

T.C.
VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

**VAN İLİNDEKİ KONUTLARDA RADON GAZININ ZAMANA BAĞLI
DEĞİŞİMİ VE AKCİĞER KANSERİ İLE İLİŞKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

DOKTORA TEZİ

Halime ERZEN YILDIZ
Danışman: Doç. Dr. Nergiz YILDIZ YORGUN

VAN – 2023

T.C.
VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

**VAN İLİNDEKİ KONUTLARDA RADON GAZININ ZAMANA BAĞLI
DEĞİŞİMİ VE AKCİĞER KANSERİ İLE İLİŞKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

DOKTORA TEZİ

Halime ERZEN YILDIZ

Bu çalışma Van YYÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından
FDK-2019-8412 No'lu proje ile desteklenmiştir.

VAN – 2023

KABUL VE ONAY SAYFASI

Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı'nda Doç. Dr. Nergiz YILDIZ YORGUN danışmanlığında, Halime ERZEN YILDIZ tarafından sunulan “Van İlindeki Konutlarda Radon Gazının Zamana Bağlı Değişimi ve Akciğer Kanseri ile İlişkisinin Araştırılması” başlıklı bu çalışma Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili hükümleri gereğince 27/04/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile başarılı bulunmuş ve Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan:

İmza:

Üye:

İmza:

Üye:

İmza:

Üye:

İmza:

Üye:

İmza:

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun / / tarih ve sayılı kararı ile onaylanmıştır.

İmza

Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

İmza

Halime ERZEN YILDIZ



ÖZET

VAN İLİNDEKİ KONUTLARDA RADON GAZININ ZAMANA BAĞLI DEĞİŞİMİ VE AKCİĞER KANSERİ İLE İLİŞKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

ERZEN YILDIZ, Halime
Doktora Tezi, Fizik Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Nergiz YILDIZ YORGUN
Nisan 2023, 114 sayfa

Konut radonu bir halk sağlığı sorunudur. Bu nedenle insanların maruz kaldığı radyasyon dozlarının değerlendirilmesi, radon maruziyetinden kaynaklanan akciğer kanseri riskinin tahmin edilmesi radyolojik koruma açısından özel bir öneme sahiptir.

Bu tez çalışmasında Van ili merkez ilçelerindeki (Tuşba, İpekyolu, Edremit) konutlarda radon konsantrasyonlarının aylık değişimleri ve konut sakinlerinin yıllık kümülatif doz değerlerinin zamana entegre LR-115 Tip II katı hal nükleer iz dedektörleri kullanılarak belirlenmesi amaçlandı. Radon gazı ile akciğer kanseri arasındaki ilişkinin araştırılması için akciğer kanseri tanısı almış vaka grubu ve hasta olmayan kontrol grubu belirlendi. Yıllık ortalama radon konsantrasyonu vaka evleri için $68 \pm 8 \text{ Bqm}^{-3}$, kontrol evleri için $101 \pm 15 \text{ Bqm}^{-3}$ olarak hesaplandı. Her iki grup için en yüksek konsantrasyon değeri Tuşba, en düşük ise Edremit ilçesinde elde edildi. Vaka ve kontrol grubu için konsantrasyon değerleri küresel ortalama olan 40 Bqm^{-3} 'ün üzerinde bulundu. Yıllık etkin doz değeri tüm vaka ve kontrol evleri için sırasıyla ortalama 1.79 ± 0.2 ve $2.66 \pm 0.4 \text{ mSv}$ elde edildi. Bu değerler dünya ortalaması olan 1.15 mSvy^{-1} 'in üzerinde, ancak ICRP tarafından önerilen eylem seviyesinin $(3-10) \text{ mSvy}^{-1}$ altındadır. Çalışmada ayrıca; $D_{\text{eş}}$, mWL, WLM, LFR ve LCR parametreleri de hesaplandı. Elde edilen sonuçlar ICRP, WHO, UNSCEAR, EPA ve TAEK tarafından belirlenen limit değerlerle ve önceki çalışmalarla karşılaştırıldı.

Sonuç olarak Van merkez ilçeleri için konut radonu radyolojik risk oluşturmamaktadır. Radona bağlı stokastik etkilerin anlaşılması, yaşam kalitesinin iyileştirilmesi ve sürdürülmesi için gelecekteki ölçümlere ihtiyaç vardır.

Anahtar kelimeler: Akciğer kanseri, Konut, LR-115 Tip II, Radon, Van

ABSTRACT

INVESTIGATION OF TIME-DEPENDENT VARIATION OF RADON GAS AND ITS RELATIONSHIP WITH LUNG CANCER IN HOUSING IN VAN PROVINCE

ERZEN YILDIZ, Halime

Ph.D. Thesis, Department of Physics

Supervisor: Assoc. Prof. Nergiz YILDIZ YORGUN

April 2023, 114 pages

Residential radon is a public health problem. Therefore, the evaluation of radiation doses to which people are exposed and the estimation of the risk of lung cancer caused by radon exposure has special importance in terms of radiological protection.

This thesis aimed to determine the monthly variation in radon concentrations and the annual cumulative dose values of the residents in the central districts of Van (Tuşba, İpekyolu, Edremit) by using a time-integrated LR-115 Type II solid-state nuclear trace detector. To investigate the relationship between radon gas and lung cancer, the case group diagnosed with lung cancer and the non-patient control group were determined. The average annual radon concentration was calculated as $68 \pm 8 \text{ Bqm}^{-3}$ for case houses and $101 \pm 15 \text{ Bqm}^{-3}$ for control houses. The highest concentration value for both groups was obtained in Tusba and the lowest in Edremit district. The concentration values for the case and control group were found to be above the global average of 40 Bqm^{-3} . The concentration value for the control group is above 100 Bqm^{-3} , which is the limit value recommended by the WHO. The mean annual effective dose values were 1.79 ± 0.2 and $2.66 \pm 0.4 \text{ mSv}$ for all cases and control homes. These values are above the world average of 1.15 mSvy^{-1} , but below the action level $(3-10) \text{ mSvy}^{-1}$ recommended by the ICRP. Also in the study; D_{eq} , mWL, WLM, LFR and LCR parameters were also calculated. The results obtained were compared with the limit values determined by ICRP, WHO, UNSCEAR, EPA and TAEK and previous studies.

As a result, residential radon does not pose a radiological risk for the central districts of Van. Future measurements are needed to understand radon-induced stochastic effects and to improve and maintain quality of life.

Keywords: LR-115 Type II, Lung cancer, Radon, Residential, Van



TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında, her türlü ilgi ve yardımlarını esirgemeyen danışmanım Sayın Doç. Dr. Nergiz YILDIZ YORGUN'a teşekkür ederim. Akademik olarak bana yol gösteren Sayın Prof. Dr. Harun AKKUŞ'a, laboratuvar analizlerinde ve istatistik hesaplamalarda bana destek veren Dr. Mehmet TARAKÇI'ya teşekkür ederim. Ayrıca sağlık bilgilerinden faydalandığım ve hastaneden hasta bilgilerini almamı kabul ederek bu çalışmayı gerçekleştirmemde yardımcı olan Van YYÜ Tıp Fakültesi öğretim üyeleri Prof. Dr. Ramazan ESEN ve Doç. Dr. Selami EKİN'e teşekkür ederim. Akademik bilgilerinden yararlandığım tez izleme jüri üyesi Dr. Öğr. Üyesi Ömer Faruk ÖZDEMİR'e teşekkür ederim. Laboratuvar tecrübeleri ve kimya bilgileri ile çalışmama destek veren Dr. Öğr. Üyesi Ali Rıza KUL'a teşekkür ederim. Bu tez çalışmasında beni destekleyen ve bazı istatistiksel katkılarından dolayı Doç. Dr. Canan DEMİR'e teşekkür ederim.

Bu çalışmanın yapılmasını destekleyen Van YYÜ Girişimsel olmayan Klinik Araştırmalar Etik Kurul (Karar No:2019/08-04) üyelerine ve projeyi kabul ederek destekleyen Van YYÜ Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Başkanlığına (Proje No: FDK-2019-8412) teşekkür ederim.

Ayrıca çalışmanın gerçekleşmesine katkı sağlayan ve evlerine beni kabul eden sevgili konut sahiplerine misafirperverliklerinden dolayı minnettarım. Yine bu uzun çalışma sürecinde beni hiç yalnız bırakmayan yeğenim Tıp Mühendisi Merve KAYAR'a teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca eşim Adnan YILDIZ, kızlarım Elif Aze ve İkra Gazel YILDIZ'a göstermiş oldukları sabırdan dolayı çok teşekkür ederim.

2023

Halime ERZEN YILDIZ



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	I
ABSTRACT	III
TEŞEKKÜR	VII
İÇİNDEKİLER.....	IX
ÇİZELGELER LİSTESİ.....	XIII
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	XV
SİMGELER VE KISALTMALAR	XIX
EKLER DİZİNİ	XXI
1. GİRİŞ	1
1.1 Genel Bilgiler	1
1.2 Radyasyon ve Çeşitleri	3
1.2.1 İyonize Radyasyon (IR)	3
1.2.1.1 Elektromanyetik Radyasyon	3
1.2.1.2 Partiküler Radyasyon	5
1.2.2 Non-iyonize Radyasyon (NIR)	6
1.3 Radyoaktivite.....	6
1.3.1 Radyoaktif Bozunma Kanunu	6
1.3.1.1 Peş Peşe Bozunum ve Radyoaktif Denge	8
1.3.2 Fiziksel Yarı Ömür ($t_{1/2f}$).....	12
1.3.3 Ortalama Yarı Ömür (τ)	12
1.3.4 Biyolojik Yarı Ömür ($t_{1/2b}$).....	13
1.3.5 Efektif Yarı Ömür ($t_{1/2e}$).....	13
1.4 Radyoaktif Bozunum Türleri.....	13
1.4.1 Alfa (α) Bozunumu	13
1.4.2 Beta (β) Bozunumu	16
1.4.2.1 Negatron (β^-) Bozunumu.....	16
1.4.2.2 Pozitron (β^+) Bozunumu	17
1.4.2.3 Elektron Yakalama.....	17
1.4.3 Gama (γ) Bozunumu	18
1.5 Radyasyon Doz Birimleri	18
1.6 ICRP Doz Sınırlama İlkeleri	21
1.7 Radyasyon Maruziyetini Azaltmak İçin Temel Önlemler.....	22
1.8 İyonize Radyasyonun Biyolojik Etkileri	24
1.8.1 İyonize Radyasyonun Hücresel Boyutta Etkisi.....	25
1.8.2 İyonize Radyasyonun DNA Hasarı	26

1.8.2.1	Direkt etki	26
1.8.2.2	İndirekt etki	27
1.8.3	Radyasyon ve Hücre Döngüsü	28
1.8.4	Radyasyon Dozu ve Biyolojik Etki Arasındaki İlişki	29
1.8.4.1	Eşikli Doz-Etki Bağıntısı (Nonstokastik ya da Deterministik Etki) 29	
1.8.4.2	Eşiksiz Doz-Etki Bağıntısı (Stokastik Etki).....	30
1.8.4.3	Radyasyonun Somatik ve Genetik Etkileri	30
1.9	Doğal Radyoaktif Bozunma Serileri	31
1.9.1	Uranyum Serisi (^{238}U).....	31
1.9.2	Toryum Serisi (^{232}Th).....	32
1.9.3	Aktinyum Serisi (^{235}U).....	33
1.9.4	Neptünyum Serisi (^{237}Np)	34
1.10	Radyum (^{226}Ra)	35
1.11	Radon (^{222}Rn) ve Bozunum Ürünleri	36
1.12	Radon İçin Özel Birimler	39
1.12.1	Potansiyel Alfa Parçacık Enerji Konsantrasyonu (PAEC)	39
1.12.2	Çalışma Düzeyi (Working Level, WL) ve Denge Faktörü (F)	39
1.12.3	Aylık Çalışma Düzeyi (Working Level Month, WLM)	40
1.13	İç Mekan Radon Seviyelerini Belirlemedeki Faktörler.....	41
1.13.1	Jeolojik Faktörler	41
1.13.2	Konut Özellikleri.....	43
1.14	Radon Maruziyeti ve Akciğer Kanseri İlişkisi	45
1.14.1	Akciğer Kanseri	45
1.14.2	Radon ve Akciğer Kanseri ilişkisi.....	47
1.15	Radonun Limit Değerleri.....	50
1.16	Katıhal Nükleer İz Kazıma Dedektörleri (SSNTDs).....	51
1.16.1	LR-115 Tip 2 Filmlerin Özellikleri.....	51
1.16.2	İz Oluşumu ve Kimyasal Kazıma	52
1.16.3	LR-115 dedektörlerinin kalibrasyonu	55
2.	KAYNAK BİLDİRİŞLERİ	57
3.	MATERYAL VE YÖNTEM.....	65
3.1	Çalışma Bölgesinin Tanıtılması	65
3.2	Vaka ve Kontrol Grubu Adreslerin Belirlenmesi.....	67
3.3	LR-115 Plastik Filmlerin Hazırlanması ve Konutlara Yerleştirilmesi	69
3.4	Kimyasal Kazıma İşlemi	71
3.5	İz Sayma İşlemi	72
3.6	Radyolojik Etkilerin Hesaplanması.....	73
3.6.1	İç Mekan Radon Konsantrasyonunun Hesaplanması.....	73

3.6.2	Yıllık Etkin Doz (D_{etkin})	74
3.6.3	Akciğer için Yıllık Etkin Eşdeğer Doz ($D_{\text{eş}}$).....	74
3.6.4	Çalışma Düzeyi (WL) ve Aylık Çalışma Düzeyi (WLM)	75
3.6.5	Yaşam Boyu Ölüm Riski (LFR) ve Kanser Riski (LCR).....	75
3.7	İstatistik Değerlendirme	75
4.	BULGULAR VE TARTIŞMA	77
4.1	Vaka ve Kontrol Grubuna Ait Anket Verilerinin ve Hasta Dosyalarındaki Bilgilerin Değerlendirilmesi	77
4.2	Evlerde Radon Konsantrasyonu	80
4.2.1	Konut Özelliklerine göre Radon Konsantrasyonu	90
4.2.2	Jeolojik ve Meteorolojik Faktörlere Bağlı Radon Konsantrasyonu	93
4.3	Radyolojik Parametrelerin Hesaplanması	96
5.	SONUÇ VE ÖNERİLER	101
	KAYNAKLAR.....	105
	EKLER	115
	ÖZ GEÇMİŞ.....	119



ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 1.1 Radyasyon ağırlık faktörleri	20
Çizelge 1.2 Doku ağırlık faktörleri.....	20
Çizelge 1.3 ICRP tarafından tavsiye edilen doz sınırları.....	22
Çizelge 1.4 Radonun bazı fiziksel özellikleri.....	37
Çizelge 1.5 Radon kızlarının aktivite ve atom başına potansiyel alfa enerjisi	38
Çizelge 1.6 Konutlarda 200 Bqm – 3 ve 600 Bqm – 3 eylem seviyeleri için yıllık maruziyet	50
Çizelge 1.7 Radon konsantrasyon limitleri (Bqm ⁻³).....	50
Çizelge 1.8 Farklı dedektör tipleri için iz kazıma koşulları.....	51
Çizelge 3.1 Çalışma kapsamındaki konutların konumları.....	68
Çizelge 4.1 Vaka ve kontrol grubunun demografik özellikleri	78
Çizelge 4.2 Vaka ve kontrol grubunun konut özellikleri.....	79
Çizelge 4.3 Vaka evlerine ait aylık net iz yoğunluğu ve ortalama radon konsantrasyonu	81
Çizelge 4.4 Kontrol evlerine ait aylık net iz yoğunluğu ve ortalama radon konsantrasyonu	83
Çizelge 4.5 Konut radon konsantrasyonunun Türkiye ve dünyanın farklı yerlerinde yapılan çalışmalar ile karşılaştırılması.....	86
Çizelge 4.6 Vaka evlerine ait hesaplanan radyolojik parametreler	97
Çizelge 4.7 Kontrol evlerine ait hesaplanan radyolojik parametreler	98



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1 Elektromanyetik Spektrum (Özkan, 2016).....	4
Şekil 1.2 Radyoaktifliğin zamana göre değişimi (Krane, 1988).....	7
Şekil 1.3 ^{226}Ra 'un alfa bozunumu (Başaran, 2019).....	14
Şekil 1.4 ^{226}Ra 'un bozunum şeması (Martin, 2013).....	15
Şekil 1.5 Negatron bozunumu (Barınmaz, 2009).....	16
Şekil 1.6 Pozitron bozunumu (Barınmaz, 2009).....	17
Şekil 1.7 Elektron yakalama.....	18
Şekil 1.8 Radyasyondan korunmada zırhlama, mesafe ve zaman (Al, 2019).....	23
Şekil 1.9 Farklı iyonize radyasyon türlerinin penetrasyonu (Açıkgöz, 2018).....	24
Şekil 1.10 Radyasyonun direkt ve indirekt etkisi (Becerir, 2018).....	27
Şekil 1.11 Radyasyonun hücre üzerindeki biyolojik etkisi (Öztek, 2017).....	27
Şekil 1.12 Hücre döngüsü.....	28
Şekil 1.13 a. Eşikli doz-etki bağıntısı (Sigmoid eğri) b. Eşiksiz doz-etki bağıntısı (Lineer etki).....	30
Şekil 1.14 Radyasyonun Biyolojik Etkisi (Silsüpür ve Sakarya, 2015).....	31
Şekil 1.15 Uranyum (^{238}U) un bozunum şeması (Tosaka, 2008).....	32
Şekil 1.16 Toryum (^{232}Th)'un bozunum şeması (Tosaka, 2008).....	33
Şekil 1.17 Aktinyum (^{235}U)'un bozunum şeması (Tosaka, 2008).....	34
Şekil 1.18 Neptünyum (^{237}Np)'un bozunum şeması (Tosaka, 2008).....	35
Şekil 1.19 Doğal radyasyon kaynakları ve yıllık etkin doza katkısı.....	36
Şekil 1.20 Radon kaynakları (Örgün ve Çelebi, 2015).....	37
Şekil 1.21 ^{222}Rn 'un bozunma ürünleri (Kendall ve Smith, 2002).....	38
Şekil 1.22 Topraktaki radon geçirgenliği.....	42
Şekil 1.23 Radonun evlere giriş yolları (Cabi Değerli ve Umaroğulları, 2017).....	43
Şekil 1.24 İnsan solunum sistemi (Bilgial, 2019).....	48
Şekil 1.25 LR115'in kimyasal formülü (Selüloz Nitrat) (Mehta vd., 2013).....	51
Şekil 1.26 LR-115 dedektörünün şeması (Mehta vd., 2013).....	52
Şekil 1.27 Yüklü parçacıkların içinden geçtikleri polimerin molekül zincirlerini kırması	52

Şekil 1.28 Polimer dedektörlerde gizli iz oluşumunu açıklamak için Huygens kuralının uygulanması.....	53
Şekil 1.29 Kritik açı.....	54
Şekil 1.30 Kimyasal kazıma süresince izlerde oluşan faz değişimleri	54
Şekil 3.1 Van gölü çevresindeki volkanik dağlar (Google Earth)	66
Şekil 3.2 Van ili haritası ve çalışma alanı (AFAD, 2023)	66
Şekil 3.3 Vaka ve kontrol evlerine ait konumlar	68
Şekil 3.4 Filmlerin kesilmesi ve bardak tabanlarına yerleştirilmesi.....	70
Şekil 3.5 a. Plastik bardakların folyo ile kaplanması. b. Filmlerin oda içindeki yerleşimi	70
Şekil 3.6 NaOH çözeltisinin hazırlanması ve filmlerin banyo işlemi	71
Şekil 3.7 Filmlerin durulanması ve kurutulması.....	72
Şekil 3.8 Filmlerin lamaların arasına yerleştirilmesi.....	72
Şekil 3.9 Filmleri görüntülemeye kullanılan Euromex optik mikroskop (IS.1153-PLi)	73
Şekil 3.10 Farklı iki konuta ait LR-115 dedektör görüntüsü	73
Şekil 4.1 a. Vaka evlerinin ilçelere göre dağılımı b. Kontrol evlerinin ilçelere göre dağılımı	77
Şekil 4.2 Vaka ve kontrol evlerinin aylık radon konsantrasyon dağılımı.....	80
Şekil 4.3 Vaka ve kontrol evlerinin yıllık ortalama radon konsantrasyonu.....	85
Şekil 4.4 Mevsimlere göre radon konsantrasyonu.....	87
Şekil 4.5 Merkez ilçelerin ortalama radon konsantrasyonları	88
Şekil 4.6 a. Vaka evlerinin yıllık ortalama doz dağılımı b. Kontrol evlerinin yıllık ortalama doz dağılımı	89
Şekil 4.7 Tüm konutlar için yıllık radon konsantrasyon frekans dağılımı.....	90
Şekil 4.8 Radon konsantrasyonunun konut yaşına göre dağılımı.....	90
Şekil 4.9 Radon konsantrasyonunun konut tipine göre dağılımı	92
Şekil 4.10 Oturma yılına göre ortalama radon konsantrasyonları	92
Şekil 4.11 Eylül 2021-Ağustos 2022 arasındaki aylık deprem sayısı.....	93
Şekil 4.12 Aylık ortalama radon konsantrasyonlar.....	94
Şekil 4.13 Aylık ortalama sıcaklık değerleri	94
Şekil 4.14 Aylık ortalama rüzgar hızı.....	95
Şekil 4.15 Aylık ortalama nispi nem	95

Şekil 4.16 Aylık yağışlı gün sayısı ve yağış miktarı	96
--	----





SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamalarıyla aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
A	Aktivite
α	Alfa parçacığının simgesi
β	Beta parçacığının simgesi
Bq	Becquerel
Ci	Curie
F	Denge Faktörü
g	Gün
Gy	Soğurma doz birimi (Gray)
γ	Gama ışınının simgesi
h	Saat
J	Joule
θ_c	Kritik açı
l	Litre
λ	Bozunma sabiti
μCi	Mikrokuri
μm	Mikrometre
ν	Nötrino
pCi	Pikoküri
R	Röntgen
Rad	Soğurma doz birimi
Rem	Eşdeğer doz birimi
s	Saniye
Sv	Sievert
τ	Ortalama ömür

Kısaltmalar**Açıklama**

ALARA	As Low As Reasonably Achievable
AFAD	Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı
BEIR	Biological Effects of Ionizing Radiation
EEC	Equilibrium Equivalent Concentration
EPA	United States Environmental Protection Agency
IARC	International Cancer Research Agency
ICRP	International Commission on Radiological Protection
IR	İyonize Radyasyon
keV	kiloelektronvolt
KHAK	Küçük Hücreli Akciğer Kanseri
KHDAK	Küçük Hücre Dışı Akciğer Kanseri
LET	Lineer Enerji Transferi
LEAR	Yaşam boyu aşırı mutlak risk
MeV	Megaelektronvolt
NIR	Non-iyonize radyasyon
PAEC	Potansiyel alfa parçacık enerji konsantrasyonu
SSNTD	Katıhal Nükleer İz Kazıma Dedektörü
TAEK	Türkiye Atom Enerji Kurumu
$t_{1/2b}$	Biyolojik Yarı Ömür
$t_{1/2e}$	Efektif Yarı Ömür
$t_{1/2f}$	Fiziksel Yarı Ömür
UNSCEAR	United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation
WHO	Dünya Sağlık Örgütü
WL	Working Level
WLM	Working Level Month
W_R	Radyasyon ağırlık faktörü
W_T	Doku ağırlık faktörü

EKLER DİZİNİ

	Sayfa
Ek 1. Binalarda Radon Araştırması Bilgi Formu	115
Ek 2. Etik Kurul Onay Belgesi	117





1. GİRİŞ

1.1 Genel Bilgiler

İnsanlar yaşamları boyunca doğal radyasyon kaynaklarından yayınlanan farklı tipteki radyasyona (alfa, beta, gama) ve nükleer silah denemeleri, radyoaktif atıklar ile reaktör kazalarından kaynaklanan yapay radyasyona maruz kalmaktadır. Doğal radyasyon kaynaklarını, uranyum (^{238}U), toryum (^{232}Th) serilerindeki radyonüklidler ve potasyum (^{40}K) ile trityum (^3H), berilyum (^7Be), karbon (^{14}C) vb. kozmik radyonüklidler oluşturmaktadır (Can, 2011). Bu radyonüklidler, yer kabuğu kökenli malzemelerde (kaya, toprak, kil, granit vb.) ve bu malzemelerin kullanıldığı yapı malzeme ürünlerinde (beton, tuğla, briket, seramik vb.), suda, toprakta yetişen gıda ürünlerinde, bulundukları bölgenin jeokimyasal özelliğine bağlı olarak farklı miktarlarda bulunmaktadır. İnsanlar bu radyonüklidlerden kaynaklanan radyasyona dışsal ve içsel olarak maruz kalmaktadırlar (Akyürek, 2017). Doğal radyoaktiviteden dolayı insanların maruz kaldığı yıllık etkin doz UNSCEAR (Birleşmiş Milletler Atomik Radyasyonun Etkileri Bilimsel Komitesi) raporuna göre 2.4 mSv'dir ve bunun yaklaşık yarısı radon (^{222}Rn), toron (^{220}Rn) ve bunların kısa ömürlü aktif katı ürünlerinden gelir. ^{222}Rn , uranyum (^{238}U) doğal serisinde yer alan radyoaktif bir soy gazdır ve radyumun (^{226}Ra) bozunum ürünüdür (Çelebi vd., 2015). Bir bölgedeki radon potansiyeli; o bölgedeki kaya ve topraktaki uranyum ve radyum içeriği, gözeneklilik, geçirgenlik ve nem içeriği gibi özelliklerin yanı sıra meteorolojik ve mevsimsel değişikliklerin bir sonucu olabilir. Radonun kuru toprakta bozunmadan önceki difüzyon uzunluğu yaklaşık 1.6 m'dir. Radonun bu özelliği onu sağlık açısından daha tehlikeli bir gaz haline getirir. Konut içindeki hava basıncı, altında yer alan toprağın hava basıncından genellikle daha düşüktür. Bu nedenle toprak ve kayadan çıkan radon gazı, binaların temellerinden, bodrum katlarından, borularından konut içine sızar (Verma ve Khan, 2014). Bina tasarımının yanı sıra yapı malzemelerinin ve havalandırma sistemlerinin seçimi iç mekan radon seviyelerini etkiler (UNSCEAR 1988). Radon 3.82 günlük yarı ömre sahip olduğundan akciğerlerde bozunma olasılığı düşüktür. Bu yüzden, bozunmadan önce solunum sürecinde ekshalere edilebilir. Radonun kısa ömürlü bozunma ürünleri olan ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi ve ^{214}Po radyoaktif izotoplardır ve kendilerini aerosol partiküllerine bağlarlar. Bu yavru ürünler inhale edildiğinde buradaki

"mukus" tabakasında takılı kalırlar ve akciğerlere yerleşebilirler. Bozunum sürecinde çevre dokularda büyük miktarda radyasyon enerjisi biriktirirler ve sonuçta biyolojik hasara neden olurlar (Verma ve Khan, 2014). UNSCEAR, solunan radon ve bozunum ürünlerinin akciğer için kanserojen olduğu sonucuna varmıştır. Uluslararası Kanser Araştırmaları Ajansı (IARC) 1988 raporu, radonu tütün dumanı, asbest ve benzen ile aynı grupta yer alan kanıtlanmış bir insan kanserojeni olarak sınıflandırmıştır. Radon ve nesline maruziyete bağlı akciğer kanseri ile ilgili dozimetrik ve epidemiyolojik araştırmalar yapılmış olmasına rağmen, büyük belirsizlikler rapor edilmiştir (UNSCEAR 2019). Uluslararası Radyolojik Koruma Komisyonu (ICRP) tarafından evlerdeki radon konsantrasyonu için tavsiye edilen değer yılda 200-600 Bqm⁻³ dür. İç mekan radon konsantrasyonu için üst limit değeri, ICRP tarafından 400 Bqm⁻³, Avrupa Birliği tarafından 400 Bqm⁻³ ve Dünya Sağlık Örgütü (WHO) tarafından 100 Bqm⁻³ olarak kabul edilmiştir. Türkiye Atom Enerji Kurumu (TAEK) Radyasyon Güvenliği Yönetmeliği, Türkiye'de müsaade edilebilir radon konsantrasyonunu, evlerde 400 Bqm⁻³ olarak belirlemiştir. 400 Bqm⁻³'lük değerde akciğer kanseri meydana gelme riski %6'dır. Bu risk sigara kullanımı ile 10-20 kat kadar artabilmektedir (Can, 2011; ICRP, 1987; 1993). İnsanlar yaşamlarının %80'ini evde geçirdikleri için konutlardaki radon ölçümleri ve orada yaşayan insanların maruz kaldığı radyasyon dozlarının değerlendirilmesi, olası risk tahminlerini belirlemek ve radyolojik önlemler alınabilmesi açısından özel bir öneme sahiptir. Buna göre, radon maruziyetinin bir halk sağlığı sorunu olarak ele alınmasına hem mesleki hem de konut ortamlarında radon maruziyetinden kaynaklanan akciğer kanseri riskinin tahmin edilmesine büyük ilgi vardır.

Bu bilgiler ışığında Van ili merkez ilçelerindeki (Tuşba, İpekyolu, Edremit) konutlarda radon konsantrasyonlarının aylık değişimleri ve bu konut sakinlerinin maruz kalacağı yıllık etkin doz eşdeğerlerinin zamana entegre LR-115 Tip II katı hal nükleer iz dedektörleri kullanılarak belirlenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca radon gazı ile akciğer kanseri arasındaki ilişkinin araştırılması için akciğer kanseri tanısı almış hasta grubu ve hasta olmayan kontrol grubu belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar WHO, UNSCEAR, Amerika Çevre Koruma Ajansı (EPA) ve TAEK tarafından belirlenen limit değerlerle ve önceki çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

1.2 Radyasyon ve Çeşitleri

Radyasyon, enerjinin parçacık ya da elektromanyetik dalga şeklinde yayılmasıdır. Yapısal olarak iki çeşit radyasyon vardır. Bunlar “parçacık” ve “dalga” tipi radyasyonlardır. Parçacık radyasyonu; belli bir kütle ve enerjiye sahiptir. Dalga tipi radyasyon ise belli bir enerjiye sahip ancak kütsüz radyasyon çeşididir. Bütün dalga tipi radyasyonlar ışık hızıyla (3×10^8 m/s) hareket ederler. Parçacık ve dalga tipi radyasyonlar da madde ile yaptıkları etkileşime göre yine iki gruba ayrılırlar. Bunlar, “iyonize” ve “non-iyonize” radyasyonlardır.

1.2.1 İyonize Radyasyon (IR)

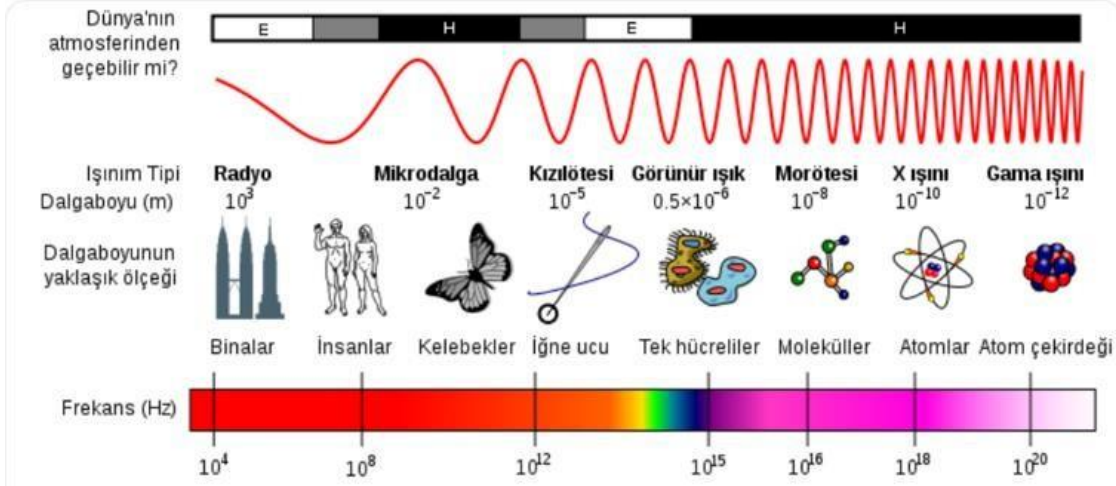
Söz konusu radyasyon bir atomun çevresindeki elektronlara çarparak enerjilerini elektronlara aktardıklarında (enerjileri, eşik enerji miktarı olan 12.4 eV’den büyükse) elektronları yörüngelerinden koparıp serbest hale geçmesine neden oluyorsa bu olaya iyonizasyon, bunu sağlayan radyasyona ise iyonize radyasyon denir (Atakan, 2014). Bu durumda elektronunu kaybeden atom pozitif iyon, elektronu alan atom ise negatif iyon haline gelir. Havada bir iyon çifti üretmek için gerekli ortalama enerji 33.97 eV olarak kabul edilir (Yülek, 1992). İki tip iyonize radyasyon vardır:

1.2.1.1 Elektromanyetik Radyasyon

Gama Işını (γ)

Gama Işını (γ), elektromanyetik spektrumdaki en kısa dalga boylu ışınlarıdır (Şekil 1.1). Yüksüz oldukları için elektrik ve manyetik alanda sapmaya uğramazlar. γ ışınları, atom çekirdeğinin enerji seviyelerindeki farklılıklardan meydana gelir. Çekirdek, bir radyoaktif bozunum (α , β parçacığı gibi) yaptıktan sonra genellikle tam kararlı hale geçmez. Fazla kalan enerjisini elektromanyetik radyasyon olarak yayınlar. Böylece çekirdek daha düşük enerji seviyesine ve sonunda taban seviyesine düşer. Çekirdeğin uyarılmış enerji seviyesinden taban seviyeye düşerken yayınladığı fotonlara gama ışını denir. Gama ışınları elektromanyetik spektrumda en yüksek enerji düzeyine

sahiptir. γ ışınlarının enerjileri tipik olarak 0.01-10 MeV arasında olup çekirdek durumları arasındaki enerji farkı mertebesinde. Yüksek enerjilerinden dolayı madde içerisinde ve canlı içinde yol alabilir ve hasar oluşturabilir. Gama ışınını durdurmak için kalın beton ya da kurşun bloklar kullanmak gerekir (Krane, 1988; Gelgün, 2010; Bora, 2001).



Şekil 1.1 Elektromanyetik Spektrum (Özkan, 2016)

X-Işını

X-ışınları, elektromanyetik spektrumunda 0.1-100 Å (10^{-11} - 10^{-8} m) dalga boyu aralığında mor ötesi bölgede yer alır (Şekil 1.1). Enerjileri 0.1-100 keV aralığındadır. X-ışınları, yüklü parçacıkların atomun yörüngesindeki elektronlarla veya atom çekirdeğinin elektrik alanı ile etkileşimleri sonucunda oluşur. Hedef atom üzerine gönderilen yüklü parçacıkların atomun yörüngesindeki elektronlarla etkileşmesi sonucu elektronlar üst enerji seviyelerine çıkabilirler. Oluşan elektron boşluklarına üst enerji seviyelerinden elektron doldurulması esnasında iki yörünge arasındaki enerji farkına eşit enerjide foton yayınlanır. Bu fotonlara karakteristik X-ışınları denir. Sürekli X-ışını ise hızlandırılmış elektronların, hedef atomun coulomb alanı içinde kademeli olarak ivmelenmeleri sonucu yayınladıkları elektromanyetik dalgalarıdır (bremsstrahlung veya frenleme ışını). (Çetingöz vd., 2013).

1.2.1.2 Partiküler Radyasyon

Alfa (α) Işını

İki proton ve iki nötrondan oluşan alfa parçacıkları pozitif yüklüdür. Çift pozitif yükleri nedeniyle iyonlaştırma gücü yüksektir, ancak büyük kütlelerinden dolayı penetrasyon yeteneği azdır. Enerjileri 3-10 MeV aralığında olup havadaki menzilleri 2-10 cm'dir. Daha yoğun materyallerde bu oran daha düşüktür ve bir kâğıt parçası ile durdurulabilir. İnsan derisinden geçemediği için external bir tehlike oluşturmaz. Fakat inhalasyonla ya da yiyeceklerle vücuda alındığında önemli ölçüde doku hasarına neden olur (Gelgün, 2010; Martin, 2013; Bora, 2001).

Beta (β) Işını

Negatif yüklü (negatron) veya pozitif yüklü (pozitron) olabilen beta parçacığı bir atomun çekirdeğinden yayınlanır. Alfa ışınına göre enerjisi daha düşük (1-3 MeV), penetrasyon yeteneği daha yüksektir. β ışınının havadaki menzili 0-10 m, yoğun malzemelerde ise sadece birkaç milimetredir. Bir metal levha β ışını durdurmak için yeterlidir. Yeterli enerjiye sahip olduğundan internal ve external olarak tehlikelidir (Martin, 2013; Bora, 2001).

Nötron

Nötron, berilyumun alfa parçacıkları ile bombardımanı sonucunda keşfedilmiştir. Yüksüzdür ve sadece hedef atomun çekirdeği ile etkileşime girebilir. Bir nötronun menzili başlangıç enerjisine, maruz kaldığı çarpışmaların sayısına ve çarpışma türüne bağlıdır. Enerjisi 1 MeV'in üzerinde olan nötrona hızlı nötron denir. Hızlı nötronların soğurulması pratik olarak imkansızdır, bu nedenle hızlı bir nötronu durdurmak için önce enerjisi 0.025 eV'den daha düşük bir termal nötron seviyesine düşürülmelidir. Daha sonra bu termal nötron uygun malzemelerle absorbe edilir. Geleneksel olarak nötron zırhlaması için su ve parafin gibi hidrojen açısından zengin malzemeler kullanılır. Nötronlar diğer

iyonize radyasyon türlerine kıyasla daha yüksek bir radyobiyojik etkiye ve doz ağırlıklandırma faktörüne sahiptir (Martin, 2013; Çetingöz vd., 2013).

1.2.2 Non-iyonize Radyasyon (NIR)

NIR'lar, maddeden geçerken yüklü iyonlar üretmek yerine, yalnızca uyarma için yeterli enerjiye sahiptirler. Ultraviyole, görünür ışık, kızıl ötesi, mikrodalga, radyo dalgaları bu grupta yer alır (Şekil 1.1). NIR doğal kaynaklı (güneş ışığı veya yıldırım deşarjları vb.) olmanın yanı sıra insan yapımı (kablosuz iletişimde, endüstriyel, bilimsel ve tıbbi uygulamalar gibi) da olabilir. NIR türlerine hem akut hem de kronik maruz kalmanın etkilerinin ciddiyeti hakkında belirsizlik mevcuttur (Ng, 2003).

1.3 Radyoaktivite

Kararsız çekirdeklerin parçacık ve/veya elektromanyetik radyasyon yayınlarak bozunması olayına *radyoaktif bozunma*, yayınlanan ışın veya parçacıklara da *nükleer radyasyon* adı verilir. Bir çekirdeğin kararsız bir yapıya sahip olması çekirdekte bulunan N/Z ile ilişkilidir. Bozunum doğadaki radyoizotoplardan kaynaklanıyorsa buna doğal radyoaktivite, insan tarafından yapay olarak reaktörlerde veya hızlandırıcılarda gerçekleştiriliyorsa buna da yapay radyoaktivite adı verilir (Kapdan, 2009; Gelgün, 2010).

1.3.1 Radyoaktif Bozunma Kanunu

N sayıda radyoaktif atom olduğu kabul edilirse, dt zaman aralığında dN kadar atom bozunmaya uğrayacaktır. Bozunan dN atomu, başlangıçtaki N radyoaktif atom sayısı, geçen dt zamanı ve bozunma sabiti λ ile de orantılı olacaktır (Yülek, 1992):

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (1.1)$$

Burada (-) işareti dt'nin artışıyla N'in azalışını gösterir. (1.1) eşitliği radyoaktif bozunmanın temel bağıntısıdır. Bozunma sabiti (λ) bir atomun birim zaman içinde

bozunma olasılığıdır ve birimi s^{-1} , dak^{-1} , h^{-1} ve y^{-1} 'dir. Her radyoaktif element için sabit bir bozunma sabiti vardır ve zamandan bağımsızdır. $t=0$ anında N_0 sayıda radyoaktif atom olduğu ve t zaman sonra N sayıda radyoaktif atom olduğu kabul edilirse, (1.1) bağıntısının integrali bozunmamış radyoaktif atomların sayısını verir ve Eşitlik 1.2 ve 1.3'deki gibi yazılır:

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = \int_0^t -\lambda \cdot dt \quad (1.2)$$

$$N = N_0 e^{-\lambda \cdot t} \quad (1.3)$$

(1.3) eşitliğinin her iki tarafı λ bozunma sabiti ile çarpılırsa aktivite denklemi elde edilir:

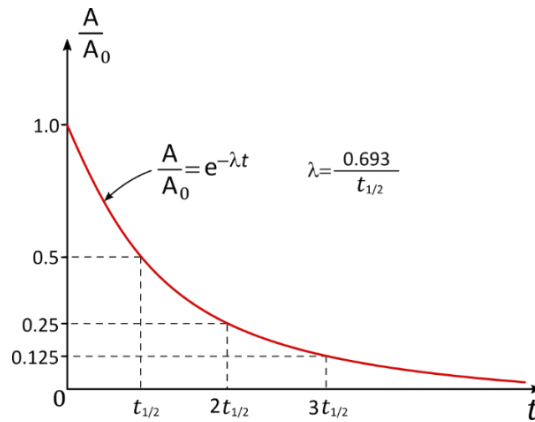
$$\lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda \cdot t} \quad (1.4)$$

Burada λN birim zamandaki bozunma sayısını verir ve *aktivite* olarak adlandırılır.

Aktivite A ile gösterilir ve birimi bozunma/s'dir. Eşitlik 1.4 aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (1.5)$$

Burada A ve A_0 sırasıyla radyoizotopun t ve $t=0$ anındaki aktivitesini gösterir. Eşitlik 1.5 radyoaktivitenin eksponansiyel olarak azaldığını gösterir (Şekil 1.2).



