUTLARDA RADON KONSANTRASYONU VE YILLIK ETKİN DOZ ORANLARININ BELİRLENMESİ” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 10/07/2014 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Fizik Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Hüseyin Ali YALIM

Başkan : Doç. Dr. Rıdvan ÜNAL

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi

Üye : Doç. Dr. Hüseyin Ali YALIM

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi

Üye : Doç. Dr. Ahmet YILDIZ

Afyon Kocatepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun

...../...../..... tarih ve

.....sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....

Prof. Dr. Yılmaz YALÇIN

Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

10.07.2014

Duygu AÇIL

ÖZET
Yüksek Lisans Tezi

AFYONKARAHİSAR MERKEZDEKİ KONUTLARDA
RADON KONSANTRASYONU VE YILLIK ETKİN DOZ
ORANLARININ BELİRLENMESİ

Duygu AÇIL
Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Hüseyin Ali YALIM

Bu tez çalışması Afyonkarahisar il merkezinde bazı konutlarda bina içi radon konsantrasyonunu ve insanların maruz kaldıkları yıllık etkin doz eşdeğerini belirlemek, radon aktivite yoğunluğunun jeolojik bölgelere göre değişimi ile meteorolojik parametrelerin radon aktivitesi yoğunluğu değişimi üzerindeki ilişkisini incelemek amacıyla yapılmıştır.

Çalışmada, il merkezi kayaç türleri ve tektonik yapısı göz önünde bulundurularak 4 bölgeye ayrılmış ve belirlenen bölgelerdeki konut yoğunluğuna göre 50 ev homojen bir şekilde seçilerek pasif radon ölçüm yöntemiyle bina içi radon konsantrasyonu belirlenmiştir. Radon aktivitesi konsantrasyonu ölçümleri Haziran 2013 ve Mayıs 2014 tarihleri arasında bir yıl boyunca üçer aylık periyotlarla gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sonuçları minimum 5 Bq/m^3 ile maksimum 2494 Bq/m^3 değerleri arasında elde edilmiş, yıllık ortalama radon aktivitesi yoğunluğu $168,6 \text{ Bq/m}^3$ ve radon yoğunluğundan kaynaklanan yıllık ortalama etkin doz eşdeğeri de $4,3 \text{ mSv/y}$ olarak hesaplanmıştır.

Diğer yandan sonuçlar mevsimsel olarak ele alındığında, radon konsantrasyonunun en yüksek olduğu dönemin kış mevsimi olduğu görülmüştür. Ayrıca 4 jeolojik bölge için ayrı ayrı radon konsantrasyonu değerleri hesaplanmış ve 1. Bölge için 125 Bq/m^3 , 2. Bölge için $188,9 \text{ Bq/m}^3$, 3. Bölge için $224,2 \text{ Bq/m}^3$ ve 4. Bölge için $136,4 \text{ Bq/m}^3$

değerleri elde edilmiştir. Son olarak, ölçüm dönemlerinde elde edilen radon konsantrasyon değerleriyle yıl boyunca kaydedilen meteorolojik verilerin (ortalama basınç, ortalama yağış, ortalama nispi nem, ortalama sıcaklık) karşılaştırılması yapılarak radon konsantrasyonu değişimleri ile meteorolojik parametreler arasındaki ilişki incelenmiştir.

2014, xiii + 83 sayfa

Anahtar Kelimeler: Bina içi radon yoğunluğu, CR-39, Jeolojik yapı, Etkin doz eşdeğeri, Meteorolojik parametreler

ABSTRACT
M. Sc. Thesis

**RADON CONCENTRATION IN THE HOUSES
OF CENTER OF AFYONKARAHİSAR
AND DETERMINING THE ANNUAL EFFECTIVE DOSE**

Duygu AÇIL

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Physics

Instructor: Assoc. Prof. Dr. Hüseyin Ali YALIM

This thesis is performed to determine the indoor radon concentration in some houses in the provincial center of Afyonkarahisar and the annual effective dose equivalent that people expose, and to examine the relation between the radon activity concentration variations according to regions, and the effects of meteorological parameters on density of radon activity.

In the study, provincial center has been divided into 4 regions by considering the rock types and tectonic structure and radon concentration has been determined by a passive radon measurement method by selecting 50 houses homogenously according to the housing densities in the determined regions. The measurements of radon activity concentrations have been performed for three months periods during one year between June 2013 and May 2014. The measurement results were acquired between 5 Bq/m^3 and 2494 Bq/m^3 values, annual average radon activity density was calculated as $168,6 \text{ Bq/m}^3$ and annual average effective dose equivalent as $4,3 \text{ mSv/y}$.

On the other side, when the results are taken into account as seasonally, it has been observed that the period with highest radon concentration is winter. Besides, radon concentration values were calculated for 4 geologic regions and for 1st Region 125 Bq/m^3 , for 2nd Region $188,9 \text{ Bq/m}^3$, for 3rd Region $188,9 \text{ Bq/m}^3$, and for 4th Region $136,4 \text{ Bq/m}^3$ was found. Finally, the radon concentration values recorded during the year which were acquired during the measurement periods and the meteorologic values

(average pressure, average rainfall, average relative humidity, average temperature) were compared and the relation between the changes in radon concentrations were examined.

2014, xiii + 83 pages

Keywords: Indoor radon concentration, CR-39, Geological structure, Effective dose equivalent, Meteorological parameters

TEŞEKKÜR

Lisans öğrenimim ve yüksek lisans çalışmam boyunca bilgisi, deneyimleri, yol göstericiliğiyle, desteğini esirgemeyen saygıdeğer danışman hocam Doç. Dr. Hüseyin Ali YALIM'a en içten teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Afyonkarahisar'ın jeolojik yapısıyla ilgili her konuda yardımlarını esirgemeyen Jeoloji Mühendisliği Bölüm Başkanı Doç. Dr. Ahmet YILDIZ'a, detektörlerin dağıtımı ve toplanmasında yardımlarını esirgemeyen Jeoloji Mühendisliği Bölümü öğretim elemanları Yrd. Doç. Dr. Metin BAĞCI'ya, Arş. Gör. İbrahim Dumlupınar'a ve haritaların çizimine katkılarından dolayı Arş. Gör. Can BAŞARAN'a, detektörlerin dağıtımı ve toplanması sırasında yardımlarını esirgemeyen Fizik Bölümü öğretim elemanları Doç. Dr. Rıdvan ÜNAL'a, Doç. Dr. İsmail Hakkı Sarpün'e, Yrd. Doç. Dr. Bekir Oruncak'a, Arş. Gör. Dr. Ayla Sandıkçioğlu'na, CR-39 radon detektörlerinin analiz işlemleri sırasında yardımlarını esirgemeyen Sayın Işık Demiröz ve Sefa Uzun'a teşekkürlerimi sunarım. A5.H1.P1.06 numaralı proje ile Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK) ve 12.FEN.BİL.14 numaralı proje ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne desteklerinden dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Detektörlerin dağıtımı ve her türlü aşamasında yapmış olduğumuz ekip çalışmasında yer alan tez arkadaşlarım Merve Özçelik ve İrem Akkuş'a teşekkürlerimi sunarım.

Tüm hayatım boyunca manevi destekleriyle yanımda olan kıymetli aileme ve tez yazımı sırasında katkılarından dolayı manevi kardeşim Hülya Vatansever'e teşekkürü bir borç bilirim.

Duygu AÇIL

AFYONKARAHİSAR, 2014

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xii
RESİMLER DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER.....	6
2.1 Radyoaktivitenin Keşfi	6
2.2 Radyoaktivite	6
2.2.1 Radyoaktif Bozunum Türleri.....	8
2.2.1.1 Alfa (α) Bozunumu.....	8
2.2.1.2 Beta (β) Bozunumu	9
2.2.1.3 Gama (γ) Bozunumu	9
2.3 Radyoaktif Bozunma Kanunu.....	9
2.3.1 Yarı Ömür.....	11
2.3.2 Ortalama Ömür	12
2.3.3 Biyolojik Yarı Ömür ($t_{1/2b}$)	12
2.3.4 Etkin Yarı Ömür ($t_{1/2e}$).....	13
2.3.5 Peş Peşe Parçalanma Kanunu	13
2.4 Radyoaktif Denge	16
2.4.1 Geçici Denge	16
2.4.2 Kalıcı veya Sürekli Denge.....	17
2.5 Doğal Radyoaktif Seriler	18
2.6 Radyoaktivite ve Radyasyon Birimleri.....	19
2.7 Radyasyon.....	21
2.7.1 İyonlaştırıcı Radyasyon	21
2.7.1.1 Elektromanyetik Radyasyon	22
2.7.1.2 Parçacıklı Radyasyon	23
2.7.2 İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyon	24
2.7.2.1 Ultraviyole Işınları (mor ötesi ışık).....	24
2.7.2.2 EMR Nitelikli Radyasyon	24

2.7.3	Radyasyon Kaynakları.....	25
2.7.3.1	Doğal Radyasyon Kaynakları.....	26
2.7.3.2	Yapay Radyasyon Kaynakları.....	28
2.8	Radon	29
2.8.1	Radonu Etkileyen Parametreler	31
2.8.2	Evlerde Radon	33
2.8.3	Radon Konsantrasyon Limitleri	36
2.8.4	Evlere Radon Girişini Azaltma Yöntemleri	38
2.9	Radon Gazının İnsan Sağlığı Üzerindeki Etkileri.....	38
3.	MATERYAL VE YÖNTEM	42
3.1	Afyonkarahisar İli ve İklimi	42
3.2	Afyonkarahisar İli Şehir Merkezi ve Çevresinin Jeolojisi.....	42
3.3	Çalışma Sahası	47
3.4	Radon Ölçümü	47
3.4.1	PADC (Pasif Radon Detektörü) CR-39.....	48
3.4.1.1	CR-39 Detektörlerinin Dağıtımı ve Toplanması.....	49
3.4.2	CR-39 detektörlerinin Analize Hazırlanışı ve Analizi	50
3.4.3	Değerlendirme Ünitesi.....	52
3.5	Radon Aktivitesi Konsantrasyonu Hesabı	53
3.6	Standart Sapma	53
3.7	Yıllık Etkin Doz Eşdeğerleri Hesabı	53
4.	DENEYSEL BULGULAR	54
4.1	Bölgelere Göre Ortalama Radon Konsantrasyon Dağılımı	54
4.2	Bölgelere Göre Mevsimsel Radon Konsantrasyon Dağılımı.....	56
4.2.1	1. Bölge Mevsimsel Radon Konsantrasyon Dağılımı	56
4.2.2	2. Bölge Mevsimsel Radon Konsantrasyon Dağılımı	57
4.2.3	3. Bölge Mevsimsel Radon Konsantrasyon Dağılımı	58
4.2.4	4. Bölge Mevsimsel Radon Konsantrasyon Dağılımı	59
4.3	Bölgelere Göre Bodrumlardaki Ortalama Radon Konsantrasyonu	61
4.4	Meteorolojik Verilerle Radon Konsantrasyonunun Karşılaştırılması.....	62
4.4.1	Radon Konsantrasyonu ve Ortalama Sıcaklık	62
4.4.2	Ortalama Radon Aktivite Konsantrasyonu ve Ortalama Basınç	63
4.4.3	Radon Konsantrasyonu ve Ortalama Yağış.....	64
4.4.4	Radon Aktivite Konsantrasyonu ve Ortalama Nispi Nem.....	65
4.5	Afyonkarahisar Merkezdeki Radon Konsantrasyon Dağılımı.....	66
4.6	Afyonkarahisar İli İçin Yıllık Etkin Doz Eşdeğerleri	67

5. SONUÇ VE TARTIŞMA.....	69
6. KAYNAKLAR.....	76
ÖZGEÇMİŞ.....	80
EKLER	81

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

A	Aktiflik
Bq	Becquerel
Ci	Curie
α	Alfa
β	Beta
γ	Gama
°C	Santigrat derece
B^+	Beta-pozitif
B^-	Beta-negatif
^{238}U	Uranyum
^{232}Th	Toryum
^{226}Ra	Radyum
^{222}Rn	Radon
MeV	Mega elektron volt
mSv	Milisievert
Z	Kütle numarası
λ	Bozunma sabiti
τ	Ortalama ömür
hPa	Hecto Pascal

Kısaltmalar

ICRP	Uluslar arası Radyasyondan Korunma Komisyonu (International Commission on Radiological Protection)
WHO	Dünya Sağlık Örgütü (World Health Organization)
SANAEM	Sarayköy Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi
TAEK	Türkiye Atom Enerjisi Kurumu
UNSCEAR	Amerika Birleşik Devletleri Radyasyon Koruması ve Ölçümü Milli Komitesi (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation)
AB	Avrupa Birliği
EPA	Çevre Koruma Ajansı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1 Nükleer kararlılığın n/p oranına göre değişimi	7
Şekil 2.2 Radyoaktif bir numunenin zamanla değişimi	11
Şekil 2.3 Peş peşe bozunma grafiği	16
Şekil 2.4 Alfa, beta, gama ve nötron parçacıklarının giricilikleri.....	24
Şekil 2.5 Doğal ve yapay radyasyon kaynaklarının küresel radyasyon dozuna oransal katkıları	25
Şekil 2.6 Doğal radyasyon kaynaklarından maruz kalınan küresel radyasyon dozlarının oransal değerleri.....	26
Şekil 2.7 Kozmik ışınlardan bir saatte alınan radyasyon dozunun yüksekliğe göre değişimi.....	27
Şekil 2.8 Yapay radyasyon kaynaklarından maruz kalınan dozun oransal değerleri	28
Şekil 2.9 Radon ve toronun bozunma zinciri.....	31
Şekil 2.10 Radon konsantrasyonunu etkileyen meteorolojik ve jeolojik parametreler...	32
Şekil 2.11 Kayaç türleri ile radon konsantrasyonunun değişimi.....	33
Şekil 2.12 Radonun binalara giriş yolları.....	35
Şekil 2.13 Basınç ve rüzgârın etkisiyle radonun binalara girişi	36
Şekil 2.14 Ülkemizde ölçülen radon konsantrasyonunun haritalandırılması (TAEK) ..	37
Şekil 2.15 Kazasal ölümlerle radondan kaynaklı ölümlerin karşılaştırılması (Home Safety Council)	41
Şekil 3.1 Afyonkarahisar ilini Türkiye haritasındaki konumu	42
Şekil 3.2 İnceleme alanının jeoloji haritası.....	44

Şekil 3.3 Afyonkarahisar ili şehir merkezi ve çevresinin tektonik haritası (Koçyiğit ve Deveci 2005)	46
Şekil 3.4 Afyonkarahisar merkezde belirlenen konutların bölgelere göre dağılımı.....	47
Şekil 3.5 CR-39 detektörünün ebatları ve izlerin oluştuğu kısım.....	49
Şekil 4.1 Bölgelere göre ortalama radon konsantrasyonu.....	56
Şekil 4.2 1. Bölgedeki mevsimsel radon konsantrasyon dağılımı	57
Şekil 4.3 2. Bölgedeki mevsimsel radon konsantrasyon dağılımı	58
Şekil 4.4 3. Bölgedeki mevsimsel radon konsantrasyon dağılımı	59
Şekil 4.5 4. Bölgedeki mevsimsel radon konsantrasyon dağılımı	60
Şekil 4.6 Bölgelere göre mevsimsel radon konsantrasyon dağılımı.....	60
Şekil 4.7 Afyonkarahisar ili mevsimsel radon konsantrasyonu değerleri.....	61
Şekil 4.8 Bölgelere göre bodrumlardaki ortalama radon konsantrasyonu.....	62
Şekil 4.9 Ortalama radon aktivite konsantrasyonu ile ortalama sıcaklık arasındaki ilişki	63
Şekil 4.10 Ortalama radon aktivite konsantrasyonu ile ortalama basınç arasındaki ilişki	64
Şekil 4.11 Ortalama radon aktivite konsantrasyonu ile ortalama yağış arasındaki ilişki.	65
Şekil 4.12 Ortalama radon aktivite konsantrasyonu ile ortalama nispi nem arasındaki ilişki	66
Şekil 4.13 Afyonkarahisar merkezdeki radon konsantrasyon dağılım haritası	67
Şekil 4.14 Bölgelere göre yıllık etkin doz eşdeğerleri	68

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Radyoaktif seriler	18
Çizelge 2.2 Radyasyon terimleri ve özel birimler ile SI birimleri arasındaki ilişki.....	21
Çizelge 2.3 Doğal ve yapay radyasyon kaynaklarından maruz kalınan dozun dağılımı	25
Çizelge 2.4 Radonun kimyasal özellikleri.....	29
Çizelge 2.5 Uluslararası kuruluşlar ve çeşitli ülkeler tarafından belirlenen radon aktivite konsantrasyon limitleri (Bq/m ³)	37
Çizelge 3.1 Radon ölçüm yöntemleri	48
Çizelge 4.1 Konutlarda ölçülen ortalama radon aktivitesi konsantrasyonu değerleri ve yıllık etkin doz eşdeğerleri	55
Çizelge 5.1 Türkiye’de bazı illerdeki kapalı ortamlardaki radon aktivite konsantrasyon sonuçları	70

RESİMLER DİZİNİ

Sayfa

Resim 2.1 Radon ve bozunum ürünlerinin solunması sonucunda akciğer dokusunda meydana getirdiği hasar	39
Resim 3.1 Afyon Kalesi ve Sarıkız Kalesi tepede dom yapısı şeklindeki lav akıntıları.	45
Resim 3.2 Pasif radon detektörü CR-39.....	49
Resim 3.3 Toplanan detektörlerin alüminyum folyolara sarılması	50
Resim 3.4 Radoslayt (a), iz kazıma diski (b).....	51
Resim 3.5 Radobath sistemi ve iz kazıma işlemi.....	51
Resim 3.6 (a)Değerlendirme ünitesi ve (b) birim alandaki alfa izleri.....	52

1. GİRİŞ

Tüm canlılar varoluşlarından bu yana sürekli olarak radyasyonla iç içe yaşamak zorunda kalmıştır. Dünyanın oluşumundan bu yana var olan çok uzun yarı ömürlü radyoaktif elementlerden dolayı doğal bir radyasyon düzeyi oluşmuştur. Maruz kalmak zorunda olduğumuz bu radyasyon seviyesini etkileyen birçok neden vardır. Bu nedenler arasında; yaşanılan bölge, bu bölgenin toprak yapısı, binalarda kullanılan yapı malzemeleri, hava şartları, mevsimler gibi birçok neden sayılabilir. Ayrıca alçak ve yüksek basınç, rüzgâr yönü, yağışlar gibi etmenler de doğal radyasyon seviyesini etkilemektedir.

Bütün canlılar milyonlarca yıldan beri uzay ve güneşten gelen kozmik ışınlar, yer kabuğunda bulunan radyoizotoplar ve bunlara bağlı olarak da toprak ve yapı malzemeleri, su ve gıdalar gibi birçok doğal kaynaktan ışınlanmaktadır. Bunlara ek olarak enerji üretimi, tarım, tıp, endüstri gibi pek çok alanda yaygın bir şekilde kullanılmakta olan yapay kaynaklardan da ışınlanmaktadır. Solunum ve sindirim yoluyla, yiyeceklerden, hava ve sudan az da olsa radyoaktif maddeler vücuda alınmakta ve böylece insan vücudu hem iç hem de dış ışınlanmaya maruz kalmaktadır.

İnsanlar; yaşam standartları, yaşadıkları ortamların fiziksel özellikleri ve coğrafi şartlara bağlı olarak değişiklik göstermekle birlikte dünya genelinde kişi başına yaklaşık olarak 2,8 mSv'lik yıllık doza maruz kalmaktadır. Bölgeden bölgeye değişmekle birlikte, doğal radyasyondan dolayı maruz kalınan radyasyonun neredeyse %50'si radondan kaynaklanmaktadır ve yıllık ortalama dozu 1,3 mSv'dir (UNSCEAR 2000).

Kapalı ortam hava kirleticisi olan radon; renksiz, kokusuz, tatsız ve gözle görülemeyen, periyodik cetvelin soy gazlar sınıfında yer alan radyoaktif bir gazdır. Radon, toprak, kaya ve suda doğal olarak bulunan uranyum ve toryumun bozunması sonucunda meydana gelir. Bu bozunma serisindeki tek radyoaktif gaz radondur. Radon kararsız bir radyoizotoptur ve kararlı hale gelinceye kadar alfa parçacıkları yayarak radyoaktif bozunmaya devam eder. Radon bir seri bozunma ile bozunum ürünlerini meydana getirir. Bu bozunum ürünlerinin radondan farkı katı parçacıklar olmalarıdır. Bu parçacıkların bir kısmı havadaki partiküllere tutunarak solunum yoluyla akciğerlere

taşınmakta ve buradaki dokulara zamanla zarar vererek akciğer kanserine yol açmaktadır. Sigaradan sonra akciğer kanserine yol açan ikinci en önemli etmendir.

Uluslararası Radyasyondan Korunma Komisyonu (ICRP) tarafından evlerdeki radon konsantrasyonu için tavsiye edilen değer $200-600 \text{ Bq/m}^3$ 'dür. Bu komisyon tarafından eski evler için radon konsantrasyonu 400 Bq/m^3 , yeni evlerde 200 Bq/m^3 olarak belirlenmiştir. 400 Bq/m^3 radon konsantrasyonuna maruziyet sonucunda akciğer kanseri meydana gelme riski %6'dır ve bu risk sigara kullanımıyla 10-20 kat artabilmektedir. Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK) tarafından evlerde müsaade edilebilir radon konsantrasyon değeri 400 Bq/m^3 olarak belirlenmiştir (TAEK 2012).

İnsanlar zamanının büyük bir kısmını kapalı ortamlarda geçirdiğinden, gün içerisinde sürekli olarak radona maruz kalmaktadırlar. Binalara radon; zemin çatlakları, asma kat boşlukları, duvar arası boşluklar, yapı malzemelerinden girmekte, doğal gaz, içme suyu gibi etmenlerden dolayı da radon konsantrasyon seviyesi artmaktadır. Radonun büyük bir kısmı (%90) kapalı ortamlara binanın temelindeki topraktan gelmektedir. Radon ve diğer gazlar, toprak boyunca yükselir ve binanın altında hapsolarak bir basınç oluşturur. Evlerdeki hava basıncı genelde topraktaki basınçtan daha düşüktür. Binanın altında oluşan bu yüksek basınçtan dolayı gazlar yerden ve duvarlardan, çatlaklardan bina içlerine sızarlar. Kumar ve arkadaşlarının Kuzey Hindistan'daki bazı konutlarda ve topraktaki radon-toron konsantrasyonları belirlemeye yönelik yapmış oldukları çalışmada; konutlardaki radon ve toron konsantrasyonunu $17-51 \text{ Bq/m}^3$ ve $9-73 \text{ Bq/m}^3$ ve topraktaki konsantrasyon değerlerini ise $2,80-6,46 \text{ k Bq/m}^3$ olarak bulmuşlardır. Ayrıca topraktaki radon konsantrasyonu ile konutlardaki radon-toron konsantrasyonu arasındaki ilişkinin jeolojik oluşumlara bağlı olduğunu ve en iyi korelasyonu çamurdan yapılmış konutlarda belirlemişlerdir (Kumar *et al.* 2014). Ramola ve arkadaşları Tehri Garhwal'da, farklı yapıdaki konutlarda radon konsantrasyonunun mevsimsel değişimini incelemiştir. Çamurdan yapılmış konutlarla çimento kullanılarak yapılan konutlarda mevsimsel olarak radon aktivite konsantrasyonu değerlerini karşılaştırmış ve radon aktivite konsantrasyonunun, kış mevsiminde yüksek, yaz ve sonbahar mevsimi ile yağışlı sezonlarda düşük değerlerde olduğunu tespit etmişlerdir (Ramola *et al.* 1997).

Radon konsantrasyonu; yaşanan bölgenin iklimi, jeolojik yapısı, sıcaklığı, kişilerin yaşam standartları, evin havalandırma ve ısıtma şekli gibi birçok parametreye bağlı olarak değişim göstermektedir. Zunic vd. (2006) Sırbistan'ın Niska Banja bölgesinde ev içi radon konsantrasyonunu belirlemeye yönelik yaptıkları çalışmada, 65 evin oturma ve yatak odalarına toplamda 102 adet CR-39 radon detektörü dağıtmışlardır ve yıllık ortalama radon konsantrasyonunu traverten bölgede 1500 Bq/m^3 , alivyum sediment oluşumunun olduğu bölgede ise 650 Bq/m^3 , maksimum değeri ise 6000 Bq/m^3 olarak tespit etmişlerdir. Abdulrahman vd. (2014) Suudi Arabistan'ın Riyad şehrinde 786 konutta bina içi radon konsantrasyonunu belirlemeye yönelik yapmış oldukları çalışmada; yıllık ortalama radon konsantrasyon değerini $24,68 \text{ Bq/m}^3$ bulmuşlardır. Belirledikleri konutlarda radon konsantrasyon değerlerinin; mevsimlere, konutların tipine, bina materyaline, havalandırma sıklığına ve havalandırma sistemine göre değişiklik gösterdiğini tespit etmişlerdir. Öztürk, Erzincan ilindeki evlerde bina içi radon konsantrasyonunun mevsimsel değişimini incelemeye yönelik yapmış olduğu çalışmada, yıllık ortalama radon konsantrasyonunu 91 Bq/m^3 bulmuştur. Kış döneminde radon konsantrasyonunu yüksek, ilkbahar ve yaz döneminde ise düşük bulmuştur. Yıllık etkin doz eşdeğerini de $2,29 \text{ mSv/yıl}$ olarak tespit etmiştir (Öztürk 2012). Özderya, Samsun ilindeki evlerde bina içi radon konsantrasyonunun belirlenmesine yönelik yapmış olduğu çalışmada her mevsim ölçüm yaparak kış döneminde yüksek ve yaz mevsiminde düşük radon konsantrasyonu çıkmıştır ve ortalama radon konsantrasyonunu 106 Bq/m^3 bulmuştur (Özderya 2009). Khayrat vd. (2003) tarafından Suudi Arabistan'ın Yemen şehrinde yapılan çalışmada; CR-39 radon detektörü ile 241 evde radon aktivitesi konsantrasyonunu ölçülmüş ve ortalama radon konsantrasyonunu 42 Bq/m^3 olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca deniz seviyesinden yükseklerle çıkıldıkça radon konsantrasyonunun arttığını tespit etmişlerdir. Kumbur ve arkadaşlarının İçel'de evlerde yapmış olduğu radon düzeyinin araştırılması adlı çalışmalarında; yaz ve kış aylarında 100 evde oturma ve yatak odalarına CR-39 nükleer iz detektörleri yerleştirmişlerdir. İçel evlerinde radon konsantrasyonları yaz aylarında $22-159 \text{ Bq/m}^3$, kış aylarında $13-59 \text{ Bq/m}^3$ arasında değişim göstermiştir. Ortalama değerler ise 23 Bq/m^3 ve 44 Bq/m^3 bulmuşlardır. Yaz aylarındaki ortalama radon aktivite konsantrasyonunun kış aylarındaki ortalama radon aktivite konsantrasyonundan yüksek bulmalarının nedeninin İçel'de yaz mevsiminin çok sıcak olmasıyla

buharlaşmanın fazla olmasına ve insanların Toros eteklerindeki yaylara taşınarak evlerin uzun süre boş yani kapalı kalmasına bağlamaktadırlar (Kumbur 1995).

Ayrıca, radon aktivite konsantrasyonu, hava sıcaklığı, hava basıncı, rüzgar hızı, rüzgar yönü, nem, yağış gibi meteorolojik birçok parametreye de bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Alonso vd. (2013) tarafından Meksika’da yapılan çalışmada kapalı ortamlardaki ortalama günlük radon değişimlerinin atmosfer basıncı ve nispi nem ile ilişkili iken sıcaklık ile ilişkisi olmadığını ortaya koymuşlardır.

Ulusal ve uluslararası olmak üzere kapalı ortamların radon aktivitesi yoğunluğunu belirlemeye yönelik olarak yapılan çok sayıda çalışma mevcuttur. Bu çalışmalardan bazıları;

Can, Kilis bölgesindeki evlerde bina içi radon aktivitesi ve radon efektif doz hızını katı hal nükleer iz detektör tekniği ile yapmış olduğu çalışmada; ortalama radon konsantrasyonunu 47 Bq/m^3 olarak bulmuştur (Can 2011).

Gelgün, Kütahya ilinde kapalı mekanlarda radon konsantrasyonunu belirlemeye yönelik yapmış olduğu çalışmada, Kütahya ilinde 100 evde radon konsantrasyonu ölçümü gerçekleştirmiş ve $39\text{-}328 \text{ Bq/m}^3$ arasında değişen radon konsantrasyon değerleri bulmuştur (Gelgün 2010).

Özkan Yeşilbağ, Artvin ve Ardahan illerindeki evlerde bina içi radon konsantrasyonunu belirlemeye yönelik yapmış olduğu çalışmada Ardahan için ortalama radon konsantrasyonunu 173 Bq/m^3 , Artvin için ortalama radon konsantrasyonunu 132 Bq/m^3 olarak bulmuştur (Yeşilbağ 2008).

Hamori vd. (2003) tarafından CR-39 detektörünü kullanarak 15277 tek katlı evde ve 325 daha fazla kata sahip evlerde yaptıkları ölçümler sonucunda ortalama radon konsantrasyon değerini 58 Bq/m^3 bulmuşlardır.

Bu tez çalışmasında, Afyonkarahisar il merkezindeki bazı konutlarda Haziran 2013 ve Mayıs 2014 tarihleri arasında bir yıl boyunca üçer aylık periyotlarla kapalı ortam radon aktivite konsantrasyonları ölçülmüş ve elde edilen sonuçlar, radon aktivitesi yoğunluğundan kaynaklanan yıllık ortalama etkin doz eşdeğerlerinin hesaplanması ve

radon aktivite yoğunluğundaki değişimler ile meteorolojik parametrelerin etkisinin belirlenmesi için kullanılmıştır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1 Radyoaktivitenin Keşfi

24 Şubat 1896 yılında radyoaktiviteyi Henry Becquerel keşfetmiştir. Becquerel, belirli floresans tuzlarının güneş ışınlarıyla aktiflendikten sonra yayınladıkları radyasyon üzerinde çalışırken tesadüfen keşfetmiştir. Şans eseri kalın bir kağıda sarılı olan uranyum ve potasyum sülfattan ibaret numuneyi karanlık bir odada fotoğraf levhalarının yanında bırakmış ve bu levhalar ışığa karşı tamamen korunmuş bir halde olmalarına rağmen banyo edildiklerinde ışıktaki bırakılmış gibi sonuç verdiğini gözlemlemiştir. Becquerel bu deneyi tekrarlayarak fotoğraf levhalarını etkileyen bazı tür radyasyonların uranyum tuzundan yayınladıkları sonucuna varmıştır. Uranyum tuzu tarafından yayınlanan bu radyasyona önce “Becquerel Işınları” adı verildi. Daha sonra farklı maddelerce yayınlanan farklı radyasyon tiplerini de kapsayacak şekilde “radyoaktif ışınlar” adı verilmiştir.

1897 yılında Rutherford uranyumdan çıkan bu ışınları inceledi ve uranyumun yayınladığı ışınları iki çeşit olarak belirledi. Bunları alfa ve beta ışınları olarak adlandırdı. Yaptığı deneyde alfa ışınlarının ince metal levhalar tarafından kolayca soğurulduğunu ve çok iyonlaştırıcı olduğunu, betaların ise daha az iyonlaştırıcı ama daha girici olduğunu gözlemledi.

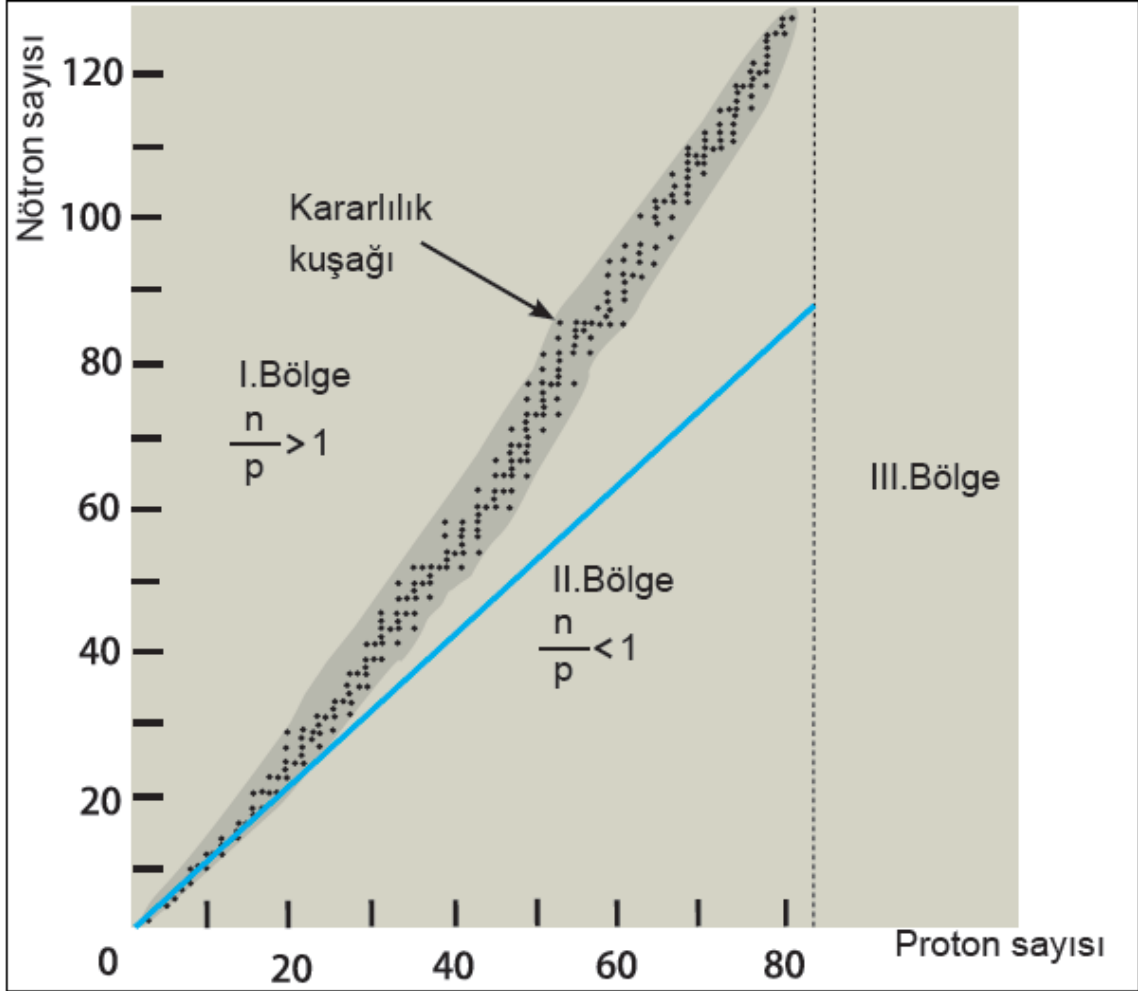
Nillard da aynı yıl yapmış olduğu çalışmalarla; alfa ve beta ışınlarından daha girici olan bir tür ışın keşfetti ve gama ışınları olarak isimlendirdi.

1898 yılında bayan Marie Curie ve eşi Pierre Curie tarafından iki radyoaktif madde polonyum ve radyum keşfedilmiştir. Birkaç yıl içinde de toryum, aktinyum, radyotoryum, mezotoryum ve diğer radyoaktif elementler keşfedilmiştir.

2.2 Radyoaktivite

Doğada bulunan elementlerin bir kısmı kararlı çekirdeklere sahipken, bir kısmı da kararsız çekirdeklere sahiptir. Kararlı bir çekirdekte, çoğu durumda nötron sayısı (N) proton sayısında (Z) biraz daha fazla ve N/Z oranı yaklaşık olarak 1,5 civarındadır (Şekil 2.1). Kararlı bir çekirdekte, proton ve nötronlar birbirlerine nükleer kuvvetlerle

çok sıkı bir şekilde bağlıdır ve hiçbir parçacık çekirdek dışına kaçamaz. Bu sayede de çekirdek dengede kalır. Çekirdek kararsız ise yani dengede değilse, bu durumda fazla bir enerjiye sahip olacak ve parçacıkları bir arada kalmayacaktır ve bir süre sonra enerjisini boşaltacaktır.



Şekil 2.1 Nükleer kararlılığın n/p oranına göre değişimi

N/Z oranı hafif izotoplarda 1 iken, ağır çekirdeklere doğru gidildikçe bu oran artmaktadır. Oran arttıkça çekirdeklerin kararlı olmadığı bir yere ulaşılır ve en ağır kararlı çekirdek bir bizmut izotopudur. Daha ağır çekirdekler sahip oldukları fazla enerjiden dolayı kararsızdırlar. Böyle çekirdeklere **radyoaktif çekirdek** veya **radyoizotop** denir. Radyoaktif çekirdekler fazla enerjilerinden kurtulmaya ve kararlı duruma geçmeye çalışırken gerçekleşen olaya **radyoaktivite** veya **radyoaktif parçalanma** denir.

Radyoaktivite kontrol edilemeyen bir olay olduğundan herhangi bir şekilde müdahale edilip yavaşlatılamaz veya durdurulamaz. Üstel bir fonksiyon şeklinde azalarak kendiliğinde tükeninceye kadar devam eder. Radyoaktivite olayı doğal ve yapay olmak üzere iki şekilde gerçekleşir.

Doğada bulunan kararsız elementler kararlı yapıya geçmeye çalışırken, hiçbir dış müdahale olmadan, sahip oldukları fazla enerjilerini çekirdeklerinden dışarıya salarlarsa bu olaya **doğal radyoaktivite**, bu elementlere de **radyoaktif elementler** denir. Doğada kararlı olarak bulunan izotoplar yapay yollarla kararsız (radyoaktif) hale getirilebilirler. Radyoaktif hale gelen çekirdeğin parçalanmaya uğraması olayına da **yapay radyoaktivite** denir.

2.2.1 Radyoaktif Bozunum Türleri

Radyoaktif bozunma; fazla enerjiye sahip bir çekirdeğin elementler veya elektromanyetik parçacıklar yayma yoluyla değişime uğramasıdır. Radyoaktif bozunma modelleri; alfa bozunumu, beta bozunumu, gama bozunumu şeklinde sıralanabilir.

2.2.1.1 Alfa (α) Bozunumu

Ana çekirdeğin bir ürün çekirdeğe ve bir alfa parçacığına parçalanması işlemidir. Alfa parçacıkları iki kere iyonlaşmış helyum atomlarıdır. (He^{++}) Alfa bozunması işleminde ana çekirdek iki proton ve iki nötron kaybederek kütlesi dört birim, yükü ise iki birim azalır.

Bu nükleer parçalanma;



bağıntısıyla temsil edilebilir. Alfa bozunumu ile çekirdeğin kimyasal ve fiziksel özellikleri değişir. Alfa bozunumu doğada bulunan ağır çekirdekli (uranyum, radyum gibi) atomlarda gerçekleşmektedir.

2.2.1.2 Beta (β) Bozunumu

Fazla proton veya nötrona sahip olan bir çekirdek, bir protonu nötrona veya bir nötronu protona dönüştürerek kurtulabilir. Bu işlemi üç farklı yolla gerçekleştirebilir. Bunlar;

$$n \rightarrow p + e^{-} \quad \beta^{-} \text{ bozunumu (negatif beta bozunumu)} \quad (2.2)$$

$$p \rightarrow n + e^{+} \quad \beta^{+} \text{ bozunumu (pozitif beta bozunumu)} \quad (2.3)$$

$$p + e^{-} \rightarrow n \quad \text{elektron yakalama } (\varepsilon) \quad (2.4)$$

bağıntılarıyla gösterilebilir.

Negatif β bozunumu veya negatron bozunumu, bir elektronun yaratılıp yayınlanmasını kapsar. Pozitif β bozunumu veya pozitron bozunumu, pozitif yüklü bir elektron yayınlar. Elektron yakalamada, çekirdeğe çok yakın elektron çekirdek tarafından yakalanır ve bir proton bir nötrona dönüşür.

2.2.1.3 Gama (γ) Bozunumu

Radyoaktif gama yayınlanması, optik veya X ışını geçişleri gibi atomik radyasyon yayınlanmasına benzer. Uyarılmış bir durum daha düşük bir uyarılmış duruma veya taban duruma, nükleer durumlar arasındaki farka eşit bir enerjiye, bir γ ışını yayınlayarak geçer. Gama yayınlanması uyarılmış bağlı durumları olan ($A > 5$) tüm çekirdeklerde gözlenir. Gama ışınlarının enerjileri 0,1 MeV ile 3 MeV arasında değişmektedir. Gama bozunumunun şematik gösterimi;

$$({}^A_ZX)^* \rightarrow {}^A_ZX + \gamma \quad (*\text{uyarılmış durum}) \quad (2.5)$$

şeklindedir.

2.3 Radyoaktif Bozunma Kanunu

Bir atomun çekirdeğinin bir alfa parçacığı, bir beta parçacığı, bir gama ışını veya herhangi bir parçacık yayınlaması ya da elektron yakalaması olayına radyoaktif bozunma denir. Radyoaktif bozunma, deneysel verilere göre eksponansiyel bir kanuna

göre gerçekleşmektedir. Bu kanunun türetilmesi için bozunmanın rastgele bir anda gerçekleşeceğini kabul edelim. Yani bu kanun, hangi atomun hangi anda bozunacağını bilmesinin mümkün olmadığını ifade eder.

Bozunmamış her bir çekirdeğin gelecek bir saniye içindeki bozunma olasılığının ölçüsüne λ diyelim ve aynı zamanda da $\lambda \ll 1$ olduğunu kabul edelim. Bir dt zaman aralığında her bir atomun bozunma olasılığı λdt olacaktır. Verilen bir zamanda N sayıda bozunmamış atom varsa dt küçük aralığında bozunacak olanların sayısı

$$dN = -\lambda N dt \quad (2.6)$$

olur.

Yani denklemden (2.6) anlaşılacağı üzere; kısa bir dt süresindeki bozunma sayısı bozunmamış atomların sayısıyla, N ve dt zaman aralığıyla doğru orantılıdır. (Denklemdaki eksi işareti t arttıkça N 'nin azaldığını göstermektedir.)

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt \quad (2.7)$$

şeklinde yazılıp $t = 0$ iken radyoaktif atomların sayısının N_0 olduğu varsayılarak integral alınırsa

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2.8)$$

elde edilir. Burada $N(t)$, t anındaki mevcut radyoaktif atomların sayısını göstermektedir. λ olasılık simgesi parçalanma sabiti veya bozunma sabiti adını alır. Verilen bir radyoaktif numunedeki mevcut radyoaktif atomların sayısını bilmekten ziyade, birim zamanda bozunmaya uğrayan atomların sayısını bilmek daha önemlidir. Bu sayı radyoaktif numunenin aktifliği kullanılarak bulunur. *Aktiflik*, verilen bir numunede saniyedeki parçalanma sayısı olarak tanımlanır.

$$\begin{aligned} \text{Aktiflik (A)} &= \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N_0 e^{-\lambda t} \\ &= \lambda N \end{aligned} \quad (2.9)$$

bulunur. Numunenin aktifliği mevcut radyoaktif atomların sayısına (N) ve bozunma sabitine (λ) bağlıdır.

2.3.1 Yarı Ömür

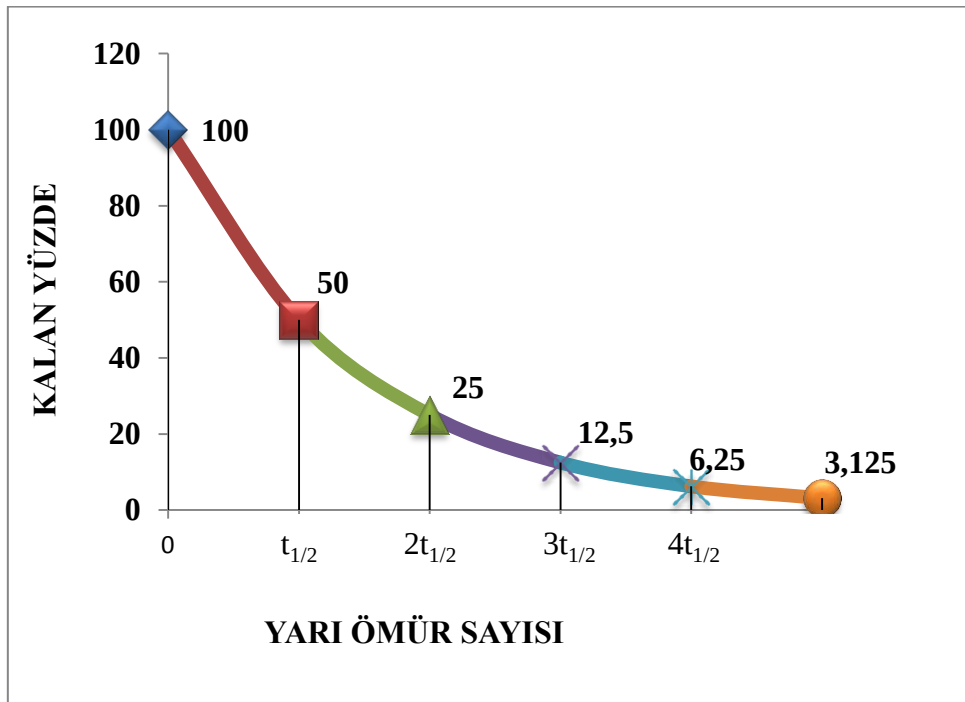
$t_{1/2}$ ile gösterilen yarı ömür radyoaktivite için önemli bir niceliktir. Yarı ömür, aktifliğin yarıya düşmesi için gerekli zaman olarak tanımlanabilir. Yani $t_{1/2}$ bozunmamış atomların sayısının yarıya düşmesi için gerekli zaman aralığıdır ve Şekil 2.2’de görölmektedir.

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2.10)$$

$N = \frac{N_0}{2}$ ve $t = t_{1/2}$ değerleri 2.10’da yerine yazılırsa;

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda t_{1/2}} \rightarrow t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda} \quad (2.11)$$

elde edilir. Burada λ ’nın birimi zamanın tersidir (s^{-1}).



Şekil 2.2 Radyoaktif bir numunenin zamanla değişimi

2.3.2 Ortalama Ömür

Bozunma exponansiyel olarak ifade edildiğinden, radyoaktif bir atomun tamamen kaybolması için sonsuz zaman gerekir. Hangi atomun ne zaman bozunmaya uğrayacağını bilemeyiz. Herhangi bir atom sıfırdan sonsuza kadar değişik bir ömre sahip olabilir. Bu olay için istatistiki olarak averaj veya ortalama ömür (τ) niceliği belirlenmelidir.

Radyoaktif bir çekirdeğin ortalama ömrünü hesaplamak için; bütün çekirdeklerin ömürlerinin toplamını, toplam çekirdek sayısına bölünmelidir. Varsayalım ki; t_1 ömrüne sahip dN_1 sayıda çekirdek, t_2 ömrüne sahip dN_2 sayıda çekirdek vs. olsun. Buna göre ortalama ömür;

$$\tau = \frac{t_1 dN_1 + t_2 dN_2 + t_3 dN_3 + \dots}{dN_1 + dN_2 + dN_3 + \dots} \quad (2.12)$$

şeklinde yazılabilir. $N_0 = dN_1 + dN_2 + dN_3 + \dots$ olmak üzere, 2.12 ifadesi integral şeklinde yazılırsa;

$$\tau = \frac{\int_0^{N_0} t dN}{\int_0^{N_0} dN} = \frac{\int_0^{N_0} t dN}{N_0} \quad (2.13)$$

elde edilir. Bu ifadede dN nin yerine denklem 2.6'daki değeri yazılırsa;

$$\tau = \frac{-\int_0^{N_0} \lambda t N_0 e^{-\lambda t} dt}{N_0} = \int_0^{\infty} \lambda e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \quad (2.14)$$
$$\tau = \frac{1}{\lambda}$$

elde edilir.

2.3.3 Biyolojik Yarı Ömür ($t_{1/2b}$)

Biyolojik yarı ömür, sindirim sistemi, solunum yoluyla ya da damardan enjeksiyonla vücuda alınan bir radyoaktif maddenin, biyolojik olaylar sonunda alınan miktarının

yarısının vücuttan atılması için geçen zamandır. Vücuda alınabilen radyoaktif maddelerin her birinin belirli bir biyolojik yarı ömrü vardır.

2.3.4 Etkin Yarı Ömür ($t_{1/2e}$)

Fiziksel ve biyolojik yarı ömür göz önünde bulundurulduğunda doku tarafından absorbe edilen radyasyon miktarını belirler.

$$\frac{1}{t_{1/2e}} = \frac{1}{t_{1/2}} + \frac{1}{t_{1/2b}} \quad (2.15)$$

$$t_{1/2e} = \frac{t_{1/2} \times t_{1/2b}}{t_{1/2} + t_{1/2b}} \quad (2.16)$$

2.3.5 Peş Peşe Parçalanma Kanunu

Gerek doğal olarak bulunan radyoaktif izotoplarda ve gerekse yapay olarak meydana getirilen radyoaktif izotoplarda bozunma, eğer ürün çekirdek de radyoaktif ise peş peşe parçalanmalar şeklinde meydana gelebilir. Birçok durumda peş peşe bozunma, ana maddenin ürüne ve ürünün de kararlı bir izotopa bozunmasıyla sınırlıdır. Herhangi bir t anında λ_1 bozunma sabiti ile ürüne bozunacak ana elementin atomlarının sayısı N olsun, ürün atomlarının sayısı da N_2 ve ürün atomları da λ_2 bozunma sabitiyle sayısı N_3 olan kararlı bir elemente bozunsun. Başlangıçta ($t=0$ da) $N_1 = N_{10}$; $N_2 = N_{20}$ ve $N_3 = N_{30} = 0$ olduğunu varsayalım. Buna göre;

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1 \quad (2.17)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \quad (2.18)$$

2.18'e göre N_2 tipindeki atomlar $\lambda_1 N_1$ hızıyla üretilirler ve $\lambda_2 N_2$ hızıyla da gözden kaybolurlar. N_2 tipindeki atomlar radyoaktif olduklarından N_3 atomlarını üretirler. N_3 atomlarının üretilme hızı;

$$\frac{dN_3}{dt} = \lambda_2 N_2 = N_3 \quad (2.19)$$

şeklinde ifade edilir. 2.17 denkleminde başlangıçtaki şartlar uygulanır ve integrali alınırsa;

$$N_1 = N_{10} e^{-\lambda_1 t} \quad (2.20)$$

elde edilir. 2.18 denkleminde N_1 değeri yerine yazılırsa;

$$\frac{dN_2}{dt} + \lambda_2 N_2 = \lambda_1 N_{10} e^{\lambda_1 t} \quad (2.21)$$

elde edilir. Bu bağıntının her iki tarafı $e^{\lambda_2 t}$ ile çarpılırsa;

$$e^{\lambda_2 t} \frac{dN_2}{dt} + \lambda_2 N_2 e^{\lambda_2 t} = \lambda_1 N_{10} e^{-\lambda_1 t} e^{\lambda_2 t} \quad (2.22)$$

veya

$$\frac{d}{dt} (N_2 e^{\lambda_2 t}) = \lambda_1 N_{10} e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t} \quad (2.23)$$

elde edilir. 2.23'te integral alınırsa;

$$N_2 e^{\lambda_2 t} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t} + C \quad (2.24)$$

bulunur. $t = 0$ da $N_2 = N_{20} = 0$ alınarak 2.24'te yerine konulursa;

$$C = -\frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} \quad (2.25)$$

bulunur. Bulunan bu C değeri 2.24 denkleminde yerine yazılıp, her iki taraf $e^{\lambda_2 t}$ 'ye bölünürse;

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \quad (2.26)$$

olur. 2.19 bağıntısı da benzer şekilde, $t = 0, N_3 = N_{30} = 0$ şartıyla çözülürse;

$$N_3 = N_{10} \left(1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_2 t} - \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_1 t} \right) \quad (2.27)$$

bulunur.

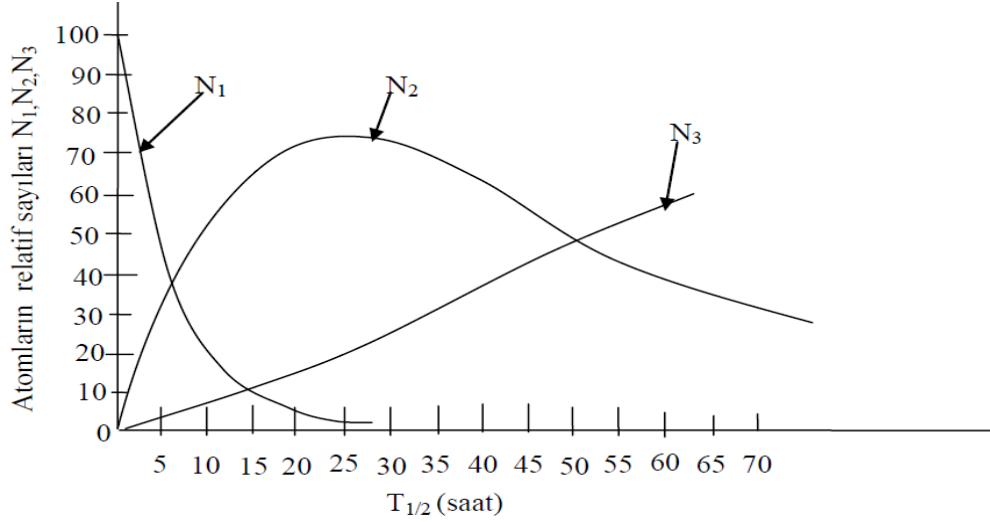
Zincirleme bozunma problemi herhangi bir sayıdaki zincirleme radyoaktif bozunmalara genelleştirilebilir. Zincirleme bozunmaları temsil eden diferansiyel denklemler;

$$\begin{aligned} dN_1/dt &= -\lambda_1 N_1 \\ dN_2/dt &= \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \\ dN_3/dt &= \lambda_2 N_2 - \lambda_3 N_3 \\ &\vdots \\ &\vdots \\ &\vdots \\ dN_n/dt &= \lambda_{n-1} N_{n-1} - \lambda_n N_n \end{aligned} \quad (2.28)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada;

($N_1, N_2, N_3, \dots, N_{n-l}$ herhangi bir t anında mevcut olan izotop atomlarının sayısı, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_{n-l}$ mevcut atomların sırasıyla bozunma sabitleridir.)

Eğer mevcut olan farklı izotopların radyoaktif atomlarının $t = 0$ da $N_{10}, N_{20}, N_{30}, \dots, N_{n0}$ biliniyorsa herhangi bir t anında $N_1, N_2, N_3, \dots, N_n$ değerlerini, 2.28 eşitliğinden yararlanarak bulabiliriz. $t = 0$ iken $N_{10} = 100$ ve $N_{20} = N_{30} = 0$ şartları altında başlayan $^{105}_{44}\text{Ru}$ bozunmasıyla oluşan N_1, N_2, N_3 'ün t 'ye göre değişimi Şekil 2.3'te görülmektedir.



Şekil 2.3 Peş peşe bozunma grafiği

2.4 Radyoaktif Denge

Zincirleme bozunma eşitliklerini bazı özel durumlara uygularsak iki durum ortaya çıkar. Bu durumlardan birisi $\lambda_1 \cong \lambda_2$ olduğu durum, diğer durum ise $\lambda_1 \ll \lambda_2$ olduğu durumdur. Birinci durum geçici denge, ikinci durum ise kalıcı dengedir.

2.4.1 Geçici Denge

Bir ana çekirdeğin λ_1 bozunma sabitiyle birinci ürüne, onun da λ_2 sabitiyle ikinci ürüne bozunduğunu kabul edelim. Bu iki çekirdek için $\lambda_1 \cong \lambda_2$ olduğunu varsayalım. Buna göre, 2.26 ifadesinin zamana göre türevi alınıp sıfıra eşitlenmesiyle N_2 'nin maksimuma ulaştığı süre,

$$t_m = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \quad (2.29)$$

bulunur.

Bu t_m süresinden sonra birinci ürünün bozunma hızına (dN_2/dt' ye) λ_1 ve λ_2 den hangisi büyükse o etkili olacaktır. Buna göre:

$$\lambda_1 < \lambda_2 \text{ ise;}$$

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} (N_{10} e^{-\lambda_1 t}) \quad (2.30)$$

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} (N_1) \quad (2.31)$$

veya

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (2.32)$$

olacaktır.

Aktiviter oranı ise;

$$\frac{dN_2/dt}{dN_1/dt} = \frac{\lambda_2 N_2}{\lambda_1 N_1} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (2.33)$$

şeklindedir. Bu durumda ana çekirdek ürün çekirdekle geçici olarak dengededir denir. 2.32 ifadesine göre de N_2/N_1 ifadesi sabit kalacaktır.

$\lambda_1 > \lambda_2$ ise;

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} (N_{10} e^{-\lambda_2 t}) \quad (2.34)$$

yazılabilir. Bu durum ise, belli bir zaman sonra birinci ürün elementin λ_2 ile bozunacağını gösterir. Belli bir süre sonra ana element bitecek ve birinci ürün de kendi hızıyla bozunmasına devam edecektir.

2.4.2 Kalıcı veya Sürekli Denge

Birinci ürünün herhangi bir t anındaki sayısını veren 2.26 ifadesini göz önüne alalım. $\lambda_1 \ll \lambda_2$ olsun. Buna göre, $\lambda_2 - \lambda_1 \approx \lambda_2$ ve $e^{-\lambda_1 t} \approx 1$ alınabilir ve;

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} N_{10} (1 - e^{-\lambda_2 t}) \quad (2.35)$$

ifadesi yazılabilir. Burada $\lambda_2 t \gg 1$ olup $e^{-\lambda_2 t} \approx 0$ 'dır. Bu sonuç, birinci ürünün (N_2)'nin sabit olduğunu gösterir. Bu durumda birinci ürünün ana ürünle sürekli dengede olduğu söylenebilir. N_1 için $N_1 \approx N_{10}$ yazılabilir. Buna göre de;

$$\lambda_2 N_2 \approx \lambda_1 N_1$$

ifadesi elde edilir. Bu ifade kalıcı denge şartı olarak adlandırılır.

2.5 Doğal Radyoaktif Seriler

Doğal olarak bulunan izotopların radyoaktifliklerinin araştırılması sonucunda, atom numarası $Z=81$ ile $Z=92$ arasında bulunan elementler arasında birçok radyoizotop olduğu belirlendi. Bu durumun sebebi, büyük Z 'li elementlerin protonları arasındaki Coulomb itmesi sonucu daha az kararlı yapıya sahip olmalarıdır. Çekirdek bu etkiyi azaltabilmek için α bozunmasına maruz kalır ve iki protonunu ve iki nötronunu kaybeder. Birçok durumda olduğu gibi çekirdek nötron yayınlamak yerine elektron veya beta ışını yayınlatabilir. β yayınlanması işleminde toplam yükü korumak için bir nötron bir protona dönüşür. Bu α ve β bozunma zinciri, izotop kararlı duruma ulaşıncaya kadar devam eder. Bu şekilde gerçekleşen zincirleme reaksiyonlar doğada dört farklı radyoaktif seride görülmektedir.

$Z = 81$ ile $Z = 92$ arasında olan ve doğal olarak bulunan radyoaktif izotoplar, A kütle numaralarına bağlı olarak, dört seriden birinde yer alırlar. Bu seriler Çizelge 2.1'de görülmektedir.

Çizelge 2.1 Radyoaktif seriler

Türü	Seri Adı	Ana Çekirdek	Son Çekirdek	Yarı Ömür (yıl)
4n	Toryum	$^{232}_{90}Th$	$^{208}_{82}Pb$	$1,41 \times 10^{10}$
4n+1	Neptinyum	$^{237}_{93}Np$	$^{209}_{83}Bi$	$2,14 \times 10^6$
4n+2	Uranyum	$^{238}_{92}U$	$^{206}_{82}Pb$	$4,47 \times 10^9$
4n+3	Aktinyum	$^{235}_{92}U$	$^{207}_{82}Pb$	$7,04 \times 10^8$

Tabloda n bir tamsayıdır. Alfa bozunmasında kütle dört birim değişeceğinden ve beta veya gama bozunmasında kütlede bir değişme olmayacağından bu gruplardan herhangi birinde başlayan bir bozunma işlemi yine aynı grupta bitecektir.

Bu serilerin varlığı, neptinyumun bulunduğu seri dışında, her serideki ana element uzun ömürlüdür. Neptinyum serisinin ana elementinin nispeten kısa yarı ömürlü olmasından dolayı bu elementler doğada bulunmaz.

2.6 Radyoaktivite ve Radyasyon Birimleri

Uluslararası Radyasyon Birimleri Komitesi (ICRU) radyasyon çalışmalarında kullanılan kavramlar olan aktivite, ışınlama dozu, soğrulma dozu, doz eşdeğeri için özel birimler tanımlamıştır. Curie (Ci), Röntgen (R), rad ve rem olarak adlandırılan bu özel birimler 1986 yılından itibaren terk edilmeye başlanmış ve yerine tüm dünyada kullanılan birimlerin aynı olması düşüncesiyle M.K.S. sistemini esas alan “Uluslar arası Birimler Sistemi (SI)” kullanılmaktadır. Aynı kavramlar için SI birimleri sırasıyla Becquerel (Bq), Coulomb/kg, Gray (Gy) ve Sievert (Sv) olarak seçilmiştir.

Aktivite birimi,

Curie

Bu birim, tam olarak, saniyede $3,7 \times 10^{10}$ ani nükleer bozunma üretmeye karşı gelen aktivite büyüklüğü olarak tanımlanmıştır.

