T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YAPIM AŞAMASINDAKİ METRO TÜNELLERİNDE RADON GAZ DAĞILIMININ BELİRLENMESİ

Mert ÇALLIOĞLU

DANIŞMAN
Prof. Dr. Ahmet Erdal OSMANLIOĞLU

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Maden Mühendisliği Programı

İSTANBUL-2022

ÖNSÖZ

Yüksek linsans eğitimim ve tez hazırlık sürecimde her konuda anlayışı ve desteğiyle yardımcı olan başta tez danışmanım Prof. Dr. Ahmet Erdal OSMANLIOĞLU'na, desteklerini ve fikirlerini benden esirgemeyen Doç. Dr. Ümit ÖZER'e, Araş. Gör. Dr. Meriç Can ÖZYURT'a ve Araş. Gör. Dr. Mert TERZİ'ye, bölüm başkanımız Prof. Dr. İlgin KURŞUN ÜNVER'e ve İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü çalışanlarının tümüne teşekkürü bir borç bilirim.

Deneysel çalışmalar sırasında sundukları imkanlar ve destekleriyle başta Gurur KALAYCI, Yasin KAHRAMAN, Murat ŞEKER olmak üzere tüm Doğuş İnşaat çalışanlarına ve saha desteklerini esirgemeyen tüm Soner Temel çalışanlarına teşekkür ederim.

Eğitim öğretim ve çalışma hayatım gibi yaşamın her anında, tüm süreçlerde her kararımın arkasında duran ve benden desteklerin asla esirgemeyen sevgili aileme sonsuz teşekkür ederim.

Şubat 2022 Mert ÇALLIOĞLU

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ ..... **iv**
İÇİNDEKİLER ..... **v**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **vii**
TABLO LİSTESİ ..... **ix**
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ ..... **x**
ÖZET ..... **xiii**
SUMMARY ..... **xiv**
1. GİRİŞ **1**
2. RADYOAKTİVİTE VE RADON **3**
2.1 RADYOAKTİVİTE 3
2.1.1 Radyoaktif Bozunum Türleri 4
2.1.2 Radyoaktif Bozunum Serileri 5
2.2 RADYASYON 7
2.2.1 İyonlaştırıcı Radyasyon 8
2.2.2 İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyon 10
2.2.3 Radyasyon Dozları ve Birimleri 11
2.2.4 Radyasyon Kaynakları 13
2.2.4.1 Yapay Radyasyon Kaynakları *14*
2.2.4.2 Doğal radyasyon kaynakları *15*
2.3 RADON 17
2.3.1 Radon Bozum Ürünlerinin Özellikleri ve Davranışları 19
2.3.2 Radon Yayılım Yolları 20
2.3.3 Çevresel Radon Kaynakları ve Kapalı Ortam Radon Konsantrasyonları Sınır Değerleri 25
2.3.4 Radonun Sağlık Üzerine Etkileri ve Madencilik Faaliyetlerinde Radon 29
2.3.4.1 Madencilik faaliyetlerinde radon *30*
2.4 RADON ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ 30
2.4.1 Katı Hal Nükleer İzleme Dedektörleri 32
2.4.2 Alfa Kartı 33
2.4.3 Elektret Dedektörleri 34

2.4.4 Aktifleştirilmiş Odun Kömürü 35
2.4.5 Termolüminesan Dedektörler 35
2.4.6 Katı hal bariyer dedektörleri (alfa spektrometresi) 35
2.4.7 Aktif Karbon Dedektörleri 36
2.4.8 Lucas Hücreleri 36
2.4.9 Markov Yöntemi 37
2.4.10 Havada Radon Ölçümü İçin Örnekleme Yöntemleri 37
2.4.10.1 Sintilasyon hücresi 37
2.4.10.2 İyonlaşma odaları 38
2.4.10.3 İki filtreli yöntem 39
2.4.11 Havada Radon Ölçümü İçin Entegre Örnekleme Yöntemleri 39
2.4.11.1 Difüzyon örneklemeli entegre radon ölçümü 40
2.4.11.2 Akış örneklemeli entegre radon ölçümü 40
2.4.12 Zaman Entegreli Radon Ölçümü 40
2.4.13 Toprakta Radon Ölçümleri 40
2.4.13.1 Track-etch yöntemi 41
2.4.13.2 Radon emanometresi 41
2.4.13.3 Silikon difüzyonlu bağlantı detektörü 41
3. MALZEME VE YÖNTEM 43
3.1 ÇALIŞMA SAHASI 43
3.1.1 Meclis Mahallesi İstasyonu 44
3.1.2 Sarıgazi İstasyonu 46
3.1.3 Havalandırma Sistemi 48
3.2 ÖLÇÜM YÖNTEMİ 51
3.2.1 Deneysel Çalışmalar 54
4. BULGULAR 58
5. TARTIŞMA VE SONUÇ 65
KAYNAKLAR 69
ÖZGEÇMİŞ 75

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1: Kararlılık Kuşağı (N/Z oranına göre nükleer kararlılığı belirtir, çizgi N=Z durumunu gösterir)

Şekil 2.2: Uranyum-radyum, toryum ve aktinyum bozunma serileri (Dikey oklar alfa bozunmasını, çapraz oklar beta bozunmasını gösterir)

Şekil 2.3: İyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon

Şekil 2.4: Elektromanyetik spectrum

Şekil 2.5: Radyasyon kaynakları

Şekil 0.6: Yapay radyasyon kaynakları

Şekil 0.7: Doğal radyasyon kaynakları

Şekil 2.8: Radon bozunum zinciri

Şekil 2.9: Radon gazının yayılma mekanizması

Şekil 2.10: Bir kayanın (veya toprağın) taneciklerinin içinde radonun uzaklaşan yörüngelerinin şematik gösterimi (Radon atomlarının geri tepmesi (R) ile geçilebilecek maksimum mesafe, noktalı çizgi ile gösterilir)

Şekil 2.11: Radon kaynakları

Şekil 2.12: Radyumun (226Ra) yüzey toprağında aktivite derişimi (Türkiye)

Şekil 2.13 Türkiye radon konsantrasyonu dağılım haritası (2014)

Şekil 2.14: Radon ölçüm yöntemleri

Şekil 2.15: Selüloz nitrat (Lr-115)

Şekil 2.16: Alil diglikol karbonat (CR39)

Şekil 2.17: Elekteret ve elekteret okuyucu

Şekil 2.18: Lucas hücresi şematik gösterimi

Şekil 2.19: Sintilasyon hücresi

Şekil 2.20: İyonlaşma odası şematik gösterimi

Şekil 3.1: Çekmeköy Sancaktepe Sultanbeyli metrosu ve Hastane Taşdelen Yenidoğan metrosu

Şekil 3.2: Meclis Mahallesi İstasyonu ve Sarıgazi İstasyonu

Şekil 3.3: Meclis Mahallesi istasyonu kazı işler

Şekil 3.4: Sarıgazi İstasyonu kazı işleri

Şekil 3.5: Standart radyal fan

Şekil 3.6: Rad 7 normal konfigürasyonu (saha ölçümlerine uygun ekipman)

Şekil 3.7: Rad 7 ölçüm cihazı

Şekil 3.8: Meclis Mahallesi istasyonu ölçüm noktaları

Şekil 3.9: Sarıgazi istasyonu B tüneli ölçüm noktaları

Şekil 3.10: Sarıgazi istasyonu A tüneli ölçüm noktaları

Şekil 3.11: Meclis Mahallesi İstasyonu (S01 Hat 1 ve Hat 2) ölçüm sonuçları

Şekil 3.12: Sarıgazi İstasyonu B tüneli (S02 B) ölçüm sonuçları

Şekil 3.13: Sarıgazi İstasyonu A tüneli (S02 A H3) ölçüm sonuçları

Şekil 3.14: Sarıgazi İstasyonu A tüneli (S02 A ulaşım tüneli ve H4) ölçüm sonuçları

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1: İyonizan radyasyonlar ve özellikleri

Tablo 2.2: Kalite Faktörü

Tablo2.3: Radyasyon sınır dozları

Tablo 2.4: Radyasyon kayaklarının yıllık ortalama dozları

Tablo 2.5: Radon izotoplarının nükleer özellikleri

Tablo 2.6: Radon 222'nin fiziksel ve kimyasal özellikleri

Tablo 2.7 Radon ve bozunum ürünlerinin özellikleri

Tablo 2.8: Radon konsantrasyon limitleri (Bq.m-3)

Tablo 2.9: Kapalı ortamlarda ortalama radon konsantrasyonu (Bq.m-3)

Tablo 2.10: Radon ölçüm ve dedeksiyon yöntemleri

Tablo 3.1: Gamak GM2E 280 S 4 model elektrik motoru özellikleri

Tablo 3.2: Koklama (sniff) protokolü

Tablo 3.3: Kayıt numarasına göre ölçüm istasyonları ve koordinatları

Tablo 3.4: Radon konsantrasyonu ölçüm sonuçlar

Tablo 5.1: M5 Metro istasyonları peron ölçüm sonuçları

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
ppm	: Milyonda bir, mikro
N	: Nötron sayısı
Z	: Proton sayısı
α	: Alfa
β	: Beta
γ	: Gama
MeV	**:** Megaelectron Volt
nm	**:** Nanometre
Cm	: Santimetre
Ci	: Curie
Bq	: Becquerel
Atm	: Atmosferik basınç
Kg	: Kilogram
SI	: Uluslararası ölçü birimleri
C	: Couloumb
R	: Röntgen
Gy	: Gray
J	: Joule
Sv	: Sievert
Rem	: İnsana etki eden ışıma birimi
°C	: Selsiyus
°K	: Kelvin
S	: Saniye
µm	: Mikrometre
Zns	: Çinko süifit
Ag	: Gümüş
Lr 115	: Selüloz nitrat filmler
Cr 39	: Alil diglikol karbonat
h	**:** saat
kW	**:** Kilowatt

d : Devir

Km : Kilometre

ms : Milisaniye

V : Volt

Ra : Radyum

Rn : Radon

U **:** Uranyum

Th **:** Toryum

Pb : Kurşun

NaOH : Sodyum hidroksit

KOH : Potasyum hidroksit

Kısaltmalar	**Açıklama**
RBE	: Kalite Faktörü
ICPR	: Uluslararası Radyolojik Koruma Komisyonu
TBM	: Tünel Sondaj Makinası
NATM	: Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu
Dpk	: Alt – Orta Devoniyen yaşlı Pendik formasyonu Kartal Üyesi
Tsd	: Sultanbeyli Formasyonu Dudullu Üyesi
Sdpsğ	: Üst Silüriyen – Alt Devoniyen yaşlı Pelitli Formasyonu Soğanlık Üyesi
TCR	: Karot yüzdesi
RQD	: Kaya kalite değeri
Pln	: Pressiyometre limit basıncı
Ep	: Pressiyometre modülü
qu	: Tek eksenkli basınç dayanımı
γn	: Birim hacim ağırlık
SPT	: Standart penetrasyon deneyi
Wn	: Su içeriği
LL	: Likit limit
PI	: Plastisite indeksi
AB	: Avrupa Birliği
WHO	: Dünya sağlık örgütü
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
İBB	: İstanbul Büyükşehir Belediyesi

YEDE	: Yıllık Etkin Doz Eşdeğeri
RAC	: Ölçülen radon konsantrasyonu
Df	: Radonun dengeye ulaşma faktörü
DDF	: Doz dönüştürme faktörü
MF	: Meşguliyet Faktörü, tünel içinde bulunma süresi
WLM	:Aylık Çalışma Dozu (Working Level Month)

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YAPIM AŞAMASINDAKİ METRO TÜNELLERİNDE RADON GAZ DAĞILIMININ BELİRLENMESİ

Mert ÇALLIOĞLU

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Prof. Dr. Ahmet Erdal OSMANLIOĞLU

İnşa halindeki metro tünellerinde insan sağlığı açısından zararlı olup, uluslararası sağlık kuruluşları tarafınca kanserojen madde ilan edilen radyoaktif radon gazı düzeyinin belirlenerek tünel içerisindeki dağılımının ortaya çıkarılması amaçlanmıştır. Radon gazının kaynağı yer kabuğunda bulunan uranyumdur. Radon ölçümlerinde özellikle yapım aşamasındaki yeraltı yapılarında açığa çıktığı bilinmektedir. Bu çalışmada henüz daha yapım aşamasında olan bir metro tünelinde ölçüm yapılarak radon konsantrasyonunun yoğun olduğu aşamadaki düzeyler belirlenmiştir ve bu değerler uluslar arası sınır değerlerle karşılaştırılmıştır. Bu aşamada radon ölçümü ilk defa yapılmış olup yeraltı metro tünelinin yapımı sırasında çalışanların radona maruz kalma düzeyleri belirlenmiştir. Bu açıdan çalışma gelecekte yapılacak olan benzer çalışma ortamlarında radon gazı konsantrasyonuna maruz kalmayı önleme çalışmaları için bir referans olacaktır.

Şubat 2022, 90 sayfa.

Anahtar kelimeler: Radyasyon, radyoaktivite, radon yayılımı, tünel kazılarında radon ölçümleri, Rad7, çevresel sürdürülebilirlik

SUMMARY

M.Sc. THESIS

DETERMINATION OF RADON GAS DISTRIBUTION SUBWAY TUNNELS UNDER CONSTRUCTION

Mert ÇALLIOĞLU

Istanbul University-Cerrahpasa

Institute of Graduate Studies

Department of Mining Engineering

Supervisor : Prof. Dr. Ahmet Erdal OSMANLIOĞLU

This study aims to determine the level of radioactive radon gas and to reveal its distribution in a tunnel. Radon is harmful to human health in the subway tunnels under construction and declared as a carcinogen by international health institutions. The source of radon gas is uranium in the Earth's crust. It is known that radon is found in varying amounts, especially in underground structures under construction. In this study, radon gas concentration levels in regions where radon concentration is likely to be intense will be determined by measuring in a subway tunnel that is still under construction and these values will be compared with international limit values. In this stage, radon measurements will be taken for the first time and the radon exposure levels of employees will be determined during the construction of the underground subway tunnel. In this respect, the study will be a reference for future studies to prevent exposure to radon gas concentration in similar working environments.

February 2022, 90 pages.

Keywords: Radiation, radioactivity, emanation and exhalation of radon, radon measurement in tunnel excavation, Rad7, environmentels sustainability

1. GİRİŞ

Radon gazı Radyumdan, Radyum da Uranyum ve Toryumdan oluşan elementlerdir. Radon kokusuz, tatsız, renksiz ve insanlar tarafından algılanması mümkün olmayan bir gazdır. Radonun tespitine yönelik çalışmalar hızla devam etmektedir. Evlerde Radon miktarlarının belirlenmesine yönelik çalışmalar yapılırken son yıllarda tünel, mağara, metro ve yer altında bulunan çalışma alanlarında Radon değerlerinin belirlenmesine yönelik çalışmalara da büyük önem verilmektedir. Radon gazının akciğer kanseri sebepleri arasında büyük bir rol oynadığı bilinmektedir. Bu sebeple yaşadığımız ortamlardaki Radon seviyelerin bilinmesi gerekmektedir[1,2].

Radon nerede bulunursa bulunsun temelde kaynağı yer kabuğudur. Uranyum ve toryum yer kabuğunu meydana getiren kayaçlarda ve toprakta çok yaygın olarak bulunmaktadır. Yapılan araştırmalar metamorfik ve volkanik kayaçların radyoaktif madde içeriğinin tortul kayaçlardan fazla olduğunu göstermiştir. Uranyum yer kabuğunda 2 ppm ile 4 ppm arasında çok miktarda bulunur. Kayaçlarda bulunan bu uranyumun bozunması sonucunda zincirin bir parçası olan radyum difüzyona uğrayarak daha üst katmanlardaki toprağa karışır. Uzun ömürlü olan radyum da toprak içinde sürekli bozunup Radon 222 atomlarının toprak parçacıkları ve mineralleri arasında serbest kalmasını sağlar. Topraktaki ve havaya sızan radon gazı miktarı toprak özelliklerine ve basınca bağlıdır. Radon gazı bir ortama yığın etkisi denilen bir etki sonucu dağılır. Sıcaklık, basınç farklılıkları, nem gibi faktörler bu kaçışı hızlandırmaktadır. Sıcaklıklar arasındaki farkın fazla olması hava akımlarını güçlendireceğinden radon kaçışı fazla olur. Dış basıncın iç basınca göre büyük olması, yine hava akımları yönünden daha etkilidir ve radonun kapalı ortama dağılmasını hızlandırır. Radon ürünlerinin kapalı bir bölgedeki yoğunluğu, havadaki parçacıklara ve havanın hareketine bağlıdır [3,4].

Radon konsantrasyonları ölçüm teknikleri, gelişmiş ve gelişmekte olan çeşitli cihazlarla ve aktif veya pasif olmak üzere iki şekilde gerçekleştirilir;

Aktif ölçüm tekniğinde, anlık radon ölçümleri yapılmaktadır. Bunun için radon konsantrasyonu belirlenecek yerden hava numunesi alınmakta ve numune içinde bulunan radyasyon miktarı bir radyasyon sayıcısı ile sayılarak radon konsantrasyonu hesaplanmaktadır. İyon odaları,

sintilasyon hücresi, elektrostatik toplayıcılar ve filtreler aktif radon ölçümlerinde kullanılan aletlere örnek olarak verilebilir.

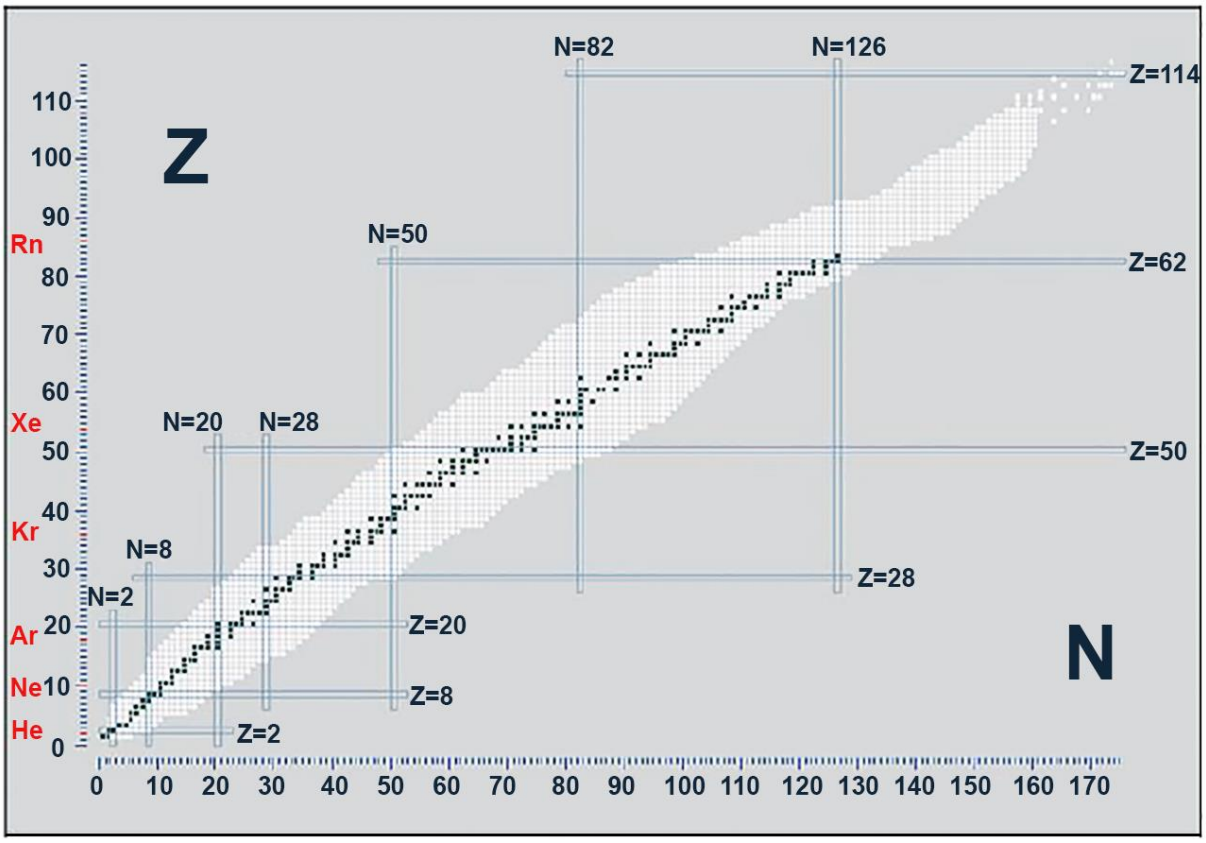
Pasif ölçüm tekniğinde ise nükleer iz dedektörleri kullanılarak uzun süreli entegre radon ölçümleri yapılmaktadır. Nükleer iz dedektörleri ile radon konsantrasyon ölçümleri çeşitli plastik maddelerden yapılmış film tabakaları kullanılarak gerçekleştirilir. Bu yöntem, plastik plakalar üzerine çarpan alfa parçacıklarının gözle görülmeyen bir iz bırakması ve bu izin kimyasal iz kazıma yöntemi ile mikroskopta sayılması esasına dayanmaktadır. Selüloz asetat, polikarbonat ve allil diglikol karbonat gibi plastik maddelerden yapılmış nükleer iz dedektörleri yaygın olarak kullanılmaktadır[5,6,7,8]

Tez kapsamında Durridge marka Rad7 model aktif radon ölçüm cihazı kullanılmıştır.

2. RADYOAKTİVİTE VE RADON

2.1 RADYOAKTİVİTE

Radyoaktif elementler doğası gereği dengeye ulaşma eğilimi gösterirler. Bu denge atom fiziği açısından incelendiğinde çekirdeğin yapıtaşı olan nükleonların, yüksüz nötronların ve artı elektriksel yüke sahip protonların, oranına bağlıdır. N/Z (N: Nötron sayısı, Z: Proton sayısı) olarak ifade edilen bu oran bir elementin kararlılık seviyesini belirlemektedir[9].



Şekil 2.1: Kararlılık Kuşağı (N/Z oranına göre nükleer kararlılığı belirtir, çizgi N=Z durumunu gösterir)[9]

Şekil 2.1'de verilen kararlılık kuşağı elementlerin nötron ve proton sayılarına göre bir grafik oluşturmaktadır. N=Z çizgisi ve kararlılık eğrisi civarı kararlılık bölgesini ifade etmektedir. Daha çok hafif çekirdekler ($Z \leq 20$) kararlı haldedir, atom ağırlığı arttıkça $N/Z>1$ olmaktadır. Periyodik tablodan bulunan bizmut ($^{208}_{83}Bi$) kararlı en ağır elementtir ve $N/Z \leq 1,5$ oranına sahiptir. $N/Z>1,5$ oranına sahip olan diğer tüm elementler kararsız bölgede kalmaktadırlar[9].

Kararsız elementlerin kararlı hale gelmek için birim zamanda yayınladıkları ışın veya parçacıklar radyoaktivite olarak tanımlanır. Radyoaktivite sebebiyle açığa çıkan enerji elektromanyetik dalga, foton ve parçacık olarak yayılır ve bu yayılıma radyasyon denilmektedir. Birim zaman aralığını (dt), gerçekleşen radyoaktif bozunuma uğrayan çekirdek miktarını (dN) olarak tanımlarsak aktivite;

$$A=dN/dt$$

olacaktır[10,11].

2.1.1 Radyoaktif Bozunum Türleri

Kararlılık kuşağı dışında kalan ve kararlı hale erişmek için kararsız elemenler kararlı bir (N/Z) oranına ulaşana kadar bozunuma uğramaktadırlar. Bu süreçte radyoaktif çekirdekler α, β ve γ radyasyonlarından birini veya birkaçını yaymaktadırlar. Elementler kararlılık kuşağı üstünde (N/Z) oranını azaltma eğilimindedir, kararlılık kuşağı altında (N/Z) oranını arttırma eğilimindedir. Kararlılık kuşağı üstünde bulunan elementler daha kararlı hale gelmek için Beta yayınlaması (kararsız çekirdekten elektron yayılmasıdır) ve Nötron yayınlaması yapabilmektedirler. Kararlılık kuşağı altında bulunan elementler daha kararlı hale gelmek için Pozitron yayması (β+ bir pozitif elektron yayılır) yapabilmektedirler. Pozitron elektronun kütlesi kadardır, fakat +1 yüklüdür. Ayrıca Elektron yakalayabilmektedirler, kararsız çekirdekler, çoğu zaman K tabakasından 1s yörüngesinden bir elektronunu çekirdeğine katar ve elektron çekirdekte protonu nötrona dönüştürür. Kararlılık kuşağının ötesindeki elementler (ağır elementler), hem proton ve hem de nötron kaybederek α-parçacıkları yayalar. Alfa yayımlaması atom numarası 2 ve atom kütle numarası 4 olan Helyum çekirdeğinin yayılmasıdır. Elementler yaptıkları yayılmalardan sonra aktif hale gelir ve kararlı duruma gelmek için fazla olan enerjisini elektromanyetik Gama (γ ışıması) yayarlar[12].