Şekil 1.2 Radyoaktifliğin zamana göre değişimi (Krane, 1988)

1.3.1.1 Peş Peşe Bozunum ve Radyoaktif Denge

Radyoaktif bozunum sonucu oluşan ürün çekirdek kararlı ise olay tek kademelidir. Şayet yeni çekirdek de kararsız ise, o da bozunacağı için bu kez olay iki kademeye uzar. Bu nedenle $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \dots$ devam eden radyoaktif bozunum zincirleri vardır. Bozunum zincirinde ilk çekirdeğe ana (N_1), onun oluşturduğu çekirdeğe kız (N_2) ve kızın oluşturduğu çekirdeğe torun (N_3) denir. $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$ olan bir bozunumun oluştuğu kabul edilirse:

$$N_1 \xrightarrow{\lambda_1} N_2 \xrightarrow{\lambda_2} N_3 \quad (t=0'da \ N_1=N_{10} \ N_2=N_{20}=0 \ N_3=N_{30}=0) \quad (1.6)$$

yazılabilir. Burada N_{10} , N_{20} ve N_{30} zaman başlangıcında ana, kız radyonüklidlere ait çekirdeklerin sayılarıdır. Kararlı nüklidin oluşumunun denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir (Martin, 2013):

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 \cdot N_1 \quad (1.7)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 \cdot N_1 - \lambda_2 \cdot N_2 \quad (1.8)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = \lambda_2 \cdot N_2 \quad (1.9)$$

Bu diferansiyel denklemlerin integrasyonundan radyoaktif bozunum için aşağıdaki ifadeler elde edilir. Eşitlik 1.7'in çözümünden aşağıdaki ifadeler elde edilir:

$$\int \frac{dN_1}{N_1} = - \int \lambda_1 dt \quad (1.10)$$

$$\ln N_1 = -\lambda_1 t + C_1 \quad C_1 = \ln N_{10} \quad (1.11)$$

$$\ln \frac{N_1}{N_{10}} = -\lambda_1 t \quad (1.12)$$

$$N_1 = N_{10} e^{-\lambda_1 t} \quad (1.13)$$

Eşitlik 1.8'nin çözümünden aşağıdaki ifadeler elde edilir:

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_{10} e^{-\lambda_1 t} - \lambda_2 N_2 \quad (1.14)$$

$$\frac{dN_2}{dt} + \lambda_2 N_2 = \lambda_1 N_{10} e^{-\lambda_1 t} \quad (1.15)$$

Eşitlik 1.15'da her iki taraf $e^{-\lambda_2 t}$ ile çarpılırsa Eşitlik 1.16 elde edilir:

$$\frac{dN_2}{dt} e^{-\lambda_2 t} + \lambda_2 N_2 e^{-\lambda_2 t} = \lambda_1 N_{10} e^{-\lambda_1 t} e^{-\lambda_2 t} \quad (1.16)$$

$$\int \frac{dN_2}{dt} (N_2 e^{\lambda_2 t}) dt = \int \lambda_1 N_{10} e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t} dt \quad (1.17)$$

$$N_2 e^{\lambda_2 t} = \lambda_1 N_{10} \frac{e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t}}{\lambda_2 - \lambda_1} + C_1 \quad (1.18)$$

Eşitlik 1.18'de $t=0$ da $N_2=N_{20}=0$ uygulanırsa C_1 değeri aşağıdaki gibi bulunur:

$$C_1 = -\frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} \quad (1.19)$$

Eşitlik 1.19 değeri Eşitlik 1.18'de yerine konulursa aşağıdaki eşitlikler elde edilir:

$$N_2 e^{\lambda_2 t} = \lambda_1 N_{10} \frac{e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t}}{\lambda_2 - \lambda_1} = -\frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} \quad (1.20)$$

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \quad (1.21)$$

Eşitlik 1.9'nin çözümünden aşağıdaki ifadeler elde edilir:

$$\int dN_3 = \int \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) dt \quad (1.22)$$

$$N_3 = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} \frac{e^{-\lambda_1 t}}{\lambda_1} - \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} \frac{e^{-\lambda_2 t}}{\lambda_2} + C_2 \quad (1.23)$$

Eşitlik 1.23’de $t=0$ da $N_3=N_{30}=0$ yazılırsa $C_2 = N_{10}$ olur ve aşağıdaki eşitlik elde edilir:

$$N_3 = N_{10} \left(1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_2 t} - \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_1 t} \right) \quad (1.24)$$

$t = 0$ da $N_{20} \neq 0$ ve $N_{30} \neq 0$ ise N_1 , N_2 ve N_3 için aşağıdaki bağıntılar yazılabilir:

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) + N_{20} e^{-\lambda_2 t} \quad (1.25)$$

$$N_3 = N_{30} + N_{20} (1 - e^{-\lambda_2 t}) + N_{10} \left[1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_2 t} - \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_1 t} \right] \quad (1.26)$$

Böylece peş peşe bozunumlar için aşağıdaki diferansiyel denklemler yazılabilir:

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 \cdot N_1 \quad (1.27)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 \cdot N_1 - \lambda_2 \cdot N_2 \quad (1.28)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = \lambda_2 \cdot N_2 - \lambda_3 \cdot N_3 \quad (1.29)$$

$$\frac{dN_n}{dt} = \lambda_{n-1} \cdot N_{n-1} - \lambda_n \cdot N_n \quad (1.30)$$

Radyoaktif Denge

Eşitlik 1.13 ve 1.21 göz önünde bulundurulursa radyoaktif denge için aşağıdaki durumlar söz konusudur:

1) $\lambda_1 \ll \lambda_2$ ise, bu durumda ana çekirdek çok uzun yarı ömürlüdür ve sabit bir hızla bozunur. Tüm zamanlar için $e^{-\lambda_1 t} \cong 1$ ve $\lambda_2 - \lambda_1 \cong \lambda_2$ olduğundan Eşitlik 1.21 aşağıdaki gibi yazılır (Krane, 1988):

$$N_2 \cong \frac{\lambda_1}{\lambda_2} N_{10} (1 - e^{-\lambda_2 t}) \quad (e^{-\lambda_2 t} \approx 0) \quad (1.31)$$

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} N_{10} \quad (1.32)$$

Burada t arttıkça kız çekirdekler oluştukları hızla bozunurlar ve Eşitlik 1.28’de $dN_2/dt = 0$ yazılırsa Eşitlik 1.33 elde edilir:

$$\lambda_2 N_2 = \lambda_1 N_1 \quad (1.33)$$

Ana maddenin her bir üründen daha uzun yarı ömürlü olduğu ve birden fazla zincirleme bozunmanın yer aldığı durumlarda *kalıcı (secular) denge* şartı;

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \lambda_3 N_3 = \dots \dots \lambda_n N_n \quad (1.34)$$

olarak yazılır. Denge durumunda, ürün çekirdekler belli bir maksimum değere ulaşır. N_2 ’nin maksimuma ulaştığı t_m için Eşitlik 1.21’in türevi alınır aşağıdaki ifadeler elde edilir.

$$\frac{dN_2}{dt} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} (-\lambda_1 e^{-\lambda_1 t_m} + \lambda_2 e^{-\lambda_2 t_m}) = 0 \quad (1.35)$$

$$\lambda_1 e^{-\lambda_1 t_m} = \lambda_2 e^{-\lambda_2 t_m} \quad (1.36)$$

$$t_m = \frac{1}{(\lambda_2 - \lambda_1)} \log_e \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \text{ ya da } t_m = \frac{1}{(\lambda_2 - \lambda_1)} \log_e \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \quad (1.37)$$

elde edilir. Örneğin Radyum için $t_{1/2}=1620$ yıl ve radon için ise $t_{1/2}=3.82$ gün’dür. Yarı ömür ve Eşitlik 1.37 kullanıldığında $t_m \approx 30$ gün olur.

2) $\lambda_1 < \lambda_2$ durumunda, Eşitlik 1.37’de aktiflikler oranlanırsa, akabinde Eşitlik 1.13 ve 1.21’deki değerler yerine konulursa;

$$\frac{\lambda_2 N_2}{\lambda_1 N_1} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} (1 - e^{(\lambda_1 - \lambda_2)t}) \quad (1.38)$$

elde edilir, t arttıkça üstel terim sıfıra gider ve aktiflik oranı Eşitlik 1.40'deki gibi olur ve buna geçici (transient) *denge* denir

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (1.39)$$

3) $\lambda_1 > \lambda_2$ ise ana çekirdek hızla bozunur. Kız çekirdeklerin aktifliği bir maksimum değere ulaştıktan sonra kendi bozunum sabiti ile bozunurlar. Bu durumda ana çekirdeklerin sayısı ihmal edilecek kadar azdır. Eğer t çok uzunsa $e^{-\lambda_1 t}$ terimi sıfır olur ve Eşitlik 1.21 aşağıdaki gibi yazılır:

$$N_2 = N_{10} \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} e^{-\lambda_2 t} \quad (1.40)$$

1.3.2 Fiziksel Yarı Ömür ($t_{1/2}$)

Fiziksel yarı ömür, bir örnekteki radyoaktif atom sayısının (veya aktivitenin) radyoaktif bozunma yoluyla yarıya inmesi için geçen süredir. Eşitlik 1.3'de $N = N_0/2$ yazılır ve gerekli matematik işlemler yapılırsa yarı ömür için Eşitlik 1.42 elde edilir (Yülek, 1992).

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda} \quad (1.41)$$

1.3.3 Ortalama Yarı Ömür (τ)

Bozunmanın üstel ifadesi radyoaktif atomların tamamen yok olması için gereken sürenin sonsuz olduğunu göstermektedir. Buna göre herhangi bir radyoaktif atomun ne zaman bozunacağı kesin olarak bilinmeyeceği gibi ömrü sıfır ile sonsuz arasında herhangi bir süre olabilir. Bozunmanın bu istatistiksel özelliği nedeni ile ortalama ömür tanımlanır. Matematiksel olarak ortalama ömür, bozunma sabitinin tersine eşittir (Özden, 1977):

$$r = \frac{1}{\lambda} = \frac{t_{1/2}}{0.693} = 1.44t_{1/2} \quad (1.42)$$

Eşitlik 1.42'den görüldüğü gibi ortalama ömür yarı ömürden büyüktür. Bu bağıntı Eşitlik 1.3'de yerine konulursa:

$$N = N_0 e^{-\lambda \cdot \frac{1}{\lambda}} = N_0 e^{-1} = 0.368N_0 \quad (1.43)$$

elde edilir. Eşitlik 1.43'e göre *ortalama ömür*, radyoaktif atom sayısının başlangıç sayısının %36.8'e düşmesi için geçen süre olarak tanımlanabilir.

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

Solunum veya sindirim sistemi ya da damar yoluyla vücuda alınan bir radyoaktif maddenin biyolojik olaylar sonunda alınan miktarın yarısının vücut dışına atılması için geçen süredir. Örneğin ^{137}Cs için fiziksel yarı ömür 30 yıl olmasına rağmen biyolojik yarı ömür 70 gündür.

1.3.5 Efektif Yarı Ömür ($t_{1/2e}$)

Efektif yarı ömür bir radyoaktif maddenin biyolojik ve fiziksel yarı ömürlerinin ortak bir yansımasıdır ve Eşitlik 1.44 ile hesaplanır (Yülek, 1992):

$$\frac{1}{t_{1/2e}} = \frac{1}{t_{1/2f}} + \frac{1}{t_{1/2b}} \quad (1.44)$$

1.4 Radyoaktif Bozunum Türleri

1.4.1 Alfa (α) Bozunumu

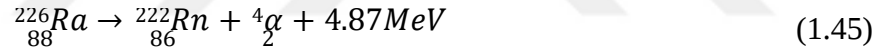
Alfalar çekirdek içinde belli bir E_0 enerji düzeyinde bulunurlar ve çekirdeğin U potansiyel engeli ile çevrili bir bölgesinde hareket ederler. $E_0 < U$ olduğundan, klasik

olarak parçacık potansiyel engelini aşacak enerjiye sahip değildir. Oysa kuantum mekaniğine göre parçacığın engeli aşma olasılığı vardır. Buna *tünelleme olayı* denir. Bu bozunma şekli Rutherford tarafından keşfedildikten on yıl sonra α partikülünün, helyum atomunun çekirdeği olduğu anlaşılmıştır. Çekirdeklerin bağlanma enerjisi incelenirken özellikle helyum çekirdeğinin çok kararlı olduğu ve bu kararlılığın ona tek bir parçacık olarak bakacak kadar büyük olduğu gösterilmiştir (Şekil 1.3).



Şekil 1.3 ^{226}Ra 'un alfa bozunumu (Başaran, 2019)

α parçacığı yayınlayan çekirdeklerin kütle numarası (A) 4 birim, proton (P) ve nötron (N) sayılarının her ikisi de 2 birim azalır (Özden, 1977; Yülek, 1992)



Eşitlik 1.45 ifadesinde elektriksel yük, enerji ve momentum korunur. Nükleer dönüşüm sonucu yayınlanan α parçacıkları tek enerjilidir ve enerjileri yüksektir. Eşitlik 1.45'de toplam reaksiyon enerjisi (Q) 4.87 MeV ve yayınlanan α parçacığının enerjisi 4.78 MeV'dir. 0.09 MeV'lik fark yeni oluşan radon çekirdeğine geri tepme enerjisi olarak aktarılmıştır. α parçacığı yayınlamadan önce ana çekirdek durgundur ve α 'nın kütlesi yeterince büyük olduğundan ürün çekirdek momentumun korunabilmesi için geri teper. Eşitlik 1.45'de Q değeri aşağıdaki bağıntı ile elde edilir (Martin, 2013):

$$Q = (m_{\text{Ra}} - m_{\text{Rn}} - m_{\alpha})c^2 = \frac{1}{2}m_{\text{Rn}}v_{\text{Rn}}^2 + \frac{1}{2}m_{\alpha}v_{\alpha}^2 \quad (1.46)$$

Diğer taraftan momentumun korunumu gereği $|P_{\text{Rn}}| = |P_{\alpha}|$ yazılır. Kinetik enerji ve momentum arasındaki ilişki yazılırsa aşağıdaki eşitlikler elde edilir:

$$\frac{1}{2} m_{Rn} v_{Rn}^2 = \frac{P_{Rn}^2}{2m_{Rn}} = \frac{P_{\alpha}^2 m_{\alpha}}{2m_{Rn} m_{\alpha}} \quad (1.47)$$

$$\frac{1}{2} m_{Rn} v_{Rn}^2 = \frac{1}{2} m_{\alpha} v_{\alpha}^2 \left(\frac{m_{\alpha}}{m_{Rn}} \right) \quad (1.48)$$

$$E_{Rn} = E_{\alpha} \left(\frac{m_{\alpha}}{m_{Rn}} \right) \quad (1.49)$$

Eşitlik 1.45'e göre kütleler arasındaki ilişki:

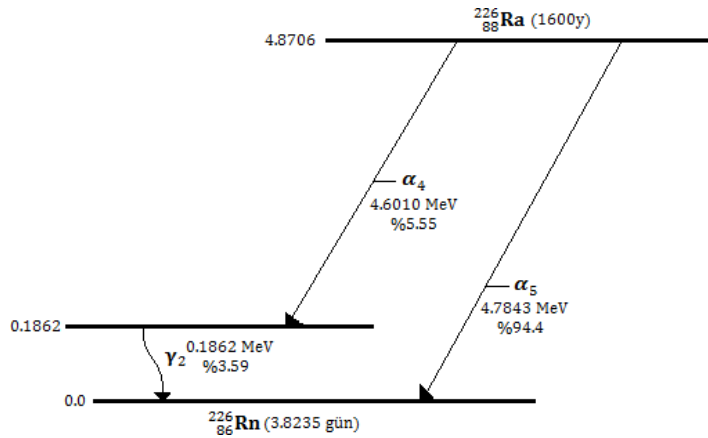
$$\frac{m_{\alpha}}{m_{Rn}} \cong \frac{4}{A-4} \quad (1.50)$$

olarak yazılır ve bu ifade Eşitlik 1.46'da yerine yazılırsa α partikülünün reaksiyon ve kinetik enerjisi için aşağıdaki eşitlikler elde edilir:

$$Q = E_{\alpha} \left[1 + \left(\frac{4}{A-4} \right) \right] \quad (1.51)$$

$$E_{\alpha} = Q \left(\frac{A-4}{A} \right) \quad (1.52)$$

^{226}Ra 'un ^{222}Rn 'a dönüşüm şeması Şekil 1.4'de gösterilmiştir. Bozunum şemasında görüldüğü üzere iki α parçacığı yayınlanmaktadır.



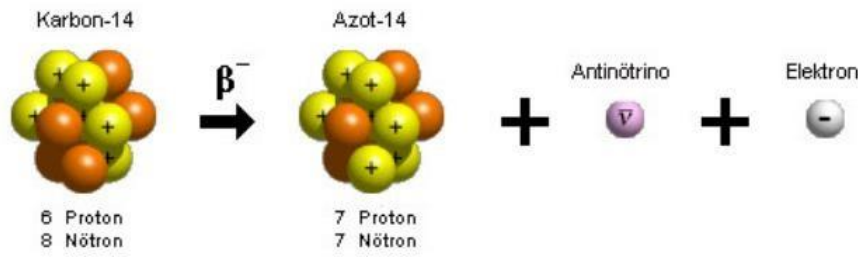
Şekil 1.4 ^{226}Ra 'un bozunum şeması (Martin, 2013)

1.4.2 Beta (β) Bozunumu

Beta bozunumunun üç farklı çeşidi vardır. Bunlar negatron (β^-) bozunumu, pozitron (β^+) bozunumu ve elektron yakalama olayıdır.

1.4.2.1 Negatron (β^-) Bozunumu

β^- bozunumu kararsız bir çekirdekten negatif elektron yayınlanmasıdır (Şekil 1.5). Eğer bir radyonüklidin kararsızlığı çekirdekteki nötron fazlalığından kaynaklanıyorsa, çekirdeğin kararlı hale geçmesi için nötronlardan biri proton ve elektrona dönüşür (Eşitlik 1.53). Proton çekirdekte kalırken, elektron hızla çekirdekten dışarı atılır.



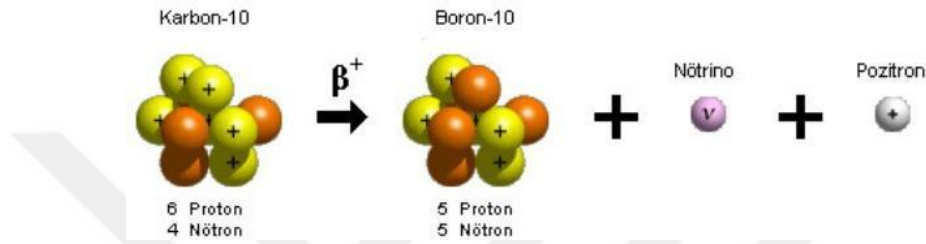
Şekil 1.5 Negatron bozunumu (Barınmaz, 2009)

$$n \rightarrow p + \beta^- + \bar{\nu} \quad (1.53)$$

Bu bozunmada ürün çekirdeğin proton sayısı bir birim artarak kendinden bir sonraki elementin izobar atomuna dönüşür. Bu bozunuma kütle sayısı değişmediği için izobarik bozunma adı verilmiştir. β yayınlayan radyoaktif maddeler sürekli bir spektruma sahiptir. Halbuki kuantum teorisine göre, çekirdekten yayınlanan parçacıkların aynı miktarda enerji taşınması gerekir. Bunun sebebi çekirdekten β^- la beraber yüksüz ve elektrona göre ihmal edilebilir ağırlıklı antinötrino ($\bar{\nu}$) denen bir parçacığın salınıyor olmasıdır. Nötrinolar (ν ve $\bar{\nu}$), çekirdeğin fazla enerjisinin bir kısmını taşır, yüksüz olduğu için madde ile etkileşmez (Yülek, 1992).

1.4.2.2 Pozitron (β^+) Bozunumu

Bu bozunma olayı β^- ile benzerlik gösterir (Şekil 1.6). Pozitronların elektrik yükleri dışındaki özellikleri elektronla aynıdır. Atomun kararsızlığı proton fazlalığından kaynaklanıyorsa, çekirdeğin içinde proton, nötrona dönüşürken pozitron ve nötrino yayınlanır. Buna pozitron (β^+) bozunumu denir. Böylece pozitron yayımlayan radyonüklidin proton sayısı bir birim azalırken kütle sayısı değişmez (Eşitlik 1.54).



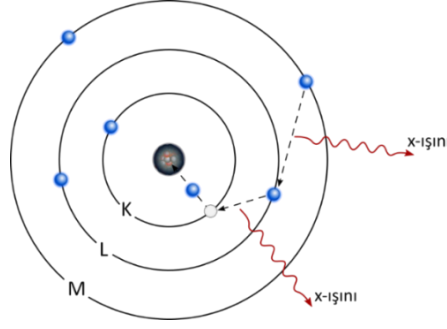
Şekil 1.6 Pozitron bozunumu (Barınmaz, 2009)

$$p \rightarrow n + \beta^+ + u \quad (1.54)$$

1.4.2.3 Elektron Yakalama

Proton fazlalığı olan çekirdekler K ya da L yörüngesinden bir elektron yakalayarak proton sayısını bir azaltıp nötron sayısını bir artırır (Eşitlik 1.55). Elektron yakalama olaylarının %90'ı K kabuğundaki elektronun yakalanmasıyla ve %10 kadarı L kabuğundaki elektronun yakalanmasıyla oluşur. M kabuğundaki elektronun yakalanma olasılığı %1'dir. K, L, M kabuğundan bir elektron yakalanmasından sonra oluşan elektron boşluğu daha yüksek seviyedeki bir elektron tarafından doldurulur. Bu sırada iki yörünge arasındaki bağlanma enerjisi farkına eşit enerjiye sahip karakteristik X-ışınları yayınlanır. (Şekil 1.7). Pozitron yayılımı ve elektron yakalamada amaç karalılığın sağlanması olduğundan her iki işlemin mümkün olduğu durumlarda birbirleri ile yarışır.

$$p + e^- \rightarrow n + u \quad (1.55)$$



Şekil 1.7 Elektron yakalama

1.4.3 Gama (γ) Bozunumu

Gama bozunumu çekirdek orjinli olup genellikle alfa ve beta radyasyonu ile beraber üretilir. Bir çekirdek alfa ya da beta yayınladığında ürün çekirdek genellikle uyarılmış durumda kalır. Daha sonra gama ışını yayınlarak daha düşük enerji durumuna geçer. Gama bozunumunda proton, nötron ve kütle sayısı değişmez. Bu nedenle gama ışınması bir izomerik geçiştir (Eşitlik 1.56).

Gama yayınlaması 10^{-9} s ya da daha kısa sürede gerçekleşir. Ancak bazı uyarılmış durumlar için bu süre uzundur. Bu durum yarı kararlı hal olarak tanımlanır (Yülek, 1992; Martin, 2013):



1.5 Radyasyon Doz Birimleri

Radyasyona bağlı biyolojik etkilerin önlenmesi ya da en aza indirilmesi için, radyasyon birimlerinin bilinmesi, gerekli ölçümlerin yapılabilmesi, ölçüm sonuçlarının değerlendirilebilmesi gerekir.

Birim zamanda maddenin soğurduğu radyasyon miktarına radyasyon dozu denir. Alınan radyasyon dozunun oluşturduğu etki radyasyonun türü, enerjisi, hedef maddenin özelliği, maruz kalınan süre, kaynak ve hedef arasındaki mesafe gibi parametrelere bağlıdır. Radyasyonun canlı ve cansız varlıklar üzerindeki etkisi alınan radyasyon dozu ile tespit edilebilir. Radyasyon doz birimleri radyasyona maruziyetin bir göstergesidir.

Uluslararası Radyasyon Birimleri Komitesi (ICRU) radyasyon çalışmalarında; aktivite, ışınlama, absorpsiyon ve eşdeğer doz kavramlarını tanımlamıştır (Gelgün, 2010; Bora, 2001; Fişne, 2002):

Aktivite, birim zamanda bozunan tanecik sayısıdır. Eğer saniyede 37×10^9 bozunum gerçekleşiyorsa buna 1 Curie (Ci) denir. Saniyede bir bozunum gerçekleşiyorsa buna da 1 Becquerel (Bq) denir. Buna göre; $1 \text{ Ci} = 37 \times 10^9 \text{ Bq}$ veya $1 \text{ Bq} = 2.7 \times 10^{-11} \text{ Ci}$ yazılabilir (Kapdan, 2009). Radyoaktivitede kullanılan diğer birim de Rutherford (Rd)'dur ve $1 \text{ Rd} = 10^6 \text{ Bq}$ 'dir.

Işınlama birimi, normal şartlar altında (0°C ve 760 mmHg basıncı) 1 kg havada 2.58×10^{-4} Coulomb'luk elektrik yükü değerinde pozitif ve negatif iyonlar oluşturan X veya γ radyasyon miktarı olarak tanımlanır. Bu da 1 gr havada 88 erg'lik bir iyonlaşma yapar. Birimi Röntgen (R) ya da C/kg'dır ve $1 \text{ C/kg} = 3876 \text{ R}$ olarak ifade edilebilir. 1 MeV enerjili α partikülü havada 60.000 iyon çifti oluşturur (Gelgün, 2010).

Absorpsiyon doz birimi, 1 kg maddenin 1 Joule (J)'lük enerjiye karşılık gelen iyonize radyasyonu soğurmasıdır ve birimi Gray (Gy)'dir. Eski birim olan Rad (rad) ise; maddenin gram başına 100 erg'lik enerji soğurmasıdır. Bu ifadelerden ve $1 \text{ J} = 10^7 \text{ erg}$ olduğundan dolayı $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$ yazılabilir. Havada 1 R'lik ışınlama dozu 0.88 rad'lık absorbe dozu meydana getirir (Bora, 2001).

Eşdeğer ve Etkin doz birimi, radyasyona maruziyetin oluşturduğu hasar dozunu belirlemede kullanılır. 1 R'lik ışımanın meydana getirdiği hasara *eşdeğer etki* denir. Eşdeğer doz, radyasyonun türüne, enerjisine ve parçacığın Lineer enerji transferi (LET) değerine bağlı olduğundan radyasyonun temel etkisinin bir indisini verir. Parçacığın geçtiği birim yol uzunluğu başına kaybettiği enerji LET olarak adlandırılır ve birimi keV/ μm 'dir (Şeker ve Çerezci, 1997). O halde LET değeri yüksek olan parçacıkların biyolojik etkisi de büyük olacaktır. Farklı radyasyonların insan dokusundaki hasar potansiyeli de farklı olacağından, temel dozimetrik değer olan absorbe doz, radyasyondan korunma çalışmalarında yeterli olmamaktadır. Bu nedenle; absorbe edilen dozun radyasyonun türüne ve enerjisine bağlı olarak kalite çarpanı olan ağırlık faktörü (W_R) ile çarpılması gerekmektedir (Çizelge 1.1). Ortaya çıkan sonuca eşdeğer doz denir ve eski birimi Rem (roentgen equivalent man) iken yeni birimi Sievert'dir (Zeyrek, 2013) Eşdeğer doz Eşitlik 1.57 ile ifade edilmektedir:

$$\text{Eşdeğer Doz (Sv)} = \text{Absorbe Doz (Gy)} \times W_R \quad (1.57)$$

Çizelge 1.1 Radyasyon ağırlık faktörleri

Radyasyon Tipi ve Enerjisi	Ağırlık faktörü (W_R)
Foton, elektron, müon (tüm enerjilerde)	1
Beta(β) partikülleri	
Nötron $E_n < 10$ keV	5
10 -100 keV	10
100 keV-2 MeV	20
2 -20 MeV	10
$E_n < 20$ MeV	5
Proton $E_p > 2$ MeV	5
α partikülleri, fisyon parçacıkları, ağır çekirdekler	20

Çizelge 1.1’da görüldüğü üzere, fotonlar ve beta parçacıkları için radyasyon ağırlık faktörü 1 olduğundan bu radyasyon tipleri için eşdeğer doz soğurulmuş doza eşittir. α parçacıkları ve 100 keV-2 MeV enerji aralığındaki nötronlar için W_R değeri 20 olduğundan eşdeğer doz soğurulmuş dozun 20 katı olacaktır. Örneğin 1 Gy β partikülü, X ve γ ışını için eşdeğer doz 1 Sv ve α partikülü için ise bu değer 20 Sv’dir.

İnsan vücudundaki farklı organ ve dokunun iyonize radyasyona karşı duyarlılığının farklı olması, ağırlıklı eşdeğer dozların toplamı olan “efektif doz (E_{eff})” hesaplamasında önemli bir etkidir. Örneğin 1 Gy absorbe doz, vücudun bütün dokularında aynı etkiyi göstermez. Efektif dozu belirlemek için çeşitli organ için tespit edilen doku ağırlık faktörleri (W_T) Çizelge 1.2’de verilmiştir (Eckerman vd., 2012). Böylece E_{eff} , radyasyonun enerjisi, tipi, doku ve organ hassasiyetlerinin birlikte hesaplanmasının bir ölçüsü olarak önemli bir radyasyon güvenliği niceliğidir.

Çizelge 1.2 Doku ağırlık faktörleri

Doku ya da Organ	W_T	$\sum W_T$
Üreme hücreleri	0.20	0.20
Kırmızı ilik, kolon, akciğer, mide	0.12	0.48
Mesane, göğüs, karaciğer, özefagus	0.05	0.20
Troid ve geri kalan organlar*	0.05	0.10
Cilt, kemik yüzeyi	0.01	0.02
Toplam		1

Organ ya da doku üzerindeki ortalama absorbe doz hesaba katılarak organ veya doku eşdeğer dozu (H_T) aşağıdaki bağıntı ile hesaplanabilir:

$$H_T = \sum W_R D_T \quad (1.58)$$

Burada D_T , gelen radyasyondan dolayı doku ya da organ üzerinde absorbe edilen ortalama dozdur. Organ ağırlık faktörleri kullanılarak organ eşdeğer dozların toplamı olan efektif (Etkin) doz (E_{eff}) aşağıdaki formülle hesaplanır (Valentin, 2003):

$$E_{eff} = \sum W_T H_T \quad (1.59)$$

Efektif dozun birimi Sievert (Sv) veya Rem (rem)'dir ve 1 Sv=100 rem yazılabilir. Örneğin akciğere 100 mSv, karaciğere 70 mSv ve kemik yüzeyine 300 mSv doz radyodiagnostik amaçla verildiğinde E_{eff} aşağıdaki gibi hesaplanır (Bora, 2001):

$$E_{eff} = (100 \times 0.12) + (70 \times 0.05) + (300 \times 0.01) = 18.5 \text{ mSv} \quad (1.60)$$

1.6 ICRP Doz Sınırlama İlkeleri

ICRP 2007'nin radyasyondan korunma ile ilgili felsefesi, iyonize radyasyonla yapılan her türlü ışımanın gerekli olduğundan emin olunması, mümkün olan en düşük dozun alınmasının sağlanması ve alınan doz eşdeğerinin müsaade edilen sınırları geçmemesinin sağlanması esasına dayanır. ICRP 2007 radyasyondan korunma için üç ilke belirlemiştir: Birincisi, radyasyon kaynaklarıyla yapılacak çalışmalarda, pozitif net bir yarar sağlanacağından emin olunan uygulamalara izin verilmesini esas alan Haklılık İlkesi'dir. İkincisi, İyonize radyasyon uygulamalarında, ekonomik ve sosyal faktörler dikkate alınarak mümkün olan en düşük dozun alınmasını sağlayacak her türlü tedbirin yerine getirilmesi gerektiğini ifade eden Optimizasyon İlkesi'dir. Bu ilke aynı zamanda ALARA (As Low As Reasonably Achievable) "Mümkün olan en düşük dozun alınmasının başarılması" prensibi olarak da bilinir (Yülek, 1992). Üçüncüsü ise Doz Limitleri İlkesi'dir. Kişilerin radyasyon dozlarının normal uygulamalarda yıllık doz

sınırlarını aşmaması gerektiğini ifade eden bu ilke; Birincil limitler, İkincil limitler, Doz Eşdeğer İndeksleri, Türetilmiş limitler, İzin Verilen limitler, İşletme limitler olarak gruplandırılır. İyonize radyasyonla çalışanlar ve halk için en çok kullanılan sınırlar Birincil ve İkincil limitlerdir. Birincil limitler yıllık doz sınırlarıdır ve bu değerler radyasyon görevlileri ve toplum için Çizelge 1.3’de verilmiştir (Wrixon, 2008). Doğal radyasyon kaynaklarından alınan doz, tıbbi teşhis ve tedaviden kaynaklanan doz birincil limitlere dahil değildir. İkincil limitler dış ışınlamalar için doz eşdeğer indeksleri ve dahili ışınlamalar için vücut içine alınma sınırlarıdır (Annual Limits on Intake (ALI)). ALI, radyoaktif maddelerin Bq cinsinden yıllık olarak vücuda alınabilir sınır değerleridir (Yülek, 1992). ICRP30 ve BEIR-III raporunda çeşitli radyoizotoplar için vücut organlarına Bq başına Sv cinsinden radyasyon dozu, her vücut organına verilen doz başına ölümcül kanser riski (risk/Ci), yıllık risk oranı (risk/ALI) verilmiştir (Cohen, 1982).

Çizelge 1.3 ICRP tarafından tavsiye edilen doz sınırları

Sınır Tipi	Mesleki (mSv/yıl)	Toplum (mSv/yıl)
Efektif doz	5 yılın ortalaması 20 mSv Herhangi bir yıl için 50 mSv	5 yıllık ortalama yılda 1 mSv’i geçmemesi şartıyla istisna olarak bir yılda daha yüksek efektif doz değerine izin verilebilir.
Eşdeğer doz (Lens ve göz için)	150 mSv	15 mSv
Eşdeğer doz (Cilt için)	500 mSv	50 mSv
Eşdeğer doz (El ve ayak için)	500 mSv	--

1.7 Radyasyon Maruziyetini Azaltmak İçin Temel Önlemler

External radyasyon kaynaklarından korunmak için uluslararası kuruluşların belirlediği üç temel kural; zaman, mesafe ve zırhlama kuralıdır.

Zaman kuralı

Radyasyondan alınan doz miktarı ile zaman doğru orantılı olduğundan, radyasyon ışımasına ne kadar az süre maruz kalınırsa o kadar az doz alınır (Eşitlik 1.61).

$$\text{Doz} = \text{Doz hızı} \times \text{zaman} \quad (1.61)$$

Örneğin doz hızı 5 Gy/h olan bir alanda 1 h kalınırsa 5 Gy, 10 h kalınırsa 50 Gy'lik doz alınır. Aynı şekilde radyoaktif gazlarla alınan inhalasyon dozu zaman ile doğru orantılı olduğundan maruz kalma zamanı en aza indirilmelidir (Bora, 2001).

Mesafe kuralı

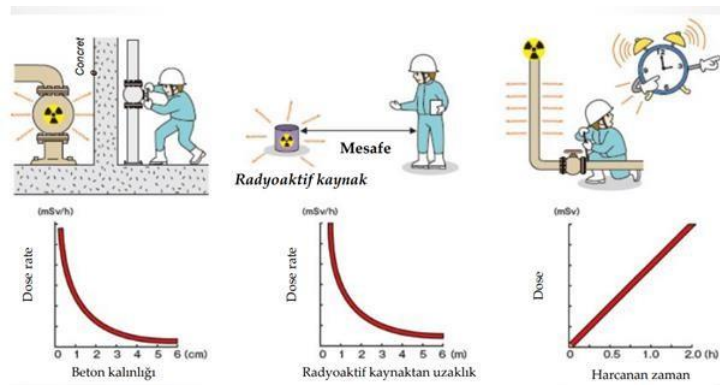
Bir radyasyon alanının şiddeti kaynaktan olan uzaklık arttıkça azalır. Radyasyon kaynağı noktasal kaynak ise mesafeye bağlı azalma, mesafenin karesi ile ters orantılı olur ve doz hızı ile mesafe arasındaki bağıntı aşağıdaki bağıntı ile verilir (Eşitlik 1.62).

$$D_r = D_0(r_0/r)^2 \quad (1.62)$$

Nokta kaynak olarak kabul edilemeyecek boyutlardaki radyasyon kaynakları söz konusu ise, radyasyon kaynağının şiddeti mesafenin karesi değil mesafeyle azalır. Örneğin bir nokta kaynaktan 1 m mesafede doz hızı 10 mGy ise 10 m mesafedeki doz hızı 0.1 mGy olur.

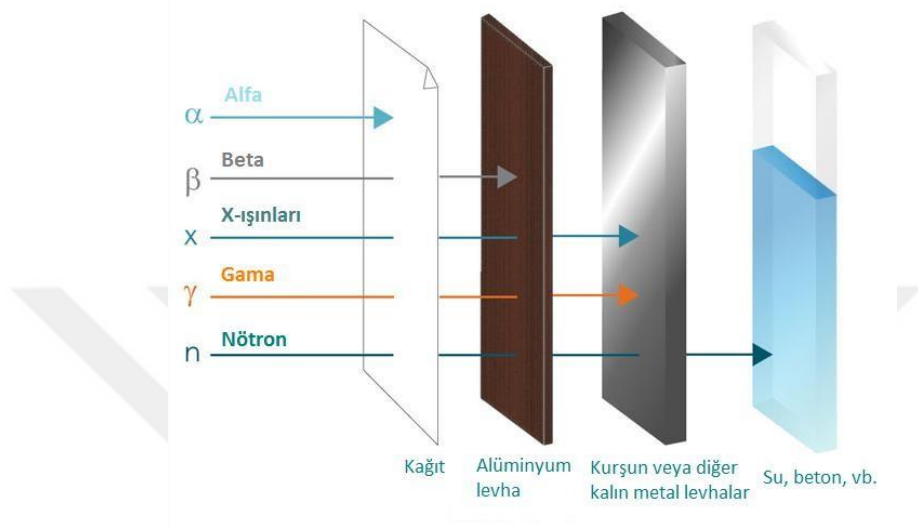
Zırhlama kuralı

Radyasyon kaynağının şiddetini azaltmak için kişi ile kaynak arasında kurşun, tuğla, beton, duvar gibi zırhlama materyallerinin yerleştirilmesidir (Şekil 1.8).



Şekil 1.8 Radyasyondan korunmada zırhlama, mesafe ve zaman (Al, 2019)

Farklı radyasyonlar için kullanılan zırhlama malzemeleri kullanılır (Şekil 1.9). α parçacıklarını bir kağıt durdurabilirken β parçacıklarını ince bir alüminyum levha durdurabilir. Diğer taraftan nötron için beton, parafin ve su gibi hidrojenli malzemeler sıkça tercih edilir (Martin, 2013).



Şekil 1.9 Farklı iyonize radyasyon türlerinin penetrasyonu (Açıkgöz, 2018)

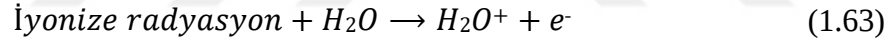
1.8 İyonize Radyasyonun Biyolojik Etkileri

Radyasyonun biyolojik etkileri; hücrenin tipine, radyasyon türüne ve LET değerine, maruz kalınan süreye ve absorbe edilen doza bağlıdır. İnsan vücudundaki çeşitli doku ve organları meydana getiren hücreler şekilleri ve özellikleri bakımından birbirinden farklı oldukları gibi radyasyon etkilerine karşı gösterdikleri tepkiler de farklıdır. Hücrelerin radyasyon etkilerine karşı duyarlılıkları (radyosensitiviteleri) bakımından bu farklar Bergonie ve Tribondeau kanunu ile ifade edilir. Bu kanuna göre: “Bir dokunun radyosensitivitesi, hücrelerin çoğalma kabiliyeti ile doğru, farklılaşma derecesi ile ters orantılıdır”. Bölünme özelliği bakımından aktif hücreler ve olgunlaşmamış hücreler radyasyona karşı en hassas hücrelerdir. Buna göre, hematopoietik ve lenfoid sistem hücreleri en duyarlı, karaciğer, böbrek, kas ve sinir hücreleri ise en dirençli hücrelerdir (Kıraç ve Yüksel, 2001).

1.8.1 İyonize Radyasyonun Hücresel Boyutta Etkisi

Bütün biyolojik dokular hücrelerden meydana gelir. Tipik bir hücre 10 μ 'luk bir çapa sahiptir ve yetişkin insanlarda yaklaşık 5×10^{13} hücre mevcuttur. Hücre, bir çekirdek, bu çekirdeği çevreleyen stoplazma ve en dışta bunları saran 10^{-6} cm kalınlığında bir zardan oluşur. Çekirdeğin içerisinde hücre hareketleri ile ilgili şifre bilgilerini içeren ve bunları gelecek nesillere değiştirmeden taşıyan “kromozom” lar yer alır. Kromozomlar ise histon denilen proteinler ile DNA zincirlerinden oluşur. Hücrenin yapı ve işlevleri DNA tarafından kontrol edilir (Coşkun, 2011). İyonize radyasyonun bir canlıda biyolojik hasar oluşturabilmesi için radyasyon enerjisinin hücre tarafından absorbe edilmesi gerekir. İyonize radyasyonun hücre ile etkileşmesi ve biyolojik hasarın oluşumu arasında birbirini takip eden 4 farklı evre mevcuttur (Yülek, 1992):

Fiziksel evre: Radyasyonun enerjisini hücrenin atom ve moleküllerine aktarması ve buna bağlı iyonizasyon veya eksitasyonun olduğu etkileşmedir. Bu etkileşme 10^{-16} - 10^{-12} s sürer. İyonizasyon sonucu meydana gelen elektronlar su molekülleri ile birleşir ve aşağıdaki ifadeler oluşur:



Burada H_2O^+ ve H_2O^- iyonları kararlı değildir.

Fiziko-Kimyasal evre: Fiziksel evrede ortaya çıkan primer ürünler hücre içinde sekonder ürünlerin oluşmasına neden olur (Eşitlik 1.65 ve 1.66). Sekonder ürünler çok reaktiftir ve hücre moleküllerinde hasara yol açabilir. Fiziko-kimyasal evre 10^{-12} ile 10^{-2} s sürer.



Su iyonları bu kademede H^+ ve OH^- iyonları ile $H^\bullet$ ve $OH^\bullet$ radikalleri meydana getirir. Bu radikaller reaktiftir ve hücre içinde sekonder ürünler oluşmasına neden olur.

Kimyasal evre: Fiziko-kimyasal evrede ortaya çıkan reaktifler hem kendi aralarında hem de hücrenin daha önce etkileşime girmemiş molekülleri arasında kimyasal reaksiyona yol açarak biyomoleküler hasar oluştururlar (Eşitlik 1.67-1.69). Bu evre saniyeler ya da saatler sürebilir:



Hidrojen peroksit oldukça reaktif bir maddedir (Yülek, 1992).

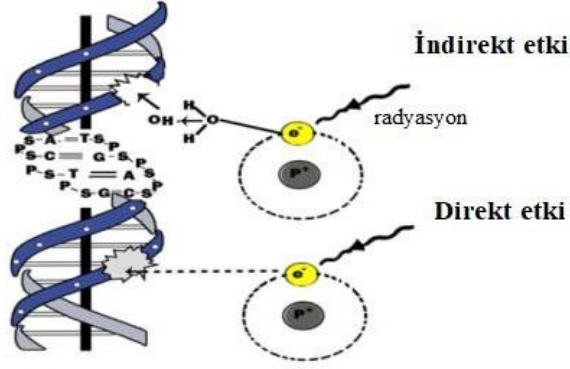
Biyolojik evre: Radyasyon etkisiyle oluşan olaylar organizmada biyolojik hasarlara yol açar. Bu evrede reaktifler biyolojik moleküllerle (BH) reaksiyona girerek hasar oluşturur (Eşitlik 1.70 ve 1.71). Oluşan hasarın niteliğine göre biyolojik etki az ya da öldürücü olabilir. Biyolojik etki saatler ya da yıllar sürer.



1.8.2 İyonize Radyasyonun DNA Hasarı

1.8.2.1 Direkt etki

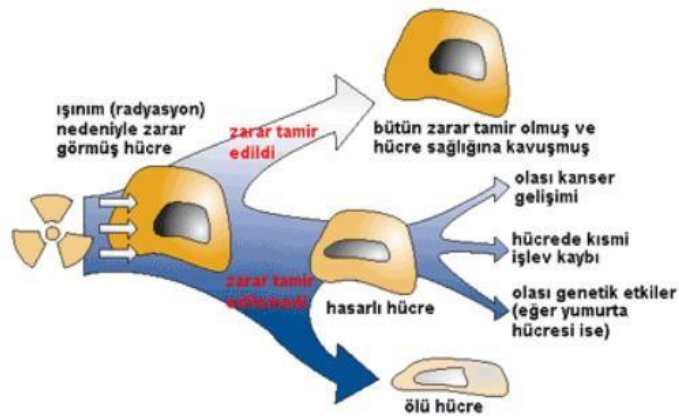
Radyasyonun etkisinin üçte biri direkt etki ile oluşur. Radyasyon enerjisini doğrudan DNA molekülüne aktararak yapısal hasar, fonksiyon kaybı ve sentez inhibisyonu oluşturuyorsa buna radyasyonun direkt etkisi denir (Şekil 1.10). Direkt etkide radyasyon ışınlam yolu üzerinde etkileştiği hücrelerin DNA zincirinde kırılmalar meydana getirir. Bu tür etki yüksek LET'e sahip nötron, α ve β ışınlam tiplerinde daha çok gözlenir. Yüksek LET'li radyasyon kısa mesafede daha çok hasara yol açar. Düşük LET'de onarılma olasılığı daha fazla olan tek zincir kırığı, yüksek LET'de ise hücre ölümü ile sonuçlanan çift zincir kırığı gözlenir (Çetingöz vd., 2013).



