KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KOCAELİ İLİ YAHYA KAPTAN MAHALLESİ'NDE BİNA İÇİ RADON KONSANTRASYONUNUN BELİRLENMESİ

KAMİL KARATAY

KOCAELİ 2016

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

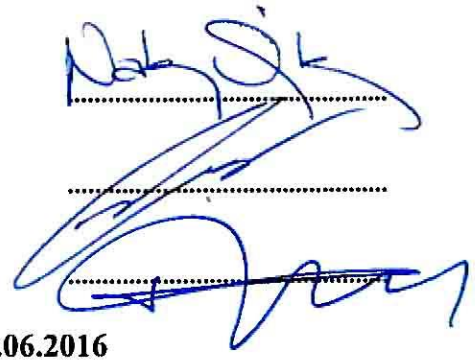
KOCAELİ İLİ YAHYA KAPTAN MAHALLESİ'NDE BİNA İÇİ RADON KONSANTRASYONUNUN BELİRLENMESİ

KAMİL KARATAY

Prof.Dr. Nalan ÖZKAN GÜRAY
Danışman, Kocaeli Üniv.

Doç.Dr. Nilgün DEMİR
Jüri Üyesi, Uludağ Üniv.

Doç.Dr. Hayriye SUNDU PAMUK
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.



Tezin Savunulduğu Tarih: 21.06.2016

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın hazırlanmasında danışmanlığımı üstlenen, bilgi ve tecrübeleri ile beni yönlendiren ve yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. Nalan ÖZKAN GÜRAY'a teşekkür ederim. Ayrıca katkılarından dolayı Doç. Dr. R. Taygun GÜRAY'a teşekkür ederim.

Saha çalışması sırasında bana yardım eden arkadaşım Emrah ÖZKAN'a, Yahya Kaptan Mahallesi muhtarı Ahmet MİRZAOĞLU'na ve evlerinde ölçüm izni veren Yahya Kaptan Mahallesi sakinlerine teşekkür ederim.

Yaşamım boyunca desteklerini esirgemeyen sevgili aileme sonsuz teşekkür ederim. Bu çalışma BAP 022 nolu proje ile desteklenmiştir.

Haziran - 2016 Kamil KARATAY

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
TABLOLAR DİZİNİ v
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ vi
ÖZET viii
ABSTRACT ix
GİRİŞ 1
1. TEMEL BİLGİLER 4
1.1. Atom Çekirdeğinin Yapısı 4
1.2. Çekirdek Kararlılığı 5
1.3. Radyasyon Tanımı ve Türleri 6
1.3.1. İyonlaştırıcı radyasyon 7
1.3.2. İyonlaştırıcı olmayan radyasyon 8
1.4. Radyasyon Kaynakları 8
1.4.1. Doğal radyasyon kaynakları 9
1.4.1.1. Kozmik radyasyon 9
1.4.1.2. Yeryüzü kaynaklı radyasyon 10
1.4.1.3. İç ışınlanma 11
1.4.2. Yapay radyasyon kaynakları 12
1.4.2.1. Tıbbi uygulamalar 12
1.4.2.2. Endüstriyel uygulamalar 12
1.4.2.3. Radyoaktif serpinti 13
1.4.2.4. Nükleer güç santralleri 14
1.4.2.5. Tüketici ürünleri 15
1.5. Bozunum Türleri 15
1.5.1. Alfa bozunumu 16
1.5.1.1. Durdurma gücü 17
1.5.2. Beta bozunumu 19
1.5.3. Gama bozunumu 22
1.5.3.1. Fotoelektrik olay 23
1.5.3.2. Compton olayı 23
1.5.3.3. Çift oluşumu 25
1.6. Radyasyon Birimleri 26
1.7. Radon 28
1.7.1. Toprakta radon 30
1.7.2. Binalarda radon 31
1.7.3. Suda radon 32
1.7.4. Radon gazının sağlık üzerine etkileri 33
1.7.5. Radon ölçüm teknikleri 36
1.7.5.1. Pasif ölçüm yöntemi 36
1.7.5.2. Aktif ölçüm yöntemi 37

2. MATERYAL VE YÖNTEM 38
2.1. Bölgenin Tanıtılması 38
2.2. Kullanılan Materyal ve Ölçüm Yöntemi 40
2.2.1. CR -39 nükleer iz dedektörleri 40
2.2.1.1. CR-39 polimerlerinde izlerin kazıma karakteristikleri 41
2.2.1.2. CR-39 sayım işlemi 43
2.2.1.3. İzlerin sayımı ve değerlendirme işlemleri 45
2.2.2. AlphaGUARD 46
3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 49
3.1. Ölçüm Verileri 49
3.1.1. CR-39 ile yapılan ölçümler 49
3.1.2. AlphaGUARD ile yapılan ölçümler 53
3.2. Tartışma ve Yorum 56
KAYNAKLAR 59
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER 64
ÖZGEÇMİŞ 65

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. İzotop tablosu 5
Şekil 1.2. Radyasyon çeşitleri 7
Şekil 1.3. Dünya genelinde doğal ve yapay radyasyon kaynaklarından maruz kalınan radyasyon dozlarının oransal değerleri. 9
Şekil 1.4. Dünya genelinde yapay radyasyon kaynaklarından alınan doz oranları 12
Şekil 1.5. Radyumun alfa bozunumu 16
Şekil 1.6. Örnek bir β^- bozunumu 20
Şekil 1.7. Örnek bir β^+ bozunumu 21
Şekil 1.8. Örnek bir elektron yakalama olayı 21
Şekil 1.9. Gama ışını yayınlanması 22
Şekil 1.10. Compton saçılması 24
Şekil 1.11. Çift oluşumu örneği 25
Şekil 1.12. Rn bozunma zinciri 29
Şekil 1.13. ^{222}Rn (Radon) ve ^{220}Rn (Toron) bozunma zinciri 30
Şekil 1.14. Radon gazının evlere giriş yerleri. 32
Şekil 1.15. Radon bozunma ürünlerinin DNA' ya zararı 34
Şekil 1.16. Uranyum bozunma zinciri 35
Şekil 2.1. Kocaeli ili İzmit ilçesi Yahya Kaptan Mahallesi haritası 39
Şekil 2.2. CR-39 radon ölçüm dedektörü 41
Şekil 2.3. Dedektörlere iz kazıma işleminin uygulanması 42
Şekil 2.4. Kazıma kritik açısı 43
Şekil 2.5. Radon ve bozunma ürünlerinin yaydıkları alfa parçacıklarının dedektör üzerinde bıraktıkları izler 43
Şekil 2.6. Radobath banyo ünitesi 44
Şekil 2.7. Radosys iz kazıma ünitesi 45
Şekil 2.8. Radosys iz değerlendirme ünitesi 45
Şekil 2.9. AlphaGUARD radon dedektörü 46
Şekil 3.1. AlphaGUARD ile 11.08.2014 - 25.05.2015 tarihleri arasında nükleer fizik laboratuvarında elde edilen ölçüm değerleri 54
Şekil 3.2. AlphaGUARD ile 25.05.2015 - 06.11.2015 tarihleri arasında bilgisayar laboratuvarında elde edilen ölçüm değerleri 55
Şekil 3.3. Yahya Kaptan Mahallesi'nde bölgelere göre radon konsantrasyon değerleri 57

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Toprakta bulunan doğal radyonüklitler 11
Tablo 1.2. Dünyada ve ülkemizde üretilen elektriğin enerji kaynaklarına göre dağılımı 15
Tablo 1.3. Alfa saçan birkaç radyonüklit ve özellikleri (Nudat) 17
Tablo 1.4. Kalite faktörleri 27
Tablo 1.5. Radyasyon birimleri 27
Tablo 1.6. ^{222}Rn özellikleri 29
Tablo 1.7. Radon izotopları ve yarılanma süreleri 30
Tablo 1.8. Yaşam boyu 200 Bq/m^3 radona maruz kalındığında riskler 36
Tablo 2.1. Yahya Kaptan Mahallesi'nde bölgelere göre blok ve daire sayısı dağılımı 39
Tablo 2.2. Kazıma ünitesinin teknik özellikleri (Radosys) 44
Tablo 2.3. AlphaGUARD cihazı teknik bilgileri 48
Tablo 3.1. Yahya Kaptan Mahallesi'nde CR-39 radon dedektörlerinin konulduğu yerler 49
Tablo 3.2. Ölçüm süreleri 50
Tablo 3.3. Ölçüm verileri 51
Tablo 3.4. Yahya Kaptan Mahallesinde ölçülen radon konsantrasyon değerleri ve yıllık etkin doz eşdeğerleri 52
Tablo 3.5. Nükleer fizik araştırma laboratuvarında AlphaGUARD ile yapılan ölçüm değerleri 53
Tablo 3.6. Bilgisayar laboratuvarında AlphaGuard ile yapılan ölçüm değerleri 55
Tablo 3.7. Radon konsantrasyon limitleri (Bq/m^3) 56
Tablo 3.8. Evlerde ölçülen ortalama radon konsantrasyonu (Bq/m^3) 56

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	:	Aktivite, (Ci)
A	:	Amstrong
A	:	Kütle numarası
B	:	Bağlanma enerjisi, (MeV)
BBE	:	Bağıl biyolojik etkinlik
Be	:	Berilyum
Bi	:	Bizmut
Bq	:	Becquerel
C	:	Karbon
Ci	:	Curie
Co	:	Kobalt
CPM	:	Dakikadaki sayım
C_{Rn}	:	Radon aktivite konsantrasyonu
Df	:	Doz dönüşüm faktörü
e-	:	Elektron
e	:	Elektron yükü, (C)
E	:	Enerji, (MeV)
e^+	:	Pozitron
eV	:	Elektron Volt
fm	:	Femtometre
Gy	:	Gray
h	:	Planck sabiti
ħ	:	Planck sabiti / 2 π, (J.s)
H	:	Hidrojen
Hg	:	Civa
J	:	Joule
K	:	Kelvin
K	:	Potasyum
kf	:	Kalibrasyon faktörü
L	:	Litre
m	:	Kütle
MeV	:	Milyon elektron volt
N	:	Radyoaktif çekirdek sayısı
n	:	Nano, (10^{-9})
n	:	Nötron
Na	:	Sodyum
ºC	:	Santigrat
p	:	Piko, (10^{-12})
p	:	Proton
Pb	:	Kurşun
Po	:	Polonyum
ppm	:	Milyonda bir birime verilen isim

QF : Kalite faktörü
R : Röntgen
Ra : Radyum
rad : Soğrulmuş radyasyon dozu
rH : Bağıl nem
Rn : Radon
Sv : Sievert
T : Sıcaklık
$T_{1/2}$: Yarılanma süresi
Th : Toryum
Tl : Talyum
U : Uranyum
WL : Çalışma düzeyi
Z : Atom numarası
α : Alfa parçacığı
β : Beta parçacığı
γ : Gama parçacığı
λ : Dalga boyu
ν : Nötrino

Kısaltmalar

ABD : Amerika Birleşik Devletleri
AEDE : Annual Effective Dose Equivelant (Yıllık Etkin Doz Eşdeğeri)
BEIR : Biological Effects of lonizing Radiation (İyonize Radyasyonun Biyolojik Etkileri)
CAS : Chemical Abstracts Service (Kimyasal Kuramlar Servisi)
CR-39 : Columbia Resin 39
ÇNAEM : Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi
ELCR : Excess Lifetime Cancer Risk (Ömür Boyu Kanser Riski)
EPA : Environmental Protection Agency (A.B.D Çevre Koruma Ajansı)
IAEA : The International Atomic Energy Agency (Uluslararası Atom Enerjisi Kurumu)
IARC : The International Agency for Research on Cancer (Uluslararası Kanser Araştırmaları Ajansı)
ICRP : International Commission on Radiological Protection (Uluslararası Radyoloji Koruma Komisyonu)
NRPB : The National Radiological Protection Board (Birleşik Krallık Ulusal Radyolojik Korunma Kurulu)
PADC : Polyallyl diglycol carbonate
TAEK : Türkiye Atom Enerjisi Kurumu
TÜİK : Türkiye İstatistik Kurumu
UNSCEAR : United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (Birleşmiş Milletler Atomik Radyasyon Etkileri Bilimsel Komitesi)
WHO : World Health Organization (Dünya Sağlık Örgütü)

KOCAELİ İLİ YAHYA KAPTAN MAHALLESİ'NDE BİNA İÇİ RADON KONSANTRASYONUNUN BELİRLENMESİ

ÖZET

Yerkabuğunda bulunan radyoaktif kaynakların ve bunların bozunma ürünlerinin varlığı, insanların maruz kaldığı doğal radyasyon radyasyonun temelini oluşturmaktadır. Doğal radyasyon kaynaklarından biri olan radon insan duyuları tarafından tek başına algılanamayan renksiz, kokusuz ve tatsız radyoaktif bir asal gazdır. Dünya Sağlık Örgütü'ne göre radon, sigaradan sonra akciğer kanserinin ikincil önde gelen sebebidir. Radon ve bozunum ürünlerinin solunum yoluyla vücuda alınması akciğer kanser riskini arttırması gibi ciddi sağlık sorunlarına yol açabildiğinden özellikle kapalı ortamlardaki radon konsantrasyonunun ölçülmesi önem arz etmektedir. Bu çalışmanın amacı Kocaeli ili Yahya Kaptan Mahallesi'nde radon konsantrasyonunu belirlemektir. Bu amaçla 24 adet CR-39 katı hal nükleer iz dedektörü kullanılmıştır. Ölçüm sürecinin sonunda toplanan detektörlerdeki alfa izlerinin sayım işlemi Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi (ÇNAEM) Sağlık Fiziği Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Ortalama radon konsantrasyonu 41 Bq/m^3 bulunmuştur. Yıllık etkin doz eşdeğeri 1,03 mSv/y ve ömür boyu kanser riski % 0,41 olarak hesaplanmıştır. Bu çalışmaya ek olarak AlphaGUARD radon detektörü kullanılarak Kocaeli Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi nükleer fizik laboratuvarı ve bilgisayar laboratuvarında radon konsantrasyon değerleri sırasıyla 23 Bq/m^3 ve 33 Bq/m^3 olarak ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar ulusal ve uluslararası standartlarla karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: AlphaGUARD Radon Dedektörü, CR-39 Nükleer İz Dedektörü, Radon, Yahya Kaptan Mahallesi.

DETECTION OF INDOOR RADON CONCENTRATION IN YAHYA KAPTAN DISTRICT IN KOCAELI

ABSTRACT

The existence of the natural radioactive sources in Earth's crust and the degradation products of these forms the basis of natural radiation. Radon which is one of the natural radiation sources is colorless, odorless, tasteless and a radioactive noble gas, so not dedectable by human senses. According to World Health Organization, radon is the second leading cause of lung cancer after smoking. Since the inhalation of radon and radon progenies may cause serious health risks such as increase in the incidence of lung cancer, it is important to determine indoor radon concentrations. The main objective of this study is to determine the radon concentration in the buildings of Yahya Kaptan district in Kocaeli. For this purpose, 24 CR-39 solid state nuclear track detectors were used. At the end of the measurement period the CR-39 detectors were collected and the counting process of alpha traces recorded by the detectors were fulfilled in the Health Physics Laboratory of Çekmece Nuclear Research and Training Center (ÇNAEM). Average radon concentration in dwellings was found to be 41 Bq/m^3 Annual effective equivalent dose was 1.03 mSv/y and excess life time cancer risk was % 0.41. Addition to this work, by using AlphaGUARD radon dedector, radon concentrations in nuclear physics laboratory and computer laboratory at the Faculty of Arts and Science of Kocaeli University were found as 23 Bq/m^3 and 33 Bq/m^3, respectively. Obtained results were compared with national and international standarts.

Keywords: AlphaGUARD Radon Detector, CR-39 Nuclear Track Detector, Radon, Yahya Kaptan District.

GİRİŞ

Canlılar yaşamları boyunca radyasyona maruz kalırlar. Dünya genelinde yapay radyasyon kaynaklarından alınan doz toplam maruz kalınan dozun yaklaşık % 12'sini, doğal radyasyon kaynaklarından alınan doz ise % 88'ini oluşturmaktadır (TAEK). Dünya genelinde bir kişinin doğal radyasyon sebebiyle bir yılda aldığı ortalama doz 2,4 mSv'dir ve bunun yaklaşık 1,3 mSV'lik kısmı radon ve radonun kısa ömürlü ürünlerinden kaynaklanmaktadır (IAEA, 1996).

Radon, kayalardaki ve topraktaki uranyumun bozunumu sonucu oluşan radyumdan gelen ve doğada bulunan tek radyoaktif gazdır. Radon ve bozunum ürünlerinin solunum yoluyla vücuda alınması akciğer kanser riskini arttırması gibi ciddi sağlık sorunlarına yol açabildiğinden özellikle kapalı ortamlardaki radon konsantrasyonunun ölçülmesi önem arz etmektedir.

Yapılan çalışmalarla açık havada yapılan ölçümün gerçek oranda radon kirliliğini göstermediği ancak evler, maden ocakları, metrolar, tüneller, mağaralar, kaplıcalar, fabrikalar, alışveriş merkezleri, okul ve ofisler gibi radon riski taşıyan kapalı ve oda ortamını andıran düzeneklerde yapılan ölçümlerle fikir sahibi olunabileceği belirtilmektedir.

Evlerde radon ölçümü ilk kez 1956 yılında İsveç'te yapılmıştır. Dünya Sağlık Örgütü ev içi radon gazı maruziyetinin olası sağlık etkilerine ilk olarak 1979 yılında değinmiştir. Radon gazı 1988 yılında IARC tarafınca kanserojen kabul edilmiştir. Dünya Sağlık Örgütü 1993 yılında üye ülkelere radonun sağlık etkilerini kontrol etme yolunda ilk çağrısını yapmıştır. 2005 yılında ise, 30 ülkenin katılımı ile radonun sağlık etkilerinden korunma yollarını araştırmıştır. Dünya Sağlık Örgütü ülkelere coğrafik yapılarına göre radon haritalarının çıkarılmasını ve ulusal radon seviyeleri eşik değerlerinin tespit edilmesini öncelikli olarak önermiş ve ulusal radon kontrol programları yapmaya davet etmiştir ve 2009 yılında ise Radon Kontrolü Ulusal Kontrol Programı geliştirilmesine yardımcı olacak bir kitap yayınlamıştır.

Tüm bu gelişmeler ile ev içerisi radon maruziyetinin kanserojen olduğu ancak son yıllarda devletlerin gündemine gelmeye başlamıştır. ABD, İngiltere, İsviçre ve Norveç' de ev alım satımlarında radon ölçümleri yapılmaktadır. Avrupa Birliği üye ülkelerinde konu ile ilgili çalışmalar yeni başlamış ve İsveç dışında ülke genelinde yürütülen ulusal bir kontrol programına rastlanılmamıştır. İsveç ise 2012-2020 Radon Kontrol Programını yayınlamıştır.

Ülkemizdeki ilk çalışmalar Eşref Atabey ve Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK) tarafından yapılmıştır. Türkiye'de evlerde radondan dolayı alınan radyasyon dozunu hesaplamak ve radon konsantrasyonu yüksek olan bölgeleri tespit etmek amacıyla 1984 yılında "Türkiye'de Konutlarda Radon Ölçümü Projesi" başlatılmıştır. Bu çalışma kapsamında 59 ilde yaklaşık 5500 evde radon ölçümü yapılmış olup ortalama radon konsantrasyonu 82,66 Bq/m^3 olarak ölçülmüştür.

Sağlık Bakanlığı ve TAEK, 15.03.2013 tarihinde "Türkiye Radon Haritası" oluşturulması ve sonrasında "Ulusal Radon Kontrol Programı" geliştirilmesi için bir protokol imzalamıştır. Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) tarafından seçilmiş ve ülkenin genelini temsil eden 81 ilde 62.320 hanede ev içerisindeki radon miktarı ölçülmesi planlanmıştır. 2014 yılının sonbaharında başlayan çalışmanın 5 yıl içerisinde bitirilmesi planlanmaktadır. Bunun yanında üniversiteler tarafından da radon ile ilgili çalışmalar yapılmaktadır.

Bu çalışmanın amacı Kocaeli ilinin İzmit ilçesinin Yahya Kaptan Mahallesi'nde bina içi radon gazı konsantrasyonunu belirlemek ve insanların radon gazından aldıkları yıllık ortalama eşdeğer dozu hesaplamaktır. Bu çalışmaya ek olarak Kocaeli Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi nükleer fizik laboratuvarında ve bilgisayar laboratuvarında AlphaGUARD cihazı kullanılarak radon gazı konsantrasyonu hesaplanmıştır.

Bu çalışmanın Bölüm 1'de anlatılan kısmında, radyasyon kavramına, iyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon türlerine, doğal ve yapay radyasyon kaynaklarına, bozunum türlerine, radyasyonun madde ile etkileşimine ve radyasyon birimlerine değinilip radon gazı ve özellikleri ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır.

Bölüm 2’de, çalışmanın yapıldığı bölge tanıtılmış ve ölçüm yapmak için kullanılan AlphaGUARD radon dedektörünün ve CR-39 nükleer iz dedektörünün özelliklerinden bahsedilmiştir. Daha sonra CR-39 ile yapılan ölçümler için sayım işlemlerinden bahsedilmiştir.

Son bölüm olan Bölüm 3’de elde edilen veriler, tartışma ve yorum ile birlikte radon riskini azaltmak için gereken tedbirler anlatılmıştır.