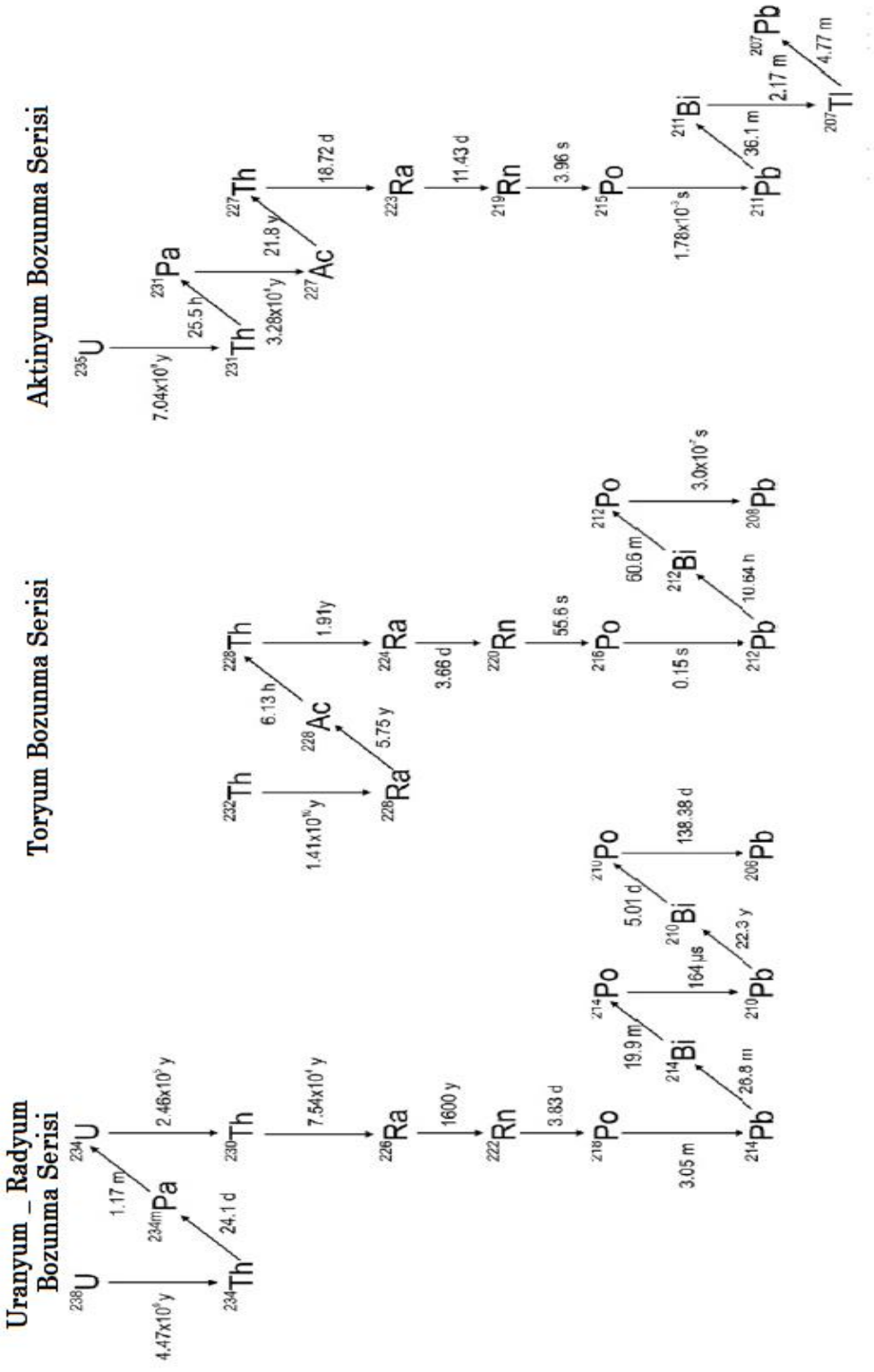
Alfa bozunumu yapan çekirdek iki proton ve iki nötron kaybederek yeni bir çekirdek oluşturmaktadır. Bu durumda bir alfa parçacığı Helyum ($^{4}_{2}He$) çekirdeğine özdeştir. Örneklemek gerekirse Radyum ($^{226}_{88}Ra$) iki proton ve iki nötron kaybederek Radona ($^{222}_{86}Rn$) dönüşmektedir. Denklemin ifadesi ise:

$$^{226}_{88}Ra \rightarrow {}^{222}_{86}Rn + {}^{4}_{2}He$$

Beta bozunumunun üç farklı türü mevcuttur. Bunlar birincisi pozitron bozunumudur (β+), kararsız çekirdeğin pozitif yüklü elektron yaymasıdır. Pozitron bozunumu enerji fazlalığının proton kökenli olduğu (veya çekirdeğin nötron eksikliği) durumlarda gerçekleşmektedir. Bu sebeple bir proton; bir nötrona, bir elektrona ve bir elektron nötrinosuna dönüşmektedir. İkincisi negatron bozunumudur (β-), kararsız çekirdeğin negatif yüklü elektron yaymasıdır. Negatron bozunumu enerji fazlalığının nötron kökenli olduğu (veya proton eksikliği) durumlarda gerçekleşmektedir. Bu sebeple bir nötron; bir protona, bir elektrona ve bir elektron antinötrinosuna dönüşmektedir. Üçüncü ve sonuncusu ise elektron yakalamadır, kararsız çekirdeğin kararlı hale gelebilmek için en içteki kabuktan (k tabakası) elektron yakalar ve bu da bir protonun bir nötronla yer değiştirmesiyle sonuçlanmaktadır. Gama bozunumu ise tek başına oluşmaz. Kararsız çekirdek alfa veya beta bozunumlarını geçirdikten sonra çoğu zaman direkt kararlı hale geçmez ve elektromanyetik fotonlar yayarak fazla enerjisinden kurtulur. Bu yayılan elektromanyetik dalgalar gama ışını olarak adlandırılırlar[13].

2.1.2 Radyoaktif Bozunum Serileri

Kararsız çekirdekler tek bir bozunum geçirerek kararlı hale geçmemektedir. Çoğunlukla belirli zaman aralıklarında üst üste bozunumlar geçirerek yeni radyoaktif çekirdekler oluşturmaktadırlar ve kararlı hale gelene kadar süren bu seri radyoaktif bozunum serisi olarak adlandırılmaktadır. Üç adedi doğal bozunum serisi olmak üzere uranyum serisinden, toryum serisinden ve aktinyum serisinden, bir adedi yapay bozunum serisi olmak üzere neptünyum serisinden, toplam dört adet seriden oluşmaktadır[14].

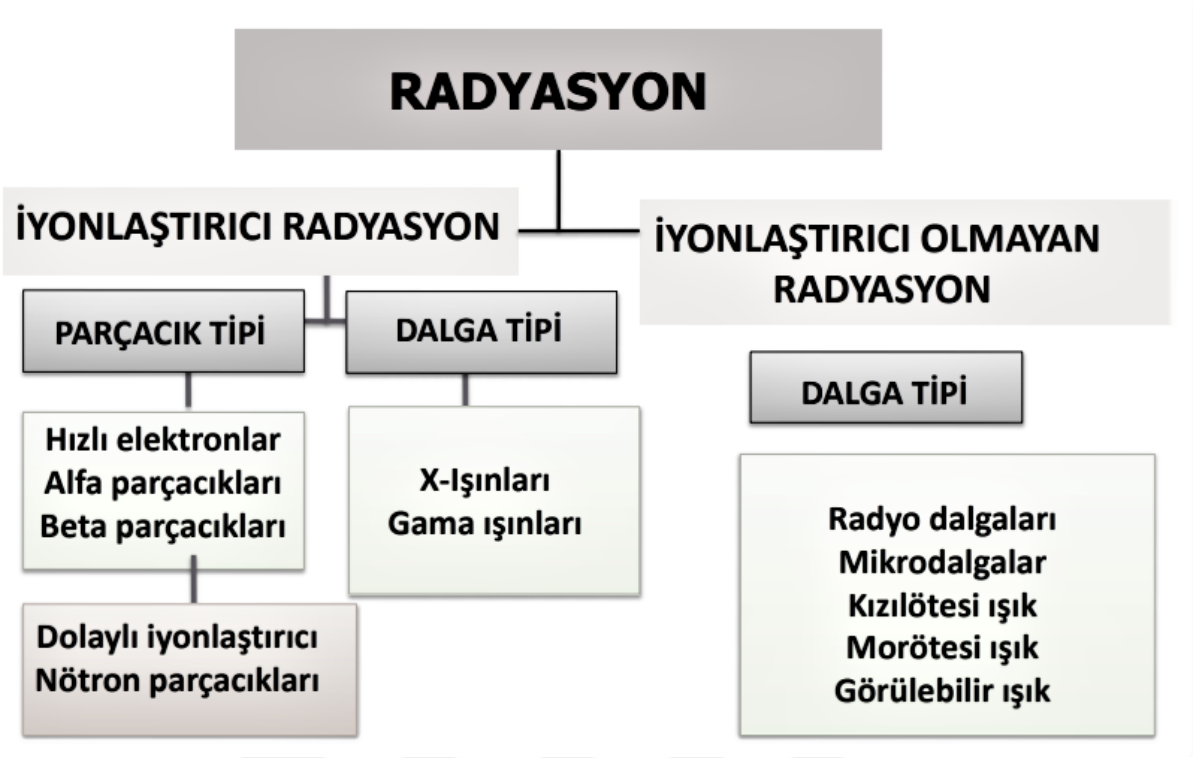


Şekil 2.2: Uranyum-radyum, toryum ve aktinyum bozunma serileri (Dikey oklar alfa bozunmasını, çapraz oklar beta bozunmasını gösterir)[14]

Uranyum serisi Uranyum 238 ile başlamaktadır, sekiz adet alfa, altı adet beta bozunumdan ve gama ışınlarını yaydıktan sonra kurşun 206'ya dönüşerek kararlı hale ulaşmaktadır. Bozunum serisinin toplam yaydığı enerji 51.7 MeV'dir. Uranyum izotopları arasında doğada en fazla bulunan izotop Uranyum 238'dir (%99,27). Toryum serisi Toryum 232 ile başlamaktadır, altı adet alfa, dört adet beta bozunumdan ve gama ışınlarını yaydıktan sonra kurşun 208'e dönüşerek kararlı hale ulaşmaktadır. Bozunum serisinin toplam yaydığı enerji 42,6 MeV'dir. Toryum izotopları (27 adet) arasında yarı ömrü sebebiyle en yavaş bozunan izotop toryum 232'dir. Aktinyum serisi uranyum 235 ile başlamaktadır, yedi adet alfa, dört adet beta bozunumdan ve gama ışınlarını yayımladıktan sonra kurşun 207'ye dönüşerek kararlı hale ulaşmaktadır. Bozunum serisinin toplam yaydığı enerji 46,4 MeV'dir. Uranyum 235 izotopunun Uranyum 238'e göre doğada çok az miktarda bulunur (% 0,72). Yapay bozunum serisi olan Neptünyum serisi Neptünyum 237 ile başlamaktadır, sekiz adet alfa, dört adet beta bozunumdan ve gama ışınlarını yaydıktan sonra Bizmut 209'a dönüşerek kararlı hale ulaşmaktadır. Bozunum serisinin toplam yaydığı enerji 55,48 MeV'dir [15].

2.2 RADYASYON

Radyasyon elektromanyetik dalga, parçacık veya foton olarak yayılan bir enerji türüdür. Kökeni bakımından parçacık tipi ve dalga tip, madde üzerindeki etkisi bakımından iyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan, kaynağı bakımından doğal ve yapay olarak iki kategoride incelenmektedir[11].



Şekil 2.3: İyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon [10,11]

2.2.1 İyonlaştırıcı Radyasyon

Elementlerle etkileşimlerinden sonra elementi iyon haline getiren yani elektriksel bir yük kazandıran radyasyon türleri iyonlaştırıcı radyasyon veya iyonizan radyasyon olarak tanımlanır. Enerjiyi taşıyan ürün cinsine göre parçacık tipi ve dalga tipi olmak üzere iki başlık altında incelenmektedir. Dalga tipi iyonlaştırıcı radyasyonda enerjinin taşınması ışınlama yoluyla gerçekleşmektedir ve kütlesizdir. X ışınları ve gama ışınları dalga tipi iyonlaştırıcı ışınlardır(şekil 2.3). Parçacık tipi iyonlaştırıcı radyasyonda ise kütlesi olan enerji yüklü bir parçacık ile gerçekleşmektedir. Alfa, beta, nötronlar parçacık tipi iyonlaştırıcı radyasyon türleridir [16].

Alfa parçacığı, iki protondan ve iki nötrondan oluşan pozitif yüklü bir helyum çekirdeğidir. Çoğunlukla atom numarası büyük elementler kararlı hale gelmeye çalışırken alfa ışını yaymaktadır. Büyük kütle ve elektriksel yüke sahiptir, yayıldığı zaman ortaya çıkan enerji 5-9 MeV aralığındadır. Yüksek elektriksel yük sebebiyle iyonlaştırıcı özellikleri fazladır ve enerjisi çabuk tükenmektedir. Bu sebeple menzili kısadır ve durdurulması kolaydır (örneğin kağıt tabakasını geçemezler)[17].

Beta parçacığı, pozitif veya negatif yüklü elektronla özdeş bir parçacıktır. Yaydığı zaman ortaya çıkan enerji 0,5 – 5 MeV aralığındadır. Alfa parçacığı gibi sahip olduğu kütle ve yük sebebiyle iyonizandır. Alfa parçacığına göre; kütlesi çok küçüktür olup elektronun kütlesine denktir. Bu da bu parçacığa daha çok hız ve girginlik sağlar ancak havada ilerlemesi ve durdurulması ihtiva ettiği enerjiye göre değişmektedir. Durdurulması alfa parçacığına göre daha zor olsa da çok ince plastik veya alüminyum tabaka ile durdurulabilmektedir[17].

Nötronlar, nükleer reaktörlerde fisyon, atmosferde füzyon reaksiyonları sonucu meydana gelmektedirler. Yüksüz parçacıklardır bu sebeple çok girgindirler ve direkt olarak iyonizan değildirler ancak çekirdeğe etkileşim sonucu iyonizan ışınları oluştururlar bu da madde içindeki menzillerinin çok uzun olmasında kaynaklıdır çünkü nötronlar çekirdeğe ulaşıp çarpabilmektedirler. Durdurulması için su, parafin, polietilen ve beton kullanılmaktadır[17].

X ışını elektromanyetik dalga tipi bir iyonlaştırıcı radyasyondur. Doğal olarak dışarıdan gelen yüksek enerjili elektronların elementle etkileşiminde elektron koparmaları sonucu veya çekirdekteki protonun hareketi sırasında elektron yakalayıp nötrleşmesi sonucu yörüngeler üzerinde oluşan elektron boşluklarına diğer yörüngelerden elektron atlaması ile doldurulur ve bu atlama yüksek enerji seviyesinden düşük enerji seviyesine doğru olduğundan kaynaklanan enerji fazlalığı olarak yayılmasıyla oluşmaktadır. X ışını yapay olarak röntgen tüplerinde elde edilmektedir, tüp içinde ısıtılan katottan çıkan elektronların anota çarpması sonucu ortaya çıkmaktadır. Frenleme tipi veya Bremsstrahlung olarak adlandırılmaktadır. Yüksek enerjilidirler ve dalga boyu kısadır, 0,01 – 10 nm arasıdır. Giriciliği yüksektir. Durdurulmasında çoğunlukla kurşun gibi yoğunluğu yüksek malzemeler zırh olarak kullanılmaktadır[18].

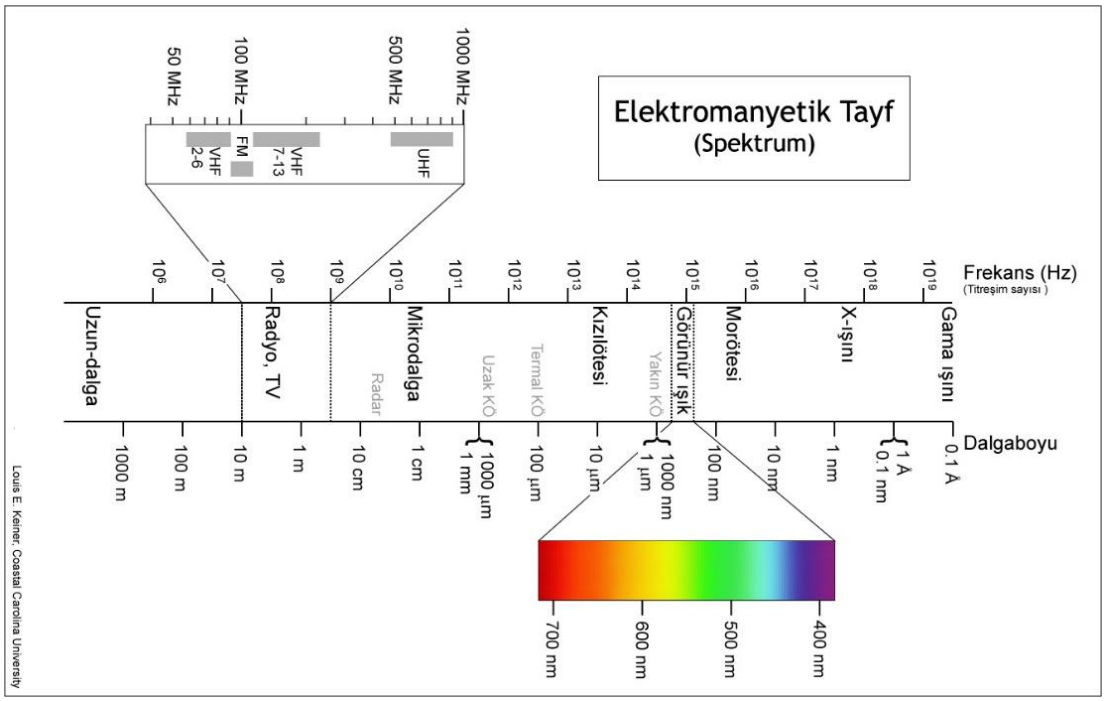
Gama ışını, elektromanyetik dalga tipi bir iyonlaştırıcı radyasyondur. Enerji seviyesi yüksektir ve 10 KeV – 10 MeV arasındadır, elektriksek olarak yüksüzdür. Dalga boyu kısadır, menzili ve giriciliği yüksektir. Tek başlarına iyonlaştırma seviyeleri düşüktür. Durdurulması için kurşun zırhlar veya beton duvarlar kullanılmaktadır [18].

Tablo 2.1: İyonizan radyasyonlar ve özellikleri [19]

Radyasyon Tipi	Yapısı	Kütlesi	Yükü	Ortalama Menzili	
				Hava	Doku
Alfa	2 Proton 2 Nötron	4	+2	3 cm	0.04 mm
Beta	Elektron	1/1840	-1	3mm	5 mm
X ve Gama	Elektromanyetik enerji dalgaları	0	0	∞	Vücut içine
Nötronlar	Nötronlar	1	0	Çok geniş	Vücut içine

2.2.2 İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyon

İhtiva ettiği enerji bakımından etkileşime girdiği elementte iyonizan bir etki oluşturamayacak kadar düşük enerjili radyasyon türlerini tanımlamaktadır. Radyo dalgaları, mikrodalgalar, kızılötesi dalgalar, görülebilir ışık dalgaları ve morötesi dalgalar iyonlaştırıcı olmayan dalga tipi radyasyonlardır (şekil 2.3) [20].



Şekil 2.4: Elektromanyetik spektrum [21]

2.2.3 Radyasyon Dozları ve Birimleri

Radyasyon dozu belirli bir sürede, belirli bir ortamda veya maddede, ışıma veya parçacık yoluyla yayılmış olan ya da soğurulmuş olan radyasyon miktarını ölçmek için tanımlanmaktadır.

Aktivite birimi Becquerel (Bq), SI birim sisteminde elementin birim zamandaki radyoaktif bozunum miktarının birimidir. Radyum elementinin saniyedeki bozunum miktarına Curie (Ci) adı verilmektedir, SI birimi olmayan ve eskiden kullanılan radyoaktivite birimidir [22].

$$1\ Ci = 3.7x10^{10}\ Bq$$

$$1\ Bq = 2.7x10^{-11}\ Ci$$

Işınlama birimi, SI birim sisteminde radyasyon etkisi altında kalma durumunun ölçütüdür ve Coulomb/kiloram (C/kg) olarak idafe edilmektedir. 0ºC ve 1 atm basınç altında (normal hava koşulu) 1 kg havada X ve gama ışıma radyasyonlarının 1 Coloumb (C) değerinde elektrik yüklü iyonlar oluşturması sırasındaki ışınlama miktarı için ifade edilmektedir. Eski ışınlama birimi ise Röntgen'dir, aynı tanıma sahiptir ancak röntgen'de 1 kg havada $2.58x10^{-4}$ C'lik elektrik yükü değeri baz alınmaktadır [22].

$$1\ R = 2.58x10^{-4}\ C/kg$$

$$1\ C/kg = 3.88x10^{3}\ R$$

Soğurulan doz birimi, bütün iyonlaştırıcı radyasyon çeşitleri için kullanılmakta olan bu birim soğurulan radyasyon miktarı tespiti için tanımlanmaktadır. SI birim sisteminde Gray (Gy) olarak adlandırılmaktadır ve radyasyona maruz kalınan maddenin 1 kg'sinde 1 J'lik enerji soğurulması oluşturan radyasyon dozudur. Eski doz birimi ise Rad'dır (radiation absorbed dose), benzer bir tanıma sahiptir ancak baz soğurulma için baz alınan enerji seviyesi 10^{-2} joule'dür (100 erg) [22].

$$1\ Rad = 10^{-2}\ Gy$$

$$1\ Gy = 100\ Rad$$

Eşdeğer doz birimi; SI birim sisteminde Sievert (Sv) olarak adlandırılmaktadır ve Joule/kg cinsinden ifade edilmektedir, iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalınması sonucu meydana gelen biyolojik zararın tespiti için tanımlanmaktadır. Eski eşdeğer doz birimi ise Rem'dir (radiation equivalent for man) [23].

$$1 \text{ Rem} = 10^{-2} \text{ Sv}$$

$$1 \text{ Sv} = 100 \text{ Rem} = 1 \text{ J.kg}^{-1}$$

İyonlaştırıcı radyasyona (çeşidine, iyonizan etkisine ve yoğunluğuna bağlı) maruz kalınması sonucu soğurulan dozun etkisi altında kalan bölgede biyolojik hasar meydana gelmektedir. Sievert birimi, 1 Gray'lik X ve gama ışımasına maruz kalınması sonucu oluşan biyolojik hasar mertebesinde etkileşim gerçekleştiren iyonlaştırıcı radyasyon miktarıdır. Soğurulan doz miktarları ve eş değer doz birimi arasındaki bağıntı radyasyon çeşitlerinin farklı etkilerinin biyolojik zararının hesaplanabilmesi için soğurulmuş dozun ve Kalite Faktörünün (RBE) çarpımı olarak ifade edilmiştir [23].

$$\text{Sievert (Sv)} = \text{Gray (Gy)} \times \text{RBE}$$

$$\text{Rem (rem)} = \text{Rad (rad)} \times \text{RBE}$$

Tablo 2.2: Kalite Faktörü [24]

Radyasyon Türü	Kalite Faktörü
X ışınlar	1
γ ışınları	1
β ışınları	1
α ışınları	20
Elektronlar	1
Protonlar	2
Nötronlar	5-20

Yıllık eş değer doz miktarı, doğal veya yapay radyasyon kaynaklarının tamamından kaynaklanan aktiviteye herhangi bir yolla bir yıl süresince maruz kalınmasıyla vücutta biriken

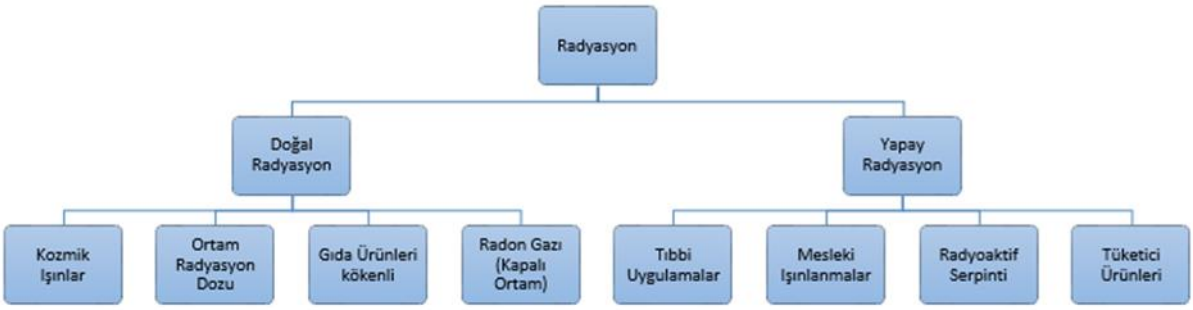
radyasyon dozu ölçütüdür, birimi eş değer doz birimiyle aynıdır ve Sievert'dir (Sv). İyonlaştırıcı radyasyon kaynaklı biyolojik zararın meydana gelmemesi için yıllık eş değer doz miktarının kabul edilebilir sınırları vardır. ICRP tarafından belirlenen ve ülkemizde de Radyasyon Güvenliği Yönetmeliği tarafından kabul gören radyasyon görevlileri sınır değerleri ve toplum üyesi kişiler sınır değerleri olarak iki ayrı kategoride tanımlanmaktadır. Sınır değerleri tablo 2.3'de belirtilmektedir [22,25].

Tablo2.3: Radyasyon sınır dozları [25]

Radyasyon görevlileri	**Sınır doz (mSv)**
Yıllık tüm vücut dozu	50
Yıllık tüm vücut dozu (5 yılın ortalaması)	20
Cilt	500
Göz merceği	150
Toplum üyesi kişiler	**Sınır doz (mSv)**
Yıllık tüm vücut dozu	1 (Özel durumlarda 5)
Yıllık tüm vücut dozu (5 yılın ortalaması)	1
Cilt	50
Göz merceği	15

2.2.4 Radyasyon Kaynakları

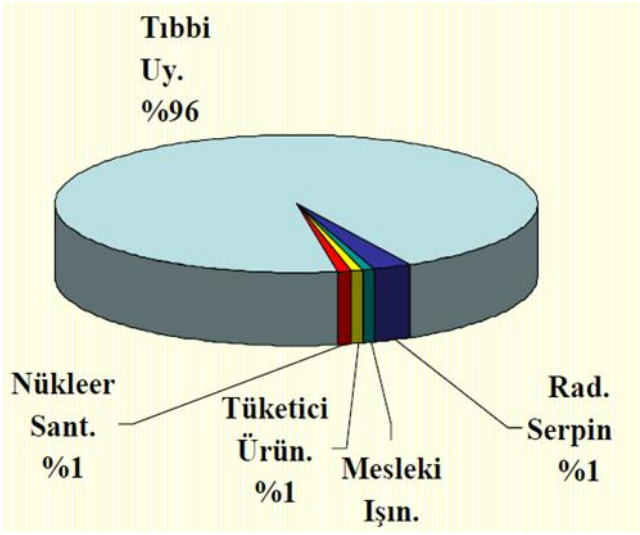
Radyasyon kaynakları radyoaktivitenin oluşum şekline göre yapay ve doğal olmak üzere iki başlık altında incelenmektedir (Şekil 2.5). İnsanların ve çevrenin radyasyon maruziyeti oranında ayrılım yapılacak olursa yayılan radyasyon %80 doğal radyasyon ve %20 yapay radyasyon kaynaklarından doğmaktadır [26,27,28,29,30,31].



Şekil 2.5: Radyasyon kaynakları [32]

2.2.4.1 Yapay Radyasyon Kaynakları

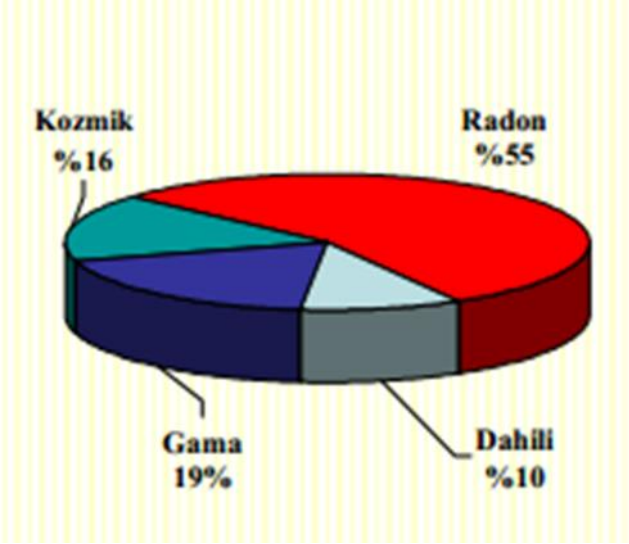
Gelişen toplum genişleyen ihtiyaçları doğurmuştur, bu ihtiyaçlar her alanda teknolojik gelişmeler ile karşılanmaktadır. Enerji, sağlık ve hizmet sektörlerinde yapay radyasyon kaynakları kullanılarak geliştirilen teknikler kullanılmaktadır. Bu ihtiyaçlar için insan eliyle yaratılan radyasyon kaynakları kullanılmaktadır. Tıbbi uygulamalarda tanısal radyoloji, röntgen, nükleer tıp, radyoterapi gibi yapay radyoaktivite kullanılmakta ve bunun sonucunda çevreye radyasyon salmaktadır. Endüstriyel uygulamalarda ise nükleer güç santrallerinde ve tüketici ürünlerinde, tek kullanımlık ürünlerin sterilizasyonunda kullanılmaktadır. Ayrıcı askeri stratejiler sonucu geliştirilen nükleer bomba teknolojilerinin denenmesi sonucu yine insan eliyle aktive edilmiş kaynaklardan çevreye radyasyon yayılmaktadır. Şekil 2.6'da yapay radyasyon kaynaklarının dağılım oranı verilmektedir [26,27,28,29,30,31].