Şekil 1.10 Radyasyonun direkt ve indirekt etkisi (Becerir, 2018)

1.8.2.2 İndirekt etki

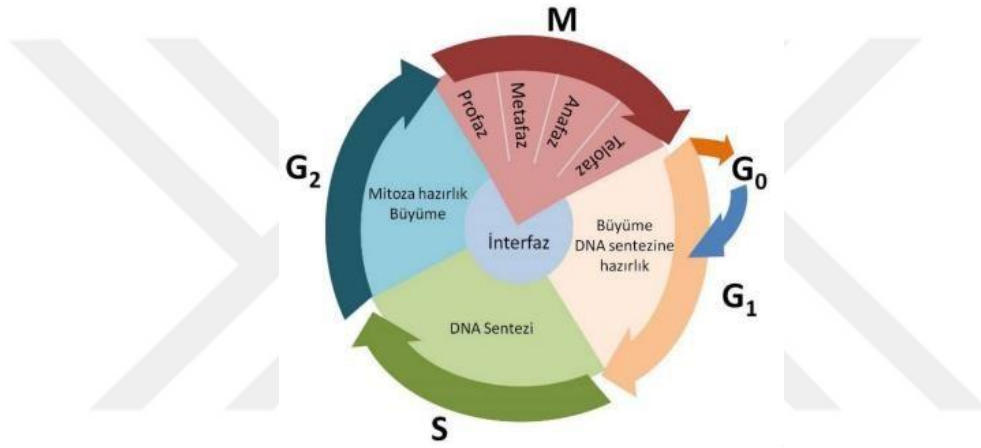
Radyasyon etkisinin üçte ikisi indirekt yolla gerçekleşir. Canlılar yaklaşık %70-90 oranında su içerdiği için radyasyon enerjisinin su molekülleri tarafından absorbe edilme olasılığı yüksektir. İndirekt etkide primer mekanizma hücre içerisindeki suyun radyolizi ile serbest oksijen radikallerinin oluşmasıdır (Şekil 1.10). Oluşan bu oksijen radikalleri DNA bileşenleri ile etkileşerek tek ve çift zincir kırılmaları veya hücresel makro moleküllerle etkileşerek baz hasarı gibi diğer bozulmalara neden olur. Oluşan hasarın derecesine göre onarım, genetik mutasyon ve buna bağlı kanser gelişimi veya hücre ölümü meydana gelebilir (Şekil 1.11) Düşük LET'li radyasyonların (X ve γ gibi) etkisi daha çok indirekt yolla gerçekleşir (Çetingöz vd., 2013).



Şekil 1.11 Radyasyonun hücre üzerindeki biyolojik etkisi (Öztek, 2017)

1.8.3 Radyasyon ve Hücre Döngüsü

Hücrenin bölünmeye başlaması ve onu izleyen bir sonraki bölünme aşamasına kadar geçen süreç hücre döngüsü olarak adlandırılır. İnsandaki hücre döngüsü, hücre tipine göre farklılık göstermekle birlikte yaklaşık 24 saattir. Hücre bölünmesi esas olarak DNA replikasyonu ve sonrasında kromozomların iki ayrı hücreye ayrılması ile karakterize edilen iki ardışık süreçten oluşur. Hücre bölünmesi mitozun profaz, metafaz, anafaz, telofaz aşamaları ve mitoz hazırlık aşaması olan interfazın G_1 , S, G_2 fazlarından oluşur (Şekil 1.12) (Manisalıgil ve Yurt, 2018).



Şekil 1.12 Hücre döngüsü

Mitoz sonrasında hücre bölünmeye devam etmeyecekse G_0 fazına geçerek fonksiyonlarını sürdürmeye devam eder. G_0 fazı hücrenin bekleme, dinlenme, uyku süresidir. Hücre burada yıllarca kalabilir. İnsan vücudundaki büyümeyen ve çoğalmayan hücrelerin büyük bölümü bu fazda bulunmaktadır. Bu faz radyasyona dirençlidir. G_0 evresi hücre döngüsünün bir kısmı değildir, bunun için jenerasyon zamanı içinde alınmaz. Jenerasyon zamanı sadece büyümeyi gösterir. Oysa, G_0 hücreleri bölünemez, fakat uygun bir uyarıdan sonra hücre döngüsüne girme ve bölünme yeteneğine sahiptir. Eğer hücrenin bölünme süreci devam edecekse hücre büyümesi ve DNA sentezine hazırlık aşaması olan G_1 fazına geçer. G_1 evresi 10-12 h sürer. Burada amino asit temini, protein ve RNA sentezi yapılarak DNA sentezine hazırlık yapılmaktadır. S fazı hücrenin protein ve DNA sentezinin yapıldığı fazdır ve 6-8 h sürer. G_2 fazı da mitoz hazırlık aşamasını içeren fazdır. DNA replikasyonunu tamamlayan hücrede kalıtsal bilgiler kontrol edilir ve hasar

varsa onarılır. Yaklaşık 4-5 h sürer. M fazında hücre profaz, metafaz, anafaz, telofaz aşamalarından geçtikten sonra ikiye bölünerek çoğalmasını tamamlar. Mitozu tamamlayan hücre yenidir ve tekrar çoğalmak üzere yeni hücre siklusuna devam eder (Kıraç ve Yüksel, 2001).

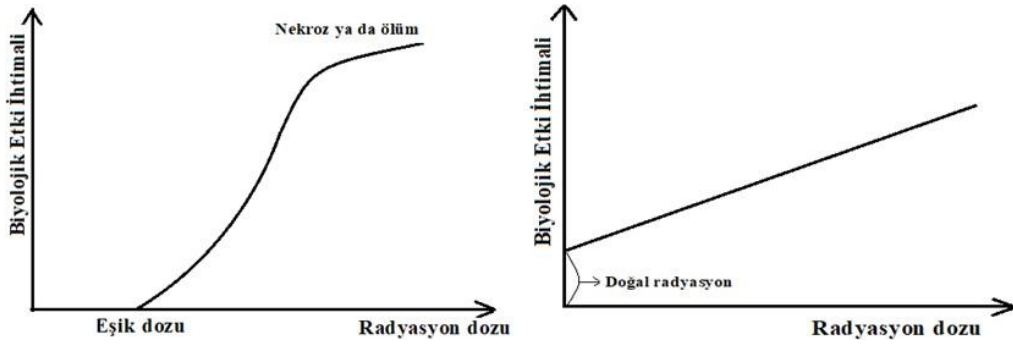
Hücreler, hücre döngüsünün herhangi bir aşamasında radyasyona maruz kalabilirler ve o anda bir dokudaki her hücre, döngünün farklı zamanlarında bulunabilir. Bu nedenle hızlı bölünen hücrelerin oluşturduğu dokular radyosensitiftir. Hücrenin G₂ ya da M fazı döngünün radyasyona en çok duyarlı fazlarıdır. Radyasyon ile genelde G₂ ve M fazındaki DNA ve kromozom hasarları ve hücre içindeki diğer kritik yapı ve moleküllerdeki (mitokondri, RNA vb) hızlı ve ciddi zararlar hücrede letal hasar oluşturabilir (Manisalıgil ve Yurt, 2018; Kurtman, 2018).

1.8.4 Radyasyon Dozu ve Biyolojik Etki Arasındaki İlişki

Alınan radyasyon dozuna bağlı olarak biyolojik etkinin olma ihtimali doz-etki bağıntısı ile açıklanmaktadır. İki farklı doz-etki bağıntısı vardır. Birincisi Sigmoid eğri olarak bilinen eşikli doz-etki bağıntısı, ikincisi ise Lineer bağıntı olarak bilinen eşiksiz doz-etki bağıntısıdır.

1.8.4.1 Eşikli Doz-Etki Bağıntısı (Nonstokastik ya da Deterministik Etki)

Bu etki, radyasyon dozunun belirli bir eşik miktardan az olması halinde biyolojik etkinin meydana gelmeyeceğini ifade eder. Eşik değer 0.25 Sv'dir (Şekil 1.13a). Burada doz arttıkça hasar miktarı da artar. Üst üste gelen dozlar birikebilir ve sonunda nekroz ya da ölüm olabilir. 10 Gy'e kadar olan maruziyette tedavi mümkündür. ≥ 10 Gy'in üzerindeki radyasyon maruziyetinde palyatif tedavi yapılabilir, hatta ölüm gerçekleşebilir. Ölüm oranı yüzde yüze yaklaştığında eğri düzleşir (Yülek, 1992).



Şekil 1.13 a. Eşikli doz-etki bağıntısı (Sigmoid eğri) b. Eşiksiz doz-etki bağıntısı (Lineer etki)

1.8.4.2 Eşiksiz Doz-Etki Bağıntısı (Stokastik Etki)

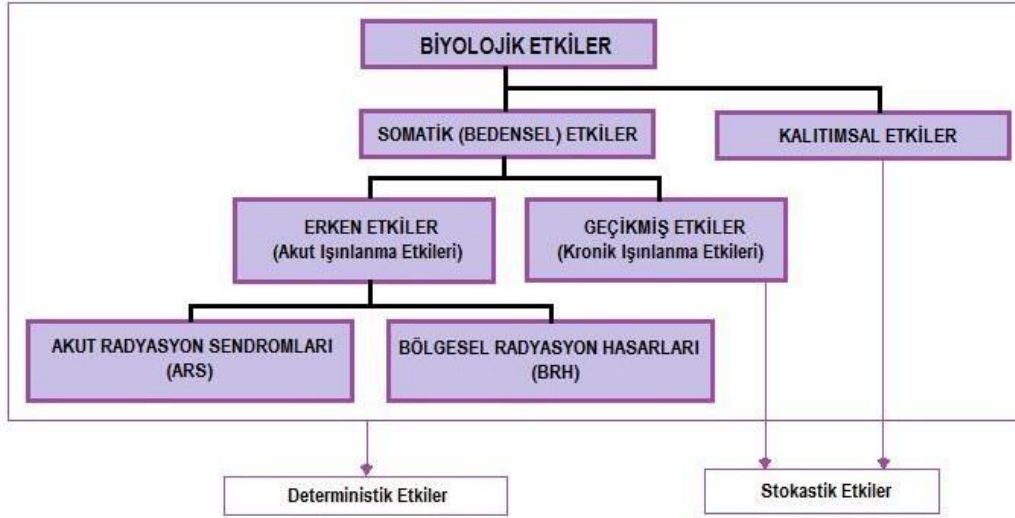
Şekil 1.13b’de görüldüğü üzere radyasyonun eşiksiz etkisi doğrudan radyasyon dozuna bağlıdır. Dozun sıfır olduğu noktada bile doğal radyasyondan dolayı pozitif bir etki görülür.

1.8.4.3 Radyasyonun Somatik ve Genetik Etkileri

Vücuttaki atom ve moleküllerin radyasyonla etkileşmesi sırasında organizmada meydana gelen biyolojik etkilere somatik etki denir. Yani somatik etkiler radyasyona maruziyet sonrasında kişinin kendisinde görünen etkilerdir. Somatik etkilere ilaveten radyasyon üreme hücrelerini etkilerse ve bu etki gelecekteki nesillere aktarılırsa buna da genetik etki denir (Şekil 1.14).

Vücudun tamamının veya bir bölümünün yüksek doz radyasyona ($\geq 0.1\text{Gy}$) maruziyeti söz konusu ise buna erken somatik etki denir. Erken somatik etki, kişide alınan doza bağlı olarak bulantı, kusma, saç dökülmesi, deride eritem, sıvı-elektrolit dengesizliği, kan tablosunda değişiklik gibi bazı belirtilerin ortaya çıktığı Akut Radyasyon Sendromu tablosu ile karakterizedir. Bu biyolojik etki saatler veya haftalar içinde gözlenir (Yülek, 1992). Radyasyona maruziyetten yıllar sonra ortaya çıkan etkiler geç somatik etkilerdir. Radyasyonun geç dönem etkileri arasında kanser, genetik mutasyon, katarakt ve infertilite sayılabilir. Radyasyona maruziyet durumunda, kemik iliği, tiroit, meme ve akciğer kanseri gelişme olasılığı daha yüksektir (Gökoğlu vd.,

2020). İntrauterin dönemde radyasyona maruz kalan çocuklarda ise mikrosefali, büyüme, gelişme ve zeka geriliği gözlelenebilmesi radyasyonun geç dönem etkileri arasındadır (Arslan, 2017).



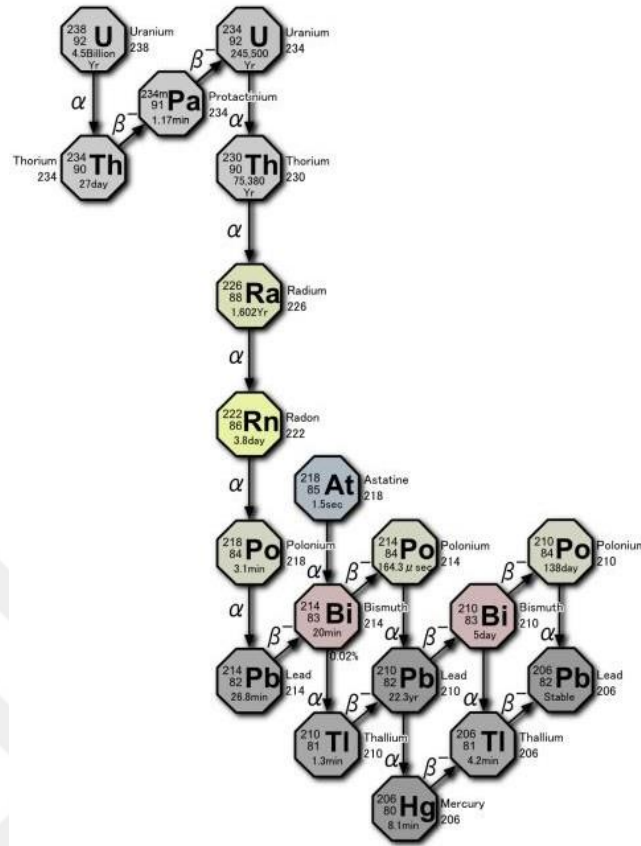
Şekil 1.14 Radyasyonun Biyolojik Etkisi (Silsüpür ve Sakarya, 2015)

1.9 Doğal Radyoaktif Bozunma Serileri

Birçok radyoaktif element, kararlı hale doğrudan geçemez. Bunun yerine tersinir olmayan seriler halinde bozunum gerçekleştirerek stabil hale geçerler. Doğada bulunan 340 radyonüklidden 70 tanesi bilinen ağır radyoaktif elementlerdir. Atom numarası $Z=82$ 'den büyük elementler radyoaktif özelliğe sahiptirler. Doğal radyoaktif seriler dört grupta yer alır: Uranyum serisi (^{238}U), Toryum serisi (^{232}Th), Aktinyum serisi (^{235}U) ve Neptünyum serisi (^{237}Np) (Gelgün, 2010).

1.9.1 Uranyum Serisi (^{238}U)

^{238}U birçok elementin uzun radyoizotop bozunma serisinin başlangıç kaynağı olup, stabil ^{206}Pb haline gelinceye kadar bozunur (Şekil 1.15).

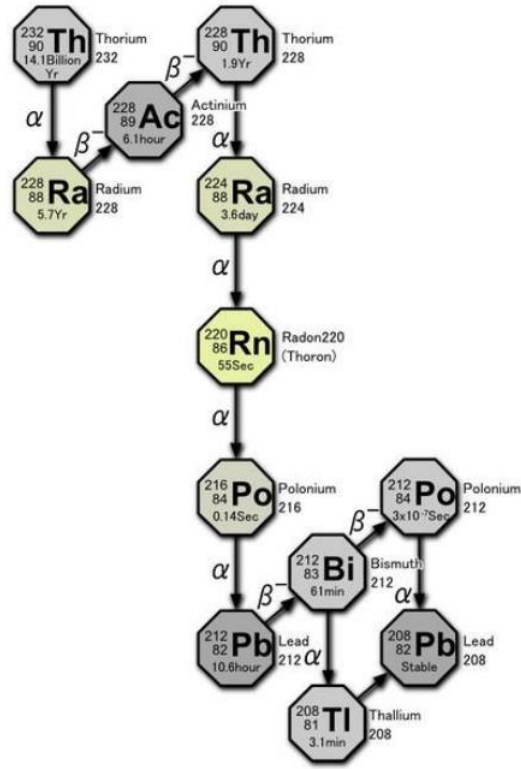


Şekil 1.15 Uranyum (^{238}U) un bozunum şeması (Tosaka, 2008)

Bu serinin kütle numarası $(4n+2)$ şeklindedir (n bir tamsayıdır). ^{238}U izotopu doğada bolluk oranı %99.28'dir ve yarılanma ömrü 4.5×10^9 y'dır. Uranyumun yeryüzündeki ortalama konsantrasyonu 2-4 ppm (milyonda bir birim) arasında olup, geniş bir alanda küçük konsantrasyonlar şeklinde pek çok mineralin içinde bulunabilmektedir (Akkurt, 2014; Eisenbud, 1987; Eroğlu ve Şahiner, 2017).

1.9.2 Toryum Serisi (^{232}Th)

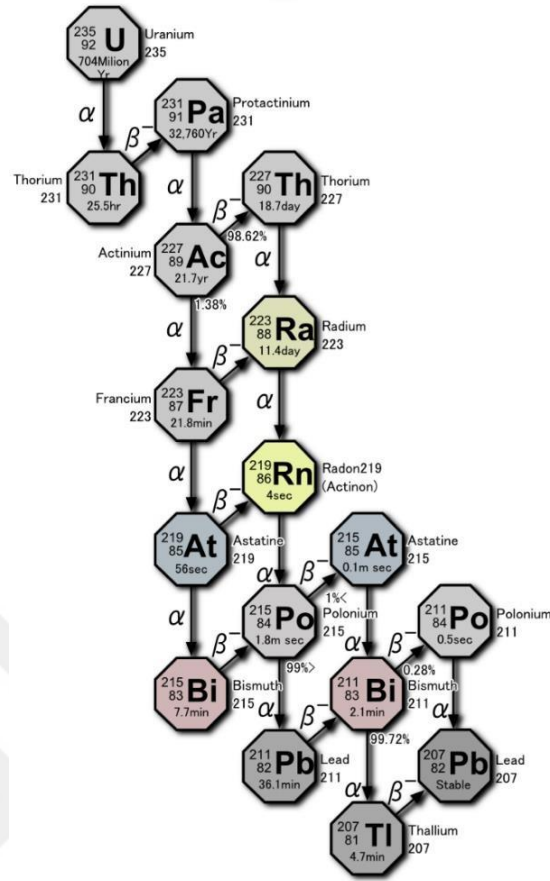
Bu serinin kütle sayıları $(4n)$ şeklindedir (Şekil 1.16). α ve β parçacıkları yayınlarak en son kararlı ^{208}Pb izotopuna dönüşene kadar bozunur. Toryumun yerkabuğundaki ortalama konsantrasyonu yaklaşık 7 ppm olup doğada uranyumdan yaklaşık üç kat daha fazla bulunur. ^{232}Th 'nin yarı ömrü 14 milyar yıl'dır (Akkurt, 2014; Eroğlu ve Şahiner, 2017).



Şekil 1.16 Toryum (^{232}Th)'un bozunum şeması (Tosaka, 2008)

1.9.3 Aktinyum Serisi (^{235}U)

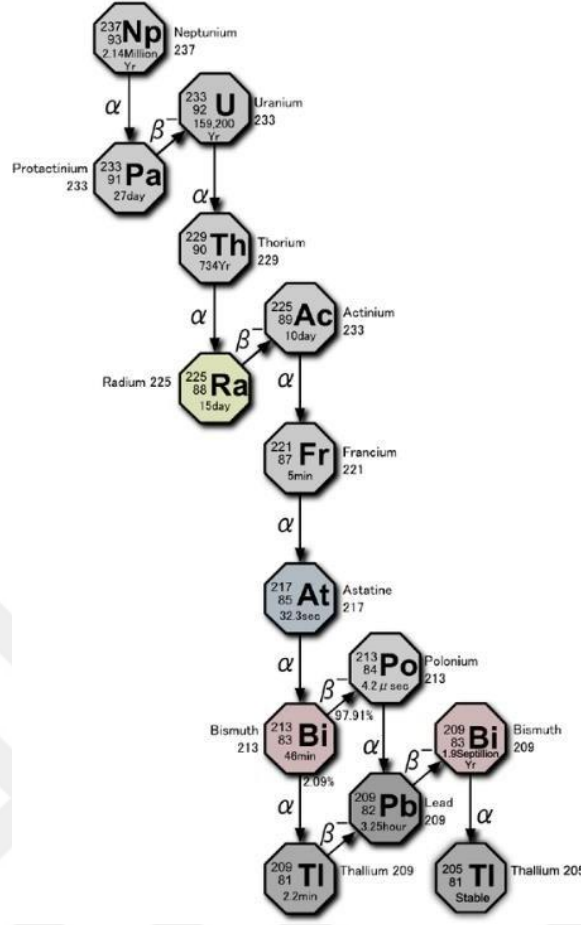
Uranyumun tabiatta bulunan bir doğal izotopu ^{235}U elementi ile başlar. Yarı ömrü 7.4×10^8 yıl olup son kararlı ürünü kurşunun bir izotopu olan ^{207}Pb 'dir (Şekil 1.17). Bu serinin kütle sayıları $(4n+3)$ şeklindedir. Bağlı bolluğu %0.72'dir (Akkurt, 2014).



Şekil 1.17 Aktinyum (^{235}U)'un bozunum şeması (Tosaka, 2008)

1.9.4 Neptünyum Serisi (^{237}Np)

Evrenin başlangıcında mevcut olan ^{237}Np , yarı ömrü 2.14 milyon yıl olması nedeniyle artık mevcut değildir. ^{238}U 'un nükleer reaktörlerde yavaş nötronlarla bombardımanı sonucu ^{239}Pu elde edilir. Oluşan ^{239}Pu 'un nötron aktivasyonundan ^{241}Pu izotopu oluşur. ^{241}Pu β yayınlayarak ^{241}Am 'a dönüşür. ^{241}Am ise α yayınlayarak ^{237}Np 'a dönüşür. Böylece nükleer fisyon kullanılarak Neptünyum serisi yapay olarak elde edilir. Kütle sayıları $(4n+1)$ şeklindedir (Martin, 2013). Neptünyum serisinin kararlı son ürünü ise ^{209}Bi 'dur (Şekil 1.18).



Şekil 1.18 Neptünyum (^{237}Np)'un bozunum şeması (Tosaka, 2008)

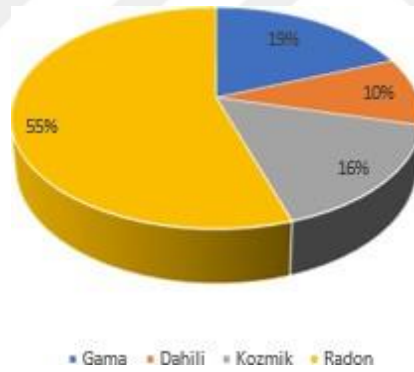
1.10 Radyum (^{226}Ra)

Radyum elementi, 1898 yılında Pierre Curie ve Marie Curie tarafından Uranyum filizi olan pekblend minerali üzerinde yaptıkları ileri araştırmalar sırasında keşfedilmiştir. Atom numarası 88, nötron sayısı 138, Erime Noktası 700°C , kaynama noktası 1737.0°C 'dir. Radyumun kristal yapısı kübik ve yoğunluğu 5.5 gr/cm^3 'dür. Tüm kayalarda ve topraklarda değişken miktarlarda bulunan ^{226}Ra , magmatik kayalar, kumtaşları ve kireçtaşlarında daha yüksek konsantrasyonlarda bulunur. Radyoaktif olan ^{226}Ra ve bozunum ürünleri, insanlar tarafından doğal olarak alınan dahili ışınlama dozunun büyük bir kısmından sorumludur. Yarılanma ömrü 1620 yıl olan ^{226}Ra , yarılanma ömrü 3.8 gün olan ^{222}Rn 'a bozunan bir emitör (ortaya çıkaran)'dır (Şekil 1.4) (Davutoğlu, 2008; Martin, 2013; Eisenbud, 1987).

^{226}Ra kalsiyum ve baryumun kimyasal bir analogudur. Kimyasal açıdan kalsiyuma benzerlik gösterdiği için kemik mineral dokusunda kalsiyum gibi davranır. Kemğin ^{226}Ra içeriğinin toplam vücut radyumunun yaklaşık %80'ini oluşturduğu tespit edilmiştir. Kemikte biriken ^{226}Ra 'dan üretilen radonun yaklaşık %70'i kana geçer ve ekspiryum ile elimine edilir. İskeletteki $1\mu\text{Ci}$ (mikroküri) ^{226}Ra , havaya 13 pCi/l ^{222}Rn exhale edilmesi ile sonuçlanır (Paquet vd., 2017; Eisenbud, 1987; Selçuk ve Yencilek, 2018).

1.11 Radon (^{222}Rn) ve Bozunum Ürünleri

Doğal radyasyon kaynaklarından elde edilen ortalama yıllık etkin doz yaklaşık 2.4 mSv 'dir, bunun yaklaşık 1.1 mSv 'i temel arka plan radyasyonuna ve 1.3 mSv 'i ise radona atfedilir (UNSCEAR, 1994). Algılanamaz bir doğal radyoaktif soy gaz olan radon, doğal kaynaklardan radyasyona maruz kalmanın en büyük tek fraksiyonu (yıllık efektif dozun %55'i) olarak katkıda bulunur (Şekil 1.19). Bu nedenle, radon radyasyondan korunma için önemli bir sorunu temsil eder (Hacıosmanoğlu, 2017).



Şekil 1.19 Doğal radyasyon kaynakları ve yıllık etkin doza katkısı

Asal gaz olan radonun bazı fiziksel özellikleri Çizelge 1.4'de verilmiştir. Diğer asal gazlar ile karşılaştırıldığında radon yoğunlukça en ağır, kaynama noktası, donma noktası, erime noktası ve kritik sıcaklığı en yüksek olandır. Soğuk suda çözülebilir. Alfa bozunum teorisine göre ana çekirdek bozunduğu zaman ortaya çıkan enerjinin büyük bir kısmı alfa parçacığı tarafından taşınırken küçük bir kısmı da ürün çekirdeğe aktarılır. Ürüne aktarılan bu enerjiye geri tepme enerjisi adı verilir. ^{226}Ra 'un ^{222}Rn 'a bozunumu

sonucu geri tepme enerjisi ile ^{222}Rn atomunun mineral içinde kat edebileceği mesafe 20-70 nm, suda 100 nm ve havada 63 μm 'dir (Yumurtacı, 2014. UNSCEAR, 2000).

Çizelge 1.4 Radonun bazı fiziksel özellikleri

Özellik	Değeri
Kaynama Noktası	-61.8 °C
Erime Noktası	-71 °C
Kritik Sıcaklığı	104 °C
Kritik Basıncı	62 atm
Normal Sıcaklık ve Basıncıta Yoğunluğu	9.96 kgm^{-3}

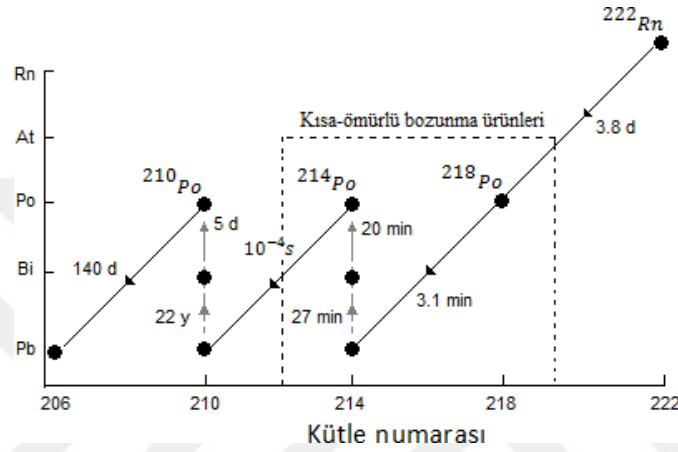
Dünya genelinde ülkelere göre değişiklik göstermekle birlikte evler, işyerleri, okullar, tüneller, metro istasyonları ve yeraltı maden ocakları gibi kapalı alanlar başta olmak üzere hemen her yerde değişik miktarda radon gazı bulunur. Radon, havadan 7.5 kat daha ağır, gözle görülemeyen, renksiz, kokusuz, tatsız bir soy gazdır. Radyum (^{226}Ra) izotopunun radyoaktif bozunum ürünüdür ve bozunma serisindeki tek gaz üründür. Radon, başta kayaç, toprak ve su olmak üzere doğada değişik miktarlarda bulunur (Şekil 1.20) (Örgün ve Çelebi, 2015).



Şekil 1.20 Radon kaynakları (Örgün ve Çelebi, 2015)

Radonun 27 izotopu vardır. Doğal olarak oluşan ana izotopları ^{222}Rn (radon), ^{220}Rn (toron) ve ^{219}Rn (aktinon)'dur. Bunlara genellikle, sırasıyla ilkel radyonüklidler olan ^{238}U , ^{232}Th ve ^{235}U doğal radyoaktif serisinin üyeleri olan radyum izotoplarının (^{226}Ra , ^{224}Ra ve ^{223}Ra) bozunum ürünleri olarak rastlanır (Paquet vd., 2017). ^{222}Rn , ^{220}Rn

ve ^{219}Rn izotoplarının yarı ömürleri sırasıyla 3.8 g, 56 s ve 4 s'dir. Ölçümlerde ^{222}Ra 'un dikkate alınmasının sebebi, diğer izotoplara kıyasla yarı ömrünün uzun olması ve doğada bulunma oranının %99.27 olmasıdır. ^{222}Rn gazı kararlı hale geçmek için α ve β parçacıkları yayarak kısa yarı ömürlü ve katı olan radyoaktif bozunum ürünlerini ortaya çıkarır. Bozunum kararlı ^{206}Pb ile son bulur (Vogiannis ve Nikolopoulos, 2015) (Şekil 1.21).



Şekil 1.21 ^{222}Rn 'un bozunma ürünleri (Kendall ve Smith, 2002)

Radonun bozunum ürünleri havadaki partiküllere bağlanma eğilimindedir. Radyoaktif seride radondan sonra gelen ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi ve ^{214}Po kız çekirdekler, α ve β yayımlayan katı elementlerdir. Radonun kısa yarı ömürkü kızlarının enerjileri ve yarı ömürleri Çizelge 1.5'de verilmiştir (ICRP, 1987) (Vogiannis ve Nikolopoulos, 2015; Eisenbud, 1987).

Çizelge 1.5 Radon kızlarının aktivite ve atom başına potansiyel alfa enerjisi

Potansiyel Alfa Enerjisi					
^{222}Rn kızları:	$t_{1/2}$	(MeV)	Atom başına (10^{12} J)	Aktivite birimi başına (MeV/Bq)	(10^{-10} J/Bq)
^{218}Po	3.05 dk	13.7	2.19	3.620	5.79
^{214}Pb	26.8 dk	7.69	1.23	17.800	28.6
^{214}Bi	19.7 dk	7.69	1.23	13.100	21.0
^{214}Po	164 μs	7.69	1.23	2×10^{-3}	3×10^{-6}

1.12 Radon İçin Özel Birimler

1.12.1 Potansiyel Alfa Parçacık Enerji Konsantrasyonu (PAEC)

Radon aktivite konsantrasyonu, gazın birim hacmi başına aktivitesi olup, $Bq\,m^{-3}$ birimi ile ifade edilir. Akciğere verilen doz esas olarak havadaki radon ürünlerinin solunmasından ve bozunmaları sırasında yayılan α parçacıklarının solunmasından kaynaklanır. Radon ürün karışımının "potansiyel alfa enerji konsantrasyonu (PAEC)" miktarı, bir konsantrasyon ölçüsü olarak kullanılmıştır. PAEC, birim hava hacmindeki kısa ömürlü ürünlerin bozunmasından yayılan toplam α enerjisidir.

1.12.2 Çalışma Düzeyi (Working Level, WL) ve Denge Faktörü (F)

PAEC'nun birimi çalışma düzeyi (WL) olarak tanımlanır. Bu ilk olarak uranyum madenindeki madenciler için RaA (^{218}Po), RaB (^{214}Pb), RaC (^{214}Bi), RaC' (^{214}Po) ile dengede olan 1 litre standart havadaki 100 pCi'lik ^{222}Rn için tanımlanmıştır. Fakat insan akciğerinin radyasyona maruz kalması ^{222}Rn 'un kendisinden değil, RaA, RaB, RaC, RaC' atomlarının radyoaktif dönüşümünden ortaya çıkan α parçacıklarının akciğerlerde birikmesi ile meydana gelir. Bu nedenle 1 WL, 1 litre ($10^{-3} m^3$) havada 1.3×10^5 MeV α enerjisi emisyonu ile sonuçlanacak kısa ömürlü radon neslinin (^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{214}Po) konsantrasyonu olarak tanımlanır (Veiga vd., 2004).

$$1MeV = 1.602 \times 10^{-13} J \quad (1.72)$$

$$1WL = 1.300 \times 10^8 MeVm^{-3} \text{ ya da } 2.08 \times 10^{-5} Jm^{-3} \quad (1.73)$$

1 WL, ^{222}Rn 'nin 3700 $Bq\,m^{-3}$ denge eşdeğer konsantrasyonu (EEC)'na eşittir. EEC, kısa ömürlü ürünleri ile dengede olan radon gazının aktivite konsantrasyonu olarak tanımlanır (UNSCEAR, 2000). Buna göre:

$$1 Bq\,m^{-3} = 5.56 \times 10^{-9} Jm^{-3} = 2.7 \times 10^{-4} WL (^{222}_{86}Rn) \quad (1.74)$$

$$1\text{ WL} = 3700\text{ Bqm}^{-3} = 100\text{ pCi} \quad (1.75)$$

Denge faktörü F_{Rn} , EEC'nin radon gazı konsantrasyonuna (C_{Rn}) oranı olarak tanımlanır. Başka bir deyişle, radon ürünlerinin gerçek karışımı için PAEC'nun, radyoaktif dengede uygulanmasıdır:

$$F_{Rn} = EEC/C_{Rn} \quad (1.76)$$

F_{Rn} 'nin değeri uygulamada çok değişik olup nadiren 1 değerini almaktadır. Radonun kısa ömürlü ürünleri ile dengeye ulaşması yaklaşık 3 h'lik bir zaman diliminde gerçekleşmektedir. Bozunma ürünlerini ortamdaki uzaklaştıran herhangi bir olay, özellikle hava hızı F_{Rn} 'nin 1'den küçük olmasına neden olmaktadır (Fişne, 2002). Konutlardaki radon ve ürünleri arasındaki denge, ^{222}Rn konsantrasyonu, aerosol konsantrasyonu, havalandırma ve biriktirme süreçleri gibi faktörlere bağlıdır. F_{Rn} ile bozunum ürünleri arasında aşağıdaki eşitlik yazılabilir (Sathish vd., 2012):

$$F_{Rn} = 0.104F_{Po-218} + 0.514F_{Pb-214} + 0.37F_{Bi-214} \quad (1.77)$$

Radon ürünlerine bağlı WL aşağıdaki eşitlik kullanılarak belirlenir (Kumar vd., 2014):

$$WL = \frac{L_{Rn} \times F_{Rn}}{3700} \quad (1.78)$$

F_{Rn} değeri UNSCEAR 2000 raporuna göre iç mekan için 0.4 olarak alınır.

1.12.3 Aylık Çalışma Düzeyi (Working Level Month, WLM)

Potansiyel alfa enerjisine maruz kalma, havadaki PAEC'nun zamanla birikimini ifade eder ve çalışma seviyesi ayının (WLM) birimine sahiptir. WLM toplam radon ışınlama miktarını tanımlamak için kullanılır. WLM, 170 h'lik bir çalışma ayı boyunca 1WL'lik konsantrasyonda bir atmosferin solunmasından kaynaklanan kümülatif maruziyet olarak tanımlanır. Yani 170 h için 1 WL'lik ışınlama 1 WLM'dir. Bu durumda:

$$WLM = WL \times \text{Maruz kalma süresi (h)}/170 \quad (1.79)$$

$$1 WLM = 3.54 \times 10^{-3} Jhm^{-3} \quad \text{ya da} \quad (1.80)$$

$$1 Bqm^{-3} = 1.58 \times 10^{-6} WLM \quad \text{ve} \quad 1 WLM = 6.37 \times 10^5 Bqhm^{-3} \quad (1.81)$$

yazılabilir. Bir yıl boyunca $1 Bqm^{-3}$ radona maruz kalan evlerde 4.4×10^{-3} WLM doz oluşur (ICRP, 2010). F_{Rn} ile WLM arasında Eşitlik 1.87 mevcuttur (Marsh ve Bailey, 2013):

$$1WLM = 6.37 \times 10^5 / F_{Rn} h Bqm^{-3} \quad (1.82)$$

WLM/y ise ışınlama hızını (maruz kalma hızı) ölçmede kullanılan bir birimdir. Her ay 1 WLM'lik toplam ışınlanmaya maruz kalan bir kişi yılda 12 WLM'lik bir hızla ışınlanmış olur (Fişne, 2002).

ICRP 2007 'e göre, halk için WLM başına 9 mSv ve maden işçileri için WLM başına 12 mSv değerlerini verir. ICRP 2010 raporuna göre, radondan kaynaklanan akciğer kanseri risklerine ilişkin epidemiyolojik veriler göz önüne alınarak WLM başına nominal risk katsayısı 5×10^{-4} olarak belirlenmiştir (Harrison ve Marsh, 2012). Epidemiyolojik verilerin elde edildiği madenlerde radon nesline maruz kalmanın tipik seviyesi, yılda 10 WLM civarındadır. Bu, yılda yaklaşık 3×10^{-3} ölüm oranı veren yaklaşık 50 mSv'lik etkin bir doza karşılık gelir (ICRP, 1993).

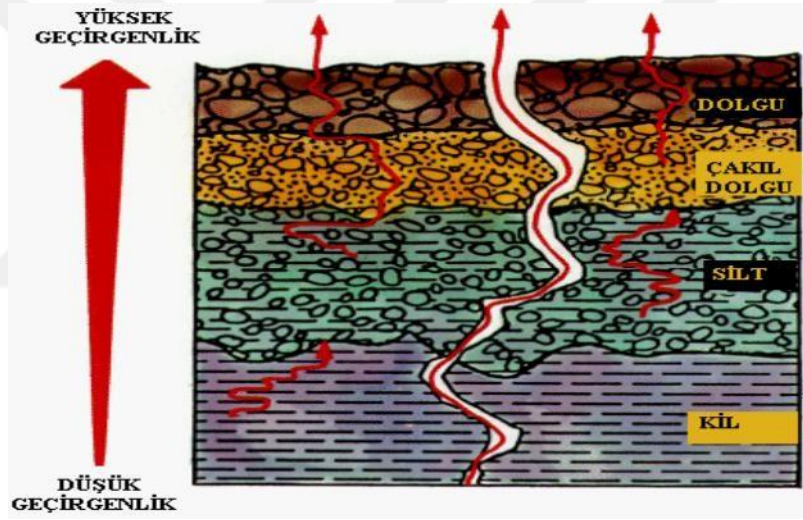
1.13 İç Mekan Radon Seviyelerini Belirlemedeki Faktörler

1.13.1 Jeolojik Faktörler

Bir evin altında yatan ana kayanın ve toprağın uranyum veya radyum içeriği, radon mevcudiyetinin önemli bir belirleyicisidir. Bina ile temas halindeki toprak, özellikle müstakil evlerde yüksek iç mekan radonunun birincil kaynağı olarak kabul edilmektedir. Konut içi radon konsantrasyonu ile bulunduğu sahadaki topraktaki radon

konsantrasyonu arasında güçlü bir ilişki olduğu kanıtlanmıştır (Reimer ve Gundersen, 1989; Carlisle ve Azzouz, 1993).

Radon, difüzyon ve konvektif akış yoluyla toprakta hareket edebilir. Kil gibi düşük geçirgenliğe sahip topraklarda, radon taşınması yavaştır ve kısa mesafelidir (Şekil 1.22). Ancak bu tür topraktaki radon konsantrasyonu çok yüksekse konut içindeki radon seviyesi de önemli seviyelere ulaşır. Kum ve çakıl gibi yüksek geçirgenliğe sahip topraklarda ise topraktaki radon konsantrasyonu normalin üzerinde olmadığında bile geniş bir alan üzerinde konvektif akışla yüksek düzeyde iç mekan radonu üretebilir. Toprağın su içeriği, topraktaki radon konsantrasyonu ve toprak gözeneklerinden taşınma hızı üzerinde güçlü bir etkiye sahiptir. Radonun sudaki difüzyonu, havadakinden altı kat daha yavaştır.



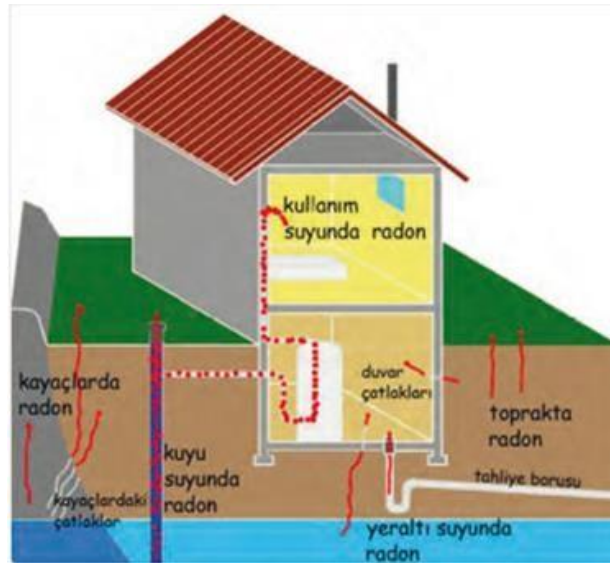
Şekil 1.22 Topraktaki radon geçirgenliği

Topraktaki çatlaklar normal taşıma süreçlerini değiştirebilir ve büyük mesafelere konvektif akış için bir kanal sağlayabilir. Örneğin, kuru killi toprak çatlayabilir ve radon gazını çok geçirgen olan çakıl veya kumdan daha fazla taşıyabilir. Fay hatları, toprağın derinliklerinden yüzeye radon getirebilir. Mosley (1992a) tarafından yapılan bir çalışmada, kanalizasyon, su hatları ve elektrik kabloları için yeraltı kanallarının, bu kanalları çevreleyen toprağın düşük geçirgenliğe sahip olduğu durumlarda uzun mesafelerde radon taşınması için bir yol sağladığı belirtilmiştir. Ayrıca Mosley (1992b), radon göçünü ve evlere girişini açıklamak için geliştirdiği modelde, konut zemin geçirgenliğinin iç mekan radon konsantrasyonlarını etkileyen en önemli parametre

olduğunu bildirmiştir. Barometrik basınç, yağış ve rüzgar hızı gibi iklim faktörlerinin radon potansiyeli üzerinde etkisi vardır. Örneğin, yüksek geçirgen topraklar için rüzgar, toprağın havalandırılmasını artırabilir ve topraktaki radon konsantrasyonunu azaltabilir. Barometrik basınçtaki değişiklikler atmosfer ile hava değişimini etkileyebilir ve bu da topraktaki radon seviyesini değiştirebilir. Ayrıca kaya veya topraktan radon yayılımı sıcaklığın artması ile azalır (Stowe, 1994).

1.13.2 Konut Özellikleri

Radon gazı yerkabuğunda oluştuğundan dolayı bir binanın stili veya yapısı, toprak altından radon girişinin belirleyicilerinden biridir (Şekil 1.23). Yeryüzünde bulunan kayaç, toprak, taş, kum, çimento gibi yapı malzemeleri, yer altı ve yüzey suları, kömür ve doğal gaz radon ihtiva eden katı ve sıvı ortamlardır ve iç mekan radon konsantrasyonu üzerinde etkili faktörlerdir (Aydoğmuş, 2019). Radon difüzyon yoluyla konuta girse bile, genellikle radon gazının toprakla temas halindeki zeminde bulunan açıklıklardan konvektif akışı daha baskındır. Radonun konveksiyonu, konut içindeki ve dışındaki sıcaklık farkı, mekanik havalandırma, ısınma cihazları ve rüzgar etkisine göre yönlendirilir. Diğer taraftan konutlarda, dış hava da iç mekan radon seviyesine katkıda bulunur. Toprağın 50 cm üzerindeki radonun en az %25'i atmosfere kaçma eğilimindedir (Graustein ve Turekian, 1990).



Şekil 1.23 Radonun evlere giriş yolları (Cabi Değerli ve Umaroğulları, 2017)

Yapı Malzemelerinde Radon

Yapı malzemeleri, doğal olarak oluşan radyoaktif potasyum (^{40}K), toryum (^{232}Th), radyum (^{226}Ra) izotoplarını içerir ve konut sakinleri için hem iç hem de dış maruziyet kaynaklarından biridir. Granit, fosfatlı kayaç ve organik maddelerce zengin şeyl gibi yapı malzemeleri yüksek radon konsantrasyonu ihtiva eder (Appleton, 2013). Yapı malzemelerinin içinde bulunan ^{226}Ra 'nın bozunmasıyla radon gazı oluşur. Yapı malzemelerindeki radon ekshalasyonunun ölçüldüğü bir çalışmada, arduvaz ve granitin diğer dekoratif malzemelerden daha yüksek olduğu gösterilmiştir (Chen vd., 2010) Başka bir çalışmada en yüksek radon konsantrasyonunun kum numunesinde ($480.71 \pm 4.52 \text{ Bqm}^{-3}$), en düşük seramik karo numunesinde ($154.30 \pm 5.24 \text{ Bqm}^{-3}$) olduğu bulunmuştur (Hussein vd., 2013).