Becquerel (Bq)

1 Bq, saniyedeki 1 nükleer dönüşüme (bozunuma) karşılık gelmektedir.

Sıvıdaki radyoaktivite (Bq/L)

Katılardaki radyoaktivite (Bq/kg)

Radyoaktif yağışlar sonunda toprak yüzeyindeki radyoaktivite (Bq/m^2)

Havadaki radyoaktivite ise (Bq/m^3) olarak elde edilir.

Işınlanma Doz Birimi

Röntgen : Havanın verilen bir m kütlesinde oluşan iyonlardaki toplam Q yükü ışınlama ya da poz (X) olarak tanımlanır. Buna göre poz, $X = Q/m$ ile ifade edilir. Birimi Röntgendir.

Bir röntgen, bir kg havada $2,58 \times 10^{-4}$ coulomb yük üreten elektromanyetik radyasyon olarak tanımlanır. Bu özel birim, havadaki fotonlara uygulanır; bu bakımdan ne başka radyasyonlar için ve ne de başka ortamlar için kullanılmaz.

Soğurulan Doz Birimi

RAD : Bir iyonize radyasyon tarafından soğurucu ortamın birim kütlesine verilen enerji olarak tanımlanır.

1 Rad = 100 erg/gr veya 0,01 J/kg olarak tanımlanır.

Rad, herhangi bir iyonize radyasyon veya herhangi bir ortam için kullanılabilir.

Gray (Gy) : Herhangi bir maddenin bir kg'ı başına bir joule'lük enerji soğurulması meydana getiren herhangi bir radyasyon miktarıdır.

Eşdeğer Doz

Radyasyona maruz kalan bir insanda meydana gelebilecek zararlı biyolojik etkileri de ölçülebilen bir birime ihtiyaç vardır. Vücudun kilogramı başına soğurduğu enerjinin meydana getirdiği biyolojik etki, maruz kalınan radyasyonun cinsine ve enerjisine göre farklılık gösterir. Örneğin; alfa tanecikleri, beta taneciklerine göre daha ağır ve yüksek enerjili olduklarından, vücut içinde kat ettikleri birim yol başına çok daha fazla enerji bıraktıkları için geçtikleri bölgenin daha fazla tahrip olmasına neden olurlar. Ayrıca bazı organların diğer organlara göre radyasyon hassasiyeti farklıdır ve aynı doza karşı oluşan biyolojik etki de farklıdır. Eşdeğer doz (etkin eşdeğer doz), bütün bu faktörleri içine alan radyasyon dozu için kullanılmaktadır. Eşdeğer doz, doz ile kalite faktörünün çarpımına eşittir.

Eş değer Doz (ED) = soğurulan doz (D) x kalite faktörü (QF)

Eşdeğer doz birimi : Rem

1 Rem = Rad x QF

Sievert (Sv) : $1 \text{ Sv} = \text{Gy} \times \text{QF} = 1 \text{ J/kg}$

Sievert çok büyük bir birim olduğundan genellikle bunun bin kat küçüğü olan milisievert (mSv) kullanılır.

Radyasyon terimlerinin ve özel birimlerin, SI birimleri ile arasındaki ilişki Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.2 Radyasyon terimleri ve özel birimler ile SI birimleri arasındaki ilişki

TERİM	ESKİ BİRİM	YENİ BİRİM	DÖNÜŞÜM
<i>Aktivite</i>	<i>Curie (Ci)</i>	<i>Becquerel (Bq)</i>	$1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$ $1 \text{ Ci} = 37 \text{ GBq}$
<i>Işınlanma Dozu</i>	<i>Röntgen (R)</i>	<i>Röntgen (C/kg)</i>	$1 \text{ C/kg} = 3876 \text{ R}$ $1 \text{ R} = 2,58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$
<i>Soğurulan Doz</i>	<i>Rad (rad)</i>	<i>Gray (Gy)</i>	$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$ $1 \text{ rad} = 0,01 \text{ Gy}$
<i>Eşdeğer Doz</i>	<i>Rem (rem)</i>	<i>Sievert (Sv)</i>	$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$ $1 \text{ rem} = 0,01 \text{ Sv}$

2.7 Radyasyon

Radyasyon; ortamda yol alan enerji olarak tanımlanabilir. Doğal ya da yapay radyoaktif çekirdeklerin kararlı yapıya geçebilmek için dışarıya saldıkları elektromanyetik dalga ve hızlı parçacıklar şeklinde taşıdıkları fazla enerjiye “radyasyon” denir.

Radyasyon parçacık ve dalga tipi radyasyon olarak temelde iki sınıfa ayrılabilir. Belli bir kütleye ve enerjiye sahip olan, çok hızlı hareket edebilen minik parçacıklara “parçacık radyasyonu”, kütsüz ve belli bir enerjisi olan radyasyon çeşidine de “dalga tipi radyasyon” denir.

Parçacık ve dalga tipi radyasyonları; “iyonlaştırıcı” ve “iyonlaştırıcı olmayan” radyasyon şeklinde iki gruba ayırabiliriz.

2.7.1 İyonlaştırıcı Radyasyon

Yüksüz atom veya molekülün yüklü hale gelmesi işlemine iyonlaşma ve oluşan yapıya da iyon adı verilir. Elektron atomdan ayrıldığında diğer atom veya molekülleri

iyonlaştırabilir ve iyonlaşmaya neden olan her radyasyon iyonlaştırıcı radyasyon olarak tanımlanır.

İyonizasyon olayı herhangi bir maddede meydana gelebildiği gibi tüm canlılarda da oluşabilir. Dolayısıyla iyonlaştırıcı radyasyon önlem alınmadığı takdirde tüm canlılar için zararlıdır.

İyonlaştırıcı radyasyon çeşitleri; elektromanyetik radyasyon ve parçacıklı radyasyon olmak üzere iki tiptir.

2.7.1.1 Elektromanyetik Radyasyon

Elektromanyetik radyasyonlar gama ve X ışınlarıdır. Dalga boyları çok küçük ama enerjileri yüksektir.

Gama (γ) Işınları

Atom çekirdeğinin bozunumu sırasında salınan foton denilen enerji paketçikleri ya da kuantaları akımıdır. Yüksüz oldukları için manyetik alanda sapmazlar. Gama ışınları beta ışınlarına göre daha yüksek enerjiye sahiptirler ve dolayısıyla da daha girici ışınlardır. Gama ve x ışınları, alfa ve beta parçacıklarına göre madde içine daha fazla nüfuz ederler ve iyonlaşmaya sebep olma etkileri daha azdır. Sadece belli bir kısmı birkaç santimetre kalınlığındaki kurşun tuğlalarla durdurulabilir.

X Işınları

Atomların dış kılıfındaki elektron bulutunda, elektronların, çekirdeğe oldukça yakın yörüngelerden aşağılara dış ya da iç etkenlerle atlaması sonucu ortaya çıkan elektromanyetik ışımalardır. X ışınları yapay olarak röntgen tüplerinden de elde edilebilir. Gama ışınları gibi yüksek enerjili ve giricidirler.

2.7.1.2 Parçacıklı Radyasyon

Alfa (α) Parçacıkları

Helyum atomu çekirdeğinden oluşan alfa parçacığı iki proton ve iki nötrondan oluşur. Pozitif yüklü parçacıklardır. Giricilikleri çok azdır ve fotoğraf filmine etki ederler. Alfa parçacıkları, ince bir kâğıt tabaka veya cildimiz tarafından durdurulabilir. Bunun sebebi; alfa parçacıkları herhangi bir madde içerisinden geçerken yoğun bir iyonlaşma meydana getirirler ve enerjilerinden çabucak kurtulurlar. Dış radyasyon tehlikesi yaratmayan alfa parçacıkları mide, solunum ve yaralar aracılığıyla vücuda girdiklerinde tehlikeli olabilirler.

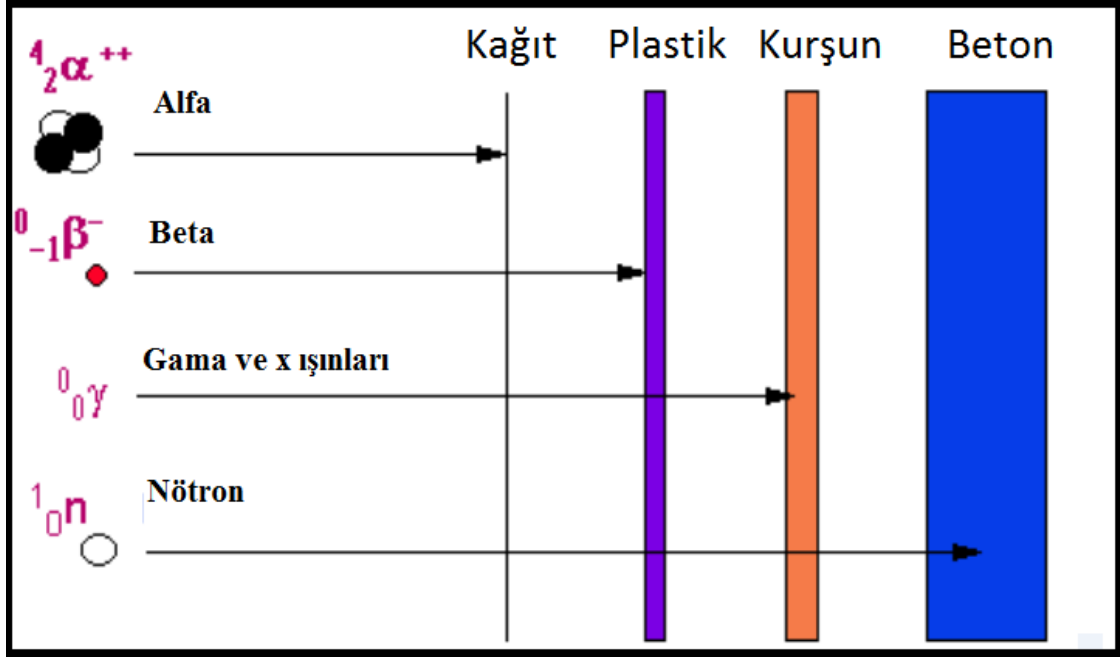
Beta (β) Parçacıkları

Çekirdek etrafında, çekirdeğin enerji fazlalığından kaynaklanan bir kütle oluşur. Bu kütle çekirdekte oluşan bu fazla yükü alır ve dışarıya beta ışını olarak çıkarır. Bunlar pozitif veya negatif yüklü elektronlardır. Çekirdekte meydana gelen enerji fazlalığı proton fazlalığından kaynaklıysa β^+ , nötron fazlalığından kaynaklı ise β^- açığa çıkar.

Beta parçacıkları belli bir yük ve kütleye sahiptirler ve madde içerisinden geçerken iyonlaşmaya sebep olurlar. Ancak oluşan bu iyonlaşma alfa parçacıklarının oluşturduğu iyonlaşmadan daha azdır ve daha giricidir. Fotoğraf filmine etki ederler. Korunmak için ince alüminyum levhadan yapılmış zırh malzemesi yeterlidir.

Nötronlar

Radyasyonla oluşan yüksüz parçacıklardır ve herhangi bir madde içerisine kolaylıkla nüfuz edebilirler. Doğrudan iyonlaştırıcı özelliğe sahip değildir. Ancak atomlarla etkileşimleri sırasında iyonlaşmaya neden olan alfa, gama, beta ve x ışınlarının çıkmasına neden olabilirler. Kalın beton, su veya parafin kütleleriyle nötronlar durdurulabilirler. Şekil 2.4'te alfa, beta ve gama parçacıklarının giricilikleri görülmektedir.



Şekil 2.4 Alfa, beta, gama ve nötron parçacıklarının giricilikleri

2.7.2 İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyon

Atomla etkileşime girebilecek kadar güçlü enerjilere sahip olmadıklarından iyonlaştırıcı radyasyon kadar etkili olamazlar. İyonlaştırıcı olmayan radyasyon kaynakları ultraviyole ışınları ve EMR nitelikli radyasyondur.

2.7.2.1 Ultraviyole Işınları (mor ötesi ışık)

Asıl kaynağı güneş olan ultraviyole ışınları güneş tam doğarken daha çok yayılırlar. Bu ışınlar beyaz kıyafetlerle engellenebilir. UV ışınları, kar veya kumdan yansıyarak güneş körlüğüne sebep olabilirler. UV'nin giriciliği az olduğu için deri ve gözleri daha çok etkilemektedir. Deri kanserinin %80'i bu ışınlardan kaynaklanmaktadır.

2.7.2.2 EMR Nitelikli Radyasyon

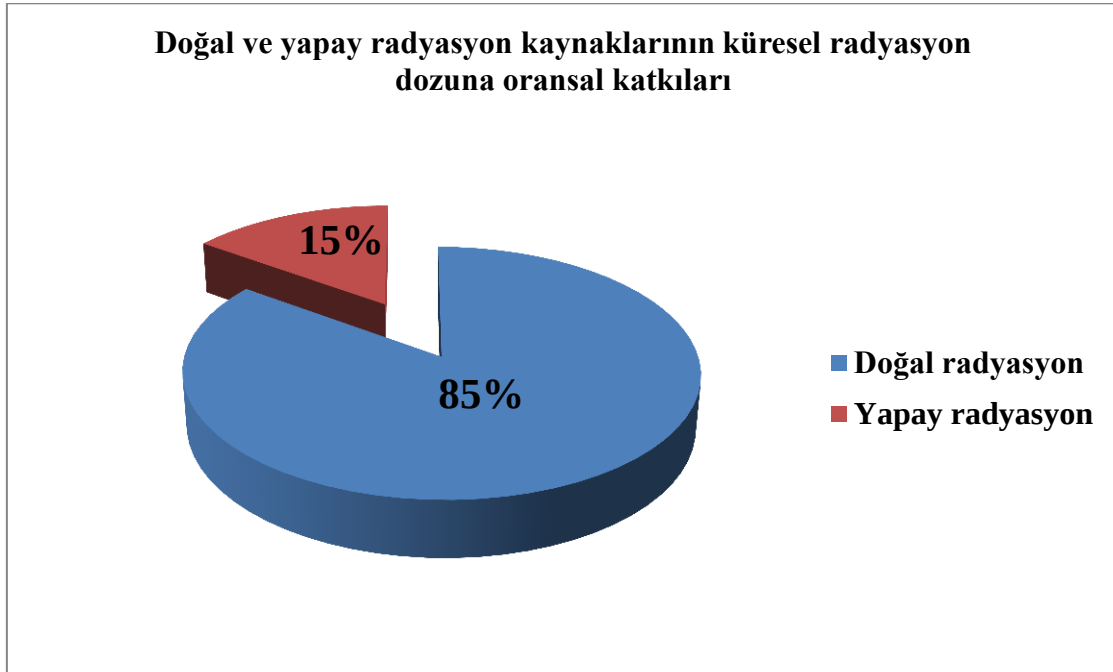
Mikrodalgalar, radyo dalgaları, trafolar, radyo FM ve TV vericileri, mobil ve cep telefonları, bilgisayarlar, trafolar, akım taşıyan kablolar ve radarlar bu grup içerisinde.

2.7.3 Radyasyon Kaynakları

Radyoaktif maddelerle iyonlaştırıcı radyasyon yayan ve üreten aygıtlara radyasyon kaynağı denir. Doğal ve yapay radyasyon kaynakları olmak üzere ikiye ayrılır. Doğal ve yapay radyasyon kaynaklarının küresel radyasyon dozuna oransal katkıları Şekil 2.5'te verilmiştir. Doğal ve yapay radyasyon kaynaklarından maruz kalınan dozun dünya ortalaması 2,7 mSv/yıl'dır. Bu dozun, radyasyon kaynaklarına göre dağılımı Çizelge 2.3'te verilmiştir.

Çizelge 2.3 Doğal ve yapay radyasyon kaynaklarından maruz kalınan dozun dağılımı

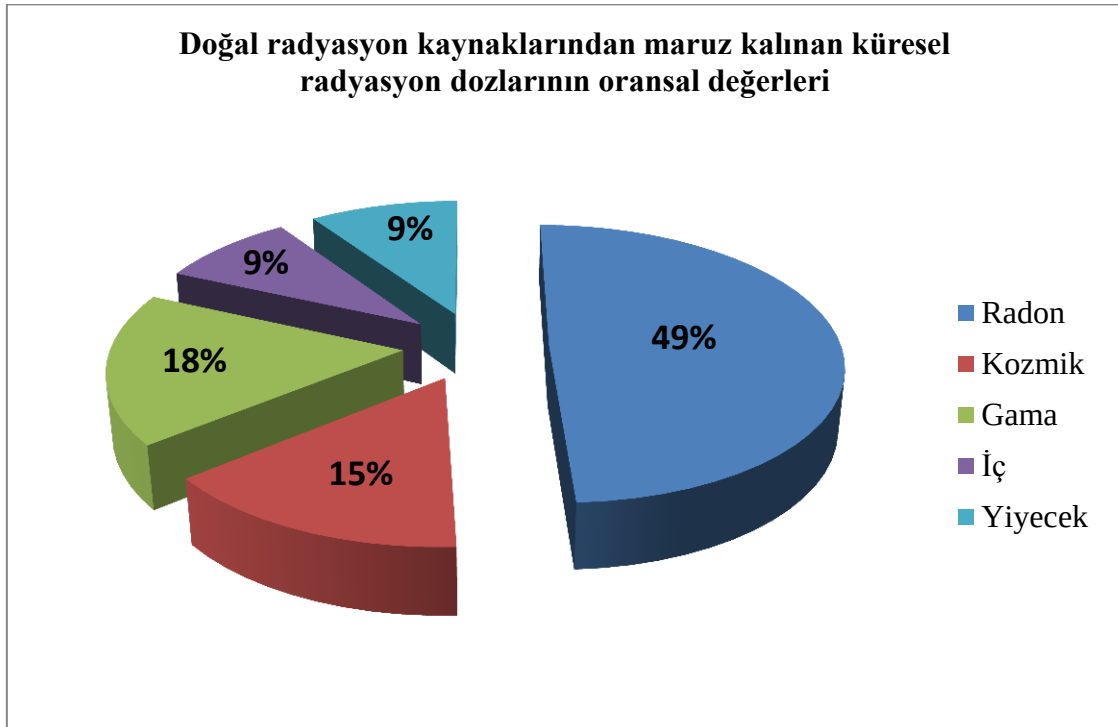
Radyasyon kaynağı	Doz (mSv)
Kozmik	0,39
Gama	0,46
İç	0,23
Radon	1,30
Tıbbi	0,30
Serpinti	0,007
Mesleki	0,002
Atıklar	0,001
Tüketici ürünler	0,0005



Şekil 2.5 Doğal ve yapay radyasyon kaynaklarının küresel radyasyon dozuna oransal katkıları

2.7.3.1 Doğal Radyasyon Kaynakları

Doğal radyasyon kaynaklarını; dünyanın dışından kaynaklanan yani güneşten ve uzaydan gelen kozmik ışınlar ve yer kabuğunda doğal olarak bulunan radyoaktif maddelerden meydana gelen karasal kaynaklar olarak sınıflandırabiliriz. Doğal radyasyon kaynaklarından maruz kalınan küresel radyasyon dozlarının oransal değerleri Şekil 2.6’da gösterilmiştir.

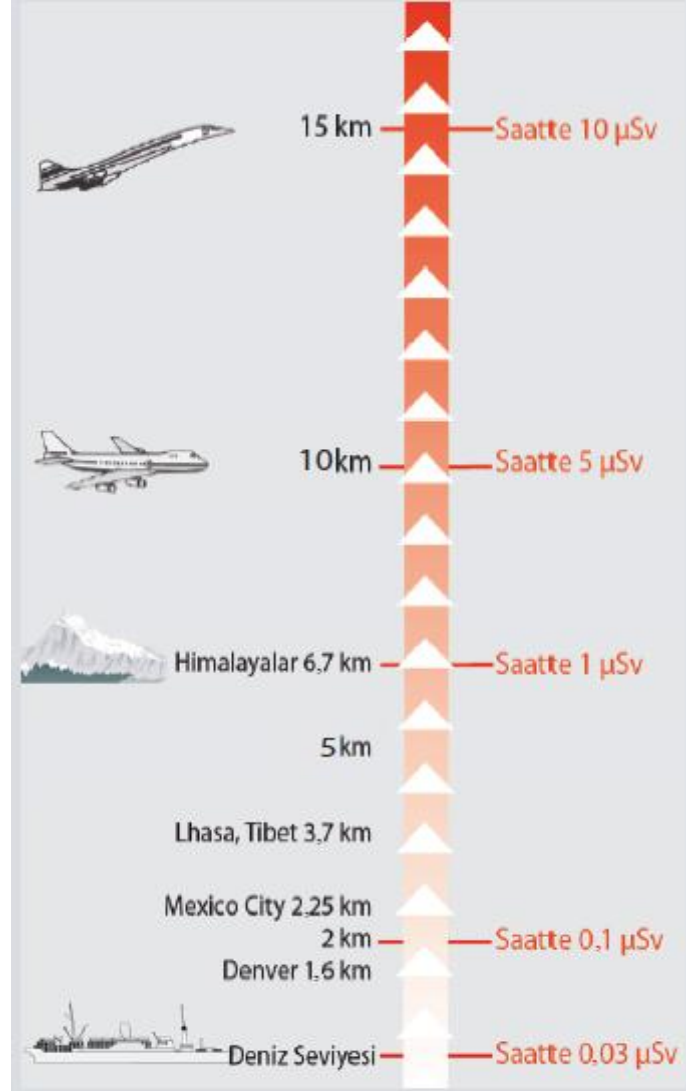


Şekil 2.6 Doğal radyasyon kaynaklarından maruz kalınan küresel radyasyon dozlarının oransal değerleri

Kozmik Radyasyon Kaynakları

Kozmik ışınlar, uzayda kökeni belli olmayan ve atmosfere hemen hemen sabit miktarda ulaşan yüksek enerjili protonlardır. Protonlar yüklü parçacıklar olduklarından dolayı atmosfere giren proton sayısı dünyanın manyetik alanından etkilenir. Bundan dolayı da doz hızı enlemle artar. Atmosfere nüfuz eden kozmik ışınlar karmaşık reaksiyonlar başlatır ve aşamalı bir şekilde soğurulurlar; böylelikle de yükseklik azaldıkça doz hızı düşer. Kozmik ışınlardan bir saatte alınan radyasyon dozunun yükseklikle değişimi Şekil 2.7’de görülmektedir. Kozmik radyasyon; protonlar, alfa parçacıkları, yüksek

enerjili çeşitli parçacıklar ve elektronlar gibi çeşitli radyasyon tipinin bir karışımıdır. UNSCEAR, enlem ve yükseklikteki değişimleri dikkate alarak, yer seviyesindeki kozmik ışınlardan kaynaklanan yıllık etkin dozu ortalama 0,4 mSv civarında hesaplamıştır.



Şekil 2.7 Kozmik ışınlardan bir saatte alınan radyasyon dozunun yüksekliğe göre değişimi

Karasal Radyasyon Kaynakları

Karasal radyasyonun temel kaynağı, yerkabuğunda bulunan radyonüklidler ve bunların meydana getirdiği bozunum ürünleridir. Canlıların dış ışınlamaya maruz kalmasında K^{40} ile U^{238} ve Th^{232} serisi radyonüklidler daha çok etkilidir. Bu radyonüklidler ve bozunum ürünleri; toprak, kaya, su, hava ve gıda maddeleri gibi çevresel ortamlarda

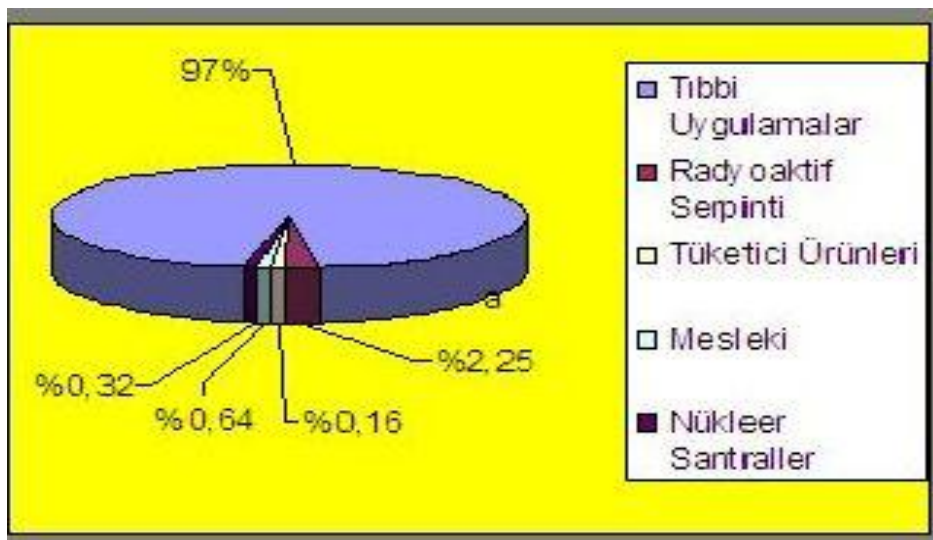
bulunmakta ve alfa, beta, gama radyasyonları ile canlıları ışınlamaktadır. Karasal radyasyona sebep olan bu radyonüklidler çevresel ortamlarda homojen bir dağılım göstermezler ve insanların yaşam alışkanlıklarına, faaliyetlerine bağlı olarak da iç ve dış ışınlamadan alınan doz değerlerinde değişiklik gösterirler.

Vücudumuzda bulunan radyoaktif elementlerden, yiyecek, içecek ve teneffüs edilen havadan dolayı da belli bir oranda iç ışınlamadan kaynaklı olarak radyasyona maruz kalırız.

2.7.3.2 Yapay Radyasyon Kaynakları

Doğal radyasyon kaynakları gibi yapay radyasyon kaynakları da belli miktarda radyasyon dozuna maruz kalmamıza neden olurlar. Ancak bu doz miktarı, doğal kaynaklardan alınan doza göre çok daha düşük bir orana sahiptir. Yapay radyasyon kaynaklarının tamamen kontrol altında olması, alınacak doz miktarı açısından önemli bir özelliktir.

Yapay radyoaktif maddeler, tıbbi, zirai ve endüstriyel amaçlı olarak kullanılan X ışınları, nükleer bomba denemeleri sonucunda meydana gelen nükleer serpintiler, az da olsa nükleer güç üretimden salınan radyoaktif maddeler, bazı tüketici ürünlerinde kullanılan radyoaktif maddeler bilinen başlıca yapay radyasyon kaynakları arasında sayılabilir. Şekil 2.8’de yapay radyasyon kaynaklarından maruz kalınan dozun oransal değerleri görülmektedir.



Şekil 2.8 Yapay radyasyon kaynaklarından maruz kalınan dozun oransal değerleri

2.8 Radon

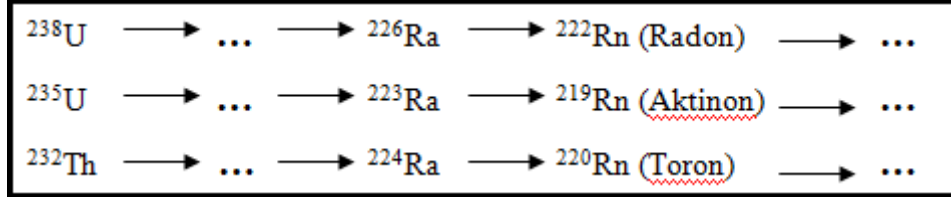
Radon; 1400'lü yıllarda madencilerde bilinmeyen bir akciğer hastalığıydı. Marie Curie tarafından radyum üzerindeki çalışmalarıyla radyoaktivitenin keşfinin ardından, doğal radyoaktivite ile ilgili önemli çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Radon 1898 ya da 1900 yılında (kaynaklara göre değişmektedir) Alman kimyager ve fizikçi Fredrich Ernst Dorn tarafından keşfedilmiştir. Ramsey ve Gray 1908 yılında radonun yoğunluğunu tespit ederek bilinen en ağır gaz olduğuna karar vermişlerdir.

Radon, duyu organlarıyla algılanamayan; renksiz, kokusuz, tatsız, doğal olarak oluşan radyoaktif bir gazdır. Periyodik cetvelde 86 atom numarası ile soy gazlar sınıfında yer alır. Havadan 7,5 kez, hidrojenden ise 100 kez daha ağır olan radon -61,8 °C'de sıvılaşır, -71 °C'de donar. Daha çok soğutulacak olursa yumuşak sarı bir renk vererek parlar ve sıvı hava sıcaklığı olan -195°C derecede turuncu-kırmızı arası bir renk alır. Radonun kimyasal özellikleri Çizelge 2.4'de görülmektedir.

Çizelge 2.4 Radonun kimyasal özellikleri

RADONUN KİMYASAL ÖZELLİKLERİ	
<i>Sembol</i>	Rn
<i>Sınıfı</i>	Soy gazlar
<i>Periyodik Cetveldeki Yeri</i>	0 grubu
<i>Atom Numarası</i>	86
<i>Atomik Yığın</i>	222 akb
<i>Erime Noktası</i>	-71.0 °C (202.15 °K)
<i>Kaynama Noktası</i>	-61.8 °C (211.35 °K, -79.24 °F)
<i>Proton ve Elektron Sayısı</i>	86
<i>Nötron Sayısı</i>	136
<i>Kristal yapısı</i>	Kübik
<i>Yoğunluk</i>	9.73 g/cm ³

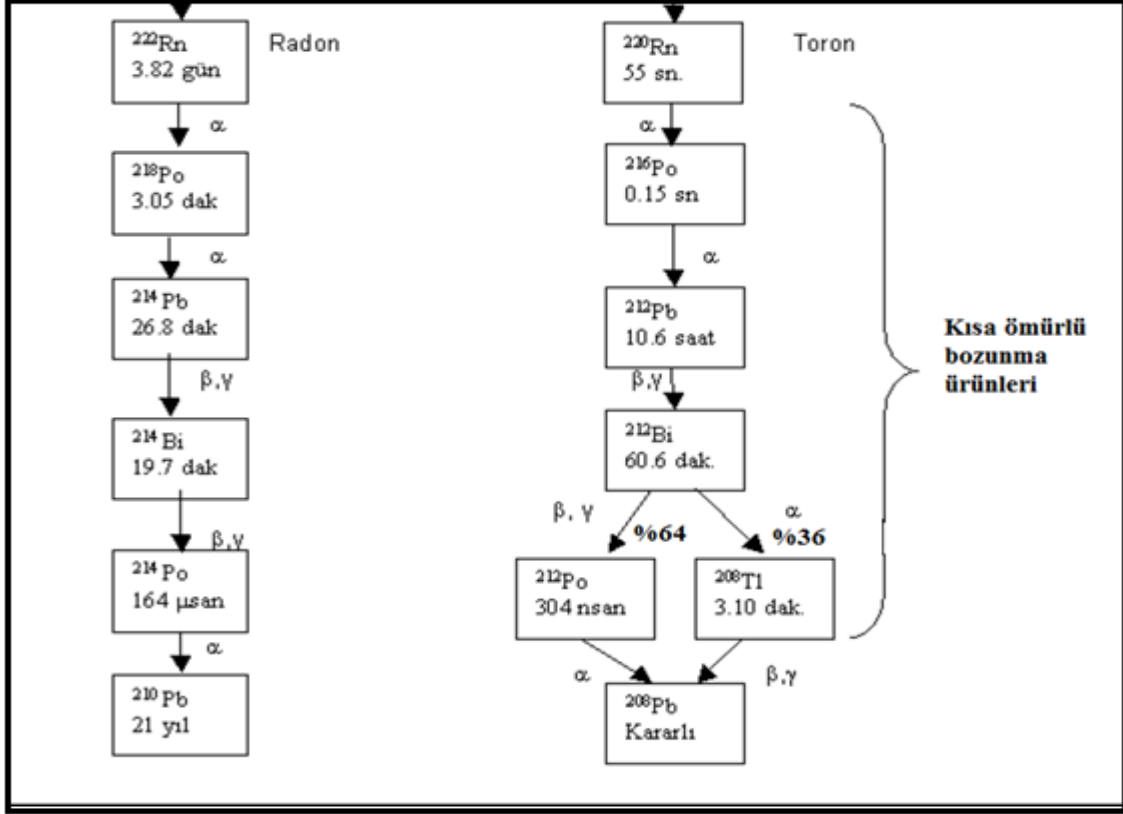
Radon, kaya, toprak ve suda doğal olarak bulunan uranyumun ve toryumun bozunması sonucunda meydana gelir. Radonun; ²³⁸U, ²³²Th, ²³⁵U'in radyoaktif parçalanması sonucunda meydana gelen üç izotopu vardır. Bunlar; radon, toron ve aktinondur. Aşağıda radon, toron, aktinonun bozunma şemaları gösterilmektedir.