Şekil 2.6: Yapay radyasyon kaynakları [32]

2.2.4.2 Doğal radyasyon kaynakları

İnsan müdahalesi olmadan doğada kendiliğinden bulunan aktiviteden kaynaklan radyasyonun kaynaklarıdır. Uzaydan gelen kozmik ışınlar ve yer kabuğunda doğal olarak bulunan radyoaktif elementler temel kaynaklarıdır ve kozmik, karasal, dahili radyasyon kaynakları olmak üzere üç başlık altında incelenmektedir. Şekil 2.7'de yüzdesel oranla dağılımı verilmiştir [26,27,28,29,30,31].



Şekil 2.7: Doğal radyasyon kaynakları [32]

Kozmik radyasyon kaynakları dünyaya uzaydan gelen yüksek enerjili kozmik ışınların atmosfere geçebilenlerinden oluşmaktadır ve çevresel dağılımı coğrafi faktörlere yani ışını

alma açısına göre değişmektedir ancak maddelerden geçebilen ışınlar (nötronlar ve protonlar) oldukları için toprakta bulunan elementlerle etkileşimi yüksektir. (bu etkileşim sonucu beta ve gama radyasyonu meydana gelmektedir) [26,27,28,29,30,31].

Karasal radyasyonlar; uranyum 238 ve toryum 232 serilerin bozunum ürünlerinden ve potasyum 40 izotopundan kaynaklanan, havada, toprak altındaki kayaçlarda, denizde ve okyanuslarda bulunmasında dolayı karasal olarak adlandırılan radyasyon kaynaklarıdır. Buradaki en önemli kaynak yeraltındaki volkanik (daha çok volkanik ancak sedimanter kayaçlarda da mevcut) kayaçlarda Uranyum 238 kaynaklı oluşan radondur. Karasal radyasyonun yayılmasında jeolojik faktörlerin önemi ve etkisi yüksektir. Karasal radyasyona sebep olan elementlerin bazıları su kaynaklarından ve gıda hammaddelerinden sindirilerek canlıların vücuduna girmektedir, radon ise gaz olması münasebetiyle solunan hava yoluyla canlı vücuduna nüfuz etmektedir. Bu durum iç ışınlama ve dış ışınlama kavramlarını doğurmaktadır. Dış ışınlama, radyoaktif bir kaynaktan yayılan gama ışınlarının canlı vücudu dışından olması sebebiyle bu şekilde adlandırılmaktadır. İç ışınlanma hava, su ve beslenme zinciri ile canlı vücuduna alınan radyoaktif bozunum ürünlerinden ve izotoplarından kaynaklanmaktadır. Uranyum 238 kaynaklı oluşan radon ve Toryum 232 kaynaklı oluşan toron havadan solunum yoluyla canlı vücuduna girmektedir ve radyasyona maruz kalma etkisinin en önemli kaynaklardır. Canlı bünyesine giren radyoaktif elementlerden yayılan alfa, beta ve gama yayımlayarak canlı vücudu içinde iç ışımalara sebep olmaktadır [26,27,28,29,30,31].

İç ışınlanma radyasyon kaynakları, doğal olarak veya sıvı ve katı gıda yoluyla canlı vücutlarda bulunan radyoaktif elementler sebebiyle gelişen radyasyon kaynaklarıdır. İç ışınlanma potasyum 40, karbon 14, kurşun 210, trityum ve polonyum gibi radyoaktif izotoplardan kaynaklanmaktadır [26,27,28,29,30,31].

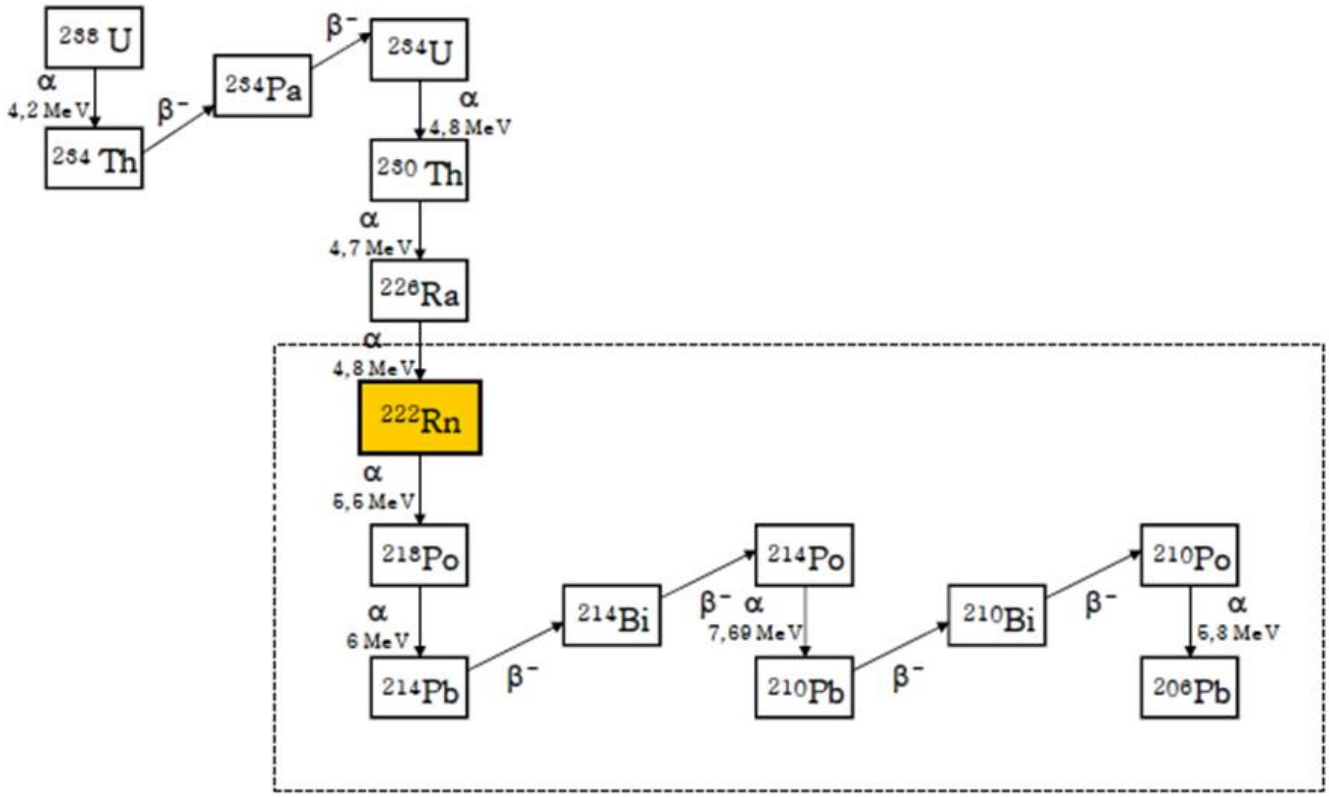
Tablo 2.4: Radyasyon kayaklarının yıllık ortalama dozları [27]

Radyasyon Kaynağı	**Yıllık Ortalama Doz (milisievert – mSv)**
Doğal radyasyon	
Kozmik Radyasyon	0,39
Karasal Radyasyon	0,48
Sindirim Kaynaklı	0,29
Solunum Kaynaklı (Radon Gazı)	1,26
Toplam	**2,4**

Yapay Radyasyon	
Tıbbi Tanı Kaynaklı	0,6
Nükleer Denemeler	0,005
Mesleki Maruziyet	0,005
Çernobil Kazası	0,002
Nükleer Güç Santrali	0,002
Toplam	**0,6**

2.3 RADON

Radyum 226'nın bozunumundan doğan inert gaz radon, soy gaz ailesine ait bir elementtir, sembolü Rn, atom numarası 86, kütle numarası 222'dir ve radyoaktiftir. Alfa parçacıkları emisyonuyla bozulmaktadır (yüksek enerji emisyonu). Radyoaktif bozunması sırasında, polonyum, bizmut, kurşun gibi kısa ömürlü radyonüklitlerin zincirin sonunda kararlı bir kurşuna dönüşmesine neden olmaktadır. Radon 222 art arda polonyum 218, kurşun 214, bizmut 214 ve polonyum 214 atomlarını üretmektedir ve kurşun 206'da kararlı hale gelmektedir (Şekil 2.8). Nispeten uzun bir yarılanma ömrü (3.82 gün) ve nispeten daha yüksek öncüsünün (uranyum 238) doğal bolluğuyla, radon 222 en sık karşılaşılan izotoptur. Spesifik aktivitesi $5{,}73 \times 10^{15}$ $Bq.g^{-1}$'dir. Radonun kütleleri 193 ile 228 arasında değişen 36 adet radyoaktif izotopu bulunmaktadır. Doğada bu izotoplardan yalnızca ikisi bulunmaktadır (Tablo 2.6); 55,6 saniye yarı ömre sahip toron (radon 220) ve 3,96 saniye yarı ömre sahip aktinon (radon 219). Bu izotoplardan doğada radon gibi bulunabilen toron, radon 222 konsantrasyonunun ölçümü sırasında, alfa yayılımına bağlı ölçümlerde, radon 222'den ayırt edilmesi zor bir radyoaktif elementtir, bunun sebebi ise yaydıkları alfa parçacıklarının enerjilerinin (radon 222 – 5.5 MeV, toron – 6,3 Mev) birbirine yakın olmasıdır ancak yarılanma ömrülerinin çok farklı olması, radon 222'yi radon 220'den ayırmak için kullanılan bir özelliktir [8].



Şekil 2.8: Radon bozunum zinciri [33]

Tablo 2.5: Radon izotoplarının nükleer özellikleri [9]

İsim	Bozunum zinciri	İzotop	Yarı ömrü (T)	Geri tepme enerjisi (KeV)	Parçalanma sabiti (s^{-1})	Bozunum enerjisi (MeV)
Radon	^{238}U	$^{222}_{86}Rn$	3,82 gün	86	$2,1x10^{-6}$	5,5
Toron	^{232}Th	$^{220}_{86}Rn$	54,2 saniye	103	$1,281x10^{-2}$	6,3
Aktinon	^{235}U	$^{219}_{86}Rn$	3.92 saniye	103	$1,77x10^{-1}$	6,8

Tablo 2.6: Radon 222'nin fiziksel ve kimyasal özellikleri [9]

İsim	Radon
Sembol	Rn
Atom numarası	86
Atom ağırlığı	222
İyonlaşma pontansiyeli (eV)	10,7
Kimyasal grubu	Soy gaz
Elektron dizilimi	[Xe] $4f^{14}$ $5d^{10}$ $6s^2$ $6p^6$
Molar hacim	50,50 x 10^{-3} $m^3.mol^{-1}$
Erime sıcaklığı	-71,1 °C / 202 °K
Kaynama sıcaklığı	-61,8°C / 211,3 °K
Kritik basınç	62 atm
Kritik sıcaklık	105°C
Kütlesel hacmi	9,73 $g.L^{-1}$
Parçalanma sabiti	2,1 x 10^{-6} s^{-1}

Oda sıcaklığındaki en ağır (yoğun) gazlardan biridir ve yoğunluğu havanın yoğunluğunun 8 katıdır (Tablo 2.7). Kokusuz ve renksiz bir gazdır, ancak sıcaklık donma noktasının altına düştüğünde (202°K veya -71°C) fosforlu hale gelmektedir, ardından sıcaklık daha fazla düşerse sarı ve sonunda kırmızı-turuncu rengini almaktadır. Yoğun haldeyken, yaydığı radyasyonun yoğunluğu nedeniyle radon parlak görünmektedir, aynı zamanda otomatik floresandır. Radon suda, çözücülerde ve organik bileşiklerde (toluen, kloroform) çözünmektedir. Difüzyon katsayısı suda havada olduğundan daha düşüktür (18°C sıcaklık için: 1,15x10^{-9} $m^2.s^{-1}$ suda ve 1,2x10^{-5} $m^2.s^{-1}$ havada). Aktif karbon, silika jel, parafin vb. tarafında kolayca tutulur, bu özellik aynı zamanda belirli ölçüm yöntemlerinde kullanılmaktadır [9].

2.3.1 Radon Bozunum Ürünlerinin Özellikleri ve Davranışları

Radon bozunum zinciri ve ürünlerinin temel özellikleri şu şekilde açıklanabilmektedir; radon bozunarak kimyasal olarak aktif ve nispeten kısa ömürlü olan radyonüklitler üretmektedir, bu radyonüklitlere radon bozunum ürünleri adı verilmektedir. Radon 222'nin bozunmasını izleyen dört radyonüklidin yarılanma ömrü 30 dakikadan azdır. Yarı ömürler bir radyoaktif malzemeden diğerine büyük ölçüde farklılık gösterir ve saniyenin bir kesri ile milyonlarca yıl arasında değişmektedir. Polonyum izotopları alfa yayınlarken, kurşun ve bizmut izotopları hem

beta hem de gama yayınlamaktadır. Radon bozunum ürünlerinin davranışları ise şu şekilde açıklanmaktadır; radyoaktivite sonucu bozunum yoluyla havadan uzaklaşabilmektedirler ancak bozunuma uğramadan önce basınç farklarının neden olduğu hava akışı sebebiyle de ortamdan uzaklaşabilmektedirler ve radonun aksine bu katı bozunum ürünleri havadaki partiküllere ve su damlacıklarına yapışarak aerosole dönüşmektedirler. Bu durumda insanlar tarafından solunması sonucu bağlı olduğu partiküllerle beraber akciğere nüfuz edebilmektedirler, birikebilmektedirler ve yapışabilmektedirler. Radon bozunum ürünleri partiküllere bağlanma durumlarına göre bağlı olan ve serbest olan (bağlı olmayan, bağımsız) olmak üzere başlıkları iki başlık altında gruplanmaktadır [34].

Tablo 2.7: Radon ve bozunum ürünlerinin özellikleri [35]

İzotop	Yarı Ömür	Bozunum Sabiti (sn^{-1})	Temel Radyasyon Enerjileri (MeV)		
			α	B	γ
^{222}Rn	3,82 gün	$2,1x10^{-5}$	5,94		
^{218}Po	3,05 dakika	$3.79x10^{-3}$	6,00		
^{214}Po	26,8 dakika	$4,31x10^{-4}$		0,65	0,24
^{214}Bi	19,7 dakika	$5,86x19^{-4}$		0,27	0,61
^{214}Po	$1,5x10^{-4}$ saniye	$4,62x10^{-3}$	7,69		
^{210}Pb	22,3 yıl	-	-	-	-

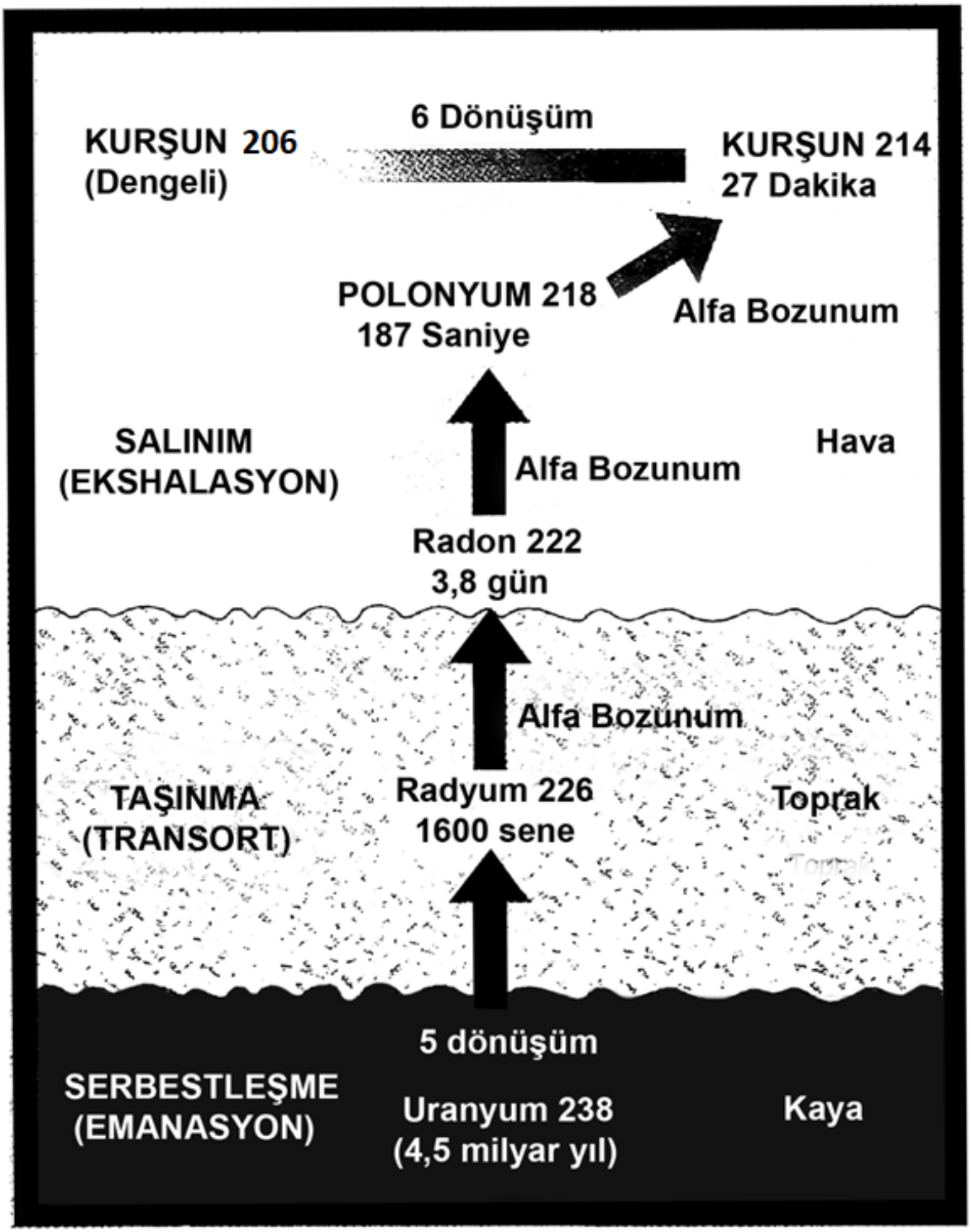
2.3.2 Radon Yayılım Yolları

Radonun atmosfere yayılımı bulunduğu yere ve bulunma miktarına göre değişkendir ayrıca birden fazla parametreye bağlıdır. Bu parametreler radonun bulunduğu yerin jeolojik özelliklerine, meteorolojik özelliklerine, hidrojeolojik özelliklerine ve çeşitli fiziki süreçlere bağlı değişiklik göstermektedir. Uranyum 238 temelli radyum 226'nın bozunumdan oluşan

radon ve izotopları uranyum ve toryum cevherlerinin bulunduğu kayaç ve topraklarda bulunmaktadır. Bulunduğu yerden atmosfere çıkışını ise kayaç ve toprakların geçirgenliği, porozitesi, nem oranı, tane boyu dağılımı, bölgedeki karstik boşluklar gibi jeolojik faktörler belirlemektedir [35,36].

Tüm gazlar gibi radon gazı da basınç farklılıkları ve gaz konsantrasyonundaki farklılıklar nedeniyle kaya, toprak ve hava ortamlarında hareket etmektedir. Radon, konsantrasyonun daha yüksek olduğu bölgelerden (oluştuğu toprak ve kayadan) konsantrasyonun daha düşük olduğu bölgelere hareket etmektedir. Altta yatan kayalarda ve toprakta radon seviyeleri ne kadar yüksekse, genellikle atmosfere ulaştığı noktada da büyük olma olasılığı o kadar yüksektir. Radon, geçirgen kayalar ve topraklarda hızla hareket etmektedir ve atmosfere ulaşmaktadır. Ancak mağaralar ve madenler gibi yetersiz havalandırılan yer altı alanlarına giren radon, potansiyel olarak tehlikeli konsantrasyonlara ulaşabilmektedir [37].

Radon konsantrasyonlarını belirlemek için kayadan toprağa, topraktan (veya sulardan) atmosfere radon gazını yayılım mekanizmasını irdelemek gerekmektedir. Yayılım mekanizması kaynaktan ölçüme kadar üç ana fiziksel olaydan oluşmaktadır ve bunlar; serbestleşme (emanasyon), taşınma (transport), salınım (ekshalasyon) süreçleridir (şekil 2.9) [38].



Şekil 2.9: Radon gazının yayılma mekanizması [38,30]

Serbestleşme (Emanasyon) (E) faktörünün tanımı, gözenek boşluğunda hareket eden radon atomlarının sayısı ile radyum 226'nın bozunumuyla mineral fazda üretilen toplam radon atomlarının sayısı arasındaki orandır [40].

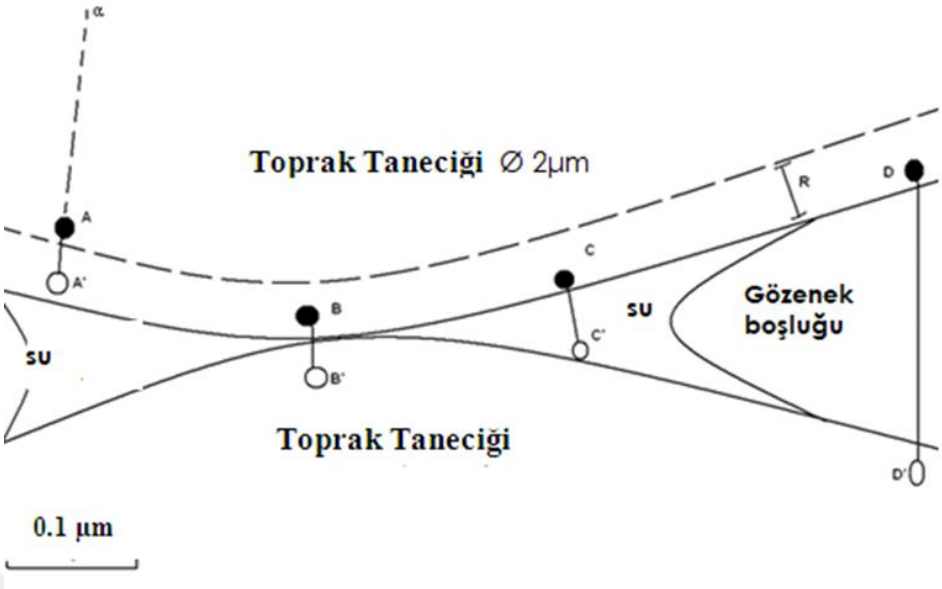
$$E = \frac{Gözenek\ Boşluğuna\ Salınan\ Radon\ Aktivitesi}{Katı\ Fazda\ Bulunan\ Radyum\ Aktivitesi}$$

Genel olarak ölçülebilir radon konsantrasyonlarında serbestleşme (emanasyon) salınım (ekshalasyon) ile karıştırılmaktadır, serbestleşme kaya birimindeki konsantrasyonu, salınım ise radonun toprağın dışındaki akı yoğunluğu olmasından kaynaklanmaktadır. Serbestleşme dikkate alınan ortam aracılığıyla taşıma mekanizmalarını içermektedir bu nedenle, serbestleşme ve salınım iki farklı olgu olarak tanımlamaktadır.

Radon serbestleşmesi (E), katı tanelerin ve ara boşlukların mikroskobik ölçeğinde, bir radon atomunun kendisini doymuş veya doymamış gözenek boşluğuna ulaşmak için bir kaya, toprak, beton vb. birimlerin tanelerinden çıktığı mekanizmadır. Serbestleşme sürecinde radonun ortamdan ayrılmasını sağlayan güçler direkt geri tepme, endirekt geri tepme ve difüzyon olarak tanımlanmaktadır. Radonun oluşum sürecinde alfa ışınlaması yaparak bozunuma uğrayan radyum elementi yayımladığı enerjinin bir kısmını bozunum ürüne aktarmaktadır, bu aktarılan enerji geri tepme enerjisi olarak tanımlanmaktadır [41, 42].

$$E = E_{\text{geri tepme}} + E_{\text{difüzyon}} = E_{\text{direkt}} + E_{\text{endirekt}} + E_{\text{difüzyon}}$$

Radyum 226 içeren bir kaya veya toprak yapısında serbestleşme iki ana mekanizma ile gerçekleşir, bunlar radonun oluşumu sırasında doğrudan geri çekilmesi ve katı tanecikte yayılması (difüzyon) şeklindedir. Radon atomu, geri tepme enerjisi adı verilen ve serbestleşmesine izin veren kinetik enerjiye sahiptir. Yoğunluğu bilinen bir mineralde, bu enerjiyle kat edebileceği mesafe 20 ila 70 nm arasındadır. Şekil 2.10'da B noktasında temas halinde olan 2 μm çapında iki küresel tanecik modellenmiştir. Radyum atomları şematik olarak siyah noktalarla gösterilmiştir. Bozunum sırasında, bir alfa parçacığı (noktalı çizgi ile gösterilmiştir) üretilmektedir ve ters yönde kendi enerjisine sahip bir geri tepme hareketi (siyah okla sembolize edilmiştir) üretir, bu atomdan uzaklaşmaya neden olmaktadır (açık dairelerle sembolize edilmiştir)(şekil 2.10) [42].



Şekil 2.10: Bir kayanın (veya toprağın) taneciklerinin içinde radonun uzaklaşan yörüngelerinin şematik gösterimi (Radon atomlarının geri tepmesi (R) ile geçilebilecek maksimum mesafe, noktalı çizgi ile gösterilir) [42]

Serbestleşme desteklemeyen durumlar da oluşmaktadır; radyum atomu tane içinde kararlı bir şekilde sabitlendiğinde, radon kaçamaz (AA') ve radon tane yüzeyine yakın bir yerde bulunur, taneden kaçmak için yeterli geri tepme enerjisine sahiptir, ancak bitişik bir taneye (BB've DD') yerleşmektedir. Radon atomlarının göçüne izin veren ve yayılma katsayısını artıran olay, radonun su içinde geri çekilmesini bitirdiği zamandır (C-C'). Tane ölçeğinde, ikinci bir fiziksel olay devreye girmektedir; radon gözeneklerin boş alanlarına katı tanecikteki difüzyonla ulaşabilmektedir. Bir katıdaki radonun difüzyon katsayısı çok küçüktür, 10^{-5} $m^2.s^{-1}$ olan havadakinden 107 kat daha düşüktür, moleküler difüzyon radonun serbestleşmesinde genellikle ihmal edilebilir bir mekanizmadır [42,43].