Sularda Radon

Radon difüzyon yoluyla, yeraltı suyuna ve havaya yayılır. Su ve havadaki radon konsantrasyonu ^{226}Ra konsantrasyonundan daha yüksektir. Radon konsantrasyonu, bazı sulara yaklaşık 0-100 MBqm $^{-3}$ değerine kadar değişebilir. Radyum açısından zengin sular yüksek radon seviyelerine neden olur (Eisenbud, 1987).

Musluk suyundaki radon, içme suyunun yutulmasından ve su kullanıldığında havaya salınan radonun solunmasından kaynaklanan maruziyetlere yol açabilir. Suyun sıcaklığı arttıkça ev atmosferindeki radon miktarı da artar (UNSCEAR, 1994; 2000). İç mekan radon seviyelerindeki böyle bir etki, konuttaki toplam su tüketimine, konut büyüklüğüne ve havalandırma hızına bağlıdır. Musluk suyundaki 1000 kBqm $^{-3}$ radonun iç mekan radon konsantrasyonu seviyesinde ortalama olarak 100 kBqm $^{-3}$ artışa yol açacağı tahmin edilmektedir (UNSCEAR, 1988).

Yapılan bir çalışmada radon konsantrasyonları için medyan değerler yüzey sularında 2.2 kBqm $^{-3}$, kaynak sularında 15.1 kBqm $^{-3}$, kuyu sularında ise 10.4 kBqm $^{-3}$ olarak elde edilmiştir (Cosma vd., 2008). İç mekan radon gazının yaklaşık % 0.2'sinin yüzey sularından, % 20'sinin yer altı sularından kaynaklandığı belirtilmiştir. Bazı durumlarda teknoloji, doğal radyasyona maruz kalmayı azaltmaya yardımcı olur. Örneğin, içme suyu kaynakları yüzey sularından çekildiğinde, su arıtma işlemlerinin

kullanılması, radyum ve diğer doğal olarak oluşan radyoaktif elementlerin konsantrasyonunda azalma sağlar (UNSCEAR, 1982).

Doğal gaz ve Kömürde Radon

Doğal gazdaki radona maruziyet, doğal gaz kuyusundaki radon konsantrasyonuna bağlıdır (Resnikoff, 2011). Doğal gazın radon içeriği üretim, dağıtım ve depolama esnasında azalmaktadır. Boru hattında olan ve evlere teslim edilen radon ne olursa olsun, havalandırmasız mutfak ocakları ve ısıtıcılardan ev ortamına salınır. Radon, doğal gazla eve girdiğinde, evin içinde ve ayrıca dışarıdaki hava alışverişi yoluyla seyreltilir. Yeterli havalandırma ile radon etkisi ihmal edilecek kadar düşük seviyelere iner. Doğal gaz ölçülemeyecek kadar düşük seviyeden 50 Bqm⁻³'e kadar değişen miktarlarda radon içerebilmektedir (Örgün ve Çelebi, 2015). Sac (2009) tarafından yapılan çalışmada; doğal gaz kullanılan kapalı ortamlarda ortalama radon konsantrasyonları 111.51-236.98 Bqm⁻³ arasında iken doğal gaz kullanılmayan binalarda ise 67.63-69.68 Bqm⁻³ arasında bulunmuştur.

Kömür, uranyum ve toryum serisinin yanı sıra ⁴⁰K radyonüklidlerini içerir. Tüketilen ton kömür başına atmosfere salınan radyonüklid miktarı, kömürdeki radyonüklidlerin konsantrasyonuna, yakma yöntemine ve uçucu kül geri kazanımının verimliliğine bağlıdır. Kömür kütlesinin yaklaşık %90'ı yanma sırasında tüketilir ve radyoaktif nüklidler uçucu olmayan kısım veya "kül" içinde yoğunlaşma eğilimindedir. Yığında bazı radyonüklidlerin zenginleşmesi meydana geldiğinden, uçucu küldeki radonun bozunum ürünleri olan ²¹⁰Pb ve ²¹⁰Po konsantrasyonları orijinal kömürden 5-10 kat daha fazladır (Eisenbud, 1987). Zonguldak taşkömürü havzasında ölçülen radon gazı değerleri 253-1470 Bqm⁻³ olarak saptanmıştır (Aydoğmuş, 2019).

1.14 Radon Maruziyeti ve Akciğer Kanseri İlişkisi

1.14.1 Akciğer Kanseri

Karsinogenez, iyonlaştırıcı radyasyonun ana geç evre somatik etkisidir. Radyasyonun neden olduğu maligniteler, diğer birçok nedenden kaynaklananlardan ayırt

edilemez. Bu nedenle, insanda bu etkilerin gözlemleri, çeşitli koşullarda ve farklı nedenlerle daha yüksek oranda maruz kalan popülasyonları incelemekle sınırlandırılmıştır. Bu sonuçlar, UNSCEAR 1988 tarafından iyonlaştırıcı radyasyon risklerine ilişkin değerlendirmeler için birincil temeli oluşturur (UNSCEAR, 1988).

Akciğer kanseri, normal akciğer dokusundaki hücrelerin kontrol dışı çoğalmasına bağlı akciğer içinde bir tümör oluşturmasıdır. Dünya çapında her yıl tahmini 1.6 milyon insan akciğer kanserinden ölmektedir. Akciğer kanseri, kanser tarama programları içinde değerlendirilemeyen bir tür olduğundan başlangıç evresinde tespit edilmesi enderdir ve erken tanı ihtimali %15 civarındadır (Memorial, 2021; Akdemir, 2018).

Tanı anında hastaların yarısından fazlasında uzak metastaz olduğundan tedavi ve cerrahi tekniklerdeki gelişmelere rağmen akciğer kanserinde genel olarak sağkalım oldukça düşüktür. Hatta karaciğer ve pankreas kanseri ile birlikte en düşük sağkalım oranlarından birine sahiptir (de Groot vd., 2018). Hastalık akciğer ile sınırlı olduğunda 5 yıllık sağkalım oranı %45 oranında iken, bütün evreler için ortalama 5 yıllık genel sağkalım %10-20 arasındadır (Herbst vd., 2018; Erbaycu, 2020). Genç hastaların, hastalığın tüm evrelerinde daha agresif tedavi alma ve her evrede daha iyi sağkalım elde etme olasılığı daha yüksektir, ancak bu sınır ileri evre hastalık için çok küçüktür (de Groot vd., 2018). Türkiye’de 2020 yılında (ülke nüfusu 84.339.067) yapılan istatistiklere göre 233.834 kanser vakasından 41.264 (%17.6) ile akciğer kanseri birinci sırada yer almaktadır. Bunlardan 34.207’i erkek ve 7057’si kadın’dır. Erkeklerde ilk sırada kadınlarda ise dördüncü sıradadır (Özdoğan, 2020).

Akciğer kanserinin, küçük hücre dışı (KHDAK) ve küçük hücreli (KHAK) olmak üzere iki ana histolojik alt tipi vardır. KHDAK kendi arasında; adenokarsinom, skuamoz hücreli karsinom ve büyük hücreli karsinom olarak alt gruplara ayrılmıştır. Adenokarsinom hiç sigara içmeyenlerde en yaygın histolojidir ve erken metastaz yapma özelliğine sahip heterojen periferik kitlelerdir (Gollins vd., 2007; Barta vd., 2019).

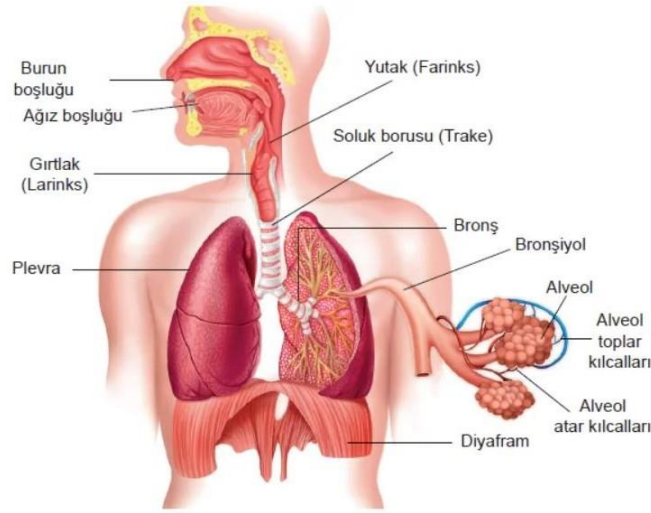
Akciğer kanseri için bilinen risk faktörleri, yaşam tarzı, çevresel ve genetik faktörleri içerir. Sigara kullanımı, akciğer kanseri için en yaygın risk faktörüdür. Diğer riskler arasında pasif sigara içiciliği, atmosferik kanserojenler, enflamasyon ve enfeksiyondan kaynaklanan akciğer hasarı, pozitif bir aile öyküsü, asbestozis, çeşitli metaller, organik kimyasallar, radyasyon, diyet faktörleri, mesleki maruziyetler yer alır. Bunların dışında insan immün yetmezlik virüsü (HIV) ve insan papilloma virüsü (HPV)

gibi infeksiyonlar, Kronik Obstrüktif Akciğer Hastalığı (KOAH), idiyopatik pulmoner fibroz ve tüberküloz geçirme öyküsünün de yüksek risk ile ilişkili olduğu belirlenmiştir. Radon gazına maruziyet çevresel toksindir ve akciğer kanser vakaların %8-15'inden sorumludur (Gollins vd., 2007; de Groot vd., 2018; Erbaycu, 2020).

Hem erkek hem de kadınlar için ortalama akciğer kanseri tanı yaşı 70'dir. Vakaların yaklaşık %53'ü 55 ile 74 yaş arasındaki bireylerde ve %37'si 75 yaşın üzerinde meydana gelmektedir. Bununla birlikte, akciğer kanseri çok genç erişkinlerde de görülür. Vakaların %10'u 55 yaşından küçük hastalarda ortaya çıkar (de Groot vd., 2018).

1.14.2 Radon ve Akciğer Kanseri ilişkisi

ICPR' de toplam akciğer kanserinin %10'unun kapalı alan radon ve onun bozunum ürünlerinden kaynaklandığı belirtilmiştir (Aydoğmuş, 2019). UNSCEAR 2019 raporunda, solunan radon ve onun ürünlerinin akciğer için kanserojen olduğu belirtilmiştir. Akciğer kanseri riski, havadaki radon soyunun solunması sonucunda akciğere salınan α radyasyonundan kaynaklanır. Akciğer kanserlerine radon gazı değil, solunan kısa ömürlü kızları neden olur, fakat yaygın olarak ölçülen radon gazıdır. Solunum yolu havayı, kan ve hava arasında oksijen ve karbondioksit değişiminin gerçekleştiği alveollere taşımak için tasarlanmıştır (Şekil 1.24). Solunan havada bulunan toz parçacıklarının çoğu, üst solunum yolu içinde birikerek exhale edilir, kesin fraksiyon öncelikle parçacıkların boyutuna ve yoğunluğuna bağlıdır. Genel olarak, 0.1 μm 'den daha büyük partiküller, nazal geçiş yolları ve alt bronşlar arasında exhale eğilimi gösterirken, daha küçük partiküllerin alveollere penetrasyon olasılığı yüksektir. Alveollerde toz yüksek oranda çözünürse, solunum yolundan hızla kana absorbe edilir. Alveolar bölgede biriken tozlar aylarca veya yıllarca akciğerde kalabilir. Alveolar duvarlarda biriken çözünmeyen toz ise fagositler tarafından uzaklaştırılır. Toz yüklü fagosit, ya mukosiliyer etki ile ağza geçer ya da lenf damarlarına ve ardından lenf düğümlerine geçer (Eisenbud, 1987).



Şekil 1.24 İnsan solunum sistemi (Bilgial, 2019)

Radyoaktif tozun inhale edilmesi ile akciğerlerin farklı bölümleri tarafından alınan doz; solunan havadaki radyonüklidlerin konsantrasyonuna, solunum hızına, radyonüklidin fiziksel özelliklerine, tozun biriktiği akciğer bölgesine, tozun uzaklaştırılma hızına, bireyler arasındaki fizyolojik ve morfolojik faktörlere, partikül boyutuna ve yoğunluğuna bağlıdır. Akciğerde biriken radyoaktif dozu hesaplamada en basit yöntem, salınan enerjinin toplam akciğer kütlesi (yetişkin insanda 1000 gr olarak alınır) boyunca eşit olarak emildiği varsayımına dayanır. Radon için enerjinin, 22 μm derinliğe kadar emildiği varsayılır (Eisenbud, 1987).

^{222}Rn , sigara içenler arasında akciğer kanserinin ikinci önde gelen nedeni ve sigara içmeyenlerde önde gelen nedeni olarak kabul edilmektedir. Ortalama 15 Bq m^{-3} (EEC) iç mekan seviyesine maruz kalan tipik bir referans popülasyon için, gözlemlenen akciğer kanseri sıklığının yaklaşık %5'inin bu radyasyona maruz kalma ile ilişkili olabileceği beklenmelidir. Nüfusun sigara içmeyen kısmı için bu oran yaklaşık %10 civarındadır (Jacobi, 1984). Radon kanıtlanmış bir insan kanserojeni olduğundan radon maruziyetinin bir halk sağlığı sorunu olarak ele alınması, hem mesleki hem de iç mekan radon maruziyetine bağlı akciğer kanseri riskinin tahmin edilmesi açısından önemlidir. WHO, bir iç mekan hava kirleticisi olarak kabul edilen radonla ilgili sağlık riskine yönelik birkaç kılavuz ve tavsiye önermiştir.

Radona maruziyetten kaynaklanan akciğer kanseri riski tahminleri, yeraltı madencilerinin epidemiyolojik çalışmalarına dayanmaktadır (Harrison ve Marsh, 2012).

Doğu Avrupa'daki madenciler arasında yüksek akciğer kanseri insidansı, radonun maden atmosferine yayılmasına bağlanmıştır. 100 WLM'den daha büyük kümülatif doza maruz kalan uranyum madencileri arasında aşırı akciğer kanseri gözlemlendiği için radon ile akciğer kanser insidansı arasında doğrusal bir ilişki olduğu belirtilmiştir (Eisenbud, 1987). BEIR VI raporunda, 50 WLM'nin altında radon maruziyeti olan madenciler için aşırı rölatif risk (ERR) WLM başına 0.012 olarak tahmin edilmiştir (UNSCEAR 2019). Radon inhalasyonundan kaynaklanan akciğer kanseri riskine ilişkin tahminler, WLM başına yaşam boyu $1.5-45 \times 10^{-6}$ arasında değişmektedir. Genel nüfus için radon kızlarının bağlandığı partikül boyutu, radon kızlarının bağlanmamış fraksiyonlarındaki farklılıklar, yavru ürün dengesine ne ölçüde ulaşıldığı, kişilerin radyosensitivitesine, solunum hızlarındaki farklılıklar risk katsayılarını etkiler (Eisenbud, 1987). Yaşam boyu aşırı mutlak risk (LEAR) hesaplamalarından, ICRP 65, erkeklerde ve kadınlarda radon kaynaklı akciğer kanseri için 2.83×10^{-4} WLM⁻¹ nominal olasılık katsayısını (ölüm) kabul etmiştir (ICRP, 2007).

Madencilerin mesleki maruziyetine ve halkın ev içi maruziyetlerine ilişkin epidemiyolojik çalışmalar, radon ve ürünlerine bağlı akciğer kanseri riskine dair güçlü kanıtlar sağlamıştır (Marsh vd., 2010).

Radona maruz kalma nedeniyle akciğer kanserinin indüksiyon süresi genellikle 5-25 yıl arasındadır (Sheen vd., 2016). 3000 rad'lık bir maruziyette tümör oluşumu için gereken ortalama süre 17 yıldır. Latent dönem yaş arttıkça kısalır: 15 yaşından önce ışınlanmış olgular için 25 yıl, 15-34 yaşlar arasında radyasyona maruz kalanlarda 15-20 yıl ve 35 yaşından büyüklerde kanser oluşumu için 10 yıl latent dönem gerekir. Sigara akciğer kanseri insidansını büyük oranda arttırır ve latent dönemini kısaltır (Kıraç ve Yüksel, 2001)

Radonun akciğer kanseri dışında, lösemi, Hodgkin lenfoma, mide, karaciğer, pankreas, böbrek, larinks, trakea, ciltte basal hücreli karsinom, skuamöz hücreli karsinom maligniteleri ile ilişkili olabileceği de belirtilmiştir (Sethi vd., 2012).

Yapılan bir çalışmaya göre, ²²²Rn karsinojen etkisinin yanında hasar etkisi göz önüne alınmış ve evde radon gazı aspiratörü kullanılarak ileri evre rektal karsinomlu bir hastaya günde en az 3 kez 15 dak boyunca radon gazı verilmiştir. Sakrum ağrısı nedeniyle günlük yaşam aktivitesini sınırlanan hastada ayrıca akciğer ve karaciğer metastazı da

tanımlıdır. Hastaya uygulanan tedavi sonunda tümör belirteçlerinde önemli ölçüde düşüş ve sakrum ağrısında azalma sağlanmıştır (Takatori vd., 2013).

1.15 Radonun Limit Değerleri

EPA'nın iç mekan radonu için belirlediği limit değer 4pCi/litre (148 Bqm⁻³)' dir. WHO tarafından konut radonu için maksimum değer 2.7pCi/litre (100 Bqm⁻³) olarak tavsiye edilmiştir (Sethi vd., 2012). ICRP 65, işyerleri ve meskenler için sırasıyla 500-1500 ve 200-600 Bqm⁻³ aralıkları önermiş, fakat daha sonra konutlardaki radon gazı için referans seviyesinin üst değeri 600 Bqm⁻³'den 300 Bqm⁻³'e revize etmiştir. Bu değerler doğrultusunda yıllık etkin doz için eylem seviyesi yaklaşık 3-10 mSv aralığı ile sınırlıdır (ICRP, 1993) (Çizelge 1.6). Dünya iç mekan radon ortalaması 40 Bqm⁻³'dür (Kumar vd., 2014). Türkiye'de müsaade edilebilir iç mekan radon konsantrasyonu 400, ortalama değer ise 81 Bqm⁻³ olarak verilmiştir (Çelebi vd., 2015).

Çizelge 1.6 Konutlarda 200 Bqm⁻³ ve 600 Bqm⁻³ eylem seviyeleri için yıllık maruziyet

Eylem Seviyesi (etkin doz)	3 mSvy ⁻¹	10 mSvy ⁻¹
Eylem Seviyesi (radon konsantrasyonu)	200 Bqm ⁻³	600 Bqm ⁻³
Radon gazına yıllık maruz kalma	1.4 MBqhm ⁻³	4.2 (MBqhm ⁻³
Ürünlerine yıllık maruz kalma	3.11 mJ h m ⁻³	9.33 mJhm ⁻³
	0.88 WLM	2.63 WLM

Çeşitli ülkeler ve uluslararası kuruluşlar tarafından benimsenen evlerde müsaade edilebilir radon konsantrasyonları Çizelge 1.7'de verilmiştir (TAEK, 2012).

Çizelge 1.7 Radon konsantrasyon limitleri (Bqm⁻³)

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

*yeni binalar için 200 Bqm⁻³

1.16 Katıhal Nükleer İz Kazıma Dedektörleri (SSNTDs)

Radon ve ürünleri α parçacığı yayınladığı için bu radyoizotopların konsantrasyon tayininde genellikle SSNTDs kullanılmaktadır. Bu dedektörler genel olarak inorganik özellik gösteren mika ve cam ile organik özellik gösteren selüloz asetat, selüloz nitrat, polikarbonat ve polietilen türevi katı materyallerdir. Bu dedektörlerin basit, dayanıklı, kararlı olmaları, yüksek duyarlılığa sahip, kolay kullanılabilir ve ucuz olmaları en büyük avantajlarıdır. Dedekte edilebilen her α parçacığı detektör üzerinde bir iz bırakır. Kimyasal amplifikasyondan sonra izler optik mikroskop altında görünür bir yapıya dönüşür. Film üzerindeki iz sayısı, ortamdaki alfa yayıcı radyonüklidlerin sayısı ile doğru orantılıdır (Tabar, 2017).

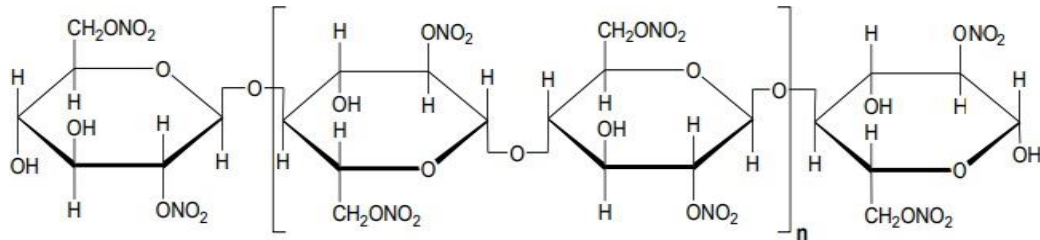
Yaygın olarak kullanılan polimer dedektörler selüloz nitrat (LR-115), selüloz asetat (CN-85), polyallyl di-glycol karbonat (CR-39) ve bisphenol A polikarbonat (makrofol)’dür. Farklı dedektör tipleri için uygun çözelti, çözeltinin sıcaklığı, normalitesi ve iz kazıma süreleri Çizelge 1.8’de gösterilmiştir (Tarakçı, 2013; Tabar, 2017).

Çizelge 1.8 Farklı dedektör tipleri için iz kazıma koşulları

Dedektör	Dedektör Materyali	Kazıma Sıcaklığı	Kazıyıcı Çözelti	Kazıma Süresi
LR-115 Tip II	Selüloz Nitrat	60 °C	%10; 2.5 N NaOH	75-100 dak
CR-39 (500 μ m)	Polikarbonat	70 °C	%25; 6.25 N NaOH	12 saat
CN-85	Selüloz Asetat	60 °C	%10; 2.5 N NaOH	20-30 dak

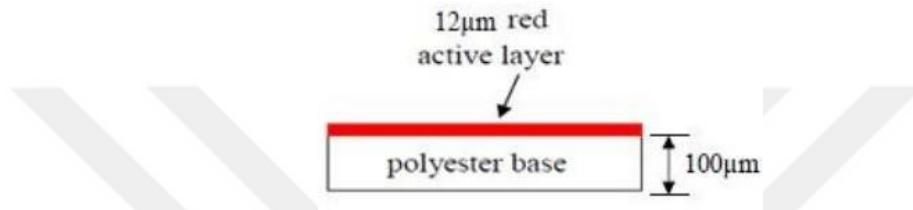
1.16.1 LR-115 Tip 2 Filmlerin Özellikleri

LR-115, ucuzluğu ve yüksek hassasiyetinden dolayı yaygın olarak kullanılır (Şekil 1.25).



Şekil 1.25 LR115’in kimyasal formülü (Selüloz Nitrat) (Mehta vd., 2013)

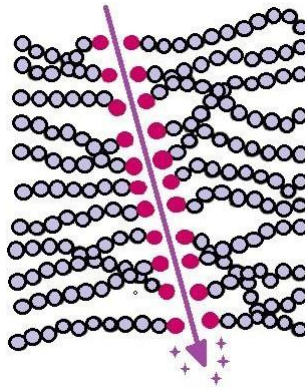
LR-115 filmleri, 12 μm kırmızı selüloz nitrat aktif katmandan ve 100 μm şeffaf polyester temel alt tabakadan oluşur. Koyu kırmızı renklidir (Leung vd., 2007) (Şekil 1.26). LR-115 filmleri 4-6 MeV enerji aralığındaki α parçacıklarına karşı duyarlıdır. Bu nedenle bu dedektörler ^{222}Rn 'dan kaynaklanan α 'ları kaydeder, fakat radonun bozunum ürünleri olan ^{218}Po 'dan 6.00 MeV ve ^{214}Po 'dan 7.69 MeV α enerjilerini kaydetmede başarılı değildir (Can, 2011). LR-115 açık olarak uygulandığından çevresel faktörlerden etkilenir ve deforme olma olasılığı yüksektir. Mekanik sürtünme, katlanma, basınç vb. gibi herhangi bir aşınmadan da etkilenir.



Şekil 1.26 LR-115 dedektörünün şeması (Mehta vd., 2013)

1.16.2 İz Oluşumu ve Kimyasal Kazıma

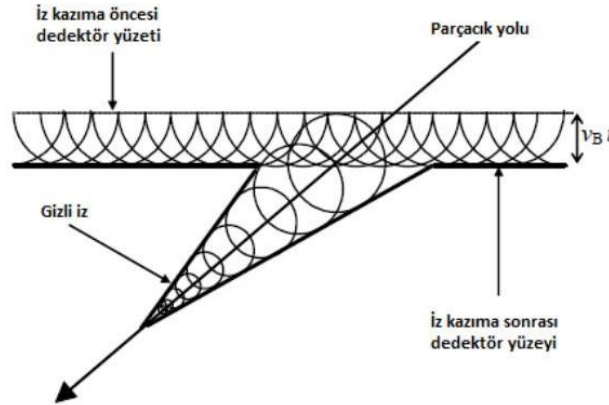
İyonize parçacıklar katı materyal boyunca ilerlerken uyarılma ve iyonizasyon ile ortama enerji aktarır. Bu enerji kaybı lineerdir ($\text{LET}=\text{dE}/\text{dx}$) ve parçacığın kütlesi, yükü, enerjisi ve etkileştiği materyale bağlı bir fonksiyondur. Enerji kaybı kritik değerin üzerine çıktığında dedektör materyali üzerinde lokal şekil değişiklikleri meydana gelir. Böylece polimerlerde moleküler zincirler kopabilir veya parçacık yolu boyunca yeni kimyasal reaktif bileşenler oluşabilir (Şekil 1.27).



Şekil 1.27 Yüklü parçacıkların içinden geçtikleri polimerin molekül zincirlerini kırması

Düşük enerjili α parçacıklarının materyaldeki LET değeri daha fazladır, bu nedenle iyonlaşma ve zincirlerdeki makaslama miktarı daha fazla olur. Lokal değişiklikler sonucunda çapı 1–10 nm arasında gizli izler oluşur. Nanometre boyutunda olan izler ancak elektron mikroskopları altında görülebilir. Bu yüzden dedektörlere kimyasal kazıma işlemi uygulandığında gizli izlerin çapları birkaç μm 'ye ulaşacağından izler optik mikroskop ile görülebilir (Tabar, 2017).

Dedektör yüzeyindeki iz büyümesinin V_T ve V_B parametrelerine dayandırılması önerilmiştir. V_T (track etching velocity), iz aşındırma oranıdır ve yüklü parçacığın karakteristik (yüklü parçacığın cinsi, enerjisi, yörüngesi, yük miktarı) özelliklerine bağlıdır. V_B (bulk etching velocity), kimyasal maddenin kazıma hızıdır ve dedektör materyalinin yapısı, aşındırma koşulları (aşındırıcının kimyasal yapısı, sıcaklık, konsantrasyon ve karıştırma koşulları gibi) ışınlama öncesi yapılan işlemler ve saklama koşulları, çevresel şartlar gibi faktörlere bağlıdır. $V = V_T/V_B$ oranı oldukça önemlidir. V fonksiyonu ile, majör ve minör eksenlerin uzunluklarını içeren iz parametreleri hesaplanabilir ve profilleri çizilebilir. V_B ve V_T 'nin sabit ve izotropik olduğu kabul edilirse iz oluşumu Huygens kuralının uygulanması ile Şekil 1.28'de görüldüğü gibi basit bir biçimde açıklanabilir.

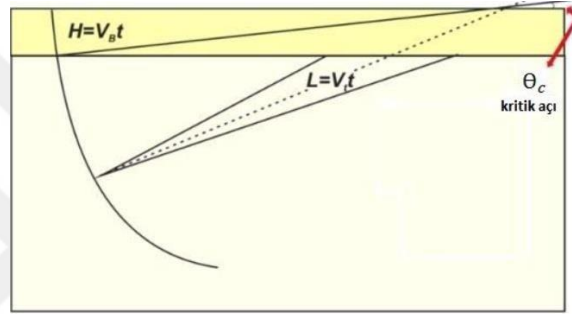


Şekil 1.28 Polimer dedektörlerde gizli iz oluşumunu açıklamak için Huygens kuralının uygulanması

Bir t kazıma süresinde dedektörün yüzeyini saran kazıma yarı kürelerinin (yarıçapları $V_B t$ olan tüm elemanter yarıküreler) içi dedektörün yeni yüzeyini verirken, kimyasal aşındırıcı parçacık yolu boyunca konik kazıma profili oluşturur. Ancak belirli

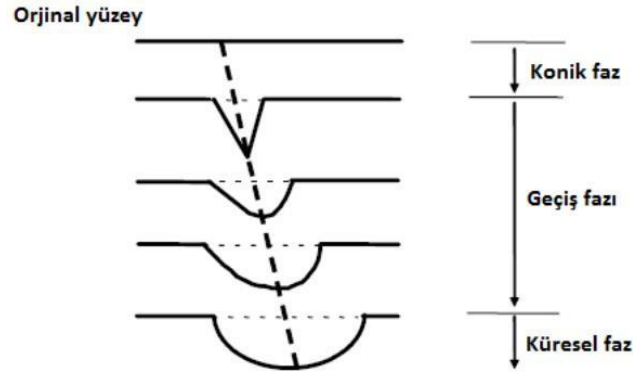
bir kritik açıdan (Θ_c) daha büyük açılarla gelen yüklü parçacıklar kazınabilen iz oluşturur. Kazıma kritik açısı Şekil 1.29 ile gösterilebilir (Leung vd., 2007; Mehta vd., 2013; Tabar, 2017). Şekil 1.29 yardımı ile kritik açı hesaplanabilir. Bunun için V_B ve V_T 'nin sabit olduğu kabul edilmiştir. Toplam iz kazıma süresi (t) sonunda kazınan materyal yüzeyi $H=V_B \cdot t$, iz uzunluğu $L=V_T \cdot t$ 'dir. Parçacık için geliş açısı $\Theta > \Theta_c$ olduğunda kazınabilen iz oluşacaktır. Kritik açı (Θ_c), iz oluşumu için yüklü parçacığın dedektör yüzeyi ile yaptığı en küçük açı değeri olarak tanımlanır ve Eşitlik 1.83 ile elde edilir (Tabar, 2017):

$$\sin \theta_c = \frac{H}{L} = \frac{V_B \cdot t}{V_T \cdot t} = \frac{V_B}{V_T} \quad (1.83)$$



Şekil 1.29 Kritik açı

Kazıma işlemi süresince izlerin şekli sırasıyla konik, geçiş ve küresel olmak üzere üç fazda değişim göstermektedir (Şekil 1.30). Kazınan izin aldığı son şekil kimyasal kazımanın bittiği ana bağlıdır. Konik fazda izin şekli koniktir, açık yüzey ise eliptiktir. Geçiş fazda izin alt tarafı daireselken açık yüzeyi hala eliptiktir. Küresel fazda ise iz küresel, açık yüzey daireseldir (Tabar, 2017).



Şekil 1.30 Kimyasal kazıma süresince izlerde oluşan faz değişimleri

1.16.3 LR-115 dedektörlerinin kalibrasyonu

Çalışmada Cherouati vd. (1988) yapmış olduğu kalibrasyon uygulamasındaki katsayı kullanılmıştır. Kalibrasyon katsayısı şu şekilde elde edilmiştir: LR-115 filmlerinin radon kalibrasyon katsayısının belirlenmesi için, 2000 cm³ hacmindeki cam kaplara sırasıyla 10, 20, 30, 40 ve 50 Bq aktivitede sıvı radyum (²²⁶Ra) standardı yerleştirilmiştir. Bu aktivitelere bağlı olarak ²²²Rn aktiviteleri Eşitlik 1.84'den elde edilir (Tabar, 2017):

$$C({}^{222}_{86}\text{Rn}) = C({}^{226}_{88}\text{Ra}) \times [1 - \exp(-\lambda t)] \quad (1.84)$$

Burada C (²²²Rn), radon aktivitesi (Bqm⁻³), C (²²⁶Ra), radyum aktivitesi (Bqm⁻³), λ, ²²²Rn'un bozunma sabiti, t ise filmlerin kalibrasyon odasında bekletildiği günü ifade eder. LR-115 filmlerinin cam kapların içine yerleştirilmiş ve denge süresi sonunda (40 g); iz yoğunlukları aktivite grafiğinin eğiminden hesaplanmış ve kalibrasyon katsayısı 0.0217 kBqm⁻³/izcm⁻²g⁻¹ olarak elde edilmiştir (İçhedef, 2013, Tarakçı, 2013).



2. KAYNAK BİLDİRİŞLERİ

İran'ın Mashhad şehrinde 150 dairede iç mekan radon konsantrasyonları minimum 12.3 Bqm^{-3} ve maksimum 135.2 Bqm^{-3} , aritmetik ortalaması 31.9 Bqm^{-3} ve yıllık efektif doz aralığı $0.25\text{-}3.78 \text{ mSv}$ olarak bulunmuştur. Tüm dairelerde, radon konsantrasyonu hem EPA'nın eylem seviyesi olan 1483 Bqm^{-3} 'den hem de WHO'nun eylem seviyesi olarak aldığı 1003 Bqm^{-3} 'den daha düşük bulunmuştur (Mowlavi vd., 2012).

Kuzey Hindistan'ın Bareilly şehrinde gerçekleştirilen çalışmada iç ortam radon, thoron ve soylarının değerleri hesaplanmış ve radonun genel ortalama değeri (87.233 Bqm^{-3}), iç mekan radon seviyesinin dünyadaki ortalama değerinden (40 Bqm^{-3}) daha yüksek, fakat ICRP tarafından önerilen eylem seviyesinden ($200\text{-}400 \text{ Bqm}^{-3}$) daha düşük bulunmuştur (Verma ve Khan, 2014).

Almanya'da yapılan bir araştırmada; oturma ve yatak odalarında radona bağlı ortalama radyasyon maruziyeti yaklaşık 49 Bqm^{-3} olduğu belirtilmiştir. Aynı çalışmada konutlardaki maksimum radon aktivite konsantrasyon değerinin 100 Bqm^{-3} 'e düşürülmesinin, Almanya'da her yıl akciğer kanserinden yaklaşık 300 ölümü önleyeceği tahmin edilmiştir (Schmid vd., 2010).

İç mekan radonunu kontrol etmek için alternatif politikaların maliyet etkinliği ve akciğer kanseri ölümlerini azaltma potansiyelinin araştırıldığı çalışmada; Birleşik Krallık evlerinde ortalama radon konsantrasyonunun 21 Bqm^{-3} olduğu belirtilmiştir. Birleşik Krallıkta her yıl akciğer kanserinden yaklaşık 1100 ölüm vakasının evdeki radonla ilgili olduğu, bunların %85'inden fazlasının 100 Bqm^{-3} 'ün altındaki radon konsantrasyonlarından kaynaklandığı ve çoğunun nedeninin radon ve aktif sigara içiciliği olduğu belirtilmiştir. Kümülatif radon konsantrasyonu Birleşik Krallık ortalaması 21 Bqm^{-3} 'e eşit olan bir evde yaşayan ve yaşam boyu sigara içmeyenler için, 75 yaşına kadar akciğer kanserinden ölüm riskinin %0.42 olduğu belirtilmiştir (Gray vd., 2009).

Hindistan'ın Lucknow ve Kanpur kentlerinde 300 konutta radon yoğunluğu 4 ay boyunca ölçülmüş ve sonuç olarak, radon konsantrasyonunun konut içindeki havalandırma şartları, inşaat malzemeleri, evin bulunduğu kat gibi birçok faktöre bağlı olduğu bulunmuştur. Ayrıca radonun doğal kaynaklardan alınan yıllık eşdeğer etkin dozun önemli bir bölümünü oluşturduğu kanıtlanmıştır (Khan, 2000).

Vaka kontrollü epidemiyolojik bir çalışmada; Amerika'nın Iowa şehrinde, aynı adreste 20 yıl oturan konut sakinlerinde, konut radon maruziyeti ile akciğer kanseri arasındaki ilişki incelenmiş ve kümülatif doz ile akciğer kanseri arasında pozitif bir ilişki olduğu gösterilmiştir (Field vd., 2000).

İspanya'da yapılan bir vaka-kontrol çalışmasında; konut radonunun akciğer kanseri için bir risk faktörü oluşturduğu, hatta resmi kılavuz seviyelerinin çok altındaki konsantrasyonlarda bile, radonun akciğer kanseri riskinde 2.5 kat artışa yol açabileceği gösterilmiştir. Ayrıca, sigara içme ve radon arasında sinerjik etki olduğu da bulunmuştur (Barros-Dios vd., 2002).

Türkiye'nin Rize ilinde yapılan bir tez çalışmasında akciğer kanserli hastaların bulunduğu evlerde yaz ve kış mevsimi iç ortam radon konsantrasyonları ölçülmüş ve kış mevsimi için hesaplanan ortalama etkin doz eşdeğerlerinin UNSCEAR'ın belirlediği standart değerden yüksek olduğu gözlenmiştir. Aynı çalışmada vaka ve kontrol grubu arasında anlamlı bir fark olmadığı belirtilmiştir (Dursun, 2016).

“Uncertainty Analysis of The Weighted Equivalent Lung Dose Per Unit Exposure to Radon Progeny in The Home” başlıklı makalede evde radon nesline birim maruziyet başına bir yetişkin için akciğerin aldığı ağırlıklı eşdeğer dozun olasılık dağılımını elde etmek için bir parametre belirsizlik analizi yapılmıştır. Dağılımın aritmetik ortalaması WLM başına 15 mSv olarak elde edilmiştir. Yani $200 \text{ Bqm}^{-3}\text{y}^{-1}$ ^{222}Rn için 13 mSv'dir (Marsh vd., 2002).

Suudi Arabistan Riyad'da iç mekan radon konsantrasyonu 786 konutta ölçülmüş. radon seviyeleri $1\text{-}195 \text{ Bqm}^{-3}$ arasında olup, ortalama 24.68 Bqm^{-3} olarak elde edilmiştir. Sonuçların %98.5'i WHO tarafından önerilen 100 Bqm^{-3} eylem seviyesinin altında olmakla birlikte ev ve oda tipi, havalandırma, mevsim ve yapı malzemelerine bağlı olarak önemli ölçüde farklılık gösterdiği bulunmuştur (Alghamdi ve Aleissa, 2014).

Birleşik Krallık'da kanser tanısı alan ve kanser olmayan çocukların yaşadıkları evlerin radon konsantrasyonlarının karşılaştırıldığı bir çalışmada; sonuçlar 2226 vaka ve 3773 kontrol evi için verilmiştir. Yüksek radon konsantrasyonları ile çocukluk çağı kanserlerinden herhangi birinin riski arasında bir ilişkiyi destekleyecek hiçbir kanıt bulunamamıştır (UKCCS Investigators, 2002).

Transilvanya (Romanya)'da 406 konutta iç mekan radon konsantrasyon ölçümleri yapılmış ve ortalama 82.5 Bqm^{-3} olarak hesaplanmıştır. Aynı çalışmada, $10^{-4}/100 \text{ Bqm}^{-3}$

$^3\text{y}^{-1}$ bir kanser risk katsayısı varsayıldığında, Transilvanya popülasyonu için yılda yaklaşık 600 akciğer kanserinin radon solumasından kaynaklandığının tahmin edilebildiği belirtilmiştir (Cosma vd., 2009).

Hindistan'da farklı lokasyonlarda yer alan konutlarda radon seviyeleri LR-115 plastik dedektör kullanılarak ölçülmüştür. Analiz sonucuna göre, ortalama iç mekan radon konsantrasyonu $39.5\text{-}215.2 \text{ Bqm}^{-3}$ arasında değiştiği bildirilmiştir. Çalışma alanlarındaki radon, toron ve bunların bozunum ürünlerine bağlı olarak tahmini inhalasyon dozu ise 0.53 ile $1 \mu\text{Svh}^{-1}$ arasında değişmiştir (Deka vd., 2003).

57.053 kişinin dahil edildiği bir Danimarka kohortu kullanılarak konut radonu ile akciğer kanseri riski arasındaki uzun vadeli ilişkinin değerlendirildiği bir çalışmada; her kohort üyesi 1 Ocak 1971'den 27 Haziran 2006'ya kadar kanser oluşumu açısından takip edilerek 589 akciğer kanseri vakası belirlenmiştir. 27 Haziran 2006'ya kadar konut adresleri izlenmiş, merkezi veri tabanlarından alınan bazı bilgiler (jeoloji, ev inşaatı vb.) kullanarak bu adreslerin her birinde radon konsantrasyonları, doğrulanmış bir regresyon modeli ile tahmin edilmiştir. Ortalama tahmini radon 35.8 Bqm^{-3} olarak belirlenmiştir. Radon ve akciğer kanseri riski arasında pozitif bir ilişki bulunmasına rağmen bu ilişkiler istatistiksel olarak anlamlı olmadığı belirtilmiştir (Bräuner vd., 2012).

Almanya'da 1990-1997 yılları arasında gerçekleştirilen iki vaka kontrol çalışmasının verileri ve önceki yayınlar kullanılarak genişletilmiş bir çalışmada; 5-35 yıl boyunca kullanılan evlerde bir yıllık radon ölçümleri yapılmıştır. Yapılan analiz, konut radon'unun akciğer kanseri için bir risk faktörü olduğuna dair kanıtları güçlendirmiştir. Aynı çalışmada histopatoloji açısından küçük hücreli karsinom riski diğer alt tiplere göre daha yüksek çıkmıştır (Wichmann vd., 2005).

Pakistan'ın Hazara bölgesinde yer alan beş farklı ilçede toplam 200 iç mekan radon konsantrasyon seviyeleri ölçülmüş ve ortalama etkin doza katkısı hesaplanmıştır. Tüm bölgedeki radon konsantrasyonları, 41 Bqm^{-3} ile 254 Bqm^{-3} arasında değişmektedir. Ortalama etkin doz değeri ise maksimum $5.1\pm 1.8 \text{ mSvy}^{-1}$, minimum $2.9\pm 1.0 \text{ mSvy}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır (Khan vd., 2012).

ABD eyaletlerinde kronik lenfositik lösemi (KLL) için insidans oranlarının konut radon seviyeleri ile önemli ölçüde ilişkili olduğu, radonun lenfosit DNA'sına zarar verdiği için onun solunması biyolojik olarak KLL'nin makul bir nedeni olduğu rapor edilmiştir (Schwartz ve Klug, 2016).

Kapalı alanlarında iç mekan radon konsantrasyonlarının aktif ve pasif yöntemler uygulanarak belirlendiği bir çalışmada; pasif yöntemle tahmin edilen ortalama radon konsantrasyonlarının aktif yöntemle yapılan ölçümlere nispeten düşük bir korelasyona (0.428) sahip olduğu gösterilmiştir. Aynı çalışmada, beklenen radon konsantrasyonu düşük veya orta ise uzun ölçüm periyotları tavsiye edilmiştir (Hasanzadeh vd., 2016).

Fransa'da radon gazı ve akciğer kanser ilişkisinin araştırıldığı vaka-kontrol çalışmasında; radon konsantrasyonlarının aritmetik ortalaması vaka evleri için 144 Bqm^{-3} , kontrol evleri için ise 138 Bqm^{-3} olarak ölçülmüştür. Sonuçların radon maruziyeti ile ilişkili akciğer kanseri riskini desteklediği belirtilmiştir (Baysson vd., 2004).

Akciğer kanseri insidansının yüksek olduğu Kore'de iç mekan radon maruziyeti ve akciğer kanseri arasındaki bağlantı için ekolojik çalışmalar gözden geçirilmiş ve aynı bölge içinde bile, çalışma yılına göre iç mekan radon konsantrasyonlarında farklılıklar gözlenmiştir. Ayrıca iç mekan radon konsantrasyonunun yüksek olduğu bölgelerde akciğer kanseri insidansı daha yüksek bulunmamıştır (Yoon vd., 2016).