Bozunma zincirinde yer alan ana atomlar, bütün doğal malzemelerde bulunabilir. Radon, toron ve aktinonun yarılanma süreleri sırasıyla; 3,8 gün, 55 saniye ve 3,9 saniyedir. Aktinonun yarı ömrünün çok kısa olması ve doğal uranyumdaki oranının $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ (0,00725) çok düşük olmasından dolayı, aktinonun etkisi ihmal edilebilir düzeydedir.

^{232}Th 'nin bozunması sonucunda oluşan ^{224}Ra 'ün alfa bozunumu sonucunda toron (^{220}Rn) meydana gelmektedir. Aktinona göre yarı ömrünün daha uzun olması nedeniyle doğal radyoaktif çevrede aktinona oranla daha fazla bir yoğunluk meydana getirir.

Radon denilince akla ^{222}Rn gelmektedir. Çünkü toron ve aktinonun yarı ömrü saniyeler mertebesinde. Radon kararsız bir radyoizotop olduğundan dolayı kararlı hale gelinceye kadar alfa parçacıkları yayarak radyoaktif bozunmasına devam eder. ^{238}U 'in doğada bol miktarda bulunduğundan, radyoaktif parçalanma ürünü olan ^{222}Rn 'nin atmosferdeki yoğunluğu yüksektir. Radon ve toronun bozunma zincirleri Şekil 2.9'da verilmiştir.



Şekil 2.9 Radon ve toronun bozunma zinciri

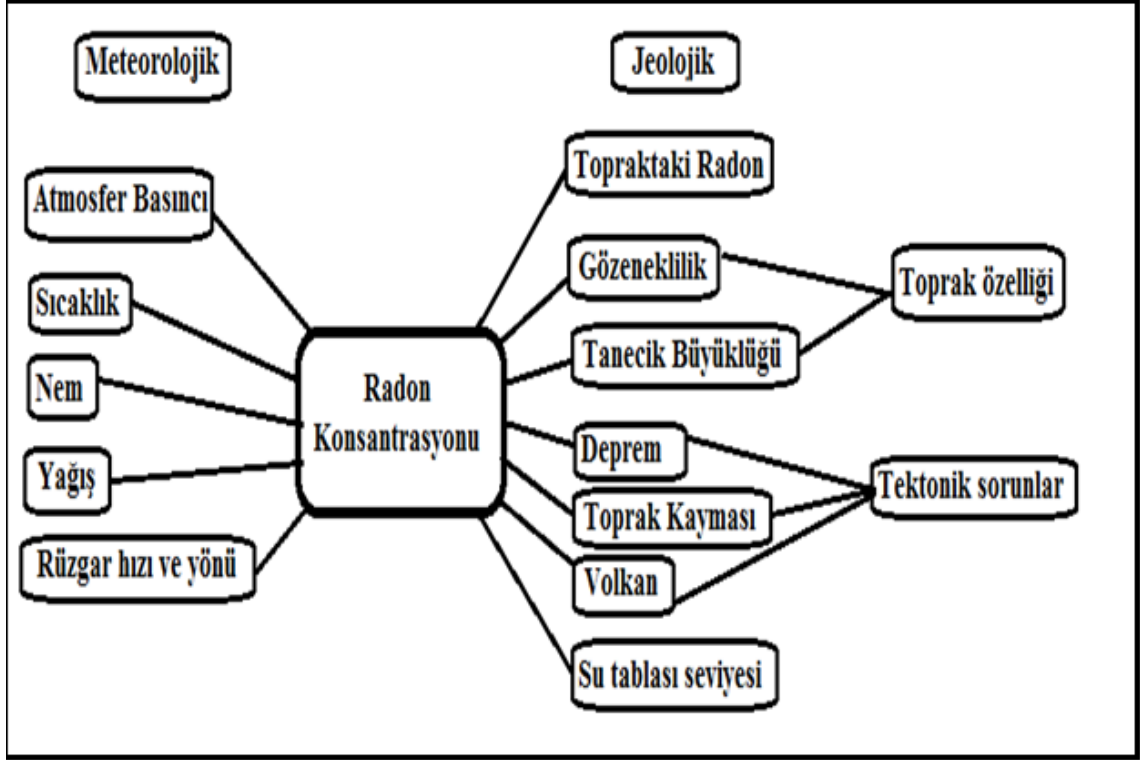
2.8.1 Radonu Etkileyen Parametreler

Doğal radyoaktif radon toprakta büyük oranda bulunmaktadır. Topraktaki porlardan ve çatlaklardan sızabilmekte ve suda çözünme özelliğinden dolayı da sularla taşınabilmektedir.

Topraktan radon salınması;

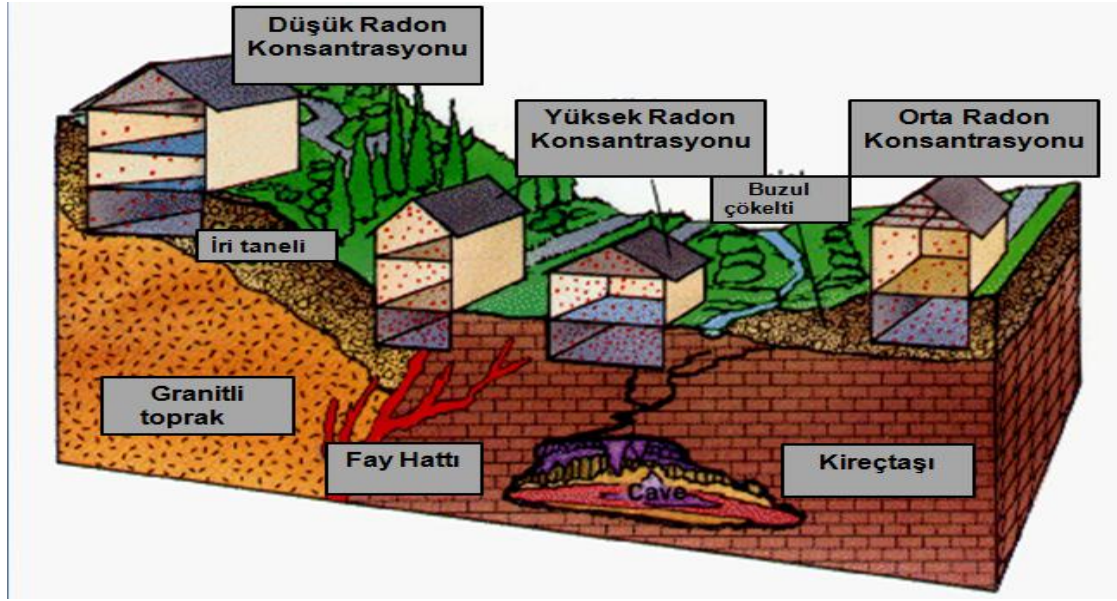
- ✓ Toprağın geçirgenliği (porozite, dansite ve granülometrik özellikleri),
- ✓ Duruluk (suyla tıkanmış olma, donma, kuruluk ve karla örtülü olma),
- ✓ Toprak ve hava sıcaklığı, hava basıncı, rüzgâr hızı ve rüzgârın yönü gibi meteorolojik koşullar,
- ✓ Bölgenin yüksekliği gibi parametrelerle ilişkilidir.

Bunlara ek olarak; yer altı suları, doğalgazlar, kömür, okyanuslar sınırlı da olsa radon salınımı yapmaktadırlar. Şekil 2.10'da radonu etkileyen parametreler gösterilmektedir.



Şekil 2.10 Radon konsantrasyonunu etkileyen meteorolojik ve jeolojik parametreler

Radon bölgeden bölgeye değişiklik göstermektedir ve hatta aynı yerleşim alanında bile farklı seviyelerde bulunabilmektedir. Radon salınımının en önemli nedeni yeraltındaki uranyum derişimidir. Granit ve volkanik topraklar, tortul şistler önemli radon kaynaklarını oluşturmaktadır. Sedimanter topraklarda ise radon konsantrasyonu düşüktür. Aşağıdaki Şekil 2.11’de kayaç yapısına bağlı olarak radon konsantrasyon yoğunlukları görülmektedir.



Şekil 2.11 Kayaç türleri ile radon konsantrasyonunun değişimi

2.8.2 Evlerde Radon

1984 yılında Pennsylvania, Boyer kentinde Limerick nükleer santralinde teknik danışman olarak çalışmaya başlayan Stanley Watres, henüz reaktör çalışmaya başlamamış olmasına rağmen radyasyon alarmıyla karşılaştı. Watres'in kiyafetlerinin dikkatle incelenmesinin ardından radyasyonun içeriden değil dışarıdan bir kaynaktan geldiği anlaşıldı. Evinde yapılan ölçümler sonucunda 3200 pCi/l'lik radyasyon belirlendi. Bu değer EPA'nın belirlediği 4 pCi/l'lik değerın 800 katına denk gelmektedir. 1980'li yıllara kadar ölçülen en yüksek değerdı. Daha sonra New Jersey'deki bir evde 3500 pCi'lik değır ölçüldü. 1956 yılında evlerde radon ölçümü ilk kez İsveç'te yapıldı. Bazı evlerde yüksek konsantrasyonlar tespit edilmesine rağmen üzerinde durulmadı. Bu durumun ölçüm yapılan bölgeye istisnai bir durum olduğu düşünöldü. 20 yıl kadar sonra tüm dünyada geniş ölçekli ve sistematik çalışmalar yapılmaya başlandı.

İnsanlar zamanlarının çoğunu kapalı ortamlarda geçirdiklerinden dolayı sürekli olarak radona maruz kalmaktadırlar. Binalardaki radon gazının büyük bir kısmı (%90), binanın temelindeki toprak ve kayalardan kaynaklanmaktadır. Kalan kısmı ise binanın yapıldığı yapı malzemeleri oluşturmaktadır. Binanın bulunduğu yerin kayaç yapısı radon konsantrasyonunu etkilemektedir. Volkanik ve granit kayaçların bulunduğu yerlerdeki

binaların radon konsantrasyonu daha yüksek çıkarken tortul kayaçlar üzerindeki binaların radon konsantrasyonu daha düşük çıkmaktadır. Binanın altındaki topraktaki oluşan radon gazı, zamanla topraktan yükselerek binanın altında birirmektedir. Binanın altındaki gazlar, ılıman ve soğuk iklimlerde bina içindeki havanın dışarıdaki havadan daha sıcak olması, oluşan basınç farkı, baca ve bina çıkışlarında oluşan hava dolaşımı gibi nedenlere bağlı olarak çatlaklardan, boşluklardan bina içerisine sızarlar.

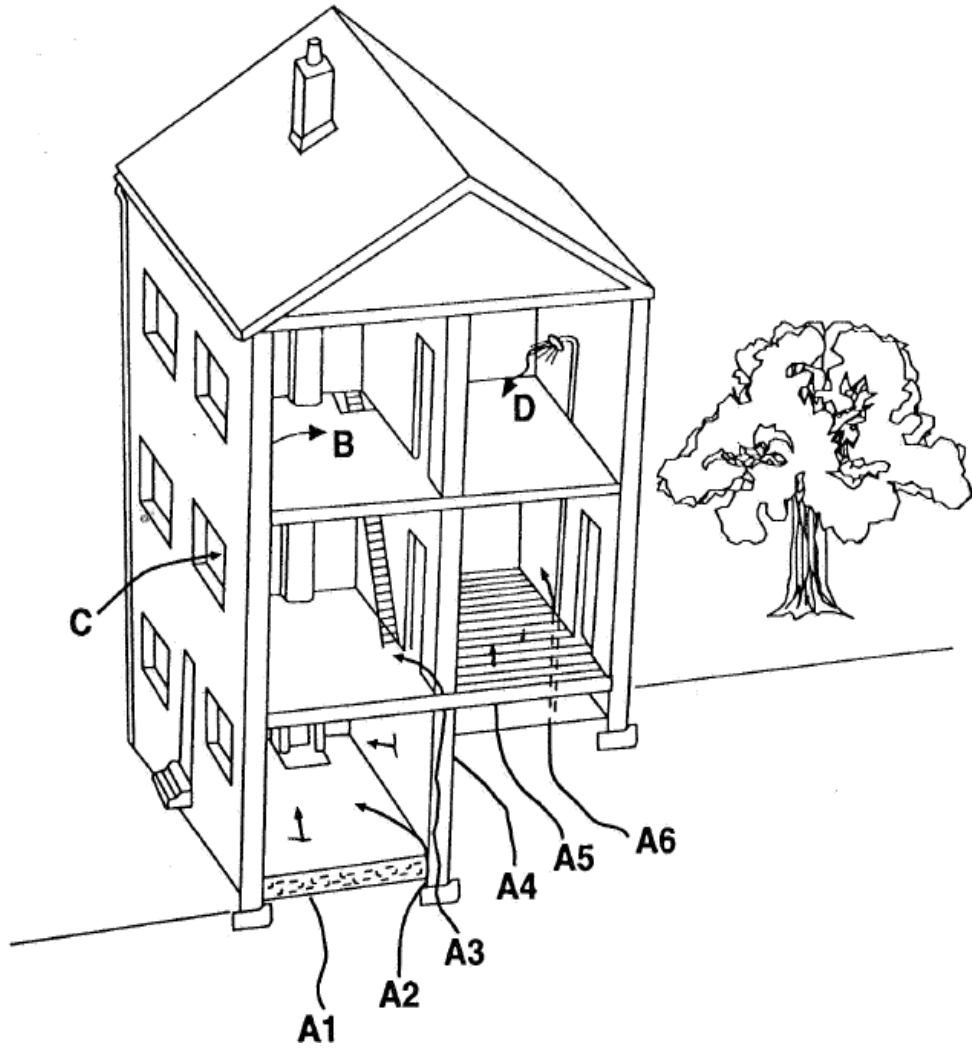
Yapı malzemeleri içeriklerine göre bulundukları ortama radon gazı vermektedir. Tüf, fosfojips, alum şist katkılı hafif beton gibi yapı malzemeleri yüksek oranda radyum içerdiklerinden dolayı radon gazı oluşturlar ve gözenekli yapılarından dolayı da radon gazının ortamda birikmesine neden olurlar.

Radon, yer altı suları başta olmak üzere sularda da çözünebilmektedir. Yer altı suyundaki radon miktarı $4 - 10^6$ Bq/L arasında değişmektedir ve bunun 1/10,000'i kullanım sırasında gaz haline dönüşmekte ve havada yayılmaktadır.

Doğal gaz üretim kuyularında 50 kBq/m^3 seviyelerinde radon gazı bulunabilmektedir, fakat kullanıma kadar gerçekleşen aşamalarda (taşıma, işleme, depolama) radyoaktif bozunmalar nedeniyle konsantrasyon azalmaktadır.

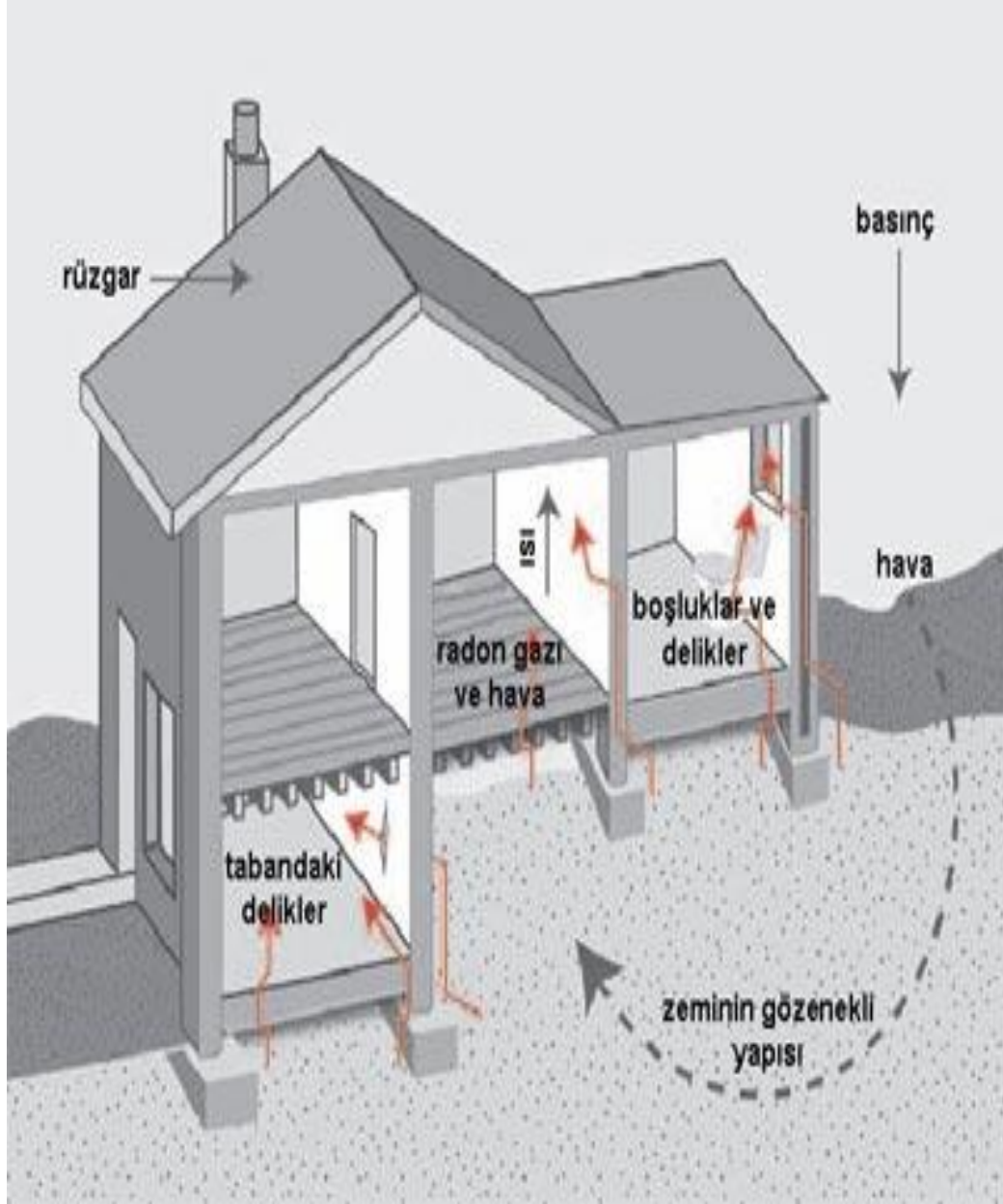
Topraktaki ve yapı malzemelerindeki radyum miktarı, toprakla temasta olan yüzey alanı ve yalıtım niteliği, bina zemini, toprak ve yapı malzemelerinin nem oranı, difüzyon potansiyeli, binanın havalandırma kapasitesi, iç-dış hava, sıcaklık ve basınç farkı, iklim koşulları radon konsantrasyonuna etki eden temel unsurlardır. Aynı zamanda ülkelerin jeolojik ve coğrafi yapısı, inşaat kalitesi, yaşam alışkanlıkları, sosyoekonomik durum, evin ısıtılma biçimi gibi parametreler de radon konsantrasyonunun değişimine neden olabilmektedir.

Şekil 2.12 ve Şekil 2.13'te radonun binalara giriş yolları ile sıcaklık ve basınç faktörlerine bağlı radonun binalara girişi gösterilmektedir.



Şekil 2.12 Radonun binalara giriş yolları

A1	Zemin çatlakları	A6	Tesisat boru boşlukları
A2	Duvar derzleri	B	Yapı malzemeleri
A3	Duvar çatlakları ve boşlukları	C	Dış ortam havası
A4	Zemin altındaki çatlaklar	D	Sular
A5	Asma kat boşlukları		



Şekil 2.13 Basınç ve rüzgârın etkisiyle radonun binalara girişi

2.8.3 Radon Konsantrasyon Limitleri

Kapalı ortamlarda radon gazının konsantrasyonunun kontrolü için limit değerler belirlenmiştir. Belirlenen limit değerlerin aşılması halinde, radon konsantrasyonunu azaltmaya yönelik tedbirlerin alınması önerilmektedir. Çizelge 2.5'te uluslararası kuruluşlar ve çeşitli ülkelerde benimsenen radon konsantrasyon değerleri verilmiştir.

Çizelge 2.5 Uluslararası kuruluşlar ve çeşitli ülkeler tarafından belirlenen radon aktivite konsantrasyon limitleri (Bq/m³)

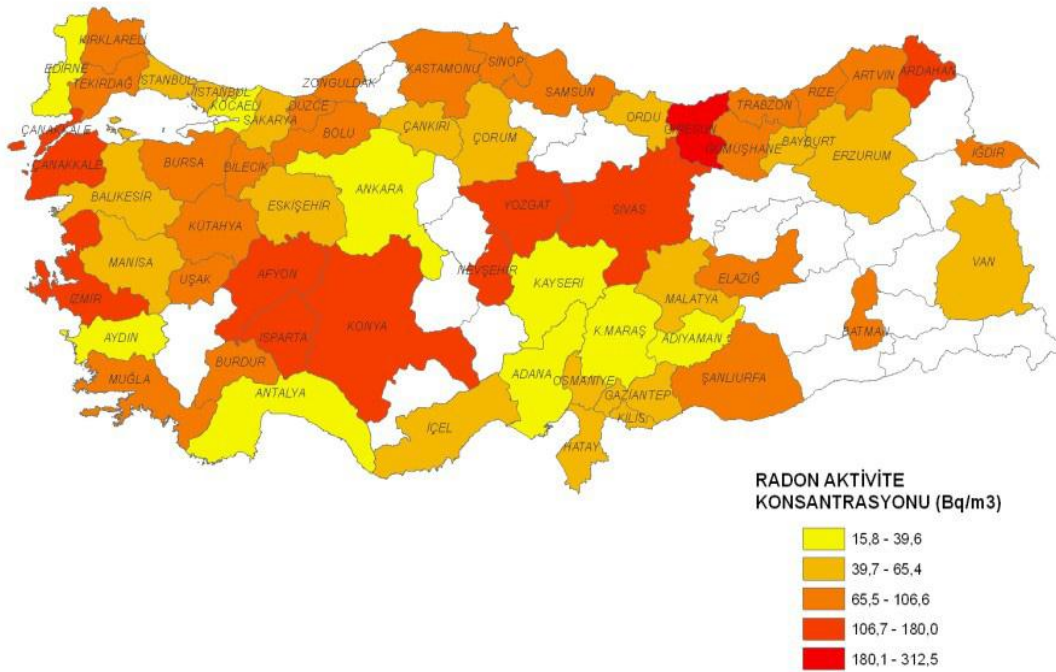
ABD	150	Norveç	200
Almanya	250	Rusya	200
Avustralya	200	Türkiye	400
Çin	200	AB*	400
Danimarka	400	WHO**	100
Kanada	800	ICRP***	400

*Avrupa Birliği

**Dünya Sağlık Örgütü

***Uluslararası Radyasyondan Korunma Komitesi

Ülkemizde, Türkiye Atom Enerjisi Kurumu Radyasyon Güvenliği Yönetmeliği'nde evler için radon konsantrasyonu limit değeri 400 Bq/m³'tür. Türkiye Atom Enerjisi tarafından ülkemizde yapılmış olan evlerde radon ölçümüyle ilgili radon konsantrasyon haritalandırılması Şekil 2.14'te görülmektedir.



Şekil 2.14 Ülkemizde ölçülen radon konsantrasyonunun haritalandırılması (TAEK)

2.8.4 Evlere Radon Girişini Azaltma Yöntemleri

Bina içindeki radon konsantrasyonunu azaltmaya yönelik alınabilecek tedbirler şunlardır:

1. Yapı malzemelerinin radyoaktivite analizleri ve doz değerlendirmeleri yapılmalıdır. Değerlendirilen sonuçlar, tavsiye edilen radyoaktivite düzeylerinin üzerinde olan yapı malzemeleri bina yapımında kullanılmamalıdır.
2. Evler havalandırılırken üst pencereler yerine alt pencereler kullanılmalıdır.
3. Evlerin girişi zeminden yüksekte tutulmalıdır.
4. Evlerin tabanları, duvarlar ile tavanların birleşme yerleri sıkıca kapatılmalıdır.
5. Kapı ve pencere yalıtım yapılmışsa, evin havalandırma süresi uzatılmalıdır.
6. Binalardaki bodrum katların toprakla izolasyonu iyi yapılmalıdır.
7. Hava akımının bina içerisinden toprağa doğru olması sağlanmalıdır.
8. Bina içlerinde kullanılan suyun radon içeriği azaltılmalıdır (suyun havalandırılması ve karbon filtreden geçirilmesi).
9. Ulusal sağlık politikaları belirlenirken radon dikkate alınmalı, evlerde radon ölçümüne önem verilmelidir.

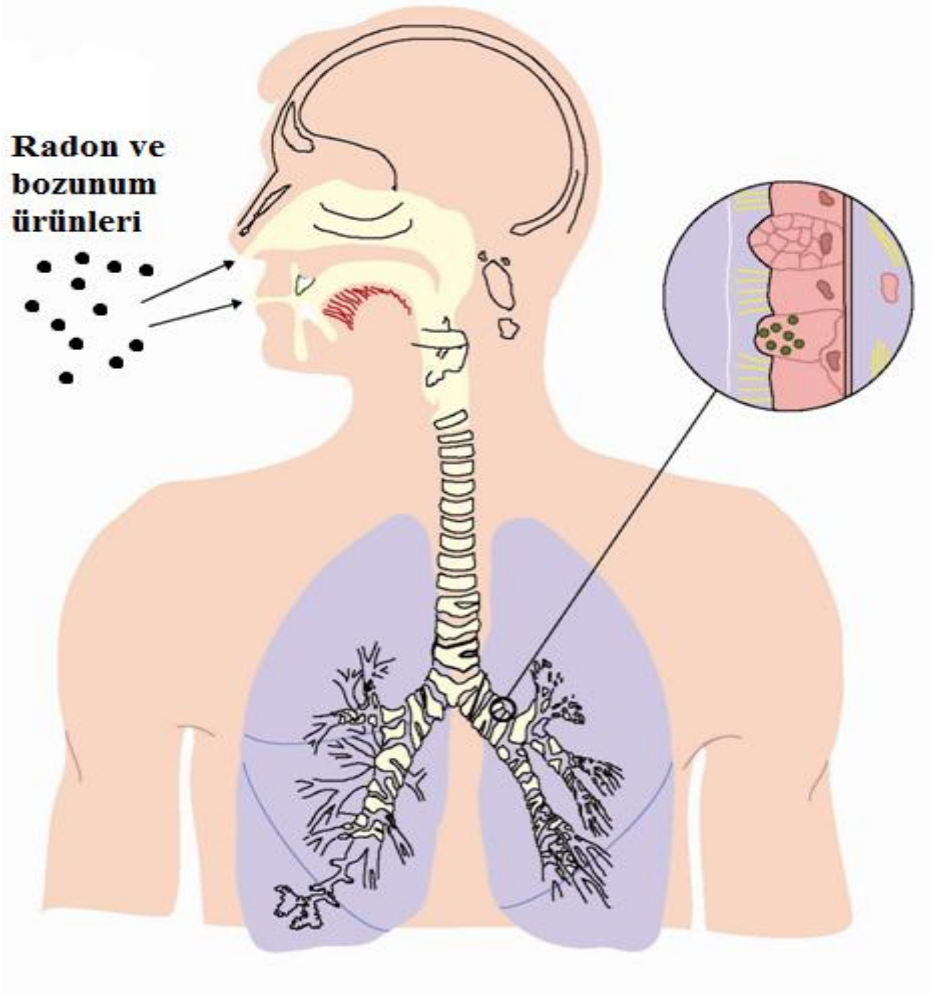
2.9 Radon Gazının İnsan Sağlığı Üzerindeki Etkileri

Radona sürekli maruz kalmak önemli sağlık sorunlarına neden olmaktadır. Dünya Sağlık Örgütü'nün raporuna göre; kapalı ortamlardaki radon, akciğer kanserine neden olan sigaradan sonra ikinci en önemli etmendir.

Radon bir seri bozunma ile yine radyoaktif olan kısa ömürlü bozunma ürünleri üretir. Bunlar; Polonyum (Po), Bizmut (Bi), Kurşun (Pb) elementlerinin radyoizotoplarıdır. Bu ürünlerin radondan farkı gaz halinde olmamalarıdır. Bu izotoplar havadaki tozlara ve su damlacıklarına tutunarak radyoaktif aerosoller oluşturmakta ve solunum yoluyla akciğerlere alınmaktadırlar.

Radonun reaktivitesi düşük olduğundan teneffüs edildiğinde dokulara kimyasal olarak bağlanmaz. Solunmuş radonun dokulardaki çözünürlüğü çok düşük olduğundan, radyotoksitesi bozunum ürünlerine göre çok daha düşüktür. Radon ve bozunum ürünlerinin teneffüs edilmesi önemli sağlık sorunlarına neden olabilmektedir.

Radon hızlı bozunur ve sonuçta meydana gelen ürünler radonu havadaki parçacıklara bağlar. Bu parçacıklar solunum sistemine alınması sonucunda bronşiyal ağacın değişik kademelerinde ilerlerler. Radyoaktif parçalanma süreci burada devam eder ve alfa parçacıkları yaymayı sürdürür. Alfa parçacıklarının giricilikleri az olmasına rağmen bronşal epitellere nüfuz edebilecek niteliktedir. Bu durum da akciğer dokusunda hasara ve zaman içinde de akciğer kanserine sebep olabilmektedir. Aşağıda Şekil 2.13'te radon ve bozunum ürünlerinin solunumu sonucunda akciğer dokusunda meydana gelen hasar gösterilmektedir.