Taşıma mekanizması; serbestleşmeyle radon salıverildiğinde toprağın gözeneklerinden bağımsız olarak boşluğa göç etmektedir, adveksiyon, konveksiyon ve moleküler difüzyon prensipleri radon göçünün iletim mekanizmalarıdır. Mikroskobik bir ölçekte taşıma yolları kayanın veya toprağın geniş gözenekleridir. Kumtaşlarında ve kumlarda radon kil oluşumlarının veya doymuş toprakların aksine daha kolay göç etmektedir. Radon, emisyon noktası ile yüzey (toprak veya kaya) arasındaki yolculuğu sırasında jeolojik oluşumlar ölçeğinde çok daha büyük gaz hacimlerine de ulaşabilmektedir, bunlar çatlaklar, faylar, yer altı boşlukları (mağaralar, karstik boşluklar, hidrojeolojik ağlar), volkanik hatlar olarak sıralanabilir. Toprak-atmosfer arayüzüne (salınım – ekshalasyon akışı) gelen radon miktarı,

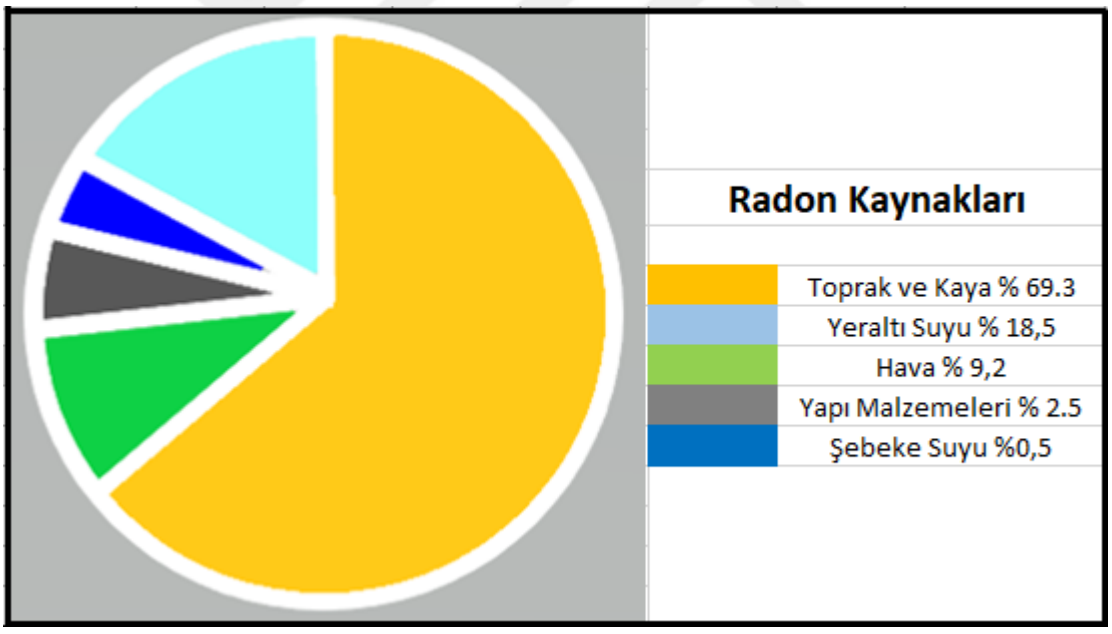
radonun toprak veya kayadan dikey olarak taşınmasının verimliliği ve kolaylığı ile doğru orantılıdır. Bir radon atomunun bozulmadan önce kat ettiği mesafe ne kadar büyükse, göç hızı o kadar yüksektir. Kayalar ve topraklardaki farklı transfer yollarının yanı sıra taşınmasında yer alan fiziksel mekanizmaların ve göç hızını kontrol eden faktörlerin incelenmesi de gereklidir. Bunlar, radon bozunum hızı, jeoloji, gözeneklerdeki akışkan ortamların özellikleri, atmosferik basınç, meteoroloji gibi faktörler olarak sıralanmaktadır [38,42].

Radon 222 salınım (ekshalasyon) akışı, makroskopik ölçekte toprak yüzeyinde radon emisyonu olarak tanımlanmaktadır. Bu akı, birim zamanda (s^{-1}) birim alan (m^2) başına Becquerel (Bq veya mBq) cinsinden ifade edilir. Örneğin bir toprağın veya bir kayanın yüzeyinde ölçülen bir radon akışı, kaynağından toprak atmosfer arayüzüne difüzif veya advektif taşıma yoluyla göçü bir yandan kaynak ortamındaki gözeneklerde radon gazının oluşumunu ve salınımını bir yandan da salınımı yöneten mekanizmalarla gerçekleşmektedir. Bir toprağın yüzeyinde ölçülen radon salınımı (ekshalasyonu), sıcaklık, atmosferik basınç veya daha da önemlisi yağış gibi meteorolojik olaylardan doğrudan veya dolaylı olarak etkilenebilmektedir. Bir zemindeki akıyı ölçmek, özenli ve hasas bir yöntem gerektirmektedir. Toprağın gözeneklerindeki radon konsantrasyonunun tek bir ölçümde olmasa bile farklı derinliklerde yapılan birkaç ölçümde gözeneklerden gelen hava ölçümleri profilin şekline bağlı olarak bize akış tipi hakkında bir fikir verebilmektedir (difüzif veya advektif) [44].

2.3.3 Çevresel Radon Kaynakları ve Kapalı Ortam Radon Konsantrasyonları Sınır Değerleri

Radon gazının ana kaynağı uranyum kaynaklı radyumun bozunumdan oluşması sebebiyle toprak ve kaya birimleridir. Radonun yayılım yolları başlığında anlatıldığı üzere çeşitli fiziksel süreçlerden sonra radon kaya birimden toprağa, oradan da havaya veya sulara ulaşmaktadır. Bu sebeple radon havada, sularda, yapı malzemelerinde dolayısıyla yaşadığımız evlerde ve iş yerlerinde bulunmaktadır (şekil 2.11). Kapalı ortam radon konsantrasyonun artmasının en önemli sebebi konutların üzerine inşa edildikleri toprak veya kaya parçasında bulunan radonun boşluk ve çatlaklar yoluyla ve basınç farklarıyla kapalı ortamlara sızmasıdır (şekil 2.12). Yayılma sürecini tamamında radyoaktif özelliğini koruyan radon insan ve çevre sağlığını etkilemektedir[11,45].

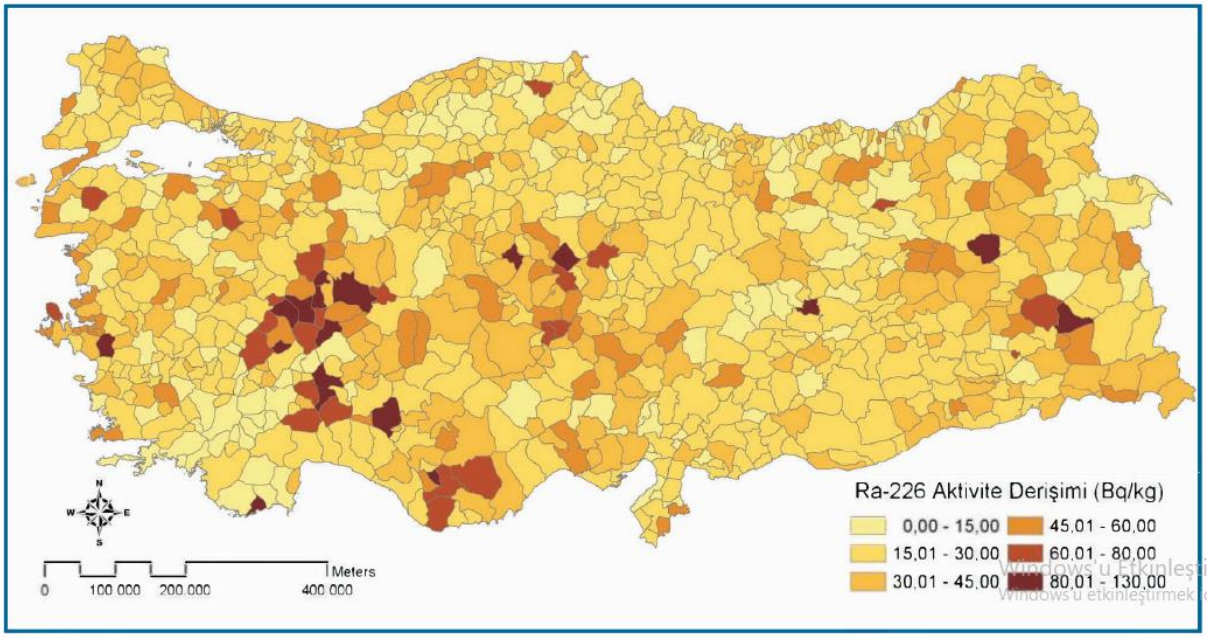
Yeraltı su kaynaklarının içinde bulunduğu ortamda radon konsantrasyonu mevcut ise suyun çıktığı kaynağın da bulunduğu jeolojik yapıda radon mevcuttur. Radon içeren su kaynağı doğal veya yapay yollarla taşınırken, su şebekelerin geçtikleri toprak veya kaya yapısının radon konsantrasyonu da çok önemlidir çünkü radonun su ile taşınarak yaşadığımız ortamlara ve çevreye nüfuz etmesi mümkündür. Kum, kil, marn, kalker, kireçtaşı, granit gibi doğal yapı malzemelerinde radonun varlık sebebidir, üretildikleri kayaçlara ve/veya oluştukları ortamın mineralojik özelliklerine göre radon çıkışına neden olan doğal uranyumun bulunmasıdır. Böylece agrega, çimento, tuğla, seramik fayans, granit plaka gibi yapı malzemeleri kullanıldığı ortama yani yaşam alanlarında radon konsantrasyonlarını arttırmaktadır. Doğalgaz ve kömür kaynaklı radon konsantrasyonun artması ise içinde oluştukları yatağın jeolojik, mineralojik ve litolojik özelliklerine bağlı olup singenetik veya epigenetik olarak kömür ve linyitler içerisinde uranyumun bulunmasıdır. Uranyum bozunum ürünü olan radon gazına da bu nedenle kömür ve linyitlerde sık rastlanmaktadır [11,45].



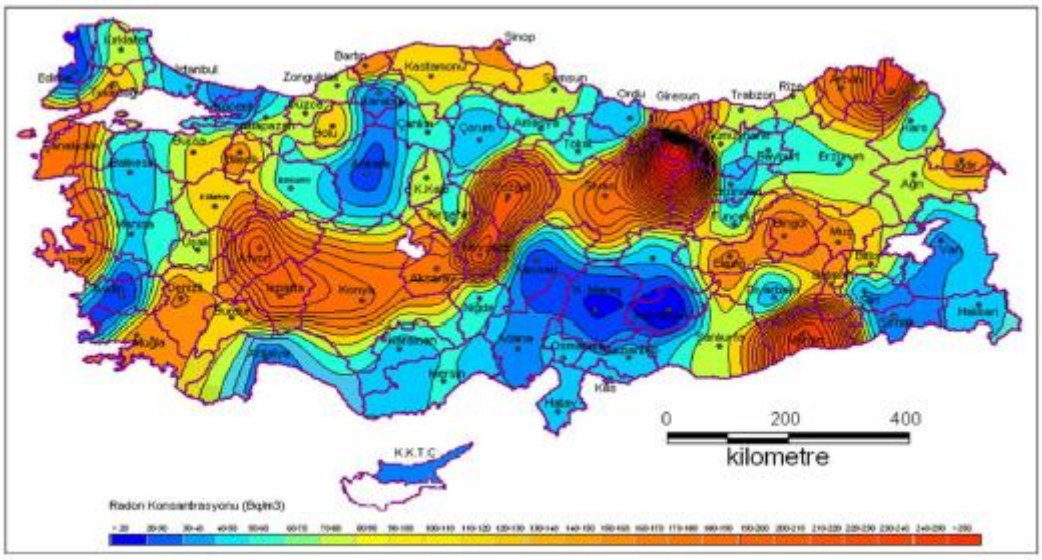
Şekil 2.11: Radon kaynakları [11]

Radon konsantrasyonları konumsal açıdan değişkenlik addetmektedir bunun sebebi yeraltı kaynakları miktarının ve atmosfere çıkış yollarının bölgesel çapta farklılık göstermesidir. Şekil 2.13'de Türkiye'de bulunan radon kaynağı radyum elementinin konsantrasyon derişimi

gösterilmektedir. Türkiye'de bulunan radon gazı konsantrasyonu derişimi 2.14'de gösterilmiştir [2, 45].



Şekil 2.12: Radyumun (^{226}Ra) yüzey toprağında aktivite derişimi (Türkiye) [46]



Şekil 2.13 Türkiye radon konsantrasyonu dağılım haritası (2014) [45]

Radon gazı konsantrasyonları radon gazı ve bozunum ürünlerinin insan sağlığına olan etkisini kontrol etmek ve maruziyet durumlarını önlemek için ülkelerin konu ile ilgilenen kurum ve kuruluşları tarafından ölçülmekte ve sınırlandırılmaktadır. Türkiye'de Radsayson Güvenliği

Yönetmeliğine göre belirlenen radon konsantrasyonu sınır değerleri ev içi seviyeler için limit 400 $Bq.m^{-3}$'dür ve iş yerlerindeki seviyeler için limit 1000 $Bq.m^{-3}$'dür. IAEA Özel Güvenlik Rehberine göre radon konsantrasyonu ev içi seviyeleri için limit değer 200 – 600 $Bq.m^{-3}$'dür ve iş yerlerindeki seviyeler için limit değer 500 – 1500 $Bq.m^{-3}$'dür [45].

Tablo 2.8: Radon konsantrasyon limitleri ($Bq.m^{-3}$) [2]

A.B.D	150	Hindistan	150	Lüksemburg	250
Almanya	250	İngiltere	200	Norveç	200
Avusturya	200	İrlanda	200	Polonya	400
Çekya	200	İsrail	200	Rusya	200
Çin	200	İsveç	200	Türkiye	400
Danimarka	400	İsviçre	400	AB	400
Fransa	300	Kanada	800	ICRP	400
Finlandiya	200	Litvanya	100	WHO	100

Tablo 2.9: Kapalı ortamlarda ortalama radon konsantrasyonu ($Bq.m^{-3}$) [11,47]

A.B.D	46	Finlandiya	120	Lüksemburg	110
Almanya	49	Fransa	89	Macaristan	107
Arjantin	37	Hırvatistan	35	Malezya	14
Arnavutluk	120	Hindistan	57	Mısır	9
Avusturalya	11	Hollanda	23	Norveç	89
Belçika	48	İngiltere	20	Polonya	49
Cezayir	30	İran	82	Portekiz	62
Çekya	140	İspanya	90	Romanya	45
Çin	24	İsveç	108	Slovakya	87
Danimarka	59	İsviçre	78	Suriye	44
Ermenistan	104	İtalya	70	Tayland	23
Estonya	120	Japonya	16	Türkiye	81
Endonezya	12	Kanada	28	Yunanistan	55

2.3.4 Radonun Sağlık Üzerine Etkileri ve Madencilik Faaliyetlerinde Radon

Canlılarda radon gazına maruz kalınması ortamdaki konsantrasyon seviyesine ve maruz kalma süresine göre ciddi bir dahili alfa radyasyonu tehlikesi oluşmaktadır. Bu durum radon gazına direk maruz kalma veya radonun bozunum ürünlerine maruz kalınması yoluyla iki farklı şekilde gerçekleşmektedir. Radon gazı solunduktan sonra akciğerlerde bozunum geçirerek ışınlama yapabilmektedir, ayrıca radon solunmadan önce bozunuma uğrayıp bu ürünlere maruz kalındığında ise akciğerlerde alfa, beta ışımaları yapmaktadırlar ve geçerlilik seviyesi düşük olmasına rağmen alfa ışımaları yayılmayı sürdürerek akciğerin içinde bronşların içyapılarına

geçebilirler. Bu iki durumda da akciğer kanseri riski artmaktadır ve iç ışımalardan kaynaklı kanserli hücre gelişim potansiyeli yükselmektedir. [48,49].

Radon, akciğer kanserinin ikinci önde gelen nedeni olarak tanımlanmaktadır ve Dünya Sağlık Örgütü'nce A sınıfı kansorejen madde sınıfına sokulmuştur Dünya Sağlık Örgütü verilerine göre akciğer kanseri vakaları içinde radon kaynaklı ayırıcı konulmuş tanı % 6 – 15 olduğu belirtilmektedir. [50,51].

2.3.4.1 Madencilik faaliyetlerinde radon

Radona maruz kalmanın ortaya çıkardığı risklerle ilgili nicel bilginin ana kaynağı, birçok farklı madenci grubu arasında binlerce mesleki akciğer kanseri verilerini kullanarak yapılan epidemiyolojik çalışmalarıdır. Radonun solunmasından sonra akciğer kanseri indüksiyonunun epidemiyolojik kanıtı, yeraltı madencilerinin, özellikle de uranyum madencilerinin çeşitli kohort ve vaka kontrol çalışmalarından gelmektedir. Verilerin çoğu, risk ve kümülatif maruziyet arasında orantılı bir ilişki olduğu varsayımıyla tutarlıdır [52].

Uzun maruz kalma süreleri ve çalışılanlar dışındaki popülasyonlar için oluşan riskleri belirlemek amacıyla epidemiyolojik bulgular tahmin edilmelidir. Daha kısa dönemleri kapsayan verilerden yaşam boyu riski tahmin etmek için projeksiyon modelleri kullanılır. Madencilerin epidemiyolojik çalışmalarının sonuçlarına dayanarak, evlerde solunan radon ürünlerinin yol açtığı olası akciğer kanseri riskini tahmin etmek için farklı risk projeksiyon modelleri önerilmiştir [52].

2.4 RADON ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ

Uzun yıllardır radonun ve bozunum ürünlerinin tespiti ve miktarının belirlenmesi için çok çeşitli teknikler kullanılmaktadır. Radon ölçümünde çevresel koşullar sebebiyle farklı gereksinimler mevcut ve duruma göre değişebilmektedir, tüm bu arayışlara cevap verecek tek bir yöntem bulunmamaktadır. Doğru yöntemin seçimi; doğal olarak ortam koşullarına, ölçüm sonucunun hangi amaçla kullanılacağına yani türüne ve cihaz maliyetine göre yapılmaktadır. Kastedilen kullanım amacı; iş ve işçi sağlığı ve güvenliği için yapılan maruz kalınan radon konsantrasyon seviyesinin ölçümü çok döngülü, uzun süreli, entegre ölçümdür veya çevresel radon yayılımı seviyesinin ölçümü için ortamın (toprağın) jeofiziksel özelliklerini dikkate alan sürekli ölçümdür. Bu örnekler çoğaltılabilmektedir.

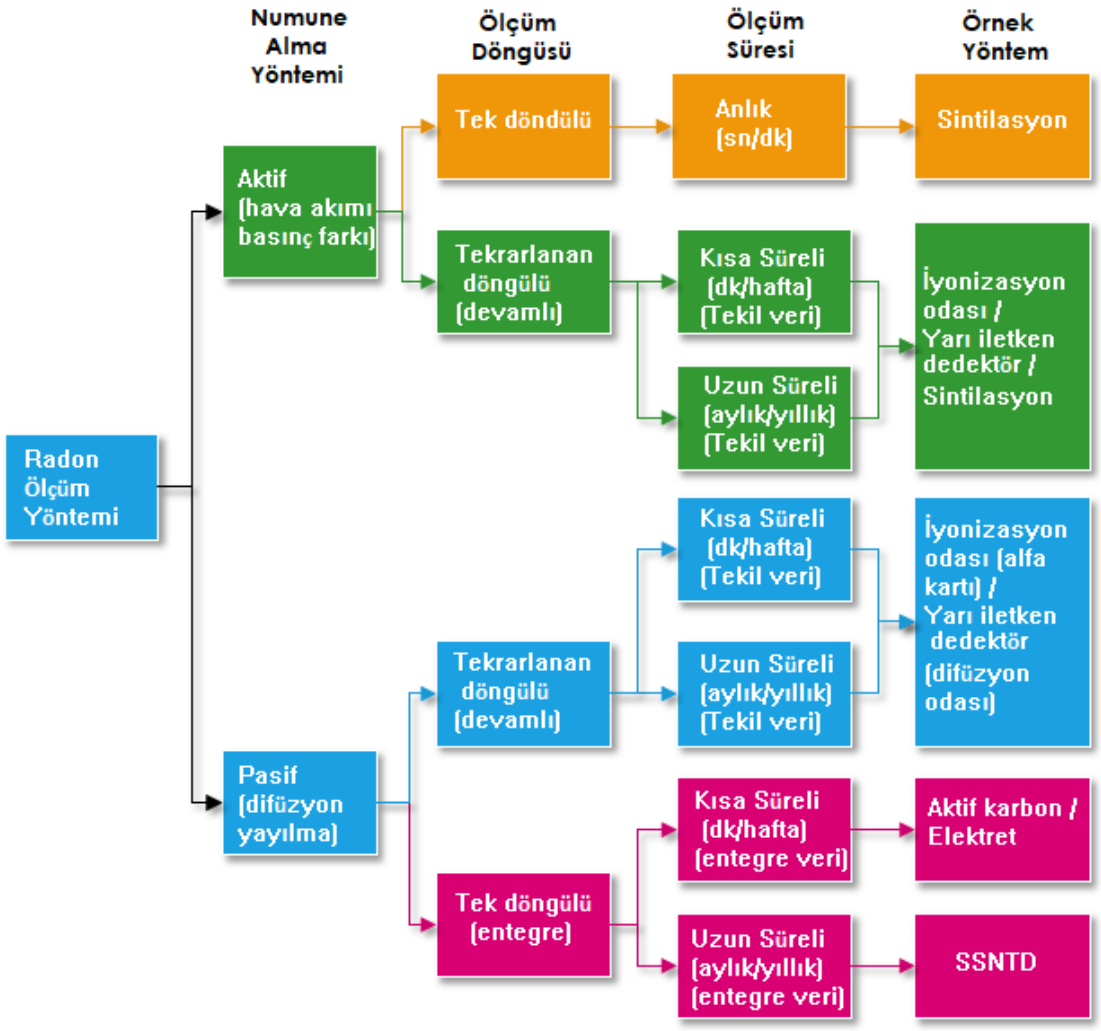
Radon ölçüm yöntemleri çeşitli özelliklerine göre kategorilendirilmektedir. Bunun en başında ölçüm için numune alış biçimine göre aktif ve pasif ölçüm yöntemleri gelmektedir. Aktif yöntemlerde radon ve radon ürünlerinin örneklemesi, güç kaynağı, pompalar, elektronik sistemler kullanılarak örnekleme ile yapılmaktadır ve sintilasyon odaları, iyon odaları, spektroskopik cihazlar kullanılmaktadır. Pasif yöntemlerde ise radon ve radon ürünlerinin örneklenmesi, herhangi bir güç kaynağı olmaksızın doğal difüzyonla yapılmaktadır ve radyoaktif bozunumlarının tespitine dayanmaktadır. Pasif yöntemlerde termolüminesans dedektörler, katı hal izleme dedektörleri, selüloz nitrat (Lr-115), poliallildiglikol karbonat (Cr-39) kullanılmaktadır [2,8].

Kullanılan detektörünün türüne göre bir başka önemli sınıflandırma da yapılabilmektedir; gerçek zamanlı yanıt veren dedektörler (örneğin sintilatörler ve yarı iletkenler) ve gerçek zamanlı yanıt vermeyen dedektörler (örneğin izli dedektörler, aktif kömür ve elektretler). Bu kategorilendirme de ölçüm süresi özelliğine göre anlık, yarı entegre ve entegre olarak yapılmaktadır. Anlık modda, kısa bir zaman ölçeğinde bir gaz numunesi alınmaktadır. Numune daha sonraki radon ölçümü için saklanabilmektedir (örneğin, numune önceden boşaltılmış bir sintilasyon hücresine alınmışsa) veya radonunun hemen ölçülmesini sağlayabilmektedir. İkinci yaklaşımın bir örneği, radonun ürünlerinin minimum iç büyümesiyle mevcut olduğu koklayıcı (sniffer) olarak adlandırılan modda kullanılan radon ölçüm ekipmanında mevcuttur. Bu yöntemler, nispeten kısa bir süre içinde çok sayıda ölçüm yapılmasına izin vermektedir [53].

Yarı entegre modunda, örnekleme ve sayma aynı anda yapılmaktadır ve radon konsantrasyonları düzenli aralıklarla değerlendirilmektedir. Genellikle, örnekleme, ölçüm sisteminin düzenine bağlı olarak numune toplama, difüzyon modu veya pompa bazlı akış modu ile birkaç dakika ila birkaç saat arasında gerçekleşmektedir. Algılama, alfa spektrometresi, iyonizasyon odası yöntemleri veya brüt alfa sayım teknikleri ile gerçekleştirilebilmektedir. Bu tür yöntemler, belirli bir ortamda radon konsantrasyonlarının hızlı değişiklikleri hakkında bilgi elde etmek için kullanılmaktadır. Ek olarak, üstün hassasiyetleri, sistematik hataların büyüklüğündeki azalmaları veya zamanla değişen bir sinyali ölçme kabiliyetleri (örneğin, çalışılan sistemdeki günlük değişimler nedeniyle) nedeniyle anlık moda göre tercih edilebilmektedir [53].

Entegre modu, örnekleme süresi için zamana entegre edilmiş bir radon konsantrasyonu sağlamaktadır (tipik olarak haftalar veya aylar). Bu modda çalışan örnekleme teknikleri, ölçüm

ortamını etkileyen her alfa parçacığının entegre bir kaydını tutmaktadır. Numune alma sahasından çıkarıldıktan sonra, analiz edilene kadar maruziyet bilgilerini muhafaza etmeleri gerekmektedir [53].