Kendall ve Smith (2002) yaptıkları çalışmada; radon ve onun bozunum ürünlerinden kaynaklanan doku ve organ dozlarını tartışmışlardır. Yapılan hesaplamalar, akciğer dışında derinin bazal katmanlarında da dozun yüksek olabileceği ve bunun sonucunda olası cilt kanseri riski olabileceğini düşündürmektedir. Ayrıca karşı önlemler alınmadığı takdirde içme suyundan alınan radondan dolayı mide kanseri riskiyle karşı karşıya kalınabileceği de vurgulanmıştır.

Fernández vd. (2013) tarafından yapılan çalışmada; radonun önemli bir iç mekan hava kirleticisi ve solunum yolu hastalıkları için bir risk faktörü olduğu belirtilmiştir.

İspanya'nın Galiçya eyaletinde radon maruziyetine bağlı ölüm oranı araştırılmış ve sonuç olarak radona bağlı ölüm oranının düşük olduğu (%3-5), radon ve sigaraya birlikte maruz kalmaya atfedilen ölüm oranının yüksek olduğu (%22) belirtilmiştir (Pérez-Ríos vd., 2010).

Brezilya'nın Rio de Janeiro şehrinde, 1 yıllık süre boyunca radon ve kısa ömürlü yan ürünlerinin hem bütünleşik (entegre) hem de anlık ölçümler yoluyla gerçekleştirildiği bir çalışmada; konutlardaki radon gazı konsantrasyonu $5-200 \text{ Bqm}^{-3}$ arasında hesaplanmıştır. En düşük iç mekan radon konsantrasyonu deniz kıyısı alanlarında, en yüksek seviyeler ise dağlara yakın bulunmuştur (Magalhães vd., 2003)

ICRP 66 yayını İnsan Solunum Yolu Modeli (HRTM) kullanılarak kısa ömürlü radon nesli için HRTM absorpsiyon parametresi değerlerini tahmin etmek için gönüllü ve laboratuvar hayvan deneylerinden elde edilen yayınlanmış veriler değerlendirilmiştir. Hayvanlar üzerinde yapılan çalışmalar, kurşun iyonlarının iki absorpsiyon fazına sahip olduğunu göstermiştir: $\sim 10^1$ u ~ 15 dak'lık bir yarı zaman ile emilir, geri kalanı ~ 10 h'lik bir yarı zaman ile emilir. Ayrıca bazı kurşun iyonlarının solunum yolu bileşenlerine bağlı olduğu da gösterilmiştir. Yayınlanmış verilerin değerlendirmelerine dayanarak, radon bozunma ürünü olarak kurşun için bazı HRTM absorpsiyon parametre değerleri türetilmiştir (Marsh ve Bailey, 2013).

Mısır'ın Alexandria şehrinde farklı bölgelerdeki konutlarda LR-115 (Tip II) alfa iz dedektörü kullanılarak iç mekan radonu ölçüm çalışmaları yapılmış ve tüm bölgelerde genel ortalama radon konsantrasyonu 44 ± 16 Bqm⁻³ olarak bulunmuştur. İncelenen alan sakinlerinin aldığı ortalama yıllık etkin dozun 0.75 mSv olduğu tahmin edilmiştir (Abd-Elzaher, 2013).

Romanya'da 12 ev ve 7 blokta üçer aylık peryotla dört mevsim boyunca iç mekan radon konsantrasyonu ölçülmüş ve yıllık 105 ± 52 Bqm⁻³ olarak elde edilmiştir. İç mekan radon seviyelerinin kış/yaz oranı, evler için 2.30 ve apartman blokları için 1.20 olarak belirlenmiştir (Muntean vd., 2014).

Ürdün'ün Tafila ilçesinde dört ayrı bölgeye yerleştirilen pasif iz dedektörleri ile radon konsantrasyonu ölçülmüş ve çalışma bölgesi için ortalama 27.30 Bqm⁻³, yıllık efektif doz ise 0.665 mSv olarak hesaplanmıştır (Salameh vd., 2011).

Hindistan/Bangalore'de LR-115 kullanılarak 200 konutta iç mekan radon seviyesi için geometrik ortalama konsantrasyon değeri 32.2 ± 1.6 Bqm⁻³ bulunmuştur. Çalışmada kış-yaz oranının maksimum, kış-sonbahar oranının minimum olduğu, konsantrasyon seviyelerinin iyi havalandırılan evlere göre yetersiz havalandırılan evlerde daha yüksek olduğu da gösterilmiştir (Sathish vd., 2012).

Vaka-kontrol çalışmalarının değerlendirildiği bir makalede; iç mekan radonu ve akciğer kanseri arasında istatistik olarak anlamlı bir ilişkisi olduğu, radona eğilimli alanlarda ise radon ve akciğer kanseri arasında daha pozitif bir ilişki olduğu gösterilmiştir. Histolojik değerlendirmede ise küçük hücreli karsinom ve akciğerin skuamöz hücreli karsinomu ile güçlü bir şekilde ilişkili olduğu belirtilmiştir (Sheen vd., 2016).

Kısa ömürlü radon/thoron soyunun solunması nedeniyle dozların değerlendirilmesi için dozimetrik yaklaşımın kullanıldığı çalışmada; farklı yaş gruplarındaki farklı vücut organlarına radon soyundan inhalasyon dozları yaşa bağlı biyokinetik model kullanılarak hesaplanmıştır. ^{222}Rn ve ^{220}Rn soy konsantrasyonlarının yıllık ortalama değerleri, ICRP tarafından önerilen referans seviyeleri içinde olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca çalışmada, bir bebeğin gelişmemiş ve yumuşak cilt yapısı nedeniyle eşdeğer doz değerinin yüksek olduğu, ağızdan solunuma bağlı inhalasyon dozunun, nazal solunumdan iki kat daha fazla olduğu, bağlanma oranının aerosol konsantrasyonu ile pozitif ilişkili olduğu da belirtilmiştir (Sharma vd., 2018).

Yapılan bir çalışmada; radonun akciğer kanseri ile ilişkili bir kanserojen olduğu, radon ve tütün dumanının sinerjik etkisinin olduğu ve ABD'nde yılda tahmini 21.000 akciğer kanseri ölümünün radondan kaynaklandığı belirtilmiştir (Sethi vd., 2012).

Konut radonundan kaynaklanan akciğer kanseri riskindeki değişkenliği ölçmek ve konut özelliklerine bağlı radondaki değişkenliği açıklamak için çok seviyeli regresyon modelleri kullanılmıştır. Yüksek riskli alanlar ve yüksek tahmin edilen radon ve sigara içme oranlarına sahip alt popülasyonlar için bölgenin ortalama yaşam boyu akciğer kanseri riski %0.15-1.8 arasında tahmin edilmiştir (Chahine vd., 2011).

1991 ve 2011 yılları arasında Moldova Cumhuriyeti'nde bulunan farklı binalardan toplanan hava örneklerinde radon konsantrasyonlarının izlenmesinin sonuçlarına göre; ^{222}Rn konsantrasyonlarının 1800 Bqm^{-3} seviyesinin tespit edildiği 1998 yılı hariç olmak üzere $92.0\text{-}179.1 \text{ Bqm}^{-3}$ aralığında değiştiği sonucuna varılmıştır (Ursulean vd., 2012).

Radon maruziyetinin sağlık üzerindeki etkileri konusunda yapılan kapsamlı bir çalışmada; radon maruziyetinin akciğer kanserine neden olabileceğinin bilimsel olarak kanıtlandığı, ancak akciğer kanseri dışındaki hastalıklarla ilişkisinin tartışmalı olduğu bildirilmiştir (Kang vd., 2019).

Radon gazı konsantrasyon değerlerini sürekli olarak izleyebilen ve bir web panosu aracılığıyla uzaktaki kullanıcılara gösterebilen uygun maliyetli bir IoT radon gazı izleme sisteminin sunulduğu bir çalışmada; sistem, kullanıcılara uyarı gönderebilmekte ve anormal değerlerin tespit edilmesi durumunda akıllı bir şekilde radon gazı konsantrasyonunu azaltmak için hafifletme cihazlarını (güçlü havalandırma gibi) etkinleştirebilmektedir (Blanco-Novoa vd., 2018).

Libya'nın güneyindeki meskenlerde radon konsantrasyonları ölçülmüş ve tüm araştırma için ortalama iç mekan radon konsantrasyonu $29.7 \pm 3.8 \text{ Bqm}^{-3}$, ortalama etkin doz oranı ise 0.67 mSvy^{-1} olarak hesaplanmıştır (Amin vd., 2014).

Gana'da yapılan bir çalışmada; CR-39 ve LR-115 dedektörleri duyarlılık, avantaj-dezavantaj ve metodoloji açısından kar ıla tırılmı tır. Çalışma sonucunda dedektörlerin hem kısa hem de uzun vadeli ölçümler için kullanılabilir olduğu, ancak LR-115'in hassasiyetinin CR-39'a kıyasla daha yüksek olduğu belirtilmiştir (Kpordzro, 2021).





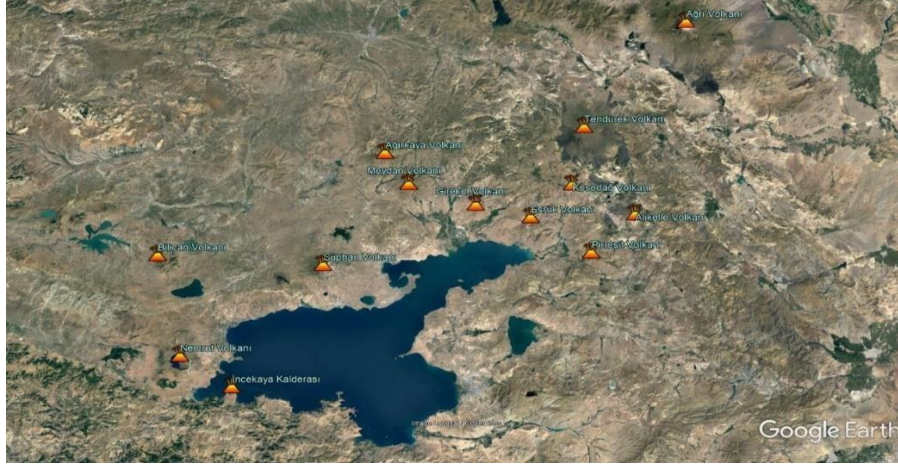
3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Çalışma Bölgesinin Tanıtılması

Van ili dünya üzerinde 42°40' ve 44°30' D boylamları ile 37°43' ve 39°26' K enlemleri arasındadır. Türkiye üzerinde ise Doğu Anadolu Bölgesi'nin Yukarı Murat-Van Bölümünde yer alan Van gölü kapalı havzasındadır. Kuzey ve kuzeybatıda Ağrı ili, batıda Van Gölü ve Bitlis ili, güneybatıda Siirt ili, güneyde Şırnak ve Hakkari ili ile komşudur. Doğusunda ise İran Devleti yer alır. 21.334 km² yüzölçümü ile Türkiye'nin 6. büyük ili olan Van'ın rakımı yaklaşık 1730 m'dir (Van İl Kültür Turizm Müdürlüğü, 2023).

Van'ın iklimi şiddetli karasaldır. Batı'da batı yönlü rüzgarlar baskın olduğu halde doğu kesimde ilkbahar ve yaz mevsiminde batı yönlü, sonbahar ve kış mevsiminde ise doğu yönlü rüzgarlar etkilidir. Van'da Akdeniz ve Karasal yağış rejimleri arasında geçiş tipi bir yağış rejimi görülür. Yağışın en fazla olduğu mevsim ilkbahardır (%39). Bunu kış (%26.6), sonbahar (%27.2) ve yaz mevsimi (%7.1) izler. Bölgede kış mevsimi çok uzun, şiddetli ve karlı iken yaz mevsimi ise çok kısa ve bölgenin en kuzeyindeki yüksek platolar da bile oldukça sıcak geçer. Kışın 150 güne yakın 0°C'nin altında geçer, yazın ise 20 gün +30°C'nin üstündedir. Kışın şiddetli soğuktan dolayı kasım ayında başlayan donlanma Nisan ayında son bulur ve yağın kar yaklaşık 3 ay yerde kalmaktadır (Görentaş, 2015; Gazioğlu Şensoy vd., 2019).

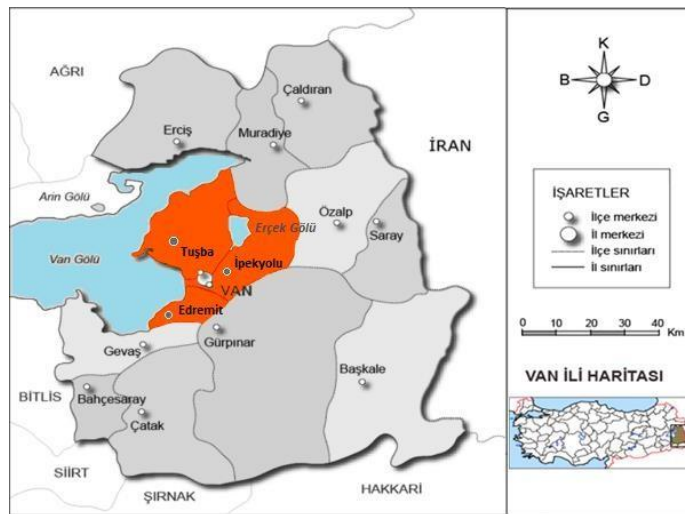
Bitlis ve Van ili sınırları arasında bulunan Van gölü, dünyanın en büyük sodalı ve ayrıca 4. büyük kapalı havza gölüdür (Çiftçi vd., 2008). Van gölü havzası yaklaşık 100.000 yıl önce oluşmuştur ve volkanik topografya bakımından oldukça zengindir. Havza içinde Nemrut (3542 m.), Süphan (4434 m.), Esrük (3100 m.), Girekol (2140 m.), Ağırkaya (3180 m.), Pirreşit (3084 m.), Bilican (2725 m.), Alikelle (2696 m.), Köseadağ (2700 m.) gibi volkanik dağlar bulunmaktadır (Şekil 3.1). Havzada en fazla gözlenen kaya grubu lavlar ve volkanik kayalardır (Akköprü vd., 2019). Van Gölü'nün batısı, kuzeyi ve kuzeydoğusunda Pliyo-Kuvaterner boyunca büyük miktarlarda bazaltik, dasitik ve andezitik volkanitler püskürmüştür. Gölün güneyinde, Paleozoyik yaşlı olduğu tahmin edilen Bitlis Masifi (albit-kuvars, granat mikalı şist, kuvarsit, radyolaritler) yer almaktadır (Degens vd., 1984). Kuzeybatı kesimlerinde bolca fosil içeren yaşlı Adilceviz kireçtaşları çökelmiştir (Yeşilova and Yakupoğlu, 2007).



Şekil 3.1 Van gölü çevresindeki volkanik dağlar (Google Earth)

Van deprem yöresi olmakla birlikte tektonik bakımdan oldukça aktif bir özellik ve yüksek risk taşımaktadır. Bu tektonik unsurlardan bazıları Bitlis bindirme fayı, Erciş Fayı, Çaldıran Fayı, Süphan Fayı, Başkale Fayı, Hasan Timur Fay Zonu, Doğubeyazıt Fay Zonu, Yüksekova-Şemdinli Fay Zonu, Beyüzümü fayı ve Kuzeydoğu Anadolu Fay Zonu'dur. Bu faylar sismik olarak aktif durumda olduğundan Van yöresi, bu fay zonlarının tehdidi altındadır (Işık vd., 2012).

Van nüfusu 2021 yılına göre 1.141.015'dir. Van ilinin 13 ilçesi vardır. Bunlar arasında; İpekyolu (339.952), Tuşba (163.320) ve Edremit (128.555) nüfus açısından en kalabalık ilk dört ilçe arasında yer alan merkez ilçelerdir (Nufusu.com., 2012). Mevcut çalışma merkez ilçelerde yürütülmüştür (Şekil 3.2).

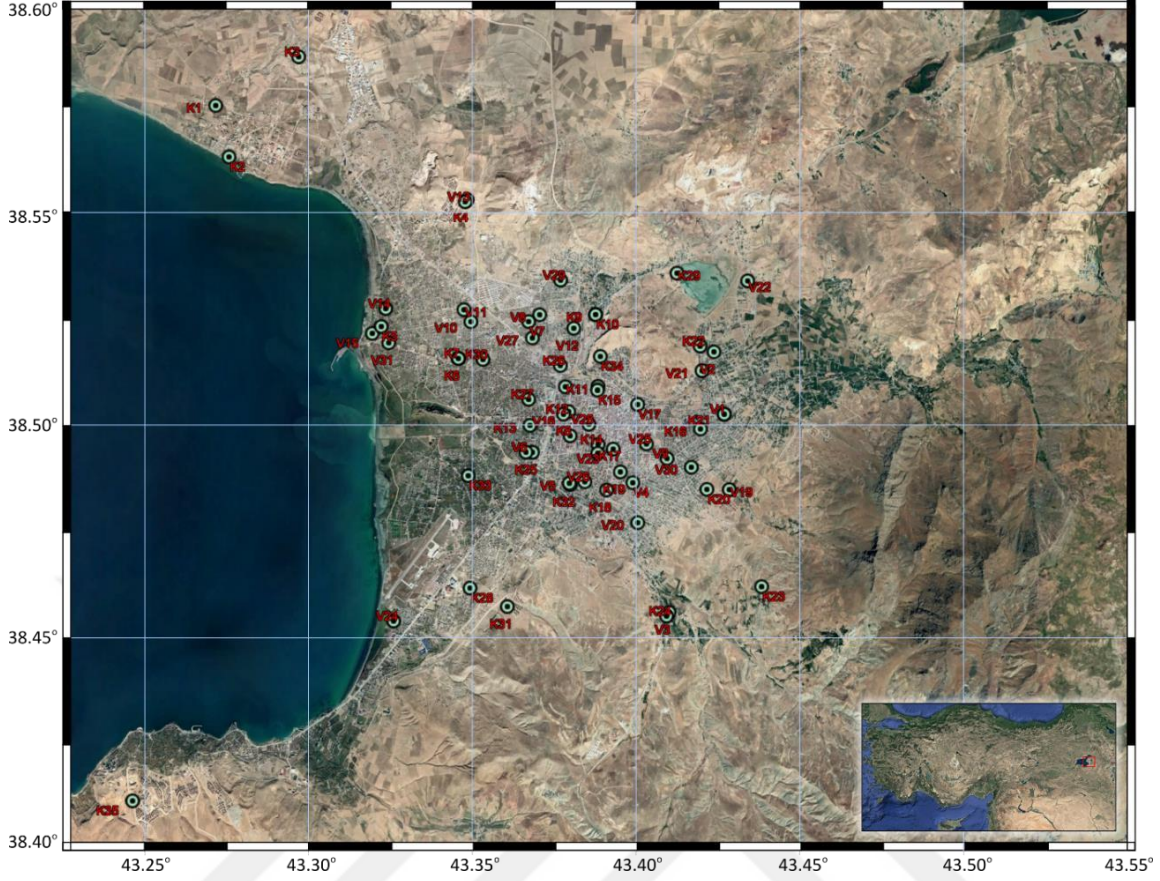


Şekil 3.2 Van ili haritası ve çalışma alanı (AFAD, 2023)

3.2 Vaka ve Kontrol Grubu Adreslerin Belirlenmesi

Van il merkezinde oturan, yaşları 35-80 arası 31'i hasta grubu olmak üzere toplam 66 konut çalışmaya dahil edildi. Araştırmaya katılanların gönüllü olması ve hasta grubunun akciğer kanseri tanısı almış olması, aynı evde en az 10 yıl ikamet edilmesi ve bir yıl boyunca taşınma ihtimallerinin olmaması çalışma kriterleri arasında yer aldı. Araştırma için Van YYÜ Dursun Odabaşı Tıp Merkezi Dahili Göğüs Hastalıkları ve Medikal Onkoloji polikliniklerindeki hasta dosyaları tarandı ve hastaların ev adresleri alındı. Kontrol grubu adresler ise Van il merkezini temsil edecek şekilde seçildi. Seçilen adreslerde oturanlar önce telefonla arandı ve kendilerine kısa bilgi verildikten sonra konutlarında ziyaret edildi. Konut seçiminde, merkez ilçelerde düzgün dağılım olmasına özen gösterildi. Ayrıca konut sakinlerine çalışmanın aylık periyotlarla bir yıl süreceği ve çalışmadan mümkün olduğunca ayrılmamaları konusunda ikna edildi. Çalışmaya katılanların onayı alındıktan sonra konut sakinlerine, aile sağlık öyküsü, demografik özellikler, mesleki maruziyetler, sigara öyküsü, önceki hastalıklar, adreste oturma süresi ve evin özellikleri (yapı malzemesi gibi) ile ilgili detaylı bir anket uygulandı (Ek 1) Önceden hazırlanmış örnek LR-115 plastik film konutta ikamet edenlere gösterildi ve daha sonra belirlenen tarihte evlere yerleştirileceği anlatıldı. Konut ziyaretleri Ağustos 2021'de yapıldı ve 2 Eylül 2021 tarihinde dedektörler konutlara yerleştirilmeye başlandı.. Ayrıca vaka ve kontrol evleri haritada belirtilmiştir (Şekil 3.3). Çalışma kapsamında yer alan konutların konumları Çizelge 3.1'de gösterilmiştir

Çalışmaya başlanmadan önce Van YYÜ Girişimsel olmayan Etik Kurul onayı alındı (Karar No:2019/08-04) (EK-2). Aynı zamanda bu çalışma Van YYÜ BAP Birimi tarafından desteklenmiştir (Proje ID No:8412).



Şekil 3.3 Vaka ve kontrol evlerine ait konumlar

Çizelge 3.1 Çalışma kapsamındaki konutların konumları

Kontrol Evleri			Vaka Evleri		
Dedektör No	Enlem	Boylam	Dedektör No	Enlem	Boylam
K1	38.576.675	43.270.323	V1	38.502.524	43.426.392
K2	38.564.368	43.274.361	V2	38.517.466	43.423.264
K3	38.588.305	43.295.896	V3	38.455.129	43.409.467
K4	38.553.905	43.347.781	V4	38.486.123	43.398.407
K5	38.523.626	43.321.199	V5	38.486.015	43.378.947
K6	38.515.957	43.344.882	V6	38.493.446	43.365.645
K7	38.515.957	43.344.882	V7	38.524.793	43.366.459
K8	38.497.377	43.379.195	V8	38.526.433	43.369.848
K9	38.526.449	43.387.011	V9	38.491.918	43.408.887
K10	38.526.449	43.387.011	V10	38.524.771	43.348.732
K11	38.509.151	43.377.729	V11	38.527.653	43.346.611
K12	38.502.578	43.377.151	V12	38.523.181	43.380.316
K13	38.499.881	43.366.870	V13	38.553.430	43.347.132
K14	38.495.294	43.387.763	V14	38.527.946	43.322.559
K15	38.508.321	43.387.591	V15	38.521.987	43.318.433
K16	38.498.986	43.419.125	V16	38.503.187	43.378.747

Çizelge 3.1 Çalışma kapsamındaki konutların konumları (devam)

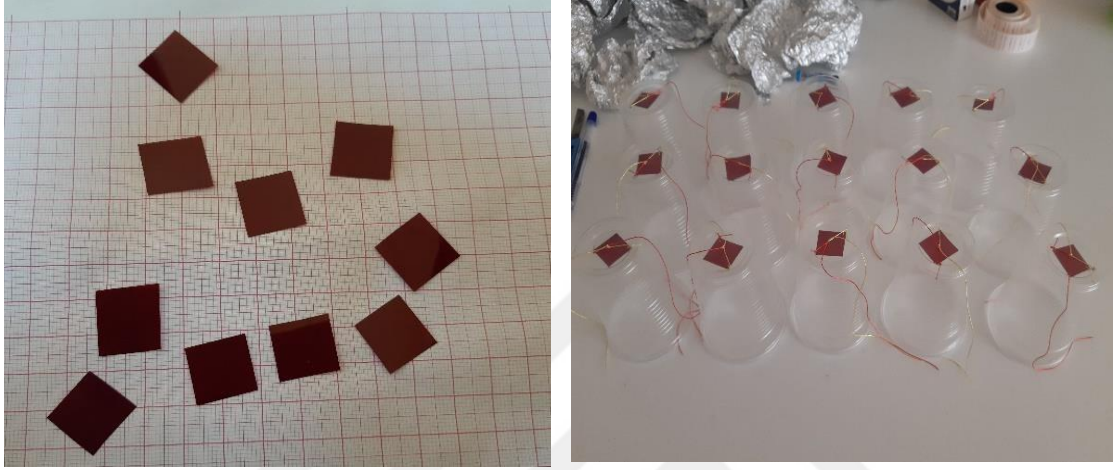
Kontrol Evleri			Vaka Evleri		
Dedektör No	Enlem	Boylam	Dedektör No	Enlem	Boylam
K17	38.493.177	43.387.670	V17	38.504.876	43.399.902
K18	38.484.382	43.390.387	V18	38.509.274	43.387.749
K19	38.488.717	43.394.596	V19	38.484.471	43.427.904
K20	38.484.519	43.421.057	V20	38.476.551	43.399.928
K21	38.502.524	43.426.392	V21	38.512.953	43.419.618
K22	38.518.832	43.419.030	V22	38.534.458	43.433.588
K23	38.461.352	43.437.672	V23	38.494.190	43.392.404
K24	38.454.220	43.408.743	V24	38.452.887	43.325.038
K25	38.493.423	43.367.639	V25	38.495.426	43.402.592
K26	38.514.249	43.376.189	V26	38.486.358	43.383.705
K27	38.506.134	43.366.464	V27	38.520.858	43.367.606
K28	38.460.837	43.348.508	V28	38.500.149	43.384.953
K29	38.536.312	43.411.958	V29	38.534.707	43.376.279
K30	38.515.711	43.352.436	V30	38.489.830	43.416.322
K31	38.456.457	43.360.045	V31	38.519.708	43.323.490
K32	38.485.707	43.379.289			
K33	38.487.794	43.347.938			
K34	38.516.394	43.388.475			
K35	38.409.874	43.245.582			

3.3 LR-115 Plastik Filmlerin Hazırlanması ve Konutlara Yerleştirilmesi

Dedektörlerin hazırlanması ve konutlara yerleştirilmesinde aşağıdaki işlemler sırasıyla yapıldı:

- Çalışmada LR-115 (Tip2, tek taraflı) film dedektörleri kullanıldı.
- Filmler 1.5 cm x 1.5 cm uzunluğunda el değmeden pamuklu eldiven yardımıyla kesildi.
- Duyarlı yüzeyi dışa gelecek şekilde, çapraz köşelerinden renkli ip geçirildi ve iki farklı iğne aracılığı ile plastik bardağın tabanından geçirildi ve ipler birbirine düğümlendi. İğne delikleri patafix ile kapatıldı (Şekil 3.4).
- Hazırlanan bardaklar konutlara yerleştirilmeden önce üzerine numara yazıldı ve yedekleriyle birlikte iki adet oturma odasına iki adet yatak odasına olmak üzere toplamda dört adet olacak şekilde hazırlandı.
- Bardaklar alüminyum folyo ile sarıldı (Şekil 3.5a).

- Filmler evlere yerleştirilirken güneşten, pencereden, kapıdan ve klima gibi havalandırma kaynaklarından uzak, yerden yaklaşık 50-100 cm yükseklikte ve duvardan yaklaşık 10 cm uzaklıkta olacak şekilde yerleştirildi (Şekil 3.5b).
- Bir ay sonra bardaklar toplanırken tekrar alüminyum folyo ile sarılarak analiz için laboratuvara getirildi.



Şekil 3.4 Filmlerin kesilmesi ve bardak tabanlarına yerleştirilmesi



Şekil 3.5 a. Plastik bardakların folyo ile kaplanması. b. Filmlerin oda içindeki yerleşimi

3.4 Kimyasal Kazıma İşlemi

Kimyasal kazıma işlemi için aşağıdaki adımlar izlendi:

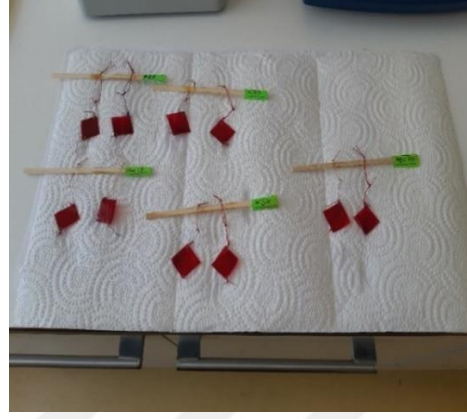
- Laboratuvara getirilen LR-115 filmleri pamuklu eldiven kullanılarak bir makas yardımı ile tabandaki ip kesildi ve önceden üzerinde kodların yazıldığı etiketlenmiş çubuklara takıldı. Etikete yakın olan film yatak odasına diğeri ise oturma odasına aittir.
- Beher içinde %10'luk NaOH çözeltisi hazırlandı. Her film için 25 ml distile su kullanıldı. Çalışmada 5 adet 50 ml'lik beherler kullanıldı. Bu nedenle 250 ml NaOH çözeltisi hazırlandı ve her bir behere 50 ml konuldu. Beherler daha önce 60 (± 1)°C'ye kadar ısıtılan manyetik ısıtıcıdaki banyoya yerleştirildi (Şekil 3.6).



Şekil 3.6 NaOH çözeltisinin hazırlanması ve filmlerin banyo işlemi

- Filmler beherin çeperlerine, tabanına ve birbirlerine değmeyecek şekilde çözelti içine konuldu. Filmler çözelti içinde hareket ettirilmemeli ve banyo süresince sıcaklık sabit kalması sağlandı.
- Kimyasal kazıma işlemi 120 devirde 100 dak olacak şekilde ayarlandı.
- Filmler daha sonra manyetik karıştırıcıda distile su içinde yaklaşık 20 dak karıştırılarak durulandı ve kurumaya bırakıldı (Şekil 3.7).
- Kurutma işleminden sonra filmler lam içerisine konuldu ve her filmin altına 1 cm² kesilmiş milimetrik kağıt yerleştirildi, akabinde lamların bir tarafı etiketlendi. Etikete yakın yerleştirilen film yatak odasını diğeri ise oturma odasını temsil etmektedir (Şekil 3.8).

- Lamların sağ ve sol uçları, filmlerin kaymaması ve düşmemesi için bantlandıktan sonra mikroskopta incelenmeye hazır hale getirildi.



Şekil 3.7 Filmlerin durulanması ve kurutulması



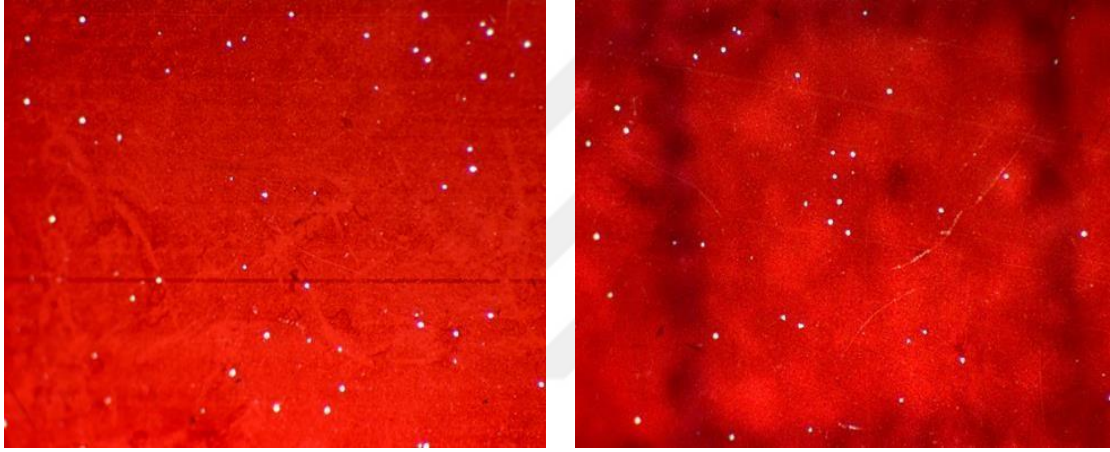
Şekil 3.8 Filmlerin lamaların arasına yerleştirilmesi

3.5 İz Sayma İşlemi

Dedektördeki α 'ların izlerini görüntülemek için Euromex marka optik mikroskop ve ImageFocus Plus V2 görüntü aktarım sistemi kullanıldı (Şekil 3.9). Mikroskobun 100x büyütme objektifi seçildi. 1cm² alan için izler sayıldı ve not edildi (Şekil 3.10).



Şekil 3.9 Filmleri görüntülemeye kullanılan Euromex optik mikroskop (IS.1153-PLi)



Şekil 3.10 Farklı iki konuta ait LR-115 dedektör görüntüsü

3.6 Radyolojik Etkilerin Hesaplanması

3.6.1 İç Mekan Radon Konsantrasyonunun Hesaplanması

Radon konsantrasyonu Eşitlik 3.1'e göre hesaplanmıştır (Baran 2013):

$$C_{Rn} = k_f x \rho / d \quad (3.1)$$

Burada C_{Rn} , radonun iç mekan konsantrasyonunu (Bqm^{-3}), ρ dedektördeki net iz yoğunluğunu ($izcm^{-2}$), d maruz kalma süresini, k_f ise kalibrasyon katsayısını ifade eder ve değeri $0.0217 \text{ kBqcm}^2/g/izm^3$ 'dir.

Net iz yoğunluğu (ρ), herhangi bir ortamda ışınlanan film üzerinde gözlenen iz yoğunluğu ile ışınlanmamış bir film üzerindeki iz yoğunluğu arasındaki farktır. Background (arka plan radyasyonu) üretiminden kaynaklanan hataları ve filmlerin saklama koşullarından kaynaklanan α kontaminasyonunu temsil eder ve dedektör yaşı ile orantılı olarak değişim gösterebilir. Çalışmada background radyasyonu için her ay alüminyum folyoya sarılı numunelerden biri laboratuvarında bekletildi ve iz sayım işlem prosedürü uygulandı.

3.6.2 Yıllık Etkin Doz (D_{etkin})

Yılda 7000h'lik bir iç mekan kullanımı için radon ve bozunum ürünlerinin solunmasından kaynaklanan yıllık etkin doz (%80 doluluk faktörü), Eşitlik 3.2 kullanılarak tahmin edilmiştir:

$$D_{etkin}(mSv\cdot y^{-1}) = [(0.17 + 9F_{Rn}) \times C_{Rn}] \times 7000 \times 10^{-6} \quad (3.2)$$

Doz tahmininde, UNSCEAR 2000 Raporu tarafından benimsenen [radon gazı için $0.17 \text{ nSv (Bqhm}^{-3})^{-1}$, radon soyu için $9 \text{ nSv (Bqhm}^{-3})^{-1}$] doz dönüştürme katsayıları kullanılmıştır. Yani 1 Bqhm^{-3} denge eşdeğer radon konsantrasyonunun (EEC) solunması ile alınan etkin doz 9 nSv olarak belirlenmiştir. Burada F_{Rn} , iç ortam radonu için denge faktörüdür. Mevcut hesaplamalarda, UNSCEAR 2000 Raporunda belirtilen denge faktörü ($F_{Rn} = 0.4$) genel değeri kullanılmıştır (Kumar vd., 2014).

3.6.3 Akciğer için Yıllık Etkin Eşdeğer Doz ($D_{eş}$)

Eşdeğer doz Eşitlik 3.3 kullanılarak tahmin edildi (Azhdarpoor vd., 2021):

$$D_{eş} = D_{etkin} \times W_R \times W_T \quad (3.3)$$

Burada W_R , radyasyon ağırlık faktörü olup α partikülü için 20'dir. W_T ise doku ağırlık faktörü olup akciğer için 0.12'dir.

3.6.4 Çalışma Düzeyi (WL) ve Aylık Çalışma Düzeyi (WLM)

Çalışma düzeyi açısından ürün konsantrasyonu Eşitlik 3.4 kullanılarak değerlendirilmiştir (Kumar vd., 2014):

$$WL_{Rn}(mWL) = \frac{C_{Rn} \times F_{Rn}}{3.7} \quad (3.4)$$

Ayrıca çalışma düzeyi ayı (WLM) cinsinden doz hesaplanmıştır.

3.6.5 Yaşam Boyu Ölüm Riski (LFR) ve Kanser Riski (LCR)

ICRP 1993 Raporunda Nominal olasılık katsayısı WLM başına 3×10^{-4} olarak belirlenmiştir. Buna göre LFR değeri Eşitlik 3.5 kullanılarak tahmin edilmiştir (Badhan vd., 2012):

$$LFR = D_{etkin} \times 3 \times 10^{-4} WLM^{-1} \quad (3.5)$$

Radon maruziyetine bağlı LCR değeri Eşitlik 3.6 kullanılarak tahmin edildi:

$$LCR = D_{etkin} \times LE \times RF \quad (3.6)$$

Burada LE ortalama yaşam ömrünü temsil eder ve bu değer Türkiye için 2022 verilerine göre yaklaşık 78 yıl olduğu tahmin edilmiştir (Vikipedi, 2022). RF ise nominal risk katsayısını gösterir. ICRP1990 raporunda RF değerinin $5 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ olduğu belirtilmiştir (Otansev, 2021).

3.7 İstatistik Değerlendirme

İncelenen özellikler için tanımlayıcı istatistikler; ortalama ve standart sapma olarak ifade edildi. Verilerin dağılımının normalliği Kolmogorov-Smirnov, varyansların homojenliği Levene testi ile test edilmiştir. Bağımsız iki grup karşılaştırmalarında normal dağılım koşulu sağlanan durumlarda T-Testi, normal dağılım koşulu sağlanmayan

durumlarda Mann Whitney U testi kullanıldı. Gruplar arasındaki farklılıkları değerlendirmek için sürekli değişkenler için normal dağılım koşulu sağlandığında Tek yönlü Varyans Analizi (ANOVA), normal dağılım koşulu sağlanmadığında Kruskal wallis testi yapıldı. Kategorik değişkenler için ki-kare testi kullanıldı. İstatistiksel anlamlılık düzeyi $p < 0.05$ olarak alınmış ve analizler için SPSS istatistik yazılım versiyonu 19.0 (SPSS Inc, Chicago, III, ABD) paketinden yararlanıldı. Radon konsantasyonunun ortalama değeri ve ortalamadaki belirsizliği hesaplamada aşağıdaki eşitlikler kullanıldı (Tarakçı, 2023):

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \quad (3.7)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \quad (3.8)$$

$$\Delta \bar{X} = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad (3.9)$$

Yukarıdaki eşitliklerde $\bar{X}$ ölçülen ortalama değer, N ölçüm sayısı, σ ölçüm işlemindeki belirsizlik, $\Delta \bar{X}$ ortalamadaki belirsizliği temsil eder. Bu eşitlikler doğrultusunda ölçüm sonucu Eşitlik 3.10 kullanılarak değerlendirildi:

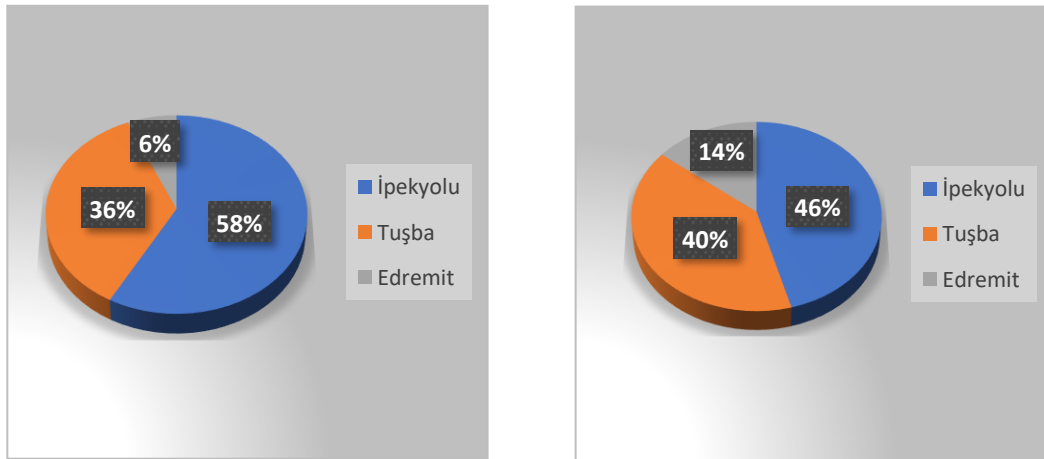
$$X = \bar{X} \pm \Delta \bar{X} \quad (3.10)$$

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Vaka ve Kontrol Grubuna Ait Anket Verilerinin ve Hasta Dosyalarındaki Bilgilerin Değerlendirilmesi

Şubat 2016-Temmuz 2021 tarihleri arasında Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Dursun Odabaş Tıp Merkezine başvuran akciğer kanseri tanısı almış ve Van merkez ilçelerinde (İpekyolu, Tuşba, Edremit) ikamet eden 98 hasta kaydına ulaşıldı. Hastaların dosya bilgileri (yaş, cinsiyet, histolojik alt ana tip, sigara öyküsü, aile öyküsü, soy geçmiş, verilen tedavi) incelendi. Taşınma, telefon numarası değişikliği, bazı hasta yakınlarının çalışmayı kabul etmemesi nedenlerinden dolayı 31 hasta çalışma kapsamına alındı.

Anket sonuçları ve dosyadaki bilgiler değerlendirildiğinde; 31 hastanın yaş ortalaması 57.6129 ± 10.14126 'dır. Hastaların cinsiyeti, eğitim düzeyleri, mesleği, sosyal güvenceleri ve gelir düzeyleri Çizelge 4.1'de gösterilmiştir. Aynı zamanda hastanın histolojik alt türü, sigara içme alışkanlığı, aile öyküsü ve aldığı tedavi türü de aynı çizelgede belirtilmiştir. Vaka ve kontrol evlerinin ilçelere göre dağılımı Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1 a. Vaka evlerinin ilçelere göre dağılımı b. Kontrol evlerinin ilçelere göre dağılımı

Vaka evleri için konut yaşı, aynı evde oturma süreleri, yapı malzemeleri, ısı yalıtımı ve havalandırma, kullanılan ısıtma sistemi ile ilgili bilgiler Çizelge 4.2'de

verilmiştir. Doğal gazla ısınma oranı yüksek olan kontrol evlerinde radon, vaka evlerinden daha yüksektir.