1. TEMEL BİLGİLER

1.1. Atom Çekirdeğinin Yapısı

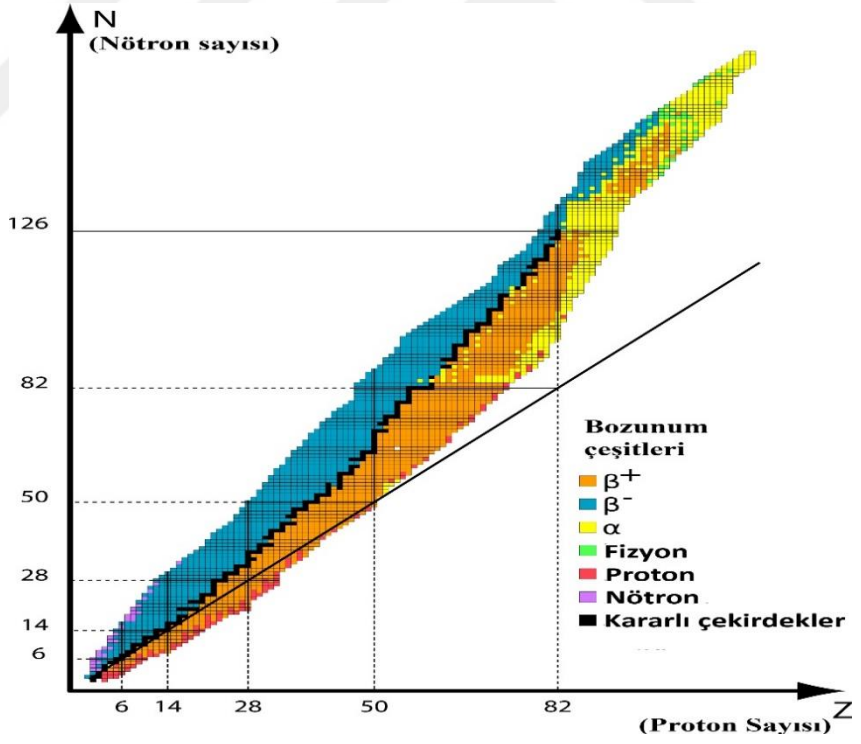
Rutherford 1911 yılında ince altın metal levhadan alfa parçacıklarının saçılması deneyleri sonucunda yeterince yüksek enerjili pozitif yüklü alfa parçacıklarının, atom içinde son derece küçük, ağır ve yüklü bir şeye çarpmasıyla geri saçılabileceğini savunmuş ve biyolojideki hücre çekirdeğine benzer biçimde "atom çekirdeği" kavramını ortaya atmıştır. Buna göre tüm maddeler kimyasal elementlerden oluşur, elementler ise atomlardan meydana gelir. Atom pozitif yüklü ve yarıçapı 10^{-15} m kadar olan çekirdek ile bu çekirdeğin etrafında bulunan elektronlardan oluşmuştur. Bu değer 10^{-10} m (1 ^{o}A) değerindeki atom çapından küçüktür. Atomun fiziksel özellikleri, dinamik ve kinetik davranışı kütlesine bağlıdır. Bu kütlenin neredeyse tamamı çekirdekten ileri gelir. Çekirdek sadece kütlenin toplandığı yer değil aynı zamanda atom enerjisinin kaynağıdır.

Atomun kimyasal özellikleri elektron yapısına bağlıdır, modern atom modeline göre elektronların yeri kesin olarak bilinemez fakat orbital denilen bölgelerde buluma ihtimalleri yüksektir. Elektronun yükü protonunkine eşit fakat negatiftir. O halde nötr bir atomda çekirdekteki proton sayısı kadar çekirdek dışında da elektron vardır. Bir çekirdeğin proton sayısına elementin atom numarası denir ve Z ile gösterilir. Atom çekirdeğinde pozitif yüklü protonlarla birlikte elektrik yüklü olmayan nötronlar bulunur. Proton ve nötronların kütleleri elektronlarınkine göre çok daha büyüktür. Protonun kütlesi yaklaşık olarak $1{,}673 \times 10^{-27}$ kg, nötronun kütlesi $1{,}675 \times 10^{-27}$ kg ve elektronun kütlesi $9{,}11 \times 10^{-31}$ kg'dır. Her elementin atom çekirdeğindeki proton sayısı sabittir ve her atom için farklıdır fakat nötron sayısı her çekirdek için farklı olabilir. Atom numarası aynı, kütle numarası farklı olan atomlara izotop denir. İzotop atomlarda kimyasal özellik aynı, fiziksel özellikler ise farklıdır. Hidrojenin izotopları olan döteryum ve trityum bu duruma örnektir. Elementler bir ya da daha fazla sayıda izotopa sahip olabilirler. Bazı izotoplar radyoaktif iken bazıları kararlıdır. Bir elementin atom ağırlığı kararlı izotoplarının ortalama ağırlığı olup, bu değer tam sayı

olmayabilir. Bir elementin atom ağırlığı, C (karbon) atom ağırlığına göre belirlenir. Proton ve nötrona kollektif olarak nükleon adı verilir. Bir çekirdekteki toplam nükleon sayısına kütle numarası denir ve A ile gösterilir.

1.2. Çekirdek Kararlılığı

Elektromanyetik kanuna göre zıt elektrik yüklü parçacıklar birbirlerini çeker, aynı elektrik yüküne sahip parçacıklar ise birbirlerini iterler. Atom çekirdeğindeki protonlar büyük bir kararlılıkla birbirlerine bitişik bir biçimde dururlar. Çünkü onları birbirine adeta yapıştıran ve elektromanyetik itme kuvvetinden çok daha güçlü olan bir kuvvet vardır ki buna güçlü nükleer kuvvet denir. Bu kuvvetin şiddeti o kadar fazladır ki, atomun çekirdeğindeki protonların ve nötronların dağılmadan bir arada durmalarını sağlar. Yaklaşık 275 adet kararlı çekirdek vardır. Bir çekirdeğin kararlı olabilmesi için proton nötron sayısı arasında bir denge olmalıdır. Kararlı çekirdekler için N'nin Z'ye bağlı değişimi Şekil 1.1'de gösterilmiştir.



Şekil 1.1. İzotop tablosu

Atom numarası 1-20 arasındaki atomların çekirdeklerinde proton sayısı nötron sayısına eşittir. Atom numarası 20-83 arasındaki çekirdeklerde nötron sayısı proton sayısından fazladır. Atom numarası 83'ten büyük olan elementlerin çekirdekleri

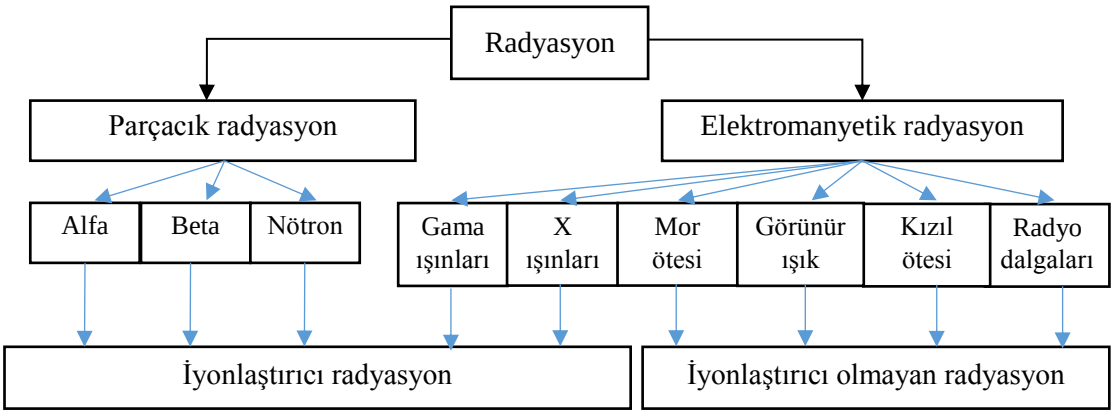
kararsız olup radyoaktiftir. Başka bir deyişle n/p < 1,5 olan çekirdekler kararlı ya da az kararlı, n/p> 1,5 olan çekirdekler ise kararsızdır. Atom numarası ve nötron sayısı çift olan atomların, atom numarası ve nötron sayısı tek olan atomlara göre daha çok sayıda kararlı izotopu vardır. 2, 8, 20, 50, 82, 126 tane proton veya nötron taşıyan çekirdekler en kararlı çekirdeklerdir. Bu nedenle bu sayılara sihirli sayılar denir. Örneğin, atom numarası 18 olan elementin üç kararlı izotopu, 19 olan elementin iki kararlı izotopu, 20 olan elementin beş kararlı izotopu ve 21 olan elementin bir kararlı izotopu, nötron sayısı 18 olan çekirdeğin üç kararlı izotopu, 20 nötronu olan çekirdeğin dört kararlı izotopu varken, 19 nötronu ve 21 nötronu olan çekirdeklerin kararlı izotopları yoktur.

Kararlılık kuşağı içinde yer alan bütün çekirdekler kararlıdır ve kararlılık kuşağı dışında kalanlar kararlı bir nötron/proton (n/p) oranına erişmek için radyoaktif dönüşümlere yani bozunuma uğrarlar. Bozunma hızı radyoaktif elementler için ayırt edici özelliktir, sıcaklık ve basınç gibi çevre koşullarına bağlı değildir. Kimyasal olaylar, bir elementin radyoaktif özelliğini etkilemez. Bu nedenle bir elementin oluşturduğu bileşikler de radyoaktif olur.

1.3. Radyasyon Tanımı ve Türleri

Radyasyon sözcüğü madde içine nüfuz edebilen ışınlar, yani girici ışınlar anlamıyla kullanılmıştır. Cinsleri ve kaynakları farklı olan ışınların yegane ortak yönü, maddeye, bu arada insan vücuduna nüfuz edebilmeleridir. Çeşitli radyasyonların giricilikleri farklıdır. Fakat belli bir radyasyon türü için giricilik enerji ile ilgili bir özelliktir. Düşük enerjili ışınlar, örneğin görünür ışık girici değildir. Fakat X ışını ve gamma ışını, özellikleri görünür ışıkla tamamen aynı olmakla beraber, giricilik yönüyle ondan ayrılırlar; zira enerjileri yüksek olup dalga boyları kısadır (Şeker ve Çerezci, 1997).

Radyasyonu, "parçacık" ve "elektromanyetik" olmak üzere temel olarak iki şekilde sınıflandırabiliriz. Parçacık radyasyonu; belli bir kütle ve enerjiye sahip çok hızlı hareket eden parçacıkları, elektromanyetik radyasyon ise belli bir enerjiye sahip ancak kütlesiz ışımaları ifade eder. Radyasyon, etkileştiği ortamdaki atom ve molekülleri iyonize edebilme özelliği olup olmadığına göre "iyonlaştırıcı" ve "iyonlaştırıcı olmayan" radyasyonlar şeklinde de sınıflandırılabilir (Şekil 1.2).



Şekil 1.2. Radyasyon çeşitleri

1.3.1. İyonlaştırıcı radyasyon

Bir atomun yörüngesindeki elektron sayısı, çekirdeğindeki proton sayısına eşit olduğunda, atom elektriksel olarak nötrdür. Atomun elektronlarından biri koparıldığında, protonların sayısı elektronlardan fazla olacağından atom bir elektrik yükü kazanacaktır. Bu şekilde bir elektronun atomdan ayrılmasından sonra geriye kalan atoma "iyon" adı verilir. İyonların meydana gelişi olayına da "iyonizasyon" denir.

İyonizasyon olayının olması için elektronların çekirdeğe elektrostatik bağlanma kuvvetini yenecek kadar enerji gerekir. Bir elektronu, yörüngesinden fırlatmaya yetecek enerji en iç yörüngede en fazladır. İç yörüngedeki elektronlar, çekirdeğe öyle sıkı bağlanmıştır ki, yalnızca X ışınları, gamma ışınları ve yüksek enerjili partiküller bunları koparabilir. Yeterli enerji olmayınca iyonizasyon olmayacağından radyasyon bir ortam için iyonlaştırıcı özelliğe sahip iken başka bir ortamda bu özelliğe sahip olmayabilir.

Alfa parçacıkları, beta parçacıkları, gama ışınları, X ışınları ve serbest nötronlar iyonlaştırıcı radyasyona örnektir. İyonlaştırıcı radyasyon, hücre içi moleküllerde ve daha önemlisi kromozomlarda hasarlar oluşturur. Mutasyon olarak bilinen bu genetik hasarlar hücre tarafından tamir edilemez ise hücreyi ölüme götüren süreci başlatan metabolik değişiklikler meydana gelir. Bu etki nedeniyle, iyonlaştırıcı radyasyonlar sürekli hücre çoğalması ile kendini gösteren kanser hastalığının tedavisinde de kullanılmaktadır.

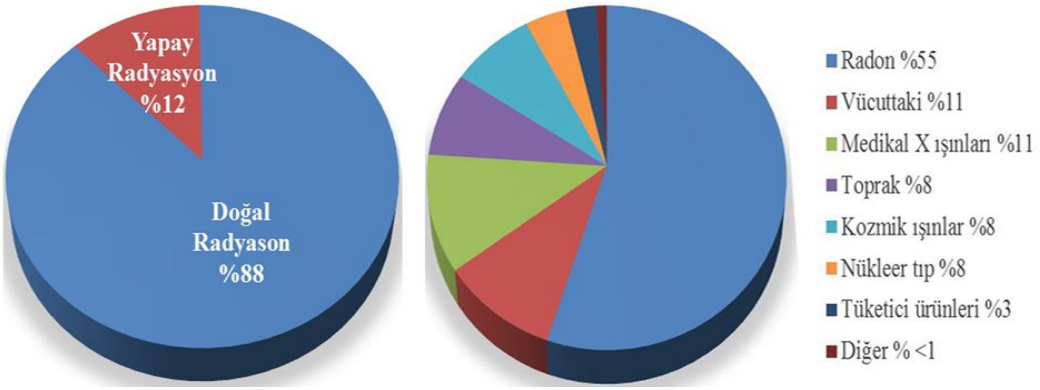
1.3.2. İyonlaştırıcı olmayan radyasyon

İyonlaştırıcı olmayan radyasyon, bir atomdan veya molekülden bir elektronu tamamen koparabilmek için atomları veya molekülleri iyonlaştırabilecek yeterli enerji taşıyan kuantumlara sahip olmayan herhangi bir elektromanyetik radyasyon türüdür. İyonlaştırıcı olmayan radyasyonların enerjisi, iyonlaştırıcı radyasyonlara göre çok daha azdır ve madde içerisinden geçerken yüklü iyonlar oluşturmaz, yalnızca bir elektronu daha yüksek enerji seviyesine çıkaran uyarım için yeterli enerjiye sahiptir.

Radyo dalgaları, mikrodalgalar, kızılötesi ve morötesi (ultraviyole) ışınlar ve görünür ışık bu gruptandır. Güneş'ten gelen ışınlar, elektrik enerjisiyle çalışan aletler, trafo istasyonları, televizyon, bilgisayar ekranları, radyo, uydu iletişim sistemleri, tıbbi cihazlar, baz istasyonları iyonlaştırıcı olmayan radyasyon kaynaklarındandır. İyonlaştırıcı olmayan radyasyona giren tüm bu dalgaların ortaya çıkardığı bir ısınma etkisi mevcuttur. İyonlaştırıcı etkisi olmayan ışınların insan sağlığı üzerinde olumsuz etkileri iyonlaştırıcı radyasyon kadar fazla değildir. Katarakt, deride yanıklar, gözde yaralar ve yanıklara neden olduğu bilinmektedir. Ancak, iyonlaştırıcı olmayan radyasyonların canlı organizmalar üzerindeki zararlı etkileriyle ilgili çalışmalar tam olarak sonuçlandırılabilmiş değildir. Bununla birlikte, farklı çeşitlerdeki iyonlaştırıcı olmayan radyasyonların canlı organizmalar üzerinde farklı etkiler bıraktıkları gözlenmektedir.

1.4. Radyasyon Kaynakları

Radyasyon kaynakları havada, suda, toprakta, hatta canlı vücutları içerisindeki doğal radyasyon kaynakları ve bunlara ek olarak insanlar tarafından üretilen yapay radyasyon kaynakları olmak üzere iki sınıfa ayrılır (Şekil 1.3).



Şekil 1.3. Dünya genelinde doğal ve yapay radyasyon kaynaklarından maruz kalınan radyasyon dozlarının oransal değerleri (IAEA, 1996).

1.4.1. Doğal radyasyon kaynakları

Yaşam var olduğundan beri tüm canlılar doğal radyasyona maruz kalmaktadır. Bu radyasyon türüne doğal denmesinin sebebi insan müdahalesi olmadan varlıklarını sürdürebilmeleridir. İnsanlar farkında olmasa da doğal radyasyona maruz kalmaktadır. Doğal radyasyon kaynakları yapay radyasyon kaynaklarından fazladır. İnsanların maruz kaldığı radyasyonun yaklaşık % 88'i doğal kaynaklıdır. Doğal radyasyon, insan vücudunda, sularda, kaya ve toprakta, toprakta yetişen besinlerde ve uzaydan gelen kozmik ışınlarda farkı oranlarda bulunabilmektedir. Doğal radyasyon yolu ile alınan ortalama yıllık etkin doz 2,4 mSv civarındadır. Bununla birlikte, bazı ülkelerde bu miktar 10 mSv'in üzerindedir (TAEK). Doğal radyasyon kaynakları kozmik radyasyon, yeryüzü kaynaklı doğal radyasyon ve iç radyasyon olmak üzere üç ana başlık altında sınıflandırılır.

1.4.1.1. Kozmik radyasyon

Doğal radyasyonun bir kısmını kozmik ışınlar oluşturur. Kozmik ışınlar, uzaydan gelen yüksek enerjili ve yüklü, helyum veya proton çekirdeğine benzeyen az miktarda foton ve elektron karışımından oluşan, ışık hızına yakın hareket eden atom altı parçacıklardır. Kozmik ışınların yoğunluğu güneşin aktif durumuna (güneş patlamalarına), yerin manyetik alanına ve yerküreden yüksekliğe bağlı olarak değişir. Kozmik ışınların büyük bir kısmı dünya atmosferinden geçmeye çalışırken tutulurlar. Elektriksel olarak yüklü olmaları sebebiyle dünyanın manyetik alanının etkisi altında kalırlar. Bu nedenle kozmik ışın yoğunluğu ekvatordan kutuplara gidildikçe artar. Böylece, insanların aldığı radyasyon enlem arttıkça artar. Deniz seviyesine

yaklaştıkça kozmik ışınların yoğunluğu dolayısıyla doz miktarı azalır. UNSCEAR tarafından yapılan hesaplamalara göre, kozmik ışınlardan kaynaklanan yer seviyesindeki yıllık etkin doz enlem ve yüksekliğe bağlı olarak değişse de ortalama 0,4 mSv civarındadır (TAEK).

Uçuş yüksekliklerindeki kozmik ışınların yoğunluğu, yer seviyesindekinden daha yüksektir. Kıtalararası uçuşlardaki uçuş yüksekliğindeki doz hızı, yer seviyesindeki doz hızının 100 katına ulaşabilir. Uçakla yapılan seyahatler, bazı topluluklar için yıllık dozda ortalama 0,01 mSv'lik artışa neden olur, ancak bu doz dünya ortalaması olan 0,4 mSv değerini etkilemez (IAEA, 1996).

1.4.1.2. Yeryüzü kaynaklı radyasyon

Radyoaktif maddeler yıldızlarda oluşan çekirdek tepkimeleri sonucu ortaya çıkmış maddelerdir ve dünyanın oluşumundan beri kaya ve mineraller, toprak ve yerküre radyoaktif çekirdek içerirler. Toprakta ve kayaçlarda bulunan ^{238}U, ^{232}Th, ^{40}K gibi doğal radyonüklitler çekirdekler ışıma yaparak yerküre kaynaklı radyasyon dozuna katkıda bulunurlar (Tablo 1.1). Bu radyonüklitlerin konsantrasyonları bulunulan yerin coğrafi ve jeolojik yapısına, toprak ve kayaçların mineralojik yapılarına göre değişiklikler gösterir. Tarımda verimi artırmak için kullanılan ^{32}P içeren suni gübreler de yerel olarak toprağın yüzey radyoaktivitesini artırmaktadır. Uranyum, kaya ve toprak katmanları boyunca düşük konsantrasyonlarda dağılmıştır. ^{238}U birçok elementin radyoizotop bozunma serisinin başlangıç kaynağıdır ve kararlı ^{206}Pb haline gelinceye kadar bozunur. Oluşan ilk ürünler arasında yer alan ve radyoaktif gaz olan radon radyoizotopu ^{222}Rn atmosfere dağılır ve bozunmaya devam eder. Toryum da benzer şekilde yeryüzüne dağılmıştır ve ^{232}Th, başka bir radyoaktif serinin başlangıç kaynağıdır. Yerkabuğunun ağırlık olarak % 2,4'ünü oluşturan ^{40}K'ın aktivite konsantrasyonu genelde, ^{238}U ve ^{232}Th' den büyüktür (TAEK).

Tablo 1.1. Toprakta bulunan doğal radyonüklitler (UNSCEAR, 2000)

Radyonüklit Konsantrasyonu (Bq /kg)				
	K-40	**U-238**	**Ra -226**	**Th -232**
Değişim aralığı	140-850	16-110	17-60	11-64
Ortalama	400	35	35	45

1.4.1.3. İç ışınlanma

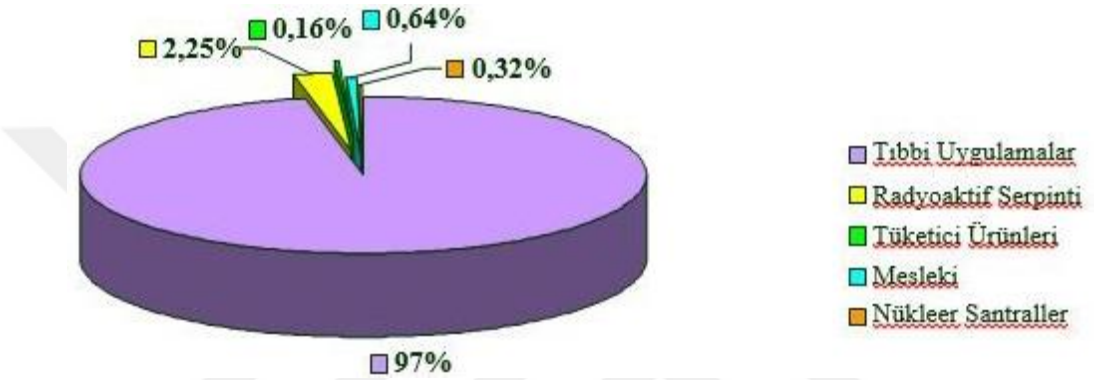
İç ışınlanma radyasyon kaynaklarının vücudun içinden, vücudu ışınlamasıdır. Radyasyon kaynağı vücudun bileşenlerinde olabileceği gibi solunum veya sindirim yoluyla vücuda dışarıdan da alınmış olabilir.

Solunum yoluyla iç ışınlanma insanların nefes almaları sonucu ciğerlerine radyoaktif maddelerin girmesiyle başlar. Radyoaktif madde ile kirlenmiş toz, duman veya radon gibi radyoaktif gazlar solunum yoluyla iç ışınlanmanın ana kaynaklarıdır. Radyoaktif parçacıklar ciğerlerde yer edinebilir ve uzun süre orada kalabilir. Bu maddeler vücutta kaldıkları ve bozundukları sürece iç ışınlanma devam eder. Yavaş bozunan radyoizotoplar için iç ışınlanma süresi çok uzun olabilir. Alfa ve beta kaynaklarının solunumuyla gerçekleşen ışınlanma en zararlı iç ışınlanmadır. Alfa ve beta parçacıkları etrafındaki dokuya büyük miktarda enerji transfer edebilir, gen dizilimlerine ve diğer hücre bileşenlerine zarar verebilir. Bu hasarın mutasyona, kansere ya da diğer hastalıklara sebep olma riski vardır.