Resim 2.1 Radon ve bozunum ürünlerinin solunması sonucunda akciğer dokusunda meydana getirdiği hasar

Yapılan çalışmalar yüksek oranda radon ve bozunum ürünlerine maruz kalındığında akciğer kanserine yakalanma oranının yüksek olduğunu göstermiştir. Sigara akciğer

kanseri riskini arttıran etmenlerden biridir. Hem sigara içip, hem de radona maruz kalmak akciğer kanserine yakalanma riskini artıracaktır.

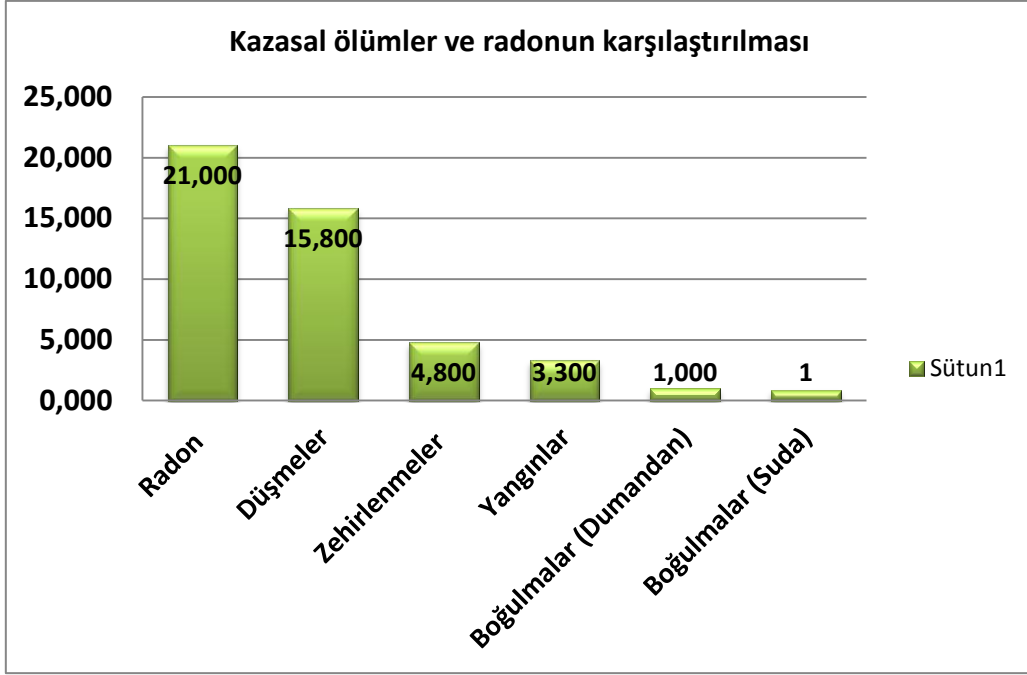
ABD Halk Sağlığı Servisi; yıllık akciğer kanseri vakalarının, sigara içmeyenlerden 5.000, sigara içenlerden ise 15.000'ini, Uluslararası Radyasyondan Korunma Komitesi (ICRP) ise toplam akciğer kanserlerinin %10'unu radona bağlamaktadırlar. EPA (Çevre Koruma Ajansı) tarafından yapılan karşılaştırmalı risk değerlendirmelerine göre radon çevresel sorundan bir tanesidir.

1998 yılında Harvard'ta John Graham'ın yaptığı çalışmaya göre de radon evlerdeki bir numaralı risk olarak belirlenmiştir.

Evlerde yaralanmalardan kaynaklanan kazasal ölümlerin ilk beşi;

- *Düşmek
- *Zehirlenmek
- *Yangınlar
- *Boğulmak (Dumandan)
- *Boğulmak (Suda)

Radonun sebep olduğu akciğer kanserinden olan ölümler tüm bu nedenlerden daha yüksek bir orana sahiptir. Bu ölüm oranları Şekil 2.15'te görülmektedir.



Şekil 2.15 Kazasal ölümlerle radondan kaynaklı ölümlerin karşılaştırılması (Home Safety Council)

Dünya Sağlık Örgütü akciğer kanseri vakalarının radonla ilişkilendirilen vaka oranının hesaplama yöntemi ve ülkedeki radon konsantrasyonuna bağlı olarak %3-14 arasında değiştiğini belirtmiştir. Ancak bu durumda yüksek dozlarda radon gazına maruz kalmış herkesin akciğer kanserine yakalanacağı anlamına gelmez. Maruz kalınma ve hastalığın oluşması arasında yıllarca zaman geçebilmektedir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Afyonkarahisar İli ve İklimi

1015 metre yükseklikte kurulu olan Afyonkarahisar karasal iklimin hüküm sürdüğü bir ilimizdir. Yazları sıcak ve kurak, kışları soğuk ve kar yağışlı, baharları ise ılık ve yağışlı geçer. Yağışlar kışları kar şeklinde, baharları da yağmur şeklinde görülür. Şekil 3.1’de Afyonkarahisar ilinin Türkiye haritasındaki konumu görülmektedir.



Şekil 3.1 Afyonkarahisar ilini Türkiye haritasındaki konumu

3.2 Afyonkarahisar İli Şehir Merkezi ve Çevresinin Jeolojisi

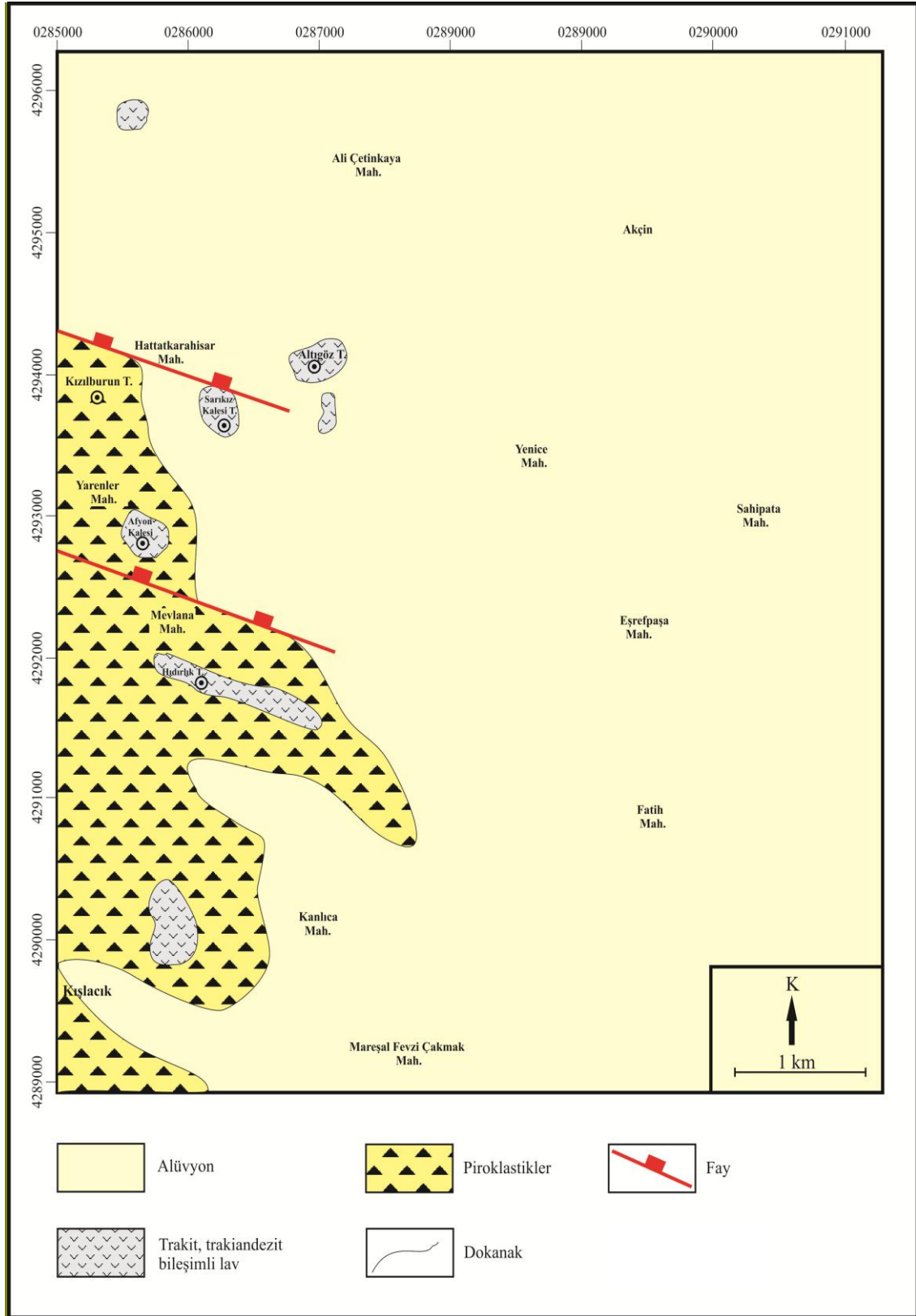
Afyonkarahisar ili İç Anadolu ve Ege Bölgesini birbirine bağlayan coğrafik bir konuma sahiptir ve Afyon zonunun metamorfik kayaçlarından oluşturmaktadır. Bu metamorfik kayaçlar Afyon metasedimanter grubu olarak adlandırılmıştır (Tolluoğlu *et al.* 1997). Ömer-Gecek, Gazlıgöl ve İncehisar arasında kalan bölgedeki inceleme alanında karakteristik olarak yayılım gösteren birim sırasıyla Bayramgazi şistleri (Ulutürk 2009), Çobanlar şistleri (Metin *et al.* 1987) olarak adlandırılmıştır. Albit – klorit – muskovit – biyotit - kuvarşist, kalkışist ve meta kumtaşı – meta konglomera olarak gözlenmektedir. Öte yandan şistlerin içerisinde yer yer kuvarsitlere, çatlakların arasında ise kuvars damarlarını görmek olasıdır. Birim çok kıvrımlı bir yapıya sahiptir ve genel olarak kahve, boz ve yeşil renklidir.

Düşük dereceli yeşil şist fasiyesine ait mineral parajenezleri kapsadığı Öktü vd. (1997) tarafından yapılan çalışmada tespit edilmiştir. Çobanlar şistindeki farklı düzeylerde merceksi şekilli mermer oluşumlarının yanı sıra birimin şistozite düzlemleriyle uyumlu olduğu görülmektedir.

Adını Afyonkarahisar'ın 35 km doğusundaki Paşadağ Tepe'sinden alan Oyuklu Tepe civarında incelenen birim, beyazdan griye doğru değişen renklere sahip, oldukça sert, kristalize görünümde ve genel olarak kalın tabakalanma, düzgün kıvrımlanma göstermektedir (Şekil 3.2).

Metamorfik kayaçların üzerine uyumsuz bir şekilde Başçakmaktepe konglomerası, Seydiler tüfü ve Özburun sedimanter üyesinden oluşan Orta – Üst Miyosen yaşlı Gebeceler formasyonu gelmektedir. Konglomera, kumtaşı, aglomera, tüf, tüfit, marn, killi kireçtaşı, silisifiye kireçtaşı gibi sedimanter kayaçların düzensiz bir şekilde sıralanmasıyla oluşan ve Ömer-Gecek formasyonu olarak adlandırılan birimin kalınlığı bölgede yapılan çalışmalar sonucunda 50-150 m arasında değiştiği belirlenmiştir (Ulutürk 2009, Harut 1995).

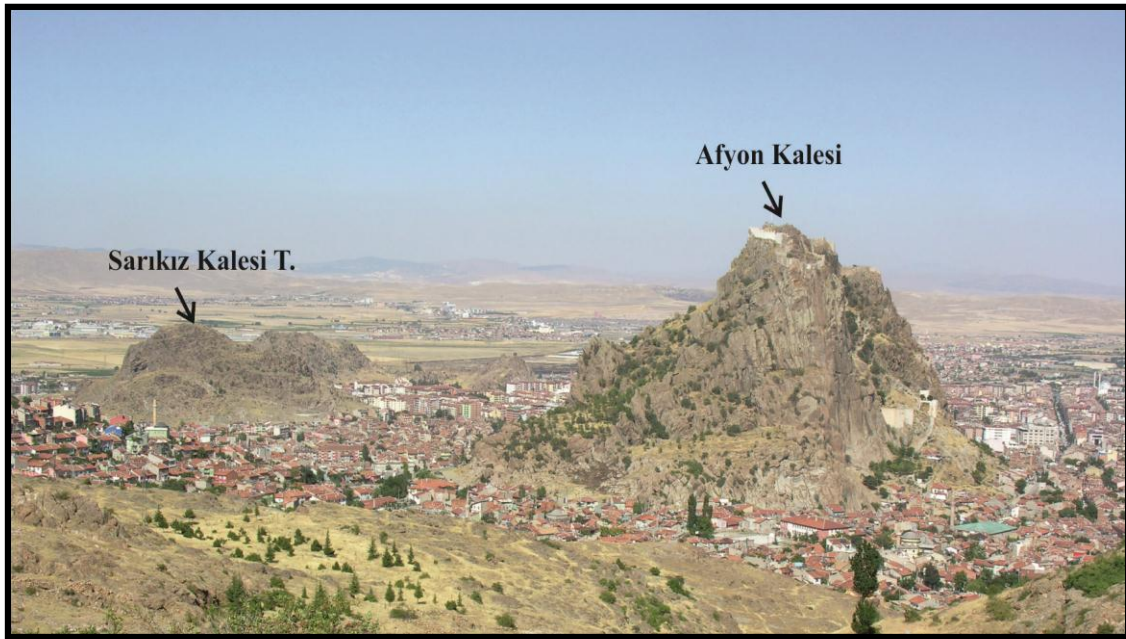
Genellikle süt beyaz ve krem renkli olan Seydiler tüfü formasyonu adını, karakteristik olarak gözlendiği ve inceleme alanının dışındaki Seydiler Kasabasından alan Özburun sedimanter üyesiyle yanal yönde geçişli olup kristalin tüf türündedir ve bölgede yapılan çalışmalar sonucunda genellikle camdan oluşan matriks içerisinde kuvars, sanidin, plajioklaslar, ve çubuğumsu şekilli biyotit fenokristalleri yer aldığı belirlenmiştir.



Şekil 3.2 İnceleme alanının jeoloji haritası

Karakteristik olarak inceleme alanının güneyinde yer alan Erkmen Kasabası'nda gözlenmesinden dolayı ilk kez Harut (1995) tarafından adlandırılan Aglomera türündeki piroklastikler ve lav akıntılarından oluşan Erkmen volkanitleri bölgedeki volkanizmanın en son aşamasını karakterize etmektedir.

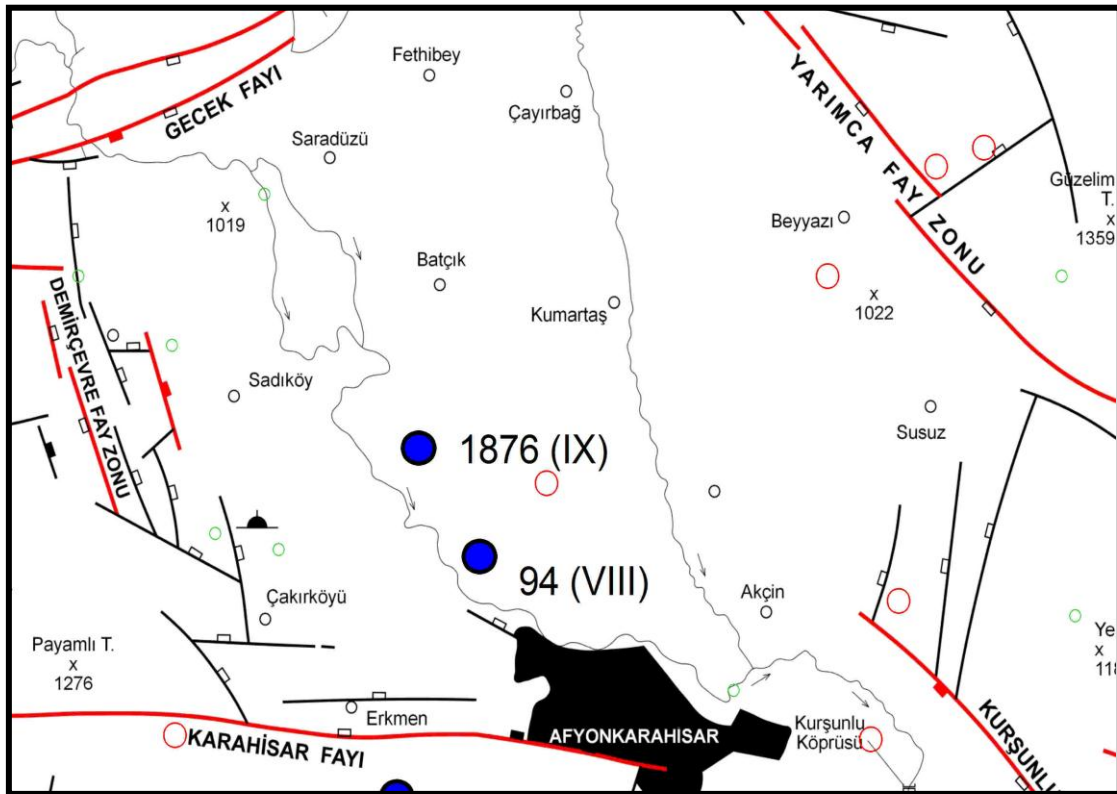
Trakit, trakiandezit bileşimli blok ve litik parçalar içeren, genellikle gri, koyu gri renkli olan piroklastikler, blok ve kül akıntısı şeklinde tanımlanmaktadır ve Afyon Kalesi ile Hıdırlık Tepe arasındaki bölgede karakteristik olarak gözlenmektedir (Yıldız *et al.* 2011). Erkmen volkanitlerinin diğer bir seviyesi de trakit, trakiandezit bileşimli lavlar dom yapıları şeklinde Afyon Kalesi, Hıdırlık Tepe, Sarıkız Tepe, Altıgöz Tepe ve Çadırkuran Tepe'de karakteristik olarak gözlenmekte ve bölgedeki en önemli yükseltileri oluşturmaktadır. Birim gri, koyu gri ve kahverengimsi tonlarda olup yer yer levha şekilli çatlaklar gözlenmiştir (Resim 3.1). İnceleme alanındaki halan oluşumunu sürdürmekte olan en genç birim Kuvaterner yaşlı alüvyondur .



Resim 3.1 Afyon Kalesi ve Sarıkız Kalesi tepede dom yapısı şeklindeki lav akıntıları

Afyon-Akşehir Grabeni (AAG) ve bu grabenin kenar fayları Güneybatı Türkiye'nin genişlemeli Neotektonik rejiminin etkisi altındaki inceleme alanında yer alan en önemli tektonik yapıdır (Şekil 3.3). Koçyiğit ve Deveci (2005) tarafından son olarak bölgenin tektonik yapısı incelenmiş ve Afyon-Akşehir Grabeni'nin kenar fayları Akşehir Fay

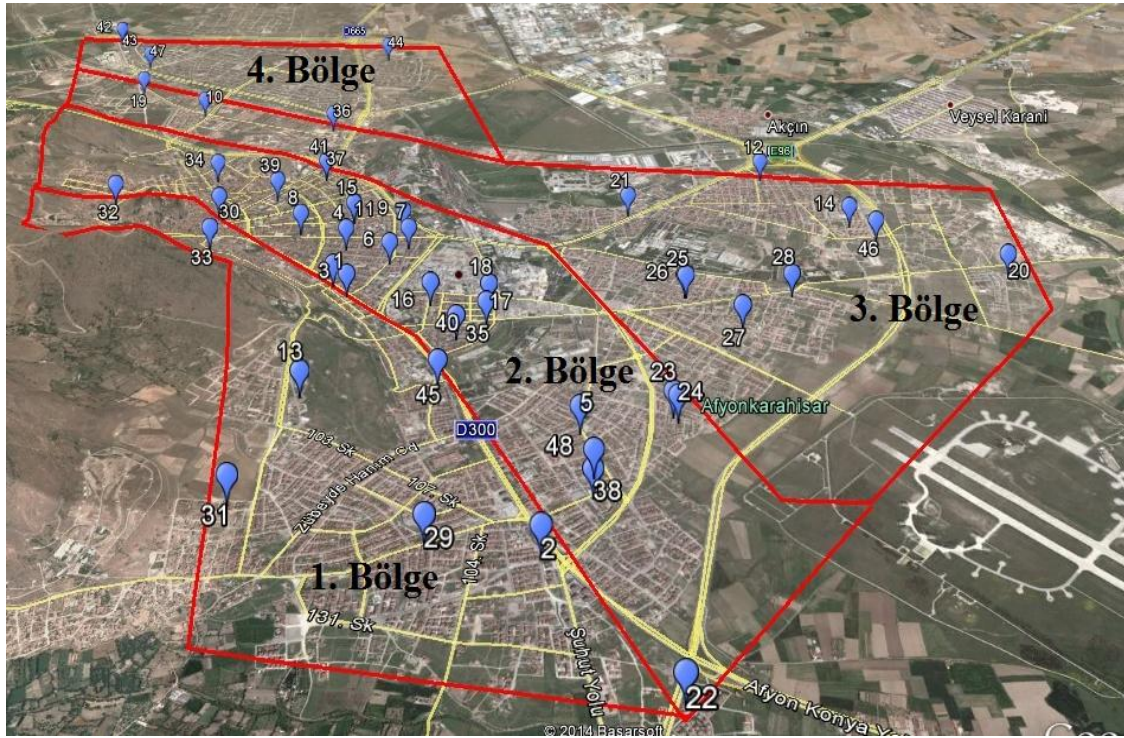
Zonu (AFZ), Hamidiye Fay Zonu (HFZ), Yarımcı Fay Zonu, Fethibey Fay Zonu ve Demirçevre Fay Zonu olarak adlandırılmıştır. Gelecekte oluşması muhtemel depremin Afyonkarahisar ili şehir merkezine en yakın tektonik yapılar olan Akşehir Fay Zonu ve Demirçevre Fay Zonuyla ilişkili olarak meydana geleceği düşünülmektedir (Şekil 3.3). Afyonkarahisar şehir merkezini D-B uzanımlı olarak kateden Akşehir Fay Zonu'nun ana fayını temsil eden segmenti, şehir merkezinde Afyon Kalesi ile Hıdırlık tepe arasında kalan alan boyunca karakteristik olarak gözlenen Karahisar fayıdır (Koçyiğit ve Deveci 2005). Öte yandan Karahisar fayının basamak türündeki diğer fayı, Kızılburun tepe ve Sarıkız Kalesi tepenin güneyi boyunca gözlenen fay olduğu düşünülmektedir. Kuzeyde Ömer-Gecek alanından başlayarak KB-GD uzanımlı olarak bölgeyi kateden Demirçevre Fay Zonu, Çakırköy ve Erkmen Kasabası yakınlarında Karahisar fayıyla kesişmektedir (Koçyiğit ve Deveci 2005).



Şekil 3.3 Afyonkarahisar ili şehir merkezi ve çevresinin tektonik haritası (Koçyiğit et al. 2005)

3.3 Çalışma Sahası

Bu tez çalışması Afyonkarahisar merkezdeki bazı konutlarda gerçekleştirilmiştir. Afyonkarahisar merkezde radon konsantrasyonunun jeolojik değişimini de gözlemleyebilmek adına, kayaç türleri ve tektonik yapılar göz önünde bulundurularak çalışma alanı 4 bölgeye ayrılmıştır. Bu bölgelerde konut sayılarının yoğunluğu dikkate alınarak 50 adet ev homojen bir şekilde belirlenmeye çalışılmıştır. Şekil 3.4’de belirlenen noktaların dağılımı görülmektedir. Bölgelerin uzanımları Afyonkarahisar ve çevresinde etkili olan KB-GD doğrultulu Akşehir-Simav Fay Sistemi’ne ait faylarla uyumu dikkate alınarak çizilmiştir.



Şekil 3.4 Afyonkarahisar merkezde belirlenen konutların bölgelere göre dağılımı

3.4 Radon Ölçümü

Belirli bir bölgede veya evlerde radon konsantrasyonunun belirlenmesinin tek yolu uygun cihazlarla ölçümlerin yapılmasıdır. Radon, doğal radyoaktif bir gazdır ve duyu organlarıyla algılanma şansı yoktur. Bu yüzden; radon konsantrasyonunun belirlenmesi için birçok yöntem ve cihaz geliştirilmiştir. Radon ölçümleri, radon tarafından yayılan alfa parçacıkları veya radonun bozunma ürünlerinin alfa, beta ve gama radyasyonunun

ölçülmesi esasına dayanılarak gerçekleştirilir. İki temel ölçüm yöntemi vardır. Bunlar Çizelge 3.1’de gösterilen aktif ölçüm yöntemi ve pasif ölçüm yöntemidir.

Çizelge 3.1 Radon ölçüm yöntemleri

Aktif Yöntem	Pasif Yöntem
Pompalar, güç kaynakları ve elektronik sistemler gibi cihazlara ihtiyaç vardır.	<i>Katı hal nükleer iz detektörleri</i> ; selüloz nitrat (LR-115), polialil diglikol karbonat (CR-39)
İyon odaları, spektroskopik sayım cihazları, sintilasyon hücreleri kullanılır.	<i>Termoluminesans detektörler</i> ; CaSO ₄ :Dy veya LiF kullanılır.

Evlerde radon konsantrasyonunun belirlenmesinde en yaygın ve en ucuz yöntem; nükleer iz kazıma detektörleri ile alfa sayımıdır.

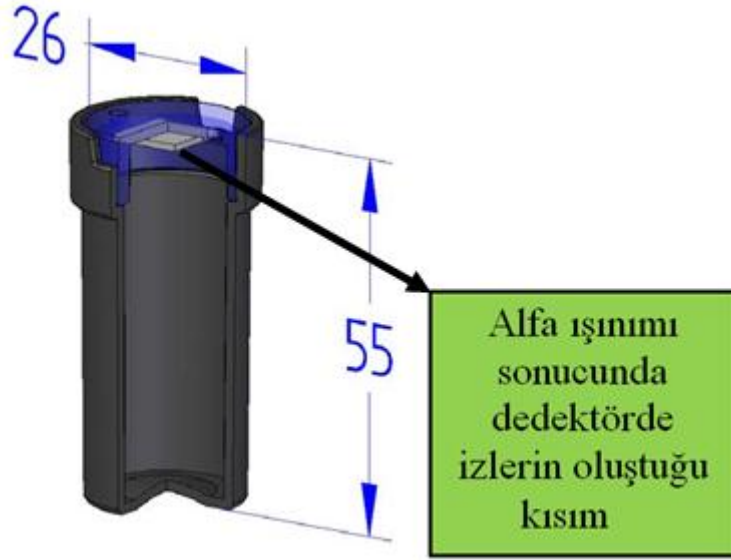
Bu tez çalışmasında evlerdeki radon konsantrasyonunu belirlemek için, CR-39 pasif nükleer iz kazıma detektörleri ile alfa sayımı yöntemi kullanılmıştır. Türkiye Atom Enerjisi Kurumu’ndan temin edilen detektörler, Afyonkarahisar ilinin kayaç türleri ve tektonik yapıları göz önünde bulundurularak ayrılan 4 farklı bölgeye konut sayılarının yoğunluklarına göre dağıtılmıştır.

3.4.1 PADC (Pasif Radon Detektörü) CR-39

CR-39, Radosys Şirketi tarafından üretilmektedir. CR-39 detektörlerinin kimyasal adı, allil diglikol ve kimyasal sembolü de C₁₂H₁₈O₇’dir. CR-39 pasif radon detektörü Resim 3.2’de görülmektedir. Bu detektör Şekil 3.5’de gösterildiği gibi; 26x55 mm silindir şeklinde ve detektör çipi kapağın hemen altında 10x10 mm ve kalınlığı da 1 mm’dir. Polypropylene madde ile detektörün yüzeyi kaplanmıştır. Bu madde toron ve toz parçacıklarının girmesini engellerken, alfa parçacıklarına karşı duyarlıdır. Yalnızca radon gazı difüzyon yoluyla detektör içerisine girebilmektedir. Kapağın hemen altındaki detektör çipi üzerinde radonun bozunumu sonucunda yayılan alfa parçacıkları izler bırakmaktadır.



Resim 3.2 Pasif radon detektörü CR-39



Şekil 3.5 CR-39 detektörünün ebatları ve izlerin oluştuğu kısım

3.4.1.1 CR-39 Detektörlerinin Dağıtımı ve Toplanması

Bu tez çalışmasında CR-39 detektörlerinin dağıtımına 2013 Haziran ayında, yaz döneminde başlanmıştır. Detektörler, Türkiye Atom Enerjisi Kurumu'ndan (TAEK) temin edilmiştir. Belirlenen 50 noktadaki evlere 4 mevsim detektör dağıtımı gerçekleştirilmiştir.

Detektörler, evlerde insanların en çok zaman geçirdiği düşünülen oturma odaları ve yatak odalarında uygun yerlere yerleştirilmiştir. Ayrıca bodrumu olan binalarda bodrum katlarında uygun yerlere de detektörler yerleştirilmiştir. Yerleştirme yapılırken detektörlerin, kapalı dolaplara, elektronik cihazların yakınına, soba ve kalorifer peteklerinin yanına, doğrudan güneş ışığı gören noktalara, 2 metreden yüksek noktalara, duvarla temas halinde olması gibi noktaların seçilmemesine ve ilk bırakıldığı konumdan detektörün yerinin kesinlikle değiştirilmeyeceği yerlere konulmasına özen gösterilmiştir.

Türkiye Atom Enerjisi Kurumu'ndan alüminyum folyolara sarılı olarak gelen detektörler, yerleştirileceği noktada açılarak uygun yerlere konulmuştur. Yerleştirilen detektörler bulundukları konumdan üçer aylık periyotlarla toplanarak bir yıl boyunca tekrarlanmıştır. Üçer aylık periyotların sonunda detektörler hava almaması için Resim 3.3'te görüldüğü gibi tekrar alüminyum folyolara sarılarak bulundukları ortamdan alınmıştır ve ölçümlerin değerlendirilmesi için Sarayköy Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi (SANAEM) Sağlık Fiziği bölümüne götürülmüştür.



Resim 3.3 Toplanan detektörlerin alüminyum folyolara sarılması

3.4.2 CR-39 detektörlerinin Analize Hazırlanışı ve Analizi

Detektörün analize hazır hale gelebilmesi için ilk olarak detektör çipleri dikkatlice çıkarılmıştır. Resim 3.4'teki gibi çıkartılan her bir detektör çipi üzerindeki alfa nümerik kodları altta kalacak şekilde radoslayt diye adlandırılan slaytlara, ardından da iz kazıma

diskine yerleştirilmiştir. Radoslaytın her birinde 12 adet detektör çipini alacak yuva vardır.