Kontrol evleri için ortalama yaş 46.2571 ± 11.25727 olup hepsi evlidir. Konut sakinlerinin eğitim düzeyi, mesleği, sigara içme alışkanlığı, gelir düzeyi Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Vaka ve kontrol grubunun demografik özellikleri

Demografik özellikler		Vaka (n=31) %	Kontrol (n=35) %
Cinsiyet	Kadın	5 (%16.1)	
	Erkek	26 (%83.9)	
Eğitim	Okuryazar değil	9 (%29)	0
	Okuryazar	1 (%3.2)	0
	İlkokul	15 (%48.4)	10 (%28.6)
	Ortaokul	5 (%16.1)	2 (%5.7)
	Lise	1 (%3.2)	8 (%22.9)
	Üniversite	0	15 (%42.9)
Meslek	Memur	4 (%12.9)	16 (%45.7)
	İşçi	8 (%25.8)	3 (%8.6)
	Çiftçi	6 (%19.4)	0
	Serbest meslek	6 (%19.4)	9 (%25.7)
	Ev hanımı	4 (%12.9)	1 (%2.9)
	Şoför	3 (%9.7)	0
	İşsiz	0	3 (%8.6)
	Emekli	0	3 (%8.6)
Sosyal güvence	Var	31 (%100)	33 (%94.3)
	Yok	0	2 (%5.7)
Sigara	Var	28 (%90.3)	20 (%57.1)
	Yok	3 (%9.7)	15 (%42.9)
İlçe	İpekyolu	18 (%58.1)	16 (%45.7)
	Tuşba	11 (%35.5)	14 (%40)
	Edremit	2 (%6.5)	5 (%14.3)
Gelir düzeyi	<2000 TL	3 (%9.7)	2 (%5.7)
	2000-3000 TL	5 (%16.1)	2 (%5.7)
	3000-4000 TL	12 (%38.7)	8 (%22.9)
	>4000	11 (%35.5)	23 (%65.7)
Aile öyküsü	Var	16 (%51.6)	16 (%45.7)
	Yok	13 (%41.9)	19 (%54.3)
	Bilmiyor	2 (%6.5)	0
Tam türü	KHAK	17 (54.8%)	
	KHDAK	12 (38.7%)	
	Bilinmiyor	2 (6.5%)	
Tedavi türü	Kombine tedavi	20 (64.5%)	
	Kemoterapi	3 (9.7%)	
	Cerrahi tedavi	2 (6.5%)	
	Radyoterapi	1 (3.2%)	
	Tedavi almamış	5 (16.1%)	

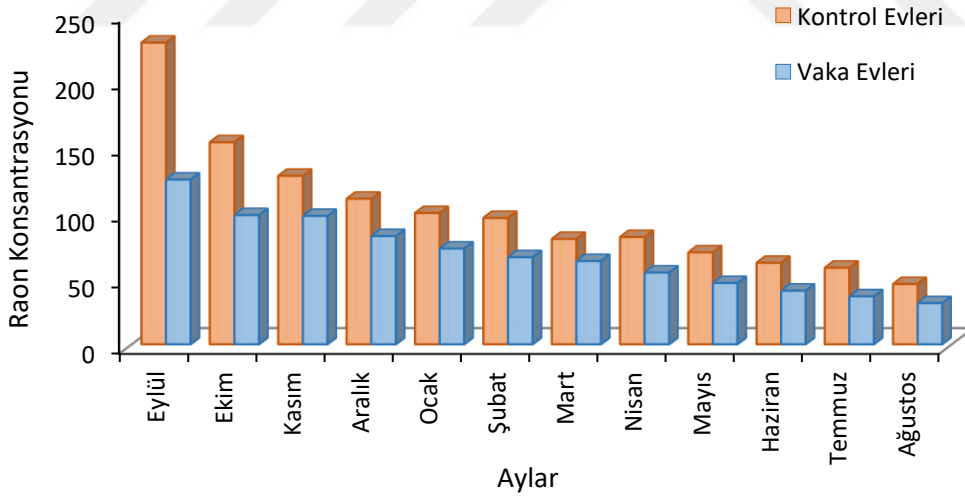
Konut tipi, bina yaşı ev sahiplerinin aynı adreste oturma süreleri, yapı malzemeleri, ısı yalıtımı ve havalandırma, ısıtma sistemi, oda büyüklüğü ile ilgili bilgiler Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2 Vaka ve kontrol grubunun konut özellikleri

Konut özellikleri		Vaka (n=31) %	Kontrol (n=35) %
Bina tipi	Apartman bodrumlu	7 (%22.6)	15 (%42.9)
	Apartman bodrumsuz	2 (%6.5)	6 (%17.1)
	Müstakil bodrumlu	14 (%45.2)	3 (%8.6)
	Müstakil bodrumsuz	8 (%25.8)	11 (%31.4)
Bina yaşı	<1995	5 (%16.1)	1 (%2.9)
	1996-2000	6 (%19.4)	4 (%11.4)
	2001-2005	6 (%19.4)	5 (%14.3)
	2006-2010	7 (%22.6)	13 (%37.1)
	2011-2015	7 (%22.6)	12 (%34.3)
Duvar yapı malzemesi	Beton	0	1 (%2.9)
	Tuğla	0	5 (%14.2)
	Briket	31 (%100)	28 (%80)
	Taş	0	1 (%2.9)
Tavan yapı malzemesi	Beton	30 (%96.8)	33 (%94.3)
	Ahşap	1 (%3.2)	2 (%5.7)
Taban yapı malzemesi	Beton	4 (%12.9)	1 (%2.9)
	Ahşap	27 (%87.1)	34 (%97.1)
Pencere durumu	Tek camlı ısı yalıtımı iyi	4 (%12.9)	1 (%2.9)
	Tek camlı ısı yalıtımı zayıf	7 (%22.6)	6 (%17.1)
	Çift camlı ısı yalıtımı iyi	18 (%58.1)	27 (%77.1)
	Çift camlı ısı yalıtımı zayıf	2 (%6.5)	1 (%2.9)
Isıtma sistemi	Kalorifer	1 (%3.2)	0
	Kömür sobası	20 (%64.5)	9 (%25.7)
	Doğal gaz	10 (%32.3)	26 (%74.3)
Yatak odası (m²)	≤10	9 (%29)	13 (%37.1)
	>10	22 (%71)	22 (%62.9)
Oturma odası (m²)	≤10	1 (%3.2)	0
	>10	30 (%96.8)	35 (%100)
Oturma süresi (yıl)	10-20	12 (%38.7)	27 (%77.1)
	21-30	14 (%45.2)	7 (%20)
	31-40	5 (%16.1)	1 (%2.9)
Isı yalıtımı	Var	6 (%19.40)	22 (%62.80)
	Yok	25 (%80.60)	13 (%37.20)

4.2 Evlerde Radon Konsantrasyonu

Vaka ve kontrol evlerine ait aylık net iz yoğunluğu ve ortalama radon konsantrasyonları Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4’de verilmiştir. Vaka ve kontrol evlerinin aylık radon konsantrasyon dağılımı Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Şekil 4.2’den görüleceği üzere her iki grup için en yüksek radon konsantrasyonu eylül ayında en düşüğü ise ağustos ayında olduğu bulunmuştur. Tüm aylar için radon konsantrasyonları kontrol grubu için daha yüksektir. Bunun nedeni kontrol evlerinin çoğunda ısı yalıtımının olması, buna karşın vaka evlerinin çoğunda ise ısı yalıtımının olmaması olabilir. Yalıtım konuttaki basınç farkının artmasına neden olduğundan radonun konut içine girme eğilimi artar (Örgün ve Çelebi, 2015). Ayrıca kontrol evleri sakinlerinin çoğu çalışan olduğu için evlerini vaka evlerine kıyasla daha az havalandırdıklarını belirtmişlerdir. Fransa’da madenlerde yapılan kohort çalışmasında; kümülatif radon maruziyeti ile akciğer kanseri arasında pozitif bir ilişki bulunmuş ve madenlere uygulanan zorunlu havalandırma ile yıllık maruziyet 21.3 WLM’den 1.7 WLM’ye düşmüştür (UNSCEAR, 2019).



Şekil 4.2 Vaka ve kontrol evlerinin aylık radon konsantrasyon dağılımı

Çizelge 4.3 Vaka evlerine ait aylık net iz yoğunluğu ve ortalama radon konsantrasyonu

Vaka evleri	Eylül		Ekim		Kasım		Aralık		Ocak		Şubat		Mart	
	ρ iz/cm ² g	C _{Rn} Bq/m ³	ρ iz/cm ² g	C _{Rn} Bq/m ³	ρ iz/cm ² g	C _{Rn} Bq/m ³	ρ iz/cm ² g	C _{Rn} Bq/m ³	ρ iz/cm ² g	C _{Rn} Bq/m ³	ρ iz/cm ² g	C _{Rn} Bq/m ³	ρ iz/cm ² g	C _{Rn} Bq/m ³
V1	288±17	208±12	189±14	137±10	159±13	115±9	165±13	119±9	122±11	88±8	115±11	83±8	119±11	86±8
V2	49±7	35±5	65±8	47±6	54±7	39±5	85±9	61±7	69±8	50±6	75±9	54±6	36±6	26±4
V3	73±9	53±6	74±9	54±6	37±6	27±4	41±6	30±5	26±5	19±4	30±5	22±4	49±7	35±5
V4	317±18	229±13	123±11	89±8	153±12	111±9	100±10	72±7	119±11	86±8	105±10	76±7	86±9	62±7
V5	318±18	230±13	280±17	203±12	188±14	136±10	120±11	87±8	133±12	96±8	128±11	93±8	96±10	69±7
V6	448±21	324±15	229±15	166±11	240±15	174±11	237±15	171±11	200±14	145±10	169±13	122±9	141±12	102±9
V7	101±10	73±7	95±10	69±7	105±10	76±7	92±10	67±7	107±10	77±7	88±9	64±7	87±9	63±7
V8	177±13	128±10	143±12	103±9	153±12	111±9	127±11	92±8	99±10	72±7	104±10	75±7	75±9	54±6
V9	189±14	137±10	129±11	93±8	124±11	90±8	111±11	80±8	96±10	69±7	100±10	72±7	72±8	52±6
V10	622±25	450±18	405±20	293±15	473±22	342±16	326±18	236±13	254±16	184±12	220±15	159±11	206±14	149±10
V11	73±9	53±6	70±8	51±6	116±11	84±8	65±8	47±6	70±8	51±6	74±9	54±6	94±10	68±7
V12	103±10	75±7	96±10	69±7	120±11	87±8	104±10	75±7	67±8	48±6	60±8	43±6	51±7	37±5
V13	108±10	78±8	100±10	72±7	153±12	111±9	130±11	94±8	102±10	74±7	87±9	63±7	65±8	47±6
V14	147±12	106±9	121±11	88±8	114±11	82±8	59±8	43±6	79±9	57±6	39±6	28±5	63±8	46±6
V15	226±15	163±11	209±14	151±10	137±12	99±8	143±12	103±9	118±11	85±8	97±10	70±7	62±8	45±6
V16	124±11	90±8	107±10	77±7	116±11	84±8	105±10	76±7	95±10	69±7	108±10	78±8	92±10	67±7
V17	86±9	62±7	73±9	53±6	102±10	74±7	75±9	54±6	72±8	52±6	69±8	50±6	73±8	53±6
V18	232±15	168±11	178±13	129±10	231±15	167±11	136±12	98±8	147±12	106±9	116±11	84±8	98±10	71±7
V19	66±8	48±6	68±8	49±6	59±8	43±6	101±10	73±7	60±8	43±6	62±8	45±6	67±8	48±6
V20	119±11	86±8	171±13	124±9	112±11	81±8	98±10	71±7	121±11	88±8	97±10	70±7	89±9	64±7
V21	312±18	226±13	257±16	186±12	208±14	150±10	126±11	91±8	94±10	68±7	88±9	64±7	93±10	67±7
V22	81±9	59±7	97±10	70±7	104±10	75±7	122±11	88±8	96±10	69±7	103±10	75±7	85±9	61±7
V23	53±7	38±5	51±7	37±5	76±9	55±6	82±9	59±7	56±7	41±5	48±7	35±5	79±9	57±6
V24	171±13	124±9	136±12	98±8	109±10	79±8	115±11	83±8	106±10	77±7	98±10	71±7	84±9	61±7
V25	176±13	127±10	161±13	116±9	173±13	125±10	115±11	83±8	110±10	80±8	86±9	62±7	97±10	70±7
V26	92±10	67±7	97±10	70±7	85±9	61±7	116±11	84±8	103±10	75±7	112±11	81±8	102±10	74±7
V27	111±11	80±8	92±10	67±7	75±9	54±6	80±9	58±6	60±8	43±6	65±8	47±6	97±10	70±7
V28	88±9	64±7	64±8	46±6	73±9	53±6	58±8	42±6	40±6	29±5	64±8	46±6	61±8	44±6
V29	98±10	71±7	84±9	61±7	102±10	74±7	96±10	69±7	95±10	69±7	63±8	46±6	89±9	64±7
V30	71±8	51±6	99±10	72±7	89±9	64±7	91±10	66±7	82±9	59±7	70±8	51±6	67±8	48±6
V31	198±14	143±10	134±12	97±8	123±11	89±8	92±10	67±7	100±10	72±7	86±9	62±7	116±11	84±8
Ort.	172±13	124±17	135±12	98±10	134±12	97±10	113±11	82±7	100±10	72±6	91±10	66±5	87±9	63±4

Çizelge 4.3 Vaka evlerine ait aylık net iz yoğunluğu ve ortalama radon konsantrasyonu (devam)

	Nisan		Mayıs		Haziran		Temmuz		Ağustos		Ortalama	
Vaka evleri	ρ iz/cm ² g	C _{Rn} Bq/m ³	ρ iz/cm ² g	C _{Rn} Bq/m ³	ρ iz/cm ² g	C _{Rn} Bq/m ³	ρ iz/cm ² g	C _{Rn} Bq/m ³	ρ iz/cm ² g	C _{Rn} Bq/m ³	ρ iz/cm ² g	C _{Rn} Bq/m ³
V1	96±10	69±7	64±8	46±6	86±9	62±7	63±8	46±6	55±7	40±5	127±11	92±14
V2	42±6	30±5	55±7	40±5	36±6	26±4	38±6	27±4	26±5	19±4	53±7	38±4
V3	31±6	22±4	42±6	30±5	33±6	24±4	28±5	20±4	21±5	15±3	40±6	29±4
V4	59±8	43±6	47±7	34±5	50±7	36±5	40±6	29±5	51±7	37±5	104±10	75±16
V5	100±10	72±7	81±9	59±7	65±8	47±6	43±7	31±5	57±8	41±5	134±12	97±18
V6	163±13	118±9	144±12	104±9	141±12	102±9	122±11	88±8	115±11	83±8	196±14	142±19
V7	94±10	68±7	85±9	61±7	69±8	50±6	75±9	54±6	52±7	38±5	88±9	63±3
V8	89±9	64±7	65±8	47±6	57±8	41±5	61±8	44±6	50±7	36±5	100±10	72±9
V9	57±8	41±5	63±8	46±6	54±7	39±5	51±7	37±5	42±6	30±5	91±10	66±9
V10	112±11	81±8	85±9	61±7	74±9	54±6	54±7	39±5	75±9	54±6	242±16	175±38
V11	65±8	47±6	66±8	48±6	50±7	36±5	57±8	41±5	47±7	34±5	71±8	51±4
V12	68±8	49±6	51±7	37±5	37±6	27±4	34±6	25±4	39±6	28±5	69±8	50±6
V13	54±7	39±5	48±9	35±5	58±8	42±6	49±7	35±5	27±5	20±4	82±9	59±8
V14	57±8	41±5	53±7	38±5	38±6	27±4	41±6	30±5	30±5	22±5	70±8	51±8
V15	59±8	43±6	50±7	36±5	58±8	42±6	40±6	29±5	36±6	26±4	103±10	74±14
V16	100±10	72±7	80±9	58±6	70±8	51±6	59±8	43±6	33±6	24±4	91±10	66±5
V17	80±9	58±6	69±8	50±6	50±7	36±5	39±6	28±5	54±7	39±5	70±8	51±4
V18	96±10	69±7	63±8	46±6	78±9	56±6	55±7	40±5	48±7	35±5	123±11	89±13
V19	54±7	39±5	47±7	34±5	45±7	33±5	30±5	22±4	49±7	35±5	59±8	43±4
V20	73±9	53±6	65±8	47±6	59±8	43±6	45±7	33±5	37±6	27±4	91±10	65±8
V21	90±9	65±7	78±9	56±6	64±8	46±6	54±7	39±5	55±7	40±5	127±11	92±18
V22	73±9	53±6	66±8	48±6	64±8	46±6	48±7	35±5	29±5	21±4	81±9	58±5
V23	53±7	38±5	45±7	33±5	38±6	27±4	42±6	30±5	25±5	18±4	54±7	39±4
V24	82±9	59±7	73±9	53±6	52±7	38±5	45±7	33±5	37±6	27±4	92±10	67±8
V25	70±8	51±6	61±8	44±6	50±7	36±5	48±7	35±5	38±6	27±4	99±10	71±10
V26	80±9	58±6	73±9	53±6	57±8	41±5	51±7	37±5	47±7	34±5	85±9	61±5
V27	62±8	45±6	49±7	35±5	33±6	24±4	56±7	41±5	33±6	24±4	68±8	49±5
V28	56±7	41±5	30±5	22±4	36±6	26±4	34±6	25±4	32±6	23±4	53±7	38±4
V29	71±8	51±6	63±8	46±6	47±7	34±5	43±7	31±5	34±6	25±4	74±9	53±5
V30	55±7	40±5	48±7	35±5	37±6	27±4	40±6	29±5	28±5	20±4	65±8	47±5
V31	81±9	59±7	73±9	53±6	60±8	43±6	50±7	36±5	38±6	27±4	101±10	73±9
Ort.	75±9	54±3	64±8	46±3	56±7	41±3	50±7	36±2	43±7	31±2	94±10	68±8

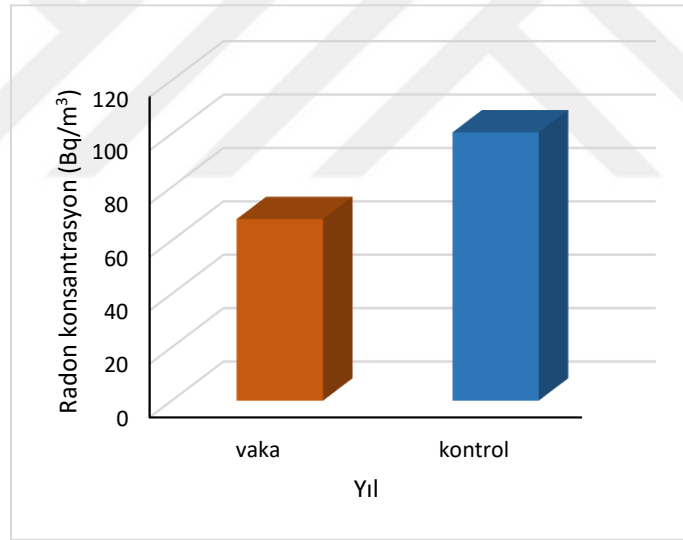
Çizelge 4.4 Kontrol evlerine ait aylık net iz yoğunluğu ve ortalama radon konsantrasyonu

Kontrol evleri	Eylül		Ekim		Kasım		Aralık		Ocak		Şubat		Mart	
	ρ iz/cm ² g	C _{Rn} Bq/m ³	ρ iz/cm ² g	C _{Rn} Bq/m ³	ρ iz/cm ² g	C _{Rn} Bq/m ³	ρ iz/cm ² g	C _{Rn} Bq/m ³	ρ iz/cm ² g	C _{Rn} Bq/m ³	ρ iz/cm ² g	C _{Rn} Bq/m ³	ρ iz/cm ² g	C _{Rn} Bq/m ³
K1	278±17	201±12	148±12	107±9	117±11	85±8	86±9	62±7	111±11	80±8	88±9	64±7	66±8	48±6
K2	498±22	360±16	365±19	264±14	168±13	122±9	153±12	111±9	228±15	165±11	233±15	169±11	97±10	70±7
K3	389±20	281±14	246±16	178±11	176±13	127±10	131±11	95±8	201±14	145±10	159±13	115±9	144±12	104±9
K4	274±17	198±12	191±14	138±10	140±12	101±9	149±12	108±9	149±12	108±9	120±11	87±8	105±10	76±7
K5	346±19	250±13	215±15	156±11	168±13	122±9	134±12	97±8	141±12	102±9	138±12	100±8	124±11	90±8
K6	295±17	213±12	215±15	156±11	163±13	118±9	139±12	101±9	196±14	142±10	88±9	64±7	71±8	51±6
K7	352±19	255±14	228±15	165±11	171±13	124±9	131±11	95±8	174±13	126±10	128±11	93±8	103±10	75±7
K8	140±12	101±9	121±11	88±8	139±12	101±9	117±11	85±8	99±10	72±7	112±11	81±8	78±9	56±6
K9	362±19	262±14	239±15	173±11	185±14	134±10	146±12	106±9	132±11	95±8	114±11	82±8	121±11	88±8
K10	95±10	69±7	100±10	72±7	107±10	77±7	115±11	83±8	110±10	80±8	106±10	77±7	119±11	86±8
K11	299±17	216±13	166±13	120±9	154±12	111±9	127±11	92±8	113±11	82±8	114±11	82±8	112±11	81±8
K12	451±21	326±15	340±18	246±13	298±17	216±12	193±14	140±10	218±15	158±11	161±13	116±9	148±12	107±9
K13	424±21	307±15	260±16	188±12	174±13	126±10	193±14	140±10	205±14	148±10	148±12	107±9	102±10	74±7
K14	275±17	199±12	161±13	116±9	166±13	120±9	147±12	106±9	139±12	101±9	136±12	98±8	120±11	87±8
K15	152±12	110±9	123±11	89±8	103±10	75±7	84±9	61±7	87±9	63±7	69±8	50±6	56±7	41±5
K16	419±20	303±15	247±16	179±11	197±14	142±10	176±13	127±10	149±12	108±9	118±11	85±8	123±11	89±8
K17	156±12	113±9	87±9	63±7	70±8	51±6	101±10	73±7	70±8	51±6	68±8	49±6	49±7	35±5
K18	243±16	176±11	155±12	112±9	107±10	77±7	109±10	79±8	119±11	86±8	104±10	75±7	101±10	73±7
K19	323±18	234±13	207±14	150±10	170±13	123±9	196±14	142±10	135±12	98±8	146±12	106±9	82±9	59±7
K20	364±19	263±14	273±17	197±12	222±15	161±11	177±13	128±10	115±11	83±8	110±10	80±8	80±9	58±6
K21	377±19	273±14	178±13	129±10	189±14	137±10	181±13	131±10	155±12	112±9	147±12	106±9	132±11	95±8
K22	397±20	284±14	353±19	255±14	374±19	271±14	190±14	137±10	148±12	107±9	176±13	127±10	122±11	88±8
K23	215±15	156±11	208±14	150±10	199±14	144±10	168±13	122±9	96±10	69±7	107±10	77±7	93±10	67±7
K24	164±13	119±9	132±11	95±8	113±11	82±8	108±10	78±8	104±10	75±7	136±12	98±8	127±11	92±8
K25	207±14	150±10	147±12	106±9	115±11	83±8	122±11	88±8	109±10	79±8	96±10	69±7	103±10	75±7
K26	319±18	231±13	304±17	220±13	197±14	142±10	131±11	95±8.0	138±12	100±8	157±13	114±9	110±10	80±8
K27	356±19	258±14	234±15	169±11	176±13	127±10	151±12	109±9	145±12	105±9	130±11	94±8	89±9	64±7
K28	287±17	208±12	175±13	127±10	152±12	110±9	124±11	90±8	118±11	85±8	120±11	87±8	74±9	54±6
K29	552±23	399±17	280±17	203±12	269±16	195±12	242±16	175±11	161±13	116±9	195±14	141±10	201±14	145±10
K30	221±15	160±11	142±12	103±9	151±12	109±9	100±10	72±7	117±11	85±8	112±11	81±8	114±11	82±8
K31	362±19	262±14	260±16	188±12	246±16	178±11	140±12	101±9	149±12	108±9	190±14	137±10	129±11	93±8
K32	641±25	464±18	335±18	242±13	269±16	195±12	227±15	164±11	173±13	125±10	183±14	132±10	148±12	107±9
K33	208±14	150±10	179±13	129±10	125±11	90±8	153±12	111±9	145±12	105±9	147±12	106±9	145±12	105±9
K34	380±19	275±14	242±16	175±11	200±14	145±10	246±16	178±11	164±13	119±9	168±13	122±9	132±11	95±8
K35	193±14	140±10	144±12	104±9	174±13	126±10	115±11	83±8	125±11	90±8	101±10	73±7	108±10	78±8
Ort.	315±18	228±15	211±15	153±9	176±13	127±7	152±12	108±5	137±12	102±5	132±11	96±4	110±10	79±4

Çizelge 4.4 Kontrol evlerine ait aylık net iz yoğunluğu ve ortalama radon konsantrasyonu (devam)

Kontrol Evleri	Nisan		Mayıs		Haziran		Temmuz		Ağustos		Ortalama	
	ρ iz/cm ² g	C _{Rn} Bq/m ³	ρ iz/cm ² g	C _{Rn} Bq/m ³	ρ iz/cm ² g	C _{Rn} Bq/m ³	ρ iz/cm ² g	C _{Rn} Bq/m ³	ρ iz/cm ² g	C _{Rn} Bq/m ³	ρ iz/cm ² g	C _{Rn} Bq/m ³
K1	77±9	56±6	70±8	51±5	67±8	48±6	55±7	40±5	40±6	29±5	100±10	73±13
K2	115±11	83±8	107±10	77±7	99±10	72±7	94±10	68±7	64±8	46±6	185±14	134±27
K3	137±12	99±8	95±10	69±7	58±8	42±6	48±7	35±5	50±7	36±5	153±12	111±20
K4	110±10	80±8	104±10	75±7	88±9	64±7	78±9	56±6	65±8	47±6	131±11	95±12
K5	123±11	89±8	114±11	82±8	78±9	56±6	86±9	62±7	46±7	33±5	142±12	103±16
K6	67±8	48±6	50±7	36±5	54±7	39±5	57±8	41±5	33±6	24±4	119±11	86±17
K7	131±11	95±8	107±10	77±7	82±9	59±7	66±8	48±6	60±8	43±6	144±12	104±17
K8	74±9	54±6	79±9	57±6	65±8	47±6	68±8	49±6	41±6	30±5	94±10	68±7
K9	115±11	83±8	118±11	85±8	93±10	67±7	90±9	65±7	64±8	46±6	148±12	107±17
K10	88±9	64±7	74±9	54±6	86±9	62±7	73±9	53±6	40±6	29±5	93±10	67±5
K11	100±10	72±7	101±10	73±7	63±8	46±6	85±9	61±7	73±9	53±6	126±11	91±13
K12	133±12	96±8	101±10	73±7	87±9	63±7	65±8	47±6	60±8	43±6	188±14	136±25
K13	107±10	77±7	86±9	62±6	66±8	48±6	41±6	30±5	44±7	32±5	154±12	112±23
K14	110±10	80±8	102±10	74±7	74±9	54±6	71±8	51±6	58±8	42±6	130±11	94±12
K15	70±8	51±6	61±8	44±6	43±7	31±5	60±8	43±6	40±6	29±5	79±9	57±7
K16	113±11	82±8	98±10	71±7	94±10	68±7	64±8	46±6	46±7	33±5	154±12	111±21
K17	53±7	38±5	44±7	32±5	40±6	29±5	44±7	32±5	43±7	31±5	69±8	50±7
K18	97±10	70±7	75±9	54±6	76±9	55±6	69±8	50±6	42±6	30±5	108±10	78±11
K19	103±10	75±7	71±8	51±6	58±8	42±6	47±7	34±5	42±6	30±5	132±11	95±17
K20	88±9	64±7	74±9	54±6	68±8	49±6	62±8	45±6	51±7	37±5	140±12	102±21
K21	148±12	107±9	125±11	90±8	118±11	85±8	125±11	90±8	95±10	69±7	164±13	119±15
K22	130±11	94±8	148±12	107±9	106±10	77±7	100±10	72±7	98±10	71±7	195±14	141±23
K23	100±10	72±7	82±9	59±7	77±9	56±6	81±9	59±7	67±8	48±6	124±11	90±12
K24	112±11	81±8	96±10	69±7	84±9	61±7	99±10	72±7	79±9	57±6	113±11	82±5
K25	113±11	82±8	90±9	65±7	97±10	70±7	81±9	59±7	76±9	55±6	113±11	82±7
K26	155±12	112±9	104±10	75±7	106±10	77±7	100±10	72±7	64±8	46±6	157±13	114±17
K27	96±10	69±7	72±8	52±6	81±9	59±7	60±8	43±6	47±7	34±5	136±12	99±18
K28	100±10	72±7	64±8	46±6	53±7	38±5	52±7	38±5	58±8	42±6	115±11	83±14
K29	124±11	90±8	148±12	107±9	142±12	103±9	137±12	99±8	97±10	70±7	212±15	154±25
K30	118±11	85±8	77±9	56±6	79±9	57±6	100±10	72±7	65±8	47±6	116±11	84±9
K31	122±11	88±8	133±12	96±8	106±10	77±7	98±10	71±7	87±9	63±7	169±13	122±17
K32	137±12	99±8	131±11	95±8	127±11	92±8	108±10	78±8	110±10	80±8	216±15	156±31
K33	157±13	114±9	128±11	93±8	118±11	85±8	124±11	90±8	103±10	75±7	144±12	104±6
K34	159±13	115±9	121±11	88±8	122±11	88±8	104±10	75±7	76±9	55±6	176±13	127±17
K35	138±12	100±8	93±10	67±7	112±11	81±8	101±10	73±7	78±9	56±6	124±11	89±7
Ort	112±11	81±3	96±10	69±3	85±9	61±3	80±9	58±3	63±8	46±3	139±12	101±15

Yıllık radon konsantrasyonu vaka evleri için 68 ± 8 Bqm⁻³, kontrol evleri için 101 ± 15 Bqm⁻³ olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.3). Vaka evlerinin genel ortalama değeri uluslararası kuruluşların belirlediği limit değerlerinin altındadır. Vaka evleri tek tek değerlendirilirse V6 WHO'nün belirlediği 100 Bqm⁻³ limit değerin üzerinde ve EPA'nın kabul ettiği limit değeri olan 148 Bqm⁻³'e yakın bulunmuştur. V10 konutu için bulunan değer hem WHO hem de EPA'nın limit değerlerinin üzerinde fakat Türkiye'nin kabul ettiği değerden (400 Bqm⁻³) ve ICRP'nin belirlediği 200-300 Bqm⁻³ limit değerin altında bulunmuştur (Çizelge 4.3). Kontrol evleri için genel ortalama değer WHO'nün belirlediği limit değere yakındır. Bununla beraber K2, K3, K9, K12, K13, K16, K21, K22, K26, K29, K31, K32 ve K34 konutları için bulunan ortalama radon konsantrasyon değerleri WHO'nün kabul ettiği limit değerin üzerinde, K5, K7, K20 ve K33 konutları için ise WHO'nün limit değerine yakın bulunmuştur. Ayrıca K29 ve K32 konutları için elde edilen değerler ise EPA'nın belirlediği limit değerin üzerindedir (Çizelge 4.4).



Şekil 4.3 Vaka ve kontrol evlerinin yıllık ortalama radon konsantrasyonu

Çizelge 4.5'de farklı ülkeler ve Türkiye'de yapılan çalışmalar ile mevcut çalışmada elde edilen değerler yer almaktadır. Çizelge 4.5'den görüleceği üzere vaka grubu için bulunan değer dünya ortalamasının üzerinde Türkiye ortalamasının altındadır. Kontrol grubu için elde edilen konsantrasyon değeri hem dünya hem de Türkiye ortalamasının üzerindedir. Her iki grup için ortalamanın üzerinde radon konsantrasyonu

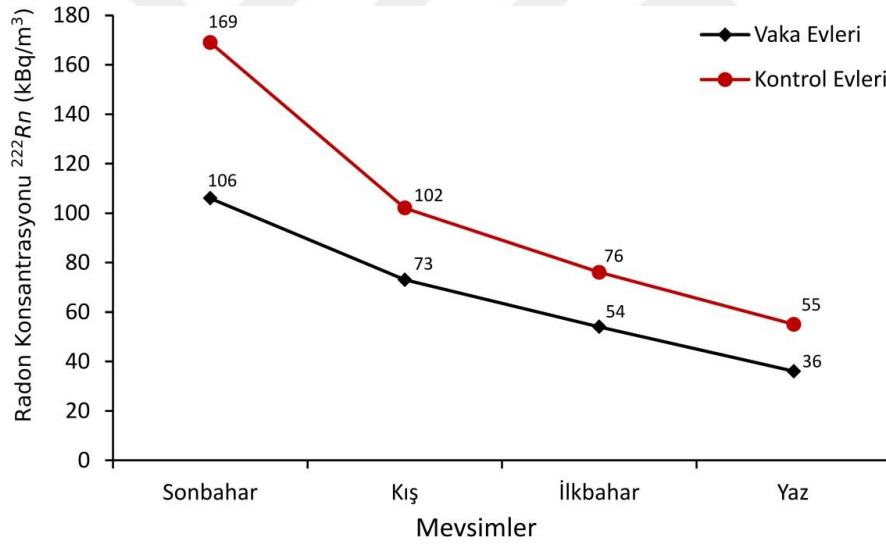
Çizelge 4.5 Konut radon konsantrasyonunun Türkiye ve dünyanın farklı yerlerinde yapılan çalışmalar ile karşılaştırılması

Ülke	Radon Konsantrasyonu (Bqm ⁻³)	Referans
Mısır (Alexandria)	Değişim aralığı 15- 132	Abd-Elzaher, 2013.
Hindistan (Lucknow ve Kanpur)	Ortalama 34 ± 8 ve 40 ± 10	Khan, 2000
Ürdün (Ajloun)	Ortalama 36.3 ± 2.3	Al-Khateeb vd, 2012
Pakistan (Hazara)	Değişim aralığı 41 – 254	Khan vd., 2012
Brezilya (Rio de Janeiro)	Değişim aralığı 5 – 200	Magalhães vd., 2003
Meksika (Mexico City)	Değişim aralığı 41-136	Franco-Marina vd., 2003
Suudi Arabistan (Riyadh)	Değişim aralığı 1 – 195	Alghamdi, ve Aleissa, 2014
Romanya (Transylvania)	Ortalama 82.5	Cosma vd., 2009
İspanya	Ortalama 141.4 ± 231.9 (Vaka) 114.0 ± 135.3 (Kontrol)	Dios vd, 2002
İran (Neyriz)	Ortalama 29.9 ± 12.6	Azhdarpoor vd., 2021
Türkiye (Kütahya)	Değişim aralığı 39 – 328	Gelgün, 2010
Türkiye (Adapazarı)	Değişim aralığı 3 – 155	Kapdan, 2009
Türkiye (Rize)	Ortalama 63.7 (Vaka) 50.4 (Kontrol)	Dursun, 2016
Türkiye (Artvin)	Değişim aralığı 21 – 321	Yeşilbag vd., 2010
Türkiye (Ardahan)	Değişim aralığı 53 – 736	Kucukomeroglu vd., 2011
Türkiye (İstanbul)	Ortalama 75	Otansev, 2021
Türkiye (Kilis)	Değişim aralığı 47 ± 40	Can, 2011
Türkiye ortalaması	81	Çelebi vd., 2015
Dünya ortalaması	40	UNSCEAR, 2006
Bu çalışma	68 ± 8 (Vaka) <u>101 ± 15 (Kontrol)</u>	

olan konutlar çoğunlukla sigara kullanan evlerdir. İspanya’da yapılan vaka kontrol çalışmasında, kontrol grubu evlere nazaran vaka evlerindeki radon konsantrasyon değeri

daha yüksek bulunmuştur (Çizelge 4.5). Mevcut çalışmada vaka evlerindeki konsantrasyon değeri daha düşük bulundu. Kontrol grubunun eğitim düzeyi vaka evlerine göre daha yüksekti ve çalışmanın önemi daha iyi anlaşıldı. Ayrıca kontrol evlerinde su ve doğal gaz kullanımı da vaka evlerine göre daha yüksektir. Fransada yapılan vaka-kontrol çalışmasında ölçülen radon konsantrasyonunun aritmetik ortalaması vaka evleri için 144 Bqm^{-3} , kontrol evleri için 138 Bqm^{-3} olarak elde edilmiştir. Aynı çalışmada kapalı radon maruziyeti ile ilişkili küçük bir aşırı akciğer kanseri riskinin varlığını desteklediği bildirilmiştir (Baysson vd., 2004).

Mevsimsel olarak değerlendirildiğinde vaka ve kontrol grubu için en yüksek ortalama konsantrasyon sonbaharda olup sırasıyla $106 \pm 9 \text{ Bqm}^{-3}$ ve $169 \pm 30 \text{ Bqm}^{-3}$, en düşük ise yaz mevsiminde olup sırasıyla $36 \pm 3 \text{ Bqm}^{-3}$ ve $55 \pm 5 \text{ Bqm}^{-3}$ ölçülmüştür (Şekil 4.4).

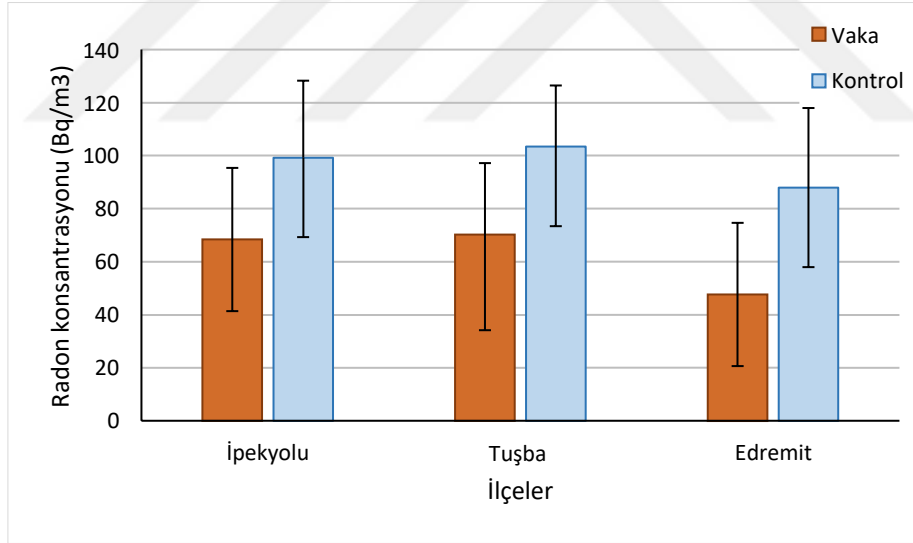


Şekil 4.4 Mevsimlere göre radon konsantrasyonu

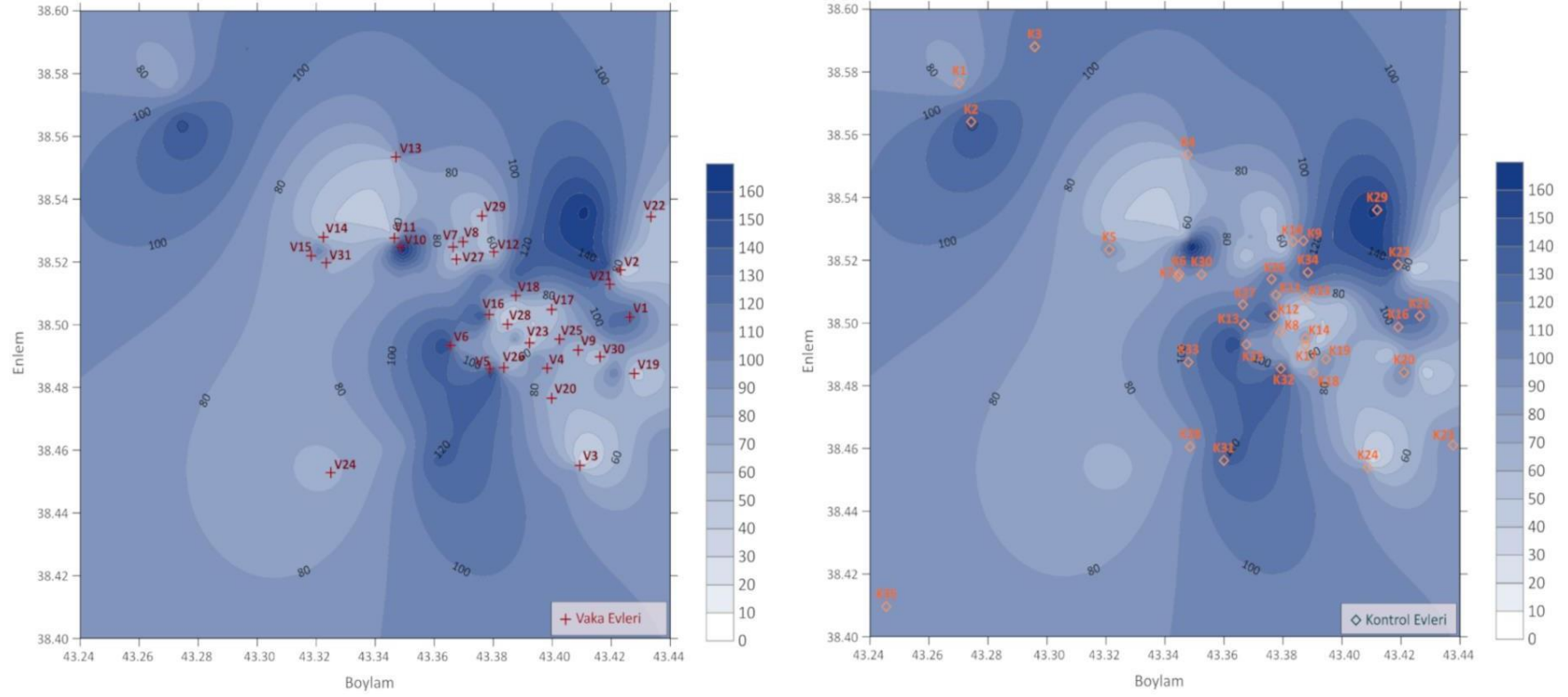
Türkiye'nin Eskişehir ilinde yapılan araştırmada; ev içi radon gazı ölçümleri yapılmış ve en yüksek konsantrasyon kış ve sonbahar mevsimlerinde, en düşük ise yaz ve ilkbahar mevsimlerinde gözlemlenmiştir (Akkurt, 2013). Başka bir çalışmada radon konsantrasyonunun maksimum değeri kış mevsiminde, minimum değeri ise yaz mevsiminde gözlenmiştir (Badhan vd., 2012). Buna karşın Dudney vd. (1990) tarafından yapılan çalışmada, yazın elde edilen radon konsantrasyonunun değerlerinin kış

değerlerinden önemli ölçüde daha yüksek olduğu bildirilmiştir (Stowe, 1994). Farklı bir çalışmada ise en yüksek konsantrasyonun kış mevsiminde en düşük ise ilkbahar mevsiminde olduğu tespit edilmiştir (Alghamdi ve Aleissa, 2014).

Bu çalışma kapsamında her üç ilçede ikamet eden vaka ve kontrol evleri için radon konsantrasyonları Şekil 4.5’de gösterilmiştir. Her iki grup için en yüksek konsantrasyon değeri Tuşba ilçesinde, en düşük ise Edremit ilçesinde elde edilmiştir. Her üç ilçe için radon konsantrasyon değeri vaka grubu için dünya ortalamasından yüksek, Türkiye ortalamasından daha düşüktür. Kontrol evleri için her üç ilçedeki konsantrasyon değeri hem dünya hem de Türkiye ortalamasından yüksektir. Tuşba ilçesindeki evlerin çoğu göle yakın olduğundan bu konutlarda çevresel radyoaktivitenin baskın olduğu söylenebilir. Van tektonik olarak aktif bir bölgede yer almakla birlikte bölge çevresindeki göl sularının tamamı yüksek brüt alfa ve beta radyoaktivite seviyelerine sahiptir (Akan vd., 2014). Van ili merkez ilçelerinin tümü için vaka ve kontrol evlerinin doz dağılım haritaları Şekil 4.6a ve Şekil 4.6b’ de gösterilmiştir.



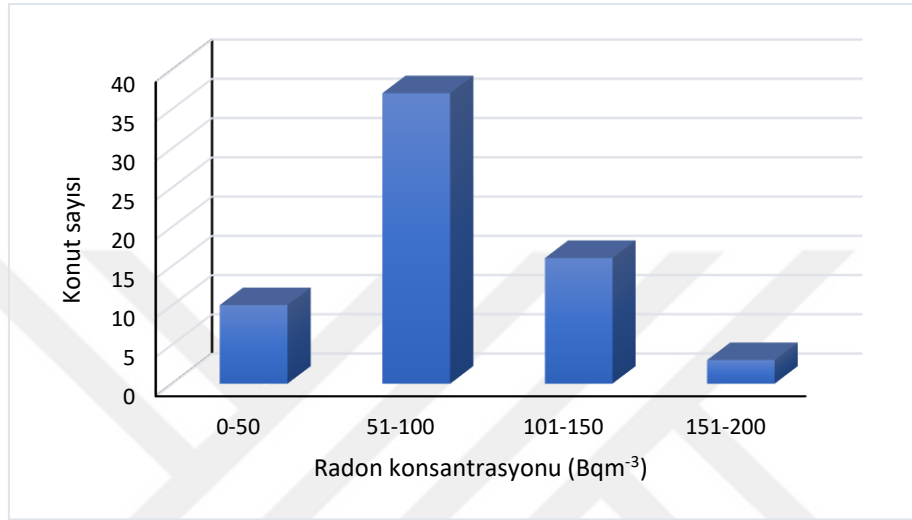
Şekil 4.5 Merkez ilçelerin ortalama radon konsantrasyonları



Şekil 4.6 a. Vaka evlerinin yıllık ortalama doz dağılımı b. Kontrol evlerinin yıllık ortalama doz dağılımı

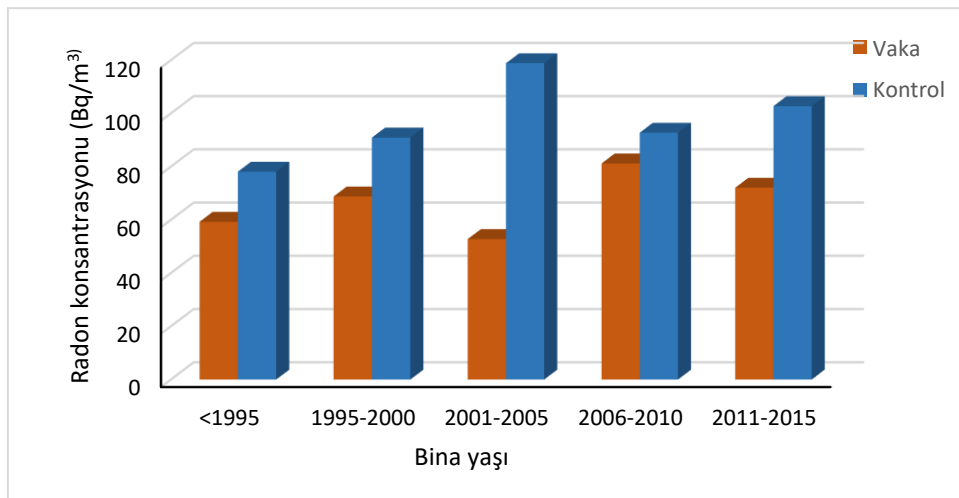
4.2.1 Konut Özelliklerine göre Radon Konsantrasyonu

Merkez ilçelerdeki tüm konutlar için yıllık ortalama radon konsantrasyonunun frekans dağılımı Şekil 4.7’de verilmiştir. Konutların yarısından fazlasında radon konsantrasyonu 51-100 Bqm⁻³ aralığında olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.7 Tüm konutlar için yıllık radon konsantrasyon frekans dağılımı

Radon konsantrasyonunun bina yaşına göre dağılımı Şekil 4.8’de verilmiştir. Şekil 4.8’e göre en yüksek konsantrasyon kontrol evleri için 2001-2005 arasında yapılan konutlarda, vaka evleri için ise 2006-2010 arasında yapılan konutlarda bulunmuştur.