Sindirim yoluyla iç ışınlanma ise kişinin radyoaktif maddeyi ağzına aldığı andan itibaren başlar ve sindirim sistemi boyunca devam edebilir, bazı radyoizotoplar böbreklere, diğer organlara hatta kemiklere ulaşabilir. Besin maddelerinde doğal olarak bulunan radyoizotop konsantrasyonu bölgenin doğal fon seviyelerine, iklimine ve tarım uygulamalarına bağlı olarak değişir. Yiyecek ve içeceklerde bulunan ^{40}K, ^{238}U ve ^{232}Th serileri, sindirim yolu ile alınan dozun temel nedenini oluşturmaktadır. Her insan vücudu ^{40}K ve ^{14}C içerir. Bunlar vücudumuzda sürekli radyasyon saçan iki radyoaktif elementtir. İç ışınlanma kaynaklarından alınan yıllık ortalama etkin doz miktarının 0,3 mSv olduğu ve bunun yarısının ^{40}K'dan kaynaklandığı tahmin edilmektedir (TAEK).

1.4.2. Yapay radyasyon kaynakları

Yapay radyasyon insanlar tarafından çeşitli amaçlarla üretilmiş radyoaktif izotopların kullanımından kaynaklanmaktadır. Doğada bulunmazlar ve bunları üreten hiçbir doğal mekanizma yoktur. Doğal radyasyon kaynaklarının aksine tamamen kontrol altında olmaları da maruz kalınacak doz miktarı açısından önemli bir özelliktir. Yapay radyasyon kaynakları ve bu kaynaklardan maruz kalınan dozlarının oransal değerleri Şekil 1.4'de gösterilmiştir.



Şekil 1.4. Dünya genelinde yapay radyasyon kaynaklarından alınan doz oranları

1.4.2.1. Tıbbi uygulamalar

Tıbbi alandaki radyasyon uygulamaları, radyasyonla görüntü elde edebilme ve radyasyonun hücre veya tümörleri yok edebilme yeteneğine sahip olması temeline dayanır. Radyasyonun hücre veya tümörleri yok ederek tıpta tedavi amaçlı kullanılmasına radyoterapi denir. Yüksek enerjili X ışınları veya ^{60}Co ve benzeri gama ışını yayan radyoaktif maddelerin kullanıldığı radyoterapide, radyolojide alınan radyasyon dozunun binlerce katı radyasyon dozuna ihtiyaç duyulur. Radyasyonun tıbbi uygulamaları, toplum için en çok radyasyon dozuna maruz kalınan yapay radyasyon kaynağını oluşturur.

1.4.2.2. Endüstriyel uygulamalar

Radyasyon endüstriyel alanda oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Özel olarak imal edilmiş X ışını üreten veya gama ışını yayan radyoizotop içeren cihazlarla röntgen filmleri çekilen endüstriyel ürünlerde (borular, buhar kazanları, her türlü makine aksamları, kaynak dikişleri, araç lastik ve jantları, uçak kanatları vs.)

herhangi bir hata olup olmadığı tespit edilebilmektedir. X ışını ile yapılan çalışmalar direkt grafi, gama ışınları ile yapılan çalışmalar ise gama grafi, her ikisi birden radyografi olarak adlandırılırlar. Radyografi tekniğinde kaynaktan çıkan ışınlar malzeme içinden geçtikten sonra, malzeme üzerine yerleştirilen bir film üzerine düşürülür. Malzemede bulunabilecek hatalar, yoğunluk farkı nedeniyle film üzerinde farklı kararmalar oluşmasına neden olur. Radyografi çalışmalarının yanı sıra yine birçok sanayi ürününün (demir, çelik, lastik, kağıt, plastik, çimento, şeker, vs.) üretim aşamasındaki seviye, nem ve yoğunluk ölçümleri radyasyondan yararlanılarak yapılmaktadır. Bunların dışında, petrol aramalarında belirli derinliklerdeki nem ve yoğunluk ölçümünde kullanılmaktadır.

Tek kullanımlık atılabilir tıbbi malzemeler özel ışınlama tesislerinde radyasyon kullanılarak mikroorganizmalardan sterilize edilir. Bu yöntem klasik sterilizasyon yöntemlerine göre çok daha başarılı ve çok daha güvenilirdir. Benzer şekilde gıda ışınlamaları ile yiyecek maddelerinin daha uzun süre dayanmaları sağlanmaktadır. Radyasyonun zirai alanlarda kullanılması genellikle tohum ıslahı şeklinde olmaktadır. Radyasyondan yararlanılarak mutasyona uğratılan tohumlar daha verimli ve dayanıklı hale getirilmektedirler. Radyasyonun tarımda kullanılmasının bir başka amacı da böceklenmenin önlenerek daha dayanıklı ürünler elde etmektir. Hayvanların hastalıklarının belirlenmesinde, üremelerinin takip edilmesinde ayrıca hayvanlara verilen yemlerin iyileştirilmesinde de bu teknolojiden faydalanılmaktadır. Akarsularda debi ölçümü, barajlarda su kaçaklarının tespiti, yeraltı sularının hareketlerinin takibi gibi diğer endüstriyel uygulamalar radyasyon sayesinde hem daha ucuz hem de daha kolay bir şekilde yapılmaktadır.

1.4.2.3. Radyoaktif serpinti

Nükleer patlama sonucu atmosfere yayılan radyoaktif artıkların, rüzgar ya da yağmurla tekrar yeryüzüne inmesine radyoaktif serpinti denir. Radyoaktif serpintiler, radyoaktif çevre kirliliğine neden olan en büyük yapay radyasyon kaynağıdır. Bununla birlikte, yer üstü ve yer altında yapılan nükleer denemeler bölgesel kirliliğe neden olmaktadır. Radyoaktif serpinti kalıcıdır, nereye gideceği önceden bilinmez, geniş sahaları kaplar, duyu organları ile varlığı anlaşılmaz ve öldürücüdür.

Yeryüzündeki ilk nükleer serpinti deneyimi, atom bombalarının kullanımıyla gerçekleşmiştir. Dünyada ilk atom bombaları 1945 yılında, Japonya'nın Hiroşima ve Nagazaki kentlerine atılmıştır. Bombanın atılmasıyla gözleri kör eden bir ışık yayılmış, bunun ardından gelen yüksek ısıyla 3 km çapındaki bir alanda, canlı ve cansız tüm varlıklar yanmıştır. Bu patlamayı, alev rüzgârları ve yağmur şeklinde yeryüzüne inen radyasyon takip etmiştir. 1986'daki Çernobil nükleer santralindeki bir kaza sonucunda da benzer sonuçlar ortaya çıkmıştır. Bu kaza sonucunda, birçok insan ölmüş veya sakat kalmıştır. Kazayla ortama salınan atıklar, insanların genetiğinde kalıcı hasarlara yol açmış ve bu hasarın nesilden nesile geçişine neden olmuştur. Ayrıca bu atıklar atmosferik hareketlerle, kilometrelerce uzaktaki bölgelere de yağmur şeklinde düşmüştür. Ülkemizde özellikle Karadeniz bölgesi, Çernobil kazasından etkilenmiştir.

1.4.2.4. Nükleer güç santralleri

Uranyum ya da plütonyum gibi ağır radyoaktif maddelerin, dışarıdan nötron bombardımanına tutularak daha küçük atomlara parçalanması olayına fisyon, hafif radyoaktif atomların birleşerek daha ağır atomları meydana getirdiği nükleer tepkimelere ise füzyon tepkimesi denir. Nükleer reaktörlerde fisyon reaksiyonu ile edilen enerji elektriğe çevrilir. Güneşteki reaksiyonlar ise füzyon reaksiyonudur. Bu reaksiyonun yarattığı sıcaklık fisyon reaksiyonundakinden çok daha fazladır, bu sebeple bu sıcaklığı kontrol edebilecek bir füzyon reaktörü henüz kurulamamıştır.

Dünya elektrik ihtiyacının yaklaşık % 13'ünü nükleer enerjiden karşılamaktadır. Bazı ülkeler enerjilerinin büyük bir kısmını nükleer santrallerden üretmektedir. Dünya çapında 400′den fazla nükleer santral bulunmaktadır. Nükleer reaktör sayısı bakımından Amerika birinci (104 adet reaktör), elektrik üretiminde nükleerin payı bakımından ise Fransa birinci (% 78) sırada yer almaktadır. Dünyada ve ülkemizde üretilen elektriğin enerji kaynaklarına göre dağılımı Tablo 1.2'de gösterilmiştir.

Tablo 1.2. Dünyada ve ülkemizde üretilen elektriğin enerji kaynaklarına göre dağılımı (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2012)

Enerji Kaynakları	**Dünya**	**Türkiye**
Petrol	% 4,6	% 1,5
Doğalgaz	% 22,2	% 43,7
Kömür	% 40,6	% 27,5
Hidroelektrik	% 16	% 24,2
Nükleer	% 13	% 0
Diğer (Yenilenebilir vb.)	% 3,7	% 3,1
Toplam	21431 TWh	240 TWh

Nükleer enerji hem büyük bir enerji potansiyeli sahiptir hem de ucuzdur. Ancak santrallerin atıkları, yeryüzünü 100.000 yıl etkisi altında bırakabilmektedir. Atıkların kontrol altında tutulduğu durumlarda, nükleer enerji santralleri çevreye zarar vermemektedir.

1.4.2.5. Tüketici ürünleri

Televizyonlar, duman dedektörleri, fosforlu saatler, inşaat malzemeleri, bazı yanıcı gazlar, paratonerler ve lüks lambası fitilleri gibi bazı tüketici ürünleri az miktarlarda da olsa radyoaktif madde içerirler. Kömür ve fosfat kayaları uranyum, radyum, potasyum ve toryum içerirler. Fosfatın gübre ve kömürün yakıt olarak kullanılması esnasında çevreye az da olsa belli bir radyasyon dozu verilir.

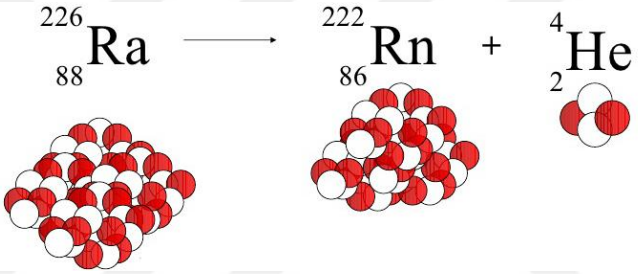
1.5. Bozunum Türleri

Atom çekirdeklerinin tümü kararlı değildir**.** Kararsız atomların fazla enerjilerini vererek daha kararlı bir atom haline dönüşerek kendilerini yeniden düzenlemelerine radyoaktif bozunma denir. Bu özelliği gösteren maddelere radyoaktif madde denir. Radyoaktif bir elementin bileşikleri de radyoaktif özellik gösterir. Radyoaktif maddeler alfa, beta, gama bozunumu olmak üzere üç tür bozunum yaparlar

Alfa ve beta bozunumlarında kararsız bir çekirdek, alfa ve beta parçacıkları yayarak daha kararlı bir çekirdeğe dönüşür. Gama bozunumu ise çekirdeğin kendisi değişmeden uyarılmış bir durumdan taban durumuna geçerken gama ışını yayınlamasıdır.

1.5.1. Alfa bozunumu

Alfa parçacığı yani helyum çekirdeği, element sentezinde önemli bir yapıtaşıdır. Kararsız elementlerin daha hafif elementlere bozunmasında da alfa parçacıklarının çekirdekten atılması (alfa bozunması) devreye girer. Alfa bozunması, kararsız çekirdek kararlı bir çekirdeğe dönüşünceye kadar devam eder. Atom numaraları 83'ten büyük olan yani kararlılık kuşağının ötesindeki elementler (ağır elementler) kararlı nötron/proton oranına erişmek için, hem proton hem de nötron kaybederek kararlı hale geçmeye çalışırlar. Aynı zamanda 2 proton, 2 nötrona sahip helyum çekirdeği yayınlayarak da parçalanabilirler; örneğin doğada radyoaktif ^{226}Ra çekirdeği alfa bozunumu yaparak ^{222}Rn'ye dönüşür. (Şekil 1.5). Bu bozunumda proton ve nötron sayıları ayrı ayrı korunur.



Şekil 1.5. Radyumun alfa bozunumu

Tipik bir alfa bozunumu denklemi

$$ {}^{A}_{Z}X_{N} \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y_{N-2} + {}^{4}_{2}He \qquad (1.1) $$

şeklinde yazılır.

He çekirdeği yüksek enerjiye sahip olsa da ağır kütlesi nedeniyle menzili çok kısadır. Rutherford alfanın havadaki erişim menzilinin 3,84 cm olduğu tespit etmiştir. Alfa bozunumu genellikle kütle numarası 190'dan büyük çekirdeklerde daha sık görülür. Alfa ışını doğal kaynakların yaydığı en iyonize edici parçacıklardır. Bir kağıt sayfayla veya birkaç santimetrelik hava ile dahi durdurulabilirler. Alfa yüklü bir parçacık olduğundan içerisinden geçtiği maddenin elektronları ile etkileşir. Alfa parçacıklarının giriciliği çok zayıftır. Kuvvetli bir manyetik alan altında küçük sapmalar gösterirler ve pozitif yüklü parçacıklar gibi davranırlar. Alfa ışınları tek enerjili olup enerji spektrumları kesiklidir, enerjileri 4 ila 10 MeV arasında değişim gösterir. Alfa ışınları içlerinden geçtikleri gazları daima iyonlaştırırlar. İyonlaşma

yaparken enerjilerini ve hızlarını kaybederler. Bir süre sonra termal hıza ulaşırlar. Termal hıza ulaştıkları zaman daha fazla iyonlaşma yapamazlar. Elektron yakalayarak nötr atomlar haline gelirler. Alfa saçan birkaç radyonüklit ve özellikleri Tablo 1.3'de gösterilmiştir.

Tablo 1.3. Alfa saçan birkaç radyonüklit ve özellikleri (Nudat)

Radyonüklit	**^{210}Po**	**^{226}Ra**	**^{238}Pu**	**^{241}Am**
Yarılanma süresi	138,37 gün	1600 yıl	87,7 yıl	432,6 yıl
Alfa Enerjisi	5,3 MeV	4,8 MeV	5,5 MeV	5,49 MeV
Havadaki Menzili	3,8 cm	3,3 cm	4,0 cm	4,0 cm

1.5.1.1. Durdurma gücü

Yüklü bir parçacık madde içerisinde bir uçtan diğer uca geçerken, elektronlar ile çarpışmalar sonucunda enerjisini adım adım fakat sürekli kaybeder. Belli bir mesafeyi kat ettikten sonra enerjisinin tümünü kaybeder; bu mesafeye parçacığın menzili denir. Menzil parçacığın türüne, materyalin yapısına ve parçacığın enerjisine bağlıdır.

Bir malzeme içinden geçen yüklü parçacıkların enerji kaybetme hızına ise malzemenin durdurma gücü adı verilir. Durdurma gücü elektronik ve nükleer durdurma gücü olarak iki bileşenden oluşur. Elektronik durdurma gücü, yüklü parçacığın malzemedeki atomik elektronlarla etkileşiminden kaynaklanır. Nükleer durdurma gücü, yüklü parçacığın atomun çekirdeği ile etkileşiminden kaynaklanır. Toplam durdurma gücü S_{toplam}, elektronik ve nükleer etkileşmelerden kaynaklanan durdurma güçlerinin toplamıdır:

$$S_{toplam} = -\frac{dE}{dx} = S_{elek} + S_{nük}. \tag{1.2}$$

Buradaki negatif işaret yüklü parçacığın materyal içinden geçerken kinetik enerji kaybettiği anlamına gelir. Nükleer bileşen, toplam durdurma gücünün genellikle çok küçük bir kısmını oluşturduğu için hesaplarda ihmal edilebilir. Bu yüzden durdurma gücü sadece elektronik bileşenin bir fonksiyonu olarak yazılabilir

$$-\frac{dE}{dx} \approx S_{elek}. \tag{1.3}$$

Yüklü parçacıkları materyal içerisinden geçerken, kaybettikleri enerjiyi hesaplamak için Bethe ve Bloch' un "durdurma gücü" denklemi

$$\left[-\frac{dE}{dx}\right]_{Bethe-Bloch} = \frac{4\pi N_A r_e^2 z^2 m_e c^2 \rho Z}{A\beta^2}\left[\ln\left(\frac{W_{max}}{I}\right)-\beta^2\right] \quad (1.4)$$

şeklinde verilebilir. Burada;

β = Düzeltici faktör (υ_0/c),

E = Parçacığın enerjisi,

x = Parçacığın madde içerisinde aldığı yol,

c = Işık hızı,

r_e = Klasik elektron yarıçapı,

m_e = Elektronun durgun kütlesi,

N_a = Avagadro sayısı,

I = Malzemenin ortalama uyarılma potansiyelidir.

Klasik elektron yarıçapı $r_e = e^2/mc^2 = 2{,}818\times10^{-15}$ m, düzeltici faktör $\beta = \upsilon_0/c$, ışık hızı $c = 3\times10^8$ m/s ve elektronun durgun enerjisi $m_ec^2 = 0{,}511$MeV olarak alınabilir. Burada elektrona transfer edilen maksimum enerji $W_{max} = \frac{2m_ec^2\beta^2}{1-\beta^2}$ ile verilir. Denklem (1.4) de görüldüğü gibi dE/dx, gelen parçacığın kütlesinden (m) bağımsız, gelen parçacığın hızına (υ_0) bağlı ve parçacığın yükünün karesiyle (z^2) orantılıdır. Burada $4\pi N_A r_e^2 m_e c^2$ hesaplanarak, elde edilen değer Denklem (1.4)'de yerine konulursa durdurma gücü ifadesi

$$\left[-\frac{dE}{dx}\right]_{Bethe-Bloch} = \frac{4{,}8938\times10^{-18}\rho Z z^2}{A\beta^2}\left[\ln\left(\frac{W_{max}}{I}\right)-\beta^2\right] Jm^{-1} \quad (1.5)$$

ile verilir. Durdurma gücü birimi, MKS sisteminde Jm^{-1} ile verilir. Fakat bu ifade uygulamalarda genellikle $MeVcm^{-1}$ cinsinden hesaplanır:

$$\left[-\frac{dE}{dx}\right]_{Bethe-Bloch} = \frac{0{,}30548\,\rho Z z^2}{A\beta^2}\left[\ln\left(\frac{W_{max}}{I}\right)-\beta^2\right] MeVcm^{-1}. \quad (1.6)$$

Hesaplanması zor olan parametrelerden biri materyalin ortalama uyarılma potansiyelidir. I için elde edilen deneysel formüller

$$I(eV) = 12Z + 7,\ Z < 13, \tag{1.7}$$

$$I(eV) = 9{,}76Z + 5{,}58Z^{-0{,}19},\ Z \geq 13 \tag{1.8}$$

şeklindedir. I, tüm iyonlaşma ve atomik uyarılma işlemleri üzerinden ortalama alınarak hesaplanır. Bu hesaplar yüksek enerjilerde daha iyi sonuç verir.

Buraya kadar saf bir element içerisinde hareket eden yüklü parçacık için durdurma gücü ifadesi hesaplanmıştır. Eğer parçacık saf bir element içerisinde değil de bileşik veya karışım içerisinde hareket ediyorsa Bragg-Kleeman kuralı olarak bilinen yarı deneysel bir bağıntı kullanılarak toplam durdurma gücü hesaplanabilir:

$$\left(\frac{1}{\rho}\frac{dE}{dx}\right)_{toplam} = \sum_i \frac{\omega_i}{\rho_i}\left(\frac{dE}{dx}\right)_i . \tag{1.9}$$

Burada i. elementin durdurma gücü $(1/\rho_i)(dE/dx)_i$ ifadesi ile i. elementin kütle oranı $\omega_i = \frac{N_i A_i}{M}$ ifadesi ile verilir. Burada i. elementin yoğunluğu ρ_i ve i. elementin bileşikteki atom sayısı N_i ile verilir. M moleküler ağırlıktır.

Pozitif yüklü bir parçacık ile soğurucu materyalin elektronunun yüklerinin birbirini itmesinden dolayı yüklerin yer değiştirmesi doğaldır. Parçacık ile soğurucu materyal arasındaki yük değişiminin gerçekleştiği düşük enerjilerde Bethe-Bloch formülü geçerliliğini kaybeder. Pozitif yüklü bir parçacık soğurucu materyalin elektronlarını koparır. Parçacığın yükü azalır ve lineer enerji kaybı gerçekleşir. Sonuç olarak, parçacık z elektronlu nötr bir atoma dönüşür.

1.5.2. Beta bozunumu

Beta radyasyonu kararsız bir atom çekirdeğinden yayınlanan yüksek enerjili elektrondur. Beta radyasyonun iyonlaştırma özellikleri azdır. Işık hızına yakın bir hızla hareket ederler. Alfa ışınlarından daha çok, gama ışınlarından daha az giricidirler. Elektrik ve manyetik alanda negatif yüklü oldukları için pozitif kutupa

doğru saparlar. Sapmaları alfa ışınlarından daha fazladır. Bunun sebebi kütlelerinin daha küçük (bir alfa tanesinin yaklaşık 1/7000 katı) olmasıdır. Beta ışını; plastik, cam veya metal tabakalar tarafından tamamen soğurulabilmekte ya da absorblanabilmektedir. Beta ışınları genellikle vücudun derisinin üst kısmından öteye nüfuz edemezler. Her şeye rağmen, yüksek enerjili beta radyasyonlarına aşırı derecede maruz kalma veya yüksek dozda ışınlanma durumlarında, deri yanıkları görülebilmektedir. Bu şekildeki beta yayınlayıcılar, solunum ya da sindirim yoluyla vücuda alındığı takdirde de tehlike yaratabilmektedir. Beta bozunumunun üç farklı türü vardır. Bunlar β^-, β^+ ve elektron yakalama olayıdır.

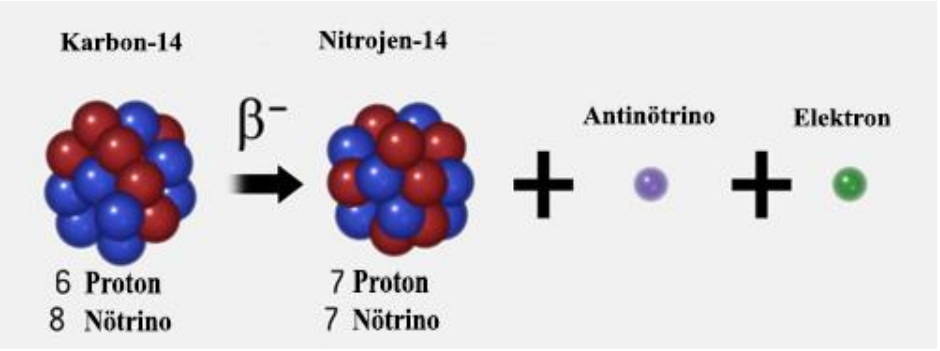
β^- bozunumu: Bir çekirdeğin kararsızlığı nötron fazlalığından ileri geliyorsa, çekirdekteki nötronlardan biri proton ve elektron haline dönüştürür

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}. \tag{1.10}$$

Bir beta ışıması ile çekirdekteki proton sayısı bir birim artar, nötron sayısı bir birim azalır. Dolayısıyla ile atom numarası bir artarken kütle numarası değişmeden kalır yani atomun bir beta ışıması sonucu izobar atomu oluşur

$$^{A}_{Z}X_{N} \rightarrow ^{A}_{Z+1}Y_{N-1} + e^- + \bar{\nu}. \tag{1.11}$$

β^- bozunumuna örnek olarak ^{14}C bozunumu verilebilir (Şekil 1.6).



Şekil 1.6. Örnek bir β^- bozunumu

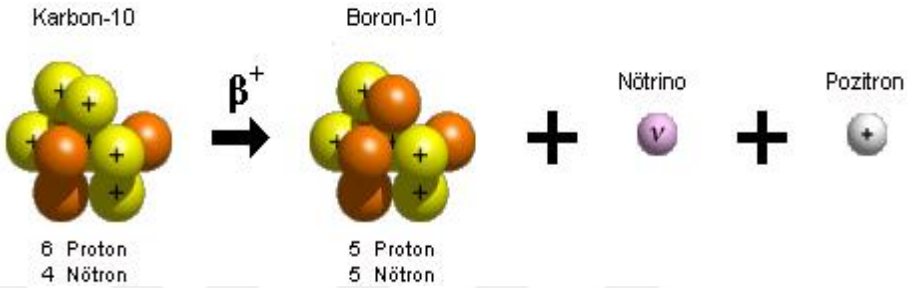
β^+ bozunumu: Atomun kararsızlığı proton fazlalığından ileri geliyorsa protonlardan biri nötron ve pozitrona dönüşür

$$p \rightarrow n + e^+ + \nu. \tag{1.12}$$

Bir pozitron ışıması ile çekirdekteki nötron sayısı bir birim artar, proton sayısı bir birim azalır. Dolayısıyla atom numarası bir birim azalırken kütle numarası değişmeden kalır, atomun bir beta ışıması sonucu izobar atomu oluşur;

$$ {}^{A}_{Z}X_{N} \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y_{N+1} + e^{+} + \nu . \qquad (1.13) $$

β^{+} bozunumuna örnek olarak ^{10}C bozunumu verilebilir (Şekil 1.7).



Şekil 1.7. Örnek bir β^{+} bozunumu

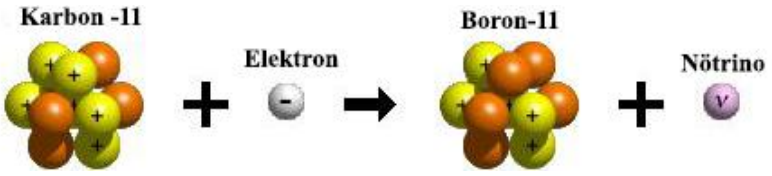
Elektron yakalama olayı: Çekirdek proton fazlalığından dolayı kararsız ise atom çekirdeğinin kendisine en yakın orbitaldeki bir elektronu yakalaması olayıdır. Elektronla birleşen proton, nötron ve nötrino haline;

$$ p + e^{-} \rightarrow n + \nu \qquad (1.14) $$

dönüşür. Bir proton gittiği için atom numarası bir azalırken kütle numarası değişmez;

$$ {}^{A}_{Z}X_{N} + e^{-} \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y_{N+1} + \nu . \qquad (1.15) $$

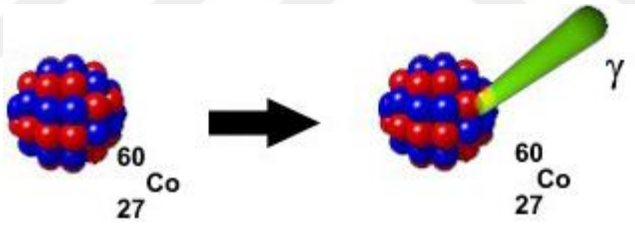
Elektron yakalama olayına örnek olarak ^{11}C izotopunun elektron yakalama olayı verilebilir (Şekil 1.8).



Şekil 1.8. Örnek bir elektron yakalama olayı

1.5.3. Gama bozunumu

Radyoaktif bozunumdan (alfa veya beta) veya bir nükleer reaksiyondan sonra ortaya çıkan ürün çekirdek, genellikle uyarılmış enerji seviyesinde kalır. Bu durumdaki çekirdek ikinci bir bozunum ile bir foton yayınlayarak daha düşük enerji seviyesine ve sonunda taban enerji seviyesine geçer. Bu şekilde, çekirdeğin uyarılmış enerji seviyesinden temel enerji seviyesine geçerken yayınladığı fotonlara gama ışını denir. Gama ışınlarının alfa ve beta parçacıklarına göre madde içine nüfuz etme kabiliyetleri çok daha fazla, iyonlaşmaya sebep olma etkileri ise çok daha azdır. Ancak birkaç santimetre kalınlığındaki kurşun tuğlalarla ve sadece belli bir kısmı durdurulabilir. Madde içerisinden geçerken üstel bir fonksiyon şeklinde bir şiddet azalmasına uğrarlar. . Enerjileri kesiklidir. Enerjileri tipik olarak 0,1 MeV - 10 MeV arasındadır ve bu da 100 ile 10^4 fm dalga boyu aralığına denk gelir. Kütleleri yoktur ve yüksüzdürler dolayısı ile elektrik ve manyetik alanda saptırılamazlar, yüksek enerjilerinden dolayı madde içerisinde yol alabilirler, ışık hızı ile yayılırlar. Co-60'ın gama ışını yayınlaması gama bozunumuna örnek olarak verilebilir (Şekil 1.9).



Şekil 1.9. Gama ışını yayınlanması (Davutoğlu, 2008)

X ve gama ışınları (foton), içinden geçtikleri ortamın atomları ile rastgele yaptıkları karşılıklı etkileşimler sonucunda ortama enerji bırakarak absorblanabileceği gibi saçılıma da uğrayabilirler. Fotonların madde ile etkileşiminde rol oynayan üç önemli üç olay fotoelektrik olay, compton saçılması ve çift oluşum olayıdır. Bu etkileşmeler fotonların iki önemli özelliklerini açıklar. Bunlardan birincisi fotonların madde içerisinde yüklü parçacıklarla karşılaştırıldığında daha uzun mesafelere penetrasyonu, ikincisi ise belli bir kalınlıktaki malzemeyi geçince fotonların enerjilerinde bir azalma meydana gelmemesi, sadece şiddetinde azalmanın olmasıdır (Knoll, 2000).

1.5.3.1. Fotoelektrik olay

Madde yüzeyine düşen ışık veya daha yüksek enerjili elektromanyetik dalganın tüm enerjisini atoma bağlı elektrona vererek, elektronu atomdan sökmesine fotoelektrik olay denir. Yörüngeden koparak serbest hale gelen elektrona fotoelektron denir.

Olayı ilk olarak Alman Fizikçi Heinrich Rudolf Hertz, elektromanyetik dalgaların varlığını deneysel olarak göstermeye çalışırken gözlemlemiş olduğundan bu olaya Hertz etkisi de denmiştir ancak günümüzde bu isim kullanılmamaktadır. Hertz yaptığı deneyde, üzerine civa sürülmüş bir çinko levhayı önce negatif elektrikle yükleyerek üzerine ışık düşürüldüğünde yüklerini kaybettiğini, fakat daha sonra pozitif elektrik yükleyince aynı ışık altında yükünü kaybetmediğini görmüştür.

Fotoelektrik olayın pek çok özelliği klasik fizik ya da ışığın dalga modeli ile açıklanamaz. Klasik fiziğe göre ışık şiddetine bağlı olarak metal yüzeyinden her frekansta elektron sökülmesi gerekir, elektronların enerjisi, çarpan ışığın şiddeti ile orantılıdır, elektronların koparılmasından ve ivmelendirilmesinden sorumlu olmalıdır.

Ancak gözlemler sonucu yayılan elektronların enerjilerinin ışık şiddetinden bağımsız olduğu ortaya çıkmıştır. Einstein, Planck'ın foton hipotezinden yola çıkarak buna bir açıklama getirmiştir. Buna göre gelen ışık dalga değil, foton adında ve her biri $E=h\nu$ (h=Planck sabiti, ν =ışığın frekansı) enerjisine sahip parçacıklardan oluşur. Bu modele göre ışığın şiddetini artırmak birim zamanda yayılan foton sayısını artar ancak frekans sabit tutulması sonucunda her fotonun enerjisi de sabit kalır. Bu olay sırasında gelen fotonun enerjisinin bir kısmı elektronu bağlı olduğu atomdan sökmek için harcanır, geri kalan kısmı ise koparılan elektrona kinetik enerji olarak aktarılır;

$$E = h\nu = E_{Bağlanma} + E_{Kinetik} \tag{1.16}$$

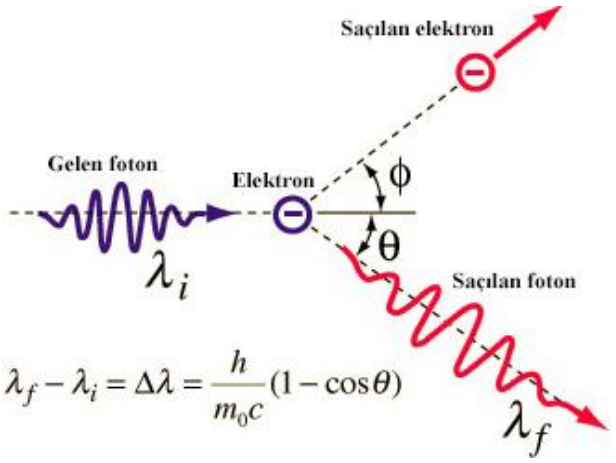
1.5.3.2. Compton olayı

Işığın tanecikli bir yapıya sahip olduğuna dair ilk kanıt 1923'de Amerikalı fizikçi Arthur H. Compton tarafından yapılan saçılma deneyidir. Compton olayı (veya Compton saçılması) yüksek enerjili X ışınları fotonunun karbon atomunun serbest elektronlarından birisine esnek çarparak, elektronu bir doğrultuda

fırlatırken, kendisinin de herhangi bir doğrultuda saçılması olayına denir (Şekil 1.10). Compton, yaptığı deneyde durgun bir parçacığa çarpıp saçılan ışığın dalga boyunda bir kayma olduğunu bulmuştur.

Compton olayında fotonun enerjisi 0,5 ile 10 MeV arasındadır. Bu olayda foton, bağ enerjisi en az olan atomun en dış yörüngesindeki elektronlardan biriyle etkileşime girer ve elektronu yörüngesinden fırlatır. Etkileşim sonucunda foton, enerjisinin bir kısmını kaybeder ve geliş doğrultusu ile 0-180^o aralığındaki bir açı ile saçılır. Geri kalan enerjisiyle bir başka yönde yoluna devam eder. Fırlayan elektrona Compton elektronu adı verilir. Bu elektron ortamda yoluna devam ederek, diğer atomlarda iyonlaşmaya yol açar.

Foton çarpışmadan önce ve çarpışmadan sonra aynı hızla, yani ışık hızı ile yayılır. Saçılan fotonun enerjisinin azalması hızının azalmasından değil, frekansın azalmasındandır. Toplam enerji ve momentum korunur. Gelen fotonun kaybettiği enerji, elektronun kazandığı kinetik enerjiye eşittir. Saçılan foton enerji kaybettiğinden frekansı küçülür ve buna bağlı olarak da dalga boyu büyür (Şekil 1.10). Gelen fotonun momentumu, saçılan fotonun momentumu ile saçılan elektronun momentumlarının vektörel toplamına eşittir.



Şekil 1.10. Compton saçılması

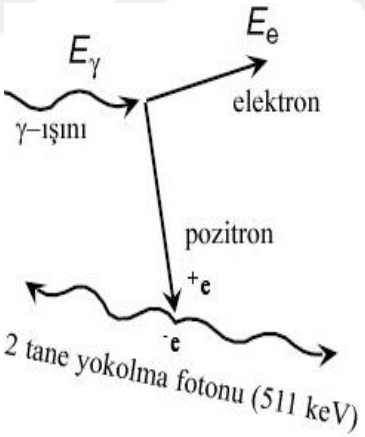
Burada λ_i gelen ışığın dalga boyu, λ_f saçılan ışığın dalga boyu ve θ saçılma açısıdır. Bu olay, fotonların momentumlarının olduğunu gösteren ve ışığın tanecikli karakterini doğrulayan önemli bir olaydır.

1.5.3.3. Çift oluşumu

1,02 MeV üzerinde enerjiye sahip foton çekirdeğin yeterince yakınından geçerken çekirdeğin elektromanyetik alanı ile etkileşerek enerjisinin tümünü bir elektron ve pozitrona dönüştürerek yok olur. Bu olaya çift oluşumu adı verilir. Bu etkileşmede foton, elektron-pozitron çifti üretir ve kendisi yok olur (Şekil 1.11). Enerjinin korunumu,

$$h\nu = m_{e+} + m_{e-} + T_{e+} + T_{e-} \tag{1.17}$$

denklemi ile verilir. Burada, T_{e+} ve T_{e-} pozitron ve elektronun kinetik enerjileridir. Çift oluşumunda kaybolan fotonun 1,02 Mev'den fazla enerjisi elektron-pozitron çifti arasında kinetik enerji olarak paylaşılır. Enerjinin 1,02 Mev'lik bölümü ise oluşan parçacıkların durgun kütlelerine eşdeğerdir. Negatif yüklü parçacık enerjisi tükenene kadar çeşitli çarpışmalar yapar. Pozitif yüklü parçacık ilk karşılaştığı atomun bir orbital elektronuna çarparak yok olur. Bu olayda enerjileri 0,511 MeV olan ve birbirleriyle 180^o açı yapan zıt doğrultuda iki tane yok olma fotonu meydana gelir.



Şekil 1.11. Çift oluşumu örneği (Gilmore, 2008)

Çift oluşum süreci Einstein'ın $E = mc^2$ denklemi ile verilen enerjinin kütleye dönüştüğü olaya bir örnektir (Khan, 1993).

1.6. Radyasyon Birimleri

Radyasyon birimleri aktivite, ışınlama, soğurulmuş doz ve eşdeğer dozdur.

Aktivite: Aktivite birimi Becquerel (Bq) olup saniyede bir bozunma meydana getiren herhangi bir radyoaktif madde miktarı olarak tanımlanmaktadır. Sıvılardaki radyoaktivite Bq/L, katılardaki radyoaktivite Bq/kg, radyoaktif yağışlar sonunda toprak yüzeyindeki radyoaktivite Bq/m^2, havadaki radyoaktivite ise Bq/m^3 olarak elde edilir.

Eskiden kullanılan aktivite birimi Curie (Ci)'dir. Herhangi bir radyoaktif madde miktarı eğer saniyede $3,7x10^{10}$ bozunma hızına sahipse aktivitesi 1 Curie olarak tanımlanmaktadır. Becquerel ve Curie arasındaki bağıntı 1 Ci =$3,7 \times 10^{10}$ Bq veya 1 Bq = $2,703 \times 10^{-11}$ Ci şeklindedir.

Işınlama: Işınlama, X ve gama ışınlarının havayı iyonlaştırmalarının bir ölçüsüdür. Işınlama birimi ise Röntgen'dir ve normal hava şartlarında (0 ^oC ve 760 mm Hg basınçta) havanın 1 kg'ında $2,58x10^{-4}$ C'luk elektrik yükü değerinde pozitif ve negatif iyonlar oluşturan X ve gama ışını miktarıdır.

Soğurulmuş doz: Radyasyonlarla ışınlanan bir maddenin birim miktarındaki soğurulan radyasyon enerjisidir. SI birim sisteminde soğurulan doz birimi Gray (Gy)'dir. Gray, 1 kg'lık bir maddeye 1 Joule (J)'luk enerji veren herhangi bir iyonlayıcı radyasyonun dozudur. Eski özel birimi rad (radiation absorbed dose) olup, 1 rad, herhangi bir maddenin gramı başına 100 erg'lik enerji soğurmasına eşdeğerdir.

Eşdeğer doz: Radyasyona maruz kalan bir insanda meydana gelebilecek zararlı biyolojik etkileri de ölçebilen bir birime ihtiyaç vardır. Vücudun kilogramı başına soğurduğu enerjinin meydana getirdiği biyolojik etki, maruz kalınan radyasyonun cinsine ve enerjisine göre farklılık gösterir. Örneğin, alfa tanecikleri beta taneciklerine göre daha ağır ve yüksek enerjili olduklarından, vücut içinde kat ettikleri birim yol başına çok daha fazla enerji bıraktıkları için geçtikleri bölgenin daha fazla tahrip olmasına neden olurlar. Ayrıca bazı organların diğer organlara göre radyasyon hassasiyeti farklıdır ve aynı doza karşı oluşan biyolojik etkide farklıdır. Eşdeğer doz, bütün bu faktörleri içine alan radyasyon dozu için kullanılmaktadır. Hücrenin 1 radlık alfa parçacığından hasar görme olasılığı 1 rad'lık gamma

radyasyonuna göre daha fazladır. Bu farklılıkların belirlenebilmesi için belirli bir radyasyon dozunun aynı biyolojik etkiyi yaratan X-ışını dozuna oranı olarak bağıl biyolojik etkinlik (BBE) kavramı kullanılır. BBE değerleri α- radyasyonu için 1 den 20 ye kadar değişir. BBE, ölçülmesi oldukça zor bir nicelik olduğundan bunun yerine, birim mesafede aktarılan enerjiye göre belirli bir radyasyon tipi ve enerjisi için hesaplanan kalite faktörü (QF) kullanılır. Birim uzunluk başına nispeten az enerji aktaran beta ve gammalar için QF'ler 1 civarındadır. Birim uzunluk başına daha fazla enerji aktaran α'lar için QF'ler 20 ye kadar değişir. Çeşitli radyasyon türleri için kalite faktörleri Tablo 1.4'de verilmiştir.

Tablo 1.4. Kalite faktörleri

Radyasyon türü	**Kalite faktörü (QF)**
χ ışınları	1
γ ışınları	1
β ışınları	1
α ışınları	20
Elektronlar	1
Protonlar	2
Nötronlar	5-20

Etkin doz: Doku veya organların aldığı dozun tüm vücut için yüklediği riski ifade etmek için kullanılan bir kavramdır. Birimi Sievert'tir. Dünya genelinde doğal radyasyon kaynakları nedeniyle alınan yıllık etkin doz 2,42 mSv'dir. Tıp alanında çalışan radyasyon görevlilerinin aldıkları dozun yıllık ortalaması 1-5 mSv civarındadır. 1986 yılında Çernobil kazasında çalışan işçilerin aldığı kişisel doz ortalaması 150 mSv'dir (TAEK). Tablo 1.5'de radyasyon birimleri ve bu birimlerin SI ve klasik birim setleri için dönüşümleri gösterilmiştir.

Tablo 1.5. Radyasyon birimleri

Terim	**Eski birimler**	**SI birim**	**Dönüşüm**
Işınlanma	Röntgen (R)	Röntgen (C/kg)	1 C/kg= 3876 R
Absorblanan doz	Rad (rad)	Gray (Gy)	1 Gy =100 rad
Eşdeğer doz	Rem (rem)	Sievert (Sv)	1 Sv= 100 rem
Aktivite	Curie (Ci)	Becquerel (Bq)	1 Bq= 2,7 x 10^{-11} Ci

1.7. Radon

Marie Curie' nin radyum üzerindeki çalışmalarıyla radyoaktiviteyi keşfinden sonra, doğal radyoaktivite ile ilgili yapılan bilimsel çalışmalar artmıştır. 1898'de Ernest Rutherford ve Owens, radyoaktif maddelerin ışınımlarla birlikte bir de gaz yaydığını farkettiler. Radon, 1900 yılında Alman kimyacı Friedrich Ernst Dorn tarafından radyumun bozunma zincirini çalışırken keşfedilmiş ve havadaki varlığı, ilk olarak 1901 yılında Elster ve Geitel tarafından bulunmuştur. 1903'te, radonun atomik ağırlığı Sir William Ramsay tarafından saptanmış ve radon periyodik tabloda 18. Gruba eklenmiştir. 1908'te William Ramsay ve Robert Gray, Latincede "ışıyan" manasına gelen "Nitens" kelimesinden türetilmiş "Niton" ismini verdi ve sembolü "Nt" olarak belirlediler. Alfa ışımasıyla radyumdan oluştuğu göz önüne alınarak 1923'te Curt Schimdt'in Uluslararası Kimya Komitesi'ne sunduğu tavsiyeyle "Radon" olarak adlandırılmaktadır.

Radon 86 atom numarası ile periyodik cetvelin soy gazlar sınıfında yer alır. Soy gazlar grubunun en son üyesi ve en ağırıdır. Renksiz, kokusuz, tatsız, gözle görülemeyen radyoaktif bir gazdır. Gaz olduğu için oluştuğu yerde kalmaz uçarak her ortama karışabilir. Erime noktası -71 ^{o}C, kaynama noktası ise -61,8 ^{o}C'dir. Yoğunluğu 273 K ve 1 atmosfer basınçta 9,73 gram/litre ve molar hacmi de 50,5 cm^3'tür. Normal koşullar altında renksiz olan radon katı hale dondurulduğunda sarı renk verir. Sıcaklık daha da düşürüldüğünde turuncu-kırmızı arası bir renk alır. Havadan 7,5 kez, hidrojenden ise 100 kez daha ağırdır ve tek atomlu şekilde bulunur. Elektron ilgisinin az olması ve iyonlaşma enerjisinin yüksek olması radonun diğer elementlerle kimyasal bağ yapmasını engeller. Ancak elektron ilgisi yüksek olan bazı atomlarla etkileşip kararlı bileşikler yapabilir. Katratlar ve karışık florimler gibi bazı bileşikler oluşturabilir; özellikle, suyla birlikte yarı kararlı bir katrat-hidrat oluşturur; $Rn\text{-}6H_2O$ (Martinelli, 1993). Radon kısmen suda çözülebilir ve sudan daha az çözülebilirliği olan gliserin hariç, organik sıvılar içinde yüksek bir çözülebilirliğe sahiptir. Odun kömürü ve silikon jelin üstünde kolayca emilebilir (Cigna, 2005). Çözünürlüğü sıcaklık arttıkça azalır; sudaki çözünürlüğü 0 ^{o}C, 25 ^{o}C ve 50 ^{o}C'de sırasıyla 510, 220 ve 130 cm^3/litredir (UNSCEAR, 1993). ^{222}Rn atomunun özellikleri Tablo 1.6'da verilmiştir.