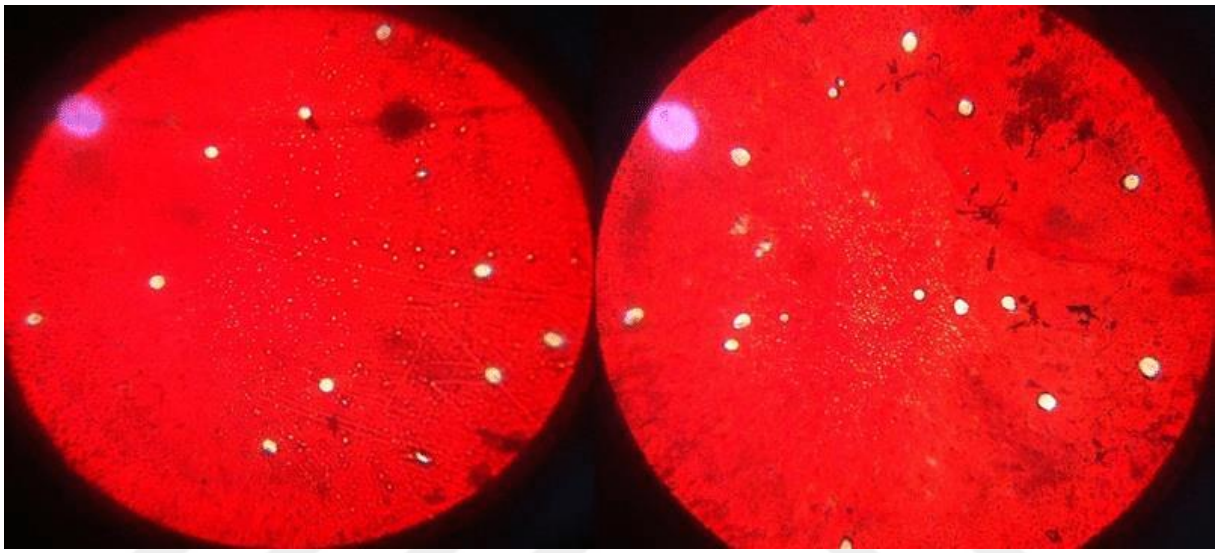


Şekil 2.14: Radon ölçüm yöntemleri[54]

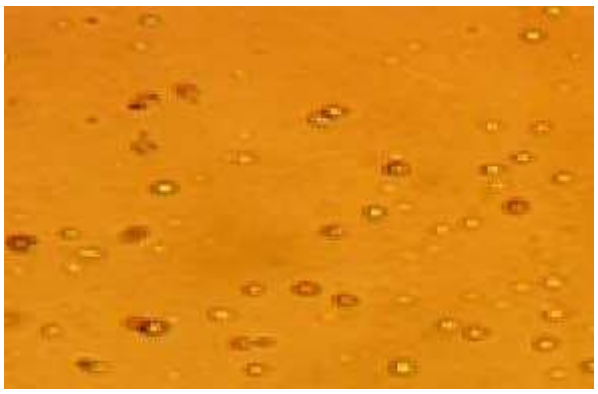
2.4.1 Katı Hal Nükleer İzleme Dedektörleri

Katı hal nükleer izleme dedektörleri (SSNTD) pasif, entegre edici, hafif ve nispeten ucuz radon dedektörleridir. İşlemleri, selüloz nitrat (Lr-115) (Şekil 2.15), polikarbonat veya alil diglikol karbonat (CR39) (Şekil 2.16) gibi seçilmiş bir film malzemesinin kullanımına dayanmaktadır. Filme çarpan alfa parçacıkları mikroskobik hasar izleri bırakmaktadır. Pozlamanın ardından, iz yoğunluğunun (alan birimi başına iz sayısı) optik mikroskobi veya otomatik tarama ile kolayca belirlenebilmesi için, izlerin boyutunu artırmak için film alkali bir çözelti (tipik olarak NaOH

veya KOH) içinde oyulmaktadır ve sayılmaktadır. Kısa entegrasyon zaman ölçeklerindeki nispeten düşük hassasiyetleri nedeniyle, nükleer izleme dedektörleri toprak akı yoğunluğu ölçümlerinden çok toprak gazı radon ölçümlerine daha uygundur. SSNTD'ler alfa parçacıklarına duyarlıdır, ancak beta ve gama ışınlarına tamamen duyarsızdır. Nem, düşük sıcaklık, orta derecede ısınma ve ışıktan etkilenmemesi gibi özellikleri mevcuttur ve çalıştırılması için enerji gerektirmemektedir [53,55].



Şekil 2.15: Selüloz nitrat (Lr-115) [64]



Şekil 2.16: Alil diglikol karbonat (CR39 [65]

2.4.2 Alfa Kartı

Alfa kart sistemi, gaz halinde hassas bir radon ölçümü sağlayan pasif bir radon algılama yöntemidir. Kart yere yatırılır, ters çevrilmiş bir kapta asılmaktadır, 12 saatten birkaç güne kadar yerinde bırakılmalıdır. Algılama hacmine girdikten sonra, radon bozulur ve ürünleri ince bir zar üzerinde aktif bir tortu oluşturmaktadır ve alfa kart daha sonra alınıp okunmaktadır.

Okuma cihazı, yalnızca alfa parçacıklarına duyarlı, birbirine bakan ve arasına kartın yerleştirildiği iki silikon detektör içermektedir. Bu şekilde, iyi bir sayım verimliliği elde edilmektedir. Okuyucu, sahada kullanılabilecek küçük, portatif bir ekipmandır[56].

2.4.3 Elektret Dedektörleri

Elektret radon dedektörü (Şekil 2.17), hem elektrostatik alan kaynağı hem de sensör olarak hizmet veren elektrik yüklü bir teflon disktir. Dedektör bölmesindeki alfa bozunmaları, bölmedeki havanın iyonlaşmasına ve bunun sonucunda elektrette yükün azalmasına neden olur. Ölçüm süresi boyunca elektret voltaj düşüşü, radon konsantrasyonunu ölçmek için kullanılır. Elektretler, pasif, entegre, hafif ve nispeten ucuz radon dedektörleridir. Çeşitli avantajları, bilgileri nispeten uzun bir süre boyunca saklama yeteneği, ortamdaki nemden bağımsız olması ve okuma kolaylığıdır. Dezavantajları ise tepki eğrisi çok düşük veya çok yüksek dozları etkili bir şekilde kapsamaz ve bazı durumlarda önemli hatalara neden olan ve hatta kullanımlarını engelleyen gama radyasyonu geçmişine duyarlıdır [53].



Şekil 2.17: Elekteret ve elekteret okuyucu [66]

2.4.4 Aktifleştirilmiş Odun Kömürü

Aktif kömür, radonun adsorbe edilebileceği pasif bir ortam olarak kullanılmaktadır. Kömür bir teneke kutuda tartılmaktadır ve test edilecek havaya maruz kalana kadar kapatılmaktadır. Maruz kalma süresi, karşılaşılması beklenen radon seviyesine ve gerekli tespit limitine bağlı olarak birkaç saatten birkaç güne kadar değişebilmektedir. Maruz kalmanın ardından, kutular tekrar kapatılır ve radon aktivitesi, en yaygın olarak gama spektrometresi ile belirlenir ancak sıvı sintilasyon radon ekstraksiyonunu takiben kullanılabilmektedir. Kömür bidonları basit, pasif, sağlam ve düşük maliyetlidir ve makul bir süre içinde (yani birkaç gün) görece çok sayıda ölçüm yapılmasına izin vermektedir. Radonu adsorbe etme kapasiteleri suyun adsorpsiyonuyla azalır, bu nedenle ıslak veya nemli ortamlar için daha az uygundur [53].

2.4.5 Termolüminesan Dedektörler

Isıtmadan sonra ışın yayma prensibine dayanarak, birkaç termolüminesan dedektör (TLD'ler) oluşturulmuştur. Bu dedektörleri kullanarak radonu tespit etme fikri, radon ürünlerinin alfa aktivitesini kaydetme yeteneğine bağlıdır [57].

2.4.6 Katı hal bariyer dedektörleri (alfa spektrometresi)

Alfa spektrometresi kullanarak radonu tespit etmek için katı hal yüzey bariyer dedektörlerinin kullanılması aktif bir tekniktir. Sıralı iki filtre ile silindirik bir sistemden hava çekmektir. Birinci filtrenin amacı, partikül aktivitesini, özellikle havada bulunan radon ürünlerini uzaklaştırmaktır. Daha sonra, radon bozunumunun meydana geldiği iki filtre arasında bir gecikme olmaktadır. Bu ürünler daha sonra yüzey bariyer detektörüne bakan ikinci bir filtrede toplanmaktadır. Diğer bir yaklaşım, bozunma ürünlerinin metal bir oda içine yerleştirilmiş ve negatif bir potansiyelde tutulan bir metal yüzey üzerinde toplanmasını içermektedir. Metal yüzey üzerinde toplanan pozitif yüklü polonyum 218 aktivitesi daha sonra yüzey bariyeri detektörü kullanılarak sayılmaktadır. Her iki durumda da, ölçüm sisteminin havadaki radon ürününün içe doğru büyümesine izin verdiği sürenin bilgisi, radon konsantrasyonunun hesaplanmasını sağlamaktadır. Alfa spektrometresinin bir avantajı, farklı alfa enerjilerine sahip oldukları için radon ve toron soylarının sinyallerini spektral olarak ayırma yeteneğidir. Katı hal bariyeri dedektörleri, düşük bir algılama sınırına ulaşılmasını sağlayan çok düşük iç arka planlara sahiptir. Diğer avantajları arasında kompakt boyutları, yüksek enerji çözünürlüğü ve sağlamlığı bulunmaktadır. Dezavantajlar ise, bir elektrik güç kaynağının ve ilgili elektronik

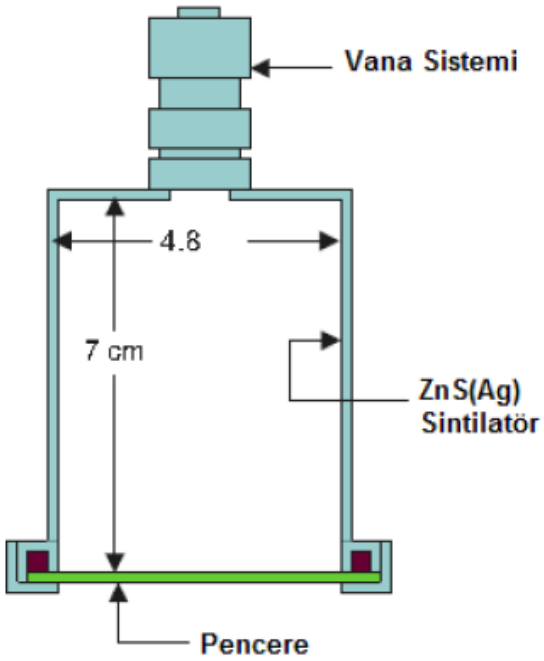
ekipmanın gerekliliğini ve alfa spektrometre tespit sistemlerinin nispeten yüksek maliyetini içermektedir [53,58].

2.4.7 Aktif Karbon Dedektörleri

Hava, radon gazının aktif karbon tarafından adsorbe edildiği bir kutuda yayılmaktadır. Örnekleme 2–4 gün sürer; daha sonra aktif karbona yakalanan radon ürünleri tarafından yayılan gama ışınları sintilasyon detektörü vasıtasıyla sayılmaktadır (Tablo 2.10)[56].

2.4.8 Lucas Hücreleri

Anlık ölçümler için kullanılan lucas hücreleri (Şekil 2.18) içten gümüşle aktive edilmiş çinko sülfür (ZnS) ile kaplanmış cam, metal veya şeffaf plastik hücrelerden oluşmaktadır. Örneklemeden hemen önce hücre tahliye edilir ardından numune alınacak hava filtre edilerek hücreye bırakılmaktadır. Bu filtre sayesinde içeriye radyoaktif olarak sadece radon gazı girmektedir. En az 3 saatlik gecikmeden sonra hücrede, bir fotoçoğaltıcı tarafından radonun ve ürünlerinin yaydıkları alfa parçacıkları hücre duvarlarına çarparak sintilasyon meydana getirir ve optik temasa geçilerek sayılmaktadır. Sistemin hassasiyeti yaklaşık 4 $Bq.m^{-3}$'tür [59].



Şekil 2.18: Lucas hücresi şematik gösterimi [66]

2.4.9 Markov Yöntemi

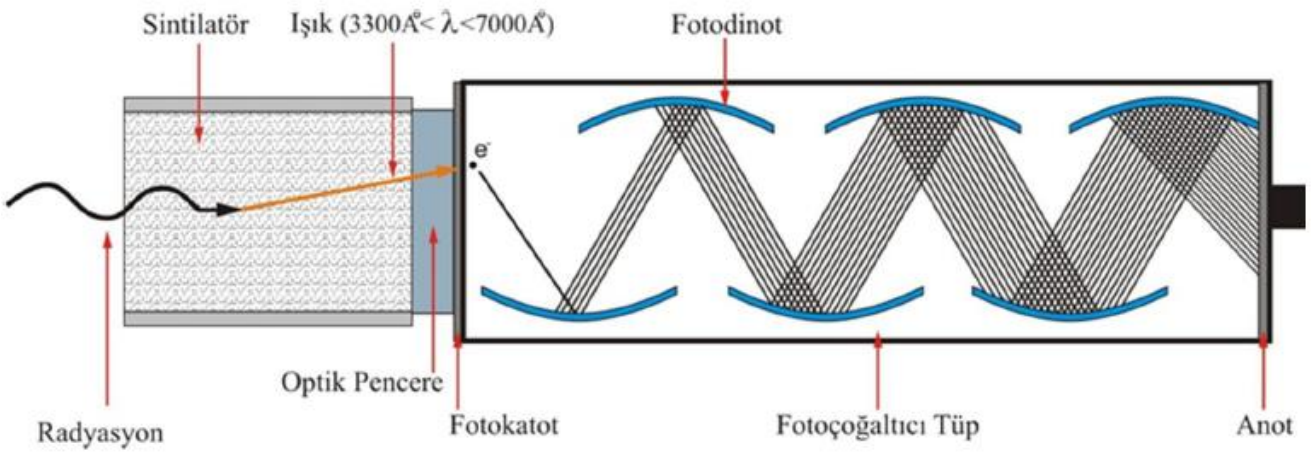
Bu yöntem, önceden aspire edilen bilinen bir hava hacminin olduğu bir cam elyaf filtreden iki ardışık alfa parçacıklarının sayılmasına dayanmaktadır. Bu teknik, potansiyel alfa enerji konsantrasyonunun ölçümünü sağlamaktadır [58].

2.4.10 Havada Radon Ölçümü İçin Örnekleme Yöntemleri

Yöntemler ve enstrümantasyon, elle örnekleme, sürekli ve zaman bütünleştiren izleme olarak izleme türüne göre sınıflandırılabilir.

2.4.10.1 Sintilasyon hücresi

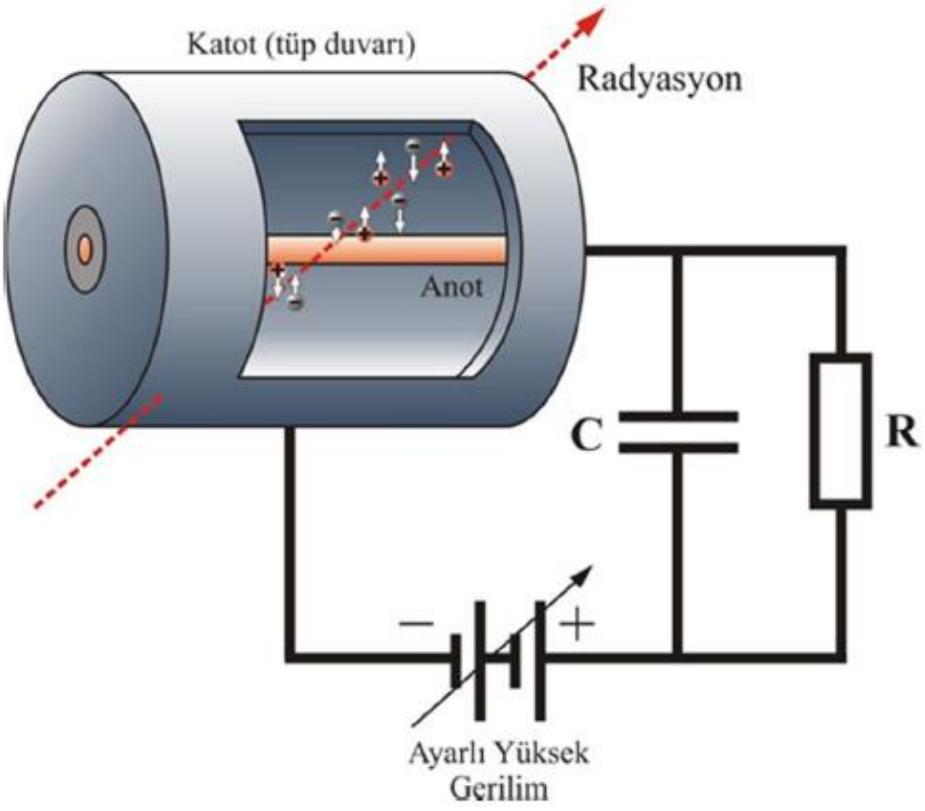
Sintilasyon hücre tekniği (Şekil 2.19), uygulamalarda en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir (Tablo 2.10). Sintilasyon hücreleri, dahili olarak kaplanmış silindirlerdir. Sintilasyon malzemesi, genellikle gümüşle aktive edilmiş çinko sülfür tozu, şeffaf bir uç pencereye sahiptir. Alfa parçacıklarının sintilasyon materyali ile etkileşimi, uç pencereye bitişik bir fotoçoğaltıcı tarafından algılanıp yükseltilen ve elektronik bir cihaz tarafından sayım hızına dönüştürülen ışık fotonlarının üretimine neden olmaktadır. Sintilasyon hücreleri, kapalı veya akış düzeninde çalıştırılabilmektedirler. Yaygın olarak hava, özellikle sistemlerin içinden akışta hücreye girmeden önce bir filtreden geçer; bu giriş havasında bulunan radon ürünlerinin yanı sıra tozun giderilmesi içindir. Kısa ömürlü radon ürünlerinin çıkarılması, ölçüm sistemindeki büyümelerinin güvenilir bir şekilde hesaplanmasına izin vermektedir. Radonu ve toronu sintilasyon hücrelerini kullanarak, radon bozunması için bir gecikme çizgisine sahip iki hücre kullanarak programlanmış sayımla veya ardışık alfa parçacıklarını tanımlamak için çift sayma tekniğini kullanarak ayırt etmek mümkündür. Hücreler ayrıca sağlam ve nispeten düşük maliyetlidir ve toron konsantrasyonunun hızlı bir şekilde değerlendirilmesine izin vermektedir. Sintilasyon hücrelerinin bir dezavantajı, kullanımla birlikte arka planında hücre içinde kurşun 210 ve alfa yayan polonyum 210 birikmesidir. Bu, çinko sülfür eleğin periyodik olarak değiştirilmesiyle çözülmektedir. Diğer bir dezavantaj, çift sayma yaklaşımı kullanılarak radon ve toron'un ikili ölçümünün, radon konsantrasyonunun toron konsantrasyonundan çok daha düşük olduğu durumlarla sınırlı olmasıdır Sintilasyon hücreleri, bir pompa kullanılarak tahliye veya hava akışı ile doldurulabilir. Daha düşük algılama seviyesi, hücre boyutu, malzeme türü ve sayım aralıkları gibi birkaç parametreye bağlıdır. Tipik cihazlar için 3,7 $Bq.m^{-3}$'lük bir hassasiyet rapor edilmiştir [53,58].



Şekil 2.19: Sintilasyon hücresi [67]

2.4.10.2 İyonlaşma odaları

Radonu ölçmek için kullanılan iyonlaşma odaları (Şekil 2.20), merkezi bir toplama anodu ile inşa edilmiş kapalı metal silindirlerdir. Silindir içerisinde bulunan çeşitli radon ürünlerinin doğal radyoaktif bozunması sırasında yayılan alfa parçacık enerjisinin elektrotlar üzerinde toplanması ve bir elektrometre vasıtasıyla iyon akımı olarak ölçülmesi prensibiyle çalışan hassas ölçüm sistemleridir. Bu üniteler kapalı veya akış modunda çalıştırılabilmektedir ve hazne hacmine bağlı olarak 4 $Bq.m^{-3}$ kadar düşük algılama sınırlarına ulaşabilmektedirler. Cihaz, alfa darbe sayımı veya iyonizasyon akımı ölçümü ile çalıştırılabilmektedir ve radon ürünleri de dahil olmak üzere atmosferik aerosolleri gidermek maksadıyla sayacı filtrelenmiş hava ile doldurmak için özel teknikler kullanılmaktadır. Akış iyonizasyon odaları hem laboratuvar uygulamaları için kullanılabilir hem de saha cihazları olarak ancak aslen laboratuvar cihazlarıdır. Örnekler sahada toplanır ve sayım için iyonizasyon odalarına aktarıldıkları laboratuvar testi için geri gönderilmektedir [53,58].



Şekil 2.20: İyonlaşma odası şematik gösterimi [67]

2.4.10.3 İki filtreli yöntem

Cihaz, her iki uca filtre tutucularla takılan silindirik bir borudan ve hava çekmek için bir pompadan oluşmaktadır. İlk filtre yalnızca radon ve diğer atmosfer gazlarının girmesine izin vermektedir. Hazne içinde oluşturulan iç radon ürünleri çıkış filtresi üzerinde toplanır. Havadaki radon konsantrasyonu ile orantılı olan çıkış filtresinin aktivitesi alfa sayma cihazları ile ölçülür: ZnS (Ag) sintilasyon detektörleri veya katı hal bariyer detektörleri. İki filtreli teknik, işyerlerinde kısa süreli örnekleme için veya çok düşük seviyelerde radon konsantrasyonlarının sürekli dış mekanda izlenmesi için kullanılabilmektedir [58].

2.4.11 Havada Radon Ölçümü İçin Entegre Örnekleme Yöntemleri

Radon konsantrasyonunun sürekli izlenmesi hem araştırma hem de radyasondan koruma amaçları için kullanılmaktadır. Ana uygulamalar, iyileştirici eylemler için radon kaynaklarının

teşhisi, ortam radon konsantrasyonu ve toprak gazı radon seviyelerinin varyasyonlarının ölçülmesiyle ilgilidir. Genelde iki farklı örnekleme yöntemi kullanılmaktadır.

2.4.11.1 Difüzyon örneklemeli entegre radon ölçümü

Difüzyon radon ölçümü, örnekleme için güç kaynağı gerektirmeyen, ancak alfa parçacıklarını saymak için elektronik devrelerden yararlanan bir yöntemdir (Tablo 2.10). Radon gazı, bir filtreleme cihazı aracılığıyla moleküler difüzyon ile aletin hacmine girmektedir. Hacim içindeki radonun bozunmasından kaynaklanan radon ürünleri sintilasyon veya bir yüzey bariyeri detektörü ile sayılmaktadır. Hassasiyeti artırmak için radon bozunum ürünleri, elektrostatik bir toplayıcı ile dedektör yüzeyine odaklanabilmektedir. Elektrostatik toplamanın verimliliği, nemli atmosferdeki iyonların etrafında su moleküllerinin toplanmasıyla azaltılan partikül hareketlerine bağlıdır. Bu cihazları havanın nem içeriğinden bağımsız hale getirmek için silika jel yatakları kullanılır [58].

2.4.11.2 Akış örneklemeli entegre radon ölçümü

Hava pompa ile çift musluklu sintilasyon hücresinden sürekli olarak çekilmektedir (Tablo 2.10). Belirli bir aralıkta kaydedilen toplam sayımlar, radon konsantrasyonunun aralık boyunca toplanan ürünlerinin aktivitesinin bir fonksiyonudur. Bu etki, radon konsantrasyonunun hızlı değiştiği durumlarda özellikle önemlidir. Radon konsantrasyonunun değişmesiyle birlikte, sintilasyon hücreleri içindeki radon ürünlerinin birikmesi kalibrasyon sırasında dikkate alınmalıdır. Radon konsantrasyonlarındaki hızlı değişiklikleri izlemek için katı hal bariyer dedektörüne dayalı özel bir cihaz geliştirilmiştir [60].

2.4.12 Zaman Entegreli Radon Ölçümü

Zamanı entegre eden ölçümler, maruz kalma süresi boyunca ortalama radon konsantrasyonunu ölçmektedir. Radonun ve ürünlerinin filtreleme cihazı aracılığıyla difüzyonuna ve yaydıkları radyasyonların aktif sayma cihazları olarak sintilasyon ZnS (Ag) veya silikon yüzey bariyer dedektörü kullanılarak ölçülmesine dayanan çeşitli cihazlar geliştirilmiştir [61].

2.4.13 Toprakta Radon Ölçümleri

Plastik parça dedektörleri, selüloz nitrat filmler (LR-115 tip 2) (Şekil 2.15) ve CR-39 (Şekil 2.16) tabakaları radon tarafından üretilen alfa parçacığı izlerini kaydetmek için çok hassastır.

Plastik izleme dedektörleri, nispeten daha uzun sürelerde (haftalar ila aylar arasında) radon izotoplarının ortalama değerini kaydedebilmektedir, ancak yalnızca birkaç saat veya daha kısa süren geçici değişikliklere karşı duyarsızdır.

2.4.13.1 Track-etch yöntemi

Track-etch tekniği, önemsiz yanıltıcı sinyaller arka planı, düşük maliyeti, sağlamlığı ve bütünleştirici bir ölçüm olarak doğası nedeniyle toprak gazında radon tespiti için oldukça uygundur. Dedektör tertibatı, deliğinin dibine yakın dikey konumda durur ve radon bozunması alfa parçacıkları dedektör filmlerine çarparak radyasyon hasarı izlerini bırakmaktadır. LR-115 filmler (Şekil 2.15), duruma göre bir hafta veya ay sonra toplanabilir ve 60°C'de 2 saat boyunca NaOH çözeltisi kullanılarak sabit sıcaklık banyosunda tespit edilmektedir. Alfa izleri, uzun süreli aşındırmadan sonra kazınmış delikler haline gelen dairesel veya konik noktalar olarak ortaya çıkmaktadır. İz noktaları veya delikler, uygun bir büyütme altında bir mikroskop kullanılarak sayılacaktır. Ölçülen iz yoğunluğunun, toprak gazındaki ortalama radon içeriği ile orantılı olduğu varsayılmaktadır [62].

2.4.13.2 Radon emanometresi

Radon emanometre, toprak gazındaki anlık radon konsantrasyonunu ölçmek için kullanılmaktadır. Cihaz, ters çevrilmiş çan şekilli alfa detektörlü bir alfa sayım sintilasyon tertibatından, elle çalıştırılan bir kauçuk pompasından ve bir toprak gazı sondasından oluşmaktadır. Sonda, alt ucunda delikler ve bir burgu deliğinde pnömatik olarak sızdırmaz hale getirmek için üstte kauçuk bir başlık bulunan yaklaşık 4 cm çapında metal bir tüptür. Toprak gazının dolaşımı için giriş ve çıkış boruları vardır. Elle çalıştırılan kauçuk pompa, toprak gazını sintilasyon odasına dolaştırmak için kullanılmaktadır. Radondan çıkan alfa parçacıkları, ZnS (Ag) sintilatörlerine çarparak ışık kuantumu şeklinde bir enerji oluşturur ve sintilasyon düzeneği ile kaydedilir. [63].

2.4.13.3 Silikon difüzyonlu bağlantı detektörü

Yüzeye yakın radon gazı dalgalanmalarını ölçmek için tasarlanmıştır. Alfa parçacıklarının tespiti için silikon difüzyonlu bağlantı noktasından oluşur ve çoğu toprağın 24 saatlik maruziyette yeterli sayımı gerçekleştirmektedir [61].