Resim 3.4 Radoslayt (a), iz kazıma diskisi (b)

Daha sonra banyo (kimyasal iz kazıma) işlemi radobath sisteminde Resim 3.5'te görüldüğü gibi gerçekleştirilmiştir. Radona maruz kalmış detektör çiplerinin alfa izlerinin görünür hale gelebilmesi için kimyasal iz kazıma yöntemi kullanılmıştır.

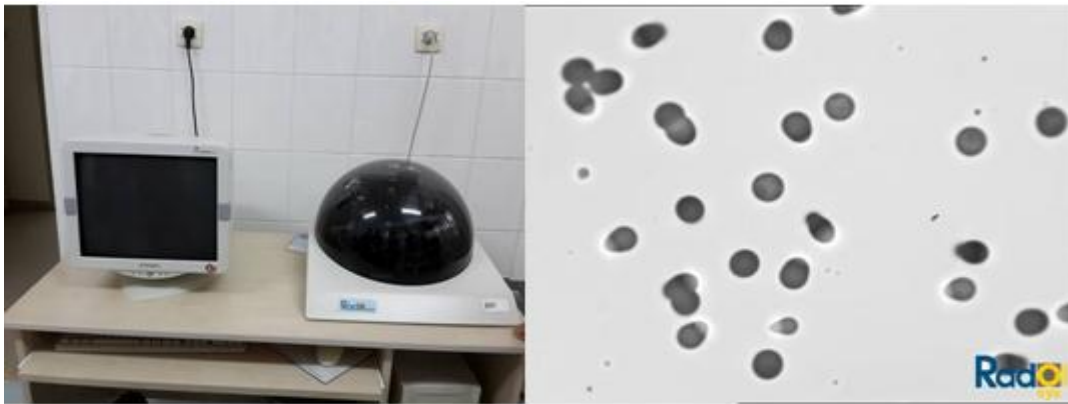


Resim 3.5 Radobath sistemi ve iz kazıma işlemi

Radobath sisteminin içine 4 litre saf su konulup kapağı kapatılmıştır ve ısıtıcı ile karıştırıcı motor çalıştırılarak suyun sıcaklığı 60 °C'ye çıkıncaya kadar beklenmiştir. Suyun istenen sıcaklığa ulaşmasından sonra cihazın sinyal vermesiyle NaOH (Sodyum hidroksit) çözeltisi yaklaşık 10 gr alan kaşıkla eklenmiştir. Hazırlanan bu çözeltiyle 432 adet detektörün kimyasal kazıma işlemi gerçekleştirilebilir. Çözeltinin hazır olduğunu belirten uyarı sesinin ardından sıcaklığın 90 °C olması beklenmiş ve ardından çiplerin takılı olduğu kazıma diski radobath sistemine yerleştirilerek 4,5 saatlik banyo işlemine bırakılmıştır. Ardından 4 litre saf suya 200 ml %15 veya %20'lik sirke ilave edilerek 20 dakika süren nötrleştirme işlemi başlatılmıştır. Cihazın sesli uyarısıyla içerisindeki saf su boşaltılmış ve tekrar 20 dakikalık nötrleştirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Nötrleştirme işleminin ardından slaytlar radobath ünitesinden çıkarılarak bir günlük kurutma işlemine bırakılır. Kuruması sağlanan detektör çipleri değerlendirme ünitesi için hazır hale gelmiştir.

3.4.3 Değerlendirme Ünitesi

Değerlendirme ünitesindeki (Resim 3.6a) bilgisayarda Linux işletim sistemi kullanılmaktadır. Her bir slayt sayım ünitesine yerleştirilmiş ve optik mikroskopta Resim 3.6b'de görüldüğü gibi CR-39 detektöründe cm^2 başına düşen alfa izlerinin sayımı gerçekleştirilmiştir. Değerlendirme ünitesindeki sistem sayesinde evlere yerleştirilen detektörlerin yerleştirilme ve toplanış tarihleri girilerek aktiviteler Bq/m^3 cinsinden hesaplanmıştır.



Resim 3.6 (a)Değerlendirme ünitesi ve (b) birim alandaki alfa izleri

3.5 Radon Aktivitesi Konsantrasyonu Hesabı

Konutlarda radon aktivite konsantrasyonunu hesaplamak için denklem 3.1 kullanılmıştır.

$$RAC = CF \times \left(\frac{\text{iz sayısı}}{46,8} \right) \times \left(\frac{1000}{\text{gün}} \right) \times 24 \quad (3.1)$$

RAC : Radon aktivite konsantrasyonu

CF : Kalibrasyon faktörü

3.6 Standart Sapma

Standart sapma, değerlerin, ortalama değerden (ortalamadan) ne kadar uzaklaşmış olduğunun ölçüsüdür. Radon aktivite konsantrasyonlarının standart sapma değerleri Denklem 3.2 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x-\bar{x})^2}{n-1}} \quad (3.2)$$

3.7 Yıllık Etkin Doz Eşdeğerleri Hesabı

İnsanlar zamanlarının büyük bir kısmını kapalı ortamlarda geçirdiklerinden, kapalı ortam radon konsantrasyonu belirleme çalışmalarının bir parçası da radon aktivitesi yoğunluğundan kaynaklanan yıllık etkin doz değerinin belirlenmesidir. Kapalı ortamlardaki radon konsantrasyonundan dolayı maruz kalınan yıllık etkin doz eşdeğeri; YEDE,

$$YEDE = C * E * F * T * D \text{ (mSv/y)} \quad (3.3)$$

eşitliği kullanılarak hesaplanır. Burada;

C : Radon konsantrasyonu (Bq/m³)

E : Denge faktörü (Ev için : 0,4)

F : İnsanların bina ya da evde kaldıkları zaman (işgal faktörü) : 0,8

T : Bir yıllık zaman (8760 saat/yıl)

D : Doz dönüşüm faktörü : [9. 10⁻⁶ mSv (Bq. m⁻³. h)⁻¹]

4. DENEYSEL BULGULAR

Afyonkarahisar merkezde farklı jeolojik yapılara sahip bölgelerdeki bazı konutlarda, radon konsantrasyonunun bir yıl süreyle belirlenmesi, mevsimsel değişimlerle radon konsantrasyonunun karşılaştırılması ve insanların maruz kaldıkları yıllık etkin doz eşdeğerlerinin hesaplanmasına yönelik yapılan bu çalışmada elde edilen deneysel sonuçlar alt başlıklar halinde aşağıda verilmiştir.

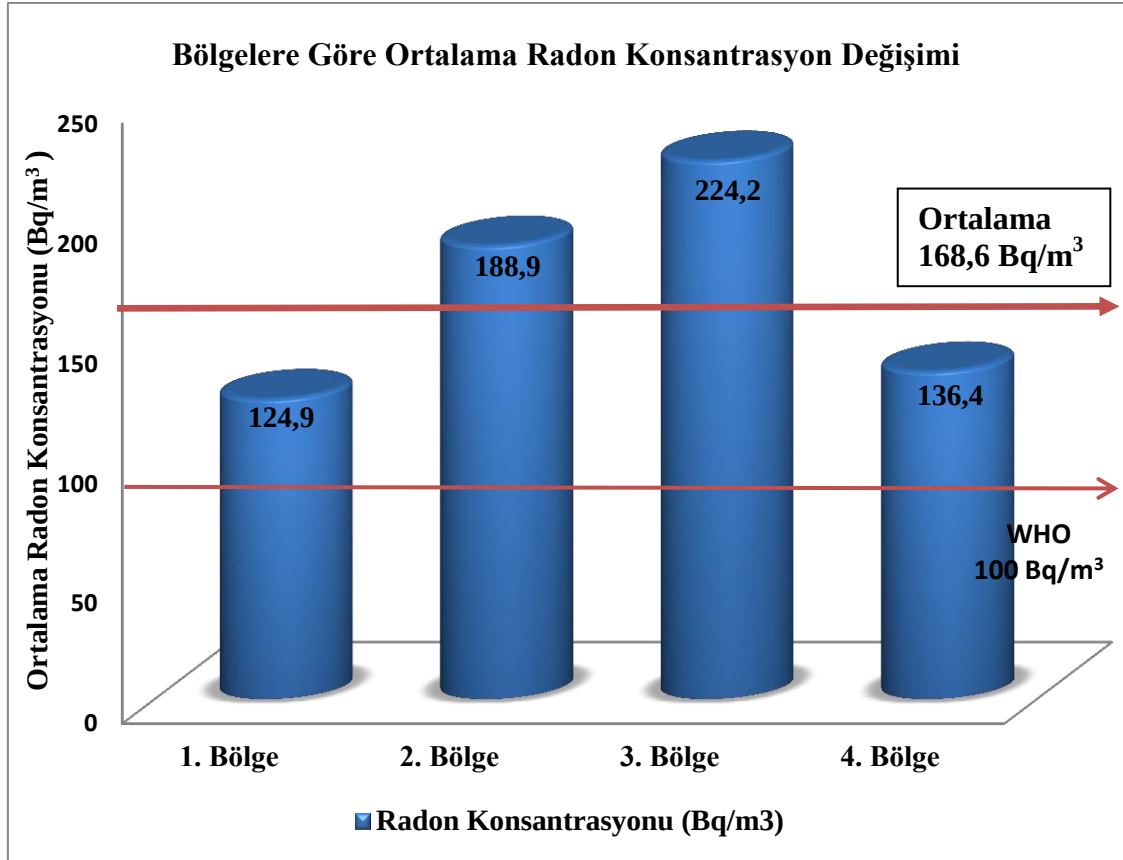
4.1 Bölgelere Göre Ortalama Radon Konsantrasyon Dağılımı

Afyonkarahisar merkezde belirlenen 50 konutta yapılan ölçümler sonucunda elde edilen mevsimsel ve yıllık ortalama radon aktivitesi konsantrasyonu (RAK) değerleri ve standart sapmaları (σ) ile yıllık ortalama etkin doz eşdeğerleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Afyonkarahisar merkezdeki ortalama radon konsantrasyonu $168,6 \text{ Bq/m}^3$ olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.1’de bölgelere göre ortalama radon konsantrasyon dağılımı görülmektedir. Şekil 4.1’e göre $124,9 \text{ Bq/m}^3$ değerle minimum konsantrasyon 1. bölgeye aittir. En yüksek konsantrasyon ise 3. bölge de $224,3 \text{ Bq/m}^3$ olarak hesaplanmıştır. Farklı kayaç ve tektonik özelliklere sahip olan bu bölgelerde ortalama radon konsantrasyon değerleri de farklılık göstermiştir. 2. ve 3. bölge konsantrasyonları ortalama radon konsantrasyonunun ($168,6 \text{ Bq/m}^3$) üzerindedir. Öte yandan her bir noktadaki dönemlik ölçümlere göre inceleme yapıldığında, yıllık etkin doz eşdeğerleri minimum $0,1 \text{ mSv/y}$ ve maksimum $62,9 \text{ mSv/y}$ olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.1 Konutlarda ölçülen ortalama radon aktivitesi konsantrasyonu değerleri ve yıllık etkin doz eşdeğerleri

BÖLGELER	Ev No	Radon Aktivitesi Konsantrasyonu (Bq/m^3)										YE DE (mS v/y)
		Yaz		Güz		Kış		Bahar		Yıllık		
		RAK	σ	RAK	σ	RAK	σ	RAK	σ	RAK	σ	
1.	1	77	± 6	29	$\pm 6,1$	157,5	$\pm 12,3$	29,5	$\pm 6,2$	73,3	$\pm 7,7$	1,8
	2	94	$\pm 4,1$	133,5	$\pm 28,2$	199,5	± 5	130,5	$\pm 14,3$	139,4	$\pm 12,9$	3,5
	3	101,7	$\pm 8,8$	77,33	$\pm 5,2$	80,33	$\pm 10,3$	64,33	$\pm 8,6$	80,9	$\pm 8,2$	2
	4	39,5	$\pm 5,4$	35	$\pm 6,8$	72	$\pm 7,5$	51	$\pm 1,9$	49,4	$\pm 5,4$	1,2
	5	78,5	$\pm 5,4$	138,5	± 7	298,5	± 11	140	$\pm 8,5$	163,9	± 8	4,1
	6	113,5	$\pm 8,5$	72	± 7	102	$\pm 12,5$	64,5	$\pm 5,4$	88	$\pm 8,4$	2,2
	7	61	$\pm 4,9$	68	± 8	302	± 15	261,3	$\pm 10,8$	173,1	$\pm 9,7$	4,4
	8	27,5	$\pm 1,5$	50	$\pm 10,2$	57	$\pm 9,5$	65,5	$\pm 7,1$	50	$\pm 7,1$	1,3
	9	232,7	± 10	77,3	$\pm 2,6$	197,7	± 15	83	$\pm 8,9$	147,7	$\pm 9,1$	3,7
	10	346,5	$\pm 21,4$	80,5	± 5	196	± 9	53,5	$\pm 3,1$	169,2	$\pm 9,6$	4,3
	11	90,7	$\pm 4,4$	91,8	$\pm 11,7$	372	$\pm 11,7$	215,7	$\pm 10,8$	192,5	$\pm 9,7$	4,9
2.	12	111,3	$\pm 6,7$	166,3	$\pm 5,2$	338,7	$\pm 17,3$	220,7	$\pm 13,2$	209,3	$\pm 10,6$	5,3
	13	61,5	$\pm 3,4$	79,5	$\pm 5,8$	476,5	$\pm 18,5$	57	$\pm 4,6$	168,6	$\pm 8,1$	4,3
	14	101	± 9	58	$\pm 7,7$	144,7	± 11	129,3	$\pm 21,8$	108,3	$\pm 12,4$	2,7
	15	142	± 3	248	± 25	174	± 12	119	$\pm 12,2$	170,8	$\pm 13,1$	4,3
	16	54,5	$\pm 6,9$	64,5	± 4	105,5	$\pm 5,5$	61	$\pm 7,9$	71,4	$\pm 6,8$	1,8
	17	104	$\pm 7,9$	401,5	$\pm 12,6$	1040	± 49	397,5	$\pm 13,3$	485,8	$\pm 20,7$	12,3
	18	75	$\pm 7,3$	86,7	$\pm 7,8$	147,3	$\pm 10,3$	92,3	$\pm 18,6$	100,3	± 11	2,5
	19	171	$\pm 14,2$	630	$\pm 26,9$	1535	± 74	673	$\pm 8,5$	752,3	$\pm 30,9$	19
	20	47	$\pm 3,8$	40	$\pm 8,7$	77	$\pm 9,5$	38,5	$\pm 3,2$	50,6	$\pm 6,3$	1,3
	21	58	$\pm 9,6$	36	± 4	85	± 8	31	$\pm 7,9$	52,5	$\pm 7,4$	1,3
	22	57,7	$\pm 4,5$	104,7	$\pm 4,7$	179,3	± 9	78,3	$\pm 9,7$	105	± 7	2,6
	23	58,7	± 6	64,7	± 5	107,3	$\pm 8,3$	55,7	$\pm 1,9$	71,6	$\pm 5,3$	1,8
	24	171,3	$\pm 8,8$	240,3	± 17	271,3	± 14	178,7	$\pm 10,8$	215,4	$\pm 12,7$	5,4
	25	31,7	$\pm 2,2$	41,7	$\pm 5,6$	69,3	$\pm 6,7$	43,3	± 2	46,5	$\pm 4,1$	1,2
	26	853,7	$\pm 37,1$	609	$\pm 15,6$	434,3	± 43	463,7	$\pm 13,6$	590,2	$\pm 27,3$	14,9
	27	149	$\pm 5,1$	51,7	$\pm 10,4$	105	$\pm 13,3$	112	$\pm 6,6$	104,4	$\pm 8,9$	2,6
	28	87	± 2	48	± 7	200	± 17	155	$\pm 14,6$	122,5	$\pm 10,2$	3,1
	29	44,3	$\pm 4,4$	36,5	$\pm 5,7$	66,8	$\pm 7,3$	36,8	$\pm 4,4$	46,1	$\pm 5,5$	1,2
	30	401	± 14	506	$\pm 16,3$	1042	± 25	442	$\pm 22,1$	597,8	$\pm 19,4$	15,1
	31	89,5	$\pm 7,2$	76,5	$\pm 7,8$	113,5	$\pm 6,5$	65,5	$\pm 5,3$	86,3	$\pm 6,7$	2,2
	32	42,7	$\pm 6,3$	55,3	$\pm 4,2$	83,3	$\pm 8,3$	-	-	60,4	$\pm 6,3$	1,5
	33	183,5	$\pm 5,6$	654	± 20	1361	$\pm 32,5$	732,5	$\pm 54,1$	732,8	$\pm 28,1$	18,5
	34	61	$\pm 7,6$	41	$\pm 7,5$	56	± 3	49	$\pm 3,2$	51,8	$\pm 5,3$	1,3
3.	35	189,3	$\pm 3,7$	239	$\pm 8,7$	462,3	$\pm 13,7$	225	$\pm 11,9$	279	$\pm 9,5$	7
	36	107	$\pm 5,6$	85	$\pm 6,7$	160	$\pm 4,5$	78	$\pm 7,2$	107,5	± 6	2,7
	37	405,5	$\pm 14,3$	418	$\pm 15,8$	525	± 13	313,5	$\pm 46,5$	415,5	$\pm 22,4$	10,5
	38	30	$\pm 3,7$	44,5	$\pm 3,9$	117,5	± 7	49	$\pm 20,2$	60,3	$\pm 8,7$	1,5
	39	370	$\pm 9,1$	415	$\pm 20,6$	939	± 28	479	$\pm 23,1$	550,8	$\pm 20,2$	13,9
	40	39,3	$\pm 6,8$	98,3	$\pm 11,4$	54,3	± 12	48	$\pm 4,4$	60	$\pm 8,7$	1,5
	41	90	$\pm 4,6$	82,7	$\pm 9,1$	119,7	$\pm 11,3$	101	$\pm 11,9$	98,4	$\pm 9,2$	2,5
	42	437,5	$\pm 8,5$	308,5	$\pm 5,9$	443	± 17	322,5	$\pm 9,5$	377,9	$\pm 10,2$	9,5
	43	108	$\pm 5,1$	95	$\pm 7,6$	155	$\pm 10,3$	125,7	$\pm 8,9$	121	± 8	3,1
	44	279	$\pm 13,7$	288,5	$\pm 12,3$	421	± 11	292	$\pm 22,6$	320,1	$\pm 14,9$	8,1
	45	558,5	± 16	379	$\pm 43,7$	903,5	± 22	586	$\pm 13,2$	606,8	$\pm 23,7$	15,3
	46	8,5	$\pm 1,9$	65,5	$\pm 5,2$	26	$\pm 3,5$	6,5	$\pm 5,1$	26,6	$\pm 3,9$	0,7
4.	47	264,5	$\pm 19,9$	148	$\pm 5,6$	387	± 21	176	$\pm 26,1$	243,9	$\pm 18,2$	6,2
	48	52,3	$\pm 4,5$	50,7	$\pm 5,4$	63,7	± 4	38	$\pm 5,5$	51,2	$\pm 4,9$	1,3
	49	102,7	$\pm 8,9$	131,7	$\pm 4,1$	229	$\pm 10,7$	136,3	$\pm 12,5$	149,9	$\pm 9,1$	3,8

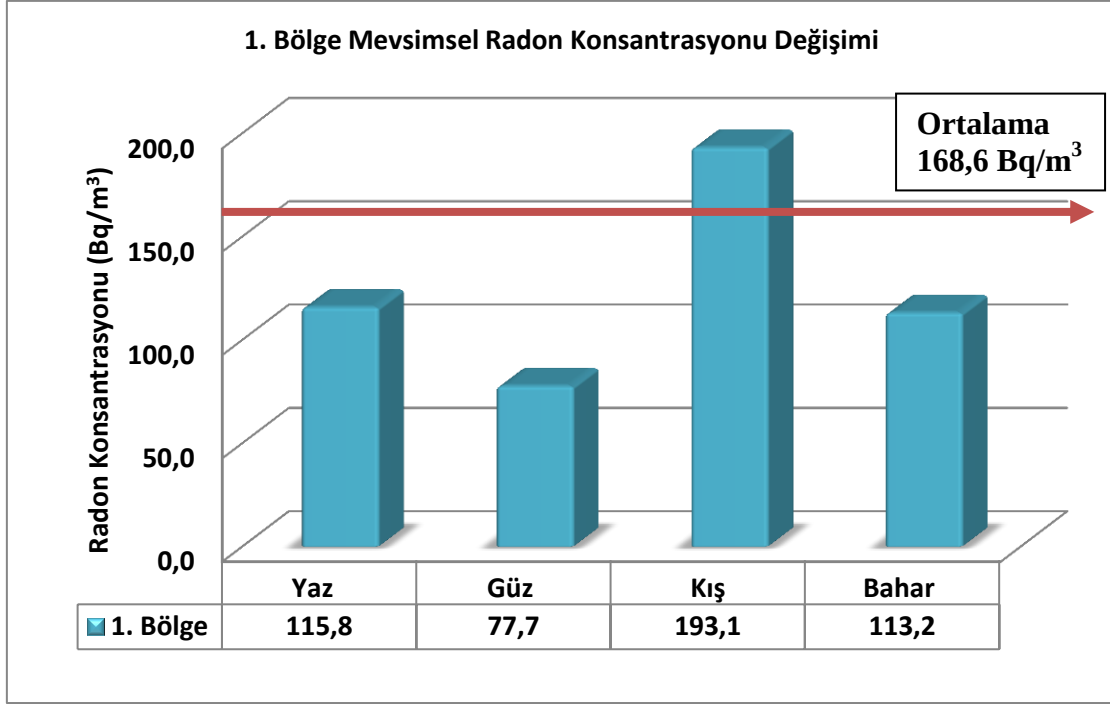


Şekil 4.1 Bölgelere göre ortalama radon konsantrasyonu

4.2 Bölgelere Göre Mevsimsel Radon Konsantrasyon Dağılımı

4.2.1 1. Bölge Mevsimsel Radon Konsantrasyon Dağılımı

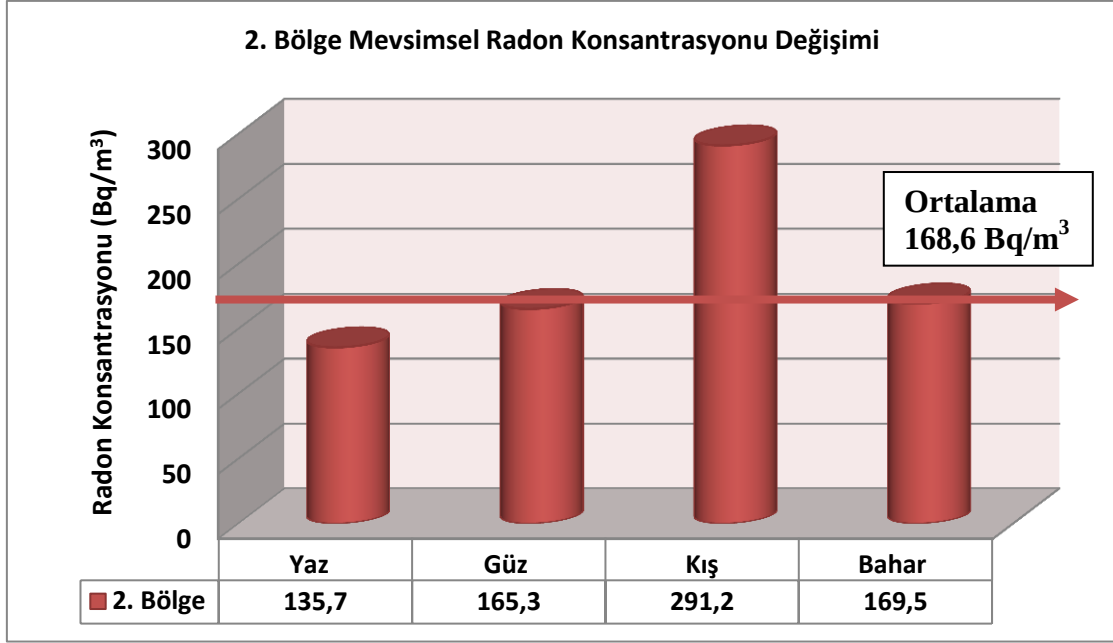
1. Bölgedeki konutlarda radon konsantrasyonunun mevsimsel değişimi Şekil 4.2’de görülmektedir. Bu bölgede radon aktivitesi konsantrasyonu değerleri; yaz döneminde $115,8 \text{ Bq/m}^3$, güz döneminde $77,7 \text{ Bq/m}^3$, kış döneminde $193,1 \text{ Bq/m}^3$ ve bahar döneminde $113,1 \text{ Bq/m}^3$ olarak belirlenmiştir. Buna göre, radon konsantrasyonu güz döneminde en düşük olurken, kış döneminde en yüksek değere ulaşmıştır.



Şekil 4.2 1. Bölgedeki mevsimsel radon konsantrasyon dağılımı

4.2.2 2. Bölge Mevsimsel Radon Konsantrasyon Dağılımı

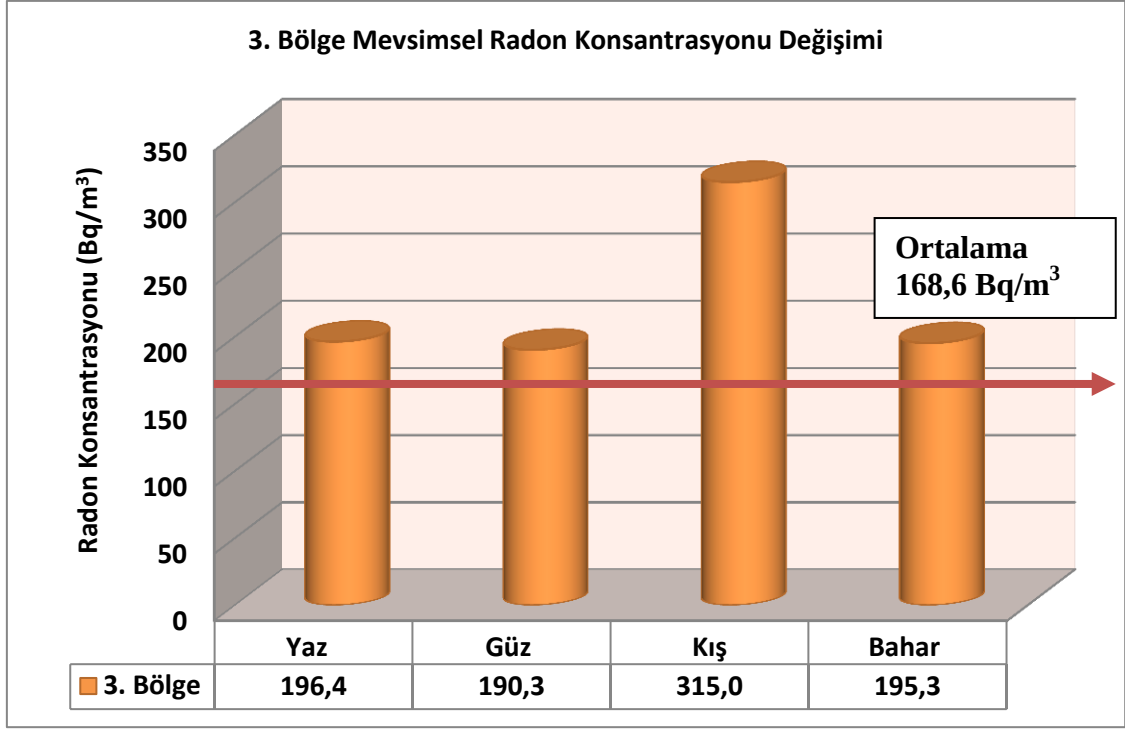
Üçer aylık periyotlarla bir yıl boyunca ölçümleri gerçekleştirilen 2. Bölgedeki konutlarda radon konsantrasyonunun mevsimsel değişimi Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Bu bölgede radon aktivitesi konsantrasyonu değerleri; yaz döneminde $135,7 \text{ Bq/m}^3$, güz döneminde $165,3 \text{ Bq/m}^3$, kış döneminde $291,2 \text{ Bq/m}^3$ ve bahar döneminde $169,5 \text{ Bq/m}^3$ olarak belirlenmiştir. Buna göre, yaz mevsimi $135,7 \text{ Bq/m}^3$ 'lük radon konsantrasyonu değeriyle en düşük, kış mevsimi ise $291,2 \text{ Bq/m}^3$ 'lük radon konsantrasyonu değeriyle en yüksek değere sahiptir.



Şekil 4.3 2. Bölgedeki mevsimsel radon konsantrasyon dağılımı

4.2.3 3. Bölge Mevsimsel Radon Konsantrasyon Dağılımı

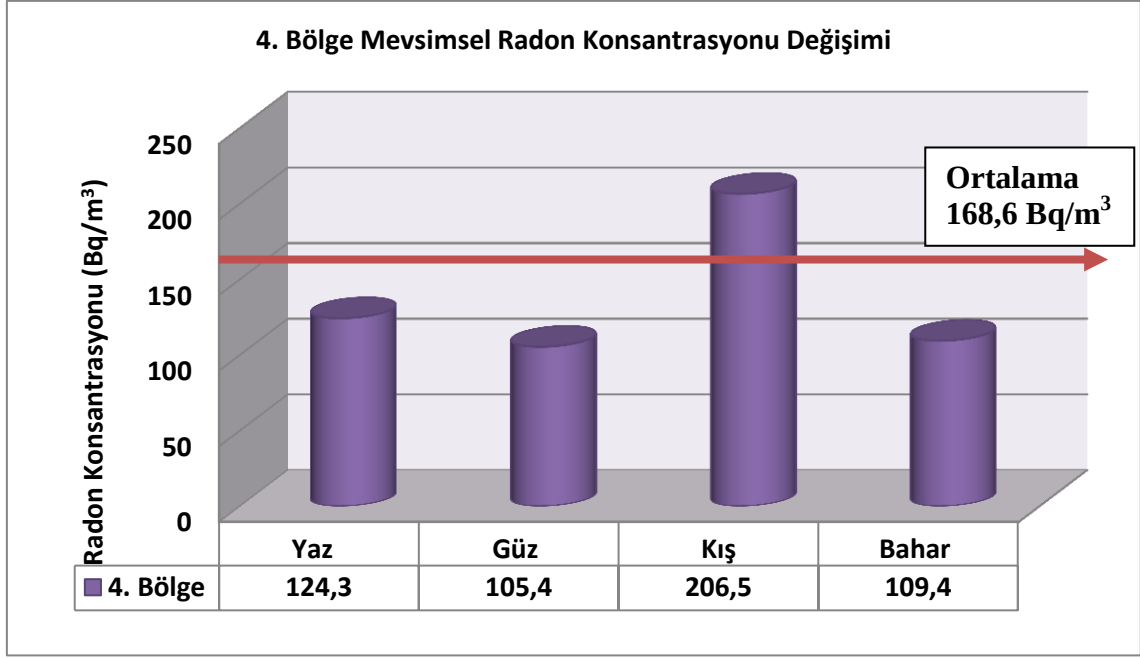
Bir yıl boyunca üçer aylık periyotlarla radon konsantrasyon değeri ölçülen 3. Bölgedeki konutlarda radon konsantrasyonunun mevsimsel değişimi Şekil 4.4’de verilmiştir. Bu bölgede radon aktivitesi konsantrasyonu değerleri; yaz döneminde $196,4 \text{ Bq/m}^3$, güz döneminde $190,3 \text{ Bq/m}^3$, kış döneminde $315,0 \text{ Bq/m}^3$ ve bahar döneminde $195,3 \text{ Bq/m}^3$ olarak belirlenmiştir. Buna göre, Güz dönemi $190,3 \text{ Bq/m}^3$ ’lük radon konsantrasyonu değeriyle en düşük, kış dönemi ise $315,0 \text{ Bq/m}^3$ ’lük radon konsantrasyonu değeriyle en yüksek değere sahiptir.