Tablo 1.6. ^{222}Rn özellikleri

Sembol	Rn	Renk	Renksiz
Atom numarası	86	İyonizasyon Enerjisi	10,745 eV
Nötron Sayısı	136	Molar ısı kapasitesi	20,8 J $K^{-1}mol^{-1}$
Atomik kütlesi	222 amu	Yarı ömrü	3,823495 gün
Grup ismi	Soygaz	Nötron Tesir Kesiti	0,7
Grup	18	Molar hacim	50,5 cm^3/mol
Periyot	6	Isısal İletkenliği	0.00361 W/(m K)
Blok	P	Kristal yapı	Kübik
Atomik yarıçapı	1,34 ^{0}A	Standard Molar Entropi	176,2 J $K^{-1}mol^{-1}$
Elektron Dizilimi	[Xe] $4f^{14}5d^{10}6s^26p^6$	Buharlaşma Entalpisi	18,1 kJ mol^{-1}
Donma Noktası	-71,0 ^{o}C	Füzyon Entalpisi	2,7 kJ mol^{-1}
Kaynama Noktası	-61,8 ^{o}C	CAS kayıt numarası	10043-92-2
Yoğunluk	9,73 g/litre		

Radon ve bozunma ürünleri insanların doğal kaynaklardan maruz kaldığı radyasyonun en önemli bileşenidir. Doğada var olan üç temel radyoaktif bozunma serisinin tek gaz ürünü radondur (Şekil 1.12).

$^{238}U \rightarrow ..... \rightarrow {}^{222}Ra \rightarrow {}^{222}Rn$ (Radon) $\rightarrow$ .....

$^{235}U \rightarrow ..... \rightarrow {}^{223}Ra \rightarrow {}^{219}Rn$ (Aktinon) $\rightarrow$ .....

$^{232}Th \rightarrow ..... \rightarrow {}^{224}Ra \rightarrow {}^{220}Rn$ (Toron) $\rightarrow$ .....

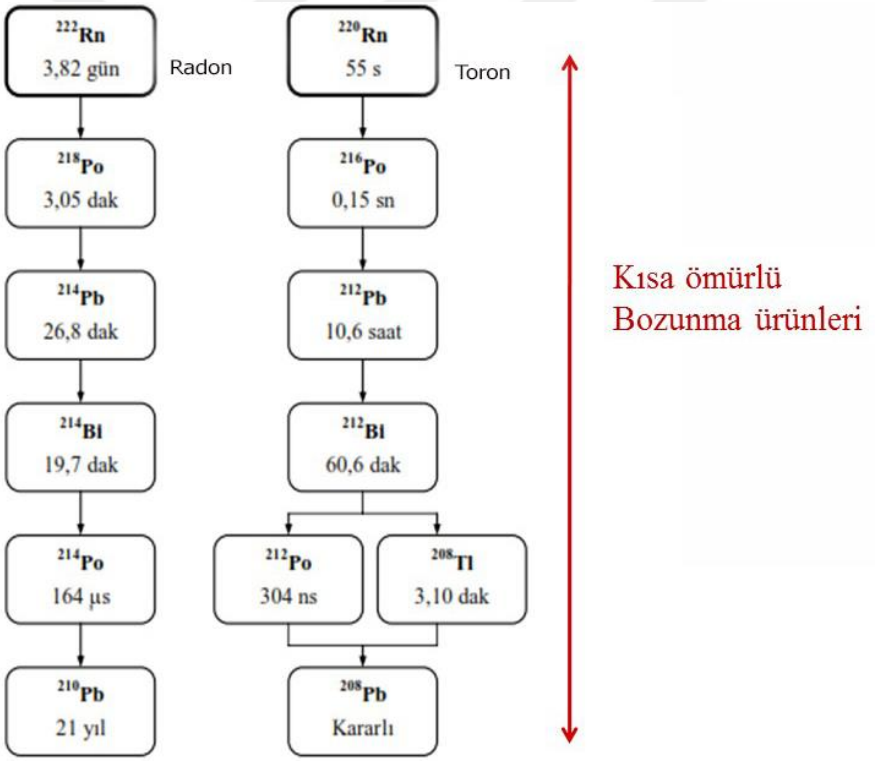
Şekil 1.12. Rn bozunma zinciri

En ağır soy gaz olan radon ^{235}U, ^{232}Th ve ^{238}U bozunma serilerinden gelen üç doğal radyoizotopa sahiptir. ^{219}Rn (Aktinon) aktinyum serisinin, ^{220}Rn (Toron) toryum serisinin ve ^{222}Rn (Radon) ise uranyum bozunma serisinin bir ürünüdür (Şekil 1.13). Radonun yarı ömrü 3,8 gün, toronun yarı ömrü ise 55 saniye ve aktinonun yarı ömrü ise 3,9 saniyedir. Aktinonun yarı ömrünün çok kısa ve doğal uranyumdaki ^{235}U/^{238}U oranının 0,00725 gibi çok düşük seviyelerde olması sebebiyle aktinonun toplam doza etkisi ihmal edilebilir düzeydedir. Toron ve aktinonun yarı ömürleri saniyeler mertebesinde olduğu için radon denilince akla ^{222}Rn (Radon) gelmektedir (ICRP, 1993). Ayrıca radon, ^{219}Rn ile ^{226}Rn arasında yirmiden fazla yapay izotopa sahiptir. Bazı Radon izotopları ve yarılanma süreleri Tablo 1.7'de verilmiştir.

Tablo 1.7. Radon izotopları ve yarılanma süreleri

İzotop	Yarılanma Süreleri
Rn-211	14,6 saat
Rn-212	24,0 dakika
Rn-217	0,6 milisaniye
Rn-218	35,0 milisaniye
Rn-219	3,96 saniye
Rn-220	55,61 saniye
Rn-222	3,82 gün

Kararsız bir radyoizotop olan radon kararlı hale geçene kadar alfa parçacıkları (Helyum çekirdeği) yaymak suretiyle radyoaktif bozunmaya devam ederek son ürünü olan kurşuna dönüşür. Bozunma ürünlerinin radondan farkı gaz halinde olmamalarıdır. Radonun ve toronun bozunma zinciri Şekil 1.13'de verilmiştir.



Şekil 1.13. ^{222}Rn (Radon) ve ^{220}Rn (Toron) bozunma zinciri

1.7.1. Toprakta radon

Radon, yer kabuğununda farklı miktarlarda bulunan uranyumun bozunması ile yeryüzünde bir yoğunluk oluşturur. Gaz olması sebebiyle radon sürekli hareket halindedir. Radonun nüfuzu toprağın gözenekliliğine, bölgedeki radyumun kütle yoğunluğuna, sıcaklığa ve atmosfer basıncına bağlı olduğu için farklı miktarlarda

atmosfere geçer. Diğer gazlarda olduğu gibi radon da kırık ve çatlaklarda yoğunlaşır. Radon yarılanma süresinin az olması sebebiyle fay ya da kırık yüzeylerinden fazla uzağa gidemez. Toprakta 1 metreye kadar derinliklerde yapılan CO_2 ve Rn ölçüm sonuçları, fay-kırık gibi tektonik hatların konum ve uzanımlarını belirlemede kullanılır ayrıca topraktaki radon gazı ölçümleri deprem tahmini çalışmalarında önemli parametrelerden biri kabul edilir.

1.7.2. Binalarda radon

İnsanlar zamanlarının büyük bir kısmını kapalı mekanlarda geçirirler bu sebeple radona maruz kalmaları önemli bir problemdir. Binalardaki radon gazının büyük bir kısmı, binanın temelindeki toprak ve kayalardan, geri kalanı ise binanın yapıldığı yapı malzemelerinden kaynaklanmaktadır (TAEK). Hammaddesi topraktan elde edilen taş, kum, çimento, beton, tuğla gibi yapı ürünleri farklı miktarlarda Radyum içerebilir ve bozunarak Radon kaynağı oluşturabilir (Makofske et al., 1998).

Toprakta oluşan radon gazı, toprak boyunca yükselerek, binanın altında birikmektedir ve binanın içine sızan radon gazı binanın içerisinde kalma eğilimindedir. Bunun sebebi radonun havadan ağır olmasıdır ve özel bir mekanizma yoksa evin içerisindeki basınç dışarıdaki basınçtan biraz daha düşük olma eğilimindedir. Kapalı ortamlardaki radon yoğunluğu mevsimsel olarak değişiklik gösterir. Soğuk havalarda bina içerisindeki radon miktarının sıcak havalardakine göre daha fazla olduğu söylenebilir. Özellikle sonbahar ve kış mevsimlerinde binaların ısıtılma ihtiyacı sonucu bina içindeki havanın dışarıdaki havaya göre daha sıcak olması nedeniyle içerideki basınç dışarıdakinden fazla olur ve bu nedenle içerdeki radon oranı yükselir. Yaz aylarında ise havalandırma sebebiyle ortamdaki radon miktarının azalması beklenir. Ölçüm olmaksızın evlerdeki radon miktarının tahmini mümkün değildir. Eğer zemin topraksa, radon kolayca sızabilmektedir. Eğer zemin çimento ise radon zamanla oluşan çatlaklardan sızmaktadır. Bununla birlikte su boruları, tesisat ve duvar arası boşluklar radonun sızmasını kolaylaştırmaktadır. Binalardaki radon konsantrasyonunu belirleyen unsurlar:

- Topraktaki ve yapı malzemelerindeki ^{226}Ra miktarı
- Toprak ve yapı malzemelerinin nem oranı
- Toprak ve yapı malzemelerinde yayılma (difüzyon) potansiyeli

- Toprakla temasta olan yapının yüzey alanı ve izolasyon niteliği
- Bina zemini
- Binadaki havalandırma kapasitesi
- İklim koşulları
- İç/dış hava sıcaklık ve basınç farkı şeklinde sıralanabilir.

Radon gazının evlere giriş yerleri Şekil 1.14'de gösterilmiştir.



Şekil 1.14. Radon gazının evlere giriş yerleri (EPA, 1986).

Maden ocakları, metro, tünel, mağaralar, kaplıcalar, fabrikalar, alışveriş merkezleri, okul ve ofisler radon riski taşıyan işyerleri olarak tanımlanabilmektedir. Radon atmosfere yayılan bir gaz olduğundan açık havada yapılan ölçümler gerçek oranda radon kirliliğini göstermez, ancak kapalı ortamlarda yapılan ölçümlerle fikir sahibi olunabilir.

1.7.3. Suda radon

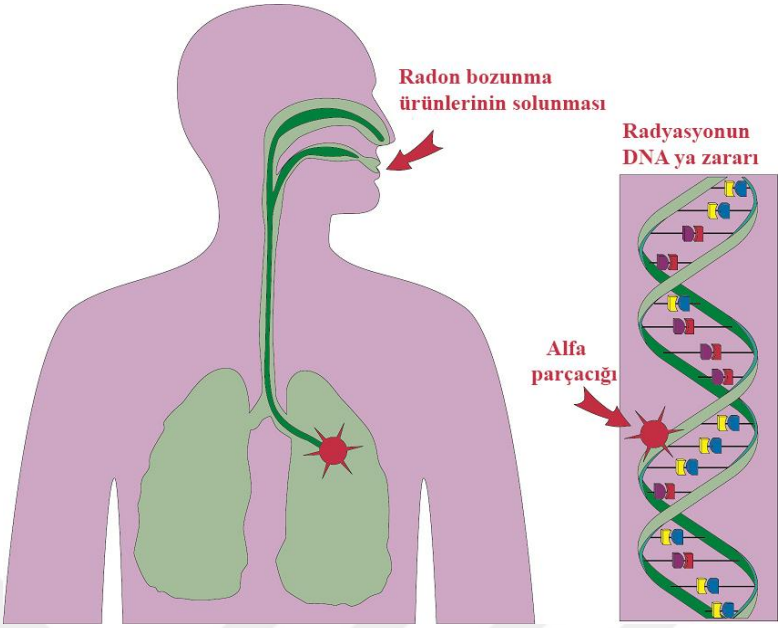
Yüzey sularındaki radon genelde çözünmüş radyumla birlikte bulunur. Suda ölçülen radon, sadece suyun içerisinde bulunan radyumdan kaynaklanmamakta, aynı zamanda suyun geçtiği yerlerdeki toprak ve kayalarda bulunan radyumdan da ileri gelmektedir. Radon topraktan geçerken suda çözünür ve bu su ile birlikte eve taşınmış olur. Su yoluyla evlere giren radon suyun sıcaklığı arttıkça ev atmosferine daha çok yayılır (UNSCEAR, 1993). Evlerde duş, çamaşır ve bulaşık makinesi gibi suyun püskürtülmesi veya çalkalanması ile yapılan uygulamalar büyük miktar

radonun salınmasına neden olur. Sudaki radon seviyesi, ev içi radon seviyesini önemli derecede attırır. Yeraltı sularındaki radon konsantrasyonu, yüzeysel sulardan daha yüksektir. Örnek olarak inşaat malzemesinden gelen ışınlanmalara, yüzeysel sulardan katkı % 0,2, yeraltı sularından gelen katkı ise % 20'dir.

Ev içi havasına, musluk suyundan radon transferi çalışmalarında bir günde kişi başına ortalama 0,2-0,4 m^3 su kullanıldığı varsayılarak, bu miktarın transfer veriminin 0,5-0,6 olduğu rapor edilmiştir. Sudaki radon konsantrasyon değeri Bq/L ya da pCi/L birimleri ile verilir. UNSCEAR, yüzey suları için tipik ^{222}Rn konsantrasyonunun 1pCi/L değerinden daha düşük olduğunu ve yer altı suları için tipik ^{222}Rn konsantrasyonunun 4 ile 40 kBq/m^3 arasında değiştiğini bildirmektedir (UNSCEAR, 1988). Sudaki en yüksek konsantrasyonlar Kanada'da 14 $MBqm^{-3}$, Finlandiya'da 77 $MBqm^{-3}$, ABD'de 20 $MBqm^{-3}$ bulunmuştur. Yapılan çalışmalar 370 BqL^{-1} radon konsantrasyonuna sahip bir suyun, ev içi radon konsantrasyonuna katkısının 37 $mBqL^{-1}$ olduğunu ortaya koymuştur (Çelebi, 2007).

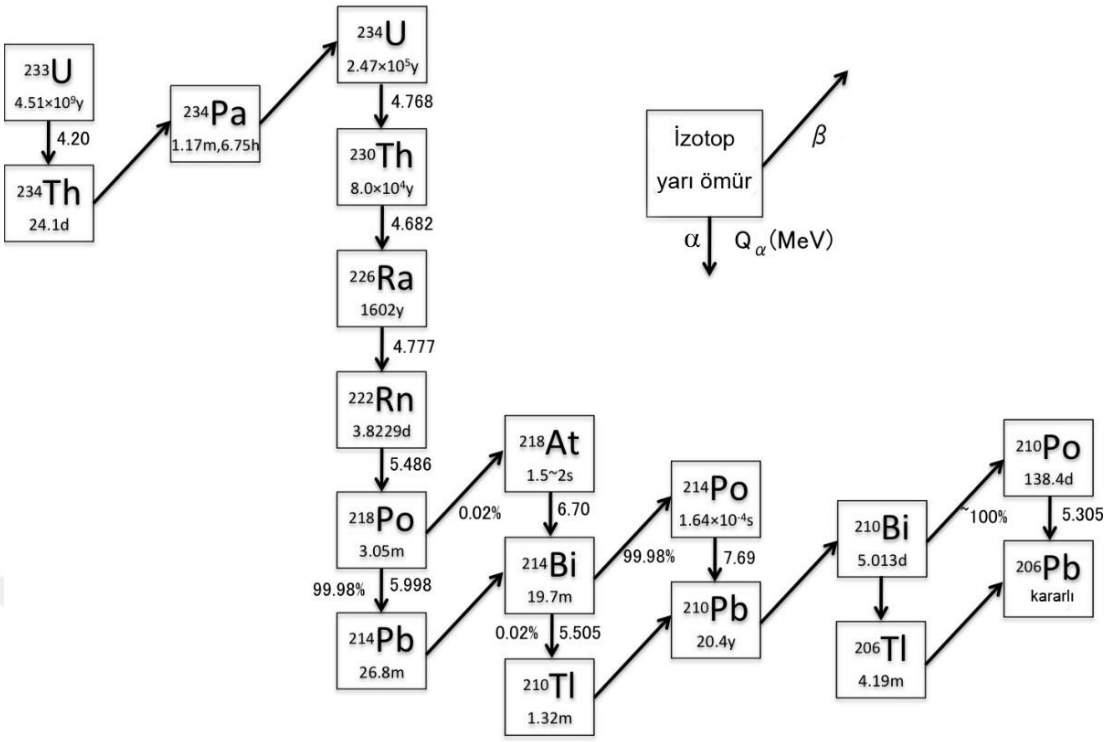
1.7.4. Radon gazının sağlık üzerine etkileri

Vücuda sindirim veya solunum yoluyla giren radon gazı teneffüs edildiğinde bozunmaya uğrar ve akciğerler tarafından tutulabilecek parçacıklara dönüşür. Bozunma ürünleri kararlı hale gelinceye kadar bozunma devam eder ve bozunma sürecinin her aşamasında radyasyon salımı gerçekleşir. Bozunma ürünlerinin radondan farkı gaz halinde olmamaları, katı parçacık olmalarıdır. Bu parçacıkların bir kısmı havadaki tozlara ve su damlacıklarına tutunarak aerosoller oluşturmakta ve solunum yoluyla akciğerlere taşınabilmektedir. Radyoaktif parçacıklar akciğerin en küçük dokularına kadar nüfuz eder ve bazılarının alfa yayıcısı olmaları nedeniyle, alfa radyoaktivitesinin biyolojik etkileri önem kazanmaktadır (Şekil 1.15). Alfa parçacıklarının penetrasyon güçlerinin az olmasına rağmen bronş ve bronşiollerin yüzeysel hücrelerine penetre olabilecek yeterliktedir.



Şekil 1.15. Radon bozunma ürünlerinin DNA' ya zararı

^{222}Rn arka arkaya iki kez alfa bozunumuyla önce ^{218}Po ve ^{214}Pb'ye dönüşür. Sonra iki kez beta ve gama bozunmalarıyla sırasıyla ^{214}Bi ve ^{214}Po'yu oluşturur. Zincirin en sonunda bir alfa bozunumuyla ^{210}Pb meydana gelir. Bu zincirde en kararlı iki çekirdek ^{210}Pb ve ^{220}Rn'dir. ^{210}Pb'un yarı ömrü 21 yıldır. Arada kalan dört izotop ise oldukça kısa yarı ömürlere sahip olduklarından aktiviteye katkıları çok azdır. Diğer radon izotopu ^{220}Rn bozunma zincirinde ilk iki element ^{216}Po ve ^{212}Pb, alfa salınmasıyla oluşur. Sonra beta ve gama salınarak ^{212}Bi oluşur. Bu aşamadan sonra bu izotopun iki türlü bozunmaya uğrama ihtimali vardır. Ya alfa ve beta vererek ^{212}Po'ya bozunur ya da alfa vererek ^{218}Tl'ye bozunur. Her iki durumda da son ürün kararlı bir element olan ^{208}Pb'dir (Şekil 1.16).



Şekil 1.16. Uranyum bozunma zinciri

Bu parçacıkların bozunmasıyla açığa çıkan enerji akciğer dokusunda hasara, dolayısıyla zaman içerisinde kansere sebep olur. Fakat bu, yüksek dozda radona maruz kalan herkes akciğer kanserine yakalanacağı anlamına gelmez. Akciğer kanserine neden olan en tehlikeli maddeler listesinde radon, sigaradan sonra ikinci sırada gelmektedir. Sigara, kanser riskini arttırmaktadır. Hem sigara içip hem de yüksek dozda radona maruz kalmış kişilerde akciğer kanserine yakalanma riski oldukça yüksektir (TAEK).İngiltere Milli Radyasyondan Korunma Komitesi (NRPB), İngiltere'deki yıllık toplam 41000 akciğer kanserinden en az 2500'ünü, ABD Halk Sağlığı Servisi ise yıllık akciğer kanseri vakalarının, sigara içmeyenlerden 5000, sigara içenlerden ise 15000'ini, Uluslararası Radyasyondan Korunma Komitesi (ICRP) ise toplam akciğer kanserlerinin % 10'unu radona bağlamaktadır. Ancak bu durum yüksek dozda radona maruz kalmış herkesin akciğer kanserine yakalanacağı anlamına gelmemekte ve maruz kalınma ile hastalığın oluşması arasında geçen zaman yıllarca sürebilmektedir. Radon gazına maruz kalınmasıyla ortaya çıkabilecek sağlık riskleri, cinsiyet, yaş ve sigara kullanımı gibi faktörlere bağlı olarak değişmektedir (EPA, 1986). Yaşam boyu 200 Bq/m^3 radona maruz kalındığında riskler Tablo 1.8'de gösterilmiştir.

Tablo 1.8. Yaşam boyu 200 Bq/m^3 radona maruz kalındığında riskler (T.C. Sağlık Bakanlığı, 2014)

	NRPB (1990)	**BEIR VI (1993)**
Sigara içenler	% 10	% 10 - % 15
Sigara içmeyenler	% 1	% 1 - % 3

Epidemiyolojik çalışmalar, yüksek seviyede radon ve bozunma ürünlerine maruz kalmış bireylerin akciğer kanserine yakalanma oranlarının yüksek olduğunu göstermiştir.

1.7.5. Radon ölçüm teknikleri

Radon ölçümleri sağlık fiziği alanında farklı kanser türlerinin araştırılmasında, yer bilimleri alanında mineral aramalarında, jeotermal çalışmalarda, volkanik patlamalarda ve deprem tahminlerinde kullanılır. Radon seviyelerinin ölçülmesi, bozunma sürecinde yayınlanan radyasyon miktarının tespit edilebilmesiyle gerçekleşir. Günümüzde pek çok farklı radon ölçüm teknikleri kullanılmaktadır. Radon ve bozunum ürünlerinin konsatrasyonları pasif ölçüm yöntemi ve aktif ölçüm yöntemi olmak üzere iki temel yöntemle ölçülmektedir.

1.7.5.1. Pasif ölçüm yöntemi

Pasif ölçüm tekniğinde kullanılan cihazlar radonun içine girmesini sağlayacak açıklığa sahiptir. Radon ve bozunma ürünlerinin yayınladığı alfa parçacıklarının dedektör filmi üzerine iz bırakması esasına göre çalışmaktadır.

Pasif ölçüm tekniklerinde amaç kısa zamanda sonuçlar elde etmektir. Bu teknikte kullanılan cihazlar küçüktürler dolayısıyla taşınması kolaydır. Ölçüm esnasında herhangi bir güç kaynağına veya kimyasal enerjiye ihtiyaç duyulmaz. Aktif ölçüm tekniğinde kullanılan cihazlara kıyasla çok daha ucuzdurlar. Nemden ve makul seviyedeki ışıktan etkilenmezler. Radon konsantrasyonu ölçümü yapılırken aynı zamanda nem, sıcaklık ve basınç gibi ölçümler yapılamaz. Ölçüm sonucu verilerin elde edilmesi laboratuvarda gerçekleşir. Pasif ölçüm yönteminde kullanılan cihazlar katı hal nükleer iz dedektörleri, dielektrik dedektörler, minik elektrometreler ve termolüminesans fosforlar olarak sınıflandırılabilir (Durrani ve Iliç, 1997).

1.7.5.2. Aktif ölçüm yöntemi

Aktif ölçüm yönteminde ise incelenmek istenen bölgedeki hava, kullanılan cihazların içine pompalanarak alınır. Ölçüm yapılacak numune sıvı veya topraktaki gaz ise ek cihazlar gerekmektedir.

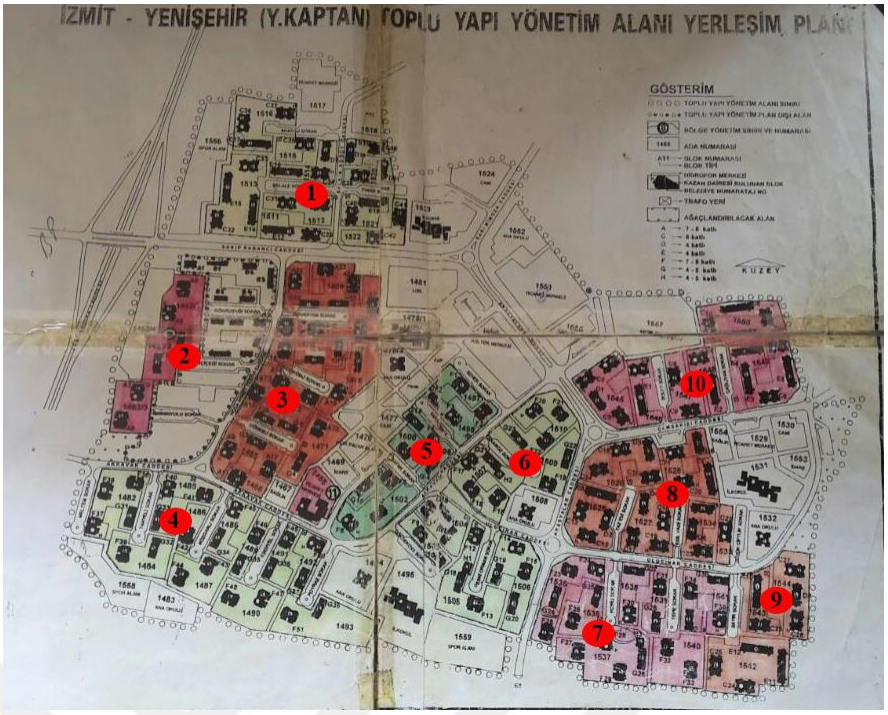
Aktif ölçüm tekniğinde ölçümler sürekli veya aralıklı yapılabilir. Bu teknikte kullanılan cihazların birçok çeşidi taşınabilir boyuttadır. Bir ortamda ölçüm yapıldıktan sonra başka bir ortamda ölçüme devam edilebilir. Radon ölçümünün yanı sıra eş zamanlı olarak sıcaklık, basınç ve nem gibi parametreler ölçülebilir. Pahalı sistemlerdir ve ölçüm yapılabilmesi için teknik bilgi sahibi eleman gereklidir. Pasif ölçüm tekniğinde kullanılan cihazlara göre çok daha pahalıdırlar. Ölçüm yapılan sahada veriler elde edilebilir. Düzenli olarak kalibrasyonları gereklidir. Aktif ölçüm yöntemi, elektronik sistemler, pompalar, güç kaynakları gibi cihazlar gerektirmektedir. Aktif sistemde iyon odaları, sintilasyon hücreleri veya spektroskopik sayım cihazları kullanılmaktadır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Bölgenin Tanıtılması

Kocaeli ili, Marmara Bölgesi'nin doğusunda yer alır, 3.505 km^2 genişliğindedir. Doğusu Sakarya ili, güneyi Bursa ili, batısı Yalova ili, İzmit körfezi, Marmara denizi ve İstanbul ili, kuzeyi Karadeniz ile çevrilidir. Doğal bir liman olan İzmit körfezi işlek bir deniz yoludur. İlin kuzeybatısında yer alan İstanbul il sınırı, Gebze ile İstanbul arasında akan Kemiklidere'nin doğusundan geçer. Güneybatıda İstanbul-Kocaeli sınırı İzmit Körfezi'nin karşı kıyısında Yalova topraklarıyla son bulur. Körfez kıyılarıyla Karadeniz kıyısında ılıman, dağlık kesimlerde ise daha sert bir iklim hüküm sürer. İklimi Karadeniz iklimi ile Akdeniz iklimi arasında bir geçiş iklimi özelliği gösterir. İzmit'te yazlar sıcak ve az yağışlı, kışlar yağışlı, zaman zaman karlı ve soğuk geçer. Genelde Kocaeli ilinin özelde ise İzmit'in Karadeniz'e bakan kıyıları ile İzmit Körfezine bakan kıyılarının iklimi arasında bazı farklılıklar göze çarpar. Yazın körfez kıyılarında bunaltıcı sıcaklar yaşanırken Karadeniz kıyıları daha serindir.

Bu çalışmada, Kocaeli ili İzmit ilçesinin Yahya Kaptan Mahallesi'ndeki bina içi radon seviyesi ölçümleri pasif nükleer iz detektörleri kullanılarak gerçekleştirildi. Yahya Kaptan Mahallesi İzmit'in en kalabalık ikinci mahallesidir. Yahya Kaptan Mahallesi 40.763705 kuzey enlemi ile 29.972104 doğu boylamı arasında yer alır. Bu mahalle 10 bölgeye ayrılmıştır (Şekil 2.1). Bu mahallede 7 cadde, 39 sokak ve toplamda 183 blok bulunmaktadır.



Şekil 2.1. Kocaeli ili İzmit ilçesi Yahya Kaptan Mahallesi haritası

Yahya Kaptan Mahallesi 2014 yılı adrese dayalı nüfus kayıt sistemi verilerine göre 20584 nüfuslu bir mahalledir. Yahya Kaptan Mahallesi toplu konut projesi dahilinde yapılmış olan apartmanlardan oluşur ve 10 bölgeye ayrılmıştır. Her bölgede farklı sayıda apartman ve daire bulunmaktadır (Tablo 2.1). Çalışma kapsamında her bölgede bir binaya ikişer tane dedektörü bırakılmıştır. Dedektörler binaların en alt ve en üst katlarında seçilen birer tane daireye bırakılmıştır. Diğer 4 dedektör muhtarlık, aile sağlığı merkezi, eczane ve taksi durağına bırakılmıştır. Toplamda 24 dedektör kullanılmıştır.

Tablo 2.1. Yahya Kaptan Mahallesi'nde bölgelere göre blok ve daire sayısı dağılımı

Bölge	**Blok sayısı**	**Daire Sayısı**
1. Bölge	23	640
2. Bölge	6	168
3. Bölge	25	672
4. Bölge	24	656
5. Bölge	12	320
6. Bölge	24	606
7. Bölge	21	528
8. Bölge	20	528
9. Bölge	9	248
10. Bölge	19	536
Toplam	183	4902

2.2. Kullanılan Materyal ve Ölçüm Yöntemi

Yahya Kaptan Mahallesi'nde Cr-39 pasif dedektörler kullanılarak, Kocaeli Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi nükleer fizik laboratuvarı ve bilgisayar laboratuvarında ise AlphaGUARD aktif dedektör kullanılarak radon konsantrasyon değerleri ölçülmüştür.

2.2.1. CR -39 nükleer iz dedektörleri

CR-39 bir polikarbonat lens türüdür. Kimyasal adı polyallyl diglycol karbonat (PADC) ve kimyasal sembolü ise $C_{12}H_{18}O_7$'dir. Pittsburgh Plate Glass (PPG) tarafından 1947 yılında piyasaya sunulmuştur. İlerleyen yıllarda radon dedektörlerinde de kullanılmaya başlanmıştır.

CR-39 nükleer iz detektörlerinin bina içi atmosferik radon ölçümlerinde kullanılması, uzun süreli ortalama bir radyasyon konsantrasyonu elde edilmesi açısından tercih edilen ve eş zamanlı birden çok noktada ölçüm yapmayı mümkün kılan oldukça ekonomik bir pasif ölçüm yöntemidir. CR-39 detektörleri camın optik özelikleri ile mekanik ve fiziksel özelikleri birleştirilerek yapılmış ve ısı altında sertleştirilmiş bir tür plastiktir. Camla kıyaslanabilecek optik özelliklere sahiptir, yüzeyi cam gibi parlak ve pürüzsüdür. Kimyasal maddelere, aseton ve benzen içeren çözücülere karşı dayanıklıdır. Çözücülerle temas ederse veya uzun süre çözücü içinde bekletilirse iç ve dış yüzeyinde çatlamalar ve kırılmalar olmaz. 100 milyon röntgen şiddetindeki gama ışınlarına maruz bırakıldığında saydamlığından % 5 oranında kayıp verir (Canbazoğlu, 2004).

CR-39 nükleer iz dedektörleri 1cm yüzey alanlı ve 1mm kalınlıklı polyallyl diglycol karbonat adı verilen plastik filmlerden yapılmışlardır. Bu filmler 26 mm çapında ve 55 mm yüksekliğinde bulunan plastik difüzyon kaplarının kapaklarına yapıştırılmışlardır. Kabın ağzı, radon bozunma ürünlerini filtreleyerek yalnız radon gazını geçiren bir kapakla kapatılmış ve CR-39 dedektörü kapağın iç yüzüne yerleştirilmiştir (Şekil 2.2). Radon gazı kabın içine girdiğinde, yarılanma ömrü sonunda bozunarak bir alfa taneciği yayınlamaktadır. Yayınlanan bu alfa radyasyonu detektöre çarptığında plaka yüzeyi üzerinde iz bırakmaktadır. Ölçme işlemi, nükleer iz dedektörüne çarpan iyonize alfa radyasyonunun yüzey tabakası üzerine bıraktığı

izlerin belirginleştirilerek sayılması esasına dayanmaktadır. Dedektör plakası üzerindeki alfa izlerinin sayısı, ölçüm yapılan yerdeki radon konsantrasyonu ile orantılıdır.



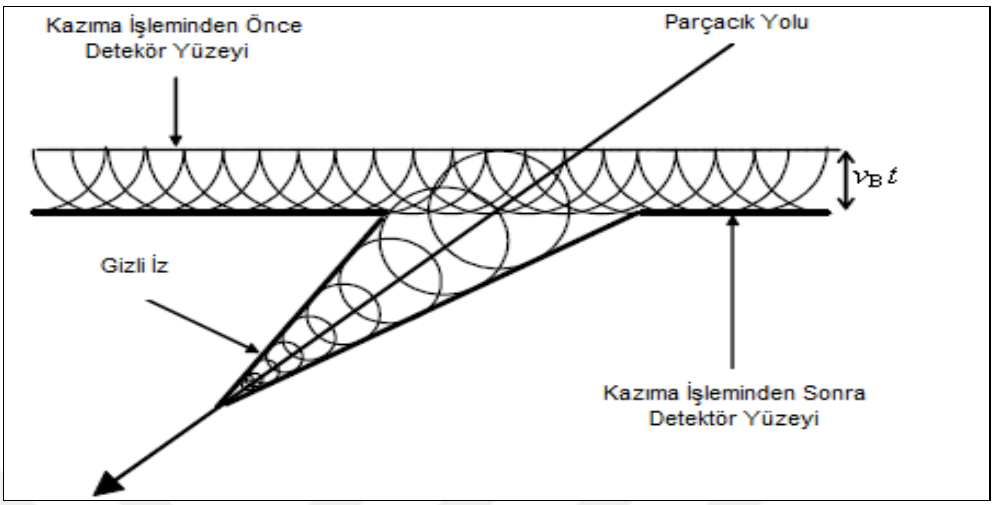
Şekil 2.2. CR-39 radon ölçüm dedektörü

2.2.1.1. CR-39 polimerlerinde izlerin kazıma karakteristikleri

Ağır yüklü parçacıklar, katıhal nükleer iz dedektörü olarak kullanılan materyal içinden geçerken iyonizasyona ve deformasyona neden olurlar. Radon konsantrasyonun belirlenmesi de alfa parçacıklarının dedektör üzerinde bıraktığı izlerin sayılması esasına dayanır. Dedektöre çarpan alfa parçacıklarının yolundaki tüm moleküller iyonize olur. Birincil iyonizasyon olarak adlandırılan bu süreç bir dizi kimyasal işlemi tetikler. Alfa parçacığın geçtiği yol boyunca çok sayıda uyarılma ve iyonlaşma ile yapısal hasar oluşur. Bu hasarlı bölgeye gizli iz adı verilir. Gizli izler elektron mikroskobu ile ya da iz kazıma işlemi sonucunda optik mikroskopta gözlenebilir. Üzerinde gizli izler bulunan dedektör materyali bazı kimyasallarla işlem gördüğünde, kimyasal tepkimeler gizli iz etrafında çok şiddetli oluşacaktır.

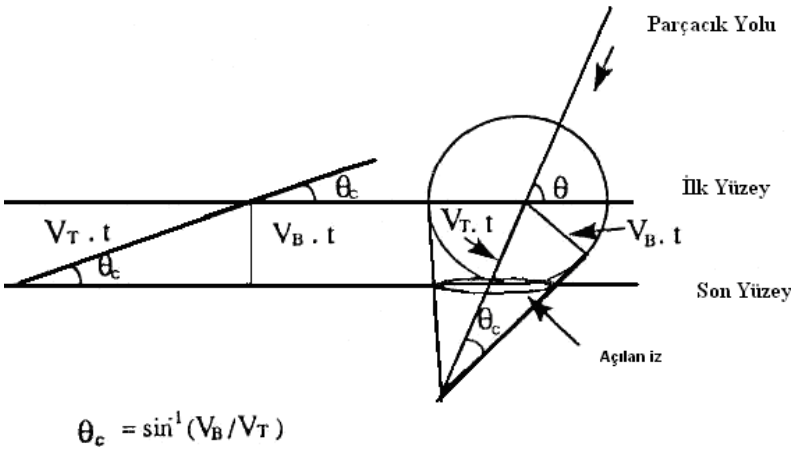
Teorik olarak yapılan çalışmalar hasara uğramamış materyalin kazınma hızının (V_B) dedektör yapısına ve deney koşullarına (çözelti sıcaklığı ve konsantrasyonu ile kazıma süresine) bağlıyken gizli izin kazınma hızı (V_T) gelen parçacığın özelliklerine (parçacığın yükü ve enerjisine) bağlı olduğunu göstermiştir. Kimyasal çözelti

materyalin tüm yüzeyini kazıyacaktır ama hasar etrafındaki kazıma hızı çok daha hızlı olacaktır (Şekil 2.3).



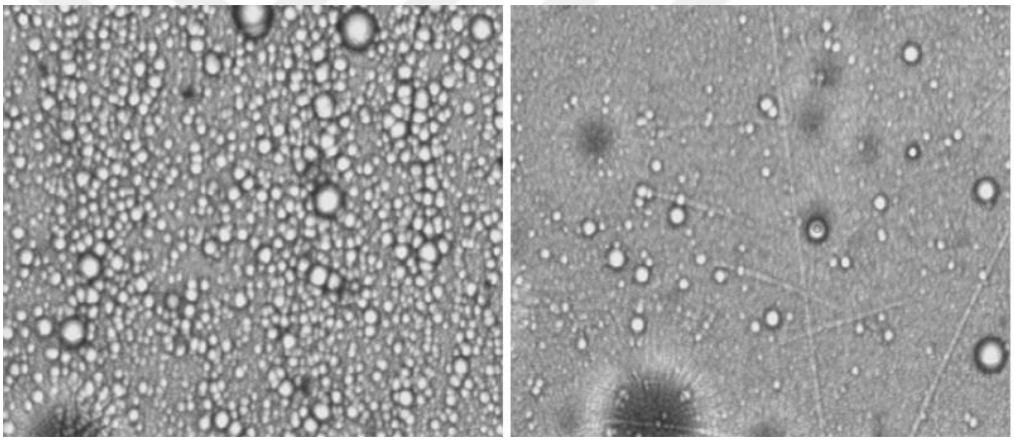
Şekil 2.3. Dedektörlere iz kazıma işleminin uygulanması (Yaprak, 2010)

Kazıma izinin şekli ve çapı temel olarak V_T ve V_B parametrelerine bağlıdır. V_T/V_B oranı dielektrik ortamda (hem kristal hem de polimerik) yüklü parçacıkların kayıt özeliklerini belirlemede çok kullanışlıdır. Ayrıca kimyasal verimlilik ve kazıma kritik açısı (θ_c) gibi parametreleri de bize verir. Kazıma kritik açısı Şekil 2.4 ile açıklanabilir. Detektör üzerinde yüklü parçacıkların meydana getirdiği izlerin gözlenme ihtimaliyeti $\cos^2\theta_c$ ile verilir. Burada verilen bir detektör için $\theta_c = \sin^{-1}(V_B/V_t)$'dir. Ortamdaki iz kazıma hızı V_T'nin değeri, yüklü parçacığın enerjisi ve türünün bir fonksiyonudur. Yüksek Z'li parçacıklar için V_T, zarar görmeyen yüzeyin kazınma hızı V_B'den büyüktür. Böyle bir durumda iz; uzun, tığ gibi ve silindirik şekle sahiptir. Kazıma çukuru iz uzunluğu ile karşılaştığında çok küçük kalır. Kazıma çukuru çapı D, yaklaşık olarak $2V_B.t$'dir ve iz uzunluğu ise yaklaşık olarak $V_T.t$'dir. Bu özellikle kristal ortamlardaki durumdur. Bu durum aynı zamanda fisyon olayı sonucu oluşan yüklü parçacıklar ve hızlandırıcılardan açığa çıkan ağır iyonların plastik üzerine gelmesi durumunda da geçerlidir. Bununla birlikte α parçacıkları için V_T/V_B oranı çok yüksek değildir. Örneğin CR-39 plastiklerinde bu oran değeri sadece 2 ya da 3 olabilir. Bir plastikteki V_B'yi ölçmek oldukça kolaydır. Örneğin kimyasal dağlama ile plastik yüzeyinden kazınan tabakanın kalınlığı olan $h = V_B.t$ dir. Burada t dağlama zamanı ya da kazıma zamanıdır. V_B'nin bilinmesi ile α parçacıkları için V_T bulunabilir.



Şekil 2.4. Kazıma kritik açısı (Durrani and Bull, 1987).

Radon konsantrasyonuna bağlı olarak CR-39 iz kazıma dedektörü yüzeyinde oluşan alfa parçacık izleri Şekil 2.5'de gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Radon ve bozunma ürünlerinin yaydıkları alfa parçacıklarının dedektör üzerinde bıraktıkları izler

2.2.1.2. CR-39 sayım işlemi

Ölçüm süresi sonunda toplanan dedektörler, ölçüm haricinde radon girişinin engellenmesi için özel alüminyum folyoların içine konularak, hava veya ışıkla temas etmeyecek şekilde kapatılmıştır. CR-39 dedektörlerinin kayıt ettiği alfa izlerinin işlenmesi ve sayımı, ÇNAEM Sağlık Fiziği biriminde gerçekleştirilmiştir. Sayım işleminden önce, alfa parçacıklarının film üzerinde bıraktığı izlerin görünür hale gelebilmesi için Radobath banyo ünitesinde (Şekil 2.6) iz kazıma (etching) işlemi yapılmaktadır. Bu işlemin amacı dedektör üzerindeki istenmeyen izlerin arındırılıp alfa izlerinin görünür hale getirilmesidir.



Şekil 2.6. Radobath banyo ünitesi

Kazıma ünitesinin teknik özellikleri Tablo 2.2'de belirtilmiştir.

Tablo 2.2. Kazıma ünitesinin teknik özellikleri (Radosys)

İz kazıma maddesi	% 25'lik NaOH
İz kazıma sıcaklığı	90 ^{0}C
İz kazıma süresi	4 saat
İz kazıma çözeltisi hacmi	5000 g
Banyo işlemi özellikleri	Sıcaklık düzenleme ayarı, otomatik sıvı karıştırıcı
Diğer standart özellikler	Çözelti hazırlamada kullanılacak yardımcı malzeme seti
Güç	0-240 V (AC), 50/60 Hz
Paketlenmiş ağırlığı	8 kg
Boyutları (paketlenmemiş)	ø250 mm x 350 mm

Dedektörler tutucu plakalara yerleştirilmiştir. Radobath banyo haznesinde % 75 oranında saf su ve % 25 oranında NaOH (sodyum hidroksit) içeren bir çözelti hazırlanır. Çözelti sıcaklığı 90 ^{o}C'ye ulaştığında, bu çözelti içerisine yerleştirilen plakalar 4 saat boyunca kazıma işlemine bırakılmıştır. Daha sonra banyo haznesindeki çözelti başka bir kaba aktarılıp hazneye 4 L'lik saf su ile % 15-20'lik 200 mL asetik asit eklenip plakalar nötralize edilmekte ve banyo ünitesinden çıkarılan kazıma diski yaklaşık bir saat süresince kurumaya bırakılmaktadır. Bu işlemin ardından dedektörler Radosys iz kazıma ünitesinde (Şekil 2.7) sayım işlemi için hazır hale getirilmiştir.



Şekil 2.7. Radosys iz kazıma ünitesi

2.2.1.3. İzlerin sayımı ve değerlendirme işlemleri

Alfa parçacıklarının CR-39 dedektörleri üzerinde bıraktıkları izler optik bir sistem olan Radosys iz değerlendirme ünitesinde (Şekil 2.8) otomatik olarak okunmaktadır. Bu değerlendirme ünitesi ışık mikroskobuna bağlı 100 kat büyütmeli bir CCD (Charge-coupled device) kamera içermektedir. Elde edilen analog görüntü dijital hale çevrilerek bilgisayara aktarılmaktadır.