Tablo 2.10: Radon ölçüm ve dedeksiyon yöntemleri [68]

Metot Adı	Çekirdek	Dedektör	Örnekleme Cihazı	Örnekleme Süresi
Aktif kömür yüzeyinde tutma	Radon gazı	Sintilasyon	Aktif kömür	2-7 gün
İz dedektörü (filitrelenmiş)	Radon gazı	İz dedektörü	Filtreli difüzyon kabı	3-12 ay
İz dedektörü (filitrelenmemiş)	Radon gazı	İz dedektörü	Filtresiz difüzyon kabı	2-12 hafta
Kömür/sıvı sintilasyon	Radon gazı	Sintilasyon	Aktif kömür	2-7 gün
Sürekli radon sayımı	Radon gazı	Sintilasyon/ İyon odası	Sayım odası / pompa	Anlık
Elektrostatik disk dedektör/ İyon odası	Radon gazı	Yarıiletken dist dedektör	Filitreli iyon odası	1-12 ay
Aktif kömür	Radon gazı	Sintilasyon	Pompa/Vana	15-60 dakika
Sintilasyon hücresi	Radon gazı	Sintilasyon	Negatif basınç göstergesi/ Vana	3 gün
Sürekli seviye belirleme	Radon ürünleri	Yarıiletken	Pompa/filtre	72 saat

3. MALZEME VE YÖNTEM

Radon gazının insan sağlığı üzerine zararlı etkileri olduğu yapılan çalışmalarla ortaya çıkmıştır. Özellikle yeraltında yapılan madencilik ve tünel inşası gibi iş kollarında bölgesel kaya birimlerinin mineralojik özelliklerine bağlı olarak radon gazı konsantrasyonunun yoğun olduğu noktalarda çalışan işçiler çalışma alanlarında yoğun bir şekilde radon gazı salınımına maruz kalmaktadır. Bu durum çalışma alanlarında radon konsantrasyonların belirlenmesini ve insan sağlığı açısından sınır değerlerle karşılaştırılarak kontrol altına alınması gibi bir ihtiyacı doğurmuştur. Tez kapsamında inşa halindeki bir metro tünellerinde radon konsantrasyonu aktif radon ölçüm yöntemiyle alınarak sınır değerlerle karşılaştırılmıştır. İstanbul ili sınırları içerisinde bulunan ve inşaat süreci devam etmekte olan Çekmeköy Sancaktepe Sultanbeyli metro hattındaki tünellerde yapılan havadaki radon konsantrasyon ölçümleri, İstanbul Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü katkılarıyla kullanılan Durridge Rad 7 aktif radon izleme monitörü ile yapılmıştır.

3.1 ÇALIŞMA SAHASI

İstanbul ili sınırları içerisinde, Anadolu yakası bölgesinde İstanbul Büyükşehir Belediyesi Raylı Sistem Daire Başkanlığı Anadolu Yakası Raylı Sistem Müdürlüğü idaresinde Doğuş İnşaat – Özaltın İnşaat – Yapı Merkezi İnşaat yükleniciliğiyle Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli (CSS) Metrosu Üsküdar-Üsküdar-Çekmeköy Metro hattının devamı şeklinde yapılmaktadır ve 10.910 km uzunluğundaki güzergahta Tünel Sondaj Makinası (Tunnel Boring Machine – TBM) ve Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (New Austrian Tunneling Method – NATM) yapım tekniğiyle gerçekleştirilecek tüneller ile Meclis Mahallesi İstasyonu'ndan başlayarak Sultanbeyli İstasyonu'na ulaşmaktadır. Hat üzerinde 8 adet istasyon bulunmaktadır. İstasyonlar; Meclis Mahallesi İstasyonu, Sarıgazi İstasyonu, Samandıra İstasyonu, Abdurrahman Gazi İstasyonu, Sancaktepe İstasyonu, Veysel Karani İstasyonu, Hasanpaşa İstasyonu, Sultanbeyli İstasyonu şeklinde sıralanmaktadır (Şekil 3.1).

Tez kapsamında yapılan radon konsantrasyonu ölçümü Meclis Mahallesi İstasyonu ve Sarıgazi İstasyonu tünellerinde kazı çalışma alanlarında yapılmıştır (Şekil 3.2).



Şekil 3.1: Çekmeköy Sancaktepe Sultanbeyli metrosu ve Hastane Taşdelen Yenidoğan metrosu



Şekil 3.2: Meclis Mahallesi İstasyonu ve Sarıgazi İstasyonu

3.1.1 Meclis Mahallesi İstasyonu

Çekmeköy Sancaktepe Sultanbeyli Metro Hattı projesinin (Raylı sistem hattı üzerinde Km:0.000 kazı – tünel başlangıç noktası ile Km: 10.910 kazı – tünel bitiş noktası arası ve Km:0.000 ile Km: 6.961 ana hat tünel imalatı yapılmaktadır ve atanan Km değerleri projenin teknik ölçüm, ilerleme durumunu kontrol etmek için kullanılmaktadır) 0.699 – 0.839

kilometreleri arasında yapılan kazı çalışmalarını kapsamaktadır. Saha jeolojisi ise Pendik formasyonu Kartal üyesine aittir. Alt – Orta Devoniyen yaşlı Pendik formasyonu Kartal Üyesine (Dpk) ait ağırlıklı olarak kiltaşı, kiltaşı – şeyl ardalanması şeklinde olması beklenmektedir. Yapılan sondaj çalışmalarında birim içerisinde yer yer dayk sokulumlarına rastlanmıştır. Birimin dayanım aralığı orta sert-zayıf aralığında beklenmektedir. Yer yer çok ayrışmış kesimler de beklenebilir. Pendik formasyonu Kartal üyesinde (Dpk) yapılan pressiyometre deneyi sonuçları, karot yüzdesi (TCR), kaya kalite değeri (RQD) ve ve kaya mekaniği deney sonuçları aşağıdaki gibi beklenmektedir.

Karot Yüzdesi (TCR)	% 95-100
Kaya Kalitesi (RQD)	% 55-90
Pressiyometre limit basıncı (Pln)	45 kg/cm^2
Pressiyometre modülü (Ep)	3 171 kg/cm^2
Tek Eksenli Basınç Dayanımı (qu)	$1.50 \leq qu \leq 40.70$ MPa
Birim Hacim Ağırlık (γn)	$1.89 \leq \gamma n \leq 2.79$ MPa

Pendik formasyonu Kartal üyesinin Çok – Tümüyle Ayrışmış seviyelerinde (Dpk/W5) yapılan standart penetrasyon deneylerinden (SPT) elde edilen örselenmiş örnekler üzerinde gerçekleştirilen laboratuvar deneylerine ait sonuçlar ve pressiyometre deneyi sonuçları aşağıdaki verilmiştir.

SPT (N)	$11 \leq$ SPT (N) $\leq$ R
Su içeriği (Wn)	$\% 7 \leq Wn \leq \% 29$
Likit limit (LL)	$\% 33 \leq LL \leq \% 51$
Plastisite İndeksi (PI)	$\% 16 \leq PI \leq \% 30$
4 nolu elek üstünde kalan (+4)	$\% 0 \leq + 4 \leq \% 44$
200 nolu elekten geçen (–200)	$\% 7 \leq - 200 \leq \% 99$
Zemin sınıfı (USCS)	CL, CH, CL/CH, SM, GM, GP – GM
Pressiyometre limit basıncı (Pln)	15 kg/cm2 $\leq$ Pln $\leq$ 58 kg/cm2
Pressiyometre modülü (Ep)	207 kg/cm2 $\leq$ Ep $\leq$ 1000 kg/cm2



Şekil 3.3: Meclis Mahallesi istasyonu kazı işler

3.1.2 Sarıgazi İstasyonu

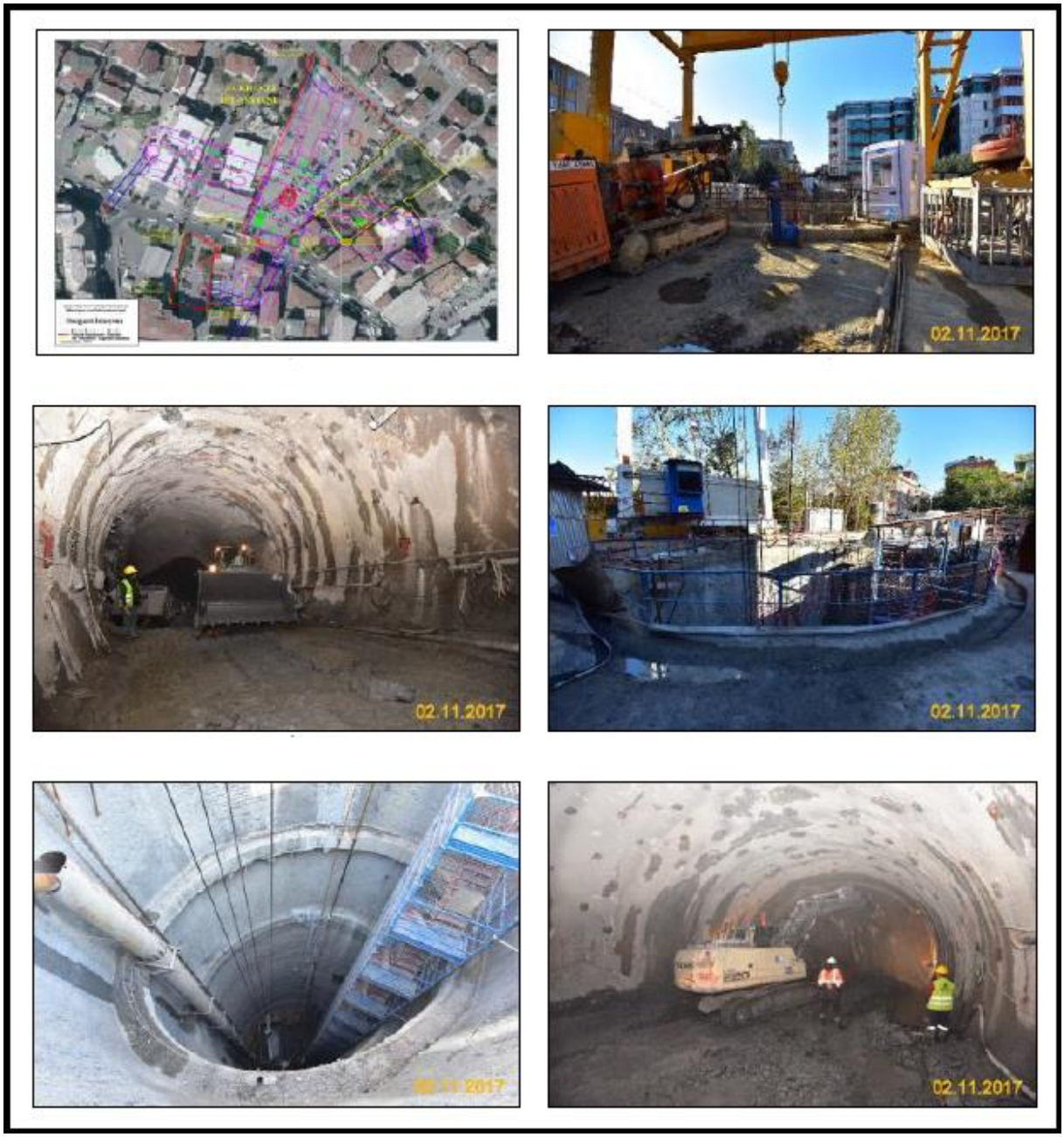
Çekmeköy Sancaktepe Sultanbeyli Metro Hattı projesinin 1.895,00 – 2.035,00 kilometreleri arasında yapılan kazı çalışmalarını kapsamaktadır. Saha jeolojisi ise Sultanbeyli formasyonu Dudullu üyesine aittir. Sultanbeyli Formasyonu Dudullu Üyesine (Tsd) ait birim izlenmektedir. Birim genel olarak; çakıllı kumlu kil, kumlu siltli kil, çakıllı / killi kum, killi kumlu çakıl seviyelerini barındırır. Sultanbeyli Formasyonu Dudullu Üyesi (Tsd) birimi içerisinde yapılan

SPT deneylerinden elde edilen örnekler üzerinde gerçekleştirilen laboratuvar deneyleri ile pressiyometre deney sonuçlarına ait sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

SPT (N)	$2 \leq$ SPT (N) ≤ 83
Su içeriği (Wn)	% 7 $\leq$ Wn $\leq$ % 30.6
Likit limit (LL)	$24 \leq$ LL ≤ 57
Plastisite İndeksi (PI)	$13 \leq$ PI ≤ 32.1
4 nolu elek üstünde kalan (+4)	% 0.3 $\leq +4 \leq$ % 50
200 nolu elekten geçen (–200)	% 3.1 $\leq -200 \leq$ % 98.5
Zemin sınıfı (USCS)	CL, CH, SC, SM, SW – SM, GC, GM, GP – GM
Pressiyometre limit basıncı (Pln)	4.2 kg/cm2 $\leq$ Pln $\leq$ 29.8 kg/cm2
Pressiyometre modülü (Ep)	75 kg/cm2 $\leq$ Ep $\leq$ 734 kg/cm2

Bu formasyonun da altında istasyon tabanına kadar Üst Silüriyen – Alt Devoniyen yaşlı Pelitli Formasyonu Soğanlık Üyesi (SDpsğ) olan birim yer almaktadır. Birim ağırlıklı olarak killi kireçtaşları ile temsil edilir. Bu birimler gri – koyu gri renkli, orta sert – sert, orta – zayıf dayanımlı, orta derecede – yer yer çok – yer yer tümüyle ayrışmış; özelliktedir. Bu birimlere ait süreksizlikler; 0^o – 90^o, açık, parlak – mat, pürüzlü – pürüzsüz - kaygan, düzensiz, kil – kalsit dolgulu, kapalı, 15^o – 90^o, seyrek – orta sık – yer yer çok sık, düzensiz, maksimum 10 cm'ye varan, kalsit dolguludur. Pelitli formasyonu Soğanlık üyesinde (SDpsğ) yapılan pressiyometre deneyi sonuçları, karot yüzdesi (TCR), kaya kalite değeri (RQD) ve ve kaya mekaniği deney sonuçları aşağıda sunulmaktadır.

Karot Yüzdesi (TCR)	% 80- 100 geçiş zonlarında %50-60
Kaya Kalitesi (RQD)	% 40-60 geçiş zonlarında %0
Tek Eksenli Basınç Dayanımı (qu)	4.9 MPa $\leq$ qu $\leq$ 33.4 MPa
Birim Hacim Ağırlık (γn)	2.63 (gr/cm3) $\leq \gamma n \leq$ 2.73 (gr/cm3)



Şekil 3.4: Sarıgazi İstasyonu kazı işleri

3.1.3 Havalandırma Sistemi

Havalandırma sistemleri yüksek radon konsantrasyonuna karşı alınabilecek en iyi önlemlerden bir tanesidir. Basınç ve konsantrasyon farkına dayanan bir akış oluşturarak havada biriken radon gazını dağıtıp dengelemektedir. Tünel içi radon konsantrasyonlarını ölçümü yapıldığı sırada her iki tünelde aynı havalandırma sistemi kullanılmaktadır. Alfer marka standart radyal

tip havalandırma sistemi kullanılmakta, ilerlemeye mütakip fan tüplerle ilerlenerek çalışılan tünel aynasına güncellenmektedir. Alfer standart radyal tipi fan özellikleri (şekil 3.5);

Gamak marka GM2E 280 S 4 model elektrik motoru kullanılmıştır. Motor özellikleri; 75 Kw elektrik motoru, 75 – 90 kw'lık ABB ACS 550 serisi motor sürücüsü ile devir ayarlı olarak çalışmaktadır, Maximum devir 1475 d/dk'dır (şekil 3.6).

60.000 m3 /h Debi

300 mmSS Toplam Basınç

40 ºC İşletme Sıcaklığı

Çift ve Tek Emişli Dizayn

Motora Direkt Akuple, Kayış Kasnaklı ve Kaplin Tahrik Şekilleri

Tozlu Hava Sevkiyatı için Aşınmaya Dayanıklı İmalatlar

Standart ve Normlara Uygun Olarak Hassas Tezgahlarda DIN 10816-1 Normuna Uygun Statik ve Dinamik Balans İşlemi

Hava Ayar Damperleri, Drallregler Klape İmalatları

Oransal Kontrollü veya On/Off Klape Actuatörleri

Susturucu, Kompanzatör, Emiş Filtresi İmalatları



Şekil 3.5: Standart radyal fan

Tablo 3.1: Gamak GM2E 280 S 4 model elektrik motoru özellikleri

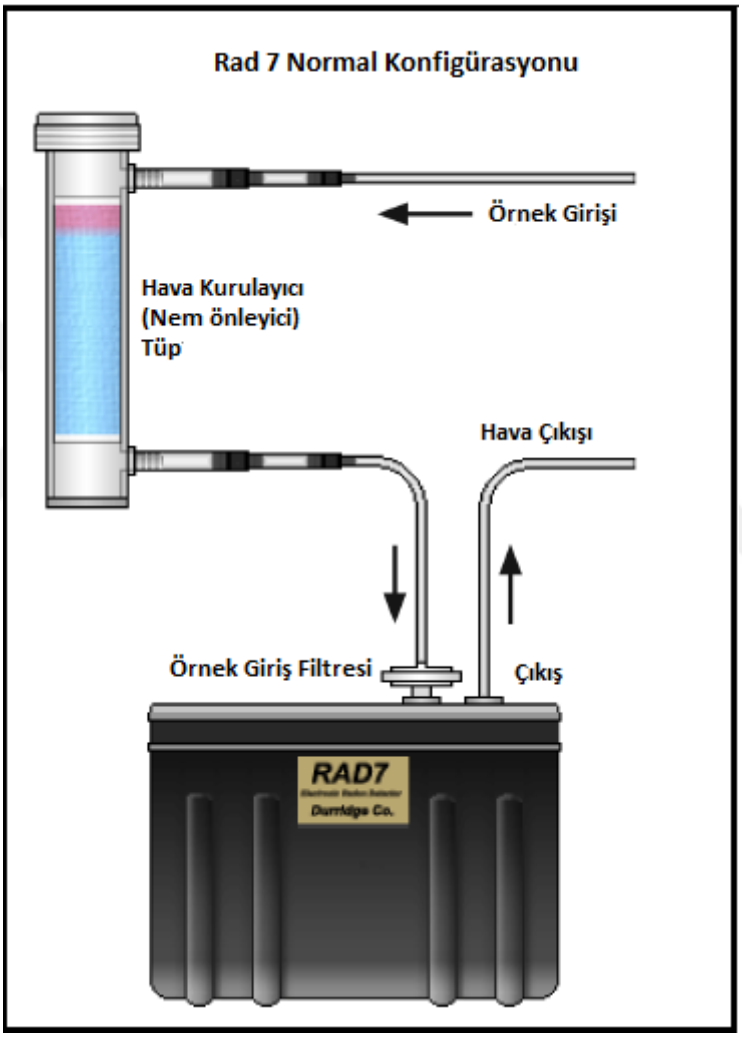
Anma Gücü	Tip	Anma Gücünde						
		Hız	Akım I_N	Moment M_N	Güç katsayısı Cos ϕ	Verim ή %		
kW						IEC 60034-2-1-2014		
		d/dk	A	Nm		4/4	¾	½
75	GM2E 280 S 4	1480	133	484	0,87	94,0	94,1	93,4

Kalkışta				Devrilme moment oranı	Eylemsizlik momenti	Yaklaşık ağırlık
Akım oranı I_A/I_N		Moment oranı M_A/M_N		M_K/M_N	J	B3
Doğrudan	Y/Δ	Doğrudan	Y/Δ		Kgm^2	Kg
7,0	2,3	2,6	0,8	2,8	1,0	550

3.2 ÖLÇÜM YÖNTEMİ

Durridge RAD7 (Şekil 3.6 ve 3.7) bir katı hal alfa detektörü olarak kullanmaktadır. Katı hal dedektörü, alfa radyasyonunu doğrudan bir elektrik sinyaline dönüştüren yarı iletken bir malzemedir. Katı hal cihazlarının önemli bir avantajı sağlamlıktır. Diğer bir avantaj, her bir alfa parçacığının enerjisini elektronik olarak belirleme yeteneğidir. Bu, radyasyonu hangi izotopun (polonyum 218, polonyum 214, vb.) ürettiğini tam olarak söylemeyi mümkün kılar, böylece eski radonu yeni radondan, radonu torondan ve sinyali gürültüden hemen ayırt edebilmektedir. Alfa spektrometresi olarak bilinen bu teknik, uygulamalarda koklama veya örnekleme için bir avantajdır. Gerçek zamanlı sürekli monitörlerde ölçüm süresi boyunca radon seviyesinin değişimi gözlemlenebilmektedir. Bu bazen radon konsantrasyonunda büyük dalgalanmalar gösterebilir ancak seviyeyi etkileyen süreçlerin varlığını anlamaya yardımcı olmaktadır.

İstatistiksel olarak kesin okumalar sağlamak için yeterli sayıda okuma olması önemlidir. Bir diğer önemli parametre de arka plandır. Bu, hava örneğinde radon olmadığında cihaz tarafından verilen okumadır. Düşük seviyeli sürekli izleme için, arka planın son derece düşük ve kararlı olması gerekir. Yüksek kaliteli alfa dedektörü ve benzersiz, gerçek zamanlı spektral analiz nedeniyle, RAD7 arka planı kaybolacak kadar küçüktür ve kurşun 210 oluşumuna karşı önleyicidir [69].



Şekil 3.6: Rad 7 normal konfigürasyonu [69]

Koklayıcı modda (Sniffer) ölçüm almak, hızlı ve yerinde ölçümler almak demektir. Böylece, 48 saatlik tam bir protokol testini beklemeden radon seviyesi hakkında bir fikir edinilebilmektedir. Teknik genellikle kapalı ortamda radon giriş noktalarını bulmak için kullanılmaktadır. Herhangi bir hızlı tepki veren, pompalı sürekli radon monitörü koklama için kullanılabilmektedir. Bununla birlikte, dikkate alınması gereken bazı faktörler vardır: Birincisi,

yüksek radon seviyelerine maruz kaldıktan sonra iyileşme hızıdır. Koklayıcı (Sniffer) bir radon çıkışı bulduğunda, tüm radon bozunma zinciri ölçüm cihazının içinde oluşur. RAD7'de koklayıcı (SNIFF) modunda sadece polonyum 218 bozunumalarına bakmaktadır, bu da konsantrasyonun düşük seviyeli olduğu bir bölgelerde, kurşun, bizmut, polonyum 214 ürünlerinin uzun saatler süren bozunumlarını beklemenin gerekmediğini göstermektedir ve önceki koklamalardan kalan polonyum 214 bozulmalarını yok saymaktadır. Polonyum 218'in üç dakikalık bir yarı ömrü vardır, bu nedenle radon koklayan RAD7, hem ani artışlara hem de ani düşüşlere 15 dakikalık bir yanıt süresine sahiptir. RAD7 toron koklama yeteneğine de sahiptir. Polonyum 216'nın 150 ms'lik bir yarı ömrü vardır, bu nedenle cihaz tepkisi neredeyse anlıktır. Tek gecikme, hava örneğini ölçüm odasına koymak için gereken yaklaşık 45 saniyedir. Koklama sırasında bir diğer faktör, kurşun 210 birikmesine (diğer araçların) karşı savunmasızlığıdır. Rad 7'de arka planı artırmaya gerek kalmadan konsantrasyon ölçümüne devam edilebilmektedir [69].



Şekil 3.7: Rad 7 ölçüm cihazı [69]

Radon konsantrasyonları, radonun radyoaktivitesi ölçülerek veya radon bozunma ürünlerinin radyoaktivitesi ölçülerek belirlenmektedir. Havadaki radon bozunma ürünlerini ölçen aletlere "çalışma seviyesi" monitörleri denmektedir. Çalışma seviyesi modu örnek havayı ince bir

filtreden geçirir ve ardından filtreyi radyoaktivite açısından analiz etmektedir. Radon ürünleri filtreye yapışarak çalışma seviyesi monitörü tarafından sayılmaktadırlar. RAD7, bozunum ürünlerini dışlayan ince bir giriş filtresinden geçen hava örneklerini analiz için bir odaya vakumlamaktadır. RAD7 bölmesindeki radon bozunur ve tespit edilebilir alfa yayan ürün, özellikle polonyum izotopları üretir. RAD7, bozunma radyasyonunu dahili olarak tespit etse de, yaptığı tek ölçüm radon gazı konsantrasyonudur. Kısaca, RAD7 radon ürün konsantrasyonlarını (çalışma seviyeleri) ölçmez, sadece radon gazı konsantrasyonlarını ölçebilmektedir [69].

RAD7 ölçüm cihazının iç kısmında silikon katı hal dedektörlü elektrik iletkenliği olan 0,7 litrelik bir yarım küre dahili numune hücresi bulunmaktadır. Filtre sayesinde numune hava pompa tarafından emilip dedektör odasına ulaşmaktadır. Dedektör ile yarım küre arasında 2000 ile 2500 V arasında yüksek voltaj farkı olması pozitif iyonize parçacıkları dedektöre doğru hızlandırmaktadır. Odadaki bir radon çekirdeği, pozitif iyonize edilmiş bir polonyum 218'e bozunursa, bu parçacık detektöre doğru hızlandırılacaktır. Dedektörün yüzeyinde kısa ömürlü polonyum 218 bozunur ve karakteristik bir enerjiye sahip α radyasyonu dedektöre yayılmaktadır. Dedektör bir sinyal üretir ve bu sinyal elektronik olarak yoğunlaştırılmış olarak mikroişlemciler tarafından sayılır ve sinyallerin enerji seviyeleri depolanır ve spektrumu düzenlemektedir [69].

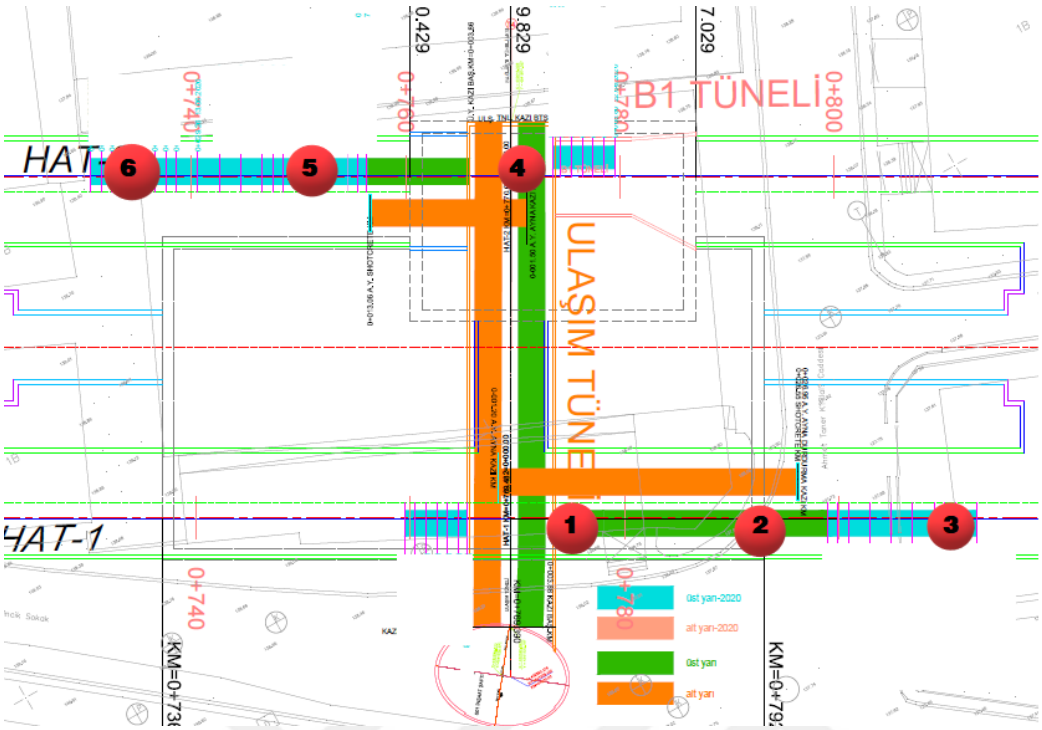
3.2.1 Deneysel Çalışmalar

Yapım aşamasındaki Çekmeköy Sancaktepe Sultanbeyli Metro hattının kazı çalışması yapılan tünellerinde ve uzun bir süre çalışma yapılmadan beklenmiş bir tünelinde Durridge Rad 7 aktif radon izleme monitörü ile radon gazı dağılımı tespit edilmek için yerinde ölçümler alınmıştır. Çalışma açısından aktif olan Meclis Mahallesi istasyonunda (Şekil 3.7) ve Sarıgazi istasyonu B tünel hattında (Şekil 3.8) kazı sınırlarının izin verdiği ölçekte ve kazı ekibi tüneldeyken harita ekibinin yardımlarıyla daha önce 20 metre mesafeli aralıklarla ve koordinatlarıyla belirlenmiş olan noktalardan radon gazı ölçümü alınmıştır. Ayrıca kazı başladıktan sonra teknik sebeplerden dolayı çalışması durdurulmuş olan Sarıgazi istasyonu A tünel hattında (Şekil 3.9) çalışmanın olmadığı bir durumda yine harita ekiplerince daha önceden işaretlenmiş ve koordinatları belirlenmiş 15 ve 20 metre mesafeli aralıklı noktalardan radon gazı ölçümü alınmıştır.