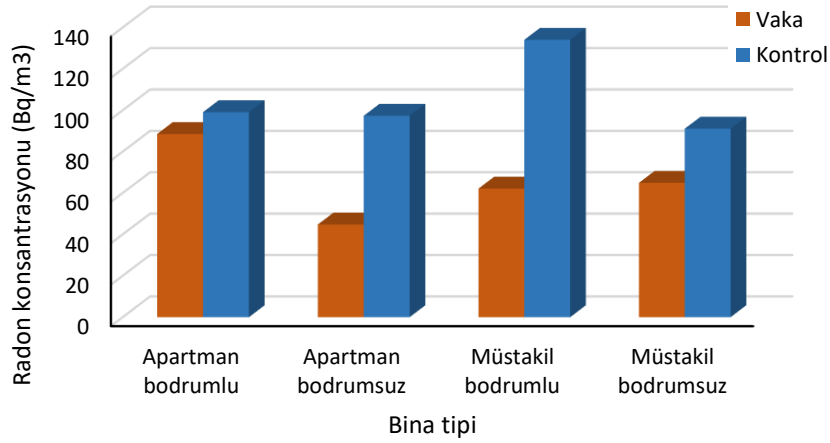
Şekil 4.8 Radon konsantrasyonunun konut yaşına göre dağılımı

Konut içi radon konsantrasyonunu etkileyen kaynak, basınç farkı ile zorlanan hava kaçakları ve çatlaklar yoluyla toprak radonunun konut içine difüzyonudur. Eski binalar, temelin çökmesi ve çatlaması nedeniyle toprak gazı için daha fazla giriş yoluna sahip olabilir (Abdalla ve Jastaniah, 2013; Stowe, 1994). Eski evler daha yüksek radon seviyelerine sahip olma eğilimindedir. Fakat bir konutun yapısının ve bina sakinlerinin davranışının iç mekan radon konsantrasyonu üzerinde önemli etkileri vardır. Bununla beraber zemini oluşturan kaya ve topraktaki radyum miktarı, konutun fay hatlarına yakın veya uzak olması, kullanılan suyun radon içeriği, konut zeminindeki nem oranı, konutun zeminden olan yüksekliği, kullanılan yalıtım malzemesinin niteliği, bodrum katların kömür vb. malzeme için depo olarak kullanılma durumu gibi faktörler konut radonu üzerinde etkilidir (Örgün ve Çelebi, 2015).

Çalışmada kat farkına bakmak için K6 ve K7, K9 ve K10, V1 ve K21 konutları aynı binadan seçildi. K7, K9 ve K21 alt kat evlerinde üst kat evleri olan K6, K10 ve V1'e göre daha yüksek konsantrasyonlar elde edildi (Çizelge 4.3 ve 4.4). Ürdün'de yapılan bir çalışmada iç mekan radon konsantrasyonu katlara göre değerlendirilmiş ve en yüksek zemin katta, en düşük ise ikinci katta elde edilmiştir (Al-Khateeb vd., 2012).

Odalara bağlı olarak radon konsantrasyonu değerlendirildiğinde kontrol evleri için yatak odasındaki yıllık ortalama konsantrasyon değeri oturma odasına göre daha yüksek olduğu tespit edildi. Vaka evlerinde ise yatak odası ve oturma odası konsantrasyon değerleri birbirine çok yakındı. Bunun nedeni de kontrol evlerinde yatak odasının daha az havalandırılması olabilir. Oturma odasında sıcaklığın artması iç mekan hava basıncını düşürür ve daha yüksek iç mekan radon seviyelerine yol açar. Yapılan farklı iki çalışmada, yatak odası ölçümleri oturma odalarından daha yüksek olduğu bulunmuştur (Khan, 2000; Amin, 2014).

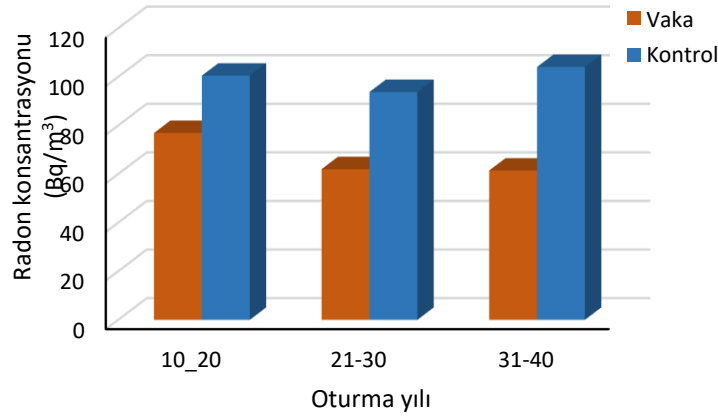
Konut tipine göre radon konsantrasyonu değerlendirildiğinde, vaka evleri için en yüksek konsantrasyon bodrumlu apartman ve en düşük ise bodrumsuz apartman evlerinde olduğu görülmüştür. Kontrol grubu için en yüksek konsantrasyonun bodrumlu müstakil en düşük ise bodrumsuz müstakil evlerde olduğu görülmüştür (Şekil 4.9). Yapılan bir çalışmada bodrum katları veya zemin teması olan binaların bodrum olmayan yapılara göre daha yüksek iç mekan radon seviyelerine sahip olduğu gösterilmiştir (Stowe, 1994).



Şekil 4.9 Radon konsantrasyonunun konut tipine göre dağılımı

Ayrıca bir bodrum katından binanın diğer bölümlerine radon akışı, alanlar arasındaki iletişime de bağlıdır. Khan (2000) tarafından yapılan çalışmada müstakil evlerdeki ölçümler bina ölçümlerinden daha yüksek bulunmuştur. Toprağın üst 50 cm'lik kısmındaki radonun en az %25'i atmosfere kaçma eğilimindedir ve dış havanın ortalama radon konsantrasyonu yaklaşık 3.7-14.8 Bqm⁻³'dir.

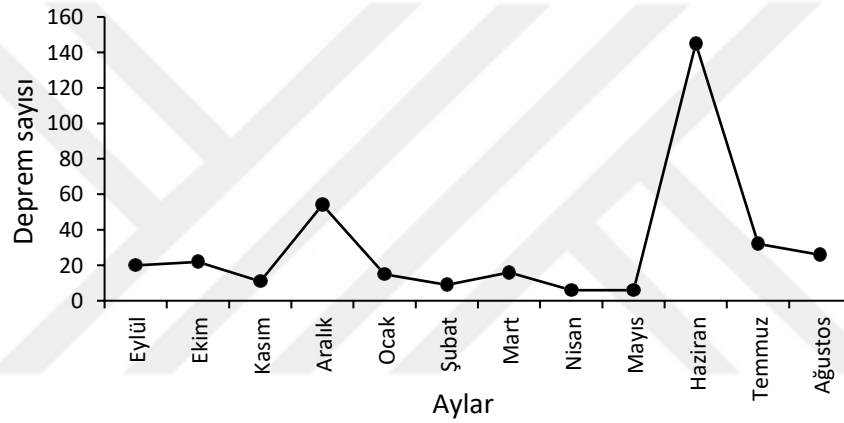
Konut sakinlerinin radona bağlı sürekli maruziyeti için kümülatif doz önemlidir. Bu nedenle konutta oturma süresi arttıkça maruziyette artar. En yüksek konsantrasyon vaka evleri için 10-20 y aynı adreste ikamet edenlerin konutlarında, kontrol evleri için ise 31-40 y aynı adreste oturanların konutlarında ölçülmüştür (Şekil 4.10). Bu da konutun yapısı ve özellikleri, konut sakinlerinin yaşam alışkanlıkları, meteorolojik olaylar gibi faktörlerin iç mekan radon konsantrasyonu üzerinde önemli etkileri olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.10 Oturma yılına göre ortalama radon konsantrasyonları

4.2.2 Jeolojik ve Meteorolojik Faktörlere Bağlı Radon Konsantrasyonu

Yeraltından radon salımı jeofiziksel bir olaydır. Rusya, Japonya ve Çin’de yapılan çalışmalar radon gazı ile sismik aktiviteler arasında doğrudan bir ilişki olduğunu ortaya koymuştur. Radon sızıntısı, aktif faylar üzerinde daha fazladır. Radon gazındaki artışlar deprem öncesinde maksimuma ulaşır, depremle birlikte doğaya yayılır (Aydoğmuş, 2019; Örgün ve Çelebi, 2015). Van ili birinci derece deprem bölgesinde olup çalışma bölgesinde Edremit ilçesi ikinci derece deprem bölgesinde, Tuşba ve İpekyolu ise hem birinci hem de ikinci derece deprem bölgesindedir. Çalışmada bir yıl boyunca aylık deprem sayıları Van İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğünden alındı (Şekil 4.11).

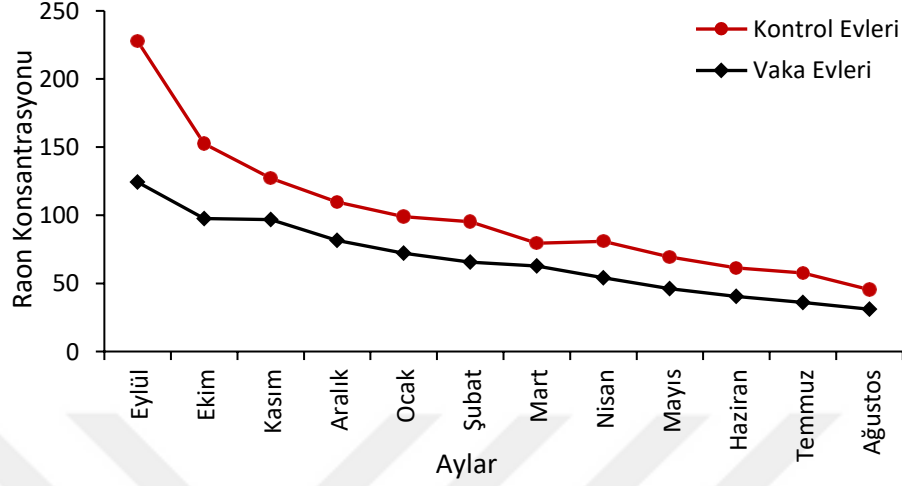


Şekil 4.11 Eylül 2021-Ağustos 2022 arasındaki aylık deprem sayısı

Bu çalışmada elde edilen verilerden, aylık deprem verileri ile radon konsantrasyonu arasında istatistiksel olarak bir korelasyon bulunamadı. Konutların bulunduğu konumların fay hatlarına yakın ve uzaklığı radon konsantrasyon değerleri üzerinde etkili olduğu düşünülmektedir. Aylık deprem sayısı ile konsantrasyonlar arasında istatistiksel olarak bir korelasyon bulunamadı. Catalano vd. (2012)’nin yaptığı çalışmada aktif fayların yakınındaki binalarda 500 Bqm^{-3} veya daha yüksek konsantrasyonlar elde etmişlerdir. Hindistan’ın Mizoram şehrinde yapılan bir çalışmada; fay bölgelerinin diğer yerlere kıyasla daha yüksek ortalama radon konsantrasyonları gösterdiği belirtilmiştir (Rohmingliana vd., 2010).

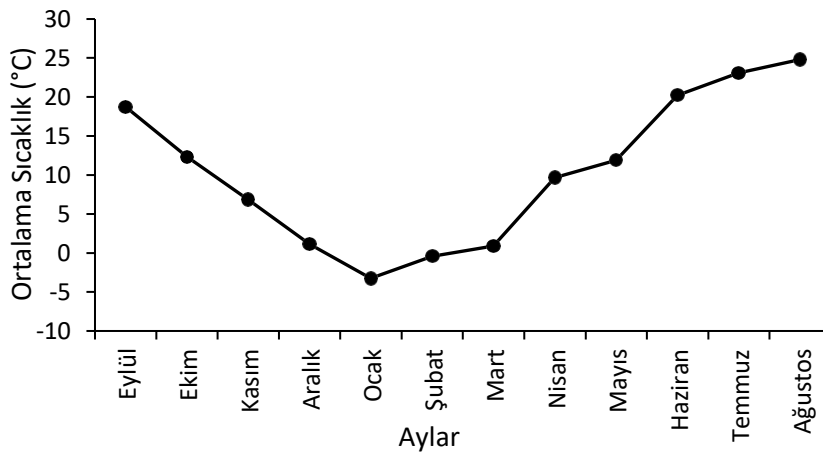
Eylül 2021-Ağustos 2022 tarihlerini içeren bir yıllık Van merkez ilçelerindeki meteorolojik değerler Van Meteoroloji 14. Bölge Müdürlüğünden alınmıştır. Mevcut çalışmada aylık radon konsantrasyonun değerleri Şekil 4.12’de verilmiştir. Buna göre en yüksek konsantrasyonun eylül ayında, en düşük ise ağustos ayında olduğu görülmektedir.

Diğer taraftan, meteorolojiden alınan veriler doğrultusunda aylık ortalama sıcaklık grafiği çizildi (Şekil 4.13).



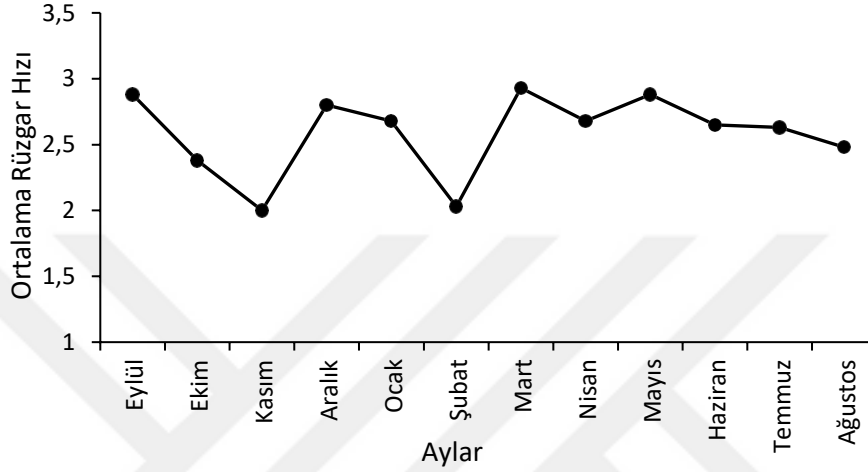
Şekil 4.12 Aylık ortalama radon konsantrasyonlar

Şekil 4.12 ve 4.13 birlikte değerlendirildiğinde ocak ayına kadar sıcaklık değeri azalmasına paralel olarak radon konsantrasyon değerleri de azalmaktadır. Ocak ayından ağustos ayına kadar sıcaklık artışıyla beraber radon konsantrasyon değerleri azalmaktadır. Yapılan çalışmalara göre sıcaklık ve radon arasında negatif bir ilişki vardır. Bu çalışmada istatistik açıdan sıcaklık ve konsantrasyon değerleri arasında bir ilişki bulunamamıştır. Konut içi ve dışındaki sıcaklık farkı basınç farkına neden olabileceğinden iç mekan radon konsantrasyonunu etkiler. Magalhães vd. (2003) yaptıkları çalışmada sıcaklık radon konsantrasyonu arasında negatif bir korelasyon gözlemlemiştir.



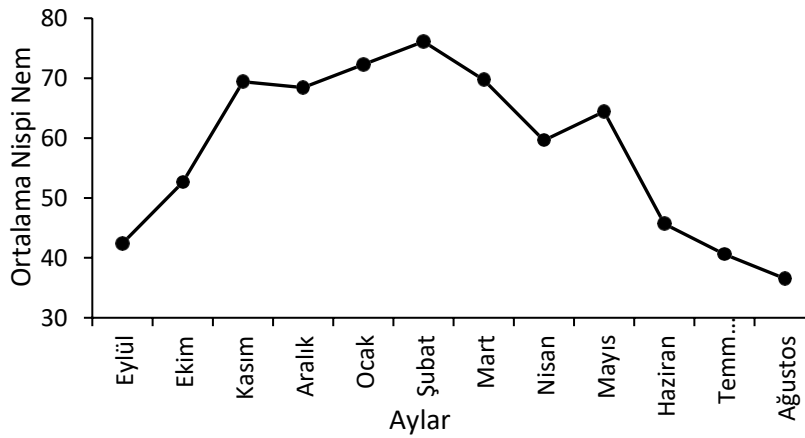
Şekil 4.13 Aylık ortalama sıcaklık değerleri

Rüzgarın hızı ve yönü iç mekan radon konsantrasyonunu etkiler. Aylık ortalama rüzgar hızı Şekil 4.14’de verilmiştir. Rüzgar toprağın havalandırılmasını artırabilir ve toprak gazındaki radon konsantrasyonunu azaltabilir. Şekil 4.14’e göre kasım-aralık, şubat-mart ve nisan-mayıs dışındaki diğer aylarda rüzgar hızında azalma gözlenmiştir. Konsantrasyon değerleri de bu aylarla uyumlu olarak düşüş göstermiştir.



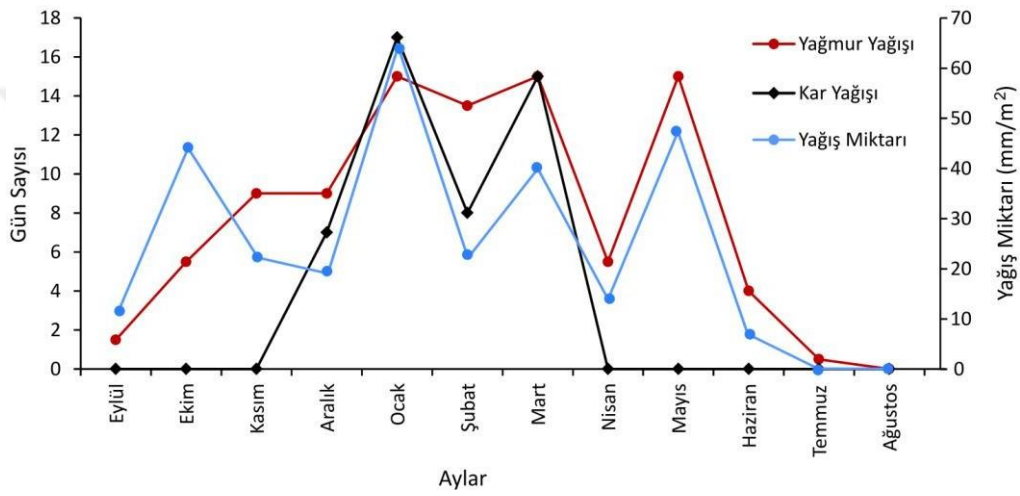
Şekil 4.14 Aylık ortalama rüzgar hızı

Aylık ortalama nispi nem grafiği Şekil 4.15’de verilmiştir. Nem radonun topraktan atmosfere salınımını artırır (Baran, 2013). Şekil 4.15’e göre kasım-aralık, şubat-nisan ve mayıs-ağustos ayları arası nem oranı düşmüştür. Buna bağlı topraktan radon salınımının azalması ve iç mekan konsantrasyonunun azalması beklenmektedir. Çalışmada söz konusu aylarda radon konsantrasyonu düşmektedir.



Şekil 4.15 Aylık ortalama nispi nem

Aylık yağışlı gün sayısı ve yağış miktarı Şekil 4.16’da gösterilmiştir. Yağışla beraber topraktaki su doygunluğa ulaşana kadar topraktaki radon artar ve suyun varlığı difüzyon hızını azaltır. Radonun sudaki difüzyonu, havadakinden altı kat daha yavaştır (Stowe, 1994). Şekil 4.16 incelendiğinde, eylül ve ocak rasında yağmurlu gün sayısı artmaktadır ve Van merkezde aralık ayında başlayan kar yağışı mart ayında da devam etmiştir. Yerlerin karla kaplı olması topraktan radon çıkışını azaltmaktadır. Çalışmada kış aylarında radon konsantrasyonu sonbahar mevsimine göre daha düşük bulundu. Bunun nedeni kar yağışının radon difüzyonunu azaltması olabilir.



Şekil 4.16 Aylık yağışlı gün sayısı ve yağış miktarı

4.3 Radyolojik Parametrelerin Hesaplanması

Bu tez çalışmasında yıllık etkin doz (D_{etkin}), akciğer için yıllık etkin doz eşdeğeri ($D_{eş}$), çalışma düzeyi (mWL), yıllık maruziyet (WLM), yaşam boyu ölüm riski (LFR) ve kanser riski (LCR) parametreleri vaka ve kontrol evleri için hesaplandı (Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7).

Çizelge 4.6 kontrol edildiğinde, yıllık etkin doz değeri vaka evleri için 0.77 ± 0.1 ve 4.62 ± 1.0 mSv arasında değişmekte ve tüm vaka evleri için ortalama 1.79 ± 0.2 mSv’dir. Radondan alınan yıllık etkin dozun dünya ortalaması 1.15 mSv’dir (UNSCEAR 2000). Vaka evleri için elde edilen ortalama değer dünya ortalamasının üzerinde olup ICRP tarafından önerilen eylem seviyesi olan 3-10 mSv’in altındadır. V6 ve V10 konutları için hesaplanan yıllık etkin doz değerleri dünya ortalamasının üzerinde, ICRP

tarafından önerilen eylem seviyesi aralığındadır. Tüm evler için ortalama çalışma seviyesi değeri 7.35 ± 0.86 mWL, yıllık ortalama maruziyet ise 0.46 ± 0.05 WLM olarak hesaplanmıştır. Akciğer için etkin doz eşdeğeri ise tüm evler için ortalama 4.30 ± 0.5 mSvy⁻¹ olup en yüksek dozlar V6 ve V10 konutlarına aittir. Tüm vaka evleri için LCR değeri ortalama $(0.70 \pm 0.08) \times 10^{-2}$ olarak hesaplandı. Yaşam boyu radon maruziyetine bağlı ölüm riski tüm vaka evleri için ortalama $(1.38 \pm 0.15) \times 10^{-4}$ olarak hesaplandı.

Çizelge 4.6 Vaka evlerine ait hesaplanan radyolojik parametreler

Vaka Evleri	$D_{eş}$ (mSvy ⁻¹)	Çalışma Seviyesi (mWL)	Yıllık Maruziyet (WLM)	D_{etkin} (mSvy ⁻¹)	$LCR \times 10^{-2}$	$LFR \times 10^{-4}$
V1	5.81±1.0	9.95±1.51	0.62±0.10	2.42±0.4	0.94±0.16	1.86±0.31
V2	2.4±0.2	4.11±0.43	0.26±0.03	1.00±0.1	0.39±0.04	0.39±0.04
V3	1.85±0.2	3.14±0.43	0.20±0.03	0.77±0.1	0.30±0.04	0.59±0.10
V4	4.75±1.0	8.11±1.73	0.51±0.05	1.98±0.4	0.77±0.16	1.52±0.31
V5	6.14±1.2	10.49±1.95	0.66±0.13	2.56±0.5	1.00±0.20	1.97±0.39
V6	9±1.2	15.35±2.05	0.97±0.13	3.75±0.5	1.56±0.20	2.89±0.39
V7	3.98±0.2	6.80±0.32	0.43±0.03	1.66±0.1	0.65±0.04	1.28±0.10
V8	4.56±0.5	7.78±0.97	0.49±0.05	1.90±0.2	0.74±0.08	1.46±0.15
V9	4.18±0.5	7.14±0.97	0.45±0.05	1.74±0.2	0.68±0.08	1.34±0.15
V10	11.09±2.4	18.92±4.11	1.19±0.26	4.62±1.0	1.80±0.39	3.56±0.77
V11	3.24±0.2	5.51±0.43	0.35±0.05	1.35±0.1	0.53±0.04	1.04±0.10
V12	3.17±0.5	5.39±0.63	0.34±0.05	1.32±0.2	0.51±0.08	1.02±0.15
V13	3.74±0.5	6.38±0.86	0.40±0.05	1.56±0.2	0.61±0.08	1.20±0.15
V14	3.24±0.5	5.51±0.86	0.35±0.05	1.35±0.2	0.53±0.08	1.04±0.15
V15	4.68±1.0	8.00±1.51	0.50±0.10	1.95±0.4	0.76±0.16	1.50±0.39
V16	4.18±0.2	7.14±0.54	0.45±0.03	1.74±0.1	0.68±0.04	1.34±0.10
V17	3.24±0.2	5.51±0.32	0.35±0.03	1.35±0.1	0.53±0.04	1.04±0.10
V18	5.64±0.7	9.62±1.41	0.61±0.10	2.35±0.3	0.92±0.12	1.81±0.23
V19	2.71±0.2	4.65±0.43	0.29±0.03	1.13±0.1	0.44±0.04	0.87±0.10
V20	4.13±0.5	7.03±0.86	0.44±0.05	1.72±0.2	0.67±0.08	1.32±0.15
V21	5.83±1.2	9.95±1.95	0.63±0.13	2.43±0.5	0.95±0.20	1.87±0.39
V22	3.67±0.2	6.27±0.54	0.39±0.03	1.53±0.1	0.60±0.04	1.18±0.10
V23	2.47±0.2	4.22±0.43	0.27±0.03	1.03±0.1	0.40±0.04	0.79±0.10
V24	4.25±0.5	7.24±0.86	0.46±0.05	1.77±0.2	0.69±0.08	1.36±0.15
V25	4.49±0.7	7.74±0.78	0.48±0.10	1.87±0.3	0.73±0.12	1.44±0.23
V26	3.86±0.2	6.59±0.54	0.41±0.03	1.61±0.1	0.63±0.04	1.24±0.10
V27	3.10±0.2	5.30±0.54	0.33±0.03	1.29±0.1	0.50±0.04	1.00±0.10
V28	2.40±0.2	4.11±0.43	0.26±0.03	1.00±0.1	0.39±0.04	0.77±0.10
V29	3.36±0.2	5.73±0.54	0.36±0.03	1.40±0.1	0.55±0.04	1.08±0.10
V30	2.98±0.2	5.08±0.54	0.32±0.03	1.24±0.1	0.48±0.04	0.95±0.10
V31	4.37±0.5	7.46±0.97	0.47±0.05	1.82±0.2	0.71±0.08	1.40±0.15
Ortalama	4.30±0.5	7.35±0.86	0.46±0.05	1.79±0.2	0.70±0.08	1.38±0.15

Çizelge 4.7'e göre kontrol evleri için ortalama D_{etkin} değeri 2.66 ± 0.4 mSvy⁻¹ olarak hesaplandı. Bu değer UNSCEAR 2000 Raporu tarafından verilen küresel ortalama değer olan 1.15 mSvy⁻¹'in üzerinde ve ayrıca ICRP tarafından tavsiye edilen eylem seviyesi aralığının (3–10 mSvy⁻¹) altındadır. Konutlar tek tek değerlendirildiğinde K2,

K12, K21, K22, K26, K29, K31, K32 ve K34 konutları için D_{etkin} değeri dünya ortalamasının üzerinde ve ICRP tarafından önerilen eylem seviyesi aralığındadır. Tüm konutlar için ortalama çalışma seviyesi 10.92 ± 1.62 mWL, yıllık ortalama maruziyet 0.69 ± 0.10 WLM olarak hesaplandı.

Çizelge 4.7 Kontrol evlerine ait hesaplanan radyolojik parametreler

Kontrol Evleri	$D_{eş}$ (mSvy ⁻¹)	Çalışma Seviyesi (mWL)	Yıllık Maruziyet (WLM)	D_{etkin} (mSvy ⁻¹)	$LCR \times 10^{-2}$	$LFR \times 10^{-4}$
K1	4.63±0.7	7.89±1.41	0.50±0.08	1.93±0.3	0.75±0.12	1.49±0.23
K2	8.50±1.7	14.49±2.92	0.91±0.18	3.54±0.7	1.38±0.27	2.73±0.54
K3	7.03±1.2	12.00±2.16	0.76±0.13	2.93±0.5	1.14±0.20	2.26±0.39
K4	6.02±0.7	10.27±1.30	0.65±0.08	2.51±0.3	0.98±0.12	1.93±0.23
K5	6.53±1.0	11.13±1.73	0.70±0.10	2.72±0.4	1.06±0.16	2.09±0.31
K6	5.45±1.0	9.30±1.84	0.59±0.10	2.27±0.4	0.88±0.16	1.75±0.31
K7	6.58±1.0	11.24±1.84	0.71±0.10	2.74±0.4	1.07±0.16	2.11±0.31
K8	4.30±0.5	7.35±0.76	0.46±0.05	1.79±0.2	0.70±0.08	1.38±0.15
K9	6.77±1.0	11.57±1.84	0.73±0.10	2.82±0.4	1.10±0.16	2.17±0.31
K10	4.25±0.2	7.24±0.54	0.46±0.03	1.77±0.1	0.69±0.04	1.36±0.10
K11	5.76±0.7	9.84±1.41	0.62±0.08	2.40±0.3	0.94±0.12	1.85±0.23
K12	8.62±1.7	14.70±2.70	0.93±0.18	3.59±0.7	1.40±0.27	2.76±0.54
K13	7.10±1.4	12.11±2.49	0.76±0.15	2.96±0.6	1.15±0.23	2.28±0.46
K14	5.95±0.7	10.16±1.30	0.64±0.08	2.48±0.3	0.97±0.12	1.91±0.23
K15	3.6±0.5	6.16±0.76	0.39±0.05	1.50±0.2	0.59±0.08	1.16±0.15
K16	7.03±1.4	12.00±2.27	0.76±0.15	2.93±0.6	1.14±0.23	2.26±0.46
K17	3.17±0.5	5.41±0.76	0.34±0.05	1.32±0.2	0.51±0.08	1.02±0.15
K18	4.94±0.7	8.43±1.19	0.53±0.08	2.06±0.3	0.80±0.12	1.59±0.23
K19	6.02±1.0	10.27±1.84	0.65±0.10	2.51±0.4	0.88±0.14	1.93±0.31
K20	6.46±1.4	11.03±2.27	0.69±0.15	2.69±0.6	0.98±0.23	2.07±0.46
K21	7.54±1.0	12.86±1.62	0.81±0.10	3.14±0.4	1.22±0.16	2.42±0.31
K22	8.93±1.4	15.24±2.49	0.96±0.15	3.72±0.6	1.45±0.23	2.86±0.46
K23	5.71±0.7	9.73±1.30	0.61±0.08	2.38±0.3	0.93±0.12	1.83±0.23
K24	5.18±0.2	8.86±0.54	0.56±0.03	2.16±0.1	0.84±0.04	1.66±0.10
K25	5.18±0.5	8.86±0.76	0.56±0.05	2.16±0.2	0.84±0.08	1.66±0.15
K26	7.22±1.0	12.32±1.84	0.78±0.10	3.01±0.4	1.17±0.16	2.32±0.31
K27	6.26±1.2	10.70±1.95	0.67±0.13	2.61±0.5	1.02±0.20	2.01±0.39
K28	5.26±1.0	8.97±1.51	0.56±0.10	2.19±0.4	0.85±0.16	1.69±0.31
K29	9.74±1.7	16.65±2.70	1.05±0.18	4.06±0.7	1.58±0.27	3.13±0.54
K30	5.33±0.5	9.08±0.97	0.57±0.05	2.22±0.2	0.87±0.08	1.71±0.15
K31	7.73±1.0	13.19±1.84	0.83±0.10	3.22±0.4	1.26±0.16	2.48±0.31
K32	9.89±1.9	16.86±3.35	1.06±0.21	4.12±0.8	1.61±0.31	3.17±0.62
K33	6.58±0.5	11.24±0.65	0.71±0.05	2.74±0.2	1.07±0.08	2.11±0.15
K34	8.04±1.0	13.73±1.84	0.86±0.10	3.35±0.4	1.31±0.16	2.58±0.31
K35	5.64±0.5	9.62±0.76	0.61±0.05	2.35±0.2	0.92±0.08	1.81±0.15
Ortalama	6.38±1.0	10.92±1.62	0.69±0.10	2.66±0.4	1.04±0.16	2.05±0.31

Akciğer için hesaplanan etkin eşdeğer doz ise ortalama 6.38 ± 1.0 mSvy⁻¹'dir. Radona bağlı yaşam boyu kanser ve ölüm riski için sırasıyla ortalama $(1.04 \pm 0.16) \times 10^{-2}$ ve $(2.05 \pm 0.31) \times 10^{-4}$ değerleri elde edildi. Kilis ilinde yapılan iç mekan radon çalışmasında, yıllık etkin doz eşdeğeri 1.19 mSv olarak ölçülmüştür (Bayram, 2011).

Kumar vd. (2014) yaptıkları çalışmada yıllık etkin doz değerini 0.47 ± 0.10 mSv, çalışma seviyesi değerini ise 1.77 ± 0.40 mWL olarak hesaplamışlardır. Mısır'da yapılan çalışmada, yıllık maruziyet 0.19 WLM olarak elde edilmiştir (Abd-Elzaher, 2013). Otansev (2021) yaptığı çalışmada iç mekan radon konsantrasyonuna bağlı kanser riskini $(6.43 \pm 2.77) \times 10^{-3}$ olarak hesaplamıştır.





5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Van merkez ilçelerinde gözlenen yıllık iç mekan radon konsantrasyonu seviyesi vaka evleri için ortalama $68 \pm 8 \text{ Bqm}^{-3}$, kontrol evleri için $101 \pm 15 \text{ Bqm}^{-3}$ olarak hesaplandı. Konsantrasyon değerleri ayrıca çalışma seviyesi (mWL) biriminden de hesaplandı. Vaka grubunun ortalama iç mekan radon konsantrasyon değeri dünya ortalamasının üzerinde, ulusal ortalamasının altındadır. Kontrol grubu için hesaplanan ortalama radon konsantrasyon değeri ise hem dünya hem de ulusal ortalamasının üzerindedir. Her iki grup için ortalama konsantrasyon değerleri ICRP ve EPA tarafından önerilen limit değerlerin altındadır. Bununla beraber vaka evlerinin ortalama radon konsantrasyon değeri WHO'nün kabul ettiği limit değerin altında iken kontrol evlerinden elde edilen konsantrasyon değeri ise bu limit değerin üzerindedir. Çalışmada en yüksek konsantrasyon değerinin sonbahar, en düşük ise yaz mevsiminde olduğu belirlendi. Konsantrasyon değerleri ile jeolojik ve meteorolojik faktörler arasında istatistik açıdan bir korelasyon bulunamadı.

Mevcut çalışmada konut radonuna bağlı bazı radyolojik parametreler (D_{es} , WLM, Detkin, LCR, LFR) hesaplandı. Vaka ve kontrol evleri için yıllık etkin doz sırasıyla 1.79 ± 0.2 ve $2.66 \pm 0.4 \text{ mSv}$ olarak bulundu. Her iki değer UNSCEAR 2000 Raporu tarafından verilen küresel ortalama değer olan 1.15 mSvy^{-1} 'in üzerinde ve ayrıca ICRP tarafından tavsiye edilen eylem seviyesi aralığının ($3\text{--}10 \text{ mSvy}^{-1}$) altındadır. Radona bağlı yaşam boyu kanser ve ölüm riski için sırasıyla ortalama $(1.04 \pm 0.16) \times 10^{-2}$ ve $(2.05 \pm 0.31) \times 10^{-4}$ değerleri elde edildi. Vaka evleri için mesleki maruziyet, yaşam alışkanlıkları (sigara, beslenme), sosyo-ekonomik düzeye bağlı yaşam koşulları, genetik gibi faktörler radona maruz kalmanın etkilerini gözlemlemeyi zorlaştırmaktadır. Bu nedenle iç mekan radonunun akciğer kanseri üzerindeki gerçek riskini tahmin etmek zordur. Elde edilen veriler doğrultusunda akciğer kanseri ile radon arasında korelasyon bulunmamıştır.

Hesaplanan parametrelere göre, çalışma sonuçları Van merkez ilçeleri için radyolojik risk oluşturmamaktadır. Bununla beraber radona bağlı stokastik etkilerin anlaşılması, yaşam kalitesinin iyileştirilmesi ve sürdürülmesi için gelecekteki ölçümlere ihtiyaç vardır. Epidemiyolojik çalışmaların revize edilmesi risk değerlendirmesine yönelik daha analitik bir yaklaşım sağlar.

Bir vaka kontrol çalışmasını başarılı bir şekilde yürütmek için uygun çalışma tasarımı çok önemlidir. Vakalar ve kontroller arasındaki farklılıkları tespit etmek ve radonun akciğer kanseri riski üzerindeki etkisinin kesin tahminlerini sağlamak için çok sayıda numune gereklidir. Kontroller, yaş, cinsiyet, sosyo-ekonomik durum, ikamet alanı ve konut türü açısından akciğer kanseri vakalarına mümkün olduğunca benzer olmalıdır. Çevresel tütün kullanımı ve iç mekan radonunun akciğer kanseri riski üzerindeki sinerjik etkisini değerlendirmek için hiç sigara içmeyenler üzerinde vaka-kontrol çalışmaları yapılabilir.

Akciğer kanserinin küresel olarak kansere bağlı ölümlerin önde gelen nedeni olmaya devam ettiği göz önüne alındığında, radon azaltma çabaları sigarayı bırakma stratejilerinin uygulamalarına eşlik etmelidir. Radon etkisinin kümülatif doza bağlı olarak, oluşturacağı biyolojik hasarın yıllar sonra bile ortaya çıkabileceği bilinmeli ve insanlar bu konuda bilgilendirilmelidir. Akciğer kanseri riskinin yanı sıra kanser dışı hastalıklar ve akciğer dışındaki kanser riskleri konusunda da ileri çalışmaların yapılması gerekmektedir.

Radon ölçümlerinin toplanamayacağı (konut sakinlerinin girişe izin vermeyeceği evler gibi) evlerin iç mekan radon seviyesi, ölçülebilen birçok parametreyi (evin jeolojisi ve toprak tipi, binanın yapısal özellikleri gibi) hesaba katan modeller ile tahmin edilebilir. Yüksek konsantrasyonlara uzun süre maruz kalmaktan kaçınmak ve azaltma tekniklerini kullanmak için gerçek zamanlı veriler yararlı olabilir. Örneğin Blanco-Novoa vd. (2018) tarafından geliştirilen IoT radon gazı izleme sistemi kullanıcılara uyarı gönderebilmekte ve anormal değerlerin tespit edilmesi durumunda radon gazı konsantrasyonunu azaltmak için hafifletme cihazlarını etkinleştirebilmektedir.

Evlerde radon seviyelerinin azalması için yeterli havalandırma çok önemli bir faktör olmakla birlikte iç mekan radon seviyelerini düşük tutmanın birçok mekanik yolu vardır:

- Binaların toprak ile temas eden yüzeyleri ve birleşim yerleri sızıntıya imkân vermeyecek şekilde izole edilmelidir.
- Evlerin duvarlarında, su ve kanalizasyon borularının geçtiği yerlerde bulunan çatlaklar kapatılmalıdır.
- Binaların projelendirme safhasında zemin etüdü ve jeolojik yapı dikkate alınarak radon gazının binaya girmeden atmosfere tahliye edileceği sistemler yapılmalıdır.

- Yapı malzemelerinin radyoaktivite analizleri ve değerlendirmeleri yapılarak, radyoaktif niteliği yüksek malzemeler bina yapımında kullanılmamalıdır.
- Evlerde, kapı ve pencerelerde izolasyon varsa havalandırma süresi arttırılmalıdır.
- Mutfakta doğal gaz kullanıldığında mekanik havalandırma sistemi kullanılmalıdır.
- Kuyu suyu yüzey sularına göre yüksek konsantrasyona sahip olduğundan evlerde kuyu suyu tercih edilmemelidir.





KAYNAKLAR

- Abdalla, S. M., Jastaniah, S. D. (2013). Physical factors affecting the interior radon-concentrations. *Open Journal of Biophysics*, 3, 33-41.
- Abd-Elzaher, M. (2013). Measurement of indoor radon concentration and assessment of doses in different districts of Alexandria city, Egypt. *Environmental Geochemistry and Health*, 35(3), 299-309.
- Açıkgöz, G. (2018). *Kulakçayırı gölünün doğal radyoaktivite ve ağır metal kirliliğinin belirlenmesi*, Yüksek lisans tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- AFAD. (2023). İl afet risk azaltma planı (IRAP). Erişim tarihi:02.03.2023. Erişim adresi: <https://van.afad.gov.tr/kurumlar/van.afad/Kutuphane/Il-Planlari/VAN-IRAP.pdf>
- Akan, Z., Baskurt, B., Asliyukse, H., Kam, E., Yilmaz, A., Yuksel, M.B., Biyik, R., Esen, R., Koca, D. (2014). Environmental radioactivity and high incidence rates of stomach and esophagus cancer in the Van lake region: a causal relationship? *Asian Pacific Journal of Cancer Prevention*, 15 (1), 375-380.
- Akdemir, Ü.Ö., Aydos, U. (2018). Akciğer kanserinde tanı ve evrelemede florodeoksiglikoz pozitron emisyon tomografisi/bilgisayarlı tomografi görüntülemenin yeri. *Nucl Med Semin*, 4, 6-17.
- Akköprü, E., Mouralis, D., Tunç, R., Robin, A. K. (2019). Meydan kalderası ve gürgürbaba domu çevresinin jeomorfolojik özellikleri. *Coğrafi Bilimler Dergisi*, 17(2), 428-452.
- Akkurt, N. (2014). *Eskişehir ilçelerinde radon konsantrasyonlarının mevsimsel değişimi*, Yüksek lisans tezi. OGU Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, Türkiye.
- Akyürek, S. (2017). *Nevşehir il merkezinde yer alan okullardaki radon gazı derişiminin aktif yöntem ile ölçülmesi ve yıllık etkin radyasyon dozunun değerlendirilmesi*, Yüksek lisans tezi. Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Nevşehir, Türkiye.
- Al, M. (2019). Radyasyon güvenliği ve radyasyondan korunma. Erişim tarihi:12.10.2022. Erişim adresi: https://hsgm.saglik.gov.tr/depo/birimler/kanser-db/yayinlar/sunular/mamografi_cekim_teknikleri_20.11.2019/Radyasyon_guvenligi_ve_radyasyondan_korunma_is_guvenligi_uzmani_Mustafa_Al.pdf
- Alghamdi, A.S., Aleissa, K.A. (2014). Influences on indoor radon concentrations in Riyadh, Saudi Arabia. *Radiation Measurements*, 62, 35-40.
- Al-Khateeb, H. M., Al-Qudah, A. A., Alzoubi, F. Y., Alqadi, M. K., Aljarrah, K. M. (2012). Radon concentration and radon effective dose rate in dwellings of some villages in the district of Ajloun, Jordan. *Applied Radiation and Isotopes*, 70 (8), 1579-1582.
- Amin, R. M. (2014). Evaluation of radon gas concentration in the drinking water and dwellings of south-west Libya, using CR-39 detectors. *International Journal of Environmental Sciences*, 4(4), 484-490.
- Appleton, J. D. (2013). **Radon in air and water**. Part II. (O. Selinus, Ed.). In essentials of medical geology Springer, Dordrecht. 239-277.
- Arslan, N. (2017). The effects of radiation on biological systems/Radyasyonun biyolojik sistemler üzerindeki etkileri. In *Nuclear Medicine Seminars*, 3(3), 178-184. Galenos Yayınevi Tic. Ltd.