Şekil 4.4 3. Bölgedeki mevsimsel radon konsantrasyon dağılımı

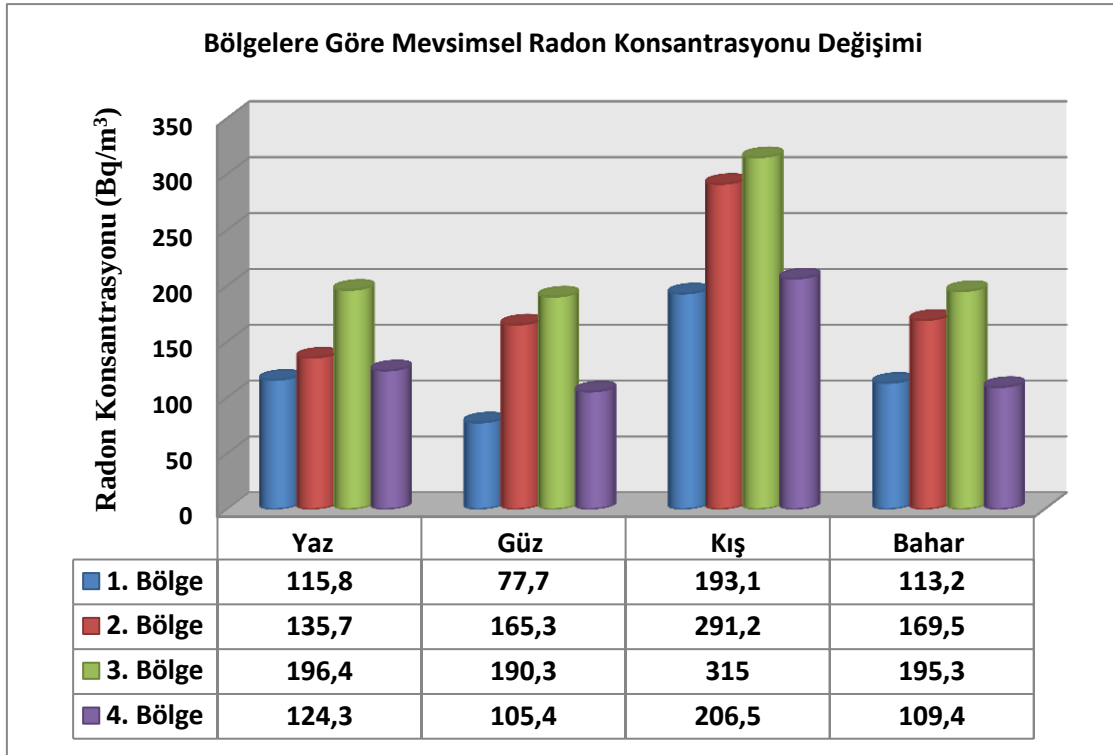
4.2.4 4. Bölge Mevsimsel Radon Konsantrasyon Dağılımı

Üçer aylık periyotlarla bir yıl boyunca ölçüm alınan 4. Bölgedeki konutlarda radon konsantrasyonunun mevsimsel değişimi Şekil 4.5'te görülmektedir. Bu bölgede radon aktivitesi konsantrasyonu değerleri; yaz döneminde $124,3 \text{ Bq/m}^3$, güz döneminde $105,4 \text{ Bq/m}^3$, kış döneminde $206,5 \text{ Bq/m}^3$ ve bahar döneminde $109,4 \text{ Bq/m}^3$ olarak belirlenmiştir. Buna göre, en düşük radon konsantrasyon değeri güz döneminde $105,40 \text{ Bq/m}^3$ ve en yüksek radon konsantrasyon değeri kış döneminde $206,50 \text{ Bq/m}^3$ olarak belirlenmiştir.



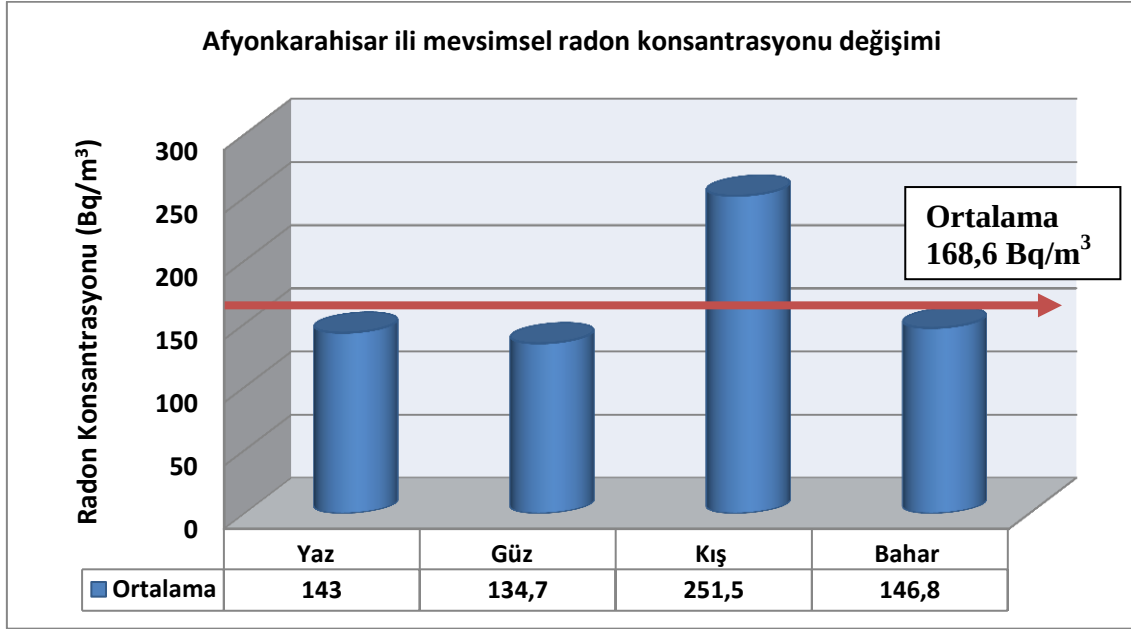
Şekil 4.5 4. Bölgedeki mevsimsel radon konsantrasyon dağılımı

Şekil 4.6’da tüm bölgelerin mevsimlere göre radon konsantrasyon değerleri görülmektedir.



Şekil 4.6 Bölgelere göre mevsimsel radon konsantrasyon dağılımı

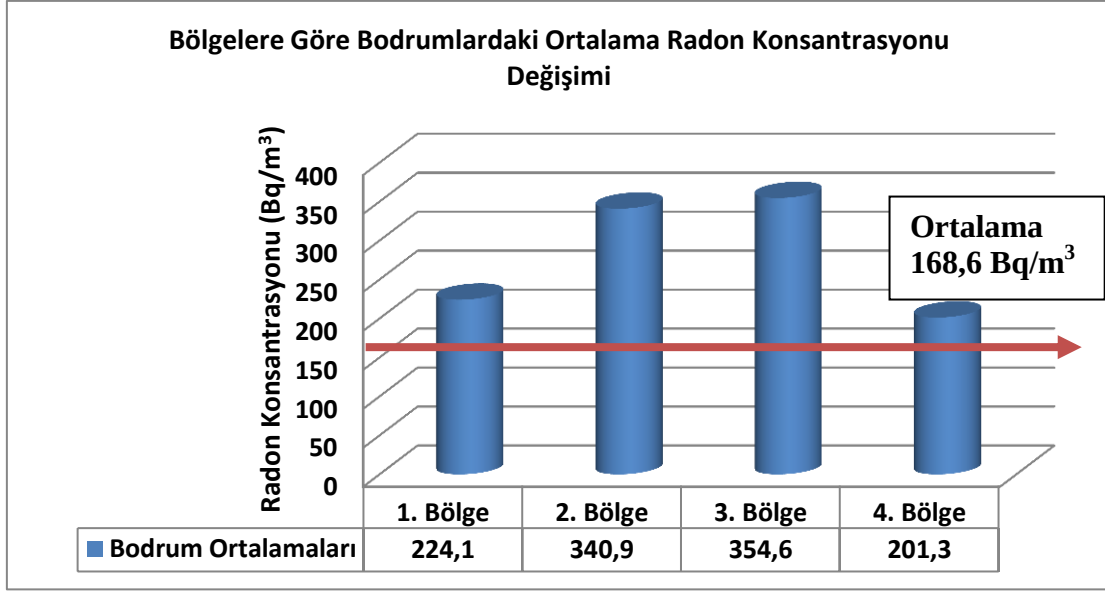
Şekil 4.7’de Afyonkarahisar ilinin mevsimsel radon konsantrasyon dağılımı görülmektedir. Bölgelere ayrılmadan mevsimsel olarak radon konsantrasyon ortalaması alınmıştır.



Şekil 4.7 Afyonkarahisar ili mevsimsel radon konsantrasyonu değerleri

4.3 Bölgelere Göre Bodrumlardaki Ortalama Radon Konsantrasyonu

Konutlardaki radonun büyük bir kısmı (%90) bina altındaki topraktan gelmektedir. Yapılan çalışmada, belirlenen konutlarda varsa kiler ya da bodrumlarına da detektörler yerleştirilmiştir. Radon kaynağına daha yakın olan bu noktalarda ortalama radon konsantrasyonunun daha yüksek çıkması beklenmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.8’de görülmektedir. Bu sonuçlara göre radon konsantrasyonu, Afyonkarahisar için hesaplanan ortalama radon konsantrasyon değeri olan $168,60 \text{ Bq/m}^3$ değerinden tüm bölgelerde daha yüksek çıkmıştır.



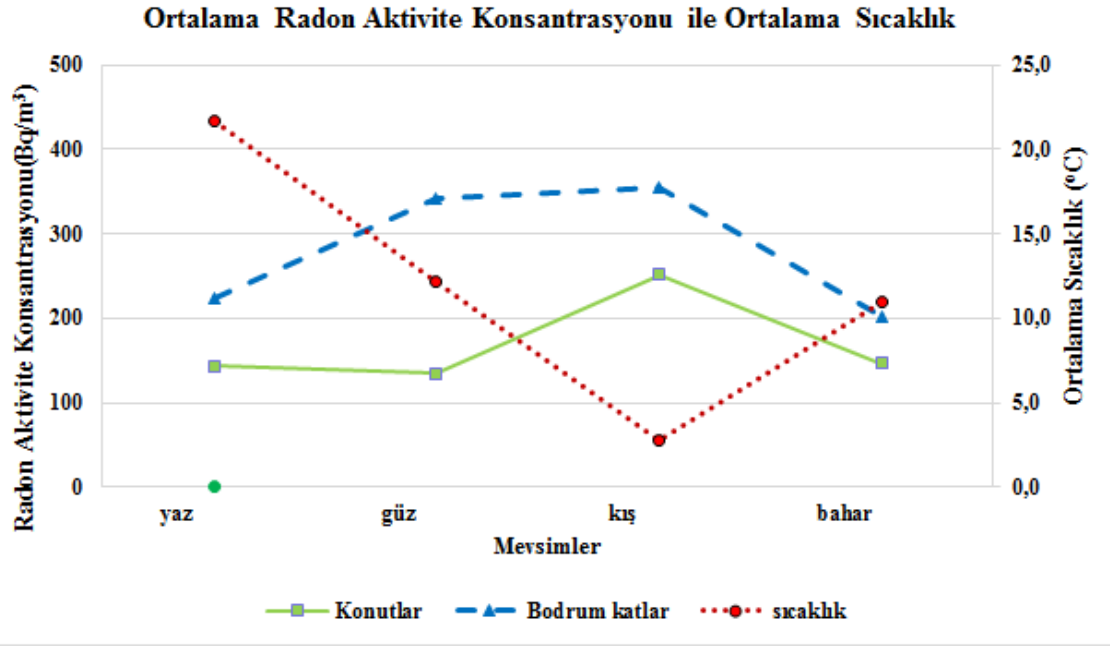
Şekil 4.8 Bölgelere göre bodrumlardaki ortalama radon konsantrasyonu

4.4 Meteorolojik Verilerle Radon Konsantrasyonunun Karşılaştırılması

Radon aktivite konsantrasyonu birçok parametreye bağlı olarak değişmektedir. Meteorolojik olarak da birçok değişkene bağlı olduğu düşünülmektedir. Bir yıl boyunca mevsimlere göre yapılan radon aktivite konsantrasyonu ölçümlerindeki değişimler üzerindeki sıcaklık, basınç nispi nem ve yağış miktarı gibi meteorolojik parametrelerin etkisini incelemek için Haziran 2013 ve Mayıs 2014 dönemine ait meteorolojik veriler Afyonkarahisar Meteoroloji 5. Bölge Müdürlüğü'nden temin edilmiştir. Mevsimsel olarak değişen radon aktivite konsantrasyon değerinin meteorolojik değerlerle nasıl değiştiği gözlemlenmeye çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlar alt başlıklar halinde aşağıda verilmiştir.

4.4.1 Radon Konsantrasyonu ve Ortalama Sıcaklık

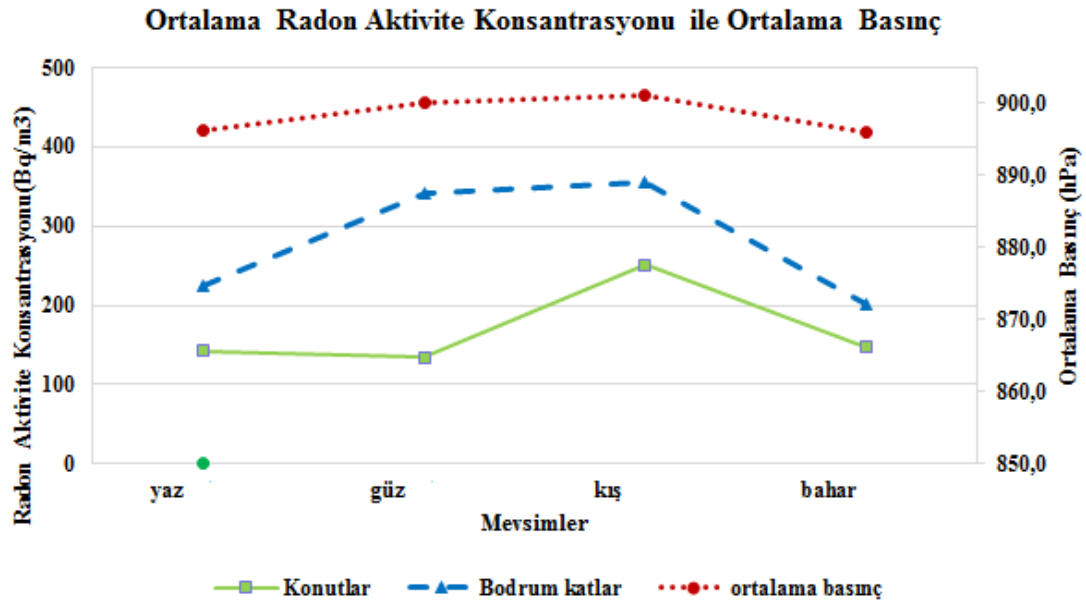
Afyonkarahisar Meteoroloji 5. Bölge Müdürlüğü'nden temin edilen aylık ortalama sıcaklık değerleri kullanılarak mevsimlik ortalama sıcaklık değerleri; yaz için 21,7°C, güz için 12,2°C, kış için 2,8°C ve bahar için 10,9°C olarak hesaplanmıştır. Mevsimlere göre ortalama sıcaklık değerleri ile aynı dönemlerdeki radon aktivite konsantrasyon değerleri Şekil 4.9'da birlikte verilmiştir.



Şekil 4.9 Ortalama radon aktivite konsantrasyonu ile ortalama sıcaklık arasındaki ilişki

4.4.2 Ortalama Radon Aktivite Konsantrasyonu ve Ortalama Basınç

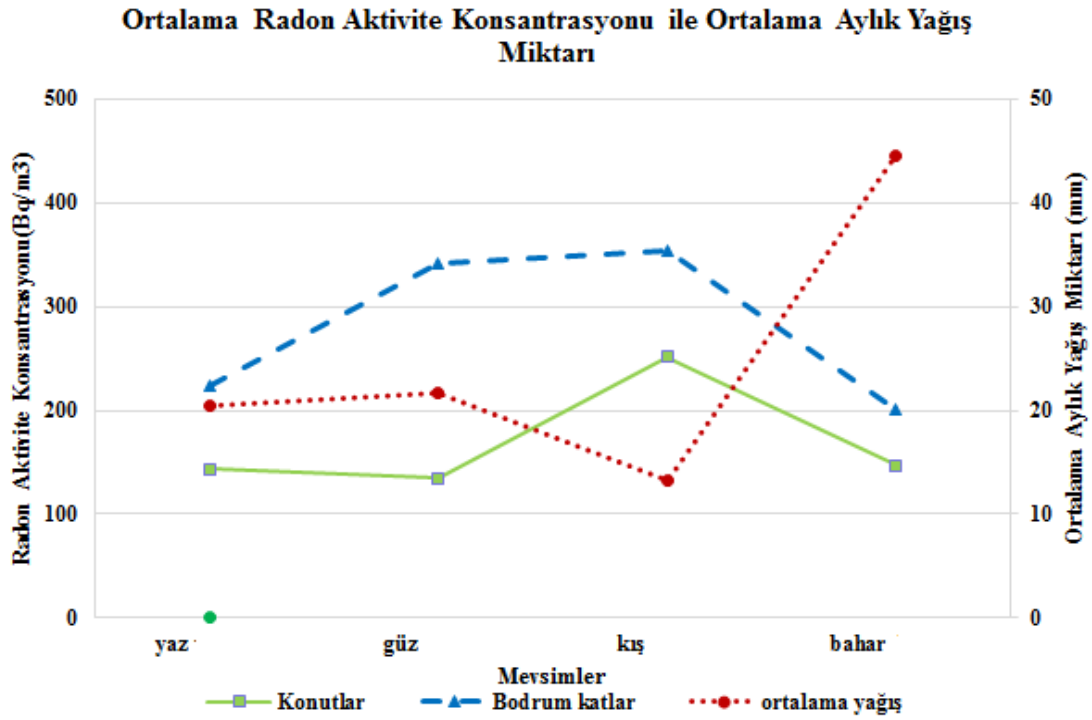
Afyonkarahisar Meteoroloji 5. Bölge Müdürlüğü'nden elde edilen aylık ortalama hava basınç değerleri kullanılarak mevsimlere göre ortalama basınç değerleri; yaz için 896,4 hPa, güz için 900 hPa, kış için 900,1 hPa, bahar için 896 hPa olarak hesaplanmıştır. Mevsimlere göre ortalama basınç değerleri ile aynı dönemlerdeki radon aktivite konsantrasyon değerleri Şekil 4.10'da birlikte verilmiştir.



Şekil 4.10 Ortalama radon aktivite konsantrasyonu ile ortalama basınç arasındaki ilişki

4.4.3 Radon Konsantrasyonu ve Ortalama Yağış

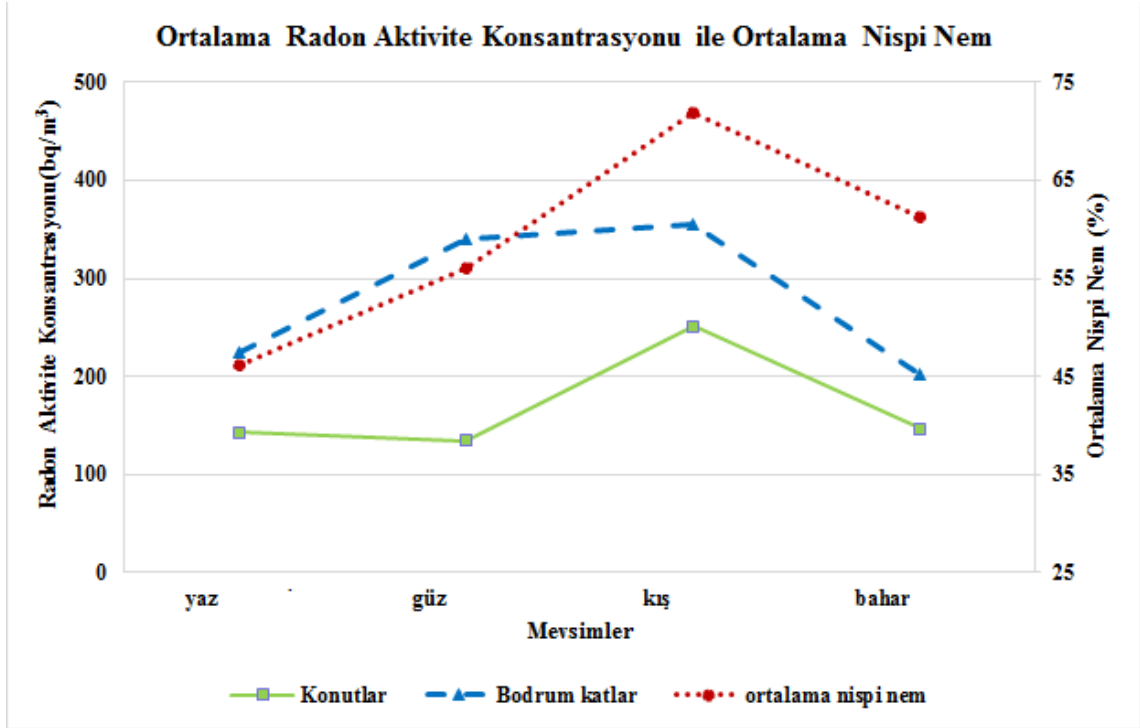
Mevsimlik ortalama yağış miktarı değerleri Afyonkarahisar Meteoroloji 5. Bölge Müdürlüğü'nden elde edilen aylık ortalama hava yağış değerleri kullanılarak; yaz için 79,5 mm, sonbahar için 23,6 mm, kış için 138,4 mm, bahar için 54 mm olarak hesaplanmıştır. Mevsimlere göre ortalama yağış değerleri ile aynı dönemlerdeki radon aktivite konsantrasyon değerleri Şekil 4.11'de birlikte verilmiştir.



Şekil 4.11 Ortalama radon aktivite konsantrasyonu ile ortalama yağış arasındaki ilişki

4.4.4 Radon Aktivite Konsantrasyonu ve Ortalama Nispi Nem

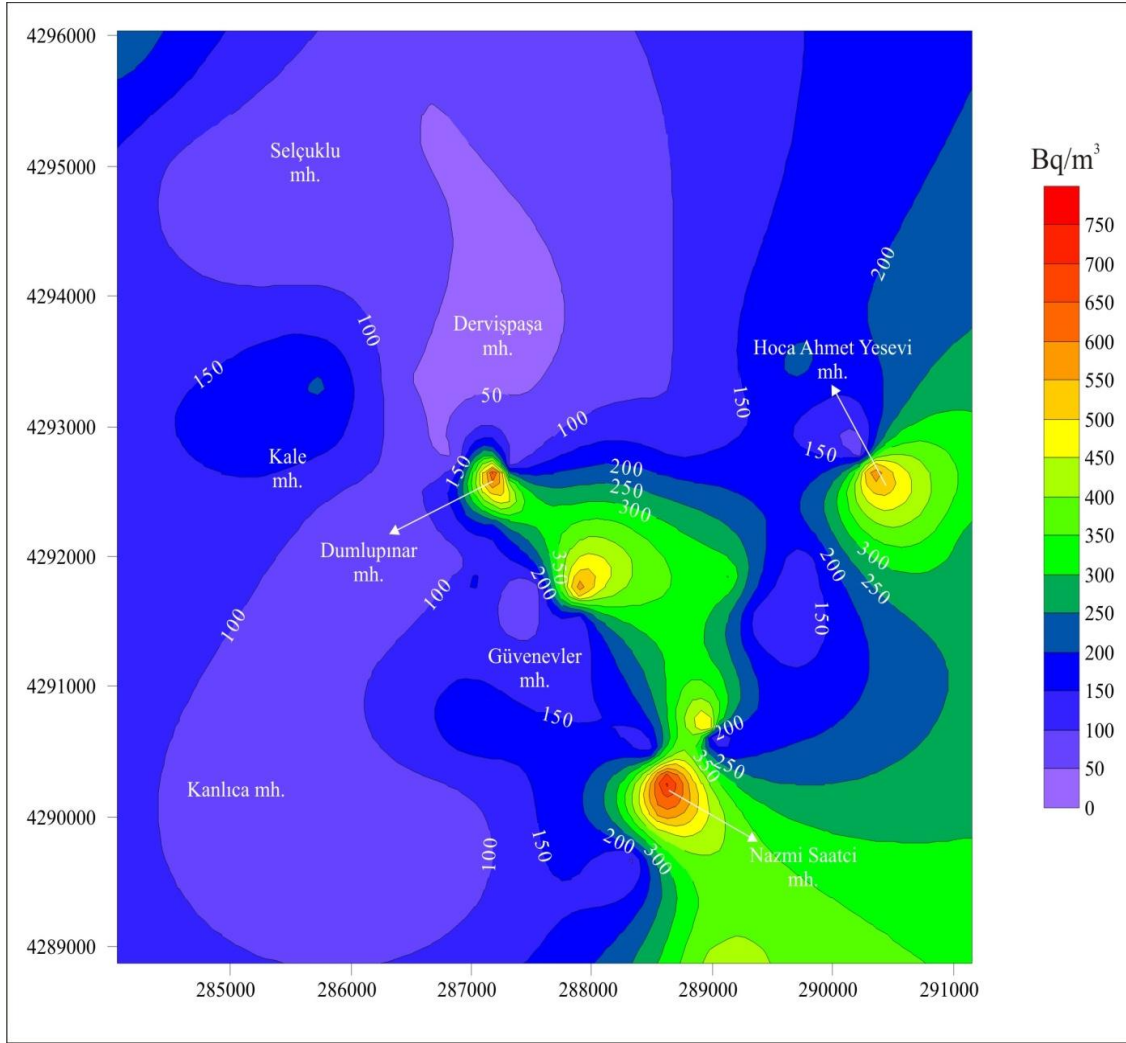
Mevsimlik ortalama nispi nem değerleri, Afyonkarahisar Meteoroloji 5. Bölge Müdürlüğü'nden elde edilen aylık ortalama nispi nem değerleri kullanılarak; yaz için %79,5, sonbahar için %23,6, kış için 138,4 ve bahar için %54 olarak hesaplanmıştır. Mevsimlere göre ortalama nispi nem değerleri ile radon aktivite konsantrasyon değerleri arasındaki ilişki Şekil 4.12'de verilmiştir.



Şekil 4.12 Ortalama radon aktivite konsantrasyonu ile ortalama nispi nem arasındaki ilişki

4.5 Afyonkarahisar Merkezdeki Radon Konsantrasyon Dağılımı

Her bir konut için elde edilen yıllık ortalama radon aktivitesi konsantrasyonu değerleri kullanılarak Afyonkarahisar il merkezindeki radon konsantrasyonunun yoğunluk haritası çizilerek Şekil 4.13'te gösterilmiştir.



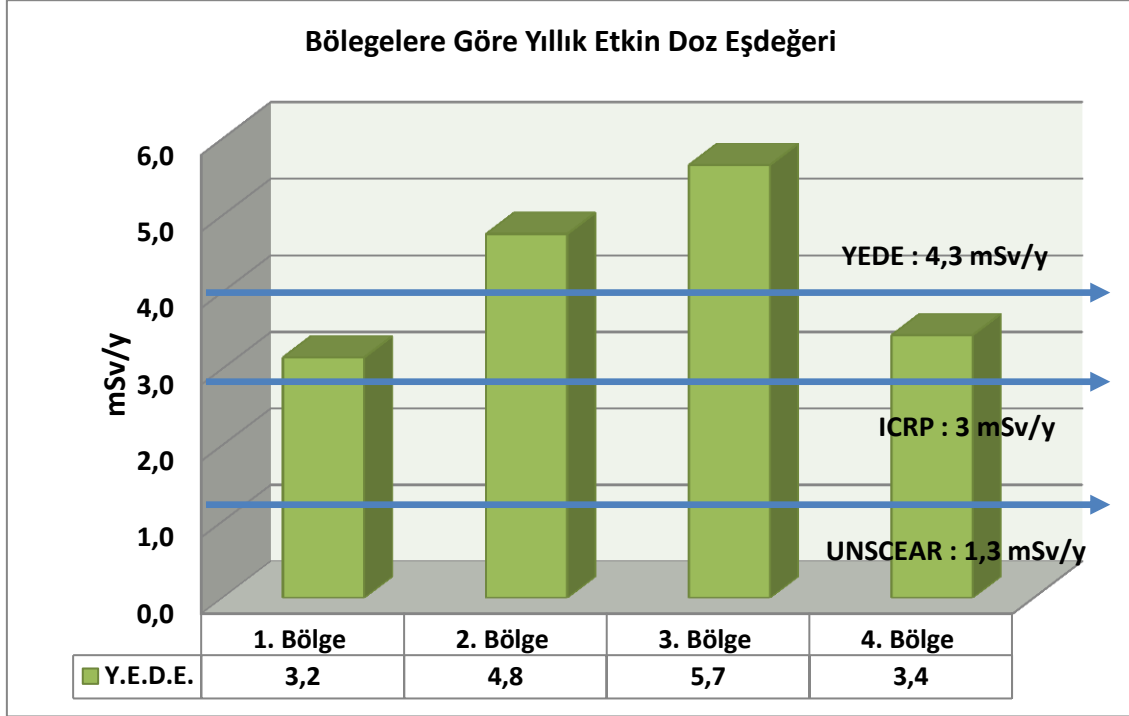
Şekil 4.13 Afyonkarahisar merkezdeki radon konsantrasyon dağılım haritası

Şekil 4.13'teki radon konsantrasyon dağılım haritası incelendiğinde inceleme alanındaki en yüksek radon konsantrasyonlarının elde edildiği bölgelerin dağılımıyla, Şekil 3.2'deki jeoloji haritasında verilen KB-GD doğrultulu fay hatlarıyla uyumlu olduğu görülmüştür. Ayrıca maksimum radon konsantrasyonların elde edildiği bu bölgelerin söz konusu fay hatlarına oldukça yakın olması, radon konsantrasyonlarındaki değişimin bölgenin tektonik yapısıyla ilişkili olduğu fikrini kuvvetlendirmektedir.

4.6 Afyonkarahisar İli İçin Yıllık Etkin Doz Eşdeğerleri

İnsanlar zamanlarının büyük bir kısmını kapalı ortamlarda geçirdiklerinden, kapalı ortamlardaki radon konsantrasyonundan dolayı maruz kaldıkları yıllık etkin doz eşdeğerleri Denklem 3.1 kullanılarak hesaplanmıştır.

Afyonkarahisar merkezde ortalama yıllık etkin doz eşdeğeri 4,3 mSv/y olarak hesaplanmıştır. Bölgelere göre yıllık etkin doz eşdeğerleri ayrı ayrı hesaplanarak Şekil 4.14'te verilmiştir. Bu sonuçlara göre, 2. ve 3. Bölgelerdeki yıllık etkin doz eşdeğerlerinin, Afyonkarahisar geneli için hesaplanan yıllık etkin doz eşdeğerinin üzerinde olduğu görülmektedir.



Şekil 4.14 Bölgelere göre yıllık etkin doz eşdeğerleri

5. SONUÇ VE TARTIŞMA

Afyonkarahisar il merkezinde gerçekleştirilmiş olan bu çalışma kapsamında ölçümlerin yapılacağı alan, jeolojik özellikler göz önünde bulundurularak 4 bölgeye ayrılmıştır. Bu bölgeler oluşturulurken çalışma alanındaki farklı kayaç türleri, bölgelerin tektonik yapıları dikkate alınmıştır ve bölgelerin uzanımları Afyonkarahisar ve çevresinde etkili olan KB-GD doğrultulu Akşehir-Simav Fay Sistemi (ASFS)'ne ait faylarla uyumlu olacak şekilde belirlenmiştir. Bölgelerdeki noktaların dağılımı konut yoğunluklarına göre homojen bir şekilde yapılmaya çalışılmıştır. Belirlenen bölgelerdeki 50 noktada bulunan evlere 4 mevsim boyunca Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK) Sarayköy Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi'nden (SANAEM) temin edilen detektörler yerleştirilmiş ve ölçümler alınmıştır.

Mevsimsel etkinin de gözlemlenebilmesi açısından yapılan çalışma üçer aylık periyotlarla bir yıl boyunca sürdürülmüştür. Elde edilen veriler deneysel bulgular kısmında tablo ve şekillerde verilmiştir.

Konutlarda yapılan bir yıllık ölçümler sonucunda Afyonkarahisar merkezdeki ortalama radon aktivite konsantrasyonu $168,6 \text{ Bq/m}^3$ hesaplanmıştır. Türkiye genelinde kapalı ortamlarda radon aktivite konsantrasyonuna yönelik bazı çalışmalar Çizelge 5.1'de görülmektedir. Çizelgedeki bilgilere göre Afyonkarahisar'da elde edilen ortalama radon aktivite konsantrasyonu değeri en yüksek ikinci değerdir.

Elde edilen sonuçlar mevsimsel olarak incelediğinde ise yaz döneminde $143,0 \text{ Bq/m}^3$, güz döneminde, $134,7 \text{ Bq/m}^3$, kış döneminde, $251,5 \text{ Bq/m}^3$, bahar döneminde, $146,8 \text{ Bq/m}^3$ bulunmuştur. Konutlardan elde edilen tüm veriler ele alındığında en düşük radon aktivite konsantrasyonu 5 Bq/m^3 ve en yüksek radon aktivite konsantrasyonu 2494 Bq/m^3 hesaplanmıştır.

Çizelge 5.1 Türkiye’de bazı illerdeki kapalı ortamlardaki radon aktivite konsantrasyon sonuçları

İl	Radon Konsantrasyonu (Bq/m^3)	Referans
Erzurum	85	Çelebi ve Alkan (1997)
Şanlıurfa	68	Çelebi ve Alkan (1997)
Çanakkale	160	Çelebi ve Alkan (1997)
Elazığ	47	Selçuk vd. (1908)
İstanbul	50	Köksal vd. (1993)
Isparta	164	Uluğ vd. (2003)
Ardahan	173	Öztürk vd. (2008)
Artvin	132	Öztürk vd. (2008)
Antalya	29	Köksal vd. (2004)
Tekirdağ	87	Yarar vd. (2005)
Manisa	97	Erees vd. (2006)
Kastamonu	98	Kam ve Bozkurt (2007)
Kars	114	Çelik vd. (2008)
Edirne	49	Bozkurt ve Kam (2007)
Giresun	130	Çelik vd. (2008)
Batman	84	Damla vd. (2008)
Afyonkarahisar	169	Bu Çalışma

Yapılan araştırmalara göre; bina içi radon konsantrasyonu sonbaharda artma, ilkbaharda azalma eğiliminde olup minimum değeri de yaz mevsiminde aldığı belirlenmiştir. Ancak yapılan bu çalışmada yaz dönemi radon konsantrasyon değeri güz dönemi değerinden daha yüksek olarak elde edilmiştir. Güz dönemindeki bu azalma eğiliminin; yapılan anketler incelendiğinde bu bölgede seçilen konutlardaki kişilerin yaz aylarında Afyonkarahisar ilinde ikamet etmedikleri ve yaz döneminde konutların kapalı kalıp güz döneminde ise konutların yeniden havalandırılmaya başlanmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Kış döneminde ise radon konsantrasyonu maksimum değere ulaşmıştır. Çünkü; kış döneminde konutların havalandırılma sıklığı oldukça düşmekte ve iç-dış hava basıncı arasındaki fark artmaktadır. Kumbur ve arkadaşlarının yapmış olduğu İçel’de evlerde radon düzeyinin araştırılması adlı çalışmalarında; yaz ve kış aylarında 100 evde oturma ve yatak odalarına CR-39 nükleer iz detektörleri yerleştirmişlerdir. İçel evlerinde radon konsantrasyonları yaz aylarında $22-159 Bq/m^3$, kış aylarında $13-59 Bq/m^3$ arasında değişim göstermiştir. Ortalama değerler ise $23 Bq/m^3$ ve $44 Bq/m^3$ olarak bulmuşlardır. Yaz aylarındaki ortalama radon aktivite konsantrasyonunun kış aylarındaki ortalama radon aktivite konsantrasyonundan yüksek bulmalarının nedenini; İçel’de yaz mevsiminin çok sıcak olmasıyla buharlaşmanın fazla

olmasına ve insanların Toros eteklerindeki yaylalara taşınarak evlerin uzun süre boş kalmasına bağlamaktadırlar (Kumbur 1995).

Çalışma alanının 4 jeolojik bölgeye ayrılması sonucunda bölgelerde hesaplanan ortalama radon konsantrasyon değerleri 1. bölgeden 4. bölgeye sırasıyla; $124,9 \text{ Bq/m}^3$, $188,9 \text{ Bq/m}^3$, $224,2 \text{ Bq/m}^3$, $136,4 \text{ Bq/m}^3$ olarak bulunmuştur. 2. ve 3. bölgelerdeki radon konsantrasyon değerleri ortalama radon konsantrasyon değerinden yüksek çıkmıştır. Ayrıca 3. bölge diğer bölgelerden oldukça yüksek bir radon konsantrasyon değerine sahiptir. Bu duruma; 3. bölgenin altından geçtiği düşünülen muhtemel bir fay hattının varlığının sebebiyet verdiği düşünülmektedir ve bununla ilgili olarak yeni çalışmalar yapılması planlanmaktadır. Diğer yandan bölüm 4'te Şekil 4.13'te verilen radon konsantrasyon dağılım haritası ile 4 jeolojik bölgeye ayrılan çalışma alanında belirlenen en yüksek radon konsantrasyon değerleriyle bölüm 3'te verilen Şekil 3.2'deki jeoloji haritasındaki KB-GD doğrultulu fay hatların uyumlu olduğu görülmüştür. Yüksek radon konsantrasyonunun elde edildiği bölgelerin söz konusu fay hatlarına oldukça yakın olması da radon aktivite konsantrasyon değişiminin bölgenin tektonik yapısıyla ilişkili olduğunu da desteklemektedir. Zunic ve arkadaşlarının, Sırbistan'ın Niska Banja bölgesinde ev içi radon konsantrasyonunu belirlemeye yönelik yaptıkları çalışmada, 65 evin oturma ve yatak odalarına toplamda 102 adet CR-39 radon detektörü dağıtmışlardır ve yıllık ortalama radon konsantrasyonunu traverten bölgede 1500 Bq/m^3 , alıvyum sediment oluşumunun olduğu bölgede ise 650 Bq/m^3 , maksimum değeri ise 6000 Bq/m^3 olarak tespit etmişlerdir (Zunic *et al.* 2006).

Bölgelere göre mevsimsel değerlendirme yapıldığında; kış dönemi radon konsantrasyonu diğer mevsimlere göre yüksek çıkmıştır. Çünkü kış aylarında havalandırmanın oldukça azalması, iç-dış hava basıncı arasındaki farkın atması radon konsantrasyonunu arttıran parametrelerdir. Yaz ve güz dönemleri bölgelere göre değişiklik göstermekle birlikte kış dönemine göre daha düşük radon konsantrasyon değerlerine sahiptir. Özderya, Samsun ili ev içi radon konsantrasyonunun belirlenmesine yönelik yapmış olduğu çalışmada her mevsim ölçüm yaparak kış döneminde yüksek ve yaz mevsiminde düşük radon konsantrasyon değerleri çıkmıştır ve ortalama radon konsantrasyonunu 106 Bq/m^3 bulmuştur (Özderya 2009). Yeşilbağ'ın, Artvin ve Ardahan bina içi radon konsantrasyonunu belirlemeye yönelik

yapmış olduğu çalışmada Ardahan için ortalama radon konsantrasyonunu 173 Bq/m^3 , Artvin için ortalama radon konsantrasyonunu 132 Bq/m^3 olarak bulmuştur. Ayrıca iki il arasında çıkan konsantrasyon farkının ana nedenlerinden birinin iklim farklılığına bağlanabileceğini belirtmiştir (Yeşilbağ 2008).

Afyonkarahisar merkezdeki konutlardan elde edilen ortalama radon aktivite konsantrasyonu, mevsimsel dönemlerden alınan ortalama radon aktivite konsantrasyon değerleri ve 4 jeolojik bölgeden alınan ortalama radon aktivite konsantrasyon değerlerinin hiçbirisi TAEK tarafından konutlarda belirlenen 400 Bq/m^3 'lük sınır değeri aşmamaktadır. Ancak her bir konuttan alınan değerlere bakıldığında birçok konutta bu limit değerin üzerinde radon aktivite konsantrasyonu bulunmuştur. WHO'nun belirlemiş olduğu limit değeri 100 Bq/m^3 'tür ve bu çalışmada elde edilen ortalama radon aktivite konsantrasyonu değerleri bütün bölgelerde bu limit değerin üzerindedir.

Mevsimsel olarak radon konsantrasyon değişimleri ile sıcaklık, basınç nispi nem ve yağış miktarı gibi meteorolojik parametrelerin radon konsantrasyon değişimi üzerindeki etkisini incelenmek amacıyla, Haziran 2013 ve Mayıs 2014 dönemine ait meteorolojik veriler Afyonkarahisar Meteoroloji 5. Bölge Müdürlüğü'nden temin edilmiştir.

Meteorolojik verilerle radon konsantrasyon değerleri bölüm 4.4'te karşılaştırılmıştır. Her mevsim için alınan ortalama basınç, ortalama sıcaklık, ortalama nispi nem, ortalama yağış değerleri ile her mevsim ölçülen radon konsantrasyon değerlerinin karşılaştırmalı grafikleri çizilerek aralarındaki ilişki belirlenmeye çalışılmıştır. Ortalama basınç ve ortalama nispi nem ile radon konsantrasyonu arasında doğru ilişkili sonuçlar elde edilirken, ortalama sıcaklık ve ortalama yağış ile radon konsantrasyonu arasında ise ters ilişki olduğu gözlemlenmiştir. Alonso ve diğerleri tarafından Meksika'da yapılan çalışmada kapalı ortamlardaki ortalama günlük radon değişimlerinin atmosfer basıncı ve nispi nem ile ilişkili iken sıcaklık ile ilişkisi olmadığını ortaya koymuşlardır (Alonso *et al.* 2013).

Yapılan araştırmalara göre; soğuk havalarda evlerin ısıtılması sonucu ev içerisindeki basınç, dışarıdaki basınçtan daha azdır. Bu durum da radon konsantrasyon değerini yükselten bir etki yapmaktadır. Özellikle yaz aylarında radon konsantrasyon değerinin düşmesi iç ve dış basınç arasındaki farkın azalmasından kaynaklanmaktadır. Aşırı

yağışlı günlerde ise; toprakların gözeneklerinin tıkanması sonucu radon gazı çıkışı azalmaktadır. Radon aktivite konsantrasyon değerleri meteorolojik koşullardan etkilenmektedir.

Evlerde geçirdiğimiz her zaman diliminde sürekli olarak radon gazına maruz kalmaktayız. Bu nedenle bir yılda radon gazından dolayı maruz kaldığımız yıllık etkin doz eşdeğerinin hesaplanması sağlığımız açısından önem taşımaktadır. Bu doğrultuda yapmış olduğumuz çalışma sonucunda Afyonkarahisar ili merkezdeki evlerde yıllık etkin doz eşdeğeri 4,3 mSv/y olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu değer, ICRP tarafından belirlenen 3 mSv/y değerinin üzerinde bir değerdir. Ayrıca UNSCEAR tarafından belirlenen 1,3 mSv/y'lık değer de oldukça üzerindedir. Bölgeler bazında da yıllık etkin doz eşdeğeri hem ICRP nin belirlemiş olduğu yıllık etkin doz eşdeğerinden hem de UNSCEAR'ın belirlemiş olduğu yıllık etkin doz eşdeğerinden daha yüksektir. Bölgelere göre hesaplanan yıllık etkin doz eşdeğerleri sırasıyla; 1. bölge için 3,2 mSv/y, 2. bölge için 4,8 mSv/y, 3. bölge için 5,7 mSv/y, 4. bölge için 3,4 mSv/y olarak hesaplanmıştır. Öztürk, Erzincan ilindeki evlerde bina içi radon konsantrasyonunun mevsimsel değişimini incelemeye yönelik yapmış olduğu çalışmada, yıllık ortalama radon konsantrasyonunu 91 Bq/m^3 bulmuştur. Kış döneminde radon konsantrasyonunu yüksek, ilkbahar ve yaz döneminde ise düşük bulmuştur. Yıllık etkin doz eşdeğerini de 2,29 mSv/yıl olarak tespit etmiştir (Öztürk 2012).

Radon aktivite konsantrasyonu birçok parametreye bağlıdır. Yapı malzemelerinin türü (alum şist katkılı hazır beton, fosfojips, tuf gibi yapı malzemeleri yüksek radyum içerir ve radon gazı oluşumuna sebep olurlar), evlerin müstakil ya da apartman olması, havalandırma sıklığı, evlerdeki kişilerin yaşam alışkanlıkları, evlerin ısınma şekli, evlerin yapılış tarihi gibi birçok parametre sayılabilir. Bu çalışmada, sadece bodrum katlarda yapılan ölçümlerde, ortalama radon konsantrasyonu değerleri bölgelere göre sırasıyla; $224,1 \text{ Bq/m}^3$, $340,9 \text{ Bq/m}^3$, $354,6 \text{ Bq/m}^3$, $201,3 \text{ Bq/m}^3$ olarak bulunmuştur. Bu değerler Afyonkarahisar il merkezindeki ortalama radon konsantrasyon değeri olan $168,6 \text{ Bq/m}^3$ değerinin oldukça üzerinde bir değerdir. Bu durum ölçülen radon konsantrasyonunun asıl kaynağının binanın üzerinde bulunduğu zemin olduğunu, yani ölçülen değer büyük bir kısmının (%90) topraktan geldiğini desteklemektedir. Ayrıca yapılan anketler incelendiğinde; bazı noktalarda detektör

yerleştirildikten sonra yalıtım ve tadilat gerçekleştirilmiştir. Bu noktalardaki evlerde radon konsantrasyonunda belirgin bir artış olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum; kullanılan yapı malzemelerinden ve evdeki hava sirkülasyonunun azalması gibi nedenlere bağlı olduğu düşünülmektedir. Ramola ve arkadaşları Tehri Garhwal’da, farklı yapıdaki konutlarda radon konsantrasyonunun mevsimsel değişimini incelemiştir. Çamurdan yapılmış konutlarla çimento kullanılarak yapılan konutlarda mevsimsel olarak radon aktivite konsantrasyonu değerlerini karşılaştırmış ve radon aktivite konsantrasyonunun, kış mevsiminde yüksek, yaz ve sonbahar mevsimi ile yağışlı sezonlarda düşük değerlerde olduğunu tespit etmişlerdir. Abdulrahman vd. (2014) Suudi Arabistan’ın Riyad şehrinde 786 konutta bina içi radon konsantrasyonunu belirlemeye yönelik yapmış oldukları çalışmada; yıllık ortalama radon konsantrasyon değerini $24,68 \text{ Bq/m}^3$ bulmuşlardır. Belirledikleri konutlarda radon konsantrasyon değerlerinin; mevsimlere, konutların tipine, bina materyaline, havalandırma sıklığına ve havalandırma sistemine göre değişiklik gösterdiğini tespit etmişlerdir.

Ayrıca birçok ülke radon gazıyla ilgili yönetmelikler ve politikalar belirlemiştir. Brezilya tropikal iklime sahip bir ülkedir. Ancak buna rağmen yüksek oranda radon gazı yoğunlaşması gözlemlenmektedir. Bunun nedeni ise; yüksek uranyum içeren toprak ve kullanılan yapı malzemeleridir. Son zamanlarda yapılan çalışmalarda 1000 Bq/m^3 ’ün üzerinde çıkan alanlarda iyileştirme yapılmasını önermek için, ulusal bir yönetmelik onaylanmıştır. Başka bir proje ile de uranyum madeni dışındaki yer altı madenlerindeki radon gazı yoğunluğunu bulmak için girişim başlatılmıştır (Gelgün 2010).

Afyonkarahisar il merkezinde evlerde yapılan radon konsantrasyon sonuçları TAEK ve ICRP’nin belirlemiş olduğu sınır değerlerin altında çıkmış olmasına rağmen yine de insanlar radon hakkında bilinçlendirilerek, özellikle de evlerin havalandırılması konusunda uyarılar yapılabilir.

Bazı evlerde dönemlik ölçülen radon konsantrasyon değeri belirlenen sınır değerlerin oldukça üzerindedir. Bu noktalara yeniden detektörler yerleştirilerek belirli periyotlarla kontrollerinin yapılması ve gerekli önlemlerin alınması sağlanabilir.

Yapı malzemelerinin radon konsantrasyonu üzerine etkisinin tam olarak gözlemlenebilmesi için eşit sayılarda farklı türden yapı malzemelerine sahip evler

seçilerek ölçümler yapılabilir. İnşaat malzemeleri olarak radyoaktif analizleri yapılmış yapı malzemeleri seçilebilir.

Evlerde bulunan çatlaklar, yapı malzemelerindeki boşluklar kapatılmalı, binaların toprak ile temas eden yüzeyleri sızıntıya imkân vermeyecek şekilde izole edilmelidir. Bina içerisindeki hava akımının binanın içinden toprağa doğru olması sağlanabilir. İzolasyon yapılan evlerde havalandırma süresi uzatılmalıdır.

Ulusal sağlık politikaları belirlenirken radon dikkate alınmalı, evlerde radon gazı ölçümüne önem verilmelidir.

6. KAYNAKLAR

- Abdulrahman S. (2014). Influences on indoor radon concentrations in Riyadh, Saudi Arabia, *Radiation Measurements*, **62**: 35-40.
- Amit Kumar, R. ve Chauhan P. (2014). Measurement of indoor radon–thoron concentration and radon soil gas in some North Indian dwellings. *Journal of Geochemical Exploration*, **143**: 155-162.
- Arya, (1999). Çekirdek Fiziğinin Esasları. Aktif Yayınevi, Erzurum.
- Arıkpınar, Aylin. (2010). İzmir Seferihisar ve Balçova Jeotermal Bölgelerdeki Binalarda Radon Düzeylerinin Belirlenmesi. Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, İzmir.
- Can, B. (2011). Kilis İlindeki Evlerde Radon Gazı Ölçümü. Kilis 7 Aralık Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kilis.
- Değerlier, M. (2007). Adana İli ve Çevresinin Çevresel Doğal Radyoaktivitesinin Saptanması ve Doğal Radyasyonların Yıllık Etkin Doz Eşdeğerinin Bulunması. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Adana.
- Emen, İ. (2010). Bergama Kozak Granit Alanında Kapalı Ortamlarda Radon Aktivite Konsantrasyonunun Alfa İz Detektörleri İle Saptanması. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, İzmir.
- Gelgün, S. (2010). Kütahya İli Kapalı Mekânları Radon Gazı Konsantrasyonu Ölçümü. Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Kütahya.
- Harut, B. (1995). Erken Volkanitlerinin (Afyon KB Kesimi) Mineralojik-Petrografik ve Jeokimyasal İncelemesi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi F.B.E., 79 s. Ankara.

- Hinojo Alonso N.A., Kotsarenko A., Yutsis V., Hernandez Silva G., Perego P., Fazio M., Grimalsky V., Koshevaya S., Foglia F., Cortes Silva A., García Martínez R., Martínez Reyes J., Norini G., Groppelli G. (2013). Environmental and indoor study of Radon concentration in San Joaquin area, Queretaro, Mexico, first results. *Radiation Measurements* **50**: 149-153.
- Koçyigit, A. ve Deveci, Ş. (2005). Akşehir-Simav fay sistemi: güneybatı Türkiye’de neotektonik rejimin başlama yaşı ve depremsellik [Akşehir-Simav fault system: initiation age of the neotectonic regime and seismicity in the southwestern Turkey. Deprem Sempozyumu Özler kitabı, s.26, Kocaeli.
- Krane, S.K. (2001). Nükleer Fizik. 1. Cilt. Palme Yayıncılık, Ankara.
- Kumbur, H. (1995), İçel’de Evlerde Radon Düzeylerinin Araştırılması. Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü, Mersin.
- Metin, S., Genç, S., ve Bulut, V. (1987). Afyon ve yakın dolayının jeolojisi. M.T.A. Rapor No: 2113, Ankara.
- MEB, Milli Eğitim Bakanlığı, (2011). Çevre Sağlığı Radyasyon Kirliliği, 850CK0033, Ankara.
- Öktü, G.,Kara, İ., Önder, İ. (1997). Afyon ilinde yer alan Ömer-Gecek-Uyuz-Hamamı, Alaplı-Kızık Hamamı ve Gazlıgöl jeotermal alanlarının detaylı etüdü. MTA derleme No:10097, 41s. Ankara (yayınlanmamış).
- Özderya, F. (2009). Samsun İli Ev İçi Radon Konsantrasyonu ve Çevresindeki Topraklarda Radyoaktivitenin Tayini
- Öztürk, E. (2012). Erzincan İli Ev İçi Radon Konsantrasyonunun Mevsimsel Değişimi ve Topraktaki Radyoaktivitenin Tayini. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.
- Radosys Dosimetric Microscopy. 2011, User’s Manuel.

- Sandıkçıoğlu, A. (2004). Afyon Deprem Fay Hattı Üzerinde Bulunan Kaplıca ve Kuyu Sularındaki Radon Değişiminin Ölçümü. Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir.
- Togay, (2002). Radyasyon ve Biz, TAEK, Ankara.
- Tolluoğlu, Ü., Erkan, Y., Sümer, E.Ö., Boyacı, M.N., Yavaş, F. (1997). Afyon metasedimanter grubunun Mesozoyik öncesi metamorfik evrimi. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 40, 1-17, Ankara.
- Türkiye Atom Enerjisi Kurumu. (2012). Kapalı Ortamlarda Radon Gazı, Teknik Rapor, Ankara
- Türkiye Atom Enerjisi Kurumu. (2009). Radyasyon, İnsan ve Çevre, Ankara.
- Türkiye Atom Enerjisi Kurumu Web Sitesi, <http://www.taek.gov.tr>
- Uludağ, H. (2010). Radon Kirliliği ve Halk Sağlığı İlişkisi. Ege Üniversitesi Tıp Fakültesi Halk Sağlığı Anabilim Dalı, Bitirme Tezi, İzmir.
- Ulutürk, Y. (2009). Ömer-Gecek (Afyonkarahisar) dolayının jeolojisi ve suların kökensel yorumu. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, 180s. Isparta.
- UNSCEAR. (2000). United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Exposure Due to Natural Radiation Sources United Nations, New York.
- Vaizoglu, S. (1997). Ankara’ da Evlerde Kış Dönemi Radon Konsantrasyonunun Belirlenmesi. Hacettepe Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Bilim Uzmanlığı Tezi, Ankara.
- Yeşilbaş, Y. (2008). Artvin ve Ardahan İlleri Ev İçi Radon Konsantrasyonu ve Çevresindeki Topraklarda Radyoaktivitenin Tayini. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.

Yıldız, A., Candansayar, M.E., Bağcı, M., Türker, E., Ulutürk, Y., Gökgöz, A., Erdoğan, E., Başaran, C., Çonkar, F.E. (2011). Afyonkarahisar ilinin jeotermal potansiyelinin araştırılması. AKÜ BAPK Projesi, 146s, Afyonkarahisar.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Duygu AÇIL

Doğum Yeri ve Tarihi : Altındağ, 09.09.1987

Yabancı Dili : İngilizce

İletişim (Telefon/e-posta) : 0554405806_duyguacil@hotmail.com

Eğitim Durumu

Lise : Kocatepe Mimar Kemal Lisesi (2005)

Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi
Fizik Bölümü (2011)

Yayınları :

D. Açıl, H. A. Yalım, A. Sandıkçioğlu, R. Ünal, A. Yıldız, S. Uzun, I. Demiröz. 2014. Afyonkarahisar merkezdeki bazı konutlarda bina içi radon konsantrasyonlarının tayin edilmesi. ADIM Fizik Günleri III, 50.

A. Sandıkçioğlu, H. A. Yalım, D. Açıl, İ. Akkuş, M. Özçelik, R. Ünal, A. Yıldız, S. Uzun, I. Demiröz, 2014. Afyonkarahisar'da kapalı ortam radon konsantrasyonunun belirlenmesi. Turkish Physical Society 31st International Physics Congress, Bodrum-Turkey.

D. Açıl, H. A. Yalım, A. Sandıkçioğlu, R. Ünal, A. Yıldız, S. Uzun, I. Demiröz, 2014. Afyonkarahisar merkezdeki konutlarda radon konsantrasyonu ve yıllık etkin doz oranlarının belirlenmesi. Turkish Physical Society 31st International Physics Congress, Bodrum-Turkey.

EKLER

EK-1

EVLERDE RADON ARAŞTIRMASI BİLGİ FORMU

Görüşme Yapılan Kişinin Adı – Soyadı :

Görüşme Yapılan Kişinin Adresi ve Telefon Numarası :

Lütfen Radon ölçümü yapılacak olan bağımsız bölümün (evin) ve binanın yapısı hakkında uygun olanlarını işaretleyerek yanıtlayınız.

1. Evin tipi:

- ☐ Apartman bodrumlu ☐ Apartman bodrumsuz Kaçınıcı kat:
☐ Müstakil bodrumlu ☐ Müstakil bodrumsuz

2. Daire tipi:

- ☐ Tek katlı ☐ Dublex ☐ Triplex
☐ Oturma Odası Kaçınıcı Kat :
☐ Yatak Odası Kaçınıcı Kat :

3. Evin yapıldığı yıl:

- ☐ 1900'dan önce ☐ 1900 - 1949 ☐ 1950 - 1969
☐ 1970 - 1979 ☐ 1980 - 1989 ☐ 1990 - 1999
☐ 2000-2009 ☐ 2010 +

4. Evin duvar, tavan ve tabanının yapı malzemesi:

- Taban : ☐ Toprak ☐ Beton ☐ Ahşap ☐ Mermer ☐ Mozaik
Beton ☐ Diğer
Tavan : ☐ Beton ☐ Ahşap ☐ Diğer
Duvarlar : ☐ Beton ☐ Tuğla ☐ Ahşap ☐ Taş ☐ Biriket
☐ Toprak ☐ Diğer

5. Pencerelerin durumu:

- ☐ Tek camlı PVC pencere ☐ Çift camlı PVC pencere
☐ Tek camlı ahşap pencere ☐ Çift camlı ahşap pencere
☐ Tek camlı alüminyum pencere ☐ Çift camlı alüminyum pencere

EK-1'in devamı

6. Yatak odasına yada oturma odasına açılan balkon kapısı var mı?

☐ Evet

☐ Tek camlı PVC

☐ Çift cam PVC

☐ Tek cam ahşap

☐ Çift cam ahşap

☐ Tek cam alüminyum

☐ Çift camlı alüminyum

☐ Diğer

☐ Hayır

7. Havalandırma sistemi:

☐ Doğal havalandırma

☐ Cihaz ile havalandırma

8. Havalandırma durumu:

☐ İyi havalanıyor

☐ Az havalanıyor

☐ Hiç havalanmıyor

9. Kışın ısıtma sistemi:

☐ Kalorifer

☐ Kömür sobası

☐ Tüp gaz

☐ Elektrikli soba

☐ Afjet

☐ Doğalgaz

☐ Diğer

Doğalgaz kullanımı;

☐ Sadece mutfak ve banyo

☐ Mutfak, banyo ve kalorifer

Kalorifer sistemi;

☐ Merkezi

☐ Kombi

- Binanın yapılışında mı sistem doğalgazdı? Yoksa tadilatla sonradan mı eklendi?

10. Binada kullanılan su kaynağı:

☐ Kuyu

☐ Şebeke

11. Aşağıdaki boşlukları doldurunuz.

(a) Evin kullanım alanım²

(b) Oda sayısıadet.

(c) Oturma salonunun alanı.....m²

(d) Yatak odasının alanı..... m²

(e) Bodrum/Kiler alanı..... m²

12. Kaç yıldır bu evde yaşıyorsunuz?

☐ 5 yıldan az

☐ 5-10 yıl

☐ 10-20 yıl

☐ 20-30 yıl

☐ 30-40 yıl

☐ 40 yıldan fazla

13. Evinizin duvarlarında çatlak var mı?

☐ Evet

☐ Hayır

EK-1'in devamı

14. Evde yaşayanların yaşı, cinsiyet, mesleği ve sigara içme alışkanlıkları:

Yaş	Cinsiyet (K) (E)	Meslek	Sigara içme alışkanlığı Var (+) Yok(-)

15. Bu evde yaşayanlardan hiç Akciğer Kanseri veya Lösemi olan veya bu hastalıktan ölen oldu mu? Eğer ölen veya hasta olan varsa yaşı, cinsiyeti ve yılını belirtiniz.

	Yaşı, Cinsiyeti (K)(E)	Yıl	Kanser Cinsi
☐ Öldü ☐ Hasta			
☐ Öldü ☐ Hasta			