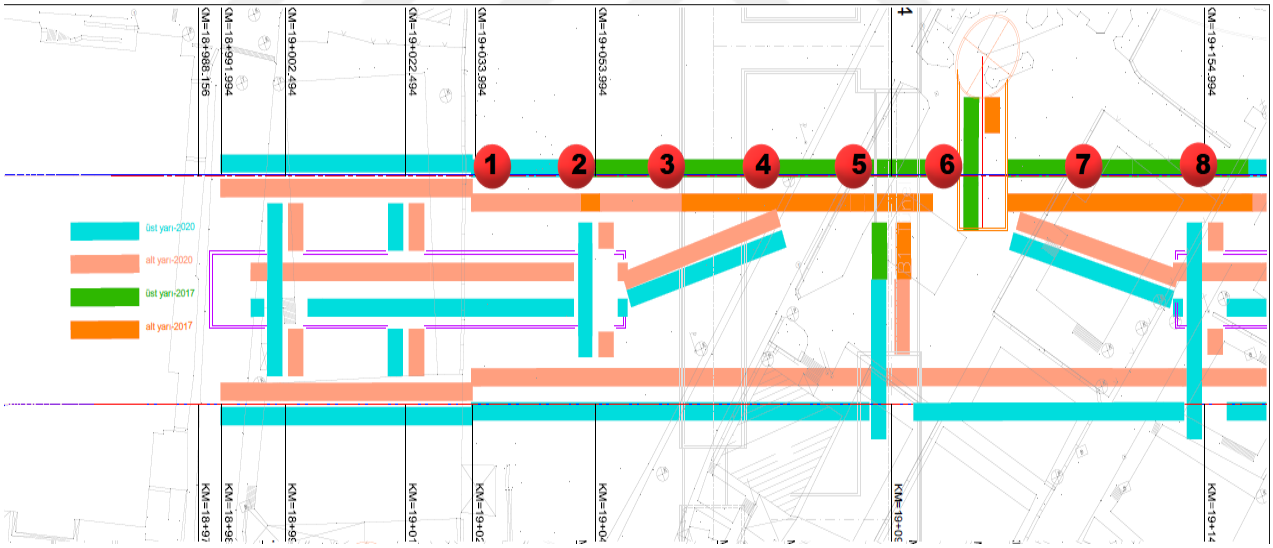
Yapılan ölçümlerde radon gazının konsantrasyonlarını belirlemek için kullanılan Rad 7 cihazının seçilen ölçüm yöntemi koklama (sniff) modudur (Tablo 3.2). Ölçüm cihazı portatif ölçme uygun olarak kurulduktan sonra koklama modu ölçüm parametreleri seçilmekte ve belirlenen noktalardan ölçümler alınmaktadır. Her bir nokta için 3 sefer döngülü 15'er dakikadan toplam 45 dakikalık bir koklama ölçümü yapılmıştır.

Tablo 3.2: Koklama (sniff) protokolü

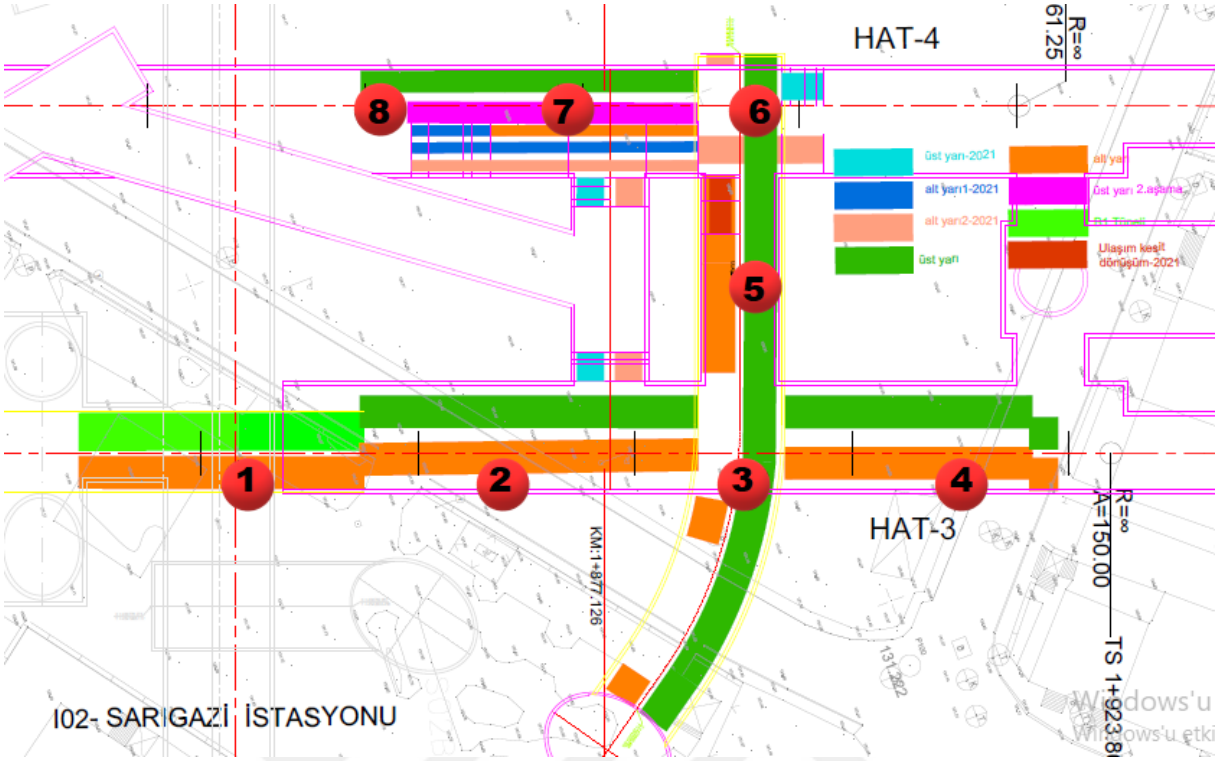
Protokol (protocol)	Koklama (sniff)
Süre (cycle)	15 dk
Döngü (recycle)	03
Mod (mode)	Koklama (sniff)
Toron (thoron)	Açık
Pompa (pump)	Otomatik
Zil Sesi (tone)	Gieger
Format (format)	Kısa (short)
Birim (units)	$Bq.m^{-3}$, ^{o}C



Şekil 3.8: Meclis Mahallesi istasyonu ölçüm noktaları



Şekil 3.9: **Sarıgazi istasyonu B tüneli ölçüm noktaları**



Şekil 3.10: Sarıgazi istasyonu A tüneli ölçüm noktaları

4. BULGULAR

Yapım aşamasındaki Çekmeköy Sancaktepe Sultanbeyli Metro hattının tünellerinde Durridge Rad 7 aktif radon izleme monitörü ile radon gazı dağılımı tespit edilmek için yerinde yapılan ölçümlere göre sonuçları Tablo 3.3'te ve Tablo 3.4'te verilen, S01 Hat 1 ve Hat 2 olarak belirtilen Meclis Mahallesi İstasyonunda mevcut kazı çalışma sahasından 6 adet ölçüm alınmıştır. S02 B olarak belirtilen Sarıgazi İstasyonunda mevcut kazı çalışma sahasından, B tünellerinden 8 adet ölçüm ve S2 A H3, S2 A H4 ve S2A Ulaşım olarak belirtilen Sarıgazi İstasyonunda mevcut kazı çalışma sahasından, A tünellerinden 8 adet ölçüm alınmıştır.

Tablo 3.3: Kayıt numarasına göre ölçüm istasyonları ve koordinatları

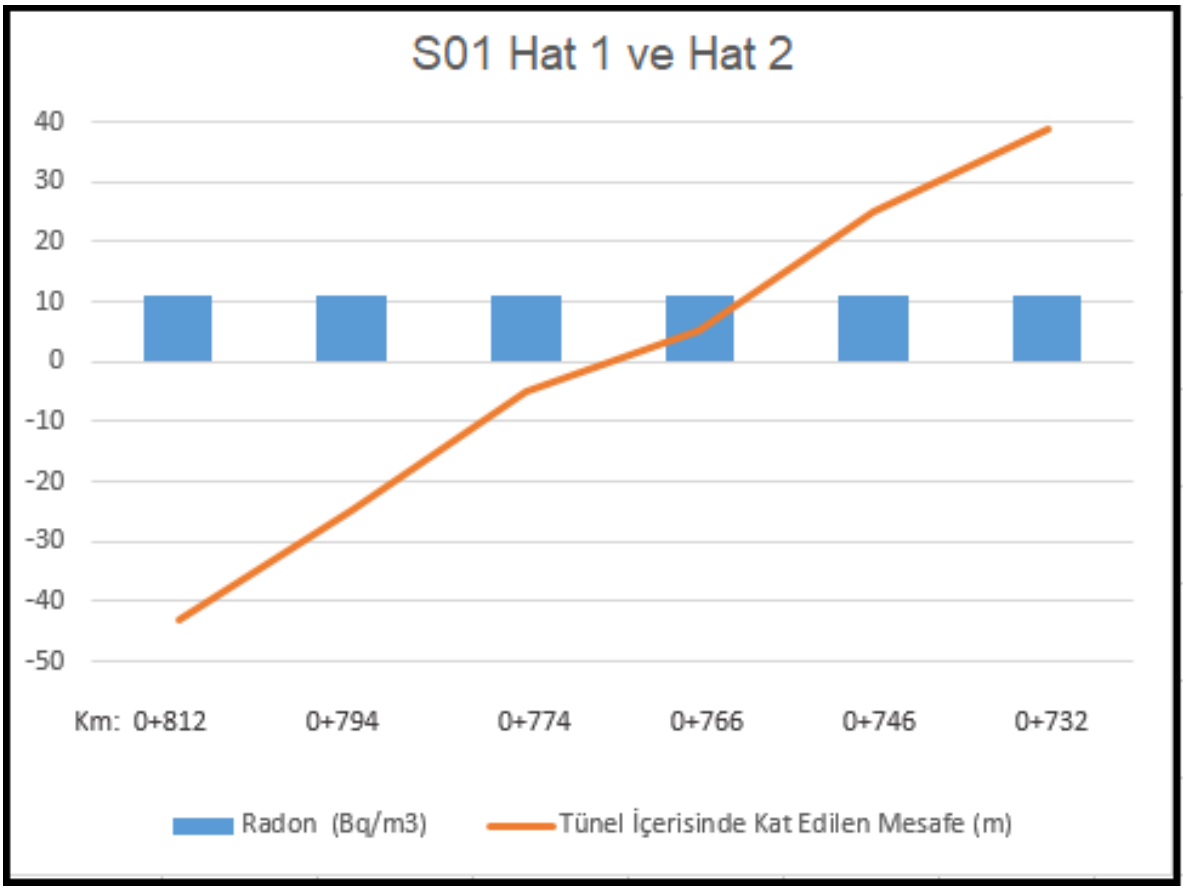
Ölçüm İstasyonu					
Hat	**Km**		**Koordinatlar**		
		X	**Y**	**Z**	**Kayıt No**
S01 Hat 1	0+812.00	432.609.486	4.541.970.383	108	1401 2 3
S01 Hat 1	0+794.00	432.592.132	4.541.980.325	108	1201 2 3
S01 Hat 1	0+774.00	432.579.985	4.541.987.284	108	1001 2 3
S01 Hat 2	0+766.00	432.602.333	4.541.940.919	108	1501 2 3
S01 Hat 2	0+746.00	432.619.687	4.541.930.977	108	1601 2 3
S01 Hat 2	0+732.00	432.635.306	4.541.922.029	108	1701 2 3
S02 B	19+036.00	433.701.736	4.542.021.109	87	1801 2 3
S02 B	19+056.00	433.720.434	4.542.014.009	87	1901 2 3
S02 B	19+076.00	433.739.131	4.542.006.909	87	2001 2 3
S02 B	19+096.00	433.757.828	4.541.999.809	87	2201 2 3

S02 B	19+114.00	433.774.656	4.541.993.419	87	2301 2 3
S02 B	19+133.00	433.792.419	4.541.986.674	87	2401 2 3
S02 B	19+153.00	433.811.116	4.541.979.574	87	2501 2 3
S02 B	19+173.00	433.829.813	4.541.972.474	87	2601 2 3
S02 A H3	1+907.126	433.787.187	4.542.058.661	105,95	3101 2 3
S02 A H3	1+887.126	433.780.087	4.542.039.963	105,95	2801 2 3
S02 A H3	1+867.126	433.772.987	4.542.021.266	105,95	2901 2 3
S02 A H3	1+847.126	433.767.233	4.542.002.058	105,95	3001 2 3
S02 A H4	1+843.995	433.741.576	4.542.024.633	105,95	3401 2 3
S02 A H4	1+828.995	433.738.120	4.542.009.900	105,95	3501 2 3
S02 A ULASIM	0+066.05	433.748.839	4.542.054.523	105,95	3301 2 3
S02 A ULASIM	0+047.50	433.766.045	4.542.048.003	105,95	3201 2 3

Tablo 3.4: Radon konsantrasyonu ölçüm sonuçlar

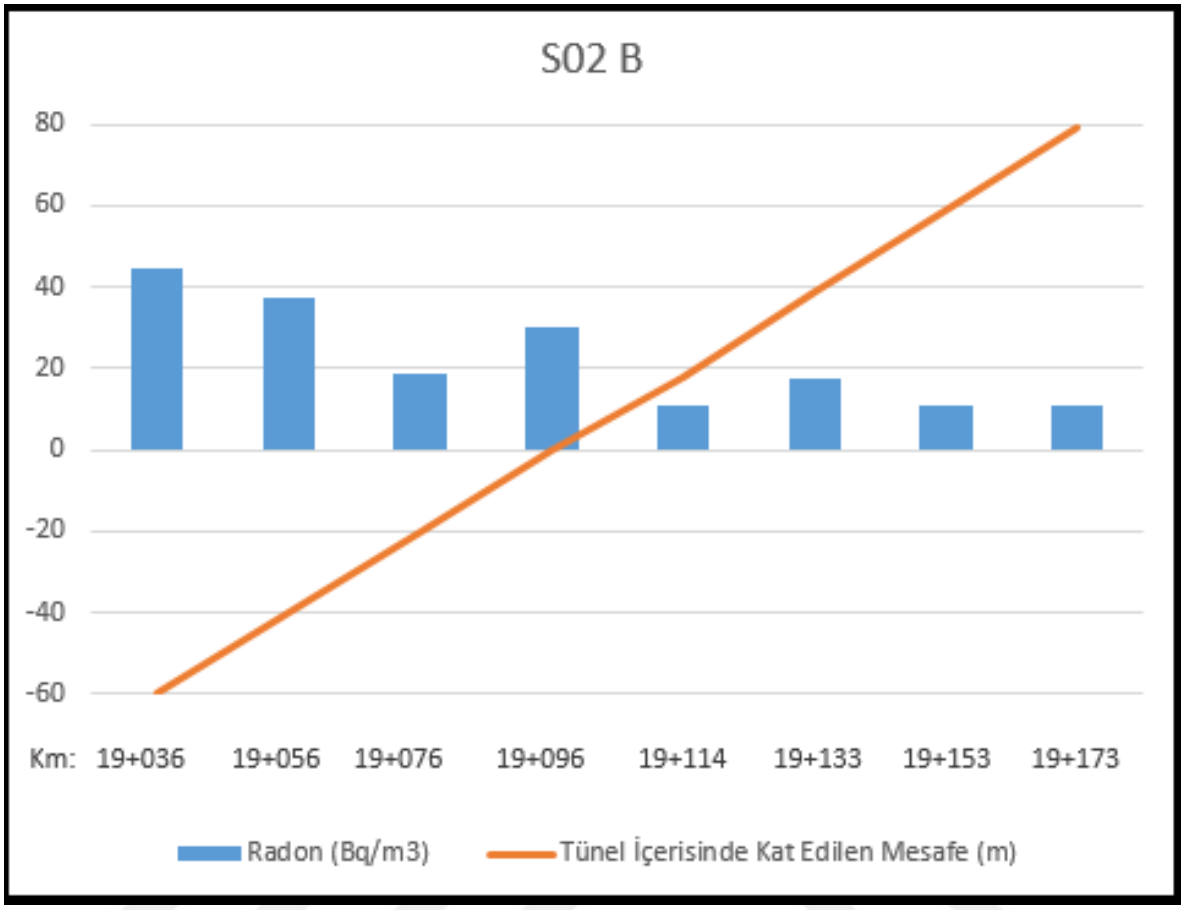
Kayıt No	**Radon Konsantrasyonu Bq.m^{-3}**			**Ort.**	**Standart Sapma**
1401 2 3	11,2±54,1	11,2±54,1	11,2±54,1	11,20	0,00
1201 2 3	13,6±46,6	8,8±44,8	11,2±54,1	11,20	2,40
1001 2 3	11,2±54,1	9,8±34,6	12,6±44,8	11,20	1,40
1501 2 3	7,9±54,2	14,5±55,3	11,2±54,1	11,20	3,30
1601 2 3	11,2±54,1	10,6±37,1	11,8±44,9	11,20	0,60
1701 2 3	11,2±54,1	11,2±54,1	11,2±54,1	11,20	0,00
1801 2 3	47,1±37,2	42,7±88,2	44,9±72,7	44,90	2,20
1901 2 3	33,7±72,7	33,7±67,4	44,9±72,7	37,44	6,47
2001 2 3	22,5±61,3	11,2±54,2	22,5±61,3	18,74	6,52
2201 2 3	22,4±61,2	33,7±67,4	33,7±67,4	29,97	6,52
2301 2 3	11,2±54,1	9,8±34,6	12,6±44,8	11,20	1,40
2401 2 3	18,5±57,6	22,5±61,3	11,2±54,1	17,40	5,73
2501 2 3	11,8±44,9	10,6±37,1	11,2±54,1	11,20	0,60
2601 2 3	11,2±54,1	11,2±54,1	11,2±54,1	11,20	0,00
3101 2 3	44,8±72,5	112±96,8	202±120	119,60	78,88
2801 2 3	78,4±85,8	236±128	236±130	183,47	90,99
2901 2 3	303±141	303±141	281±137	295,67	12,70
3001 2 3	450±167	259±133	337±148	360,68	96,03

3401 2 3	247±130	168±112	236±128	217,00	42,79
3501 2 3	202±120	180±115	169±115	183,67	16,80
3301 2 3	180±115	202±120	159±109	180,34	21,50
3201 2 3	124±100	112±96,6	135±103	123,67	11,50



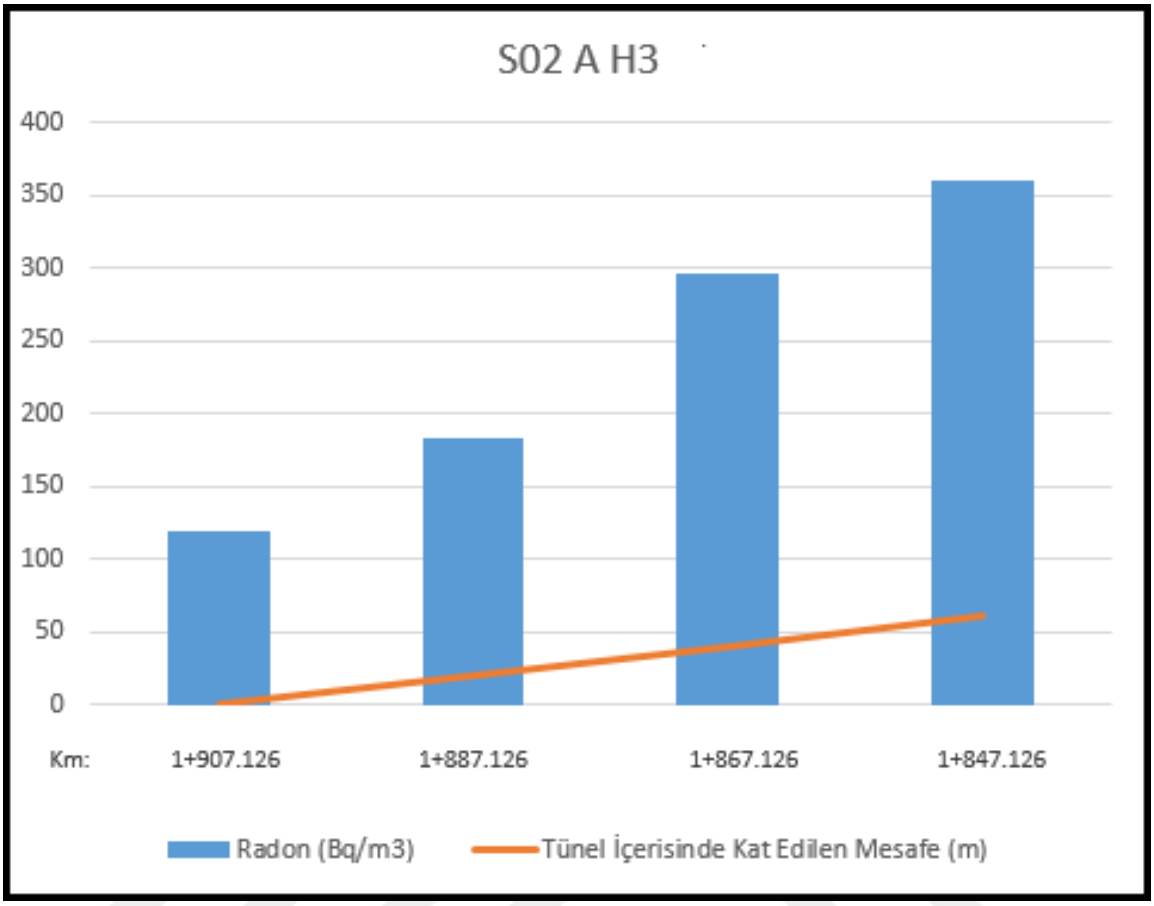
Şekil 3.11: Meclis Mahallesi İstasyonu (S01 Hat 1 ve Hat 2) ölçüm sonuçları

Şekil 3.10'da Meclis Mahallesi İstasyonu (S01 Hat 1 ve Hat 2) ölçüm sonuçları görülmektedir. S01 hattı tünel içi havalandırma sisteminin aktif olduğu bir hat olup, tünel içi gözlenen radon konsantrasyonu her ölçüm istasyonunda yapılan üç ölçümün ortalaması ve her iki hat için de yapılan ölçümlerin ortalamaları esas alınınca hat boyunca stabil ve 11,20 $Bq.m^{-3}$ olarak gözlemlenmektedir.



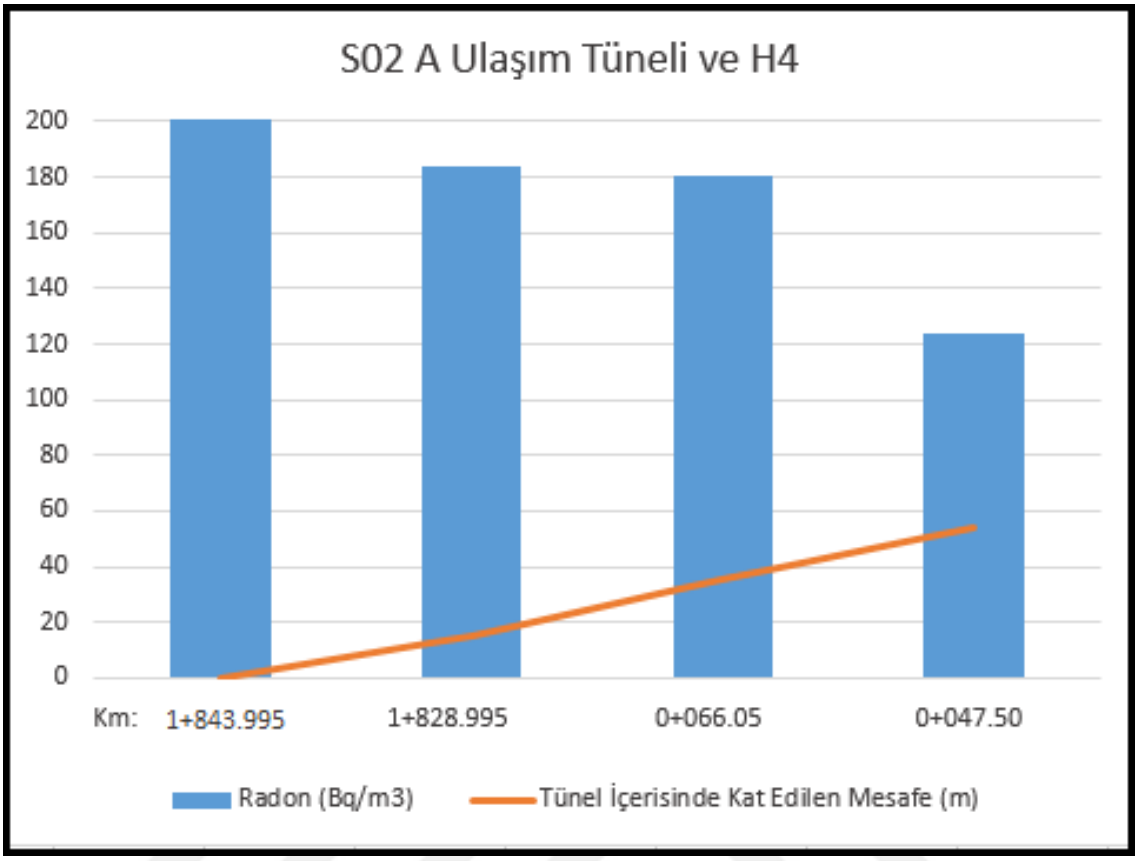
Şekil 3.12: Sarıgazi İstasyonu B tüneli (S02 B) ölçüm sonuçları

Şekil 3.11'da Sarıgazi İstasyonu B tüneli (S02 B) ölçüm sonuçları görülmektedir. S02 B hattı tünel içi havalandırma sisteminin aktif olduğu bir hat olup, tünel içi gözlenen radon konsantrasyonu ölçümleri ve hat içi kilometre sırasıyla 44,90 $Bq.m^{-3}$ – 37,44 $Bq.m^{-3}$ –18,74 $Bq.m^{-3}$ – 29,97 $Bq.m^{-3}$ – 11,20 $Bq.m^{-3}$ – 17,40 $Bq.m^{-3}$ – 11,20 $Bq.m^{-3}$ – 11,20 $Bq.m^{-3}$ olarak gözlemlenmektedir.