- Atakan, Y. (2014). *Radyasyon ve Sağlığımız?* Nobel Akademik Yayıncılık. Yayın Nu:832. 1.Basım. Ankara, Türkiye. ISBN:978-605-133-734-0
- Aydoğmuş, A. (2019). Konutlarda yer kabuğu kaynaklı radyasyon radon gazı. *geoCED*, 4, 28-38.
- Azhdarpoor, A., Hoseini, M., Shahsavani, S., Shamsedini, N., Gharehchahi, E. (2021). Assessment of excess lifetime cancer risk and risk of lung cancer due to exposure to radon in a middle eastern city in Iran. *Radiation Medicine and Protection*, 2(3), 112-116.
- Badhan, K., Mehra, R., Sonkawade, R. G. (2012). Studying the variation of indoor radon levels in different dwellings in Hoshiarpur district of Punjab, India. *Indoor and Built Environment*, 21(4), 601-606.
- Baran, A. (2013). *Denizli ve çevresindeki termal alanlarda bina içi radon düzeylerinin belirlenmesi*, Yüksek lisans tezi. Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, Türkiye.
- Barınmaz, D. (2009). *Nükleer tıp uygulamalarında radyasyon doz dağılımlarının belirlenmesi*, Yüksek lisans tezi. İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Barros-Dios, J. M., Barreiro, M. A., Ruano-Ravina, A., Figueiras, A. (2002). Exposure to residential radon and lung cancer in Spain: a population-based case-control study. *American Journal of Epidemiology*, 156(6), 548-555.
- Barta, J. A. Powell, C. A. Wisnivesky, J. P. (2019). Global epidemiology of lung cancer. *Annals of Global Health*, 85(1), 8.
- Başaran, H. (2019). *Nevşehir ilinde kanser yoğunluğu gözlenen yerleşim birimlerinin yüzey topraklarının radyolojik açıdan incelenerek yıllık etkin doz eşdeğerlerinin bulunması*, Yüksek lisans tezi. Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Nevşehir, Türkiye
- Baysson, H., Tirmarche, M., Tymen, G., Gouva, S., Caillaud, D., Artus, J. C., Vergnenegre, A., Ducloy, F., Laurier, D. (2004). Indoor radon and lung cancer in France. *Epidemiology*, 15(6), 709-716.
- Becerir, H. B. (2018). Radyasyonun biyolojik etkileri. *MedFiz@Online*, 15, 4-15. Erişim tarihi: 20.09.2022. Erişim adresi: https://medikalfizik.org/uploads/fck/15_SAYI_son1.pdf
- Bilgial, (2019). Solunum sistemi organları ve görevleri nelerdir? Erişim Tarihi: 24.10.2022. Erişim adresi: <https://www.bilgial.com/solunum-sistemi-organlari-ve-gorevleri-nelerdir/>
- Blanco-Novoa, O., Fernández-Caramés, T. M., Fraga-Lamas, P., Castedo, L. (2018). A cost-effective IoT system for monitoring indoor radon gas concentration. *Sensors*, 18(7), 2198.
- Bora, H. (2001). Radyasyon güvenliği. *Ankara Sağlık Hizmetleri Dergisi*, 2(1), 91-98.
- Bräuner, E.V., Andersen, C.E., Sørensen, M., Andersen, Z.J., Gravesen, P., Ulbak, K., Hertel, O., Pedersen, C., Overvad, K., Tjønneland, A., Raaschou-Nielsen, O. (2012). Residential radon and lung cancer incidence in a Danish cohort. *Environmental Research*, 118, 130-136.
- Cabi Değerli, F. Umaroğulları, F. (2017). Binalarda radon ve sağlık üzerindeki etkileri. *Yeşil Bina Dergisi*, 45, 264.
- Can, B., (2011). *Kilis ilindeki evlerde radon gazı ölçümü*, Yüksek lisans tezi. Kilis 7 Aralık Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kilis, Türkiye.

- Carlisle, D., Azzouz, H. (1993). Discovery of radon potential in the rincon shale, California—A case history of deliberate exploration. *Indoor Air*, 3(2), 131-142.
- Catalano R., Immè G., Mangano G., Morelli D., Tazzer A.R. (2012). Indoor radon survey in eastern Sicily. *Radiation Measurements*, 47, 105-110.
- Chahine, T., Schultz, B. D., Zartarian, V. G., Xue, J., Subramanian, S. V., Levy, J. I. (2011). Modeling joint exposures and health outcomes for cumulative risk assessment: the case of radon and smoking. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 8(9), 3688-3711.
- Chen, J., Rahman, N. M., Atiya, I. A. (2010). Radon exhalation from building materials for decorative use. *Journal of Environmental Radioactivity*, 101(4), 317-322.
- Cherouati, D. E., Djeflal, S., Durrani, S. A. (1988). Calibration factor for LR-115 detectors used for the measurement of alpha activity from radon. *International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part D. Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, 15(1-4), 583-586.
- Cohen, B. L. (1982). Effects of ICRP Publication 30 and the 1980 BEIR Report in hazard assessments of high-level waste. *Health Physics*, 42(2), 133-143.
- Cosma, C., Moldovan, M., Dicu, T., Kovacs, T. (2008). Radon in water from Transylvania (Romania). *Radiation Measurements*, 43(8), 1423-1428.
- Cosma, C., Szacsvai, K., Dinu, A., Ciorba, D., Dicu, T., Suci, L. (2009). Preliminary integrated indoor radon measurements in Transylvania (Romania). *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 45(3), 259-268.
- Coşkun, Ö. (2011). İyonize radyasyonun biyolojik etkileri. *Teknik Bilimler Dergisi*, 1(2), 13-17.
- Çelebi N., Ataksor B., Taşkın H., Albayrak N. (2015). Indoor radon measurements in Turkey Dwellings. *Radiation Protection Dosimetry*, 167(4), 626-632.
- Çetingöz, R., Uzal, C., Garipağaoğlu, M., Bilge, H., Çakar Gökçe, Ş., Özyiğit, G., Yıldız, O. G. (2013). **Temel ve klinik radyoterapi**. Türk Radyasyon Onkolojisi Derneği (TROD) Yayınları. Yayın No:1. 1. Baskı, İstanbul, Türkiye. ISBN:978-605-63913-0-9
- Çiftçi, Y., Işık, M. A., Alkeveli, T., Yeşilova, Ç. (2008). Van gölü havzasının çevre jeolojisi. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 32(2), 45-77.
- Davutoğlu, H. (2008). *Radon gazını ölçme metotları*, Yüksek lisans tezi. Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, Türkiye.
- de Groot, P.M., Wu, C.C., Carter, B.W., Munden, R.F. (2018). The epidemiology of lung cancer. *Translational Lung Cancer Research*, 7(3), 220.
- Degens, E. T., Wong, H. K., Kempe, S., Kurtman, F. J. G. R. (1984). A geological study of Lake Van, eastern Turkey. *Geologische Rundschau*, 73(2), 701-734.
- Deka, P. C., Sarkar, S., Bhattacharjee, B., Goswami, T. D., Sarma, B. K., Ramachandran, T. V. (2003). Measurement of radon and thoron concentration by using LR-115 type-II plastic track detectors in the environ of Brahmaputra Valley, Assam, India. *Radiation Measurements*. 36(1-6), 431-434.
- Dios J.M.B., Barreiro M.A., Ravina A.R., and Figueiras A., 2002. Exposure to residential radon and lung cancer in Spain: a population-based case-control study. *American Journal of Epidemiology*, 156 (6), 548-555.
- Dudney, C. S., Hawthorne, A. R., Wallace, R. G., Reed, R. P. (1990). Radon-222, 222Rn progeny, and 220Rn progeny levels in 70 houses. *Health Physics*, 58(3), 297-311.
- Durrani, S. A., Bull, R. K. (2013). **Solid state nuclear track detection: principles, methods and applications** (Vol. 111). Pergamon Press. Elsevier.

- Dursun, E. (2016). *Rize ilinde akciğer kanserli bireylerin evlerinde radon gazı ölçümleri ve akciğer kanseri radon ilişkisi*, Yüksek lisans tezi. RTEÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Rize, Türkiye.
- Eckerman, K., Harrison, J., Menzel, H. G., Clement, C. H. (2012). ICRP publication 119: compendium of dose coefficients based on ICRP publication 60. *Annals of the ICRP*, 41, 1-130.
- Eisenbud, M. (1987). **Environmental radioactivity**. Academic Press, INC, London LTD, New York, 486. ISBN 0-12-235153-3
- Erbaycu, A.E. (2020). Akciğer kanserinde epidemiyoloji ve risk faktörleri. *Türkiye Klinikleri*, 1. 1-5.
- Eroğlu, G., Şahiner, M. (2017). Dünyada ve Türkiye’de uranyum ve toryum. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA). Erişim tarihi:10.09.2022. Erişim adresi: <https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgi-merkezi/maden-serisi/Uranyum-Toryum.pdf>
- Fernández, L. C., Alvarez, R. F., González-Barcala, F. J., Portal, J. A. R. (2013). Indoor air contaminants and their impact on respiratory pathologies. *Archivos de Bronconeumología (English Edition)*, 49(1), 22-27.
- Field R.W., Steck D.J., Smith B.J, Brus C.P., Fisher E.L., Neuberger J.S., Platz C.E., Robinson R.A., Woolson R.F., Lynch C.F. (2000). Residential radon gas exposure and lung cancer: the Iowa radon lung cancer study. *American Journal of Epidemiology*, 151(11), 1091-1102.
- Fişne, A. (2002). *Yeraltı madenlerinde radon gazı konsantrasyon seviyelerinin belirlenmesi ve işçi sağlığı üzerine etkilerinin araştırılması*, Yüksek lisans tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Franco-Marina, F., Villalba-Caloca, J., Segovia, N., Tavera, L. (2003). Spatial indoor radon distribution in Mexico City. *Science of the Total Environment*, 317(1-3), 91-103.
- Gazioğlu Şensoy, R.İ., Baş, E.Ö., Yılmaz, Y. (2019). Yüksek rakım bağıcılığı: Van ili Örneği. **III. International Eurasian Agriculture and Natural Sciences Congress**, Konya, Turkey.
- Gelgün, S. (2010). *Kütahya ili kapalı mekânları radon gazı konsantrasyonu ölçümü*, Yüksek lisans tezi. Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, Türkiye.
- Gollins, C.L. Haines, C. Perkel, R., Enck, R. E. (2007). Lung cancer: diagnosis and management. *American Family Physician*, 75(1), 56-63.
- Google Earth. Erişim tarihi: 20.08.2022. Erişim adresi: <https://www.google.com/earth/index.html>
- Gökoğlu, E., Ekinci, M., Özgenç, E., İlem Özdemir, D., Aşıkoğlu, M. (2020). Radyasyon ve insan sağlığı üzerindeki etkileri. *Anatolian Clinic the Journal of Medical Sciences*, 25(3), 289-294.
- Görentaş, G. (2015). *Van’ın büyükşehir olma sürecinde ulaşım planlaması politika ve ilkeler*, Yüksek lisans tezi. Bahçeşehir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Graustein, W. C., Turekian, K. K. (1990). Radon fluxes from soils to the atmosphere measured by 210Pb–226Ra disequilibrium in soils. *Geophysical Research Letters*, 17(6), 841-844.
- Gray, A., Read, S., Mc Gale, P., Darby, S. (2009). Lung cancer deaths from indoor radon and the cost effectiveness and potential of policies to reduce them. *Bmj*, 338.

- Hacıosmanoğlu, T. (2017). Doğal ve yapay radyasyon kaynakları, kişisel doza katkıları. *Nucl Med Semin*, 3, 166-171.
- Harrison, J. D., Marsh, J. W. (2012). Effective dose from inhaled radon and its progeny. *Annals of the ICRP*, 41(3-4), 378-388.
- Hasanzadeh, E., Mianji, F., Sadighzadeh, A., Mizani, F. (2016). Comparison of passive and active radon measurement methods for personal occupational dose assessment. *Nuclear Technology and Radiation Protection*, 31(1), 73-78.
- Herbst, R.S., Morgensztern, D., Boshoff, C. (2018). The biology and management of non-small cell lung cancer. *Nature*, 553(7689), 446-454.
- Hussein, Z. A., Jaafar, S. M., Ismail, H. A., Battawy, A. A. (2013). Radon exhalation rate from building materials using passive technique nuclear track detectors. *Int J Scientific Eng Res*, 4(7), 1276-1282.
- IARC. (1988). *IARC mono graphs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. man-made mineral fibres and radon*. IARC Press, Lyon, vol 43, pp. 33–171
- ICRP. (1987). *Lung cancer risk from indoor exposures to radon daughters. appendix: special quantities and units*. annals of the ICRP 17, Publication 50, Pergamon Press. 1-60.
- ICRP (1993). *Protection against Rn-222 at home and at work*. Annals of the ICRP 23, Publication 65, 2.
- ICRP. (2007). *The 2007 Recommendations of the international commission on radiological protection*, ICRP Publication 103, Ann. ICRP 37 (2–4). <https://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20103>
- ICRP. (2010). *Lung cancer risk from radon and progeny and statement on radon*. ICRP Publication 115. Ann. ICRP 40(1). <https://www.icrp.org/publication.asp?id=icrp%20publication%20115>
- İşık, E., Aydın, M. C., Bakış, A., Özlük, M. H. (2012). The faults near Bitlis and seismicity of the region, Bitlis Eren University. *BEU Journal of Science*, 1(2), 153-169.
- İçhedef, M., Saç, M. M., Camgöz, B., Bolca, M., Harmanşah, Ç. (2013). Soil gas radon concentrations measurements in terms of great soil groups. *Journal of Environmental Radioactivity*, 126, 165-171.
- Jacobi, W. (1984). Possible lung cancer risk from indoor exposure to radon daughters. *Radiation Protection Dosimetry*, 7(1-4), 395-401.
- Kang, J. K., Seo, S., Jin, Y. W. (2019). Health effects of radon exposure. *Yonsei Medical Journal*, 60(7), 597-603.
- Kapdan, E. (2009). *Adapazarı merkezi kış dönemi radon ölçüm ve analizleri*, Yüksek lisans tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Kendall, G. M., Smith, T. J. (2002). Doses to organs and tissues from radon and its decay products. *Journal of Radiological Protection*, 22 (4), 389-406.
- Khan, A.J. (2000). A study of indoor radon levels in Indian dwellings, influencing factors and lung cancer risks. *Radiation Measurements*. 32, 87-92.
- Khan, F., Ali, N., Khan, E. U., Khattak, N. U., Raja, I. A., Baloch, M. A., Rajput, M. U. (2012). Study of indoor radon concentrations and associated health risks in the five districts of Hazara division, Pakistan. *Journal of Environmental Monitoring*, 14(11), 3015-3023.
- Kıraç, F. S., Yüksel, D. (2001). *Radyasyon biyolojisi*. Gültürk Ofset Tanıtım, Denizli, Türkiye. ISBN 975-97560-0-5.

- Kpordzro, R. (2021). Comparison and review of CR-39 and DOSIRAD LR-115 in terms of indoor radon measurements in Ghana. *International Atomic Energy Agency (IAEA)*, 52(30).
- Krane, K.S., 1988. *Nükleer Fizik 1*. (B. Şarer, Ed.). Palme Yayınları:173. 1. Baskı. Ankara, Türkiye, 2001. ISBN:975-7477-82-6.
- Kucukomeroglu, B., Yesilbag, Y. O., Kurnaz, A., Çelik, N., Çevik, U., Celebi, N. (2011). Radiological characterisation of Artvin and Ardahan provinces of Turkey. *Radiation Protection Dosimetry*, 145(4), 389-394.
- Kumar, M., Agrawal, A., Kumar, R. (2014). Radiation dose due to radon, thoron and their decay products in indoor environment of Khurja City, UP, India. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 300(1), 39-44.
- Kurtman, C. (2018). Radyobiyoijide hücre siklusu, 5r ve hasar. *Ankara Sağlık Hizmetleri Dergisi*, 17(1), 25-27.
- Leung, S. Y. Y., Nikezic, D., Leung, J.K.C., Yu, K. N. (2007). Derivation of V function for LR 115 SSNTD from its partial sensitivity to ^{222}Rn and its short-lived progeny. *Journal of Environmental Radioactivity*, 92(1), 55-61.
- Magalhães, M. H., Amaral, E. C. S., Sachett, I., Rochedo, E. R. R. (2003). Radon-222 in Brazil: an outline of indoor and outdoor measurements. *Journal of Environmental Radioactivity*, 67(2), 131-143.
- Manisalıgil, Y. A., Yurt, A. (2018). İyonlaştırıcı radyasyonun hücresel ve moleküler düzeydeki etkileri. *Duzce Medical Journal*, 20(2), 50-53.
- Marsh W.J., Birchall A., Butterweck G., Dorrian M. D., Huet C., Ortega, X., A. Reineking, G. Tymen, Ch. Schuler, A. Vargas, G. Vezzu, Wendt J., (2002). Uncertainty analysis of the weighted equivalent lung dose per unit exposure to radon progeny in the home. *Radiation Protection Dosimetry*, 102(3), 229-248.
- Marsh, J. W., Bailey, M. R. (2013). A review of lung-to-blood absorption rates for radon progeny. *Radiation Protection Dosimetry*, 157(4), 499-514.
- Marsh, J. W., Harrison, J. D., Laurier, D., Blanchardon, E., Paquet, F., Tirmarche, M. (2010). Dose conversion factors for radon: recent developments. *Health Physics*, 99(4), 511-516.
- Martin, J.E. (2013). *Radyasyon ve Radyasyondan Korunma Fiziği (Sağlık Fiziği Uygulamalı)*. (Tanır, Bölükdemir, Koç, Ed.). Palme Yayıncılık. Ankara, Türkiye.
- Mehta, V., Chauhan, R. P., Mudahar, G. S. (2013). Determining bulk etch rate of LR-115 type II SSNTD: a novel approach. *Optoelectronics and Advanced Materials-Rapid Communications*, 7, 952-955.
- Memorial. (2021). Akciğer kanseri belirtileri, yaşam süresi ve tedavisi. Erişim tarihi: 31.08.2021. Erişim adresi: <https://www.memorial.com.tr/hastaliklar/akciger-kanseri>.
- Mosley, R. B. (1992a). A mathematical model describing radon entry aided by an easy path of migration along underground channels. **In The 1992 International Symposium on Radon and Radon Reduction Technology: Additional Papers.** Minnesota /Minneapolis, U.S.A.
- Mosley, R. B. (1992b). A simple model for describing radon migration and entry into houses **(No. CONF-901010-Pt. 1)**. Battelle Press, Columbus, OH (United States).
- Mowlavi, A. A., Fornasier, M. R., Binesh, A., Denaro, M. D. (2012). Indoor radon measurement and effective dose assessment of 150 apartments in Mashhad, Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 184(2), 1085-1088.

- Muntean, L. E., Cosma, C., Cucos, A., Dicu, T., Moldovan, D. V. (2014). Assessment of annual and seasonal variation of indoor radon levels in dwelling houses from Alba County, Romania. *Rom Journ Phys*, 59(1-2), 163-71.
- Ng, K. H. (2003). Non-ionizing radiations—sources, biological effects, emissions and exposures. In **Proceedings of the international conference on non-ionizing radiation at UNITEN (ICNIR 2003)**, Malaysia.
- Nufusu.com. (2012). Van Nüfusu. Erişim tarihi:22.11.2022. Erişim adresi: <https://www.google.com/search?q=https%3A%2F%2Fwww.nufusu.com+%E2%80%BA+van+nufusu&oq=&aqs=chrome.0.69i59i450l8.23119j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8>
- Otansev, P. (2021). Ev içi radon aktivite konsantrasyonu ve kanser riski. *BEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 10 (3), 683-691.
- Örgün, Y., Çelebi, N. (2015). Radyasyon, radon (rn) ve toplum sağlığı. *TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Haber Bülteni*, 11-24. https://www.jmo.org.tr/resimler/ekler/03f20a42de5f061_ek.pdf?dergi=HABER%20B%DCLTEN%DD
- Özden, N. (1977). **Radyoaktivite ve radyasyonlar**. İstanbul Teknik Üniversitesi Nükleer Enerji Enstitüsü Genel Yayınlar. No:14, İstanbul, Türkiye.
- Özdoğan, M. (2020). Türkiye kanser istatistikleri 2020. Erişim tarihi: 20.10.2022. Erişim adresi: <https://www.drozdogan.com/turkiye-kanser-istatistikleri-2020/>.
- Özkan, E. (2016). Elektromanyetik dalgaların insanlar üzerindeki etkileri nelerdir? Erişim tarihi:08.07.2022. Erişim adresi: <https://www.gercekbilim.com/elektromanyetik-dalgalarin-insanlar-uzerindeki-etkileri-nelerdir/>
- Öztek, S.S. (2017). Radyasyondan korunma. Nükleer enerji dünyası. Erişim tarihi: 15.09.2022. Erişim adresi: http://www.nukleer.web.tr/nukleer_guvenlik/radyasyon01.html
- Paquet, F., Bailey, MR, Leggett, RW, Lipsztein, J., Marsh, J., Fell, TP, Smith, T., Nosske, D., Eckerman, K.F., Berkovski, V., Blanchardon, E., Gregoratto, D., Harrison, J.D., (2017). CRP publication 137: occupational intakes of radionuclides: part 3. *Annals of the ICRP*, 46(3-4), 1-486.
- Pérez-Ríos, M., Barros-Dios, J. M., Montes-Martínez, A., Ruano-Ravina, A. (2010). Attributable mortality to radon exposure in Galicia, Spain. Is it necessary to act in the face of this health problem? *BMC Public Health*, 10(1), 1-6.
- Reimer, G. M., Gundersen, L. C. S. (1989). A direct correlation among indoor Rn, soil gas Rn and geology in the reading prong near Boyertown, Pennsylvania. *Health Physics*, 57(1), 155-160.
- Resnikoff, M. (2011). Radon in natural gas from Marcellus Shale. *Ethics in Biology, Engineering and Medicine: An International Journal*, 2(4), 317-331.
- Rohmingliana, P. C., Vanchhawng, L., Thapa, R. K., Sahoo, B. K., Mishra, R., Zoliana, B., Mayya, Y. S. (2010). Measurement of indoor concentrations of radon and thoron in Mizoram, India. *Sci Vis*, 10(4), 148-152.
- Sac, M. M. (2009). Bursa bölgesinde bazı binalarda doğal gazdan gelen radon katkısının incelenmesi. *Engineering Sciences*, 4(4), 442-448.
- Salameh, B., Abu-Haija, O., Ajlouni, A. W., Abdelsalam, M. (2011). Radiation doses due to indoor radon concentration in Tafila District, Jordan. *Research Journal of Environmental Toxicology*, 5(1), 71-75.

- Sathish, L. A., Nagaraja, K., Ramachandran, T. V. (2012). Indoor ^{222}Rn and ^{220}Rn concentrations and doses in Bangalore, India. *Radiation Protection Dosimetry*, 151(2), 344-353.
- Schmid, K., Kuwert, T., Drexler, H. (2010). Radon in indoor spaces: an underestimated risk factor for lung cancer in environmental medicine. *Deutsches Arzteblatt International*, 107(11), 181-6.
- Schwartz, G. G., Klug, M. G. (2016). Incidence rates of chronic lymphocytic leukemia in US states are associated with residential radon levels. *Future Oncology*, 12(2), 165-174.
- Selçuk, N. A., Yencilek, F., 2018. Prostat Kanserinde Ra-223 alfa tedavi. *Nucl Med Semin*, 4, 240-244.
- Sethi, T. K., El-Ghamry, M. N., Kloecker, G.H. (2012). Radon and lung cancer. *Clin Adv Hematol Oncol*, 10(3), 157-164
- Sharma, S., Kumar, A., Mehra, R. (2018). Age-dependent inhalation dose due to exposure of short lived progeny of radon and thoron for different age groups in Jammu & Kashmir, Himalayas. *Radiation Protection Dosimetry*, 182(4), 427-437.
- Sheen, S., Lee, K. S., Chung, W. Y., Nam, S., Kang, D. R. (2016). An updated review of case-control studies of lung cancer and indoor radon-Is indoor radon the risk factor for lung cancer? *Annals of Occupational and Environmental Medicine*, 28(1), 1-9.
- Shweikani, R., Raja, G. (2009). Radon exhalation from some finishing materials frequently used in Syria. *Radiation Measurements*, 44(9-10), 1019-1023.
- Silsüpür, G.B., Sakarya, A. (2015). Mesleki radyasyon maruziyeti ve İSG mevzuatındaki yeri. 1. **Uluslararası Radyasyondan Korunma Kongresi**, Ankara, Türkiye.
- Soğukpınar, H. (2013). *Eskişehir ilinde kapalı ortam radon yoğunlukları için mevsimsel düzeltme faktörlerinin belirlenmesi*, Doktora tezi. Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, Türkiye.
- Stowe, M. H. (1994). *Predicting indoor radon-222 concentration*, Doctoral dissertation. Yale University New Haven, United States of America.
- Tabar, E. (2017). Calibration of LR-115 type-II detectors used in radon measurements. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21(3), 356-362
- TAEK. (2012). *Kapalı ortamlarda radon gazı teknik raporu (TR-2012-3)*, Ankara. <https://kurumsalarsiv.tenmak.gov.tr/bitstream/20.500.12878/316/4/10003.pdf>
- Takatori, M., Yagi, M., Hattori, S. (2013). Potential solutions in radiation hormesis. *Journal of Cancer Research Updates*, 2(2), 95-98.
- Tarakçı, M. (2023). Fizikte veri analizi: Anlamlı rakamlar ve aritmetik işlemler. Erişim tarihi: 04.01.2023. Erişim adresi: <https://docplayer.biz.tr/109823100-Fizikte-veri-analizi>.
- Tarakçı, M. (2013). *Tektonik aktivite ile radon değişimleri arasındaki ilişkilerin doğrusal olmayan analiz ile değerlendirilmesi*. Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, Türkiye.
- Tosaka. (2008). Decay chain (4n+1, Neptunium series). Erişim tarihi:11.10.2022. Erişim adresi: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Decay_chain_\(4n%2B1,Neptunium series\).PNG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Decay_chain_(4n%2B1,Neptunium_series).PNG).
- UKCCS Investigators. (2002). The united kingdom childhood cancer study of exposure to domestic sources of ionising radiation: 1: radon gas. *British Journal of Cancer*, 86(11), 1721-1726.

- UNSCEAR. (1982). *Ionizing radiation: sources and biological effects annex a. dose assessment models report to the general assembly*. United Nations, New York. 727-773.
- UNSCEAR. (1988). *Sources, effects and risks of ionizing radiation. annex a. exposures from natural sources of radiation*. United Nations, New York. 123.
- UNSCEAR. (1994). *Sources and effects of ionizing radiation, Annex A*. United Nations, New York. 167.
- UNSCEAR. (2000). *Sources, effects of ionizing radiation. raport to the general assembly, with scientific annexes. Annex B: Exposures from natural radiation sources*. United Nations, New York. 84-141.
- UNSCEAR. (2006). *Sources-to-effects assessment for radon in homes and workplaces*. United Nations, New York.
- UNSCEAR (2008). *Effects of ionizing radiation, united nations scientific committee on the effects of atomic radiation 2006 Report, Volume I: report to the general assembly. Scientific Annexes A and B*. United Nations, New York. 388.
- UNSCEAR (2019) *Sources, effects and risks of ionizing radiation report to the general assembly, with scientific annexes. Annex B: Lung cancer from exposure to radon*. United Nations, New York. 261-275.
<https://www.unscear.org/unscear/en/publications/2019.html>
- Ursulean, I., Corețchi, L., Chiruță, I., Vîrlan, S. (2012). Estimation of indoor radon concentrations in the air of residential houses and mines in the Republic of Moldova. **In first east european radon symposium–feras**, Cluj-Napoca, Romania.
- Valentin, J. (2003). Relative biological effectiveness (RBE), quality factor (Q), and radiation weighting factor (wR): ICRP Publication 92. *Annals of the ICRP*, 33(4), 1-121.
- Van İl Kültür Turizm Müdürlüğü. (2023). Genel bilgiler. Erişim tarihi: 02.03.2023, <https://van.ktb.gov.tr/TR-52093/genel-bilgiler.html>
- Veiga, L. H. S., Melo, V., Koifman, S., Amaral, E. C. S. (2004). High radon exposure in a Brazilian underground coal mine. *Journal of Radiological Protection*, 24(3), 295-305.
- Verma, D., Khan, M. S. (2014). Assesment of indoor radon, thoron and their progeny in dwellings of bareilly city of northern india using track etch detectors. *Rom. Journ. Phys*, 59(1-2), 172-182.
- Vikipedi. (2022). Beklenen yaşam süresi Erişim tarihi:15.12.2022. Erişim adresi: https://tr.wikipedia.org/wiki/Beklenen_ya%C5%9Fam_s%C3%BCresi.
- Vogiannis, E. G., Nikolopoulos, D. (2015). Radon sources and associated risk in terms of exposure and dose. *Frontiers in Public Health*, 2, 207.
- Wichmann, H. E., Rosario, A. S., Heid, I. M., Kreuzer, M., Heinrich, J., Kreienbrock, L. (2005). Increased lung cancer risk due to residential radon in a pooled and extended analysis of studies in Germany. *Health Physics*, 88(1), 71-79.
- Wrixon, A. D. (2008). New ICRP recommendations. *Journal of Radiological Protection*, 28(2), 161-168.
- Yeşilbag, Y. Ü., Küçükömeroğlu, A., Kurnaz, A., Uzderya, F. (2010). Seasonal variation or indoor radon in Artvin, Turkey. In *AIP (American Institute of Physics) Conference Proceedings*. 1203(1), 1097-1099.

- Yeşilova, Ç., Yakupoğlu, T. (2007). Adilcevaz kireçtaşı'nın (Van Gölü Kuzeyi) mikrofasiyes özellikleri/ Microfacies properties of Adilcevaz limestone (North of Lake Van). *Türkiye jeolojibülteni*, 50(1), 27-40.
- Yoon, J. Y., Lee, J. D., Joo, S. W., Kang, D. R. (2016). Indoor radon exposure and lung cancer: a review of ecological studies. *Annals of Occupational and Environmental Medicine*, 28(1), 1-9.
- Yumurtacı, E. (2014). *Toprakta sürekli radon gazı ölçümleri için eş zamanlı izleme sisteminin geliştirilmesi ve İzmir Urla bölgesinde uygulanması*, Doktora tezi. Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, Türkiye.
- Yülek, G. G. (1992). **Radyasyon fiziği ve radyasyondan korunma**. SEK Yayınları. No:14. Ankara, Türkiye. ISBN-975-7813-13-3
- Zeyrek, C. T. (2013). İyonize radyasyon uygulamaları için güvenlik ve korunmaya yönelik genel kavramlar. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 17(3), 1-9.



EKLER

Ek 1. Binalarda Radon Araştırması Bilgi Formu

1. Yaşınız:
2. Cinsiyetiniz: 1) Kadın 2) Erkek
3. Medeni durumunuz: 1) Evli 2) Bekar
4. Eğitim düzeyiniz: 1) Okur-Yazar değil 2) Okur-Yazar 3) İlkokul 4) Ortaokul 5) Lise 6) Üniversite
5. Mesleğiniz: 1) Memur 2) İşçi 3) Çiftçi 4) Serbest Meslek 5) Ev hanımı 6) Şoför 7) İşsiz 8) Emekli
6. Boyunuz: cm.
7. Kilonuz: kg.
8. Sosyal güvenceniz: 1) Var 2) Yok
9. Sigara alışkanlığınız: 1) Var (kaç yıl ve sıklığı) 2) Yok 2) Pasif içicilik
10. Kronik hastalığınız: 1) Var 2) Yok
11. Yaşadığınız yer: 1) İpekyolu 2) Tuşba 3) Edremit
12. Gelir düzeyiniz: 1) 2000TL'den az 2) 2000-3000TL 3) 3000-4000TL 4) 4000TL ve üzeri
Araştırma yapılan dedektör no:.....
Görüşmenin yapıldığı tarih :.....
Görüşme yapılan kişinin adı soyadı:.....
Görüşme yapılan kişinin adresi, tel no:.....
Radon dedektörünün eve konuş tarihi:.....Alınış tarihi:.....
Lütfen bina ve binanın yapısı hakkında uygun olanlarını işaretleyerek yanıtlayınız.
1. Binanın tipi: 1. Apartman bodrumlu 2. Apartman bodrumsuz 3. Müstakil bodrumlu 4. Müstakildodrumsuz 5. Ahşap ev 6) Toprak ev 7) Prefabrik 8) Diğer
2. Binanın yapıldığı yıl: 1. 1995'dan önce 2. 1995-2000 3. 2000- 2005 4. 2005-2010 5. 2010-2015 6. 2015'den sonra
3. Binanın ısı yalıtımı var mı? 1. var 2. yok
3. Binanın duvar, tavan ve tabanının yapı malzemesi: Taban : 1. Toprak 2. Beton 3. Ahşap Tavan : 1. Beton 2. Ahşap 3. Diğer Duvarlar : 1. Beton 2. Tuğla 3. Briket 4. Taş 5. Diğer.....
4. Pencerelerin durumu: 1. Pencereler tek camlı ısı yalıtımı iyi 2. Pencereler tek camlı ısı yalıtımı zayıf 3. Pencereler çift camlı ısı yalıtımı iyi 4. Pencereler çift camlı ısı yalıtımı zayıf
5. Havalandırma sistemi: 1. Doğal havalandırma 2. Mekanik havalandırma
6. Havalandırma durumu: 1. İyi havalanıyor 2. Az havalanıyor 3. Hiç havalanmıyor
7. Kışın ısıtma sistemi: 1. Kalorifer 2. Kömür sobası 3. Doğal gaz 4. Diğer.....
8. Aşağıdaki boşlukları doldurunuz. a. Binanın kullanım alanım ² b. Oda sayısı adet. c. Oturma salonunun alanı.....m ² d. Yatak odasının alanı.....m ²
10. Kaç yıldır bu binada yaşıyorsunuz? 1. 10 yıldan az 2. 10-20 yıl 3. 20-30 yıl 4. 30-40 yıl 5. 40-50 yıl 6. 50 yıldan fazla
9. Akciğer kanseri aile öyküsü var mı? 1. var (yakınlık derecesi) 2. yok 3. bilmiyorum
10. Hasta tedavi almış mı? tedavi aldıysa türünü belirtiniz? 0. Cerrahi tedavi 1. Kemoterapi (KT) 2. Radyoterapi (RT) 3. Kombine Tedavi 4. Tedavi almamış
12. Evdeki bireylerden hasta dışında akciğer kanserinden ölen oldu mu?



Ek 2. Etik Kurul Onay Belgesi



**T.C.
VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
GİRİŞİMSSEL OLMAYAN
KLİNİK ARAŞTIRMALAR ETİK KURULU
KARAR FORMU**

KARAR BİLGİLERİ	Karar No: 2019/08-04	Tarih: 19/04/2019
	Dr. Öğr. Üyesi Nergiz YILDIZ YORGUN sorumluluğunda yapılması tasarlanan ve yukarıda başvuru bilgileri verilen "Van İlindeki Konutlarda Radon Konsantrasyonunun Zamana Bağlı Değişimi ve Akciğer Kanseri ile İlişkisinin Araştırılması" isimli bilimsel araştırma başvuru dosyası ve ilgili belgeler araştırmanın gerekçe, amaç, yaklaşım ve yöntemleri dikkate alınarak incelenmiştir. Araştırmacıların Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Girişimsel Olmayan Klinik Araştırmalar Etik Kurulunun Çalışma Esasları Hakkında Yönergesinde belirtilen hususları yerine getirdikleri belirlenmiş olup, çalışmaları ile ilgili tüm sorumluluk araştırmacılara ait olmak üzere, söz konusu çalışmanın gerçekleştirilmesinde sakınca bulunmadığına, toplantıya katılan Etik Kurul üye tam sayısının salt çoğunluğu/oy birliği ile karar verilmiştir.	
	GİRİŞİMSSEL OLMAYAN KLİNİK ARAŞTIRMALAR ETİK KURULU	
	ETİK KURULUN ÇALIŞMA ESASI	Klinik Araştırmalar Hakkında Yönetmelik, İyi Klinik Uygulamaları Kılavuzu
BAŞKANIN UNVANI / ADI / SOYADI: Prof. Dr. Yasin TÖLÜCE		

Unvanı/Adı/Soyadı	Uzmanlık Alanı	Kurumu	Cinsiyet		Araştırma ile ilişki		Katılım *		İmza
Prof. Dr. Yasin TÖLÜCE	Tıbbi Biyoloji	Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Tıp Fakültesi	E ☒	K ☐	E ☐	H ☒	E ☒	H ☐	
Prof. Dr. Hülya ÖZDEMİR	Tıbbi Farmakoloji	Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Tıp Fakültesi	E ☐	K ☒	E ☐	H ☒	E ☒	H ☐	
Prof. Dr. Sıddık KESKİN	İstatistik Uzmanı	Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Tıp Fakültesi	E ☒	K ☐	E ☐	H ☒	E ☒	H ☐	
Prof. Dr. Serap GÜNEŞ BİLGİLİ	Dermatoloji	Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Tıp Fakültesi	E ☐	K ☒	E ☐	H ☒	E ☒	H ☐	
Doç. Dr. Muhammed BATUR	Göz Hastalıkları	Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Tıp Fakültesi	E ☒	K ☐	E ☐	H ☒	E ☒	H ☐	
Doç. Dr. Hülya GÜNBATAR	Göğüs Hastalıkları	Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Tıp Fakültesi	E ☐	K ☒	E ☐	H ☒	E ☒	H ☐	
Dr. Öğr. Üyesi Oruc ALLAHVERDİYEV	Tıbbi Farmakoloji	Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Eczacılık Fakültesi	E ☒	K ☐	E ☐	H ☒	E ☒	H ☐	
Dr. Öğr. Üyesi Zehra KAYA	Tıbbi Biyoloji	Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Tıp Fakültesi	E ☐	K ☒	E ☐	H ☒	E ☒	H ☐	
Dr. Öğr. Üyesi Sermin ALGÜL	Fizyoloji	Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Tıp Fakültesi	E ☐	K ☒	E ☐	H ☒	E ☒	H ☐	
Dr. Öğr. Üyesi Özgür GENÇ ŞEN	Endodonti	Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi	E ☐	K ☒	E ☐	H ☒	E ☐	H ☒	
Nazlı AKTAŞ YILMAZ	Avukat	Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Hukuk Müşavirliği	E ☐	K ☒	E ☐	H ☒	E ☒	H ☐	
Lütfü POLAT	Eczacı	Van Polat ECZANESİ	E ☒	K ☐	E ☐	H ☒	E ☐	H ☒	
Özge Burak DEĞER	Sağlık Mesleği Mensubu Olmayan Üye	Van Sanayiciler ve İş Kadınları Derneği	E ☐	K ☒	E ☐	H ☒	E ☐	H ☒	
Adnan SELÇUK	Sağlık Mesleği Mensubu Olmayan Üye	Van İş Geliştirme Merkezi	E ☒	K ☐	E ☐	H ☒	E ☒	H ☐	

Sayfa 2/2

Adres : Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Rektörlük Binası Merkez Kampüsü Van
Tel : 432- 2251701-05
Faks : 432-2251091
e-posta: etikkur@vyu.edu.tr



ÖZ GEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Halime ERZEN YILDIZ

Eğitim Bilgileri

Önlisans :
Üniversite : Van YYÜ
Yüksekokul : Sağlık Hizmetleri MYO
Bölüm : Hemşirelik
Mezuniyet Yılı : 1995

Lisans :
Üniversite : Van YYÜ
Fakülte : Fen Fakültesi
Bölüm : Fizik
Mezuniyet Yılı : 2003

Yüksek Lisans :
Üniversite : Van YYÜ
Enstitü : Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı : Fizik
Bilim Dalı : Nükleer Fizik
Mezuniyet Yılı : 2007

Akademik Yayınlar

- Demir, C., Demir, Y., Kul, A.R., Yıldız, H. (2019). statistical modeling of lead (pb) adsorption on Van pumice, *Eurasian Journal of Analytical Chemistry*, 14 (3), 21-29.
- Demir, C., Erzen Yıldız, H., Güven, S (2022). Vocational school of health services students' knowledge levels on hand hygiene. *ODU Medical Journal*, 9(1),21-28.
- Ekici, A., Yürektürk, Ş., Demir, C., Yıldız, H., Gürbüz, E. (2022). Kuaför salonlarında çalışan ve hizmet alan bireylerde demodex spp'nin görülme sıklığı. *İnönü Üniversitesi Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu Dergisi*, 10(2), 693-700.
- Yıldız, H., Demir, C., Gür, T., Yürektürk, Ş., Tekeli, A.E. (2022). Van ilinde kuaför işçilerinde bazı antioksidan enzim düzeylerinin belirlenmesi. *İnönü üniversitesi Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksek Okulu Dergisi*. 10(3), 918-929.
- Yıldız, H., Demir, C., Kul, A.R. (2019). Batch adsorption of methylene blue dyestuff using van sour cherry pulp and statistical comparison. *J. Int. Environmental Application & Science*, 14(4), 177-182
- Yıldız H., Yıldız N., Gür Filiz F. (2019). Determination of natural radioactivity levels of soil samples in lake turna surrounding in Van province. **3. Uluslararası Sosyal ve Beşeri Bilimler Kongresi**, Van, Türkiye.

- Yıldız, H., Yıldız Yorgun, N. (2021). frequency of lung cancer in Van central districts. **5th International Conference On Advances In Natural & Applied Sciences (ICANAS 2021)**, Ağrı, Türkiye.
- Yıldız N., Kartal R., Özdemir Ö. F., Yıldız H. (2017). cross section calculation of neutron poison isotopes by nuclear reaction models. **3rd International Conference on Theoretical and Experimental Studies in Nuclear Applications and Technology**, Adana, Türkiye.
- Yıldız Yorgun, N., Oto, B., Gür, F., Tarakçı, M., Erzen Yıldız, H., Kavaz, E. (2022). Measurement of the concentration of ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K in the soil in settlements on the coastline of lake Van, Turkey, *Radiation Protection Dosimetry*, 198(20), 1575–1584.
- Yılmaz G., İzmirli M., Çakır T., Akpınar Palabıyık Z., Yıldız H. (2010). Mide kardia, korpus ve antrum kanserli hastalarda yapılan farklı planlarda doz volum histogramları ile hedef volum ve riskli organ dozlarının karşılaştırılması. **IX. Ulusal Radyasyon Onkolojisi Kongresi**, Girne, Kıbrıs.

VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
LİSANSÜSTÜ TEZ ORJİNALLİK RAPORU

Tarih. 15/05/2023

Tez başlığı : Van İlindeki Konutlarda Radon Gazının Zamana Bağlı Değişimi ve Akciğer Kanseri ile İlişkinin Araştırılması

Yukarıda başlığı belirtilen tez çalışmamın, kapak sayfası, giriş, ana bölümler ve sonuç bölümlerinden oluşan toplam yüz on dört (114) sayfalık kısmına ilişkin, 15/05/2023 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre tezimin benzerlik oranı %13 (on üç) dür.

Uygulanan filtreler aşağıda verilmiştir:

- Kabul ve onay sayfası hariç,
- Teşekkür hariç,
- İçindekiler hariç,
- Simgeler ve kısaltmalar hariç,
- Gereç ve yöntemler hariç,
- Kaynakça hariç,
- Alıntılar hariç,
- Tezden çıkan yayınlar hariç,
- 7 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç (Limit match size to 7 words)

Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Lisansüstü Tez Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılmasına İlişkin Yönergeyi inceledim ve bu yönergede belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini bilgilerinize arz ederim.

Tarih ve imza
15/05/2023

Adı Soyadı: Halime ERZEN YILDIZ

Öğrenci No: 169102008

Anabilim Dalı: FİZİK

Programı: Doktora

Statüsü: () Yüksek lisans

(X) Doktora Statüsü

DANIŞMAN

ENSTİTÜ ONAYI

UYGUNDUR

UYGUNDUR