Şekil 2.8. Radosys iz değerlendirme ünitesi

Görüntü analizini Linux işletim sistemi altında çalışan, dedektör üzerindeki iz yoğunluğu ile radon konsantrasyonunu doğrudan verebilen Radosys adlı bir yazılım gerçekleştirmektedir. İz yoğunluğu 150 iz/mm^2'ye kadar hassaslıkta okunabilmektedir ve dedektör başına ortalama 1 dakikalık bir sürede

okunabilmektedir. Bu sayede radon konsantrasyonu araştırılan mekanlara konulan CR-39 dedektörlerinin kayıt ettikleri alfa radyasyonuna ait iz yoğunlukları belirlenir ve elde edilen iz sayısı ölçümlerinden yararlanılarak, atmosferik radon konsantrasyonu

$$C_{Rn} = \frac{d \times kf \times 1000}{t} \qquad (2.1)$$

denklemi ile Bq/m^3 cinsinden hesaplanır. Burada d CR-39 plakası üzerindeki alfa iz yoğunluğu, t saat cinsinden dedektörün radona maruz kaldığı süre ve kf ise [(Bq.m^{-3}) /(iz yoğunluğu.saat^{-1})] kalibrasyon faktörü değeridir.

2.2.2. AlphaGUARD

AlphaGUARD radon dedektörü, ^{222}Rn kaynaklı alfa radyasyonunu ölçmekte kullanılan taşınabilir nitelikte bir radyasyon detektörüdür. Almanya merkezli Saphymo GmbH firması tarafından üretilmiştir. AlphaGUARD radon dedektörü (Şekil 2.9) havada, suda, toprakta ve yapı malzemelerindeki radon yoğunluğu (Bq/m^3) ile eşzamanlı olarak sıcaklık (-15 ile +60 °C aralığında), atmosfer basıncı (700 - 1100 mb aralığında) ve nem oranı (% 0 ile % 99 rH aralığında) gibi üç farklı iklimsel parametreyi de ölçebilmektedir. Havadaki radon konsantrasyonu ölçümleri için ayrıca bir aparat kullanmak gerekmezken su, toprak ve yapı malzemeleri için yapılacak ölçümlerde ayrı aparatlar gerekir.



Şekil 2.9. AlphaGUARD radon dedektörü

Taşınabilir nitelikte olan cihaz 2 - 2.000.000 Bq/m^3 (0,05 ile 50.000 pCi/litre) aralığında radon ölçümü yapabilmektedir ve hassasiyeti 20 Bq/m^3'te 1 CPM olarak

verilmektedir. Bu geniş aralığa rağmen sistemin kendisinden gelen % 3 gibi bir doğrusallık hata payı bulunmaktadır. Cihaz bilgisayara bağlanarak veri depolanabilir ve değerlendirilebilir. AlphaGUARD ölçümler esnasında doğrudan bir güç kaynağına bağlanabildiği gibi yüksek kapasiteli pilleri sayesinde seçilen ölçüm moduna göre 6 aya kadar ölçüm yapabilmektedir. Cihaz amaca ve zaman seçimine bağlı olarak ölçümleri difüzyon modu ve akış modu olmak üzere iki şekilde yapabilmektedir. Uzun süreli ve devamlı ölçümlerde difüzyon modu kullanılır. Bu modda cihaz detektörü 10 dakikalık veya 1 saatlik döngülerle veri kaydeder. Akış modunda ise veri alma aralıkları 1 dakika veya 10 dakika olarak ayarlanabilir. Akış modu daha çok kısa süreli ölçümlerde çok sayıda veri elde etmek için seçilir.

AlphaGUARD radon detektörü gelişmiş bir atma (puls) iyonlaşma çemberi veya alfa spektroskopisi yöntemi kullanmaktadır. Alfa radyasyonu maddeyi iyonlaştırıcı özelliğe sahip olduğundan, AlphaGUARD radon detektörü buna uygun bir iyonizasyon odalı cihazdır. Detektör toplam hacmi 0,62 litredir, ancak bunun 0,56 litrelik kısmı etkin detektör olarak kullanılmaktadır. Yüksek radon ölçüm hassasiyetine ve yoğunluk gradiyentleri ile küçük yoğunluk dalgalanmalarını algılayabilecek derecede hassas elektronik yapıya sahiptir. Dedektör, ölçüm ünitesine tümleşik olan bir pompa yardımı ile havayı detektörün iyonizasyon odasına alır. İyonizasyon odası paslanmaz çelikten, silindir şeklinde yapılmıştır ve detektör besleme gerilimi (anot ve katot arası gerilim farkı) DC 750 volttur. Emme sonucunda iyonizasyon odasına giren ^{222}Rn ve ^{220}Rn izotopları bozunarak oda içerisinde iyonizasyona sebep olarak bir elektrik sinyalleri meydana getirirler. DSP (Digital Signal Processing) teknolojisine sahip olan AlphaGUARD çapraz ilgileşim (cross-correlation) algoritması kullanarak meydana gelen gürültüden radon sinyalini ayırt edebilmektedir. Bu sürekli emme esnasında radon yan ürünleri bir plaka şeklindeki filtre tarafından tutulur ve filtre plakası üzerinde biriken radon yavru ürünlerinin alfa aktivitesi ise filtre plakasının diğer yüzüne yerleştirilmiş hassas bir sayısal işlemcili modülü olan, alfa duyarlı TN-WL.02 mikroçip modülü vasıtasıyla ölçülür. Yapılan tüm ölçümlerden elde edilen elektrik sinyalleri, AlphaGUARD radon dedektörünün Counter-Module sayıcı birimine TTL sinyali olarak gönderilir ve detektörün kalibrasyon bilgileri de kullanılarak yazılım tarafından okunabilir veriler haline dönüştürülür. Alınan verilerin grafiksel olarak işlenmesi, geliştirilmesi, arşivlenmesi

ve sanal ortamda sunulması için ise AlphaGUARD için geliştirilmiş çeşitli yazılım paketleri kullanılır. Bunlar AlphaVIEW, AlphaEXPERT ve en son geliştirilmiş olan DataEXPERT yazılımlarıdır. Cihazın teknik bilgileri Tablo 2.3'de belirtilmiştir

Tablo 2.3. AlphaGUARD cihazı teknik bilgileri

Cihazın Teknik Bilgileri	
Toplam ağırlık	4,5 kg
Boyut	120 x 315 x 175 mm^3
Rn dedektör tipi	İyonizasyon odası
Dedektör gerilimi	DC 750 V
İşletim modu	Akım modu ve 3D alfa spektroskopisi
Toplam dedektör hacmi	0,62 Litre
Etkin dedektör hacmi	0,58 Litre
Dedektör dolum mekanizması	Hızlı pasif difüzyon ve aktif adaptörle otomatik dolma
Dedektör sinyal işleme birimi	3 ayrı ADC kanallı hızlı sinyal işleme
Spektral sinyal üretme birimi	DSP (Digital signal processing) ile çapraz ilgileşim (cross-correlation) algoritması
Dedektör hassaslığı	1 CPM /20 Bq/m^3
^{222}Rn ölçüm aralığı	2 - $2x10^6$ Bq/m^3 (0,05 ile 50.000 pCi/litre)
Sistem doğrusallık hatası	< % 3
^{222}Rn kalibrasyon hatası	± % 3
Ölçüm sıklıkları 1. Difüzyon modu 2. Akış modu	 10 veya 60 dakika 1 veya 10 dakika
Veri depolama kapasitesi	1 dakika döngüyle 3 gün 10 dakika döngüyle 1 ay 60 dakika döngüyle 6 ay
Dahili batarya kapasitesi	10 gün
İklim parametleri	
1. Sıcaklık	-10 °C - +50 °C (+14 °F - +122 °F)
2. Atmosfer basıncı	700 mbar - 1100 mbar
3. Nem	0 - % 99 rH

3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

3.1. Ölçüm Verileri

Yahya Kaptan Mahallesi'nde 24 hanede CR-39 radon dedektörleri ile yapılan ölçümler ve Kocaeli Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Nükleer Araştırma Laboratuvarı ve Bilgisayar Laboratuvarı'nda AlphaGUARD dedektörü ile yapılan ölçümler değerlendirilmiştir.

3.1.1. CR-39 ile yapılan ölçümler

CR-39 radon dedektörlerinin Yahya Kaptan Mahallesi'nde konulduğu yerler, hane nüfusu ve hanede sigara içen kişi sayısı Tablo 3.1'de listelenmiştir. Tüm binaların yapısı betonarmedir.

Tablo 3.1. Yahya Kaptan Mahallesi'nde CR-39 radon dedektörlerinin konulduğu yerler

Sıra no	Dedektör no	Bina Yapısı	Konulduğu yer		Hane nüfusu	Sigara içen kişi sayısı
1	B24584	Betonarme	1. bölge	Zemin kat	4	0
2	B24345	Betonarme	1. bölge	6. kat	3	0
3	B24321	Betonarme	2. bölge	Zemin kat	2	1
4	B24766	Betonarme	2. bölge	8. kat	3	2
5	B24555	Betonarme	3. bölge	Zemin kat	2	1
6	B24784	Betonarme	3. bölge	8. kat	3	0
7	B24591	Betonarme	4. bölge	Zemin kat	2	0
8	B24342	Betonarme	4. bölge	8. kat	4	2
9	B24347	Betonarme	5. bölge	Zemin kat	1	0
10	B24301	Betonarme	5. bölge	8. kat	1	0
11	B24769	Betonarme	6. bölge	Zemin kat	2	2
12	B24767	Betonarme	6. bölge	8. kat	2	2
13	B24566	Betonarme	7. bölge	Zemin kat	2	1
14	B24333	Betonarme	7. bölge	7. kat	2	2
15	B24229	Betonarme	8. bölge	Zemin kat	1	0
16	B24776	Betonarme	8. bölge	6. kat	2	1
17	B24759	Betonarme	9. bölge	Zemin kat	4	2
18	B24560	Betonarme	9. bölge	7. kat	2	0
19	B24266	Betonarme	10. bölge	Zemin kat	1	0
20	B24774	Betonarme	10. bölge	8. kat	3	1
21	B24292	Betonarme		Muhtarlık	2	0
22	B24552	Betonarme		Aile sağlığı merkezi	14	4
23	B24263	Betonarme		Eczane	2	0
24	B24574	Betonarme		Taksi durağı	8	5

Dedektörlerin hanelere yerleştirilme tarihi ve toplanma tarihi bilgisi ile toplam ölçüm süreleri Tablo 3.2'de verilmiştir. Tüm hanelerde en az 2 ay ölçüm yapılmıştır.

Tablo 3.2. Ölçüm süreleri

Sıra no	Dedektör no	Yerleştirilme tarihi	Toplanma tarihi	Gün sayısı
1	B24584	16.06.2015	16.08.2015	61
2	B24345	16.06.2015	29.08.2015	74
3	B24321	16.06.2015	16.08.2015	61
4	B24766	16.06.2015	16.08.2015	61
5	B24555	16.06.2015	16.08.2015	61
6	B24784	16.06.2015	29.08.2015	74
7	B24591	15.06.2015	16.08.2015	62
8	B24342	15.06.2015	16.08.2015	62
9	B24347	16.06.2015	16.08.2015	61
10	B24301	16.06.2015	16.08.2015	61
11	B24769	15.06.2015	16.08.2015	62
12	B24767	15.06.2015	16.08.2015	62
13	B24566	16.06.2015	16.08.2015	61
14	B24333	16.06.2015	16.08.2015	61
15	B24229	16.06.2015	16.08.2015	61
16	B24776	16.06.2015	16.08.2015	61
17	B24759	16.06.2015	16.08.2015	61
18	B24560	16.06.2015	16.08.2015	61
19	B24266	16.06.2015	29.08.2015	74
20	B24774	17.06.2015	16.08.2015	60
21	B24292	15.06.2015	16.08.2015	62
22	B24552	15.06.2015	16.08.2015	62
23	B24263	16.06.2015	16.08.2015	61
24	B24574	16.06.2015	16.08.2015	61

CR-39 dedektörleri kullanılarak radon konsantrasyonun belirlenmesi, detektördeki plastik plakalar üzerine çarpan alfa parçacıklarının gözle görülmeyen izler bırakması ve bu izlerin kimyasal iz kazıma yöntemi ile büyültülerek mikroskopta sayılması esasına dayanmaktadır. İz sayımlarına poission istatistiğinin uygulanması gerekir. Bu istatistikte hata sayım izlerinin karekökü ile verilir. Eğer A= 51,7 mm^2 alanlı bir bölgedeki sayılmış izlerin sayısı 96 (N=96) ise, o zaman iz yoğunluğu d ($iz.cm^{-2}$) Denklem (3.1) ile verilir:

$$d = \frac{N \pm \sqrt{N}}{51{,}7 \times 10^{-2}} = \frac{96 \pm 9{,}80}{51{,}7 \times 10^{-2}} = 186 \pm 18{,}9\,(iz \times cm^{-2}). \qquad (3.1)$$

CR-39 plakaları üzerindeki ortalama iz sayıları, iz yoğunlukları ($iz.cm^{-2}$) ve kalibrasyon faktörü [$(Bq.m^{-3})/(iz\ yoğunluğu.saat^{-1})$] Tablo 3.3'de gösterilmiştir.

Tablo 3.3. Ölçüm verileri

Sıra no	Ortalama iz sayısı	İz yoğunluğu	İz yoğunluğu/ zaman	Kalibrasyon faktörü
1	79,4	153,5486	0,1049	0,354
2	105,6	204,2158	0,1150	0,354
3	95,6	184,8772	0,1263	0,354
4	129,8	251,0153	0,1715	0,354
5	118,2	228,5825	0,1561	0,354
6	94,2	182,1698	0,1026	0,354
7	96	185,6507	0,1248	0,354
8	85,6	165,5386	0,1112	0,354
9	81,25	157,1263	0,1073	0,354
10	95,4	184,4904	0,1260	0,354
11	79,8	154,3222	0,1037	0,354
12	85	164,3783	0,1105	0,354
13	74,25	143,5892	0,0981	0,354
14	59,2	114,4846	0,0782	0,354
15	94,4	182,5566	0,1247	0,354
16	87,6	169,4063	0,1157	0,354
17	72,2	139,6248	0,0954	0,354
18	91,25	176,4649	0,1205	0,354
19	152	293,9470	0,1655	0,354
20	85,8	165,9254	0,1152	0,354
21	54,6	105,5889	0,0710	0,354
22	85	164,3783	0,1105	0,354
23	83,33	161,1552	0,1101	0,354
24	72,4	140,0116	0,0956	0,354

Bu tabloda gösterilen sayım verileri doğrultusunda Denklem (2.1) kullanılarak radon konsantrasyon değerleri hesaplanmıştır.

Radon ve bozunum ürünleri için maruz kalınan yıllık etkin doz eşdeğeri ise

$$AEDE = C_{Rn} \times F \times EEC \times MF \times 24 \times 365 \quad (3.2)$$

denklemi ile hesaplanır (Qufni et al., 2005). Formüldeki AEDE yıllık etkin doz eşdeğerini ifade eder. C_{Rn}, Bq/m^3 cinsinden ölçülen radon konsantrasyonunudur. F ise radon ile bozunma ürünleri arasındaki denge faktörünü göstermektedir ve bina içi ölçümler için genellikle 0,4 olarak alınır. EEC faktörü, denge eşdeğer konsantrasyonu çarpanını ifade eder ve $9{,}0 \times 10^{-9}$ $(Sv/saat)/(Bq/m^3)$ değerindedir. Meşguliyet faktörü (MF) ise mekanın kullanılma miktarının bir ölçüsüdür ve 0,8 alınmıştır (UNSCEAR, 2000). Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi Sağlık Fiziği Bölümü'nde gerçekleşen sayımlar neticesinde elde edilen radon

konsantrasyon değerleri ve hesaplanan yıllık etkin doz eşdeğerleri Tablo 3.4'de gösterilmiştir.

Tablo 3.4. Yahya Kaptan Mahallesinde ölçülen radon konsantrasyon değerleri ve yıllık etkin doz eşdeğerleri

Sıra no	Dedektör no	Radon konsantrasyonu (Bq/m^3)	AEDE (mSv/y)
1	B24584	37	0,94
2	B24345	41	1,03
3	B24321	45	1,13
4	B24766	61	1,53
5	B24555	55	1,39
6	B24784	36	0,92
7	B24591	44	1,11
8	B24342	39	0,99
9	B24347	38	0,96
10	B24301	45	1,13
11	B24769	41	1,03
12	B24767	39	0,99
13	B24566	35	0,88
14	B24333	28	0,70
15	B24229	44	1,11
16	B24776	41	1,03
17	B24759	34	0,85
18	B24560	43	1,08
19	B24266	59	1,48
20	B24774	37	0,93
21	B24292	26	0,65
22	B24552	39	0,99
23	B24263	39	0,98
24	B24574	34	0,85
Ortalama		41	1,03

Doğal ve yapay radyasyon kaynaklarından maruz kalınan radyasyon dozunun dünya ortalaması 2,7 mSv/yıl'dır. Radon kaynaklı dünya genelinde maruz kalınan ortalama yıllık doz 1,3 mSv dir (TAEK). Yahya Kaptan Mahallesi'nin radon ve bozunum ürünlerinden kaynaklı ortalama yıllık doz 1,03 mSv olarak hesaplanmıştır. Bu değer dünya geleninde radon kaynaklı maruz kalınan doz değerinin yaklaşık 0,79 katıdır. Yahya Kaptan Mahallesi'nde yaşayan insanların bina içi radon konsantrasyonlarına bağlı olarak radon gazından kaynaklı ömür boyu akciğer kanseri hastalığına yakalanma riski

$$ELCR = AEDE \times DL \times RF \quad (3.3)$$

denklemi kullanılarak % 0,41 olarak hesaplanmıştır. Burada ELCR (Excess Lifetime Cancer Risk) ömür boyu kanser riski, AEDE yıllık etkin doz eşdeğeri, DL ortalama yaşam süresi (70 yıl), RF ise ICRP tarafından önerilen Sievert başına ölümcül risk faktörü (0,057 Sv^{-1}) olarak belirtilmiştir (ICRP, 2007).

3.1.2. AlphaGUARD ile yapılan ölçümler

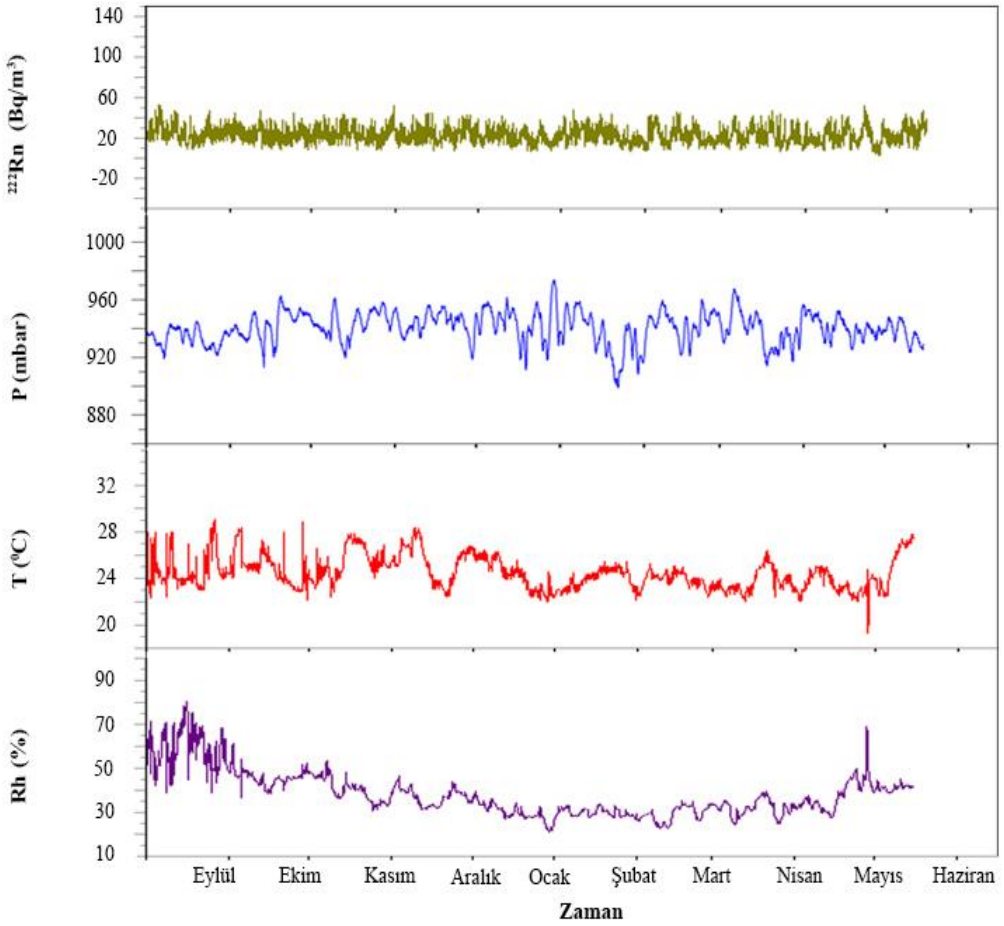
AlphaGUARD radon detektörü kullanılarak Kocaeli Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi nükleer fizik laboratuvarı ve bilgisayar laboratuvarında radon konsantrasyon değerleri hesaplanmıştır. Kocaeli Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi nükleer fizik araştırma laboratuvarında 11 Ağustos 2014 - 25 Mayıs 2015 tarihleri arasında yapılan ölçümler sonucunda elde edilen radon konsantrasyon değerleri Tablo 3.5'de verilmiştir. Ölçümler 288 gün boyunca 1 saat aralıklarla kaydedilmiş ve 6888 veri elde edilmiştir. Ölçüm yapılan yerdeki radon konsantrasyon değerleri 2 ile 53 Bq/m^3 arasında değişmektedir, ortalama radon konsantrasyon değeri ise 23 Bq/m^3 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 3.5. Nükleer fizik araştırma laboratuvarında AlphaGUARD ile yapılan ölçüm değerleri

Ölçüm Değerleri					
Başlangıç: 11.08.2014 11:00 Bitiş: 25.05.2015 12:00					
Rn-222 (Bq/m^3)					
Ortalama	**23**	Maksimum	**53**	Tarih	15.08.2014 08:00
		Minimum	**2**	Tarih	08.05.2015 03:00
Sıcaklık (ºC)					
Ortalama	**24,4**	Maksimum	**29,1**	Tarih	05.09.2014 14:00
		Minimum	**19,3**	Tarih	07.05.2015 23:00
Basınç (mbar)					
Ortalama	**970,1**	Maksimum	**987,0**	Tarih	08.01.2015 21:00
		Minimum	**949,4**	Tarih	01.02.2015 14:00
Bağıl nem (%)					
Ortalama	**38,1**	Maksimum	**80,5**	Tarih	26.08.2014 08:00
		Minimum	**20,9**	Tarih	08.01.2015 20:00

Nükleer fizik araştırma laboratuvarında AlphaGUARD ile 11.08.2014 - 25.05.2015 tarihleri arasında yapılan ölçümler sonucunda zamana bağlı olarak elde edilen radon

konsantrasyonu (Bq/m^3), sıcaklık (^{o}C), basınç (mbar) ve bağıl nem (%) değerleri Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



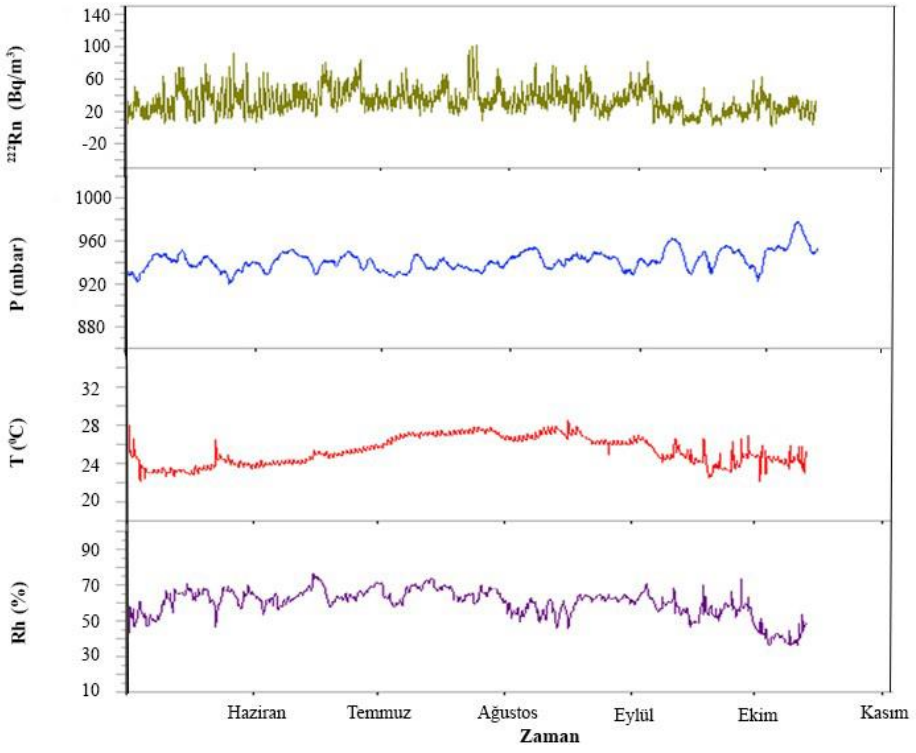
Şekil 3.1. AlphaGUARD ile 11.08.2014 - 25.05.2015 tarihleri arasında nükleer fizik laboratuvarında elde edilen ölçüm değerleri

Kocaeli Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi bilgisayar laboratuvarında 25 Mayıs 2015 - 06 Kasım 2015 tarihleri arasında yapılan ölçümler sonucunda elde edilen radon konsantrasyon değerleri Tablo 3.6'de verilmiştir. Ölçümler 165 gün boyunca 1 saat aralıklarla kaydedilmiş ve 3961 veri elde edilmiştir. Ölçüm yapılan yerdeki radon konsantrasyon değerleri 2 ile 102 Bq/m^3 arasında değişmektedir, ortalama radon konsantrasyon değeri ise 33 Bq/m^3'tür.

Tablo 3.6. Bilgisayar laboratuvarında AlphaGuard ile yapılan ölçüm değerleri

Ölçüm değerleri					
Başlangıç: 25.05.2015 11:00 Bitiş: 06.11.2015 11:00					
Rn-222 (Bq/m^3)					
Ortalama	**33**	Maksimum	**102**	Tarih	17.08.2015 04:00
		Minimum	**2**	Tarih	26.10.2015 18:00
Sıcaklık (°C)					
Ortalama	**25,3**	Maksimum	**28,5**	Tarih	09.09.2015 15:00
		Minimum	**22,1**	Tarih	26.10.2015 10:00
Basınç (mbar)					
Ortalama	**970,8**	Maksimum	**989,1**	Tarih	01.11.2015 13:00
		Minimum	**959,8**	Tarih	18.06.2015 17:00
Bağıl nem (%)					
Ortalama	**59,9**	Maksimum	**76,5**	Tarih	09.07.2015 13:00
		Minimum	**36,0**	Tarih	04.11.2015 11:00

Bilgisayar laboratuvarında AlphaGUARD ile 25.05.2015 - 06.11.2015 tarihleri arasında yapılan ölçümler sonucunda zamana bağlı olarak elde edilen radon konsantrasyonu (Bq/m^3), sıcaklık (°C), basınç (mbar) ve bağıl nem (%) değerleri Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. AlphaGUARD ile 25.05.2015 - 06.11.2015 tarihleri arasında bilgisayar laboratuvarında elde edilen ölçüm değerleri

3.2. Tartışma ve Yorum

Ne kadar dikkat edilirse edilsin doğal radyasyondan tamamen kaçmak mümkün değildir. Ancak çeşitli önlemler alınarak bu tehlike azaltılabilir. İnsanlar zamanlarının büyük kısmını kapalı ortamlarda geçirdikleri için radon ve bozunma ürünlerinin solunması ciddi sağlık problemlerine yol açabildiğinden, kapalı ortamlarda radonun tespiti ve yoğunluğunun belirlenmesi önem arzetmektedir. Radonun ana kaynağı uranyumdur. Bu nedenle radon konsantrasyonu yerkabuğu üzerinde bölgeden bölgeye farklılıklar gösterir. Kapalı ortamlarda radon gazı konsantrasyonunun kontrolü amacıyla limit değerler belirlenmiştir (Tablo 3.7 ve 3.8). Söz konusu limit değerlerin aşılması halinde, radon konsantrasyonunu düşürücü tedbirlerin alınması tavsiye edilmektedir. Tablo 3.7 ve Tablo 3.8'de çeşitli ülkeler ve uluslararası kuruluşlar tarafından benimsenen kapalı ortamlar için müsaade edilebilir radon konsantrasyonları ve evlerde ölçülen ortalama radon konsantrasyonu Bq/m^3 cinsinden verilmektedir.

Tablo 3.7. Radon konsantrasyon limitleri (Bq/m^3), (Yücel ve Arıkan, 2006)

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

*Avrupa Birliği, **Uluslararası Radyasyondan Korunma Komitesi, ***Dünya Sağlık Örgütü

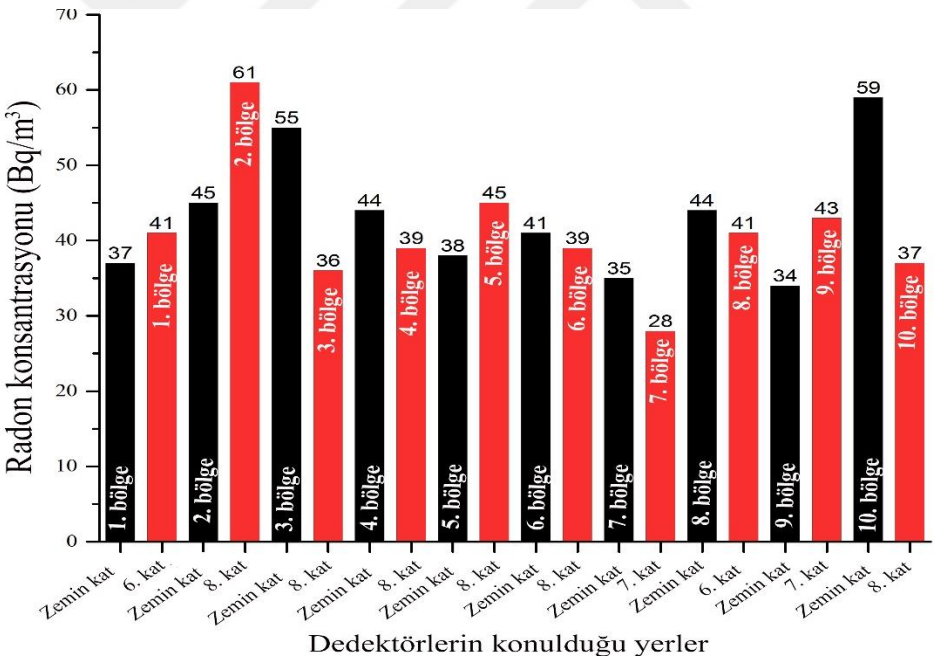
Tablo 3.8. Evlerde ölçülen ortalama radon konsantrasyonu (Bq/m^3), (Yücel ve Arıkan, 2006)

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

Yapılardaki hava basıncı özel bir durum yoksa dışarıdaki hava basıncından küçüktür. Bu sebeple kapalı ortamdaki hava yapı içerisinde kalma eğilimi gösterir. Radon gazı

havadan yaklaşık 7,5 kat ağırdır ve kapalı ortamlarda radon genelde yerden 50 cm mesafede kalma eğilimindedir. Bununla birlikte binaların üst katlarındaki radon yoğunlukları, zemin katlardakinden daha düşük olmaktadır (Durrani ve Iliç, 1997). Ölçüm olmaksızın evlerde radon değerinin tahmini mümkün değildir.

Yapılan bu çalışmada Kocaeli ili Yahya Kaptan Mahallesi'nde ortalama radon gazı konsantrasyonu 41 Bq/m^3 olarak hesaplandı. Hesaplanan bu değer ICRP, WHO ve TAEK tarafından belirlenen limitlerin altındadır (Tablo 3.7). Radon gazı topraktan atmosfere doğru yayıldığı için bulunduğu ortamın zemininde birikir. Radon konsantrasyonu kat sayısı ile ters orantılıdır. Bu nedenle alt katlardaki radon yoğunluğunun üst katlara kıyasla yüksek çıkması beklenmektedir. Ölçüm sonuçları bunu doğrularken bazı bölgelerdeki evlerde beklenenden farklı sonuçlar ortaya çıkmıştır (Şekil 3.3). Bu bölgelerde alt katlardaki radon değerlerinin üst katlardakine göre daha az çıkmasının nedeni havalandırma ile ilişkilendirilebilir.



Şekil 3.3. Yahya Kaptan Mahallesi'nde bölgelere göre radon konsantrasyon değerleri

Kocaeli Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi nükleer fizik laboratuvarında yapılan ölçümlerde ortalama radon konsantrasyonu 23 Bq/m^3 olarak hesaplandı. Bilgisayar laboratuvarında yapılan ölçümlerde ise ortalama radon konsantrasyonu 33 Bq/m^3 olarak bulundu. Bilgisayar laboratuvarı fakülte binasının zemin katında iken, nükleer fizik laboratuvarı ise aynı binanın 2. katındadır. Dolayısıyla AlphaGUARD ile

yapılan ölçümler alt katlarda radon yoğunluğunun daha fazla olduğu sonucunu doğrulamaktadır.

Kocaeli ili İzmit ilçesi Yahya Kaptan Mahallesindeki evlerde radon konsantrasyon seviyeleri belirlendiği bu çalışma bu bölgede radonla ilgili yapılabilecek daha kapsamlı çalışmalara örnek teşkil edebilir.

Bu tür çalışmalar ile radon ve tehlikeleri konusunda toplumun duyarlılığı artırılmalıdır. Ülke genelinde radon ölçümü yapılabilen merkezlerin sayısı artırılmalıdır. Ulusal veya bölgesel çalışmalarla veri eksikliği veya yetersizliği olan bölgelerde benzer ölçümler yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

Akdoğan Ç., Radon Kirliliği ve Halk Sağlığı İlişkisi, Bitirme Tezi, Ege Üniversitesi, Tıp Fakültesi, İzmir, 2010.

Akkurt A., Afyon Jeotermal Sularında Radon (RN-222) Aktivitesi Tayini, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar, 2006, 181391.

Akyıldırım H., Isparta İli'nde Radon Yoğunluğunun Ölçülmesi ve Haritalandırılması, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2005, 197323.

BEIR, *Health Effects of Exposure to Radon: BEIR VI*, 1st ed., National Academic Press, USA, 1993.

Botkin D., Keller E., *Environmental Science: Earth as a Living Planet*, John Willey Sons, USA, 1988.

Camgöz Y. I., Yaprak G., Küçük Menderes Havzası Tarım Topraklarında Doğal Radyonüklit Seviyesinin Belirlenmesi, *Ekoloji*, 2009, **18**(70), 74-80.

Can B., Kilis İlindeki Evlerde Radon Gazı Ölçümü, Yüksek Lisans Tezi, Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kilis, 2009, 287536.

Canbazoğlu C., Elazığ Yöresinde Doğal Radyoaktivite Tayini, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2004, 150093.

Cigna A. A., Radon in Caves, *International Journal of Speleology*, 2005, **35**(2), 93-101.

Cothern C., Smith J., *Environmental Radon*, 3rd ed., Plenum Press, New York, 1987.

Çelebi N., Konutlarda Radon Konsantrasyon Değerlerinin Yapı Biyolojisi Açısından İncelenme, *VIII. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi,* İzmir, 25-28 Ekim 2007.

Çelebi N., Türkiye'de Radon Ölçümleri, *Uluslararası Katılımlı Tıbbi Jeoloji Sempozyumu*, Ankara, 6-9 Şubat 2008.

Davutoğlu H., Radon Gazını Ölçme Metotları, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, 2008, 178748.

Değerlier M., Adana İli Ve Çevresinin Çevresel Doğal Radyoaktivitesinin Saptanması ve Doğal Radyasyonların Yıllık Etkin Doz Eşdeğerinin Bulunması, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 2007, 212520.

Denman A. R., Timson K., Shield G. et al., Local Health Campaigns To Reduce Lung Cancers Induced By Radon And Smoking - Who Responds?, *Health Policy*, DOI: 10.1016/j.healthpol.2009.07.011.

Durrani S. A., Bull R. K., *Solid State Nuclear Track Detection: Principles, Methods and Applications*, 1st ed., Pergamon Press, Oxford, 1987.

Durrani S. A., Ilic R., *Radon Measurements by Etched Track Detectors: Applications in Radiation Protection, Earth Sciences and The Environment*, World Scientific Publ. Co. Ltd., London, 1997.

EPA, *Radon Reduction Methods, a Home Owners Guide, US Environmental Protection Agency Report*, 1st ed., Environmental Protection Agency Publications, USA, 1986.

George A., World History of Radon Research and Measurement From the Early 1900‟s to Today, *The natural radiation environment: 8th International Symposium (NRE VIII) AIP Conference*, Brazil, 7-12 October 2007.

Gilmore G. R., *Practical Gamma-Ray Spectrometry*, 2nd ed., John Wiley and Sons, New York, 2008.

Güler Ç., Çobanoğlu Z., *Radon Kirliliği*, 1. Baskı, Aydoğdu Ofset Basımevi, Ankara, 1997.

ICRP, *Protection Against ^{222}Rn at Home and at Work*, 1st ed., ICRP Publication, Canada, 1993.

ICRP, *The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*, 1st ed., ICRP Publication, Canada, 2007.

IEAE, *Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material*, 1st ed., IAEA Publications, Austria, 1996.

Iliadis C., *Nuclear Physics In Stars*, 1st ed., Wiley-VCH, Germany, 2007.

Khan H. A., Qureshi I. E. and Tufail M., Passive Dosimetry of Radon and Its Daughters Using Solid State Nuclear Track Detectors (SSNTDs), *Radiat. Prot. Dosim.*, 1993, **46**(3), 149-170.

Knoll G. F., *Radiation Detection and Measurements*, 3rd ed., Jhon Wiley & Sons, New York, 2000.

Korkulu Z., Kocaeli İli Karadeniz Sahil Kumlarının Doğal Radyoaktivite Seviyelerinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2009, 275781.

Köksal E. M., Çelebi N., Ataksor B., Uluğ A., Taşdelen M., Kopuz G., Akar B. and Karabulut M. T., A Survey of ^{222}Rn Concentrations in Dwellings of Turkey. *J Radioanal Nucl Chem*, 2004, **259**(2), 213-216.

Krane K. S., *Nükleer Fizik I,* 2. Baskı, Palme Yayıncılık, Ankara, 2001.

Kulalı F., Topraktaki Radon Konsantrasyonu Ölçümü ve Deprem İlişkisinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2009, 237318.

Kuru S., Radon Kirliliği ve Halk Sağlığı İlişkisi, Bitirme Tezi, Ege Üniversitesi, Diş Hekimliği Fakültesi, 2003.

Makofske W. J., Edelstein M. R., *Radon and Environment,* Noyes Publications, USA, 1998.

Martinelli G., Fluidodynamical and Chemical Features of Radon 222 Related to Total Gases: Implications Foe Earthquake Predictions, Proceedings of An Advisory Group Meeting on Isotopic and Geochemical Precursors of Earthquakes and Volcanic Eruptions, *International Atomic Energy Agency*, Vienna, 9-12 Semtember 1991.

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

Oufni L., Misdaq M. A., Amrane M., Radon Level and Radon Effective Dose Rate Determination in Moroccan Dwellings Using SSNTDs, *Radiat. Meas.*, 2005, **40**(1), 118-123.

Saç M. M., Camgöz B., İzmir'de Sismik Aktiviteler ile Radon Konsantrasyonları Arasındaki Korelasyonun İncelenmesi, *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi,* 2005, **7**(3), 47-54.

Schubert M., Schmidt A., Müller K., Weiss H., Using Radon-222 as Indicator for the Evaluation of the Efficiency of Groundwater Remediation by in Situ Air Sparging, *J Environ Radioact*, 2011, **102**(2), 193-199.

Serway ve Beichner, *Fen ve Mühendislik İçin Fizik,* 5. Baskı, Palme Yayıncılık, Ankara, 2000.

Şeker S., Çerezci O., *Çevremizdeki Radyasyon ve Korunma Yöntemleri,* 1. Basım, Boğaziçi Üniversitesi Yayınları, İstanbul, 1997.

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, *Nükleer Güç Santralleri ve Türkiye*, 1. Baskı, Anıl Matbacılık, Ankara, 2013.

T.C. Sağlık Bakanlığı Türkiye Halk Sağlığı Kurumu, *Çok Paydaşlı Sağlık Sorumluluğunu Geliştirme Programı 2013-2023*, 1. Baskı, Nükleer Enerji Proje Uygulama Daire Başkanlığı Basımevi, Ankara, 2014.

Taylor J. R., Zafaritos C. D., *Fizik ve Mühendislikte Modern Fizik,* 2. Baskı, Arte Güven Yayınları, İstanbul, 1996.

Thomas D. C., Mcneill K. G., Dougherty C., Estimates of Life-Time Lung Cancer Risks Resulting from Rn Progeny Exposure, *Health Physics*, 1985, **49**(5), 825-846.

Tüysüz M. Z., Yorulmaz N., Bozkurt A., Co-60 Radyoterapi Kaynağı İçin Monte Carlo Yöntemiyle Uygun Zırh Tasarımı, *Türk Fizik Derneği 22. Fizik Kongresi*, Bodrum, 14-17 Ekim 2004.

Uluğ A., Kılıç D., Çelebi N., Batı Anadolu Fay Hattında Yer Alan Burdur İlinin Ev İçi Radon Ölçümleri, *Türk Fizik Derneği 22. Fizik Kongresi*, Bodrum, 14-17 Ekim 2004.

UNSCEAR, *Sources and Effects of Ionizing Radiation 2008 Report to the General Assembly with Annex B: Exposure from Natural Source of Radiation*, 1st ed., United Nations Sales Publication, New York, 2008.

UNSCEAR, *Sources and Effects of Ionizing Radiation 1993 Report to General Assembly with Annexes,* 1st ed., United Nations Sales Publication, New York, 1993.

UNSCEAR, *Sources and Effects of Ionizing Radiation 1998 Report to General Assembly with Annex A,* 1st ed., United Nations Sales Publication, New York, 1998.

UNSCEAR, *Sources and Effects of Ionizing Radiation*, 2nd ed., United Nations Sales Publication, New York, 2000.

URL-1: http://cevre.beun.edu.tr/dersnotu/Fiz341/fiz341cevreselradyoaktivite.pdf, (Ziyaret tarihi: 10 Şubat 2015).

URL-2: http://www.radosys.com/radon%20-%20page%201.htm, (Ziyaret tarihi: 20 Mayıs 2015).

URL-3: http://www.gseenergy.com/icerik/43-Toprakta_Radon__Toron_olcumu, (Ziyaret tarihi: 09.02.2016).

URL-4: http://www.adnanisgor.com/fizikvetip2konu.html, (Ziyaret tarihi: 07.03.2016).

URL-5: NUDAT, http://www.nndc.bnl.gov/nudat2, (Ziyaret tarihi: 15 Nisan 2015).

URL-6: https://www.epa.gov/radon, (Ziyaret tarihi: 15 Nisan 2015).

URL-7: http://www.nukte.org/node/157, (Ziyaret tarihi: 19 Nisan 2015).

Vaizoğlu S. A., Güler Ç., Indoor Radon Concentrations in Ankara Dwellings, *Indoor and Built Environment,* 1999, **8**(5), 327-331.

Yaprak G., Uranyum Keşfi için Katı Hal İz Kazıma Dedektörleri ile Toprak Gazı Radon Ölçümü ve Fiziksel Parametrelerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Nükleer Bilimler Enstitüsü, İzmir, 1988, 2820.

Yarar Y., Günaydi T., Celebi N., Determination of Radon Concentrations of the Dikili Geothermal Area in Western Turkey, *Rad. Prot. Dos.*, 2006, **118**(1), 78- 81.

Yılmaz A., Bazı İyonların Nükleer Malzemeler Üzerine Bombardımanı Sonucu Yaptığı Etkilerin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Muş Alparslan Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Muş, 2014, 350312.

Yücel B., Arıkan İ. H., Binalarda Radon ve Sağlık Etkileri, *TMMOB Fizik Mühendisleri Odası Bülteni*, 2001, **531**(1), 16-9.

Zeeb H., Shannoun F., *WHO Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective*, 1st edition, WHO Library Cataloguing-in-Publication, France, 2009.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Karatay K., Özkan N., Güray R. T., Yalçın C., Determination of Radon Concentration at Yahya Kaptan District In Kocaeli, *9th International Physics Conference of the Balkan Physical Union*, Istanbul, 24-27 August 2015.

Özkan N., Aksan S., Altınpınar A., Arslanbaş D., Demir A., Ergül H. A., Güray R. T., Kaçar E., Karademir A., **Karatay K.,** Öztoprak B. G., Pekey B., Sağdınç S., Türküm A., Yalçın C., Yaşayan ve Yaşatan Bir Kocaeli İçin Çevresel Durum Analizi, *Santek 2016 Tüyap 3. Doğu Marmara Sanayi ve Teknoloji Fuarı*, Kocaeli, 26-29 Mayıs 2016.

ÖZGEÇMİŞ

1988 yılında İstanbul'un Üsküdar ilçesinde doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini İstanbul'da tamamladı. 2007 yılında Pamukkale Üniversitesi Fizik bölümüne başladı. 2009 yılında Kocaeli Üniversitesi Fizik bölümüne geçiş yaptı ve 2012 yılında mezun oldu. 2013 yılında başladığı Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı'ndaki Yüksek Lisans eğitimine devam etmektedir.