Şekil 3.13: Sarıgazi İstasyonu A tüneli (S02 A H3) ölçüm sonuçları

Şekil 3.12'da Sarıgazi İstasyonu A tüneli (S02 A H3) ölçüm sonuçları görülmektedir. S02 A hattı tünel içi havalandırma sisteminin aktif olmadığı bir hat olup, tünel içi gözlenen radon konsantrasyonu ölçümleri ve hat içi kilometre sırasıyla 119,60 $Bq.m^{-3}$ – 183,47 $Bq.m^{-3}$ – 295,67 $Bq.m^{-3}$ – 360,68 $Bq.m^{-3}$ olarak gözlemlenmektedir.



Şekil 3.14: Sarıgazi İstasyonu A tüneli (S02 A ulaşım tüneli ve H4) ölçüm sonuçları

Şekil 3.13'da Sarıgazi İstasyonu A tüneli (S02 A ulaşım tüneli ve H4) ölçüm sonuçları görülmektedir. S02 A hattı tünel içi havalandırma sisteminin aktif olmadığı bir hat olup, tünel içi gözlenen radon konsantrasyonu ölçümleri ve hat içi kilometre sırasıyla 217,00 $Bq.m^{-3}$ – 186,67 $Bq.m^{-3}$ –180,34 $Bq.m^{-3}$ – 123,67 $Bq.m^{-3}$ olarak gözlemlenmektedir.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Yapım aşamasındaki Çekmeköy Sancaktepe Sultanbeyli Metro hattının tünellerinde Durridge Rad 7 aktif radon izleme monitörü ile radon gazı dağılımı tespit edilmek için yerinde yapılan ölçümlere göre sonuçlar çalışma sahasının havasında bulunan radon konsantrasyonun dağılımında iş ve işçi sağlığı açısından önemli bir noktanın ayrımını yapmaktadır. Ulaşılan sonuç değerler kapsamında bakılınca; tünel içi havalandırma sisteminin aktif olduğu tünellerde 11,20 $Bq.m^{-3}$ – 44,90 $Bq.m^{-3}$ değerleri arasında ve tünel içi havalandırma sisteminin aktif olmadığı tünellerde ise 119,60 $Bq.m^{-3}$ – 360,68 $Bq.m^{-3}$ değerleri arasında gözlemlenmiştir.

Uluslararası kriterler, limit değerler ve ICRP'ye göre radon gazı ürünlerine maruz kalınması sonucunda, yıllık etkin doz için 3-10 mSv arasında belirlemiştir. Bu aralıkta önem almaya gerek duyulmamaktadır ancak ortamdaki radon gazı konsantrasyonunun limitlerin üzerine çıkması durumunda dışsal müdahalelerle önüne geçilmesi gerekmektedir. Bu müdahalelere havalandırma ve/veya gaz drenaj sistemleri örnek olabilmektedir. Tez kapsamında yapılan ölçümlerden tünel içi havalandırma sistemlerinin aktif olduğu ve olmadığı tünellerden alınan örneklerin üst limit değerleri için yıllık etkin doz eş değeri aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır[50].

YEDE = RAC×Df×DDF×MF×8760 (saat/yıl)

YEDE: Yıllık Etkin Doz Eşdeğeri, mSv

RAC: Ölçülen radon konsantrasyonu, $Bq.m^{-3}$

Df: Radonun dengeye ulaşma faktörü: 0.4

DDF: Doz dönüştürme faktörü: $9,0*10^{-9}$ (Sv/saat)

MF: Meşguliyet Faktörü, tünel içinde bulunma süresi (1600 saat için 0.2)

Tünel içi havalandırma sisteminin aktif olduğu tüneller için;

YEDE = 44,90 $(Bq.m^{-3})$ * 0,4 * $9,0*10^{-9}$ (Sv/saat) * 0.2 * 8760 (saat/yıl) = 0,00028319328

≈ $2,83*10^{-4}$ $Sv.yıl^{-1}$ = 0,283 mSv

Tünel içi havalandırma sisteminin aktif olmadığı tüneller içinse;

YEDE = 360,68 $(Bq.m^{-3})$ * 0,4 * $9,0*10^{-9}$ (Sv/saat) * 0.2 * 8760 (saat/yıl) = 0,002274881

≈ $2,27*10^{-3}$ $Sv.yıl^{-1}$ = 2.27 mSv

Aylık Çalışma Dozu (Working Level Month-WLM) için kabul edilen sınır değerleri ise çalışanlar için 5 $mSv.WLM^{-1}$, halk için 4 $mSv.WLM^{-1}$'dir. Tez kapsamında yapılan ölçümler sonucu tünel içi havalandırma sisteminin aktif olduğu tünellerde bu değer 0,0566 WLM çalışanlar için, 0,07075 WLM halk için ölçülmüştür. Tünel içi havalandırma sisteminin aktif olmadığı tünellerdeyse 0,454 WLM çalışanlar için, 0,5675 WLM halk için ölçülmüştür ve limit değerlerin altında olduğu görülmüştür [50].

Ölçüm sonuçları, Türkiye Cumhuriyeti'nin, Avrupa Birliği'nin (AB), Uluslararası Radyolojik Koruma Komisyonu'nun (ICRP) ve Dünya Sağlık Örgütü'nün (WHO) deklare ettiği sınır değerlerle karşılaştırıldığında; çalışma koşullarının devamlılığı açısından maruz kalınan radon gazı konsantrasyonu bazında hiçbir sakınca bulunmamaktadır. Ülkemizde, AB'de ve ICRP'de teneffüs edilen havada bulunan radon gazı konsantrasyonu limit değeri 400 $Bq.m^{-3}$'dür, WHO'da ise limit değer 100 $Bq.m^{-3}$ olarak belirlenmiştir. Tez kapsamında alınan ölçüm sonuçları limit değerlerin altında kalmakla birlikte şu önemli tespit yapılmıştır; tünel içi havalandırma sisteminin aktif olduğu alanlarda WHO'nun belirttiği limit değerin de altında kalınması, çalışma koşullarında kaliteli havalandırma ortamı insan sağlığını doğrudan ve hayati bir noktadan etkilediğini göstermektedir. Tünel içi havalandırma sisteminin aktif olmadığı tünellerde radon gazı konsantrasyonunun yüksek oluşu, iki temel prensibi açıklamaktadır. Radon gazı üzerinde yaşadığımız yer küreden gelen ve atmosfere çıkışının mümkün olduğu her alanda bulunduğu, ortam koşulları elverişli ise biriken ayrıca insan sağlığını etkileyen bir gazdır. Bulunduğu ortamdaki konsantrasyon yoğunluğunu düşürmenin gazın çıkışından sonraki tek yolu ortamdaki derişim oranını seyreltmektir. Bu da kapalı tüm ortamlarda havalandırma yönetimini doğru sağlamakla mümkündür. Çünkü sadece ortamdaki radyoaktivite ve radyasyon miktarı değil aynı zamanda etkisi altında ne kadar zaman kalındığı da canlı sağlığına etkisi açısından çok önemli bir noktadır.

Yer küreden gelen radon salınımından korunmak için havalandırma kontrolünden önce tetkik edilmesi gereken prosesler mevcuttur. Öncelikle radon konsantrasyonu ölçümü ile radon gazının çıkış noktalarını belirlemek adına gerekli ve önemlidir. Bu proses yürütülmeden evvel radon gazının içinden geçtiği jeolojik yapı dikkatlice incelenmelidir, kayaç birimlerinin tüm mekanik özellikleri tespit edilmelidir, bilhassa geçirgenlik, tabakalanma, kırık ve çatlak yapıları. Yapılan etütler sonucunda çalışma sahasında uygulanacak yöntem, kullanılacak malzemeler gerçirgenlik ve diğer özellikler dikkate alınarak seçilmelidir. Sadece yapım

aşamasında değil sonrasında, kullanım süresi boyunca ortamdaki radon gazı salınımını minimize etmek yüksek radon konsantrasyonlu ortam havasına maruz kalma süreleri açısından da toplum sağlığını korumak adına bir zorunluluktur.

Bu bağlamda, tez kapsamında havalandırma sisteminin aktif olduğu yani çalışma yapılan tünellerde alınan ölçüm sonuçlarıyla, 2019 yılında İstanbul İli Marmaray ve Metro Yeraltı Ulaşım İstasyonlarında Radon Seviyelerinin Ölçülmesi adlı tezde Hatice Yılmaz Alan tarafından yazılan ve kamu kullanımına açılmış metro peronlarında aktif ölçüm yöntemi ile (Alfaguard cihazı ile) tespit edilen radon konsantrasyon seviyeleri ile karşılaştırılmıştır. Yılmaz Alan'ın M5 metrosu peronlarında aldığı ölçüm sonuçları en düşük ve en yüksek değer 7,4 – 25,9 $Bq.m^{-3}$'dür(20 – 43 m derinlik aralığında). Çekmeköy Sancaktepe Sultanbeyli Metro Hattında ölçülen en yüksek ve en düşük değer 11,20 – 44,9 $Bq.m^{-3}$'dür (87 – 108 m derinlik aralığında). Ölçüm sonuçları karşılaştırıldığında nihai beton ve diğer katmanlarla tamamlanmış yapıların inşa halindeki yapılara oranla daha düşük radon salınımına sahip olduğu gözlemlenmiştir ayrıca nihai ve düzenli çalışan havalandırma sisteminin ortamdaki radon konsantrasyonunu düşürdüğü bir kez daha tespit edilmiştir [70].

Tablo 5.1: M5 Metro istasyonları peron ölçüm sonuçları [70]

M5 Metro İstasyonları	Peron Ölçüm Sonuçları ($Bq.m^{-3}$)	Peron Derinlikleri (m)
Üsküdar	16,7	19,89
Fıstıkağacı	7,4	31,19
Bağlarbaşı	9,5	35,12
Altunizade	14,6	19,96
Kısıklı	11,5	42,9
Bulgurlu	21,8	25,48
Ümraniye	25,9	25,52
Çarşı	7,4	27,9
Yamanevler	16,7	24,52

Radyoaktivite ve radyasyon yaşamın ve doğanın doğal bir parçasıdır, oluşumunu engellemek mümkün değildir ancak canlı yaşamının sürdüğü ortamlarda maruz kalma seviyesini ve süresini azaltmak mümkündür. Bunun için ilk adım tespittir ve tespit içinse ilk adım ölçüm ve gözlemdir. Dünyanın birçok yerinde özellikle ABD'de ortamda bulunan, yapı malzemelerinden bozunuma uğrayarak ortama yayılan radon gazı konsantrasyonu ölçülmekte ve sınır değerlerin altında kalması koşuluyla açılacak işletmelere, çalışma yerlerine izin verilmektedir veya uygun havalandırma koşulları sağlandıktan sonra yapılan ölçümler ile ortam havası radon gazı konsantrasyonu açısından kontrol altına alındıktan sonra izin verilmektedir.

Tez kapsamında inşa halindeki metro tünellerinde insan sağlığı açısından zararlı olup, uluslararası sağlık kuruluşları tarafınca kanserojen madde ilan edilen radyoaktif radon gazı düzeyinin belirlenerek tünel içerisindeki dağılımının ortaya çıkarılması amaçlanmıştır. Radon ölçümlerinde özellikle yapım aşamasındaki yeraltı yapılarında açığa çıktığı bilinmektedir. Bu çalışmada henüz daha yapım aşamasında olan bir metro tünelinde ölçüm yapılarak radon konsantrasyonunun yoğun olduğu aşamadaki düzeyler belirlenmiştir ve bu değerler uluslararası sınır değerlerle karşılaştırılmıştır. Bu aşamada radon ölçümü ilk defa yapılmış olup yeraltı metro tünelinin yapımı sırasında çalışanların radona maruz kalma düzeyleri belirlenmiştir. Bu açıdan çalışma gelecekte yapılacak olan benzer çalışma ortamlarında radon gazı konsantrasyonuna maruz kalmayı önleme çalışmaları için bir referans olacaktır.

KAYNAKLAR

[1]. IAEA, 2003, *Radiation Protection Against Radon In Workplaces Other Than Mines*, Safety reports series no:33, IAEA Library Cataloguing in Publication Data, Viyana, ISBN 92–0–113903–9

[2]. TAEK, 2012, *Kapalı Ortamlarda Radon Gazı*, Teknik Rapor 2012/3, Türkiye Atom Enerjisi Kurumu Yayını, Ankara

[3]. IAEA, WHO, 2015, *Protection of the public against exposure indoors due to radon and other naturalsources of radiation*, IAEA Safety Standards Series No. SSG-32, IAEA Library Cataloguing in Publication Data, Viyana, ISBN 978–92 –0–102514–2.

[4]. MTA, 2017, Dünyada ve Türkiye'de Uranyum ve Toryum, Maden Serisi: 3, Eroğlu, G., Şahiner, M.(ed), Fizibilite Etütleri Daire Başkanlığı, Ankara

[5]. Korhonen, P., Kokotti, H. and Kalliokoski, P., 2000. *Behaviour of radon progenies and particle levels during room depressurisation*, Atmospheric Environment No:34, ISSN 2373-2378.

[6]. Wasiolek, P.T., James, A.C., 2000. *Unattached fraction measuring technique and radon lung dose*, Journal of Environmental Radioactivity No:51, ISSN 0265-931X1, 37 – 151.

[7]. NCRP, 1988, *Measurement of Radon and Radon daughters in air*, Recommendations of National Council on Radiation Protection and Measurements, NCRP Report No. 97, Bethesda.

[8]. Durrani, S.A., Iliç, R., 1997, *Radon measurements by etched track detectors applications in radioation protection earth Sciences and the environment*, World Scientific, Singapore, ISBN: 9810226667

[9]. Magill, J., Glay, J., 2005, *Nuclear Energetics*, Radioactivity Radionuclides Radiation, In: Wiesenbach, G.K. (ed.), Bölüm 2, Springer, Berlin, Almanya, ISBN: 3-540-21116-0, 19 31

[10]. Osmanlıoğlu, A.E., 2014, *Temel Kavramlar*, Radyoaktif Atık Yönetimi, In: Aydemir, T. (ed.), Bölüm 1, Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara, Türkiye, ISBN: 978-605-133-890-3, 1-8

[11]. Örgün Tutay, Y., Çelebi, N., 2016, Radyasyon, Radon (Rn) ve Toplum Sağlığı, *TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Haber Bülteni – Tıbbi Jeoloji ve İnsan Sağlığı Özel Sayısı* , vol.1, 11-27.

[12]. Magill, J., Glay, J., 2005, *Types of Radioactive Decay*, Radioactivity Radionuclides Radiation, In: Wiesenbach, G.K. (ed.), Bölüm 4 , Springer, Berlin, Almanya, ISBN: 3-540-21116-0, 59-89

[13]. Krane, K.S., 1988, *Nuclear Decay and Radioactivity*, Introductory Nuclear Physics, In: Halliday, D. (ed.), Bölüm 2, Jhon Wiley and Sons, Oregon, ABD, ISBN: 0-471-80553-X, 160-378

[14]. Kölbel, L., Kölbel, T., Maier, U., Sauter, M., Schafer, T., Wiegand, B., 2020, *Water–rock interactions in the Bruchsal geothermal system by U–Th series radionuclides*, Springer Publications, Geotherm Energy, 8 (24)

[15]. Mohammed, N. H., 2013, *Investigation of ^{238}U And ^{232}Th in Rock Samples Selected From Touria Mountain Omdurman*, Yüksek Lisans, Sudan Academy of Sciences (SAS), Atomic Energy Council

[16]. Taek öğrenci, Radyasyon, Bölüm 4 https://nuken.tenmak.gov.tr/ogrenci/ [Ziyaret Tarihi: 13 Ocak 2021]

[17]. Knoll, G. F., 2000, *Radiation Detection and Measurement 3rd edition*, John Wiley and Sons. New York, ISBN 0-471-07338-5

[18]. Er, Z., 1995, *Çeşitli Madensuyu ve Sodaların Radyoaktivite Seviyelerinin Tayini,* Yüksek Lisans, İstanbul Teknik Üniversitesi, Nükleer Enerji Enstitüsü

[19]. Osmanlıoğlu, A.E., 2014, *Radyasyondan Korunmak*, Radyoaktif Atık Yönetimi, In: Aydemir, T. (ed.), Bölüm 15, Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara, Türkiye, ISBN: 978-605-133-890-3, 171-193

[20]. Güler, Ç., Çobanoğlu, Z., 1994, Elektromanyetik Radyasyon, *T.C. Sağlık Bakanlığı Çevre Sağlığı Temel Kaynak Dizisi*, 32, Ankara

[21]. Türkkan, A., 2012, Elektromanyetik Alan ve Sağlık Etkileri, Nilüfer Belediyesi Çevre Bürosu, Bursa, ISBN : 978-605-62172-6-5

[22]. ICRP, 2007, The 2007 recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Valentin, J. (ed.), Elsevier, ICRP Publication 103, 37(2–4), ISBN 978-0-7020-3048-2

[23]. Allisy-Roberts, P.J., 2005, Radiation quantities and units-understanding the sievert, *Journal of Radiation Protection*, IOP Publising 25 (1)

[24]. AFAD, Radyasyon Ölçüm Birimleri Ve Dönüşümleri, https://www.afad.gov.tr/kbrn/radyasyon-olcum-birimleri-ve-donusumleri [Ziyaret Tarihi: 13 Ocak 2021]

[25]. Resmi Gazete, 2000, Radyasyon Güvenliği Yönetmeliği, İkinci Bölüm Onuncu Madde, https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=5272&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5

[26]. UNSCEAR, 2016, Annex D, Biological effects of selected internal emitters – Uranium, Sources and effects of ionizing radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Report to the General Assembly with scientific annexes, New York, USA, ISBN: 978-92-1-142316-7, 365 – 467

[27]. UNSCEAR, 2008, Annex B, Exposures of the public and workers from various sources of radiation, Sources and effects of ionizing radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Report to the General Assembly with scientific annexes, Volume 1, New York, USA, ISBN 978-92-1-142274-0, 223 – 439

[28]. UNSCEAR, 2000, Annex B, Exposures from natural radiation sources, Sources and effects of ionizing radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Report to the General Assembly with scientific annexes, Volume 1, New York, USA, ISBN 92-1-142238-8, 83 – 157

[29]. UNSCEAR, 2000, Annex C, Exposures to the public from man-made sources of radiation, Sources and effects of ionizing radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Report to the General Assembly with scientific annexes, New York, USA, ISBN 92-1-142238-8, 157 – 292

[30]. UNSCEAR, 1993, Annex A, Exposures from natural radiation sources, Sources and effects of ionizing radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Report to the General Assembly with scientific annexes, New York, USA, ISBN 92-1-142200-0, 33 – 90

[31]. UNSCEAR, 1993, Annex B, Exposures to the public from man-made sources of radiation, Sources and effects of ionizing radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Report to the General Assembly with scientific annexes, New York, USA, ISBN 92-1-142200-0, 91 – 220

[32]. Bıyık, R., 2017, Radyasyonun madde ile etkileşimi ve Radyasyon kaynakları, *Kuvaterner Yaşlı Birimlerin ESR ve Diğer Yöntemlerle Tarihlendirilmesi Çalıştayı*, 17-18 Kasım 2017, Selçuk Üniversitesi, Konya.

[33]. UNSCEAR, 1988, Sources effects and risks of ionizing radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Report to the General Assembly with scientific annexe, New York, USA, ISBN: 92-1- 142143-8

[34]. Nazarow W. W., Nero, A. V., 1988, *Radon and its decay products in indoor air*, ISBN: 9780471628101.

[35]. UNSCEAR, 2006, Effects of ionizing radiation volume 2, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Report to the General Assembly with scientific annexe C, D and E, New York, USA, ISBN: 978-92-1-142270-2

[36]. Sabroux J. C., 1998. *Le radon, traceur des phénomènes naturels*, Le Radon de l'environnement à l'homme, EDP Science, Fransa, 31-53.

[37]. Pflitsch, A., Piasecki, J., 2003, *Detection of an airflow system in Niedzwiedzia (Bear) Cave, Kletno, Poland* Journal of Cave and Karst Studies 65(3), Polonya, 160-173.

[38]. Ielsch G., 2001, *Mise au point d'une méthodologie prédictive des zones à fort potentiel d'exhalation du radon*. Yükseklisans Tezi, Bretagne Occidentale Üniversitesi, Fransa

[40]. Meslin P.Y., 2008, *Le radon, traceur géophysique de l'environnement martien : étude de son transport, première mise en évidence et développement d'une instrumentation pour sa mesure*, Doktora Tezi, Astronomi ve Astrofizik, Pierre ve Marie Curie Üniversitesi, Paris, Fransa

[41]. Tanner A. B., 1964, *Radon migration in the ground: A review*, The Natural Radiation Environment, The University of Chicago Press, ABD, 161-190

[42]. Tanner A. B., 1980. *Radon migration in the ground : a supplementary review*, Natural Radiation Environment III (Technical Information Center /U. S . Department of Energy, Springfield), ABD, 5-56.

[43]. Nazaroff W. W., 1992. *Radon transport from soil to air*, Rev Geophys. 30(2), 137-160.

[44]. Ferry C., Richon P., Beneïto A., Robe M.C., 2002, *Evaluation of the effect of a cover layer on radon exhalation from uranium mill tailings: transient radon flux analysis*, Journal Environment Radioactivity 63(1), 49-64.

[45]. TAEK, 2014, *Konutlarda Radon,* Teknik Rapor 2014/2, Türkiye Atom Enerjisi Kurumu Yayını, Ankara

[46]. TAEK, 2013, *Çevresel Radyoaktivite Atlası,* Türkiye Atom Enerjisi Kurumu Yayını, Ankara, ISBN: 978-975-8898-31-2

[47]. WHO, 2009, *Handbook On Indoor Radon a public health perspective*, Zeeb, H., Shannour, F. (ed), WHO Library Cataloguing-in-Publication Data, Fransa, ISBN 978 92 4 154767 3

[48]. National Research Council, 1999, *Health Effects of Exposure to Radon: BEIR VI*., The National Academies Press, Washington, DC, ABD

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

[50]. ICRP, 1993, *Protection Against Radon-222 at Home and at Work*, ICRP Publication 65, Smith, H. (ed.), ICRP 23(2), Oxfordshire, İngiltere, ISBN 0 08 042475 9

[51]. WHO, 2005, *International Health Regulations*, Third Editions, WHO Library Cataloguing-in-Publication Data, Fransa, ISBN: 9789241580496

[52]. National Research Council, 1988, *Health Risks of Radon and Other Internally Deposited Alpha-Emitters BEIR IV*, The National Academies Press, Washington, DC, ABD ISBN: 978-0-309-03789-1

[53]. IAEA, 2013, *Measurement and Calculation of Radon Releases from NORM Residues,* Ishimori, Y., Lange, K., Martin, P., Mayya Y. S., Phaneuf, M. (ed.), Technical Reports SeriEs No. 474, Marketing and sales unit, Viyana, Avusturalya, ISBN 978–92–0–142610–9

[54]. Janik M. ve diğ., 2014, *Radon and thoron intercomparison experiments for integrated monitors at NIRS*, Review of Scientic Instruments, (85)2, ISSB: 0034-6748

[55]. Fleisher R.L., Price P.B., Walker R.M., 1975, *Nuclear Tracks in Solids-Principles and Application*,.Berkeley California Universitesi Yayıları

[56]. Elzain, E. A., 2017, *Radon Monitoring in The Environment*, Chapter 3, Radon, Arovic, F. (ed), Intechopen Publisher, Sudan, 25-45

[57]. Yamamoto K., Fujii Y., Icotooka Y., Katayama T., 1987, *Highly Stable Silicon Pin Photodiode*, Nuclear Instruments and Methods in Physics A. ISSN: 253:542-547

[58]. Bochicho F., Risica S., 1989, *Active Radon and Radon Daughter Monitors*, Proceedings of the Workshop on Radon Monitoring in Radioprotection, Tommasino L., Furlan G., Khan A.H., Monnin M. (ed), Environmental Radioactivity and Earth Sciences, 3-14 Nisan, ICTP, Trieste, Italy. Singapore: World Scientific; 1989. p. 110

[59]. Bam B.B., Bassigani A., Finazzi P., Giacomlli G., Lembo L., Maltoni G., Partizii L., Predieri F., Sartorio C., Serra P., Steinberg R., Togo V., 1991, *Radon Measurement in The Gran Sasso 44 Radon Underground Laboratory*, Proceedings of the 2nd Workshop on Radon Monitoring in Radioprotection, Furlan G., Tommasino L. (ed), Environmental and/or Earth Sciences, 25 Kasım.-6 Aralık 1991, ICTP, Trieste, Italy. Singapore: World Scientific, 492-498

[60]. Wantick S., Latner N., Graveson R.T., 1986, *A Radon-222 Monitor Using Alpha Spectroscopy*, Health Physics

[61]. Wrenn M.E., Spitz H., Cohen N., 1975, *Design of A Continuous Digital Output Environmental Radon Monitor*, IEEE Transactions on Nuclear Science

[62]. Elzain A. E. A., 2015, *Assessment of Indoor Radon Doses Received by The Students and Staff in Schools in Some Towns in Sudan*, International Journal of Science and Research (IJSR), 4(1), Sudan, ISSN: 2566-2571

[63]. Ghosh P.C., Bhalla N.S., 1966, *A Close Circuit Technique for Radon Measurement in Water and Soil, with Some of Its Applications*, Proc. All India Symposium On Radioactivity and Metrology of Radionuclides, AEET, Bombay, 14

[64]. Jebur, J., 2016, *Estimation of Radon Concentration in soil samples and the effective dose rate using SSNDTs in Al-Kebla district of Basrah Governorate*, Journal Basra Science, Irak, ISSN 1817 2695

[65]. Aljobori S. B., Mahdi, K. H., Hatab, W. O., Mansour, H., 2018, *Determination of Outdoor Radon Concentrations at Madenat Al-Elem University College using CR-39 detector*, International Journal of Engineering and Applied Sciences (IJEAS), (5)5, ISSN: 2394-3661

[66]. İçhedef, M., 2011, *Radon Difüzyon Hızının Farklı Büyük Toprak Gruplarına Göre Değişiminin İncelenmesi,* Doktora Tezi, Nükleer Bilimler Ana Bilim Dalı, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir

[67]. Kuluöztürk, M. F., 2015, *222Rn Seviyelerini Tayin Etmek Amacıyla Göreli Sayım Yapabilen ve Düşük Enerji Tüketen Bir Spektroskopi Sistemi Geliştirilmesi*, Doktora Tezi, Nükleer Fizik, Fırat Üniversitesi, Elazığ

[68]. EPA, 1991, *National Radon Proficiency Program Handbook*, Environmental Protection Agency, Wasington, ABD

[69]. Durridge, 2021, *Rad 7 Electronic Radon Detector User Manuel*, Boston, ABD

[70]. Yılmaz Alan, H., 2019, *İstanbul İli Marmaray ve Metro Yeraltı Ulaşım İstasyonlarında Radon Seviyelerinin Ölçülmesi*, Doktora Tezi, Fizik Ana Bilim Dalı, Nükleer Programı, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul