



**T.C.  
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**DOKTORA TEZİ**

**İSTANBUL İLİ MARMARAY ve METRO YER ALTI ULAŞIM  
İSTASYONLARINDA RADON SEVİYELERİNİN ÖLÇÜLMESİ**

**Hatice YILMAZ ALAN**

**Fizik Anabilim Dalı**

**Nükleer Fizik Programı**

**DANIŞMAN  
Prof. Dr. Baki AKKUŞ**

**Şubat, 2019**

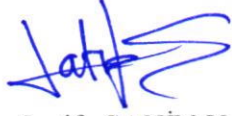
**İSTANBUL**

Bu çalışma, 8.02.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Fizik Anabilim Dalı, Nükleer Fizik Programında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

**Tez Jürisi**



Prof. Dr. Baki AKKUŞ(Danışman)  
İstanbul Üniversitesi  
Fen Fakültesi



Prof. Dr. Latife ŞAHİN YALÇIN  
İstanbul Üniversitesi  
Fen Fakülte



Doç. Dr. Arzu ÇİLLİ  
Yıldız Teknik Üniversite  
Fen Edebiyat Fakültesi



Doç. Dr. Lidya SUSAM AMON  
İstanbul Üniversitesi  
Fen Fakültesi



Doç. Dr. Kutsal BOZKURT  
Yıldız Teknik Üniversitesi  
Fen Edebiyat Fakültesi



20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi’nin aboneli olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

## ÖNSÖZ

Doktora tez çalışmalarım kapsamında başta tezimin tamamlanması olmak üzere her konuda üzerimde emeği olan beni destekleyen kıymetli tez danışmanım Prof. Dr. Baki AKKUŞ'a teşekkürlerimi sunarım. Doktora eğitimim süresince bize şefkatle yaklaşan Fen Fakültesi Dekanı Prof. Dr. Yeşim ÖKTEM'e ve tecrübeleriyle destek olan Doç. Dr. Lidya SUSAM AMON'a teşekkürü borç bilirim.

Çalışma kapsamında gerekli yasal süreçlerde desteklerini esirgemeyen İstanbul Büyükşehir Belediyesi Metro İstanbul A.Ş ile Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı TCDD 1.Bölge Müdürlüğü Marmaray çalışanlarına katkılarından dolayı teşekkür ederim. Ayrıca bana yol gösteren başarılarıyla örnek aldığım hocamız Doç. Dr. Avni AKSOY'a da teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarımın ve hayatımın her aşamasında en büyük destekçim olan sevgili eşim Dr. Fatih ALAN ve kendisi küçük katkısı en derin ve en anlamlı olan manevi desteğiyle güç veren minik kızım Nefes Sude ALAN ile benimle beraber bu süreci yüklenen aile büyüklerime teşekkür eder, minnetlerimi sunarım.

Şubat 2019

Hatice YILMAZ ALAN

# İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ .....	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ŞEKİL LİSTESİ .....	viii
TABLO LİSTESİ.....	x
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ .....	xii
ÖZET .....	xiv
SUMMARY .....	xvi
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
<b>2. GENEL KISIMLAR.....</b>	<b>3</b>
2.1. RADYASYON VE RADYOAKTİVİTE .....	3
2.1.1. Doğal Radyasyon Kaynakları .....	8
2.1.1.1. Kozmik Radyasyon Kaynakları .....	10
2.1.1.2. Karasal (Yeryüzü kaynaklı) Radyasyon Kaynakları.....	10
2.1.1.3. Dahili Radyasyon Kaynakları.....	10
2.1.2. Yapay Radyasyon Kaynakları .....	10
2.2. RADON.....	11
2.2.1. Radon Bozunma Zinciri .....	14
2.2.2. Radon Kaynakları .....	15
2.2.2.1. Bina/Yapı İçi Radon Kaynakları.....	19
2.2.2.2. Toprak ve Kayalardan Gelen Radon .....	19
2.2.2.3. Yapı malzemelerinden gelen Radon.....	20
2.2.2.4. İçme suyundan gelen Radon .....	21
2.2.2.5. Doğalgazdan gelen Radon.....	21
2.2.3. Radonun Sağlık Üzerine Etkileri.....	21
2.2.4. Radon ve Deprem İlişkisi .....	24
2.2.5. Radon Risklerinin Azaltılması İçin Alınabilecek Tedbirler .....	25
2.3. RADON ÖLÇÜM METOTLARI .....	26
2.3.1. Katı Hal İz Kazıma Dedektörleri (SSNTD) .....	28
2.4. ÜLKEMİZDE VE DÜNYADA YER ALTI ULAŞIM İSTASYONLARINDA RADON ÖLÇÜM ARAŞTIRMALARI .....	29

<b>3. MALZEME VE YÖNTEM.....</b>	<b>37</b>
3.1. METRO SİSTEMLERİ.....	37
3.2. YÖNTEM.....	47
3.2.1. LR-115 Yöntemi.....	47
3.2.2. AlphaGUARD Yöntemi .....	48
3.2.3. Gama Ölçerler .....	50
3.3. ÖLÇÜM NOKTALARININ BELİRLENMESİ .....	50
3.3.1. M1a Hattı (Yenikapı-Atatürk Havalimanı) .....	54
3.3.2. M1b Hattı (Yenikapı-Kirazlı Metro Hattı) .....	55
3.3.3. M2 Hattı (Yenikapı-Hacıosman Metro Hattı) .....	56
3.3.4. M3 Hattı (Kirazlı-Olimpiyat-Başakşehir Metro Hattı).....	58
3.3.5. M4 Hattı (Kadıköy-Tavşantepe Metro Hattı).....	58
3.3.6. M5 Hattı (Üsküdar-Yamanevler Metro Hattı).....	58
3.3.7. M6 Hattı (Levent-Boğaziçi Üniv/Hisarüstü Metro Hattı) .....	59
3.3.8. Marmaray Hattı (Kazlıçeşme-Ayrılık Çeşme Hattı) .....	60
3.4. ÖLÇÜM SÜRECİ .....	62
3.4.1. Kimyasal Kazıma Süreci .....	62
3.4.2. Etkin Doz Hesabı.....	64
<b>4. BULGULAR.....</b>	<b>66</b>
4.1.METRO VE MARMARAY İSTASYONLARI RADON KONSANTRASYONLARI .....	66
4.1.1. M1a Hattı Ölçüm Sonuçları.....	66
4.1.2. M1b Hattı Ölçüm Sonuçları .....	70
4.1.3. M2 Hattı Ölçüm Sonuçları .....	72
4.1.4. M3 Hattı Ölçüm Sonuçları .....	77
4.1.5. M4 Hattı Ölçüm Sonuçları .....	81
4.1.6. M5 Hattı Ölçüm Sonuçları .....	86
4.1.7. M6 Hattı Ölçüm Sonuçları .....	89
4.1.8. Marmaray Hattı Ölçüm Sonuçları .....	92
4.1.9. Makinist Odaları Radon Değerlerinin Kıyaslanması .....	94
4.1.10. Tüm İstasyonların Karşılaştırılması .....	95
4.1.11. Tüm İstasyonların Gama Değerleri .....	97
<b>5. TARTIŞMA VE SONUÇ .....</b>	<b>99</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>108</b>
<b>EKLER .....</b>	<b>113</b>

Ek 1: İstasyon Koordinatları.....	113
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>117</b>



## ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa No
Şekil 2.1: Doğal ve yapay radyasyon kaynaklarının etki oranları[9].....	4
Şekil 2.2: Radyasyon çeşitleri.....	6
Şekil 2.3: Radyasyonun insanlara geçiş yolları.....	7
Şekil 2.4: Doğal radyasyon kaynakları.....	13
Şekil 2.5: Radon gazının başlıca kaynakları [13].....	13
Şekil 2.6: Uranyum bozunum zinciri [15].....	14
Şekil 2.7: Ülkelerin Radon gazı aritmetik ortalaması [18].....	16
Şekil 2.8: Türkiye Radon Konsantrasyonu Dağılım Haritası[19].....	16
Şekil 2.9: İstanbul ili <sup>226</sup> Radyum derişimleri.....	17
Şekil 2.10: Radon gazının kapalı ortamlara/binalara girişı [27].....	20
Şekil 2.11: Otuzüç farklı yapı malzemesinde ölçülen <sup>226</sup> Ra, <sup>232</sup> Th ve <sup>40</sup> K Radyonüklitlerinin Ortalama Aktivite Derişim Değerleri ile Yer Kabuğunun Karşılaştırılması.....	20
Şekil 2.12: Türkiye deprem haritası.....	24
Şekil 3.1: İstanbul raylı sistemler ağı.....	39
Şekil 3.2: Türkiye deprem tehlike haritası [65].....	40
Şekil 3.3: Ada tipi istasyon örneği.....	43
Şekil 3.4: Yan peron tipi istasyon örneği.....	44
Şekil 3.5: Yan peron tipi istasyon örneği.....	44
Şekil 3.6: Dedektörlerin istasyon peronlarına konumlandırılmasına örnekler.....	45
Şekil 3.7: İstasyon amirleri odasından bir görüntü.....	45
Şekil 3.8: M2 hattı Taksim İstasyonundan bir görüntü.....	46
Şekil 3.9: Peron seviyelerinde bulunan makinist odalarından bir görüntü.....	46
Şekil 3.10: LR-115 Tip II film görüntüsü.....	48



Şekil 3.11: AlphaGUARD Cihazı. ....	49
Şekil 3.12: Ölçüm yapılan istasyonların konumları. ....	51
Şekil 3.13: İstanbul metro hatları yıllık yolcu sayısı [73]. ....	53
Şekil 3.14: M1a Bakırköy-İncirli İstasyon görseli. ....	54
Şekil 3.15: M1a hattı Yenikapı İstasyonu. ....	55
Şekil 3.16: M1b hattı Kirazlı İstasyonu peron ve iç ortam görseli. ....	56
Şekil 3.17: M2 hattı Levent, Hacıosman, Taksim ve Yenikapı İstasyonları görseli. ....	57
Şekil 3.18: Marmaray hattı yapısı. ....	60
Şekil 3.19: Marmaray Sirkeci, Yenikapı ve Üsküdar İstasyonlarından görüntü. ....	61
Şekil 3.20: LR-115 filmlerinin NaOH çözeltisi içinde banyo süreci. ....	63
Şekil 3.21: Banyo analiz süreçleri tamamlanan filmlerin mikroskop yardımıyla okunmadan önce lamlara yerleştirilmiş halleri. ....	63
Şekil 4.1: M1a hattı istasyonları Radon konsantrasyonları grafiği. ....	69
Şekil 4.2: M1b hattı istasyonları Radon konsantrasyonları grafiği. ....	71
Şekil 4.3: M2 hattı istasyonları Radon konsantrasyon grafiği. ....	76
Şekil 4.4: M3 hattı istasyonları Radon konsantrasyonları grafiği. ....	80
Şekil 4.5: M4 hattı istasyonları Radon konsantrasyonları grafiği. ....	85
Şekil 4.6: M5 hattı istasyonları Radon konsantrasyonları grafiği. ....	89
Şekil 4.7: M6 hattı istasyonları Radon konsantrasyonları grafiği. ....	91
Şekil 4.8: Marmaray hattı Radon konsantrasyonları grafiği. ....	93

## TABLO LİSTESİ

### Sayfa No

<b>Tablo 2.1:</b> Radon gazının kimyasal özellikleri. ....	12
<b>Tablo 2.2:</b> Farklı ülkelerde ev içi ortalama Radon konsantrasyonları. ....	18
<b>Tablo 2.3:</b> Dünya ülkeleri evlerde müsaade edilen Radon konsantrasyon değerleri. ....	19
<b>Tablo 2.4:</b> Bazı yer altı yapılarında ölçülen Radon konsantrasyonları [34]. ....	23
<b>Tablo 4.1:</b> M1a istasyonları Radon konsantrasyonları, AlphaGUARD ölçümü. ....	66
<b>Tablo 4.2:</b> M1a hattı istasyonları Radon konsantrasyonları, LR-115 yöntemi. ....	68
<b>Tablo 4.3:</b> M1a hattı yıllık etkin doz eşdeğerleri. ....	69
<b>Tablo 4.4:</b> M1a hattı istasyonları Radon konsantrasyonları, AlphaGUARD ölçümü. ....	70
<b>Tablo 4.5:</b> M1b hattı istasyonları Radon konsantrasyonları, LR-115 yöntemi. ....	71
<b>Tablo 4.6:</b> M1b hattı yıllık etkin doz değerleri (mSv/yıl). ....	72
<b>Tablo 4.7:</b> M2 hattı istasyonları Radon konsantrasyonları, AlphaGUARD ölçümü. ....	72
<b>Tablo 4.8:</b> M2 hattı istasyonları Radon konsantrasyonları, LR-115 yöntemi. ....	74
<b>Tablo 4.9:</b> M2 hattı yıllık etkin doz değerleri (mSv/yıl). ....	76
<b>Tablo 4.10:</b> M3 hattı istasyonları Radon konsantrasyonları, AlphaGUARD ölçümü. ....	77
<b>Tablo 4.11:</b> M3 hattı istasyonları Radon konsantrasyonları, LR-115 yöntemi. ....	79
<b>Tablo 4.12:</b> M3 hattı yıllık etkin doz değerleri (mSv/yıl). ....	80
<b>Tablo 4.13:</b> M4 hattı istasyonları Radon konsantrasyonları, AlphaGUARD ölçümü. ....	81
<b>Tablo 4.14:</b> M4 hattı istasyonları Radon konsantrasyonları, LR-115 yöntemi. ....	84
<b>Tablo 4.15:</b> M4 hattı yıllık etkin doz değerleri. ....	86
<b>Tablo 4.16:</b> M5 hattı istasyonları Radon konsantrasyonları, AlphaGUARD Ölçümü. ....	87
<b>Tablo 4.17:</b> M5 hattı istasyonları Radon konsantrasyonları, LR-115 yöntemi. ....	88
<b>Tablo 4.18:</b> M5 hattı yıllık etkin doz değerleri (mSv/yıl). ....	89
<b>Tablo 4.19:</b> M6 hattı istasyonları Radon konsantrasyonları, AlphaGUARD ölçümü. ....	90
<b>Tablo 4.20:</b> M6 hattı istasyonları Radon konsantrasyonları, LR-115 yöntemi. ....	91

<b>Tablo 4.21:</b> M6 hattı yıllık etkin doz değerleri (mSv/yıl). .....	92
<b>Tablo 4.22:</b> Marmaray hattı istasyonları Radon konsantrasyonları, AlphaGUARD ölçümü.....	92
<b>Tablo 4.23:</b> Marmaray hattı Radon konsantrasyonları, LR-115 Yöntemi.....	92
<b>Tablo 4.24:</b> Marmaray hattı yıllık etkin doz değerleri (mSv/yıl). .....	94
<b>Tablo 4.25:</b> Makinistlerin maruz kaldıkları Radon değerleri. ....	94
<b>Tablo 4.26:</b> Makinistlerin maruz kaldıkları yıllık etkin doz değerleri.....	95
<b>Tablo 4.27:</b> Tüm istasyonların peronlarının Radon, sıcaklık, nem, basınç ve derinlik değerleri .....	96
<b>Tablo 4.28:</b> İstasyonlarda ölçülen gama değerleri.....	98

## SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
<b><math>\alpha</math></b>	: Alfa
<b><math>\beta</math></b>	: Beta
<b><math>\gamma</math></b>	: Gama
<b>Bq</b>	: Becquerel
<b>Ci</b>	: Curie
<b>CR-35</b>	: Pollyallyl Di-Glycol Karbonat Dedektörü
<b>°C</b>	: Santigrat Derece
<b>e</b>	: Elektron
<b>KBq</b>	: Kilo Becquerel
<b>K</b>	: Potasyum
<b>LR-115</b>	: Selüloz Nitrat Dedektörü
<b>MeV</b>	: Mega Elektron Volt
<b>m</b>	: Metre
<b>NaOH</b>	: Sodyum Hidroksit
<b>nSv</b>	: Nano Sievert
<b>mSv</b>	: Mili Sievert
<b>ppm</b>	: Milyondaki Oran
<b>Pb</b>	: Kurşun
<b>Ra</b>	: Radyum
<b>Rn</b>	: Radon
<b>SI</b>	: Uluslararası Birim Sistemi
<b>Sv</b>	: Sievert
<b>U</b>	: Uranyum
<b>%RH</b>	: Yüzde Bağlı Nem
<b>Th</b>	: Toryum

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
<b>AB</b>	: Avrupa Birliği
<b>ALARA</b>	: Mümkün olan en düşük doz (As Low As Reasonably Achievable)
<b>ÇNAEM</b>	: ekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi
<b>EPA</b>	: evre Koruma Ajansı
<b>IARC</b>	: Uluslararası Kanser Araştırma Kurumu
<b>İBB</b>	: İstanbül Büyükşehir Belediyesi
<b>IEAE</b>	: Uluslararası Atom Enerji Kurumu
<b>ICRP</b>	: Uluslararası Radyasyondan Korunma Komitesi (Internationa Commission on Radiological Protection)
<b>NCRP</b>	:Radyasyondan Korunma Ulusal Konseyi- (National Council on Radiation Protection)
<b>PAKS</b>	: Peron Ayırıcı Kapı Sistemi
<b>SSNT</b>	: Katıhal Nükleer İz Dedektörleri
<b>TAEK</b>	: Türkiye Atom Enerjisi Kurumu
<b>TCDD</b>	: Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları
<b>TÜİK</b>	: Türkiye İstatistik Kurumu
<b>UNSCEAR</b>	: Amerika Birleşik Devletleri Radyasyon Koruması ve lm Milli Komitesi (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation)
<b>USEPA</b>	: Amerika Birleşik Devletleri evre Koruma Ajansı
<b>WHO</b>	: Dünya Sağlık rgt

## ÖZET

### DOKTORA TEZİ

#### İSTANBUL İLİ MARMARAY ve METRO YER ALTI ULAŞIM İSTASYONLARINDA RADON SEVİYELERİNİN ÖLÇÜLMESİ

**Hatice YILMAZ ALAN**

**İstanbul Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Fizik Anabilim Dalı**

**Danışman : Prof. Dr. Baki AKKUŞ**

Radon kokusuz, tatsız, renksiz ve Uranyum elementinin bozunum ürünü olan radyoaktif bir gazdır. İnsanlar tarafından algılanması mümkün olmayan ve uluslararası kuruluşlar tarafından kanserojen madde olarak ilan edilen 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.

Bu çalışmada İstanbul ili yer altı ulaşım istasyonlarında çalışma ofisleri, bilet turnikeleri, makinist odaları ve peronlarda Radon konsantrasyonları belirlenmiştir. 7 hat ve 70 istasyonda ölçüm yapılmıştır. İstanbul metro ve Marmaray yer altı ulaşım hatlarında belirlenen ölçüm noktalarında LR-115 ve AlphaGUARD ölçüm teknikleri ile Radon tespiti yapılmış hem de gama ölçerler ile gama değerleri tespit edilmiştir. Çalışanlar ve yolcular için yıllık etkin doz değerleri hesaplanmıştır. Radon konsantrasyonu tespiti çalışmasında peronlar için  $39.47 \text{ Bq/m}^3$  ile  $382.02 \text{ Bq/m}^3$  aralığında değerler bulunmuştur. Tüm istasyonların ortalama Radon değeri ise peronlar için  $114.60 \text{ Bq/m}^3$  bulunmuştur. Bulunan değerler ülkemiz için belirlenen limit değerlerin altındadır. Elde edilen veriler uluslararası standartlar ve çalışmalar ile kıyaslanmıştır.

Şubat 2019, 134 sayfa.

**Anahtar kelimeler:** İstanbul Metro, Marmaray, Radon, LR-115, Etkin doz.



## **SUMMARY**

### **Ph.D. THESIS**

#### **Radon Concentration Measurements in Marmaray and Metro Subway Station in Istanbul**

**Hatice YILMAZ ALAN**

**İstanbul University**

**Institute of Graduate Studies in Science and Engineering**

**Department of Physics**

**Supervisor : Prof. Dr. Baki AKKUS**

Radon is odorless, tasteless, colorless and a radioactive gas that is the product of degradation of Uranium. The studies for the determination of Radon, which is impossible to be perceived by people and declared as carcinogenic matter by international organizations, continues commonly. While studies are carried out to determine the amount of Radon in homes, in recent years, studies on determination of Radon values are given importance in tunnel, cave, metro stations and underground working areas. Radon gas is known to play a major role in the causes of lung cancer. For this reason, Radon levels should be known in the environments we live in.

In this study, Radon concentrations were determined in offices, ticket gates, drivers rooms and platforms in Istanbul subway. Measured at 7 lines and 70 stations. Radon was determined by both LR-115 and AlphaGUARD measurement techniques in Istanbul subway and Marmaray underground transportation lines and also gamma values were determined. Annual effective dose values were calculated for employees and passengers. In the radon concentration determination study values were found between  $39.47 \text{ Bq / m}^3$  and  $382.02 \text{ Bq / m}^3$  for the platforms. The average radon value of all stations was found to be  $114.60 \text{ Bq / m}^3$ . The values are below the limit values determined for our country. The data obtained were compared with international standards and studies.

February 2019, 134 pages.



**Keywords:** Istanbul Subway, Marmaray, Radon, LR-115, Effective dose.



## 1. GİRİŞ

Dünyada tüm canlılar milyarlarca yıldır doğada bulunan doğal radyoaktif kaynaklardan yayılan ve evrenden gelen hayatın bir parçası olan kozmik ışıklardan dolayı radyasyona maruz kalmaktadır. Hem elektromanyetik radyasyon (cep telefonu,bilgisayar...) hem de iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalan canlılar iç ve dış ışınlama ile radyasyonla ışınlanmaktadır. Vücudumuza sindirim ve solunum yoluyla, içinde yaşadığımız ortamının su ve havasıyla maruz kaldığımız radyasyon vücudumuzda birikmekte olup zamanla organlarımıza zarar vermektedir. Dünya genelinde olduğu gibi ülkemizde de doğal radyasyon, işimiz gereği aldığımız iyonlaştırıcı radyasyon veya sağlık amaçlı tıbbi ışınlama ile vücudumuza giren radyasyon değerleri belirli sınır değerler altında tutulmaya çalışılmaktadır. Ülkemizde radyasyon güvenliği konusunda tek yetkin kurum olan Türkiye Atom Enerji Kurumu(TAEK), uluslararası düzenlemelere göre belirlenen ve uygulanan ALARA (mümkün olan en küçük doz değeri) prensiplerini dayanak alarak maruz kalabileceğimiz radyasyon değerlerini belirlemiştir. Bu çalışma kapsamında doğal radyasyon kaynaklarından gelen ve dünya genelinde bu doğal kaynakların %55'ini oluşturan Radon gazı hakkında bilgi verilecek ve İstanbul ili Marmaray ve metro yer altı ulaşım istasyonlarında Radon seviyelerinin belirlenmesi hakkında yapılan çalışma ile çalışma verileri yorumlanacaktır. Radon gazından dolayı maruz kalınan yıllık doz yaklaşık olarak 1.3 mSv'dir. Radon, Uranyumun mevcut olduğu tüm kayalardan, topraktan gelmekte ve gaz olması nedeniyle bulunduğu ortamın boşluklarında ilerleyerek atmosfere kaçma eğilimi göstermektedir [1].

Uluslararası radyasyon komitelerinin Radon konusunun öneminden bahsetmesiyle 1970'li yıllardan itibaren kapalı ortamlarda özellikle ev ortamlarında Radon konsantrasyonları belirlenmeye başlamıştır. Ancak 1990'lı yılların sonu itibariyle daha da önem kazanan bu çalışmalar okullar, metro istasyonları, laboratuvarlar, tüneller, yer altı ocakları ve mağara gibi kapalı ve özellikle bodrum katı seviyelerinde bulunan alanlarda yapılmaya başlanmıştır.

Bu çalışmada İstanbul ili yer altı ulaşım istasyonlarında Radon seviyeleri belirlenmiş olup uluslararası çalışmalar ile kıyaslanmıştır. Yer altı ulaşım istasyonlarında çalışanlar ve yolcular için hesaplanan yıllık etkin doz değerleri yetkin kuruluşların belirlediği limit değerler ile karşılaştırılmıştır. Tez çalışması kapsamında Radon gazının özellikleri, kaynakları ve sağlığa

etkilerinden bahsedilmiş olup benzer çalışmalara değinilip ölçüm metotları hakkında bilgiler verilmiştir. Bu alışma kapsamında kullanılan materyaller ve sonuçlar detaylıca anlıtılarak çalışma sonlandırılmıştır. Bu alışma İstanbul ilinin dünya üzerindeki turistik ve fiziksel konumu, istasyonları kullanan yolcu sayısı bakımından, Marmaray'ın inşası yönünden ve daha önce benzer çalışma yapılmaması açısından önem arz etmektedir.



## 2. GENEL KISIMLAR

### 2.1. RADYASYON VE RADYOAKTİVİTE

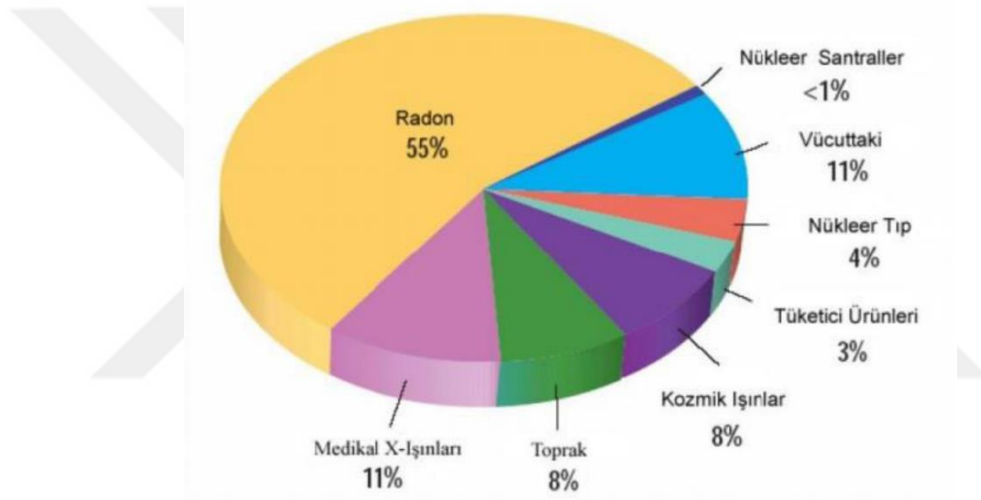
İç içe olduğumuz evrenin kaçınılmaz bir parçası olan radyasyon, doğal ve yapay radyasyon olarak ikiye ayrılmakta ve yaptığı etki bakımından ise iyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon olmak üzere iki grupta sınıflandırılmaktadır. Maruz kaldığımız radyasyonun büyük bir kısmı doğal kaynaklardan gelen ve iyonlaştırıcı etki gösteren radyasyon olup belirlenen sınır değerlerin üstünde alınması sağlık problemlerine yol açmaktadır. Bu sebeple yaşadığımız ortamlardaki radyasyon değerlerinin bilinmesi ve takibinin yapılması gerekmektedir. Doğal kaynaklı radyasyonların ise neredeyse yarısını Radon gazı oluşturmaktadır.

1979 yılında Dünya Sağlık Örgütü (WHO), Radonun evlerdeki etkilerini gündeme getirerek konunun öneminden ve sağlığa etkilerinden bahsetmiştir. 1988 yılında kanserojen madde olarak ilan edilen Radon gazının etkilerinden korunmak için 1993 yılında uluslararası çağrı yapılmıştır [2]. Radon, solunmasıyla birlikte akciğerlere yerleşerek ve yayınladıkları alfa parçacıkları ile akciğerin ışınlanmasına ve doz almasına neden olurlar [3]. Radonun, akciğer kanseri nedeni olarak sigaradan sonra ikinci sırada yer aldığı bilinmektedir. Radona maruz kalma Uluslararası Radyasyondan Korunma Komitesi (ICRP) tarafından sınırlandırılmış ve binalarda yıllık ortalama Radon konsantrasyonu için bir eylem seviyesi önerilmiştir [4].

Radon gözle görülmeyen, renksiz, tatsız, kokusuz bir gazdır. 1899 senesinde Ernest Rutherford ve 1900 senesinde Friedrich Ernest Dorn tarafından, bozunma ürünü olarak yaydığı alfa parçacığı sayesinde keşfedilmiştir. Radon, Uranyumun ( $^{238}\text{U}$ ) radyoaktif bozunma zinciri içerisinde ve kendisinden önce gelen Radyum ( $^{226}\text{Ra}$ ) un bir alfa vererek bozunmasından ortaya çıkmaktadır [5].

Alfa parçacıkları yayımladığı bilinen Radon gazı zamanla kapalı ortamlarda birikebilir. Yüksek seviyede Radon ihtiva eden ortamlarda, Radon ve Radon ürünlerinin solunması, akciğerde kanser oluşumuyla bağdaştırıldığından Radon konsantrasyonlarının kapalı mekanlar için belirlenmesi oldukça önemlidir. Yaşadığımız ortamda; içme suları, gıda malzemeleri, yapı malzemeleri ve jeolojik yapılar az veya çok miktarda radyoaktif madde içermektedir [6]. Bu gibi yollarla maruz kaldığımız doğal radyasyon kaynaklarından en önemlisini Radon oluşturmaktadır. Maruz kaldığımız doğal ve yapay radyasyon kaynakları Şekil 2.1'de

gösterilmiştir. En ağır soy gaz olan ve 5.49 MeV enerjili alfa-parçacığı yayımlayan tek radyoaktif gaz olan Radon gazının yarılanma ömrü 3.82 gündür. Radon, Hidrojenden 100 kat ve havadan 7,5 kat kadar daha ağırdır [7]. Radon gazının kimyasal özellikleri Tablo 2.1’de sunulmuştur. Uranyum ve Radyumun bozunması sonucu oluşan Radon ve Radon ürünlerinin yerküredeki kaya katmanlarında sürekli üretildiği ve atmosfere yayıldığı 1997 yılında Durrani ve Ilic tarafından paylaşılmıştır [8]. Radon konsantrasyonlarının; toprak gazında 18-180 kBq/m<sup>3</sup>, bina içi atmosferinde 11-300 Bq/m<sup>3</sup>, okyanuslar üzerindeki hava tabakasında 0.02-0.2 Bq/m<sup>3</sup>, mağaralarda 0.37-11 kBq/m<sup>3</sup> ve havalandırması olmayan Uranyum madenlerinde 37-3700 kBq/m<sup>3</sup> aralığında değiştiği bildirilmektedir [7].



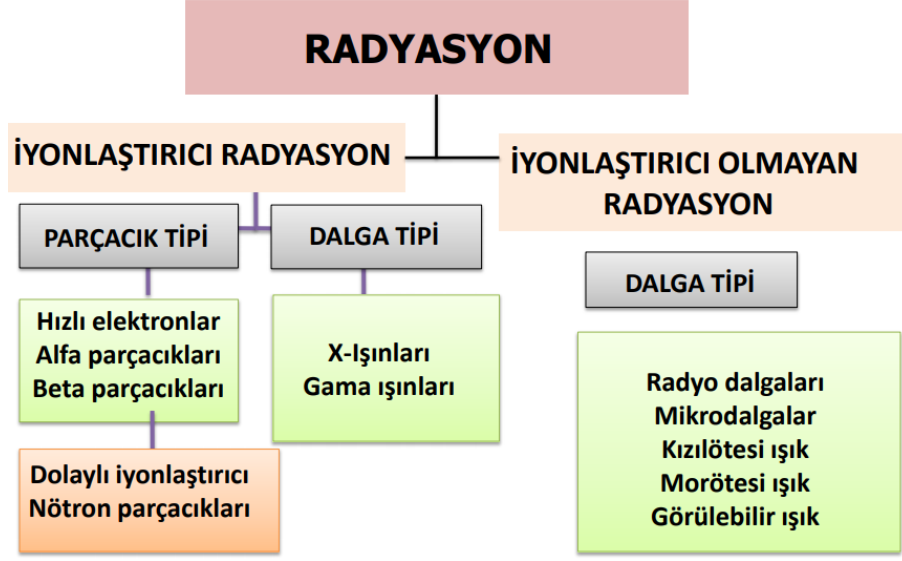
**Şekil 2.1:** Doğal ve yapay radyasyon kaynaklarının etki oranları[9].

Şekil 2.1’de görüldüğü gibi bir yıl içinde ortalama maruz kaldığımız yapay ve doğal kaynaklı iyonlaştırıcı radyasyon miktar yüzdeleri içinde en büyük oran Radon radyasyonundan gelmektedir. Dolayısıyla yaşadığımız ortamın yaydığı Radon konsantrasyonları önem arz etmektedir.

Radyoaktif atom çekirdeklerinin daha kararlı hale gelebilmek için yayımladıkları fazla enerjiye radyasyon denilmektedir. Radyasyonun canlılarda tahribata yol açtığı bilinmektedir ve gerekli önlemler alınmaktadır. Radyasyona karşı alınacak ilk önlem ne kadar doza maruz kalındığını bilmek dolayısıyla miktar ölçmektir. Radyasyonun etkileri maruz kalınan radyasyonunun cinsine, miktarına ve süresine göre değişim göstermektedir. Radyasyonun etkilerine karşı bir tutum kazanmak ve kazandırmak her bireyin görevidir. Henri Becquerel tarafından 1903 yılında

keşfedilen radyoaktivite Uluslararası Birim Sistemi (SI)'inde; kararsız atom çekirdeklerinin kararlı hale geçmek için bozunum eğilimi olarak tanımlanır ve birimi Becquerel'dir. Doğal radyoaktiflik; bozunuma uğrayan radyoizotopun doğada bulunması ya da doğada bulunan diğer radyoizotopların bozunmasından ortaya çıkar. Yapay radyoaktiflik ise radyoizotopun insan tarafından yapay olarak üretilmesi olarak ifade edilir.

Radyasyon, etkileştiği ortamdaki atomları ve molekülleri iyonize edebilme özelliği olup olmadığına göre iyonlaştırıcı radyasyon (alfa radyasyonları, beta radyasyonları, gama ışınları, X- ışınları, kozmik ışınlar, nötronlar) ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon (radyo dalgaları, mikrodalgalar, ultraviyole, kızılötesi) şeklinde iki ana kategoride sınıflandırılır. Şekil 2.2' de radyasyon çeşitleri görülmektedir. Atomla etkileşime girebilecek kadar güçlü enerji seviyesine sahip, alfa ve beta parçacığı gibi hareket eden yüklü parçacıkların meydana getirdikleri etki iyonlaştırma (iyonizasyon) olarak adlandırılmaktadır. Atomla etkileşime girebilecek kadar güçlü olmayan enerji seviyelerindeki elektromanyetik dalgaların, atomların yörüngesinde sebep olduğu değişim organizma üzerinde büyük bir hasara neden olmaz. Her gün elektromanyetik dalgaların etkisinde kalınmaktadır. Bu enerjiye örnek olarak, görünür ışık, radyo, televizyon dalgaları ile ultraviyole (UV) dalgalar ve mikrodalga gibi çok geniş bir spektrumu verilebilir. Radon çekirdeği alfa parçacığı yayımladığı için iyonlaştırıcı radyasyon olarak bilinmektedir. Doğada kendiliğinden var olduğu için hem doğal hem de iyonlaştırıcı radyasyon özelliği göstermektedir. Radyasyon ile ilgili bazı terimler aşağıda tanımlanmıştır. Radyasyon kütle ve enerjisine bağlı olarak ise parçacık ve dalga tipi radyasyon olmak üzere iki biçimde bulunur. Parçacık radyasyonu belli bir kütle ve enerjiye sahip çok hızlı hareket eden küçük parçacıkları ifade ederken dalga tipi radyasyon belli bir enerjiye sahip fakat kütsüz radyasyonu ifade eder.



Şekil 2.2: Radyasyon çeşitleri.

Radyoaktif elementler, radyoaktif izotoplar veya radyonüklitler olarak adlandırılır. 1500'ün üzerinde farklı radyoaktif nüklit vardır. Bu radyonüklitler 3 genel grupta toplanabilirler.

- 1-Başlangıçta dünyanın oluşumundan önce var olan radyonüklitler (Primordial)
- 2-Kozmik ışın etkileşimleri sonucunda oluşan radyonüklitler (Kozmojenik)
- 3-İnsan üretimi ve aktiviteleri nedeni ile oluşan radyonüklitler (doğal olanlarla kıyaslandığında daha az miktarlarda bulunmaktadır).

Aktivite, bir radyoaktif izotopun her bir birim zaman içinde parçalanma miktarını göstermektedir. Parçalanmanın boyutları olmadığı için aktivite saniye başına ölçülür ve SI birim sisteminde birimi Becquerel (Bq)'dir.

Doz ise herhangi bir maddenin belirli bir zaman aralığı içerisinde kullanılan veya tüketilen miktarıdır. Radyasyon dozu ise hedef kütle tarafından, belli bir sürede soğurulan veya alınan radyasyon miktarıdır. Bir başka deyişle bireyin soğurduğu (maruz kaldığı) radyasyon enerjisinin miktarıdır. Birimi Sievert (Sv)'dir.

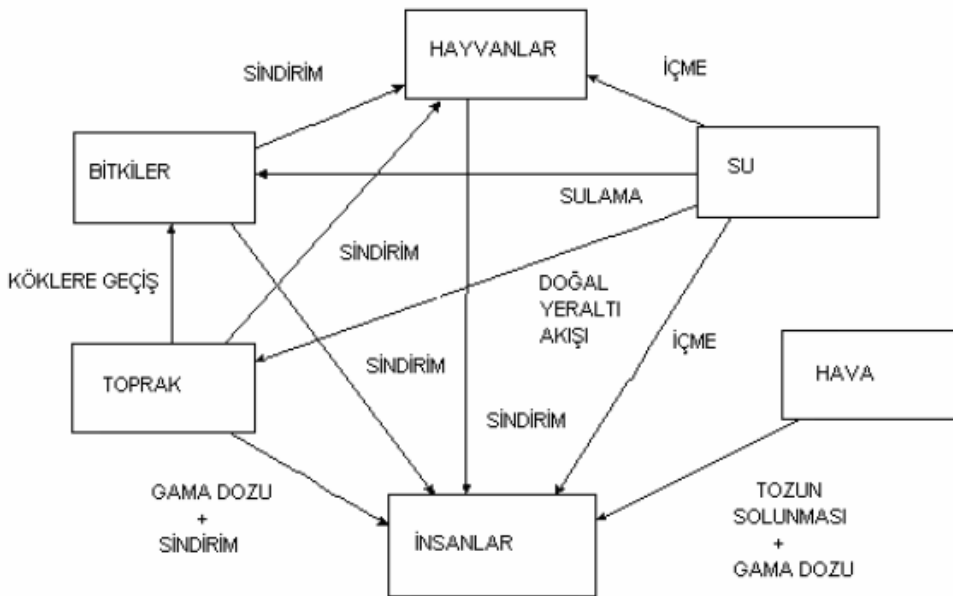
İşnlama, bir ortamda bulunan radyasyon düzeyini belirlemek için maruz kalınan radyasyon miktarı ölçmektedir. Bu, X veya gama ışınının havada neden olduğu iyonizasyon miktarıdır. SI birim sisteminde işnlamanın birimi Coulomb/kg'dır.

Soğurulmuş Doz Birimi, materyalin bir birim kütlelerinde depo edilen enerjinin ölçüsüdür. Herhangi bir radyasyonu ölçebilmektir.

Eşdeğer doz; birimi Sievert (Sv) olup, radyasyonun türüne ve enerjisine bağlı olarak herhangi bir doku veya organın maruz kaldığı doz miktarının ölçüsüdür.

Etkin doz, birimi Sievert (Sv) olup, farklı doku ve organlardaki eşdeğer doz miktarlarının toplamıdır.

Bir bireyin yıllık olarak aldığı yıllık toplam doz iç ışınlama ile dış ışınlama dozlarının toplamıdır. Tıbbi ışınlamalar ve doğal radyasyon değerleri bu değerlere dahil edilmez fakat doğal radyasyon değerlerinde insan ve çevre sağlığı açısından takibi yapılmalıdır. Uluslararası kuruluşların doğal radyasyon kaynaklı radyasyon maruziyet değerleri sınırlandırılmıştır. Yıllık toplam doz değerleri için TAEK, ALARA prensiplerine göre limit değerleri belirlemiştir. İç ışınlama, radyasyonun solunum, sindirim veya derideki yaralar vasıtasıyla vücut içerisine alınmasıdır. Dış ışınlama ise radyoaktif maddelerden veya radyasyon üreten cihazlardan gamma ve X ışınlarına maruz kalma durumudur. Radyasyonun insanlara hangi yollarla ulaştığı Şekil 2.3'te verilmiştir.



Şekil 2.3: Radyasyonun insanlara geçiş yolları.



### 2.1.1. Doğal Radyasyon Kaynakları

Doğal radyasyon doğada kendiliğinden var olan, oluşan ve kaçınılmaz bir şekilde maruz kaldığımız radyasyondur ve temelinde iki ana kaynağı bulunmaktadır. Bunlar, atmosfere giren yüksek enerjili kozmik ışın parçacıkları ve yer kabuğunda bulunan radyoaktif çekirdeklerdir. Yıllık ortalama olarak dünya genelinde bir kişi 2.7 mSv doğal radyasyona maruz kalmaktadır. Bir başka deyişle doğal radyasyon, karasal ve kozmik radyasyonları içeren dış radyasyon ile iç radyasyonları içermektedir. Yapılan araştırmalara göre bireylerin kozmik radyasyondan dolayı maruz kaldıkları yıllık doz değeri 0.39 mSv' dir. Yerküre kaynaklı Radon hariç maruz kalınan yıllık etkin doz değeri ise 0.46 mSv' dir. İnsanların büyük çoğunluğu yüksekliği az olan bölgelerde yaşadıkları için kozmik radyasyon nedeni ile maruz kaldıkları dozlarda fazla farklılık gözlenmez. Bir dağın tepesinde veya havada yol alan bir uçakta bulunan bir kişi, deniz seviyesinde bulunan bir kişiden çok daha fazla kozmik ışına maruz kalır. Karasal kaynaklı doğal radyasyon kaynakları, granitik, volkanik ve fosfat kayaçları içeren topraklardan üretilen çevresel malzemelerde ve insanların kendi vücutlarının içinde bulunabilir. İnsanların yer kabuğu kaynaklı radyasyon maruziyeti Uranyum-238 ( $^{238}\text{U}$ ) ve Toryum-232 ( $^{232}\text{Th}$ ) doğal radyoaktif serilerinde yer alan radyoizotoplar ile Potasyum-40 ( $^{40}\text{K}$ ) radyoizotopundan yayınlanan gama ışınları kaynaklıdır. Vücut içi radyasyon maruziyeti ise canlıların vücudunda doğal olarak bulunan  $^{40}\text{K}$ , Karbon-14 ( $^{14}\text{C}$ ), Radium-226 ( $^{226}\text{Ra}$ ) gibi radyoaktif izotoplar tarafından yayılan radyasyondur. Radon hariç vücut içi ışınlanmadan kaynaklanan yıllık etkin doz ise 0.23 mSv'dir [10]. En önemli ve birincil doğal kaynak ise Radon ve bozunum ürünleridir. Bir bireyin Radon kaynaklı maruz kaldığı yıllık radyasyon değeri 1.3 mSv dir. Yiyecek, içecek ve teneffüs ettiğimiz havadan maruz kaldığımız dozun dünya ortaması yaklaşık 0.25 mSv/yıl'dır. Özellikle kabuklu yiyecekler daha fazla radyoaktif madde içerirler ve bu ürünleri fazla miktarda tüketen insanlar bu ortalamanın üzerinde bir radyasyon dozu alırlar.

UNSCEAR tarafından 2008 yılında paylaşılan verilere göre maruz kalınan radyasyon miktarlarının %20 si yapay kaynaklarından gelirken %80'i doğal kaynaklardan gelmektedir. Radyasyonun canlılar üzerinde oluşturduğu olumsuz etkilerine rağmen özellikle tıpta teşhis ve tedavi amaçlı, nükleer reaktörlerde, çeşitli araştırma faaliyetlerinde ve endüstride yararlı amaçlar için de kullanılmaktadır. Gerek doğal radyasyona karşı gerekse radyasyon çalışanlarının yapay radyasyona karşı etkili bir şekilde korunmalarını ve güvenliklerinin sağlanmasını gerektirmektedir. Bu sebeple radyasyon maruziyeti ölçümlerinin gerekliliği

ortaya çıkmış, radyasyondan korunmada yetkin uluslararası kuruluşlar sınırlayıcı limit değerler bildirmişlerdir. 1928 yılında kurulan iyonize radyasyon maruziyeti sonucunda oluşabilecek kanser gibi hastalıkların önlenmesi çalışmalarını yürüten Uluslararası Radyolojiksel Korunma Komisyonu (ICRP) ([www.icrp.org](http://www.icrp.org)), 1955 yılında Birleşmiş Milletler tarafından iyonize radyasyonun etkilerini belirlemek için kurulan Atomik Radyasyonun Etkileri Üzerine Bilimsel Komisyon (UNSCEAR) ([www.unscear.org](http://www.unscear.org)), 1957 yılında kurulan Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (IAEA) ([www.iaea.org](http://www.iaea.org)) ve 1970 yılında kurulan insan sağlığı ve çevreyi korumak için kurulan Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı (USEPA) ([www.epa.gov](http://www.epa.gov)), radyasyondan korunmada uluslararası yetkin kuruluşlardır. Ülkemizde ise insan ve çevrenin radyasyondan korunması ile ilgili görevler ve faaliyetler 1956 yılında kurulan Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK) tarafından yürütülmektedir ([www.taek.gov.tr](http://www.taek.gov.tr)). Çalışanlar için radyasyondan korunma ile ilgili temel kriterleri oluşturan ICRP, diğer uluslararası radyasyondan korunma örgütleri ile işbirliği içinde çalışmalarına devam etmekte olup insanların radyasyon maruziyetini azaltmak için alınabilecek önlemler ve müsaade edilebilir maksimum dozlar hakkındaki çalışmalarını sürekli tavsiye raporları ile güncellemektedir.

Doğal radyasyon kaynakları toprakta Toryum, Uranyum, Potasyum, Radyum ve Radon şeklinde bulunurken insan vücudunda Potasyum40, Radyum, Karbon14, Tritiyum ve Polonyum elementleri şeklinde olabilmektedir.

Uranyum, doğada her yerde mevcut olan radyoaktif, ağır ve gümüş renkli bir metaldir. Az da olsa bütün kaya ve toprakta, yerkabuğunun doğal maddelerinden yapılan materyallerde bulunur. Doğal olarak var olan Uranyum elementinin üç farklı izotopu bulunmaktadır;  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  ve ağırlığının % 99.2745'ini  $^{238}\text{U}$ , % 0,7200'ini  $^{235}\text{U}$  ve % 0,0055'ini  $^{234}\text{U}$  oluşturur. Uzun bir yarı ömre sahip olan ve doğada en çok bolluğa sahip olan Uranyumun her bir birim kütlelerinde çok düşük bozunma oranına sahiptir. Tüm Uranyum izotopları temel olarak alfa parçacıkları yayımlarlar. Alfa parçacıkları ise yumuşak doku içerisinde sadece 30  $\mu\text{m}$  ilerleyebilir. Böylece derinin yüzeysel tabakasındaki ölü hücrelere bile ulaşamayabilir. Radon ise  $^{238}\text{U}$  Uranyum ürünü olarak ortaya çıkar ve solunmasıyla risk oluşturur [11].

### **2.1.1.1. Kozmik Radyasyon Kaynakları**

Doğal Radyasyonun bir kısmı uzaydan gelen kozmik ışıklardan kaynaklanır. Dünya atmosferinden geçmeye çalışırken tutulan kozmik radyasyonun bir kısmı yer küreye ulaşır ve bu radyasyon maddelerden kolayca geçebilmektedir. Kozmik radyasyondan gelen doz, dünyanın çeşitli bölgelerinde yüksekliği ve dünyanın manyetik alanından dolayı farklılık gösterir. Atmosfere giren kozmik ışıklar atmosferden geçtikten sonra yeryüzündeki manyetik alandan da etkilenir. Kutup yakınlarına ekvatora oranla daha fazla kozmik ışın girer. Yapılan araştırmalara göre bireylerin kozmik radyasyondan dolayı maruz kaldıkları yıllık doz değeri 0.39 mSv' dir.

### **2.1.1.2. Karasal (Yeryüzü kaynaklı) Radyasyon Kaynakları**

Karasal radyasyon, toprakta, sularda, yiyeceklerde, yapı malzemelerinde ve doğalgazda bulunur. Radyoaktif maddeler doğada her yerde bulunur. Düşük konsantrasyonlu Uranyum, Toryum ve bunların bozunma ürünleri her yerde mevcuttur. Bu radyoaktif çekirdeklerin bir miktarı yiyecek ve su ile sindirilirken, Radon gibi bir kısmı ise solunur. Karasal kaynaklardan gelen doz, dünyanın farklı bölgelerinde çeşitlilik gösterir. Toprağında yüksek konsantrasyonlu Uranyum ve Toryum bulunan bölgeler daha yüksek seviyelerde doz miktarına sahiptir. Yerküre kaynaklı Radon hariç gama ışınları da dahil maruz kalınan yıllık etkin doz değeri ise 0.46 mSv' dir.

### **2.1.1.3. Dahili Radyasyon Kaynakları**

Kozmik ve karasal radyasyona ek olarak, her insanda doğuştan bu yana bulunan radyoaktif materyaller ve bunun alt ürünleri bulunmaktadır. Bunların başlıcaları  $^{40}\text{K}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  ve  $^{14}\text{C}$ 'dur. Bu tip radyasyonda doz, karasal ve kozmik radyasyondan daha küçüktür. Dahili (iç) radyasyondan gelen yıllık ortalama doz miktarı 0.23 mSv/yıl dır.

## **2.1.2. Yapay Radyasyon Kaynakları**

Yapay radyasyon kaynakları gelişmiş endüstrinin gereksinimleri, yaşantı ihtiyaçları ve sağlık sektörü gibi insanoğlu tarafından teknolojik gelişimin gereği olarak üretilen yapay radyasyon kaynakları da tıpkı doğal radyasyon kaynakları gibi belli miktarlarda radyasyon dozuna maruz kalınmasına neden olurlar. Fakat bu doz miktarı, ihtiyaçlar doğrultusunda artırılıp azaltılsa da,

doğal kaynaklardan alınan doza göre çok daha düşüktür. Doğal radyasyon kaynaklarının aksine tamamen kontrol altında olmaları da maruz kalınacak doz miktarı açısından müdahale edilebilir takibi yapılabilir önemli bir özelliktir. Nükleer santraller, tıbbi cihazlar, medikal uygulamalar yapay radyasyon kaynakları olarak bilinmektedir.

## 2.2. RADON

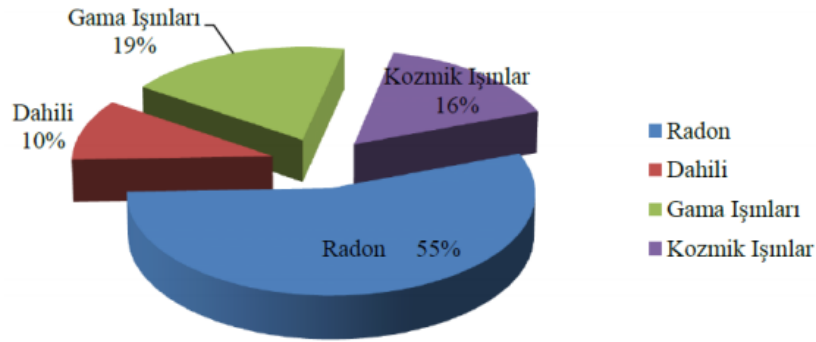
Doğal kaynaklı radyasyon maruziyetinin neredeyse yarısından fazlasını Radon gazının oluşturduğu belirtilmiştir. Radon doğal olarak oluşan bir radyoaktif gazdır. Kokusu, rengi veya tadı yoktur. Radon tüm kayalarda ve toprakta bulunan Uranyumun doğal radyoaktif bozunmasından üretilir. Radon suda da bulunabilir. Açık havada, Radon genellikle çok düşük konsantrasyonlara seyredirken bu durum genellikle bir problem oluşturmaz fakat kapalı ortamlardaki Radon konsantrasyonları daha yüksek olup, maden, metro, mağara ve su arıtma tesisleri gibi yerlerde en yüksek seviyeler bulunur. Ortalama açık ortam Radon seviyesi 5–15 Bq/m<sup>3</sup> arasında değişirken kapalı ortamlar olan evler, okullar ve ofisler gibi binalarda dünya genelinde 10 Bq/m<sup>3</sup> ile 10000 Bq/m<sup>3</sup> aralığında Radon seviyeleri bulunmuştur [12].

Radon gazının sigaradan sonra akciğer kanserinin en önemli nedeni olduğu bilinmektedir. Radonun, bir ülkede ortalama Radon düzeyine ve sigara içme sıklığına bağlı olarak, bir ülkedeki tüm akciğer kanserlerinin% 3-14'üne neden olduğu tahmin edilmektedir. Ülkelerde ulusal yasal düzenlemeler ile Radon miktarları sınırlandırılmakta insanlar bilinçlendirilmekte ve belirlenen limit değerlerin altında olsa bile Radon seviyelerini daha da düşürmek için gerekli önlemler alınmaktadır. Bu konuda akademik çalışmalar da yaygınlaşmaktadır. Akciğer kanseri riski, uzun süreli ortalama Radon konsantrasyonunda 100 Bq/m<sup>3</sup> artış başına % 16 artar. Akciğer kanseri riski Radon maruziyetinin artmasıyla orantılı olarak artar. Radonun sigara kullananlarda akciğer kanserine daha fazla sebebiyet verdiği görülmektedir. Sigara içenler sigara içmeyenlere göre Radon kaynaklı akciğer kanseri riskinde 25 kat daha fazla risk altında olduğu da tespit edilmiştir. Radon gazının kimyasal özellikleri Tablo 2.1'de verilmiştir.

**Tablo 2.1:** Radon gazının kimyasal özellikleri.

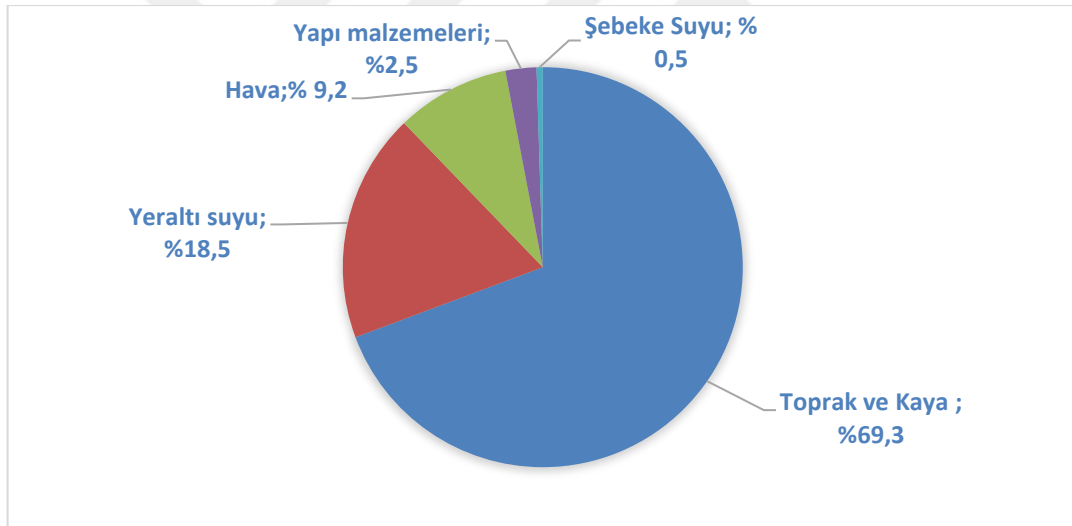
Fiziksel Hali	Gaz (soy gaz)
Atom numarası	86
Görünüşü	Renksiz, kokusuz, gaz
Atom ağırlığı	222 g/mol
Yoğunluk	9.73 g/cm <sup>3</sup>
Ergime Noktası	202.0°K . -71.15 °C
Kaynama noktası	211.3 °K. -61.85 °C
Ergime ısısı	3.247 kJ/mol
Buharlaşma ısısı	18.10 kJ/mol

Son yıllarda toplumun yoğun olarak bulunduğu yerlerde, günlük harcadığı zaman miktarının fazla olduğu yerlerde Radon seviyeleri belirlenmesi çalışmaları hızla yayılmakta ve ülkemizde de yaygınlaşmaktadır. Bu çalışmanın amacı; İstanbul ilinde Marmaray ve metro yer altı istasyonlarında belirlenen ölçüm noktalarında (istasyon amirleri odası, gişe girişleri, bekleme platformu vb) 1 aylık süre (Şubat-Mart2018) ile Radon seviyelerinin ölçülmesi, uluslararası standartlar ve sınır değerler ile alanındaki ilgili çalışmalarla kıyaslanmasıdır. Elde edilecek sonuç verilerine göre halkın sağlığı açısından gerekli önlemler alınabilir. Bu tez kapsamında İstanbul raylı sistem ağında 70 yer altı istasyonunda 310 adet LR-115 film kullanarak pasif ölçüm donanımları ve anlık ölçümler için AlphaGUARD cihazı ve gama radyasyonu için portatif gama ölçerler kullanılmıştır. Bu çalışma ülkemizde nüfusun yoğun toplandığı ve turizm açısından dünya çapında yer edinmiş il olması ve en sık kullanılan ulaşım vasıtası olması sebebiyle önem arz etmektedir.



Şekil 2.4: Doğal radyasyon kaynakları.

Şekil 2.4'ten görüldüğü gibi Radon kaynaklı radyasyonun doğal kaynaklı radyasyonun %55 ini oluşturduğu bilinmektedir.



Şekil 2.5: Radon gazının başlıca kaynakları [13].

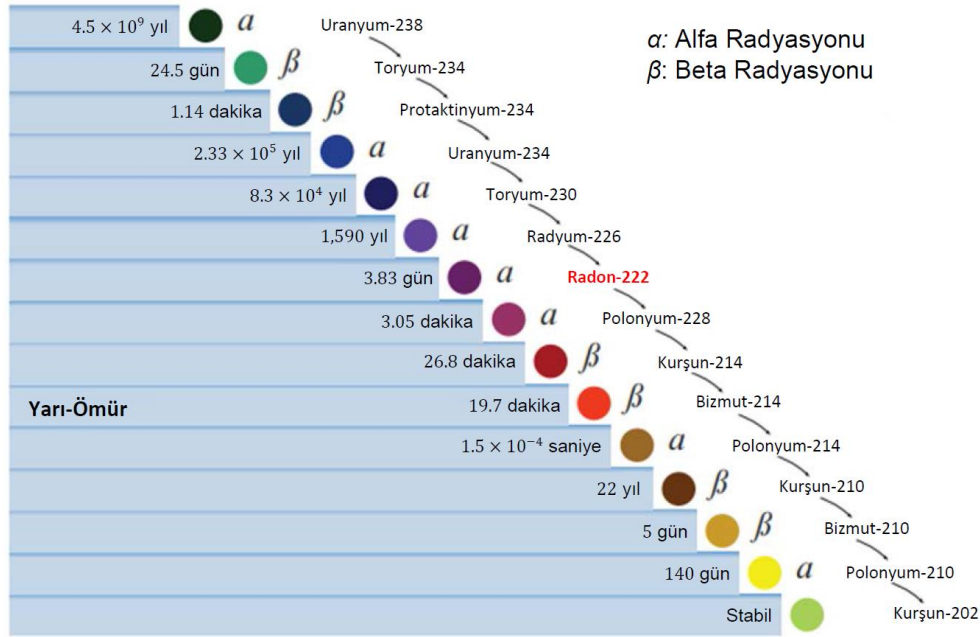
Maruz kalınan Radon miktarının başlıca kaynakları ise grafik halinde Şekil 2.5'te verilmiştir. Görüldüğü gibi en çok toprak ve kaya minerallerinden gelmektedir. Şekil 2.6'da görüldüğü gibi 3.82 günlük yarılanma süresine sahip <sup>222</sup>Radon, alfa bozunumu gerçekleştirmektedir.

Ülkemizde Radyasyon Güvenliği konusunda tek yetkili kurum olan TAEK, uluslararası komitelere dayanarak ilgili konuda yönetmelikler yayınlamıştır. Radyasyon Güvenliği Yönetmeliği madde 37 de verilen "Bu kaynaklardan Radon için izin verilen konsantrasyon seviyeleri yıllık ortalama olarak evlerde 400 Bq/m<sup>3</sup>, işyerlerinde 1000 Bq/m<sup>3</sup> değerlerini

aşamaz. Maruz kalınan doğal radyasyon seviyesinin yapı malzemeleri nedeniyle artmasının önlenmesi ve toplum üyelerinin alacağı radyasyonun mümkün olan en düşük seviyede tutulması amacıyla bu malzemelerdeki radyoaktivitenin kontrolü esastır.” ifadeleri Radon miktarının belirlenmesi konusunun önemini vurgulamaktadır [14].

### 2.2.1. Radon Bozunma Zinciri

Bir ortamda bulunan Radon gazı; iç mekân hava konsantrasyonları temel olarak alanın jeolojisine ve bazı faktörlere bağlı olarak değişmektedir. Ayrıca kapalı ortamlardaki havalandırma oranları, ısıtma ve meteorolojik koşullar gibi parametrelerde biriken Radon gazına etki etmektedir. Doğada bulunan çekirdeklerin büyük bir kısmı radyoaktiftir ve kararlı çekirdeklere bozunmaktadır. Kararsız halde bulunan bazı radyoaktif elementler doğrudan kararlı yapıya geçemezler. Bu nedenle bu tür çekirdekler, kararlı hale geçene kadar bir bozunma zinciri oluşturarak bozunmaya devam ederler. Uranyum elementinin kararlı hale geçebilmek için yaptığı bozunumlar ve ortaya çıkan ürünler Şekil 2.6 görselinde verilmiştir

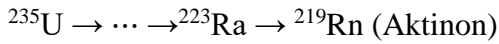
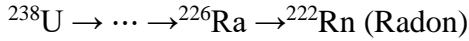


Şekil 2.6: Uranyum bozunum zinciri [15].

Yayımlanan alfa- $\alpha$  radyasyonu havada yalnızca 2.5-5.0 cm, dokuda ise birkaç mikron mertebesinde ilerleyebilir. Derinin üst tabakasına geçebilecek bir erişimi yoktur ve bir kâğıtla

siper almak mümkündür fakat en büyük tehlike alfa radyasyonunu solumak ve sindirmekle olur. Bu sebeple Radon gazının solunması sağlık açısından risk oluşturmaktadır.

Radonun; Radon, Toron ve Aktinon olmak üzere en çok bilinen üç adet izotopu vardır. Radonun, Aktinon ve Toron elementlerine göre daha çok bulunuyor olması doğal radyasyon belirlenmesinde Radonun dikkate alınmasının sebebidir [16].

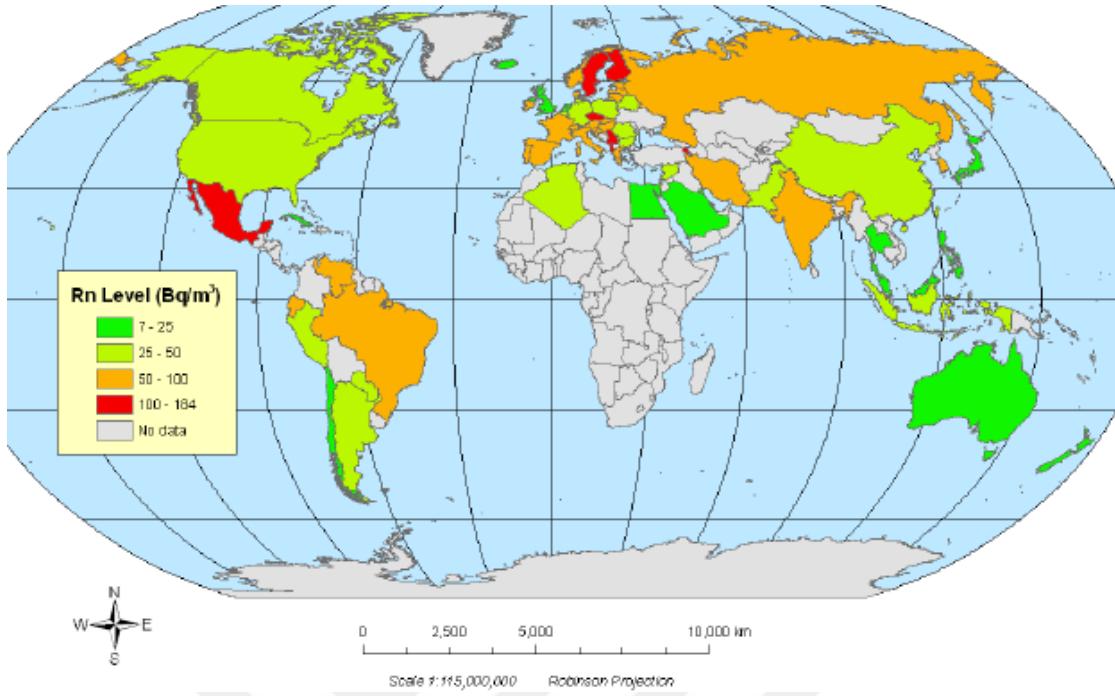


Ana çekirdekten ürün çekirdeğe kadar olan bozunumlar seri bozunumlar olarak nitelendirilir. Radyoaktif çekirdeklerin kararlı hale gelebilmek için yaptıkları bozunumlara ise radyoaktif seriler olarak bilinmektedir ve Toryum, Uranyum (Radyum), Aktinyum serileri doğal radyoaktif seriler olarak bilinmektedir ve Neptinyum serisi yapay radyoaktif seri olarak bilinmektedir.

### 2.2.2. Radon Kaynakları

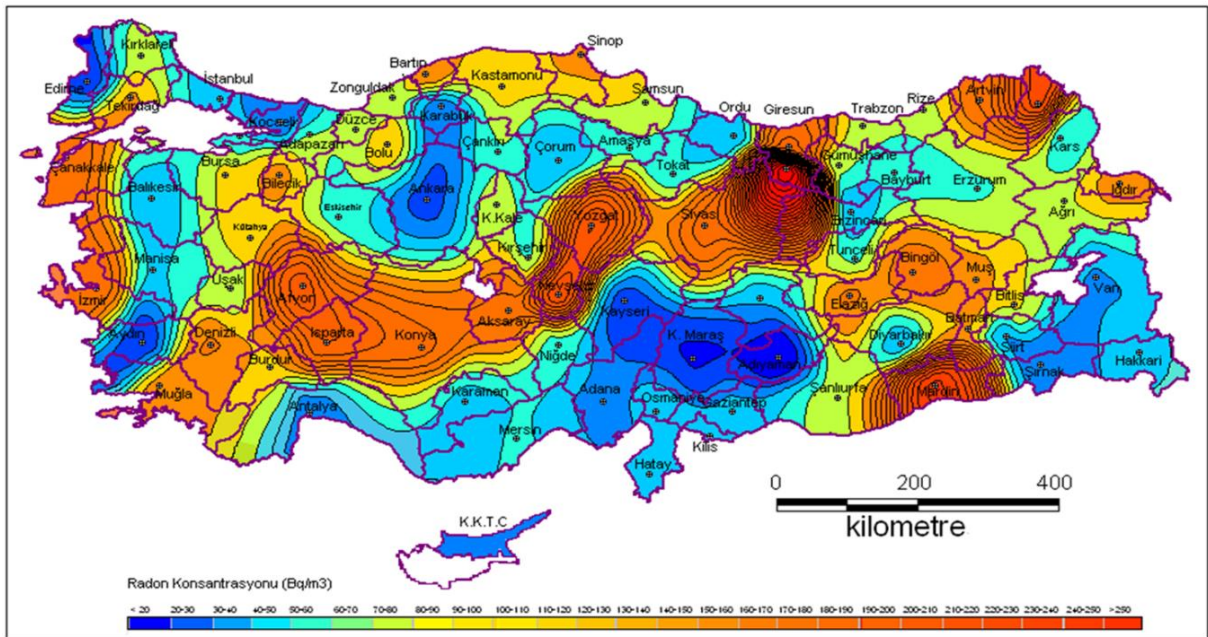
Radon gazının kapalı ortamlardaki konsantrasyonunun kontrolünü sağlamak amacıyla uluslararası kuruluşlar ve ülkeler tarafından bazı limit değerler belirlenmiştir. Belirlenen limit değerlerin aşılması durumunda Radon seviyelerini düşürücü tedbirlerin alınması tavsiye edilmektedir. Uluslararası Atom Enerji Ajansı Temel Güvenlik Standartları (IAEA-BSS) çerçevesinde, Radon için tavsiye edilen düzeyler  $200\text{-}600 \text{ Bq/m}^3$  olarak belirlenmiştir. Türkiye'de müsaade edilebilir Radon konsantrasyonu ise evler için  $400 \text{ Bq/m}^3$  'tür. İngiltere'de NRPB (The National Radiological Protection Board), Radon miktarını dışarda ortalama  $4 \text{ Bq/m}^3$ , evlerde ortalama  $20 \text{ Bq/m}^3$  olarak belirlemiş eğer Radon miktarı evlerde  $200 \text{ Bq/m}^3$  'ün üzerine çıkar ise müdahale edilmesi gerektiğini ifade etmiştir. USA Çevre Koruma Ajansı (EPA)'da benzer bir limit belirlemiştir. EPA'ya göre saptanan maksimum limit  $148 \text{ Bq/m}^3$  'tür [17]. Radon gazının sebep olmasıyla maruz kalınan ortalama yıllık doz miktarı  $1.3 \text{ mSv}$ 'dir. Bununla birlikte Avrupa Komisyonunun mesleki dozları belirlediği yenilenmiş Euratom Direktiflerinde bu değer çalışanlar için yılda  $1 \text{ mSv}$  halk için ise yılda  $0.3 \text{ mSv}$ 'dir [17]. Dünya Radon gazı aritmetik ortalaması haritası Şekil 2.7' de verilmiştir.





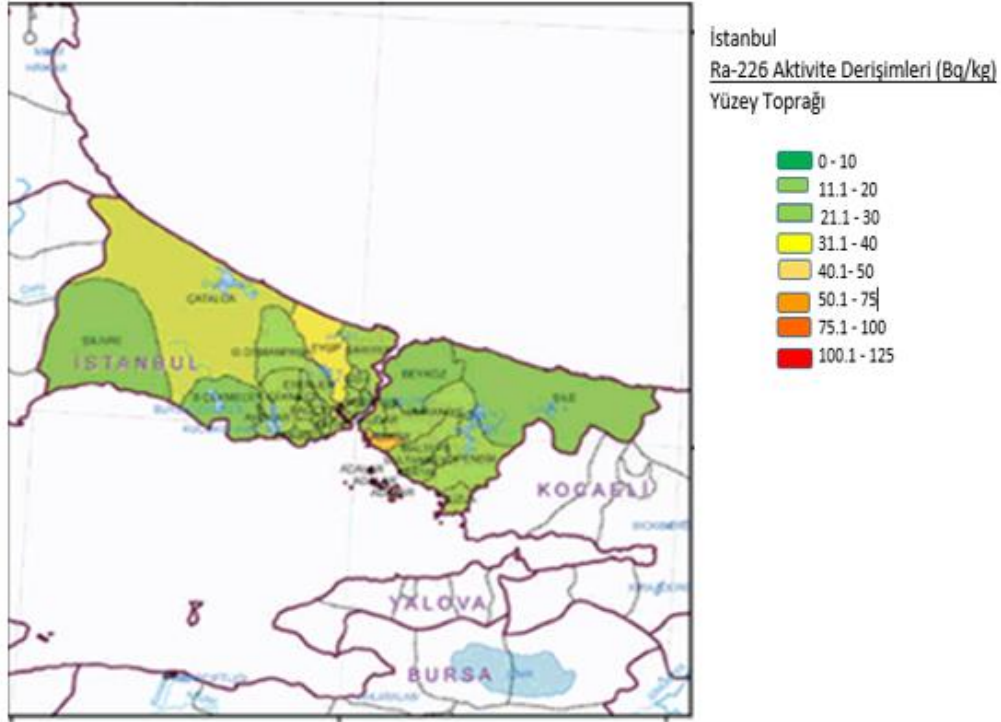
Şekil 2.7: Ülkelerin Radon gazı aritmetik ortalaması [18].

Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK), evler için üst limit değerlerini 400 Bq/m<sup>3</sup> olarak belirlemiştir. İş yerleri için ise bu değer 1000 Bq/m<sup>3</sup> tür. TAEK tarafından yapılan Türkiye Radon haritası ise Şekil 2.8’de verilmiştir ve ayrıca Tablo 2.2’ de farklı ülkelerdeki evlerin ortalama Radon değerleri sıralanmıştır.



Şekil 2.8: Türkiye Radon Konsantrasyonu Dağılım Haritası [19].

TAEK'in 2017 Eylül döneminde yayınladığı verilere göre İstanbul'a ait Radyum derişimleri Şekil 2.9'da görülmektedir. Radon, Radyum bozunum ürünü olduğu için Radyum aktivite derişimlerinde Radon değerlerine etki etmektedir.



Şekil 2.9: İstanbul ili <sup>226</sup>Radyum derişimleri.

Uluslararası Radyasyondan Korunma Komitesi'nin "Evlerde ve İş Yerlerinde Radon-222'ye Karşı Korunma" konusunda yayınladığı 65 No'lu raporunda Radona maruz kalma sınırlandırılarak, limit değerler tavsiye edilmiş ve yıllık doz için bir eylem seviyesi tespit edilmiştir. Eylem seviyesinin 3-10 mSv arasında sınırlandırılması tavsiye edilmiştir. Bu doz değerlerine karşılık gelen Radon konsantrasyonu evler için 200-600 Bq/m<sup>3</sup>, iş yerlerinde (okullar, hastaneler, sinemalar, dükkanlar...) ise 500-1500 Bq/m<sup>3</sup> olarak önerilmiştir.

ABD, İngiltere, Norveç ve İsviçre'de ev alım satımlarında Radon gazı ölçümleri yapılmaktadır. Aynı zamanda Finlandiya Radyasyon Güvenliği Kurulu 'da yeni yapılan binalarda gerekli Radon gazı önleyici tedbirlerin alınması gerektiğini belirtmiştir. Tablo 2.2'de ülkelerde evlerdeki ortalama Radon değerleri sıralanmıştır ve Tablo 2.3'te ise evler için belirlenen sınır değerler listelenmiştir. Radonun asıl kaynağının Uranyum olması nedeniyle Radon konsantrasyonu yer kabuğu üzerinde bölgeden bölgeye değişiklikler göstermektedir. Bu nedenle Radon konsantrasyonunda izin verilen limit değerlerde ülkeler arasında değişiklikler

göstermektedir. İngiltere’de bu değer evler için 200 Bq/m<sup>3</sup>, Avrupa ülkelerinde 400 Bq/m<sup>3</sup>, Kanada’da ise 800 Bq/m<sup>3</sup> olarak kabul edilmiştir. Dünya Sağlık Örgütü’nün limit değeri 100 Bq/m<sup>3</sup> tür [20]. Radyasyon korunmasının optimizasyon prensibi esas alınarak, evde ve iş yerlerinde geçirilen süre arasındaki fark dikkate alınarak (~3 katı), iş güvenliği standartlarının uluslararası uyumu için iş yerlerinde 1000 Bq/m<sup>3</sup> değerinin kullanılabilmesi bildirilmiştir [21]. 2011 yılında Uluslararası Radyasyondan Korunma Komitesi, ev içi Radon ışınlanmasından kaynaklanan sağlık etkilerini minimuma indirmek için referans seviyenin 100 Bq/m<sup>3</sup> değerine indirilmesini, ülke özel şartlarının buna elvermediği durumlarda seçilecek referans değerin, Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı tarafından yapılan son hesaplara göre yıllık 10 mSv doz değeri ve 300 Bq/m<sup>3</sup> değerini aşmamasını tartışmaya sunmuştur [22]. Ülkemizde derlenen bir çalışmada [23], UNSCEAR verileri dikkate alınarak belirlenen farklı ülkelerdeki evlerdeki ortalama Radon konsantrasyonları Tablo 2.2’de listelenmiştir [24].

**Tablo 2.2:** Farklı ülkelerde ev içi ortalama Radon konsantrasyonları.

Ülke	Radon Değeri (Bq/m <sup>3</sup> )	Ülke	Radon Değeri (Bq/m <sup>3</sup> )	Ülke	Radon Değeri (Bq/m <sup>3</sup> )
ABD	46	Finlandiya	120	Macaristan	107
Almanya	50	Fransa	62	Malezya	14
Arjantin	37	Hırvatistan	35	Mısır	9
Arnavutluk	120	Hindistan	57	Norveç	73
Avustralya	11	Hollanda	23	Polonya	41
Belçika	48	İngiltere	20	Portekiz	62
Cezayir	30	İran	82	Romanya	45
Çek Cumhuriyeti	140	İspanya	86	Slovakya	87
Çin	24	İsveç	108	Slovenya	87
Danimarka	53	İsviçre	70	Suriye	44
Ermenistan	104	İtalya	75	Tayland	23
Estonya	120	Japonya	16	<b>Türkiye</b>	<b>81</b>
Endonezya	12	Kanada	34	Yunanistan	73

Türkiye evlerindeki ortalama Radon konsantrasyonları 81 Bq/m<sup>3</sup> olarak hesaplanmıştır. Bu değer, evler için olan 400 Bq/m<sup>3</sup> değerinin altındadır. Tablo 2.3’te ise farklı ülkelerde müsaade edilen radon limit değerleri görülmektedir [24,25].

**Tablo 2.3:** Dünya ülkeleri evlerde müsaade edilen Radon konsantrasyon değerleri.

Ülke	Radon Limiti(Bq/m <sup>3</sup> )	Ülke	Radon Limiti(Bq/m <sup>3</sup> )	Ülke	Radon Limiti(Bq/m <sup>3</sup> )
ABD	150	Hindistan	150	Lüksemburg	250
Almanya	250	İngiltere	200	Norveç	200
Avusturalya	200	İrlanda	200	Polonya	400
Çek Cumhuriyeti	200	İsrail	200	Rusya	20
Çin	200	İsveç	200	<b>Türkiye</b>	<b>400 (1000*)</b>
Danimarka	400	İsviçre	400	AB	400 (200**)
Fransa	400	Kanada	800	ICRP	400
Finlandiya	400	Litvanya	100	WHO	100

\*İş yerlerindeki Radon miktarı üst seviyesi

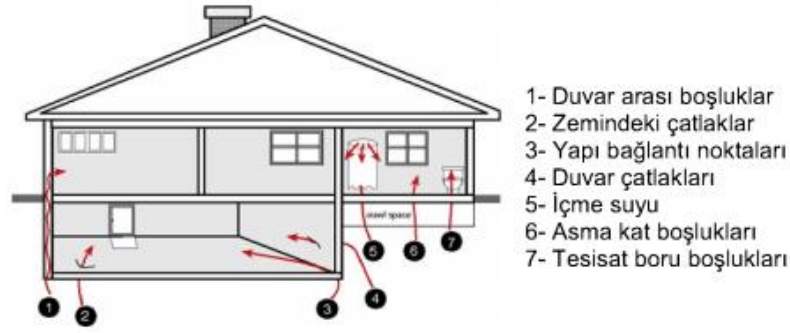
\*\* Yeni binalar için kabul edilmiş limit değerleri

### **2.2.2.1. Bina/Yapı İçi Radon Kaynakları**

Yapıların altındaki ve çevresindeki kayaç ve toprak yapıları, binanın inşasında kullanılan yapı malzemeleri, binanın etrafındaki su kaynakları ve doğalgaz binalar için potansiyel Radon kaynağıdır. Radon gazı cadde seviyesinden daha derinde bulunan ortamlarda daha yoğun olarak birikmekle beraber duvar arası boşluklardan ve çatlaklardan, zemindeki çatlaklardan, yapı bağlantı noktalarından ve evlerde kullanılan su yoluyla basınç farkından dolayı sızabileceği her noktadan binalara girer.

### **2.2.2.2. Toprak ve Kayalardan Gelen Radon**

Yapıların bulunduğu arazideki toprak ve kayaların sahip olduğu Radon konsantrasyon değeri yapılarla giren Radonun ana kaynağıdır. Uranyum konsantrasyonunun mevcut ve yüksek olduğu bütün kaya ve topraklardan Radon gazı bulduğu çatlaklar vasıtasıyla atmosfere kaçma eğilimi gösterir [26]. Şekil 2.10'da Radon gazının yapılarla giriş yolları gösterilmiştir.

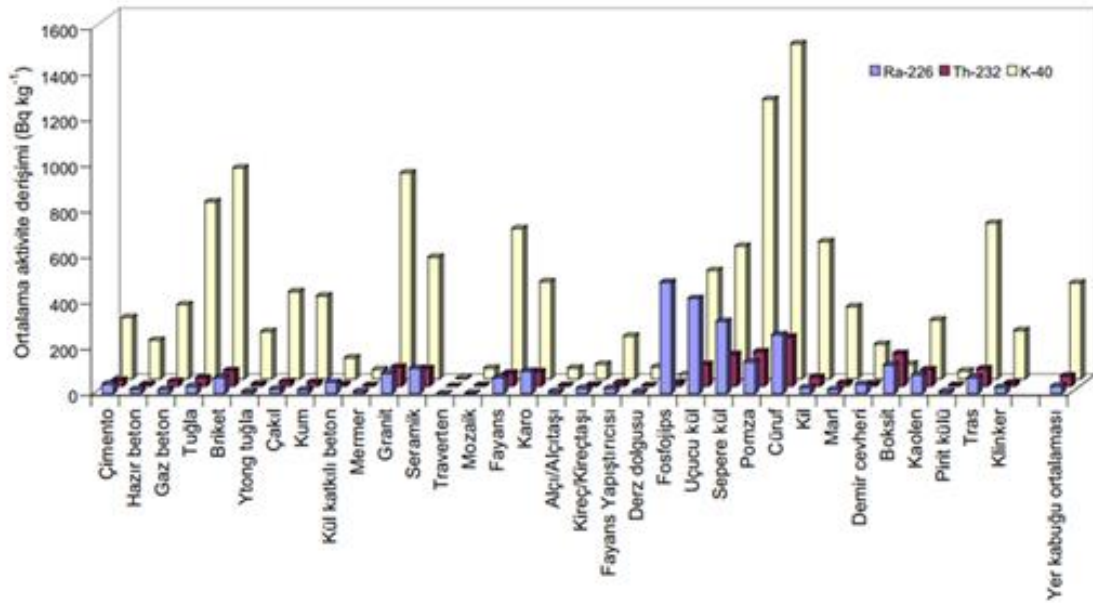


Şekil 2.10: Radon gazının kapalı ortamlara/binalara girişi [27].

Toprak gazındaki Radon konsantrasyonu, topraktaki Radyumun radyoaktivite kütle konsantrasyonuna, yayılma gücüne ve toprağın gözenekliliğine, geçirgenliğine ve nem içeriğine bağlıdır [28].

### 2.2.2.3. Yapı malzemelerinden gelen Radon

Bina içlerinde Radon konsantrasyon değerlerinin artmasının en büyük nedenlerinden biri de inşaat malzemelerinde doğal olarak bulunan  $^{226}\text{Ra}$  elementidir. Şekil 2.11'de bazı inşaat malzemelerinde bulunan  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  radyonüklitlerinin ortalama aktivite derişimleri verilmektedir [29].



Şekil 2.11: Otuzüç farklı yapı malzemesinde ölçülen  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  Radyonüklitlerinin Ortalama Aktivite Derişim Değerleri ile Yer Kabuğunun Karşılaştırılması.

Yapı malzemelerinin kapalı ortamdaki Radon konsantrasyonuna katkısı düşük Radon konsantrasyonlarında önem arz eder. Yapılan araştırmalar, yapı malzemelerinin kapalı ortamdaki Radon konsantrasyonuna katkısının 10 Bq/m<sup>3</sup> olduğunu göstermektedir. Dünya genelinde Radon konsantrasyonunun yıllık aritmetik ortalamasının 39 Bq/m<sup>3</sup> olduğu göz önüne alındığında, yapı malzemelerinin kapalı ortam Radon konsantrasyonuna katkısının %25 mertebesinde olduğu görölmektedir. Avrupa Birliği ölkelerinde bu katkının 10–20 Bq/m<sup>3</sup> aralığında olduğu tahmin edilmektedir [30].

#### **2.2.2.4. İçme suyundan gelen Radon**

Kullanmakta olduğumuz suyun kaynağında bulunan Radon gazının yanı sıra ortamlara ulaşıncaya kadar izlediği yol, geçtiği kaya, boru, toprak aracılığıyla da Radon gazı yüklenebilir. Sıcak su kullanımı ya da suyun püskürtülerek kullanılması ortama aniden radon gazı yayımlanmasını sağlar fakat doğalgazda olduğu gibi sudan gelen Radon miktarları tek başına risk oluşturmaz. Kuyu suyu kullanılan yörelerde ise Radon gazının daha yüksek miktarlarda çıktığı bilinmektedir.

#### **2.2.2.5. Doğalgazdan gelen Radon**

Bir ısınma aracı olarak kullanılmakta olan doğal gaz da bir miktar Radon ihtiva etmektedir. Doğal gaz üretim tesislerinde yapılan ölçümler sonucunda Radon konsantrasyon değerlerinin 50 kBq/m<sup>3</sup> seviyelerine kadar çıktığı görölmüştür [25]. Dolayısıyla doğal gaz ev içinde ısınma ve yemek pişirme amacıyla kullanıldığında bozunması sonucu ortama Radon gazı yayar ve farklı yollarla ortamlarda biriken Radon konsantrasyon değerlerini arttırmış olur. Doğalgazdan gelen radon miktarını düşürmek için en basit ve etkili yöntem havalandırma yöntemidir.

### **2.2.3. Radonun Sağlık Üzerine Etkileri**

İyonlaştırıcı radyasyonun canlı dokulara ulaşması sonucunda radyasyonun cinsine, enerjisine ve maruz kalınan süreye bağlı olarak kalıcı ve geçici oranlarda zarar verdiği bilinmektedir. İyonlaştırıcı tipteki doğal radyasyon kaynağı olan Radon radyasyonunun fazla solunmasıyla kanser arasında bir bağlantı olduğu tespit edilmiştir. Düşük seviyedeki Radon kaynaklı radyasyonun sağlık üzerine yıkıcı etkisi olmadığı bilinmekle beraber dünya genelinde yaşam alanlarındaki özellikle ev ve iş ortamındaki Radon konsantrasyonlarının belirlenmesi çalışmaları hızla yayılmaktadır. Hatta Radon miktarının belirli seviyeye ulaşması ile tedavi

amaçlı kullanıldığı merkezlerde bulunmaktadır. Radon özellikle romatizmal hastalıklar, cilt hastalıkları, kronik hastalıklar ve tiroid bozuklukları gibi bazı hormonal hastalıklar başta olmak üzere 20'den fazla hastalığın tedavisi için alternatif tıpta kullanılmaktadır. Bu amaçla mağaralarda kurulmuş tedavi merkezlerine rastlamak mümkündür. Avrupa ve Kuzey Amerika'da örnekleri mevcut olan bu tedavi amaçlı terapi merkezleri, atmosferinde uygun konsantrasyonlarda ( $30-160 \text{ kBq/m}^3$ ) Radon gazı ihtiva eden mağaralarda kurulmuştur. Terapi seansları, bu yapıdaki mağaralarda belli bir süre kalarak Radonun solunum yoluyla vücuda alınmasıyla yapılmaktadır [31].

Kimyasal olarak pasif bir gaz olan Radonun dokulardaki çözünürlüğü düşüktür. Akciğerlere alınan Radonun bir kısmı solunum yoluyla dışarı atılabilir fakat kimyasal bakımdan aktif halde bulunan ve radyoaktif olan Radon ürünleri havadaki toz zerreciklerine yapışarak solunumla akciğer bronşlarına yerleşip bozunmaya devam edebilirler. Bu süreçte ortaya çıkan radyasyon, hücrelerin DNA yapılarını değiştirebilir ve akciğer kanserine neden olabilir [32] ve Dünya Sağlık Örgütü tarafından "A sınıfı kanserojen madde" olarak derecelendirilen Radon gazı, akciğer kanserine neden olan en tehlikeli maddeler listesinde sigaradan sonra ikinci sırada yer almaktadır. EPA, Amerika Birleşik Devletleri'nde akciğer kanserinden bir yılda ölenlerin yaklaşık % 13 ünün ölümünün Radon gazı solunması nedeniyle meydana geldiğini bildirmektedir. Radondan kaynaklanan sağlık risklerinin belirlenmesinde yaş, cinsiyet ve tütün ürünlerinin kullanımı gibi faktörlerin de etkili olduğu rapor edilmiştir [6]. Dünya sağlık örgütünün 2005 verilerine göre ise Radon kaynaklı akciğer kanserinin, akciğer kanserlerinin % 6 ile % 15'ini oluşturduğu bilinmektedir. Bir çeşit soy gaz olan Radon gaz özelliğiyle havada kolayca ilerleyebilmektedir ve hava bileşenlerine nispeten daha ağır olan Radon, kapalı ve havalandırması zayıf olan ortamlarda birikmektedir.

İyonize radyasyonların biyolojik etkileri hücrelerde bulunan atomların iyonlaşmasıyla ile başlamaktadır. Hücrenin radyasyondan zarar görme düzeyi, hücrenin radyasyona ne kadar duyarlı olduğuna bağlıdır. Hücrelerin tümü, radyasyonun zararlı etkilerinden aynı oranda etkilenmezler. Genel olarak, bölünme hızı yüksek olan hücreler, bölünme hızı düşük olan hücrelere göre radyasyondan daha fazla etkilenirler ve etkileştikleri hücrenin kritik bir kısmında hasar oluşturabilir. Radonun sağlık üzerine etkileri deterministik ve skolastik biçimde olabilir. Deterministik etkiler yüksek dozda radyasyona maruz kalındığında ortaya çıkan ani etkilerdir.

Skolastik etkiler ise vücuda alınan dozların birikmesiyle görülen kanser veya genetik bozukluk biçiminde hasarlardır.

Radon miktarının ev, okul, tünel, yer altı yapıları gibi farklı ortamlarda farklı koşullarda farklı miktarlarda biriktiği bilinmektedir. Özellikler cadde seviyesinden daha derinde bulunan alanlarda daha fazla biriken Radon gazı sağlık açısından da daha çok risk oluşturmaktadır. Tablo 2.4’de bazı yeraltı yapılarında ölçülen radon seviyeleri görülmektedir [33]. Bu tabloya göre mağaralarda Radon miktarının çok daha fazla birikme yaptığı görülmektedir. Metro istasyonlarında ise çalışma ofislerinde istasyonlara göre daha fazla Radon olduğu gözlemlenmektedir. Halbuki istasyonlar, çalışma ofislerinden daha derinde bulunmaktadır. Kömür madenlerinde ise metro istasyonlarından fazla miktarda Radon değerleri bulunmaktadır.

**Tablo 2.4:** Bazı yer altı yapılarında ölçülen Radon konsantrasyonları [34].

İşyeri	Ülke	Radon Konsantrasyonu Aralığı (Bq/m <sup>3</sup> )
Turistik Mağaralar	Almanya	400-11180
	Macaristan	130-21100
	İrlanda	260-19060
	Slovenya	20-10000
	ABD	48-1850
Tüneller	Çek Cumhuriyeti	229-3312
	Finlandiya	500-7000
	Norveç	250
Metro	Finlandiya	45-200 (istasyon)
		20-790 (ofisler)
	Yunanistan	9-22 (istasyon)
Kömür Madeni	Türkiye	253-1470 (Zonguldak taş kömürü havzası)





nedeniyle meydana gelecek genişmeler sonucu, kayalardan yeraltı su sistemine Radon geçişi artmaktadır. Bunun sonucu olarak, sismik faaliyetin başlamasından önce çevredeki kuyu ve kaynak sularındaki Radon konsantrasyonunda bir artış gözlenmektedir [38]. Radon gazı miktarındaki artışlar deprem öncesinde maksimum bir değere ulaşır deprem gerçekleşikten sonra doğal durumuna dönmektedir. Deprem sırasında ve sonrasında ortaya çıkan artçı sarsıntılar ile birlikte ortama Radon salınmaktadır. Bu sebeple Radon miktarının özellikle fay hattı üzerindeki ve deprem riski yüksek olan mahallerde sürekli ölçülmesi gerekmektedir [39].

### **2.2.5. Radon Risklerinin Azaltılması İçin Alınabilecek Tedbirler**

Radon risklerini azaltmak için öncelikle hangi parametrelerin Radon gazına etki ettiğine bilmek gerekir. Doğada kaçınılmaz halde bulunan Uranyum radyoaktif maddesinin bozunuma ürünü olan Radon(Rn) yerküre yapısından kayaçlı yapılardan topraktan sızarak yaşam alanlarına özellikle yapıların içine sızabilmektedir. Yapılardaki Radon birikiminin önüne geçebilmek için öncelikli olarak yapı inşa edilecek yerin Radon haritası çıkarılmalıdır ve bu harita miktarlarına göre inşa yerine karar verilmelidir. Yani jeolojik yapısına bakılmalıdır. Diğer taraftan yapı malzemelerinin radyoaktivite analizleri ve doz değerlendirmeleri yapılarak değerlendirme sonuçları tavsiye edilen radyoaktivite düzeylerinin üzerinde olan malzemeler bina yapımında kullanılmamalıdır. Radonun sızıntı yapmayacağı yapı malzemesi seçilmelidir. Yapı malzemelerinin Radon içerikleri Şekil 2.11’de verilmiştir.

Radon gazının etkilerinden kurtulmak için en basit ve etkili yöntem havalandırmadır. Kış mevsiminde dahi olsa yapıların özellikle evlerin ve bilhassa bodrum katındaki evlerin havalandırmasının sürekli ve etkin şekilde yapılması gerekmektedir. Yapılardaki sızıntı, çatlak, eklenti yerleri gibi boşlukların kapatılması gerekmektedir. Özellikle bodrum katlarının toprakla izolasyonu iyi bir biçimde yapılmalıdır. Bodrum katların ve zemin katların tabanına şap, beton vb. kaplama materyalleri dökülmelidir. Toprak ile temas eden yüzeyler sızıntıya imkan vermeyecek şekilde izole edilmelidir. Radon düzeyi yüksek olabileceğinden 20 yıldan daha eski olan evlerde çatlakların kapatılması, izolasyon ile bakımı sürekli yapılmalıdır [40]. Binaların duvarlarında, su ve kanalizasyon borularının geçtiği yerlerde bulunan çatlaklar onarılmalıdır. Gerekli durumlarda yalıtım yapılmalıdır.

Evlerde, kapı ve pencerelerde izolasyon yapıldıysa havalandırma süresi arttırılmalıdır. Radon kanser riskini arttırdığından kapalı ortamlarda sigara içilmemelidir. Yer altı istasyonlarında ise

Radon miktarının sızıntısını engellemek için çatlaklar kapatılmalı, uygun malzeme kullanılmalıdır. Radon miktarını azaltmak için ise iyi bir havalandırma en önemli etkidir. İstasyonların m<sup>2</sup> büyüklüğü de temiz havanın kalitesine etki etmektedir. Güvenlik amaçlı kullanılan otomatik güvenlik kapıları ise yine Radon miktarına azaltmak için alınacak diğer bir önlem unsuru olabilir.

### 2.3. RADON ÖLÇÜM METOTLARI

Radon gazının kişiye verdiği zarar radyasyon dozuna, maruz kalma süresine, kişinin (yaş, cinsiyet, biyolojik durum, alışkanlıklar) ve yapının (işlev, kullanılan ürün miktarı, büyüklükler, havalandırma koşulları vb.) bazı parametrelerine bağlıdır.

Toprakta yüksek miktarda doğal radyoaktif Radon bulunmaktadır. Kapalı ortamlardan veya radyoaktif su kaynaklarında oluşan çatlaklardan sızabilmekte, çözünme özelliğinden dolayı su ile taşınabilmektedir. Toprakta Radon salınımı toprağın geçirgenliğine, toprağın durumuna (kuruluk, suyla tıkanmış olma, donma, karla örtülü olma), meteorolojik koşullara (toprak ve havanın sıcaklığına, hava basıncına, rüzgarın hızına ve yönüne) ve bölgenin yüksekliği ile ilişkilidir. Genel olarak, bodrum, tünel, maden ve diğer yeraltı alanları gibi kapalı veya kötü havalandırılmalı yerlerde Radon konsantrasyonu yükselmektedir. Yer altı mahallerinde her zaman zemine/cadde seviyesine göre daha yüksek çıkmaktadır.

Radon ve ürünlerini ölçmek için iki temel yöntem geliştirilmiştir. Bunlar aktif ölçüm yöntemi ve pasif ölçüm yöntemidir. Aktif ölçüm yöntemi, elektronik sistemler, pompalar, güç kaynakları gibi cihazlar gerektirir. Aktif sistemde iyon odaları, ZnS(Ag) sintilasyon detektörü veya spektroskopik sayım cihazları kullanılmaktadır. Pasif ölçüm yöntemlerinde termoluminesans detektörler veya katıhal iz kazıma detektörleri; selüloz nitrat (LR-115) veya allil diglikol karbonat (CR-39) kullanılmaktadır.

Radon gazı tespiti yapabilmek için kullanılan yöntemlerden aşağıda bahsedilmiştir.

İyonizasyon odası yöntemi ile paslanmaz çelikten silindir şeklinde üretilen dedektörün merkez ekseninde silindirden yapılmış bir elektrot bulunur. Havadaki Radon yoğunluğunu ölçmek için örneklenen hava, iyonizasyon odasına geçirilip odanın duvarları ile elektrot arasında bir potansiyel farkı uygulanır. Oluşan iyonizasyon akımı çok duyarlı elektrometre ile ölçülmektedir.

Kollektör Yönteminin temel prensibi ise bir kap içerisindeki toprak örneklerindeki Radonun bozunumu ile oluşan Radon ürünlerinin kollektör ve kap arasına uygulanan potansiyel yardımıyla kollektör yüzeyinde toplanması ve biriken ürünlerin toplam alfa aktivitesinin sayımıdır.

Diğer bir yöntem olan Lucas hücresi yöntemi ise bir ucu düz ve açık diğer ucu yarım küre olarak metal veya camdan yapılmış bir silindir biçimindedir. İç yüzeyinin duvarları sintilatör olarak gümüşle aktive edilmiş çinko sülfürle kaplıdır. Lucas hücresi kullanılarak Radon ölçümlerinde, alfa aktivitesi ölçülecek havanın filtre edilerek hücreye alınması gerekir. Havadaki bütün Radon ürünleri filtrede tutulur. Sistemden hücreye radyoaktif madde olarak yalnızca Radon gazı girer. Radon gazı Lucas hücresi içinde bozularak kısa zamanda ürünleriyle dengeye ulaşır. Radonun ve ürünlerinin yayınladıkları alfa radyasyonu hücrenin duvarlarına çarparak sintilasyon oluşturur. Bu olayda çıkan fotonlar fotoçoğaltıcı ve elektronik sistem kullanılarak sayılmaktadır.

Elektrostatik Toplama Yönteminde pozitif yüklü Radon ürünler, bir odacık içinde uygun voltaj altında hızlandırılarak yüzey engelli alfa detektörü üzerine toplanır ve spektroskopik olarak ürün aktiviteleri ölçülür. Benzer bir yöntem kollektör yönteminde de su veya toprak gibi örneklerdeki Radona ait ürünler vakum edilmiş bir kap içindeki kollektöre yüksek voltaj uygulanarak toplanmaktadır.

Filtre Yöntemi havadaki Radon ve ürünlerini ayırarak Radon bozunma oranını ölçen çift filtre ile havadaki Radon ürünleri yoğunluğunu ölçen tek filtre yönteminden oluşur. Tek filtre yönteminde havadaki Radon ve ürünleri arasında radyoaktif dengenin olduğu kabul edilerek ölçümler alınır. Çift filtre yönteminde ise havadaki Radon ve ürünleri arasında radyoaktif dengeye bağlı olmaksızın ölçümler alınmaktadır.

AC-Aktif Odun Kömürü Tutma yöntemi ile hava geçirmez kap içerisinde aktif odun kömürü ile çalışan bu metotta, hava geçirmez kap örnek seçilen alanda açılır ve havadaki Radon kömür taneciklerine tutunur. Örnek alma işleminin sonunda kap mühürlenerek analiz için laboratuara gönderilebilir. Gama bozunumunda odun kömürüne tutunan Radon sintilasyon detektörü ile sayılır ve kalibrasyon bilgilerine dayanarak örnek yerde Radon konsantrasyonu hesaplamada kullanılır. Kömür tutma detektörü 2 ile 7 gün arasında ölçüm alır. Odun kömürü, Radonun sürekli odun kömürüne tutunması ve bırakmasını sağladığından dolayı bu metot maruz kalma

süresi sonunda tam doğru ölçüm vermez. Kömür üzerinde yayılma engelini kullanımı yüksek nem ve hava akımının etkilerini azaltır [41].

Radon konsantrasyonlarının belirlenmesinde diğer bir yöntem ise katıhal iz kazıma dedektörleridir. Maliyeti ve kullanımından dolayı en yaygın kullanılan yöntemdir.

### **2.3.1. Katı Hal İz Kazıma Dedektörleri (SSNTD)**

Bilim ve teknolojinin hemen her alanına uygulanabilen katı hal iz kazıma dedektörleri (SSNTD), basit dedeksiyon teknikleri, ucuz olmaları, çok az ekipmana ihtiyaç duymaları ve çevresel koşullardan fazla etkilenmemeleri nedeniyle yüklü parçacık yayımlayan radyonüklidlerin niteleyici ve kantitatif analizinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Ortamlardaki Radon konsantrasyonlarının yayınladıkları alfa parçacıkları ile orantılı olduğu bilinmektedir. Beta ve gama parçacıklarına karşı duyarsız olan iz dedektörleri alfa parçacıkların tespitinde kolay kullanımları, elektronik cihaza ihtiyaç duymamaları ve taşınma kolaylığı, maliyeti, uzun süreli Radon ölçümlerine uygun olması, nemden ve makul seviyedeki ısı, ışıktan etkilenmemelerinden dolayı yaygınca kullanılmaktadırlar. Radon konsantrasyonu düşük olan yerlerde anlık ölçüm yapmaya uygun olmaması ise dezavantajdır.

Radonu seviyelerini belirlemek için aktif ve pasif yöntem teknikleri kullanılmaktadır. Pasif ölçüm yöntemlerinde termoluminesans dedektörler veya katıhal iz kazıma dedektörleri; selüloz nitrat (LR-115) veya allil diglikol karbonat (CR-39) kullanılır. Bu çalışmada LR-115 pasif tekniği kullanılmıştır. LR-115 filmleri, 1.7 - 4.1 MeV enerji aralığında bulunan alfa parçacıklarına karşı daha duyarlı olan, açık olarak kullanılan bir dedektör çeşididir. Bu enerji aralığından yüksek olan alfalar dedektör filmeri üzerinde iz oluşturamazlar. Bu yöntem ile filmler üzerine iz bırakan alfa parçacıkları bazı kimyasal işlemler sonrasında kırmızı film üzerine beyaz noktalar şeklinde oluşur. Bu noktalar mikroskop yardımı ile sayılarak ortamdaki Radon değerleri belirlenir. Bu izlerin büyüklükleri, alfa parçacıklarının enerjisinden dolayı farklılık göstermektedirler. LR-115 film dedektörü, beta ve gama ışınlarına duyarlı olmadığından, üzerinde sadece alfa parçacıkları iz bırakmaktadır. Bu nedenle dedektör üzerinde herhangi bir beta veya gama ışınlarının izine rastlanmamaktadır.

## 2.4. ÜLKEMİZDE VE DÜNYADA YER ALTI ULAŞIM İSTASYONLARINDA RADON ÖLÇÜM ARAŞTIRMALARI

Son yıllarda dünya genelinde toplumun yoğun olarak bulunduğu yerlerde, günlük harcadığı zaman miktarının fazla olduğu yerlerde Radon seviyeleri belirlenmesi çalışmaları hızla yayılmakta ve ülkemizde de yaygınlaşmaktadır. Bu çalışmanın amacı; İstanbul ilinde Marmaray ve metro yer altı istasyonlarında belirlenen ölçüm noktalarında (istasyon amirleri odası, turnike girişleri, peron bekleme platformu, makinist odaları) bir aylık süre (Şubat-Mart 2018) ile Radon seviyelerinin ölçülmesi, uluslararası standartlar ve sınır değerler ile alanındaki ilgili çalışmalarla kıyaslanmasıdır. Elde edilecek sonuç verilerine göre halkın sağlığı açısından gerekli önlemler alınabilir. Radonun yer altında daha yoğun bulunuyor olması ve Radon miktarının fazlasının sağlığa zararlı olması ve akciğer kanserine sebep olduğunun bilinmesi bu yerlerde çalışan kişilerin maruz kaldıkları yıllık etkin doz değerlerinin belirlenmesi zorunlu kılmıştır.

Ülkemiz ve dünya genelinde yapılan benzer çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

A. Pişkin, İş sağlığı ve Güvenliği Uzmanlık tezi olarak 2016 yılında “Ofis Çalışanlarının Radon Gazı Maruziyetinin Nükleer İz Dedektör Yöntemine göre Belirlenmesi ve Sağlık Üzerine Etkileri” başlıklı tezinde Ankara ilinde 6 ofis, Aydın ilinde 3 ofis seçerek LR-115 dedektörü ile bir aylık süre ile ölçümler almıştır. Yapılan çalışmada Aydın ilinde 23 Bq/m<sup>3</sup>, 108 Bq/m<sup>3</sup> ve 113 Bq/m<sup>3</sup> ve Ankara ili ofislerinde 40-137 Bq/m<sup>3</sup> arasında değerler bulmuştur [42].

T. Karakaş, İzmir Metrosu Kapalı İstasyonlarında Radon Aktivite Konsantrasyonlarının Belirlenmesi başlıklı yüksek lisans tezinde (2017) aylık ve yıllık Radon değerleri ile yolcu ve çalışanlar için yıllık etkin doz değerlerini hesaplamıştır. 249.03-723.69 Bq/m<sup>3</sup> sırası ile bulunduğu en düşük ve en yüksek değerlerdir. Ortalama olarak 392.86 Bq/m<sup>3</sup> değerini bulmuştur [43].

K.N.Yu, E.C.M. Young ve K.C. Wong tarafından 1996 yılında yapılan “A survey of Radon properties in underground railway stations in Hong Kong” çalışmasında havalandırma, bina materyalleri ve jeolojik yapının Radon miktarlarına etki ettiği sonucuna varılmıştır. Granit üzerine inşaa edilen istasyonlarda çalışanlar ve yolcular için yıllık etkin doz değerleri hesaplanmıştır. RDA200 detektörü ile Radon-alfa enerjisi ölçmüşlerdir. Genellikle geceleri havalandırma kapalı olduğundan sabah ilk saatlerdeki seferlerde Radon değerleri daha yüksek çıktığını görmüşlerdir. Duvar ya da diğer yüzey malzemelerinin katkısının az olduğunu

söylemişlerdir. Metro istasyon değerlerini Hong-Kong daki evler ile kıyaslamışlardır. 3 hat üzerinde toplam 31 istasyonda yapılan ölçümlerde ortalama Radon değerini  $41.6 \pm 0.99 \text{ Bq/m}^3$  bulmuşlardır. İstasyonlarda yapılan ölçümlerde  $31.7 \text{ Bq/m}^3$  ve  $63.5 \text{ Bq/m}^3$  değerleri arasında değerler bulunmuştur [44].

A.F.Hafez, A.S. Hussein ve N.M.Rasheed'ın 1998-1999 yıllarında yaptıkları Radon Measurements In Underground Metro Stations In Cairo City, Egypt çalışmasında hem CR39 hem de LR-115 yöntemlerini kullanarak 2 hat üzerinde 1'er aylık süre ile toplam bir yıl ölçüm almışlardır. Ortalama Radon değeri  $23 \text{ Bq/m}^3$  tür. Değerler  $14-40 \text{ Bq/m}^3$  arasında değişmektedir. Yolcular için etkin doz  $E = 0.06 \text{ mSv /yıl}$ , çalışanlar için etkin doz  $E = 5 \text{ uSv/yıl}$  bulunmuştur [45].

J. Sabol tarafından Radon Exposure Of Passengers In The Prague Metro başlıklı çalışmada Prag metrosunun ilk aşaması 1974 yılında açılmış olup günde 1,2 milyon kişinin kullandığı ulaşım aracıdır. 3 hat içeren Prag metrosu 05.00 da ilk seferine başlamaktadır. En derin istasyon cadde seviyesinden 52 m derinlikte olup tünellerin, istasyonların ve diğer metro alanlarının iç mekanları, betonarme, prefabrik ve çelik kullanılarak inşa edilmekte ve doğal malzemelerle ve bazı yerlerde mermer veya alüminyum plakalarla döşendiği belirtilmiştir. Metro güçlü körükler ve fanlar vasıtasıyla yoğun bir şekilde havalandırılmakta ve hareketli trenlerin piston etkisi de hava değişimine katkıda bulunmaktadır. AlphaGUARD yöntemi ile 1994/1995 yıllarında yapılan ölçümlerde ortalama Radon değeri  $10-11 \text{ Bq/m}^3$  bulunmuştur. Sonuç olarak, metro körüklü ve güçlü havalandırma sistemleri ile havalandırılmaktadır. Ayrıca tren geçişi piston etkisi ile metro yapısının astar ve malzeme yapısında Radon miktarlarını düşürmektedir. Yer üstü ulaşım araçlarını kullananlar ile metroyu kullananların maruz kaldığı Radon oranları hemen hemen aynıyken, yer altı ulaşım araçlarını kullananların maruz kaldığı foton seviyesi daha düşük olduğu savunulmuştur [46].

M. Doi ve S. Kobayashi tarafından 1996 yılında “ Surveys Of Concentration Of Radon Isotopes In Indoor And Outdoor Air In Japan” başlıklı çalışmada metro istasyonlarındaki ortalama değer  $10.9 \pm 1.1 \text{ (SE) Bq/m}^3$  bulunmuştur. Doi ve Kobayashi (1996), örümcek ağı şeklinde oluşturulmuş çok gelişmiş bir yer altı taşıma sistemine sahip olan Tokyo'nun doğusunu batısına bağlayan metro hattında, 20 km uzunluğundaki ve ortalama 15 metre derinlikteki platformların olduğu 7 istasyonda 1994 yılında ağustos-kasım ayları arasında 3 aylık dönemde Radon konsantrasyonlarını ölçmüştür. Platformların her 2 yönü, bilet gişeleri, kiokslar ve çalışan

ofislerine dedektör yerleştirmişlerdir. Kalın beton duvarların var oluşu ve kuvvetli havalandırma sayesinde Radon değerlerinin düşük çıktığı sonucuna varılmıştır [47].

M. H. Song ve diğerleri tarafından “Radon in the Underground Workplaces; Assessment of the Annual Effective Dose due to Inhaled Radon for the Seoul Subway Station Staffs” çalışmasında CR39 yöntemi ile 3'er aylık dönemler olmak üzere yıllık Radon değeri ve yıllık etkin doz değerleri hesaplanmıştır. Yıllık Radon miktarı  $16.5-93.00 \text{ Bq/m}^3$  arasında değerler almıştır. Yılda 2304 saat yer altında geçirdikleri kabul edilerek yıllık etkin doz değerleri çalışanlar için  $0.23-0.73 \text{ mSv/yıl}$  olarak hesaplanmıştır. Radon miktarları nem, basınç, sıcaklık ve elektro/manyetik alan, havalandırma ve peron ayırıcı kapı sistemi faktörleri ile değerlendirilmiştir. İstasyonlar granit üzerine inşa edilmiştir [48].

M. H. Song ve diğerleri tarafından yayınlanan “Radon Exposure Assessment For Underground Workers: A Case Of Seoul Subway Police Officers In Korea” başlıklı çalışmada 4'er ay, 3 dönem yıllık ölçüm yapılmıştır. Radon değerleri  $18.9-114 \text{ Bq/m}^3$  arasında ve yıllık etkin doz değerleri  $0.41-1.64 \text{ mSv/yıl}$  olarak bulunmuştur [49].

S. Yoon ve diğerleri tarafından 2010 yılında Kore de bulunan Deajon metro istasyonunda yapılan “Indoor Radon distribution of subway stations in a Korean major city” çalışmasında, 22 istasyonda 3'er nokta da CR39 yöntemi ile 3 ay süre ile yapılan ölçümlerde Radon ortalaması  $34.1 \pm 14.7 \text{ Bq/m}^3$  bulunmuştur. Değerler  $9.4$  ile  $98.2 \text{ Bq/m}^3$  arasında değişim göstermiştir. Deajon İstasyonu 2007 yılında açılmış olup Eylül 2007 ve Ağustos 2008 tarihleri arasında yapılan ölçümlerde çalışanlar için yıllık etkin doz  $0.24 \text{ mSv/yıl}$  iken yolcular için  $0.02 \text{ mSv/yıl}$  bulunmuştur. İşçilerin günde 8 saatten yılda 1920 saat, yolcuların günde 30 dakika istasyonlarda buldukları varsayılmıştır. İstasyonların çoğu granit ve alüvyon yatağı kayaları üstüne inşa edilmiştir. Ölçüm ekipmanları bilet ofisleri, bilet kapıları ve peronlara yerleştirilmiştir. Ölçüm aletleri havalandırmalardan uzak, duvardan 30 cm ileri, elektrikli donanımlardan uzağa yerleştirilmiştir. Aynı çalışmada sudaki Radon değerlerini de ölçmüşler. Havalandırma ve peron ayırıcı kapı sistemi etkisine bakmak için anlık ölçümler alınmıştır. Havalandırma Radon miktarını azaltıyor, peron ayırıcı kapı sistemi de Radon miktarını azaltıyor fakat peron ayırıcı kapı sisteminden dolayı tren geçişlerindeki piston etkisi de azalmaktadır. Mevsimsel olarak çok büyük farklılıklar gözlemlenmemiştir. Havalandırmaların kapalı olmasından dolayı geceleri daha yüksek değerler çıkmaktadır. Radon miktarları ile derinlik değerleri ilişkilendirilmiştir. En derin istasyon 32 metre diğerleri yaklaşık 10 küsur



metredir. İlkbahar dönemi; 29 Bq/m<sup>3</sup>, yaz dönemi 27 Bq/m<sup>3</sup>, sonbahar dönemi 38 Bq/m<sup>3</sup> ve kış dönemi değerleri 36 Bq/m<sup>3</sup> olarak bulunmuştur [50].

S. H. Hwang ve diğerleri tarafından 2018 yılında yayımlanan “Radon and NO<sub>2</sub> levels and related environmental factors in 100 underground subway platforms over two-year period” başlıklı çalışmada Radon (Rn) and nitrojen dioksit (NO<sub>2</sub>) değerleri ölçülmüştür. Mayıs 2013-Eylül 2015 dönemleri arasında yapılan ölçümlerden 2013 yılında elde edilen değerlerin 2015 yılı verilerinden daha yüksek bulunmuştur. Bu durum yeni bir havalandırma sistemi yapılmasıyla açıklanmaktadır. Radon seviyelerini yapım yılı ve derinliğe bağlamışlardır. Radon değerlerinin derinlikle arttığı ve aylara göre değiştiği görülmüştür. Göz önünde bulundurulmuş faktörler arasında derinlik, istasyon alanı, yapım yılı, yolcu sayısı, platform tipi ve jeolojik kompozisyon (granit ve granit olmayan malzemeler gibi) sayılabilmektedir. İstasyon derinlikleri 8-20 m arasında değişmektedir. Radon miktarları da derinlik ile değişmektedir. Aylık olarak Radon miktarları değişimi çok fark etmemektedir. 4 hat üzerinde yapılan çalışma ada tipi istasyonlarda daha yüksek değerler çıkmıştır. Granit üzerine inşa edilen istasyonlarda da daha yüksek değerler gözlemlenmiştir. Ay olarak bakıldığında ise ilkbahar aylarında yazın göre daha yüksek veriler elde edilmiştir. Güvenlik otomatik kapılarının Radon miktarı oranlarını azalttığından (51.4 ten 18.9Bq/m<sup>3</sup> e kadar düşürdüğü) bahsetmişlerdir. Yazın hava daha sıcak olsa bile kışın camlar açılmadığı için değerlerin daha yüksek olduğunu savunmuşlardır [51].

J. Liendo ve diğerleri tarafından 1997 yılında yapılan “Radon Monitoring For Health Studies In The Caracas Subway Using Ssntds” başlıklı çalışmada Radon değerlerini belirlemek için LR-115 ve gama değerleri için TLD dozimetreleri kullanılmıştır. Ortalama Radon değeri 30 Bq/m<sup>3</sup> olarak bulunmuştur. İşçiler için yıllık etkin doz 1 mSv/yıl, yolcular için 10µSv/yıl olarak hesaplanmıştır. Toplam 35 istasyonda yapılan ölçümlere ilaveten 10 adet trenin sürücülerinin de maruz kaldığı dozlar ölçülmüştür. Havadaki Radon konsantrasyonu düşük seviyeli ortalamaların ölçümüne izin veren 4 MeV'in altında alfa partiküllerinin saptanması için yüksek verimliliğinden dolayı, pasif SSNT LR-II5 tip 2 dedektörleri kullanılmıştır. Aynı istasyon için elde edilen farklı değerler, vantilatörün dedektör yerleştirme noktasının yakınında gözlemlenmesiyle açıklanmıştır. İstasyonların havalandırılması hem kanallardan, kapılardan hem de diğer erişim açıklıklarından yüzeyin zorla taşınmasına ve trenlerin hareketi tarafından üretilen piston etkisine dayanır. Fay hatlarının üstünde olan istasyon değerlerinin daha yüksek

çıkacağı belirlenmiştir. Düşük ortalama Radon konsantrasyonları tektonik fayların üstünde olsalar bile çok kuvvetli havalandırma sistemi sayesinde düşük çıkmıştır. Fay hattında olup ta düşük değerler çıkan istasyonlar iyi havalandırmaya bağlanmıştır. Yolcu ve metro personeli arasındaki farklar sadece farklı maruz kalma sürelerini değil aynı zamanda trenlerin dolaşımında olmadığı ve dolayısıyla daha düşük havalandırma koşullarında gerçekleştiğinde, bakım işlerinin gerçekleştirildiği gerçeğini de yansıtmaktadır. Tipik yolcu, tren operatörü ve bakım personeli dozları sırasıyla 0.01, 0.5 ve 0.1 mSv / yıl olarak hesaplanmıştır [52].

A. Çoşgun tarafından 2012 yılında doktora tezi olarak yayınlanan Antalya İlinde Farklı Ortamlarda İç Hava Kalitesinin Araştırılması ve Modellenmesi başlıklı çalışmada Antalya metro sistemi Antray'da hava parametrelerinin yanı sıra Radon değerleri de belirlenmiştir. 2011 yılı 1 Ocak-1 Nisan dönemlerinde 3 ay süre ile sadece 1 istasyonda CR39 yöntemi ile yapılan ölçümde Radon değeri  $38 \text{ Bq/m}^3$  olarak bulunmuştur [53].

“Investigation on Radon Concentration in the Tehran Subway Stations, in Regard with Environmental Effects” başlıklı çalışmada AlphaGUARD tekniği ile yapılan ölçümlerde Radon değeri  $14.19 \text{ Bq/m}^3$  bulunmuştur. Tahran istasyonunda sonbahar/kış dönemlerinde 2005 yılında 22 istasyondan 16 istasyon seçilmiş ve ölçümler alınmıştır. Tahran otel, okul ve kapalı mekanların da yapılan Radon ölçümlerine göre Tahran metrolarında çok çok düşük değerler bulunmuştur [54].

“Disadvantages Of Radon In Metro Station” başlıklı 2015 yılında yapılan çalışmada Tahrandaki yapılan ölçümlerin sonucuna istinaden yazılan diğer bir yayındır. Tahran değerleri düşük olmasına rağmen Radon miktarını azaltmak için alınabilecek önlemlerden bahsetmişlerdir. Uranyumun toprakta ve kayada bulunması, Radyum ve Radonun mevcut olabileceği yerlerin önemli bir göstergesidir. Radon bir gaz olduğu için toprakta üretilen Radonun bir kısmı bir binaya girebilir. Bununla birlikte, zemindeki çatlaklar, duvar levhası bağlantıları ve drenaj sistemi Radonun bir binaya girmesine izin verir. Kapalı Radon konsantrasyonları neredeyse her zaman dış mekan konsantrasyonlarından daha yüksektir. Radon seviyeleri genellikle bodrum katlarında yüksektir çünkü bu alanlar kaynağa en yakın ve genellikle yetersiz havalandırılmışlardır. Kapalı Radon seviyelerini azaltmak için Radonun biriktiği bodrumlarda ve diğer kapalı alanlarda havalandırmayı arttırmak en basit yöntemdir. Artan havalandırma, biriken Radon seviyelerini azaltır. Bodrum katlarında ve duvarlarındaki çatlak ve deliklerin sıvanması ve kapatılması, Radonun yayılmasını engeller. Epoksi boyaların, Radon emisyonunu

azaltmada faydalı olduğu bilinmektedir. Polietilen tabakaların da Radon emisyonuna iyi bir bariyer görevi gördüğü bilinmektedir. Uygun yüzey işlemi Radon emisyonunu azalttığından Radon konsantrasyonu tuğlalar, levhalar, zeminler ve boyasız alanlar içinde artar sonuçlarına varmışlardır [55].

G Espinosa ve R.B Gammage yaptıkları “Radon Levels survey in the Underground Transport Metro System in Meksiko City” çalışmalarında 15 m ve daha fazla metre derinlikte 20 tane yer altında istasyonunda yaz döneminde 3 ay süre ile CR-39 yöntemi ile ölçüm yapmışlardır. Radon değerleri 60-350 Bq/m<sup>3</sup> bulunmuştur. Gün içinde 8 milyondan fazla kişinin kullandığı istasyon ağında bir yolcunun yer altında kalma süresi 2 saatten fazladır ve yolcu akışı, yeraltı derinliği ve farklı jeolojik yapılar Radon konsantrasyonlarında belirleyici faktörler olmuştur. İstasyonlar ve tüneller beton, taş ve tuğladan inşa edilmiştir. Arazi ise göl yatağıdır. Metrodaki havalandırma açık olan yolcu girişlerinden ve mekanik hava tutucular tarafından sağlanmaktadır [56].

C. Andersén tarafından 2015 yılında master tezi olarak yapılan “Time-Resolved Measurements Of Radon Concentration In The Stockholm Subway Tunnels” çalışmasında, metro Radon konsantrasyon seviyelerinin nasıl değiştiğini incelemiş ve Radon konsantrasyon seviyeleri ile jeolojik yapı, basınç, sıcaklık ve nem gibi faktörler arasındaki potansiyel bağlantıları değerlendirilmiştir. 1 ay süre ile 2 istasyonda toplam 14 dedektör kullanılarak yapılan çalışmada Radon konsantrasyon seviyelerini, nispi nemi, basıncı ve sıcaklığı ölçmek için AlphaGUARD dedektörü kullanılmıştır. GR-130 BGO dedektörü gama ışınımını ölçmek ve potasyum, toryum ve uranyum içeriğini tahmin etmek için kullanılmıştır. En derin istasyon 28 m derinliktedir. Ortalama Radon konsantrasyonu 130 ± 10 Bq/m<sup>3</sup> bulunmuştur. Tüm ölçüm yerleri İsveç Çalışma Ortamları Kurumu'nun toprak altında çalışırken Radon konsantrasyonu için maruz kalma sınır değerleri altında bulunmuştur. Radon konsantrasyonu sıcaklık ve nem parametrelerinin birbiriyle ilişkili olduğu ancak aralarında doğrudan bir bağlantı olduğu gözlemlenememiştir. Hava sirkülasyonunu etkileyen diğer bir faktör havalandırma sistemidir. Radon miktarlarını havalandırma sistemi ve tren geçişiyle oluşan hava sirkülasyonuna bağlamışlardır. Pasif havalandırma yani ızgaralardan gelen havalandırma vardır. Tren geçişlerinde Radon dalgalanmalarının çok az olduğunu, geceleri tren dururken farklılıklar oluştuğunu, istasyonların altındaki kayaç-toprak yapısının farklı Radonlar yaydığı sonuçlarına varılmıştır. Tünelin derinliği ve ortalama Radon konsantrasyonu arasında korelasyon

görülmemiştir. Mevcut kaya tipleri ve Radon konsantrasyonu arasında korelasyon görülmemiştir. Radon konsantrasyon seviyeleri ile tünellerin betonla güçlendirilip güçlendirilmediği hakkında korelasyon görülmemiştir [17].

Catalonia'da (İspanya) 2008 yılında Barcelona Metrosu'nun 7 istasyonu ve 2 garajında Radon konsantrasyonu ölçümü yapılmıştır. Araştırma sonucunda yıllık ortalama Radon konsantrasyon değeri  $20 \pm 9 \text{ Bq/m}^3$  olarak bulunmuştur. Bu değer ICRP tarafından belirlenen  $1500 \text{ Bq/m}^3$  değerinden oldukça düşük olduğu gözlemlenmiştir [57].

Helsinki metrosunda yapılan bir çalışmada ise; metro hattı, şehir merkezinde 4 km, kaya tünelden oluşan 5 yer altı istasyonu ve şehir merkezi dışında 12 km uzunluğunda birkaç köprü ve 7 yüzey istasyonundan oluşmaktadır. Metro kazı çalışmaları ve inşaat çalışmaları 1971 yılında başlamıştır. 1982 yılında tamamen hizmete açılmıştır. 1972 yılında yapılan kazı çalışmaları sırasındaki ilk ölçümlerde havalandırma düzgün çalışmazsa Radon konsantrasyonunun  $2000 \text{ Bq/m}^3$ 'e çıktığı gözlemlenmiştir. Metronun yer altı istasyonlarında ise havalandırma, hareket eden trenlerin piston etkisi ile sağlanmaktadır. 1975'ten sonra bütün inşaat aşamaları boyunca tünellerde düzenli ölçümler yapılmıştır. İnşaat aşamaları boyunca en yüksek Radon konsantrasyonu  $7000 \text{ Bq/m}^3$  olarak ölçülmüştür. Fakat normal olarak Radon konsantrasyonları  $500 \text{ Bq/m}^3$ 'ten düşüktür. Metro trafiğe çıkmaya başladıktan sonra Radon ölçümleri 5 yer altı istasyonunda trenin dönüş noktası ve sürücü kabinlerinde yapılmıştır. Helsinki Metrosu'nda havadaki Radonu ölçebilmek için 1987'de yeni sürekli Radon ölçüm yöntemi geliştirilmiş ve ölçümler her mekânda 2-7 gün sürecek şekilde yılda dört kere yapılmıştır. Beşinci istasyon tamamlanmadığından dört istasyonda ölçülen ortalama Radon konsantrasyonları yaklaşık  $100 \text{ Bq/m}^3$  bulunmuştur. 1988, 1989 ve 1990 yıllarında dört istasyonda ölçülen ortalama Radon konsantrasyonu  $100 \text{ Bq/m}^3$ , tren kabininde ortalama  $50 \text{ Bq/m}^3$ , trenin dönüş noktalarında ise  $460 \text{ Bq/m}^3$  bulunmuştur. Metroyu günde 100.000 yolcu kullanmaktadır ve sıradan bir yolcu günde 20 dakikayı yer altında geçirmektedir. Sadece birkaç metro personeli bütün çalışma saatleri boyunca yer altında kalmaktadır. Çalışan bir personel için maksimum etkin doz ise  $2 \text{ mSv/yıl}$  dan az ve sıradan bir yolcu için ise ortalama etkin doz  $0.1 \text{ mSv/yıl}$  olarak bulunmuştur [58].

Benzer çalışmalar incelendiğinde metro yer altı ulaşım istasyonlarında, istasyonların jeolojik yapısı, yapı malzemesi, havalandırma özellikleri, derinlik, istasyon sıcaklık, nem, basınç değerlerinin Radon miktarına etkileyen parametreler olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca

istasyonlarda güvenlik kapılarının bulunması, tren sirkülasyonları, istasyon tipi, yolcu yoğunluğu ve istasyon yapım yıllarının da Radon miktarlarına etki ettiği düşünülmektedir. Fakat Radon gazının miktarını belirleyen en önemli etken havalandırma sistemidir ve yine aynı şekilde biriken Radon gazının azaltılması için de en önemli etken havalandırma sistemidir.



### 3. MALZEME VE YÖNTEM

Radon ve ürünlerinin konsantrasyonları tespit edilirken yaydıkları alfa miktarının belirlenmesi gerekmektedir. Yapılan bu çalışmada belirlenen ölçüm noktalarındaki Radon miktarları pasif LR-115 tip II ve aktif AlphaGUARD yöntemi ile dedekte edilmiştir. Bu çalışmanın amacı; Ülke nüfusunun büyük çoğunluğunun toplandığı İstanbul ilinde en yoğun ulaşım araçları olarak kullanılan metro ve Marmaray yer altı istasyonlarında Radon seviyelerinin belirlenmesi ve bu yerlerde çalışan kişilerin maruz kaldıkları yıllık etkin doz değerlerini belirleyip standartlarla karşılaştırmaktır.

Bu bölümde tez çalışması kapsamında olan İstanbul ilinin jeolojik yapısı, metro ve Marmaray yer altı istasyonlarının fiziksel yapısı, Radon ölçüm teknikleri, ölçüm yapılacak istasyonlar ve ölçümler hakkında bilgiler sunulmuştur.

#### 3.1. METRO SİSTEMLERİ

İstanbul ili, Avrupa ve Asya kıtalarını birbirine bağlayan dünya genelinde bilinen kültürel, tarihi, inanç ve deniz turizmleri ile sağlık ve iş alanı gibi pek çok olguyu içinde barındıran bir turizm kentidir. 41.00527 enlem ve 28.97696 boylam koordinatlarında bulunan 15.029.231(2017 yılı sonu itibarıyla) milyon nüfusa ve 5461 km<sup>2</sup> yüzölçümüne sahip yoğun bir kenttir. İstanbul'da km<sup>2</sup>'ye 2752 kişi düşmektedir. Ülkemizin en kalabalık, ekonomik, tarihi ve sosyo-kültürel açıdan en önemli şehridir. TÜİK ile Birleşmiş Milletler Nüfus Fonu (UNFPA) verilerinden yapılan derlemeye göre. 2017'de 80 milyon 810 bin 525 kişiye ulaşan Türkiye nüfusunun yüzde 18.6'sını İstanbul'un nüfusu oluşturmaktadır. Öyledir ki İstanbul nüfusuyla 201 ülkeden 129'unu geride bırakmıştır. Belçika (11.4 milyon kişi), Yunanistan (11.2 milyon kişi), Portekiz (10.3 milyon kişi), İsveç (9.9 milyon kişi) ve Azerbaycan (9.8 milyon kişi) nüfuslarıyla İstanbul ilinden daha az bir nüfusa sahiptirler [59]. İnsan yoğunluğu ve trafik karmaşasından dolayı metro gibi raylı sistemler İstanbul trafiğini hafifletmektedir. Şekil 3.1'den İstanbul metro istasyonları ağ yapıları görülmektedir [60]. Metro sistemlerinin başlıca bileşenini oluşturan tüneller, zemin ve kaya ortamlara açılan iki ucu açık, yataya yakın eğimli, uygun ulaştırma yapıları vasıtası ile arasında doğal zorluklar ve tehlikeler olan iki yerleşim biriminin kesintisiz bir şekilde bağlantısını sağlayan yer altı yapılarıdır. Yolcu ve yüklerin devamlı kesintisiz taşınması bir toplumun gelişmesi ve sosyal olarak refaha ermesi için gerekli bir durumdur. Kentlerin belirli bölgelerini genellikle yer altında açılmış tünellerle

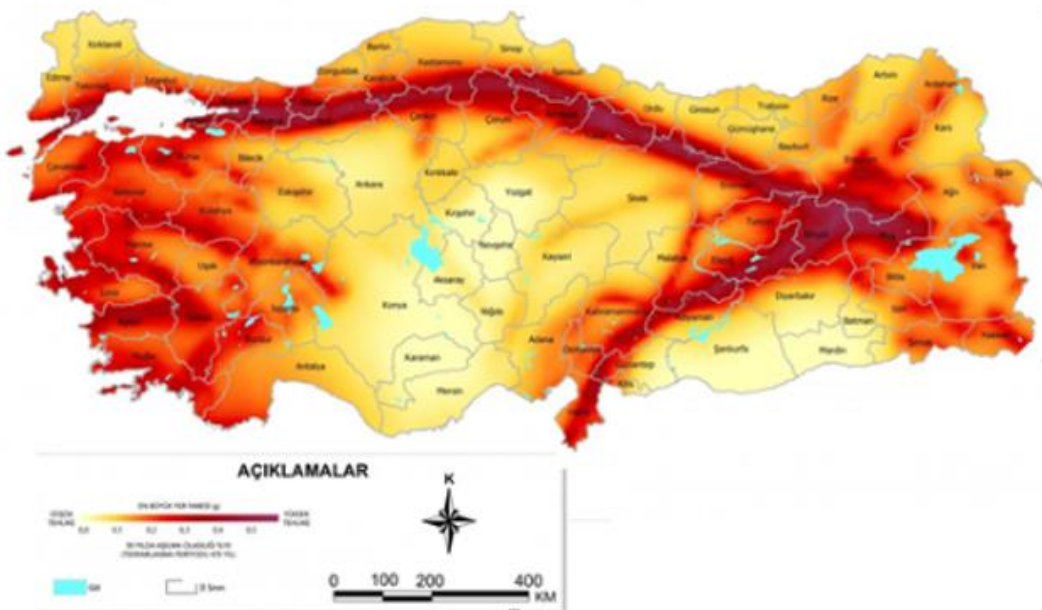
birbirine bağlayan ve kendilerine ait yollar üzerinde elektrikle işletilen süratli trenlere metro araçları, bunların işlediği tünellere ve istasyonlara da metro sistemleri denir [61]. Metro ihtiyacı şehirlerin kalabalıklaşması sonucu ortaya çıkmış ve trafik düzenine kolaylıklar getirmiştir. İstanbul metrosu, 6 adet metro hattından oluşmaktadır (Şekil 3.1). Metro sistemine ilaveten Marmaray sistemide bulunmaktadır. Bir ortamın çevresel koşullarında Radon miktarına etki etmektedir. İstanbul yer altı ulaşım istasyonlarında genellikle bekleme platformu olan peronların duvar kaplaması seramik, peron zemin kaplaması granit ve tren geçiş yolu duvarları betondur. İstanbul Marmaray ve Metro ulaşım ağlarında çoğu istasyon yer altına inşa edilmiştir fakat yer üstü istasyonları da bulunmaktadır. Bu çalışmada istasyonların fay hattı üzerinde olup olmadığına ve jeolojik olarak hangi tip yapıların üzerine inşa edildiğine dikkat edilmiştir. İstanbul ağlarında genellikle istasyonlar seramik/beton duvarlar ve granit zemin yapılar şeklinde dizayn edilmiştir.

İstanbul, batıda Çatalca Yarımadası, doğuda Kocaeli Yarımadası'ndan oluşur. Kuzeyde Karadeniz, güneyde Marmara Denizi ve ortada İstanbul Boğazı'ndan oluşan kent, ortasındaki İstanbul Boğazı ile Avrupa ve Asya kıtalarını birleştirir. Boğazdaki Fatih Sultan Mehmet ve Boğaziçi Köprüleri kentin iki yakasını birbirine bağlar. İstanbul Boğazı boyunca ve Haliç'i çevreleyecek şekilde Türkiye'nin kuzeybatısında kurulmuştur. İstanbul ili iklimi için tek bir karakteristikten söz etmek mümkün değildir. Karadeniz, Akdeniz, Anadolu ve Balkan iklimlerinin tesiri altında bulunan İstanbul'da kışın Akdeniz'den gelen ılık lodosları, Balkanlar üzerinden gelen soğuk veya Karadeniz'den gelen yağışlı havalar takip eder. Yıllık ortalama sıcaklığı 13,5°C dir. Yıllık yağış miktarı ise 720-788 mm'dir. Yağışların % 40'ı kış, % 20'si ilkbahar aylarında olur. Genel olarak yazlar sıcak ve kurak, kışlar yağışlı ve ılık geçer. Sıcaklık bir yıl boyunca -14°C ile ±41,5°C arasında seyrederek. İstanbul çevresinin bitki örtüsü Akdeniz bitkilerini andırır. Bölgede en çok görülen bitki makidir. İklimi sebebiyle her çeşit bitki yetişir. Orman bakımından zengin sayılır. 280 bin hektar (ilin % 60'ı) orman ve fundalıktır [62].





İBB tarafından paylaşılan İstanbul Jeoloji haritası, yapısal jeoloji dağılım haritası ve zemin sınıflama haritaları incelendiğinde İstanbul ‘un genel olarak 2.derece deprem bölgesinde yer aldığı görülmektedir. İstanbul ili geniş zaman aralığında oluşmuş çok sayıda kaya tipini kapsayan ve değişik fazda oldukça karmaşık, tektonik hareketlerin etkin olduğu bir bölgede yer almaktadır. İstanbul, doğudan Marmara Denizindeki Adaların güneybatısına doğru uzanan Kuzey Anadolu Fay Hattından yaklaşık 20 kilometre uzaklıktadır. M4 hattının bulunduğu Tavşantepe sınırları granit üzerine inşa edilmiştir [63]. Kozyatağı kireçtaşı, Sancaktepe sınırlarına komşu bulunan Pendik, Maltepe mahalleri Sancaktepe granit, M4 hattının bulunduğu güzergah genel olarak 1.derece deprem bölgesi ve yaşlı kaya birimleri, granit ve kireçtaşı yapısındadır. Avrupa yakasında ise Bakırköy, Bahçelievler, Fatih kireç taşı yapısında ve 2.derece deprem bölgesinde olduğu bilinmektedir [64]. Bağcılar mevkiide 2.derece deprem bölgesinde yer almakta ve zemin yapısı alüvyondur. Zemin sınıflandırılmasına göre Bakırköy, Bahçelievler, Fatih ve Bağcılar Z3 yapısında; yumuşak süreksizlik düzlemleri bulunan çok ayrışmış metamorfik kayalar ve çimentolu tortul kayalar, orta sıkı kum, çakıl, katı kil, siltli kil, er altı su seviyesinin yüksek olduğu yumuşak, kalın alüvyon tabakaları içerir. Anadolu yakasındaki M4 hattı üzerindeki mahallerde ise Z2 zemin yapısı ise tuf ve aglomera gibi gevşek volkanik kayalar, süreksizlik düzlemleri bulunan ayrışmış çimentolu tortul kayalar, sıkı kum, çakıl, çok katı kil, siltli kil ve metoformik kayaç yapılarından oluşmaktadır. AFAD 2018 verilerine göre Türkiye deprem tehlike haritası Şekil 3.2 ‘de paylaşılmıştır.



Şekil 3.2: Türkiye deprem tehlike haritası [65].

Diğer taraftan hayatımızın en önemli parçası olan hava % 21 Oksijen oranı taşıyan bünyesinde insan sağlığı için zararlı gaz veya parçacıklar bulundurmaz. Yer altı ulaşım istasyonlarındaki havanın kalitesi de sıcaklık ile değişmektedir. Metro istasyonlarında sıcaklığın mevsimlere göre 18°C ile 28 °C arasında, oransal nemin ise % 40 ila % 60 arasında olması iyi bir hava için kabul edilebilir parametrelerdir. İstanbul metroları ve Marmaray hava kalitesi bakımından gerekli koşulları sağlamaktadır. Tünellerin, istasyonların ve diğer metro alanlarının iç mekanları, betonarme, seramik, seranit ve bazı yerler mermer veya alüminyum plakalarla döşenmektedir

Metro sistemlerinin işletilmesindeki havalandırmada genelde normal, sıkışık trafik ve acil durum olmak üzere üç ayrı koşul dikkate alınmaktadır. İşletilen trenlerin tarifelere uygun şekilde çalışmalarını halinde işletme "normal" olarak tanımlanmakta ve bu durumda yolcular araçlardan istasyonlara ve istasyonlardan araçlara rahatça geçmektedirler [67]. Normal işletim sırasında tren yolundaki ve istasyonlardaki hava hareketini tren hareketlerinin piston etkisi sağlar. Geçmiş yıllarda yapılan çoğu sistemde, bu hava hareketi metro tesisinde gereken ortam şartlarını sağlamakta yeterli olmaktaydı. Buna rağmen yüksek hızlara çıkabilen yeni yüksek performanslı transit metro araçları, ivmelenme ve frenleme sistemlerinin etkisiyle piston etkili havalandırmayı yapamayacak kadar yüksek ısı üretebilmektedir. Buna ek olarak metro trenlerinde ve istasyonlarında artan klima kullanımı da tünel ortamındaki sıcaklığı arttırmaktadır. Bugün dünyada tasarlanan ve yapılan yeni sistemlerin pek çoğunda istasyon tesislerinin soğutulması ele alınmaktadır [67]. Acil bir durum meydana geldiğinde trenlerin durdurulması ya da yavaşlatılması piston kaynaklı havalandırmanın katkısının kesilmesine sebep olur. Böyle bir durumda mekanik bir havalandırma sisteminin de istasyon tünellerine dâhil edilmesini gerektirmektedir. Mekanik havalandırmanın kapatılması ya da piston etkili doğal havalandırmanın az olması Radon gazının daha çok miktarda birikmesine sebebiyet vermektedir. Metro sistemlerinde doğal havalandırma, temel olarak trenlerin tren yolunun büyük kısmını doldurması ve önüne kattığı havayı tren hareketi yönünde ittirmesidir [68]. İstasyon bekleme platformuna yaklaşan bir trenin önünde oluşan pozitif basınç; tünel ve istasyon içindeki sıcak ve kirli havayı yakın şaft, istasyon giriş/çıkışları ve diğer açıklıklardan dışarı atmaktadır. İstasyondan hareket eden trenin arkasında oluşan negatif basınç ise aynı açıklıklardan temiz havanın içeri alınmasını sağlamaktadır. Metro sistemindeki tünellerde veya istasyonlarda paralel iki hat arasında bir duvar yoksa veya duvarlar arasında boşluk bulunmaktaysa iki tren birbirinin hava hareketini engelleyip doğal havalandırmada bir kısa devreye yol açabilir. Bu durumda ada tipi istasyonlarda Radon gazının daha çok biriktiğini, yan

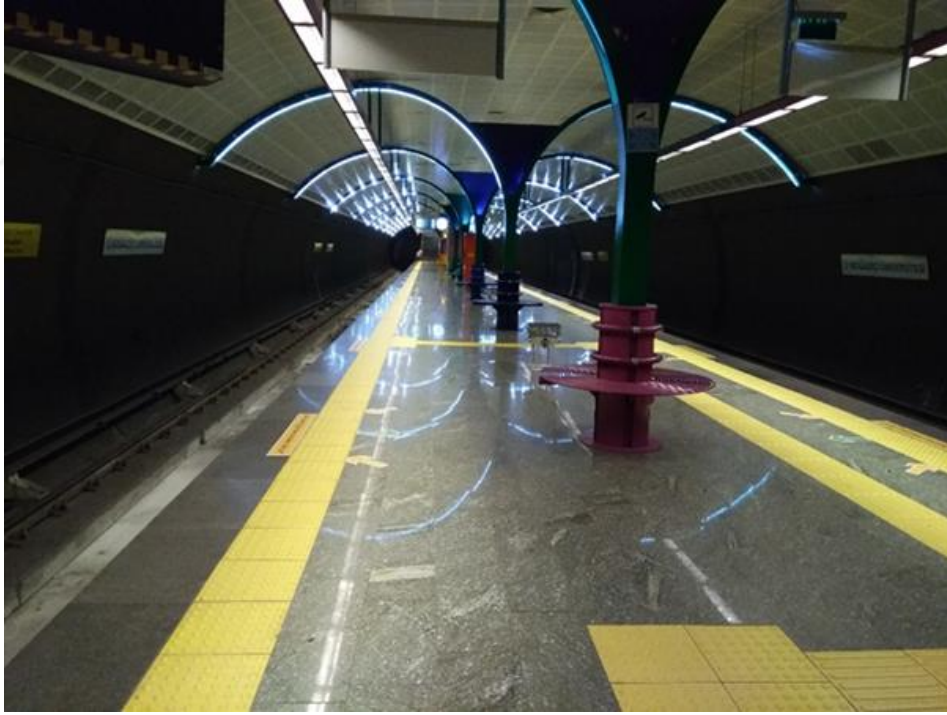
peron tipi istasyonlarda ise daha az biriktiğini söyleyebiliriz. Böyle bir kısa devre durumu net havalandırmayı azaltır ve istasyon girişleri ile platformlarda hava hızlarını artırır. Bu durum en yoğun işletim saatlerinde ve en yüksek ortam sıcaklığında istenmeyen ısı artışlarına sebep olabilmektedir. Doğal havalandırmada oluşabilecek kısa devreyi ortadan kaldırmak için havalandırma şaftları, genel olarak tünel ve istasyonların kesişim bölgeleri yakınında yer alacak şekilde tasarlanır. İstasyonlara gelen tünellerde (yaklaşım tünelleri) yer alan havanın bir kısmının tren tarafından itilerek atıldığı şaftlara genel olarak çıkış veya tahliye şaftı denir. İstasyonlardan giden tünellerde (uzaklaşma tüneli) bulunan şaftlara besleme veya tedarik şaftı denilmekte olup istasyondan uzaklaşan trenin arkasında oluşan negatif basıncın etkisiyle dış ortam havası istasyon girişlerinden değil de bu şaftlardan istasyona girer. Böylece iki trenin zıt etkisi ortadan kaldırılmış olur.

Mekanik havalandırmada hava değişimi ve hareketi için fan veya fanlardan yararlanılır. Metro sistemlerinde mekanik havalandırma ile piston etkili havalandırmayı desteklemek ve tamamlamak, ısınmış havayı sistemin dışına atmak, serin dış ortam havasını sisteme almak, egzost için dış ortam havasını tedarik etmek, çalışma saatleri dışında ortamdaki doğal ısı yutucuların yeniden işlerlik kazanmasını sağlamak, tünel ve istasyon arasındaki hava akımını azaltmak, acil durumlarda istasyonlardaki veya tünellerdeki yolcular için dış ortam havasını sağlamak, sistemi yangın durumunda dumandan arındırmak ve yangınla mücadele ekibinin sisteme güvenli girişini sağlamaktır [61].

İstanbul metro istasyonlarının normal faaliyeti sırasında tünellerde havalandırma, trenin piston etkisi ile sağlanır. Olağanüstü durumlarda ve sıkışıklık sırasında tünel havalandırılması havalandırma sistemi ile sağlanır. Kış ve yaz dönemlerinde uygun ortam koşulları elde edilir. Sıcak havalarda istasyon ve tünellerdeki sıcaklık aşırı artarsa tren piston etkisinin oluşturduğu hava değişimlerini takviye etmek amacıyla dışarıdaki taze havanın içeri çekilmesi ve sıcak havanın boşaltılması için tünel havalandırma fanları çalıştırılır. Trenlerin önceden planlanmış ya da planlanmamış normal faaliyetlerinin dışında duraklaması halinde; normalde tren piston etkisiyle elde edilen hava akımını sağlamak için tünel havalandırma fanları çalıştırılır. Fanlar itme-çekme hareketiyle çalışmakta olup tünelin bir ucundaki fanlar boşaltma durumundayken diğer uçtakiler besleme durumunda çalışmaktadır. Böylece besleme ucundan boşaltma ucuna hava akımı sağlanır. Peronların taze hava ihtiyacı peron hava besleme sistemi vasıtasıyla sağlanmaktadır.

Radon miktarına etkiyen diğerk bir faktörün ise istasyon tipi olduğu düşünölmektedir. Bu kapsamda İstanbul yer altı istasyonlarında ada tipi orta peron ve yan peron tipi istasyonlar bulunmaktadır. Bu ifadeleri kısaca açıklamak gerekmektedir. Ada(Orta) tipi istasyon; bekleme platformlarının ortada olduğu trenlerin bu platformların sağına ve soluna yanaştığı istasyonlardır (Şekil 3.3). Yan peron tipi istasyonlar ise ortada duvarların olduğu trenlerin ise sağ veya sol kısımdan platformlara yanaştığı bir başkadeyişle gidiş ve geliş yönlerine göre iki ayrı platformun bulunduğu istasyonlardır (Şekil 3.4). Bazı istasyonlarda karşılıklı iki platform bulunmaktadır ve trenler bu platform ortalarında seferler yapmaktadır ( Şekil 3.5). Bu tip istasyonlarda yan peron olarak isimlendirilmektedir. Bir başkadeyişle yan peronlar, her biri ayrı ana hatta hizmet etmek üzere, karşılıklı olarak planlanan peronlardır. Orta peronlar ise her iki yandaki hatlara hizmet vermek üzere, ortada tek olarak planlanan peronlardır.

Literatür taraması sonucunda istasyon tiplerinin de Radon miktarına etki ettiği düşünölmektedir.



**Şekil 3.3:** Ada tipi istasyon örneği.



**Şekil 3.4:** Yan peron tipi istasyon örneği.

İstanbul raylı sistemler ağında peronlar, Doğu - Batı, Kuzey - Güney, Peron 1- Peron 2 veya Hat 1- Hat 2 şeklinde isimlendirilmektedir.



**Şekil 3.5:** Yan peron tipi istasyon örneği.

İstasyonlarda ölçüm yapılan noktalara ait görseller aşağıda gösterilmiştir. Şekil 3.6'da dedektörlerin peronlara yerleştirilmesi, Şekil 3.7'de çalışma ofislerine ait bir görsel, Şekil 3.8'



de İstanbul metrosunun en yoğun istasyonlarından olan Taksim İstasyonuna ait peron görseli ve Şekil 3.9’da ise peron seviyesinde bulunan makinist odalarının fiziksel yapılarına ait görsel paylaşılmıştır. Çalışma ofislerinde ve makinist odalarında doğal havalandırma sağlayan pencereler olmadığı görülmektedir.



Şekil 3.6: Dedektörlerin istasyon peronlarına konumlandırılmasına örnekler.



Şekil 3.7: İstasyon amirleri odasından bir görüntü.



Şekil 3.8: M2 hattı Taksim İstasyonundan bir görüntü.



Şekil 3.9: Peron seviyelerinde bulunan makinist odalarından bir görüntü.

## 3.2. YÖNTEM

Radon miktarlarının belirlenmesi için aktif ve pasif ölçme teknikleri kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında pasif ölçme tekniği olan LR-115 katıhal iz kazıma dedektörü ile Radon konsantrasyonları belirlenmiştir. Ortamda bulunan Radon partiküllerinin LR-115 filmleri üzerine bıraktığı izlerin kimyasal işlemler ile belirginleştirilmesi ve optik mikroskop yardımıyla izlerin sayılması çalışması yapılmıştır. Ölçüm alınan noktalarda aynı zamanda aktif ölçme tekniği olan AlphaGUARD ile de anlık ölçümler alınmıştır. Ek olarak ölçüm noktalarındaki portatif gama ölçerler ile gama değerleri de belirlenmiştir.

### 3.2.1. LR-115 Yöntemi

Katıhal nükleer iz film dedektörleri (SSNTD) uzun yıllardır farklı ortamlardaki Radon konsantrasyonlarının ölçümü için kullanılmaktadır. Güvenilir sonuçları ve maliyetinin düşük oluşu sebebiyle tercih edilen bu ölçüm tekniğinin çalışma prensibi bazı kısa yarı ömürlü radyoaktif çekirdeklerinin yayımladıkları alfa parçacıklarının LR-115 dedektörleri üzerine bıraktığı izlerin tespitine dayanmaktadır. Radon ölçümlerinde hem ucuz oluşu hem de dedeksiyon yöntemi ile sıklıkla tercih edilen katı hal nükleer iz dedektörleri; kullanım sonrası oluşan izler uygun koşullarda fiziksel ve kimyasal işlemlere tabi tutularak optik mikroskop altında görülebilir boyutlara ulaşmaktadır. Dedektör film üzerindeki izler mikroskopta sayılarak  $\text{mm}^2$  'ye düşen iz sayısı tespit edilir (Şekil 3.10).Yapılan bu çalışmada LR-115- tip II katıhal nükleer iz kazıma dedektörü kullanılmıştır.

Nükleer iz kazıma dedektörleri temel olarak mineral, kristal, plastik içeren, elektriksel olarak yalıtılmış katı materyallerdir. Nükleer iz kazıma dedektörlerinden ağır yüklü parçacıkların geçişi, dedektör materyalinde geçtikleri yollar boyunca hasarlara neden olmaktadır. Bu hasarlara gizli iz adı verilir. Gizli izler, dedektörlere kimyasal veya elektrokimyasal iz kazıma yöntemleri uygulandığında optik mikroskop altında görülebilecek boyutlara ulaşmaktadır. Alfa parçacıklarının ölçümü için en uygun dedektör materyali polimerik plastiklerdir. Çünkü polimerik plastikler basit, ucuz, dayanıklı, kararlı, yüksek duyarlılığa sahip ve kolay kullanılabilir yapıdadır. Polimer dedektörler genellikle  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{220}\text{Rn}$  ve ürünlerinin ölçümleri için kullanılmaktadır. Yaygın olarak kullanılan polimer dedektörler selüloz nitrat (LR-115), polyallyl di-glycol karbonat (CR-39) ve bisphenol A polikarbonat (makrofole)'dür. LR-115 ve CR-39, makrofole göre daha yüksek duyarlılıktadır [69].



İyonize parçacıklar katı materyal boyunca ilerlerken iyonizasyon ve uyarılma ile enerjilerini ortama aktarırlar. Parçacığın materyal içinde enerji kaybı lineerdir (  $dE/dx$  ). Lineer enerji kaybı parçacık karakteristiklerine (kütle, yük ve enerji) ve kullanılan materyale bağlı bir fonksiyondur. Enerji kaybı kritik değerin üzerine çıktığında dedektör materyali üzerinde lokal şekil değişiklikleri oluşmaya başlar. Bu şekil değiştirmeler polimerlerde moleküler zincirlerin kopması veya parçacık yolu boyunca oldukça reaktif olan yeni kimyasal bileşenlerin oluşması şeklinde açıklanabilir. Oluşan şekil değiştirmeler neticesinde çapı 1–10 nm arasında değişen gizli izler oluşur [70].

Bu çalışma için  $1.5 \times 1.5$  cm<sup>2</sup> yüzey alanına sahip LR-115 filmleri kullanılmıştır. Pamuklu eldiven yardımıyla hazırlanan filmler elde değmeden ve hava ile irtibatı alüminyum folyo yardımı ile kesilerek ölçüm noktalarına bırakılmıştır. Belirlenen noktalarda 1 ay süre ile bekletilen filmler yine alüminyum folyo ile sarılarak laboratuvar ortamına getirilmiştir. Laboratuvarda %10' luk NaOH çözeltisi içerisinde 60 °C sıcaklıkta, 95 dakika bekletilerek kimyasal iz kazıma işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.10: LR-115 Tip II film görüntüsü.

### 3.2.2. AlphaGUARD Yöntemi

Radon aktivite konsantrasyonlarının belirlenmesi için aktif ölçüm tekniği olan ALPHAGUARD Saphymo PQ2000PRO dedektörleri ile uzun ve kısa süreli ölçümler alınabilmektedir. Tez çalışmasında pasif LR-115 tekniği ile yapılan ölçümlerin yanı sıra ölçüm noktalarından 10 dakikalık aktif ölçüm değerleri de alınmıştır. Aktif detektör ile başka bir aparata ihtiyaç duyulmadan havada, AquaKIT aparatı ile suda, toprak gazı sondası ile toprak

gazında ve yapı malzemelerinde Radon aktivite konsantrasyonu ölçülebilmektedir. Taşınabilir söz konusu cihaz ile Radon değerlerinin yanı sıra eş zamanlı olarak atmosferik basınç, sıcaklık ve nem oranı gibi iklimsel üç parametreyi daha ölçebiliriz (Şekil 3.11).



**Şekil 3.11:** AlphaGUARD Cihazı.

AlphaGUARD detektörünün teknik yapısında içerisinde ölçüm yapılmasını sağlayan iyonizasyon çemberi ve bu iyonizasyon odasından gelen sinyalleri işleyip sayısal verilere dönüştüren sinyal işleme birimi DSP (Sayısal Sinyal İşleme) bulunur. AlphaGUARD Radon detektörünün silindirik iyonizasyon çemberinin 0.56 litrelik bir etkin hacmi vardır. Cihaz çalıştırıldığında iyonizasyon çemberinin metalik iç kısmı 750 voltluk potansiyel farka sahip olur ve detektörün anot kutbu görevini yerine getirir. Katot kutbu ise detektörün merkezinde yatay eksen olarak adlandırılabilir paslanmaz çelikten yapılmış çubuktur. Detektör etkin hacmi içerisinde anot ve katot arasındaki 750 voltluk gerilim farkı nedeniyle meydana gelen iyonizasyon sonucu ortaya çıkan iyonlardan – yüklü olanlar anoda, + yüklü olanlar ise katoda doğru hareket ederler. Yüklerin bu hareketlerinden dolayı bir akım meydana gelir ve bu akımda AlphaGUARD'ın elektronik birimi tarafından anlamlı verilere çevrilmektedir.

AlphaGUARD detektörlerinin sağ tarafında Radon gazı giriş paneli bulunmakta olup koruyucu bir grid panelle kapatılmıştır. Detektörün alt kısmında ise yerle teması kesen plastik ayaklar ve havalandırma kanalları bulunur. Detektörün içinde bulunan fan ile uzun süreli ölçümlerde cihazın soğutulması sağlanır ve ısınan hava bu kanallardan dışarı atılır. Bu detektörde Radon konsantrasyonunu ölçen birimler, iyon çemberi ve detektörden gelen sinyalleri işleyip sayısal verilere dönüştüren sinyal işleme birimi DSP yer almaktadır. Bu çemberin uygun geometrisi ve akıllı sinyal (intelligent signal) özelliğinden dolayı Radon değerlerini  $2 - 2 \cdot 10^6$  Bq/m<sup>3</sup> aralığında

ölçebilmektedir. Detektördeki iyon çemberinin içine giren Radon geniş yüzeyli bir cam filtreden geçer ve böylece Radon ürünlerinin iyonizasyon odasına girmesi bu filtreyle engellenir. Bu filtre aynı zamanda çemberin iç kısmını toz zerreciklerine karşı, kirlenme ve paslanmadan korur. AlphaGUARD detektörü puls sayma özelliğine sahip iyonizasyon çemberi (alfa spektroskopisi) içermektedir. 0.56 litrelik etkin bir hacim sahip olan iyon çemberi toplam 0.62 litrelik hacme sahiptir. Bu iyon çemberinin metal iç yüzeyleri 750 Voltluk DC gerilime sahiptir. Bu voltaj sayesinde detektörün etkin hacminde oluşan iyon çiftleri bir akım meydana getirir. Bu elde edilen akım değeri ise elektronik bir sistem tarafında işlenerek anlamlı verilere dönüştürülür [71].

### 3.2.3. Gama Ölçerler

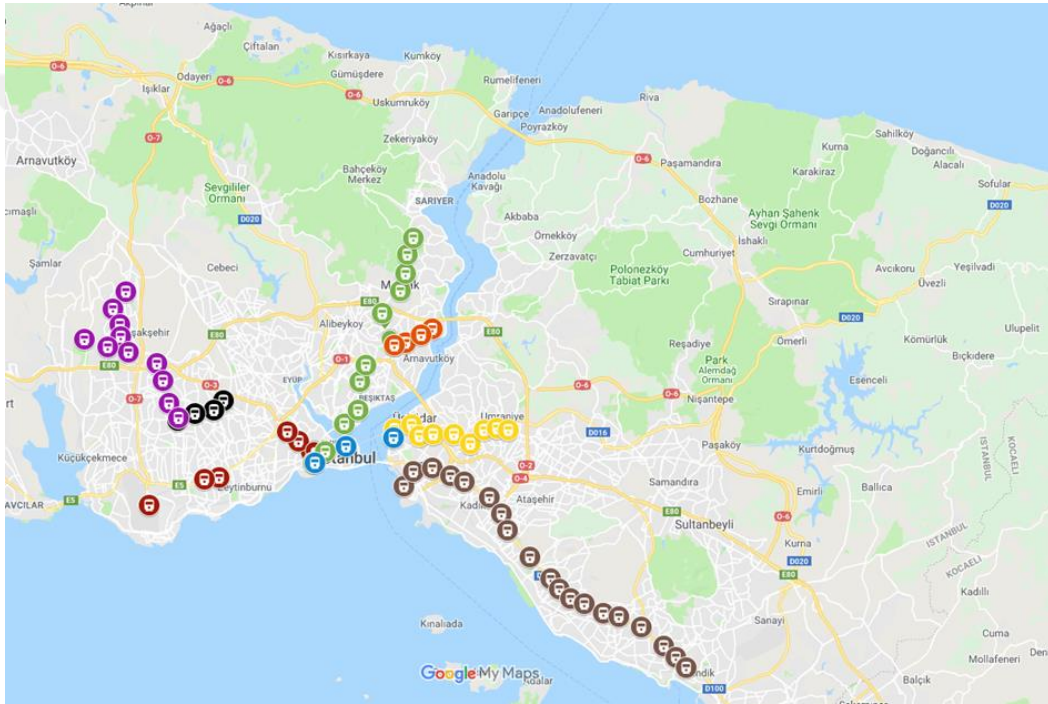
Gama ışınları, radyoaktif parçalanmadan sonra uyarılmış çekirdekten yayınlanan elektromanyetik radyasyondur. Kozmik, Radon kaynaklı veya iç ışınlama kaynaklı maruz kalınan doğal radyasyonların dışında bir de gama radyasyonları çevremizde yer almakta ve yaşadığımız yerlere nüfuz etmektedir. Bir kişinin gama kaynaklı doğal radyasyon maruziyeti UNSCEAR 2000 verilerine göre yıllık etkin doz değeri 0.5 mSv /yıldır [72]. Bu çalışmada ATOMTEX AT6130 C model gama ve X ışınlarına duyarlı portatif gama ölçer kullanılmıştır. Söz konusu cihaz, 50 keV – 3 MeV enerji aralığına sahip, 0.1  $\mu$ Sv – 100 mSv doz değer aralığında ölçüm yapabilmektedir.

### 3.3. ÖLÇÜM NOKTALARININ BELİRLENMESİ

Ölçüm noktaları belirlenirken İstanbul ili yer altı ulaşım sistemlerinin tamamı seçilmiş olup (M1a, M1b, M2, M3, M4, M5, M6 ve Marmaray hatları) metro hatları için İstanbul Büyükşehir Belediyesi Metro İstanbul Anonim Şirketi'nden ve Marmaray ölçümleri için Ulaştırma Bakanlığı TCDD 1. Bölge Müdürlüğü İstanbul Haydarpaşa'dan gerekli yasal izinler alınmıştır.

Tez kapsamında belirlenen istasyonlarda Radon seviyelerini değerlendirmek için Şubat-Mart 2018 dönemlerini kapsayan pasif ölçüm tekniği LR-115 yöntemi ve aynı zamanda 10 dakikalık aktif AlphaGUARD ölçüm tekniği yöntemi kullanılmıştır. Her iki yöntemle de elde edilen Radon değerleri, sıcaklık, basınç, nem, derinlik, yolcu yoğunluğu, istasyon tipi, havalandırma, sefer sayısı, jeolojik yapı kriterleri ile kıyaslanmıştır ve yolcular ile çalışanlar için yıllık etkin doz değerleri hesaplanmıştır. Çalışanlar için günde 8 saat olmak üzere yılda 2000 saat ve

yolcular için günde 1 saat olmak üzere yılda 250 saat baz alınmıştır. Ölçüm yapılan istasyonlarda dedektörler; istasyon amirleri odası olarak bilinen çalışma ofislerine(SOR), turnike geçiş bölgeleri ve peronlara konumlandırılmıştır. Ayrıca makinist odalarında da ölçüm yapılmıştır. Bunlara ilaveten gama değerleri de ölçülmüştür. Şekil 3.12’den ölçüm noktalarının konumları görülebilir. Ölçüm yapılan istasyonlar hakkında detaylı bilgiler aşağıda verilmiştir. LR-115 film dedektörleri yerleştirilirken yerden 1.5 m yükseklikte olmasına, havalandırma mekanizmalarına yakın olmamasına ve yolcu ile çalışanların zarar vermeyeceği şekilde asılmasına dikkat edilmiştir.



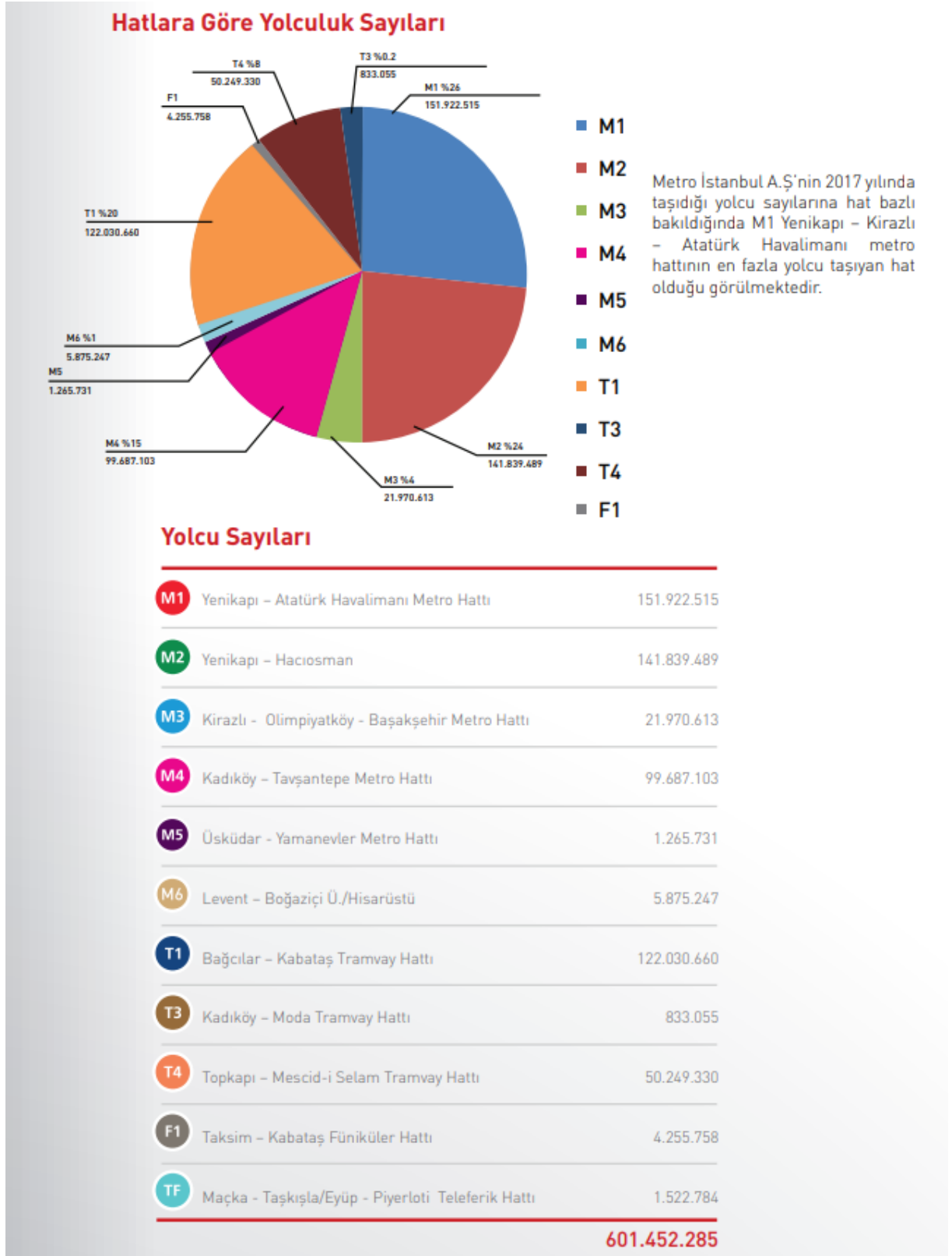
**Şekil 3.12:** Ölçüm yapılan istasyonların konumları.

İstanbul Büyükşehir Belediyesi ve Metro A.Ş firmasından elde edilen bilgilere göre metro hatlarının yolcu sayılarına ait grafik Şekil 3.13’ de verilmiştir.

Şekil 3.13’den metro ağı ve kullanıcı sayılarına ait veriler görülmekte olup yıllık en fazla kullanımın sırasıyla M1, M2, M4 ve M3 hatlarında olduğu en az ise M5 ve M6 hattının kullanıldığı anlaşılmaktadır. 4 istasyondan oluşan M6 hattının ise uzunluğu sadece 3.30 km olup en tenha hattır.

İstanbul mevcut hatlar ve uzunlukları ise aşağıda belirtilmiştir.

M1A - M1B Yenikapı-Atatürk Havalimanı ve Yenikapı-Kirazlı Metro	26.80 Km
M2 Yenikapı-Hacıosman Metro	23.49 Km
M3 Kirazlı-Olimpiyat-Başakşehir Metro	15.90 Km
M4 Kadıköy-Tavşantepe Metro	26.20 Km
M5 Üsküdar-Çekmeköy Metro	20.00 Km
M6 Levent-Boğaziçi Üniversitesi/Hisarüstü Metro	3.30 Km



Şekil 3.13: İstanbul metro hatları yıllık yolcu sayısı [73].

### 3.3.1. M1a Hattı (Yenikapı-Atatürk Havalimanı)

Avrupa kıtasında yer alan Yenikapı-Atatürk Havalimanı bölgelerini kapsayan M1a hattında 18 adet istasyon bulunmaktadır. M1 hattı Otogar istasyonundan sonra M1a ve M1b olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Dolayısıyla M1 hattında Yenikapı ve Otogar'a kadar olan istasyonlar ortaktır. M1a hattında bulunan istasyonların 7 tanesi yer altı istasyonudur. Ölçüm yapılan istasyonlar; Yenikapı, Aksaray, Emniyet/Fatih, Ulubatlı/Topkapı, Bakırköy-İncirli, Bahçelievler ve Atatürk Havalimanı istasyonlarıdır.

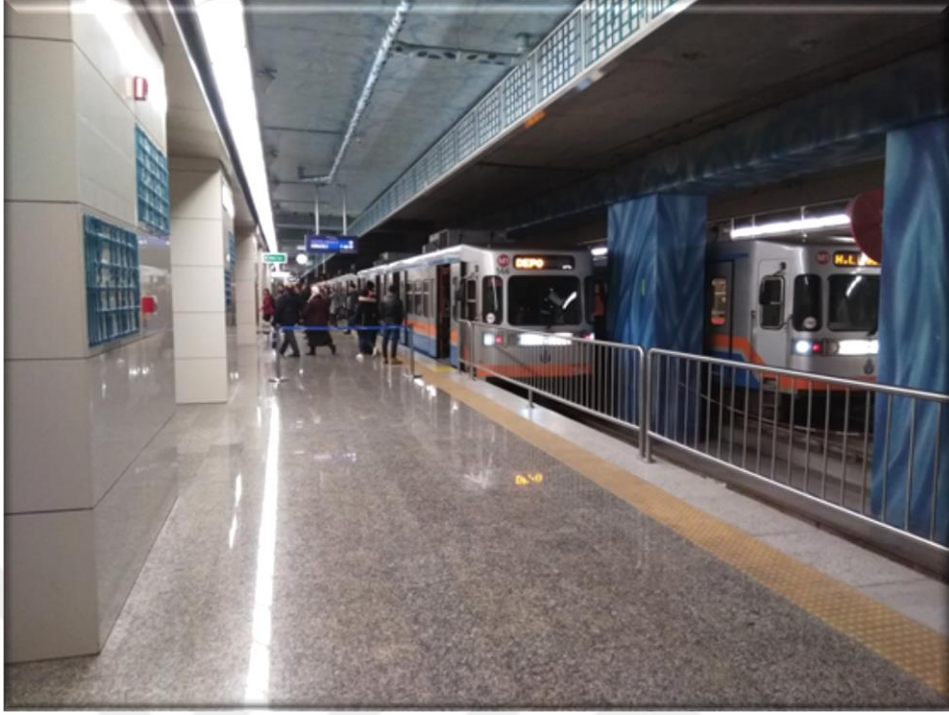
İstanbul Büyükşehir Belediyesi tarafından elde edilen bilgiye göre istasyonların hizmete açılış tarihleri şu şekildedir;

1. etap olan Aksaray – Kartaltepe yönü 03.09.1989 yılında, 2. etap olan Otogar – Zeytinburnu güzergâhı 31.01.1994 yılında, 3.etap olarak nitelendirilen Zeytinburnu – Bakırköy hattı 07.03.1994 yılında, Bakırköy – Ataköy arası 26.07.1995 yılında, Ataköy - Yenibosna 25.08.1995 ve Bahçelievler İstasyonu 15.01.1999 hizmete açılmıştır. İstanbul Fuar Merkezi - Atatürk Havalimanı ise bu hatta en son eklenen istasyonlardan olup 20.12.2002 tarihinde hizmete açılmıştır. 4. etap olan Otogar - Kirazlı uzatmasının tamamlanması ve M1B Yenikapı - Kirazlı İşletmesinin Açılması 14.06.2013 tarihinde gerçekleşmiştir. Yenikapı İstasyonun hizmete girme tarihi ise 09.11.2014 yılıdır [78]. M1a hattının peron uzunlukları tüm istasyonlar için 105 metredir. Şekil 3.14 ve Şekil 3.15'de M1a hattına ait görseller paylaşılmıştır. Radon değerlerinin kıyaslanmasında istasyon açılış tarihleri de rol oynamaktadır. Ölçüm yapılan istasyonların açılış tarihleri dikkate alınmıştır.



Şekil 3.14: M1a Bakırköy-İncirli İstasyon görseli.





Şekil 3.15: M1a hattı Yenikapı İstasyonu.

### 3.3.2. M1b Hattı (Yenikapı-Kirazlı Metro Hattı)

M1b hattı toplam uzunluğu 14.17 km olup 13 adet istasyon barındırmaktadır. Bu istasyonlardan bir kısmı M1a hattı ile ortaktır. M1b hattında ölçüm yapılan istasyonlar; Menderes, Üçyüzlü, Bağcılar Meydan ve Kirazlı yer altı istasyonlarıdır. Hat boyunca sefer süresi 25 dakikadır. İşletme saatleri 06.00 - 00.00 arasındadır. Günlük yolcu sayısı ortalama M1 hattı için 400.000 yolcudur. Yenikapı-Kirazlı yönünde tek yönde günde 168 sefer yapılmaktadır. Sefer sıklığı ise 4 dk. (Pik Saatte) dir. M1b hattının peron uzunlukları Menderes için 122 m, Üçyüzlü ve Kirazlı için 125 m ve Bağcılar için 127 metredir [74].

İstanbul Büyükşehir Belediyesi tarafından elde edilen bilgiye göre istasyonların hizmete açılış tarihleri, 3.3.1. M1a hattı bölümünde belirtilmiştir. Yenikapı mahalli hem M1 hattı için hem M2 hattı için hem de Marmaray için istasyon barındırmaktadır. Şekil 3.16'da M1b hattına ait görseller paylaşılmıştır.





Şekil 3.16: M1b hattı Kirazlı İstasyonu peron ve iç ortam görseli.

### 3.3.3. M2 Hattı (Yenikapı-Hacıosman Metro Hattı)

M2 hattı Avrupa yakasında bulunmakta olup fay hattı (2.derece deprem bölgesi üzerinde) yer almaktadır. Yenikapı-Hacıosman arası sefer yapan bu hatta günlük ortalama 320.000 yolcu taşınmaktadır. Hat uzunluğu 23.49 km dir. 16 adet istasyon bulunmaktadır. Sefer süresi tek yönde 31 dakikadır ve günde 225 sefer/tek yön yapılmaktadır. İşletme saatleri 06.15 - 00.00 arasındadır. Ölçüm yapılan istasyonlar; Yenikapı, Vezneciler/İstanbul Üniversitesi, Şişhane, Taksim, Osmanbey, Şişli/Mecidiyeköy, Gayrettepe, Levent, 4,Levent, Sanayi Mahallesi, İTÜ Ayazağa, Atatürk Oto Sanayi, Darüşşafaka ve Hacıosman istasyonlarıdır. İstanbul Büyükşehir Belediyesi tarafından elde edilen bilgiye göre istasyonların hizmete açılış tarihleri şu şekildedir;

Taksim - Şişli ve 4. Levent Tünellerinin Birleşmesi: 30.04.1995

Araçların Tünele İndirilmesi: 11.01.1999

Deneme Seferleri Başlatılması: 25.03.1999

1. Etap Taksim - Levent Arasının Hizmete Açılması: 16.09.2000

Levent - 4. Levent Arasının Hizmete Açılması: 24.10.2000

2. Etap Taksim - Şişhane ve 4. Levent - Atatürk Oto Sanayi Bölümünün Açılması: 31.01.2009

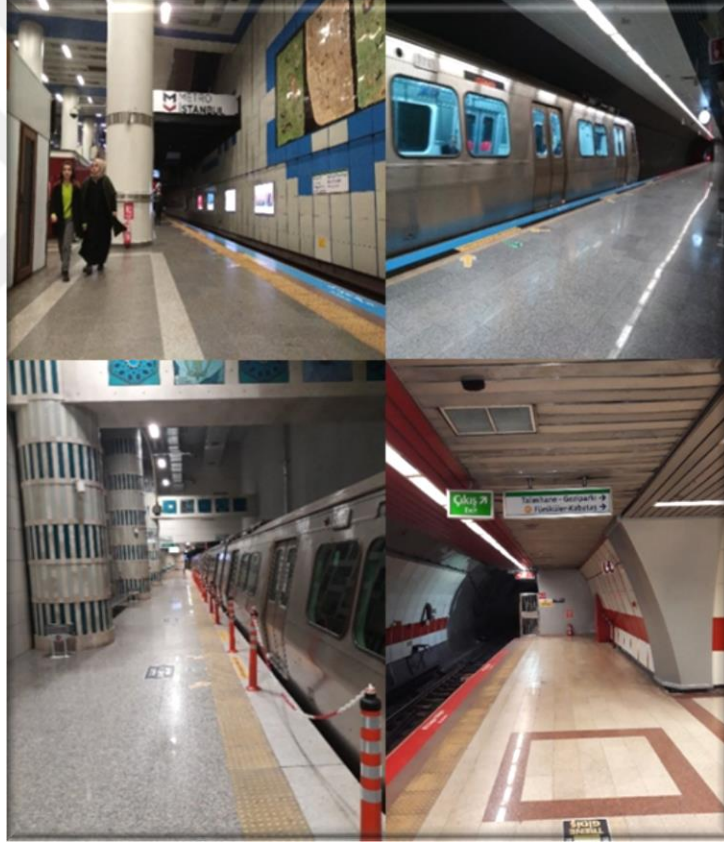
Darüşşafaka İstasyonu'nun Hizmete Açılması: 02.09.2010

Hacıosman İstasyonu'nun Hizmete Açılması: 29.04.2011

3. Etap Yenikapı Uzatmasının Açılması: 15.02.2014

Vezneciler - İstanbul Üniversitesi İstasyonu'nun Hizmete Açılması: 16.03.2014

Haliç istasyonu hariç tüm istasyonlar yeraltı/tünel şeklinde inşa edilmiştir. İstasyonlar orta peron ve yan peron şeklinde dizayn edilmiştir. M1, M2 ve Marmaray hatlarının kesişme noktası olan Yenikapı İstasyonu İstanbul için önem arz etmekte ve yoğun olan bir istasyondur. M2 hattı için Yenikapı istasyonu 3 yol - 2 orta peron, Sanayi Mahallesi İstasyonu 3 yol - 3 yan peron ile pek çok istasyona göre daha büyük inşa edilmiştir. M2 hattının en derin istasyonlarından olan Vezneciler 2014 yılında yani yakın zamanda hizmete açılmıştır. M2 hattının peron uzunlukları tüm istasyonlar için 180 metredir. M2 hattı Levent, Hacıosman, Taksim ve Yenikapı İstasyonları görseli Şekil 3.17'de paylaşılmıştır.



**Şekil 3.17:** M2 hattı Levent, Hacıosman, Taksim ve Yenikapı İstasyonları görseli.

M2 hattında peron duvar malzemesi seramik. Tren geçiş yolu beton ve peron zemini granit malzemedir fakat birkaç istasyonda metal sac panel ve sinterfleks paneller kullanılmıştır.

### 3.3.4. M3 Hattı (Kirazlı-Olimpiyat-Başakşehir Metro Hattı)

M3 hattı Avrupa Yakasında yer almaktadır. Genel olarak çok soğuk ve geniş bir hattır. Toplam 11 adet istasyon barındırmaktadır. Hat uzunluğu 15.9 km dir. Sefer süresi 20 dakika olup işletme saatleri 06.00 – 00.00 arasındadır. Yolcu kapasitesi 70.000 yolcu/saat dir.

İstanbul Büyükşehir Belediyesi tarafından elde edilen bilgiye göre istasyonların hizmete açılış tarihleri şu şekildedir; Hattın işletmeye açılışı: 7 Temmuz 2013 ve Olimpiyat İstasyonu'nun hizmete alınması: 22 Kasım 2013. Olimpiyat istasyonuna gitmek için Ziya Gökalp istasyonundan tren değişikliği yapılması gerekmektedir. Bu hatta 11 adet istasyonun tamamında ölçüm yapılmıştır. M3 hattının peron uzunlukları tüm istasyonlar için 180 metredir.

### 3.3.5. M4 Hattı (Kadıköy-Tavşantepe Metro Hattı)

M4 hattı Asya kıtası yani Anadolu yakasında yer almaktadır. Fay hattı üzerinde yer alan metro hattında 19 adet istasyon bulunmaktadır ve istasyonların tamamında ölçüm yapılmıştır. 1.derece deprem bölgesinde yer alan M4 hattında ölçüm yapılan istasyonlar; Kadıköy, Ayrılık Çeşmesi, Acıbadem, Ünalın, Göztepe, Yenısahra, Kozyatağı, Bostancı, Küçükyalı, Maltepe, Huzurevi, Gülsuyu, Esenkent, Hastane/Adliye, Soğanlık, Kartal, Yakacık, Pendik, Tavşantepe istasyonlarıdır.

M4 hattı uzunluğu 26.2 km dir. Toplam 19 adet istasyon bulunmaktadır ve istasyonların tamamı yer altı istasyonu olduğu için tamamında ölçüm yapılmıştır. İşletme saatleri 06.00 - 00.00 arasındadır ve yolcu taşıma kapasitesi 70.000 Yolcu/Saat dir.

İstanbul Büyükşehir Belediyesi tarafından elde edilen bilgiye göre tünellerin tamamlanması 2011 yılında, deneme seferlerinin başlaması 8 Mayıs 2012 tarihinde ve 1.etabın(Kadıköy-Kartal) işletmeye açılış tarihi 17 Ağustos 2012 gerçekleşmiştir. Ayrılık Çeşmesi İstasyonu'nun Açılışı: 29 Ekim 2013 ve 2.etabın (Yakacık-Tavşantepe) işletmeye açılış tarihi: 10 Ekim 2016 dir. Bostancı dışındaki istasyonlar yan peron şeklinde inşa edilmiştir. Bostancı istasyonunda iki yan peron bulunmaktadır. M4 hattının peron uzunlukları tüm istasyonlar için 180 metredir.

### 3.3.6. M5 Hattı (Üsküdar-Yamanevler Metro Hattı)

M5 hattı Asya yakasında yer almaktadır. İstanbul'un en son açılan hattıdır. 1.Etap Üsküdar-Yamanevler güzergahı 15 Aralık 2017 ve 2. Etap olan Yamanevler - Çekmeköy güzergahı 21

Ekim 2018 tarihlerinde İstanbullulara hizmet veremeye başlamıştır. Sürücüsüz trenlere sahip tek hattır ve bu hatta peron ayırıcı otomatik güvenlik kapıları bulunmaktadır. Otomatik güvenlik kapılarının Radon miktarını azaltıcı etkileri olduğu savunulmakla beraber tren sirkülasyonundan gelen hava akımını engellediği için dezavantajı da bulunmaktadır. M5 hattında; Üsküdar, Fıstıkağacı, Bağlarbaşı, Altunizade, Kısıklı, Bulgurlu, Ümraniye, Çarşı, Yamanevler İstasyonlarında ölçüm yapılmıştır.

Toplu taşımacılık sektöründe dünyanın en büyük sivil toplum kuruluşu olan Uluslararası Toplu Taşımacılar Birliği (UITP), dünyada faal durumdaki sürücüsüz metro hatları üzerinde tek seferde yolcu taşıma kapasite üzerinden yaptığı inceleme sonuçlarına göre M5 Üsküdar-Çekmeköy sürücüsüz metro hattını Avrupada birinci, dünyada üçüncü olarak göstermiştir. Dünyadaki 20 sürücüsüz metro hattını geride bırakarak üçüncü olan M5 Üsküdar-Çekmeköy Metro Hattı, aynı listede yer alan Avrupa'daki metro hatları arasında ise ilk sırada yer almıştır. Türkiye'nin ilk sürücüsüz metro hattının ardından, 1200 yolcu kapasiteli Roma, 895 kişi kapasiteli Barcelona ve 722 yolcu kapasiteli Paris metroları gelmektedir. Avrupa'nın birincisi sürücüsüz M5 Üsküdar-Çekmeköy Metro Hattı'nda, her biri 6 vagonlu olmak üzere 21 adet araç hizmet veriyor. Her bir araçta (6 vagonlu) tek seferde bin 620 yolcu taşınabiliyor [75]. M5hattının peron uzunlukları Üsküdar istasyonu hariç tüm istasyonlar için 140 metredir. Üsküdar istasyonu peron uzunluğu 150 metredir.

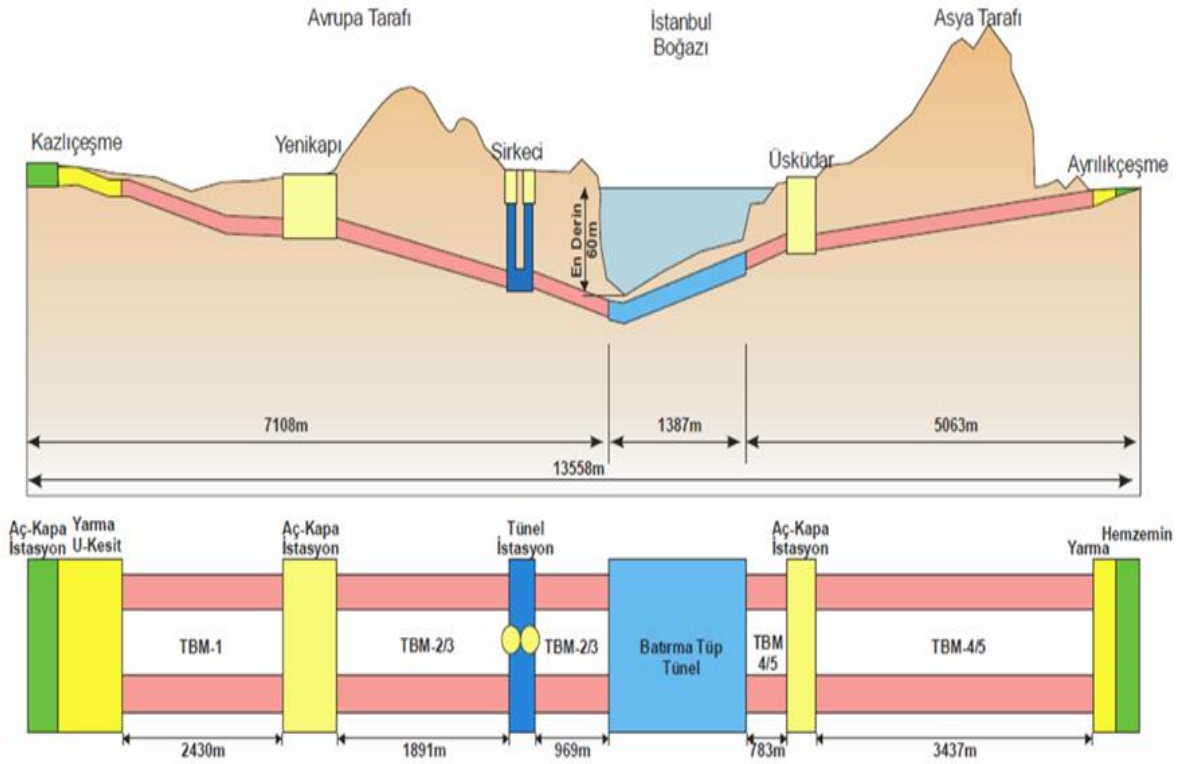
### **3.3.7. M6 Hattı (Levent-Boğaziçi Üniv/Hisarüstü Metro Hattı)**

M6 hattı 19.04.2015 tarihinde hizmete açılmış olup 3.3 km hat uzunluğuna sahip 4 istasyonu bulunan İstanbul'un görsel açıdan güzel ve peronlardaki yürüme mesafesinin en az olduğu hatır. Ayrıca hem istasyon sayısı hem de istasyon yapısı ile en küçük hattıdır. İşletme saatleri 06.00 - 00.00 olan bu hatta sefer süresi tek yönde 7 dakikadır. M6 hattında ölçüm yapılan istasyonlar; Levent, Nispetiye, Etiler ve Hisarüstü / Boğaziçi Üniversitesi istasyonlarıdır. M6 hattının Levent istasyonu peron uzunluğu 54 metredir. Etiler ve Nispetiye istasyonları peron uzunluğu 48.6 metre olup Hisarüstü/Boğaziçi istasyonu ise 48.4 metredir.

İstanbuldaki tüm metro istasyonlarının peron genişlikleri ise 4m ile 70.35 m arasında değişmektedir.

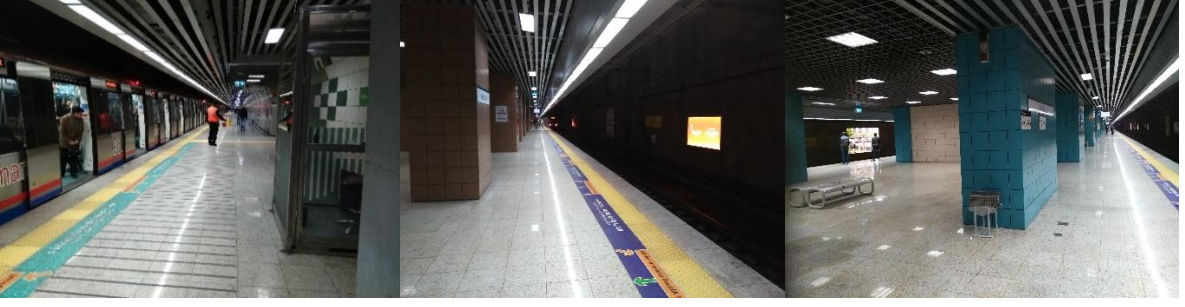
### 3.3.8. Marmaray Hattı (Kazlıçeşme-Ayrılık Çeşme Hattı)

1860'lı yıllarda fikir olarak sunulan ve İstanbul ulaşımının ana omurgasını oluşturan Marmaray 2013 yılında açılmıştır. İstanbul Boğazının altına Marmara Denizine yaklaşık 13.6 km uzunluğunda batırma tünel metoduyla inşa edilmiştir. Yolcu yoğunluğunun en fazla olduğu ulaşım vasıtalarından biri olan Marmarayın sahip olduğu 5 istasyondan Sirkeci, Üsküdar ve Yenikapı yer altı istasyonlarında ölçüm yapılmıştır. Marmaray deniz üstüne inşa edilmesi ve Avrupa ile Anadolu yakasını birbirine bağlaması özelliğiyle İstanbul için büyük önem arz etmektedir. Sirkeci İstasyonu 53 m derinliği ile İstanbul'un en derin istasyonlarından olup dünya metro derinlikleri olarak kıyaslandığında da önem arz etmektedir. Şekil 3.18'de Marmaray hattı yapısı görülmektedir. Şekil 3.19'da ise Marmaray hattı istasyonlarına ait görselleri içermektedir.



Şekil 3.18: Marmaray hattı yapısı.





**Şekil 3.19:** Marmaray Sirkeci, Yenikapı ve Üsküdar İstasyonlarından görüntü.

Marmaray Üsküdar İstasyonunun çalışma ofisi derinliği cadde seviyesinden -5.8 m, turnike bölgesi -5.8m ve peron platform derinliği -23 m aşağıdadır. En derin istasyon olan Sirkeci İstasyonunda ise çalışma ofisi deniz seviyesinden  $\pm 10$  m ve cadde seviyesinden -6 m mesafede olup, peron platform alanı deniz seviyesinden -37m yukarıda ve cadde seviyesinden -53 m aşağıdadır. Yenikapı İstasyonunda ise çalışma ofisi -4 m, turnike bölgesi -4 m ve peron platform alanı cadde seviyesinden -13 m derinliktedir.

Marmaray da seferler sabah 06:00 ile gece 23:40 arasında çift hat üzerinde yapılmaktadır. Sabah 06:00- 09:00 ve akşam 16:00-19:00 saatleri arası en yoğun saatlerdir. 10 dakikalık sefer aralığı ile trenler çalışmaktadır. Sıvılaşma riskine karşı, batırma tüp tünel elemanları yerine yerleştirilmeden önce, tünel tabanının altında, boyu 4 - 10 metre arasında değişen basınçlı çimento enjeksiyonu kolonları imal edilmiştir. İstanbul'un iki yakası arasındaki seyahat süresi 4 dakikadır. İstasyonlar arası genel mesafe süresi ise 11 dakikadır. Marmaray tünel içerisinde LVT bloklar kullanılmıştır. 32 m genişlik ve 278 m boy uzunluğuna sahip Üsküdar istasyonunun cadde seviyesinden derinliği 23 metredir.

C40 yapısal betonların kullanıldığı Marmaray'da bu tarz betonlar dış ortam şartları ve kimyasal aşınmalara ve çatlak durumlarına karşı oldukça dayanıklı olduğu bilinmektedir. Çatlaksız beton özelliklerinden dolayı Radon gazı geçirmediği ölçüm sonuçları ile de desteklenmektedir. Marmaray'ın hem yapı malzemesi bakımından hem de su üstüne inşası dolayısıyla doğal radyasyon değerinin fazla beklenmesi fakat sonuçların düşük çıkma sebebi kuvvetli havalandırmalarıdır.

Marmaray istasyonlarının duvarları seramik kaplama, tüneller ve istasyon peron karşısı duvarlar beton üzeri yangına dayanıklı sıva kaplama ve peron zeminleri granit kaplamadır.

Yukarda özellikleri belirtilen istasyonların tamamında toplam 70 istasyona 310 adet LR-115 film yerleştirilmiştir.

### 3.4. ÖLÇÜM SÜRECİ

Gerekli yasal izinlerin alınması ve ölçüm yapılacak istasyonların belirlenmesinden sonra İstanbul Üniversitesi Nükleer Data Laboratuvarında LR-115 pasif nükleer kazıma filmleri 1.5x1.5 cm ebatlarında pamuklu eldiven yardımıyla kesilerek ve numaralandırılarak plastik bardakların zeminine yerleştirilmiştir. Filmlerin yanmaması için el ve çevre ile temas etmemesine, alfa parçacıklarına duyarlı yüzeylerin zarar görmemesine ve filmlerin gün ışığından, havadan yani ortamdaki etkilenmemesi için alüminyum folyo yardımı ile sarılmasına, ortam ile irtibatının kesilmesine dikkat edilmiştir. Aynı şekilde filmleri toplarken alüminyum folyo ile sarılarak hava ile teması kesilip laboratuvar ortamına kimyasal işlemler için getirilmiştir.

Tez çalışmaları kapsamında belirlenen istasyonlarda Radon seviyelerini belirlemek için hem aktif hem de pasif ölçüm teknikleri kullanılmıştır. İstanbul ili yer altı ulaşım ağında 70 istasyona 310 adet LR-115 pasif nükleer iz dedektörleri Şubat-Mart 2018 dönemini kapsayan 1 ay süre ile yerleştirilmiştir. Dedektörler yerleştirilirken zeminden 1.5 m yükseklikte konumlandırılmasına, havalandırma ve elektronik cihazların yakınına yerleştirilmemesine ve insanların dokunamayacağı şekilde yerleştirilmesine dikkat edilmiştir. 1 ay süre ile bekletilen LR-115 pasif dedektörleri yerleştirilirken konum bilgileri, sıcaklık-nem bilgileri istasyonların fiziksel özellikleri not edilmiştir. LR-115 filmleri toplanırken AlphaGUARD aktif ölçüm cihazı ile 10 dakikalık süre ile aynı noktalardan ölçüm alınmıştır. Aktif ölçüm cihazı anlık Radon miktarı, hata payı, basınç, sıcaklık ve nem değerlerini de vermektedir. LR-115 filmleri toplanırken aynı zamanda gama ölçer cihaz ile de değerler alınmıştır.

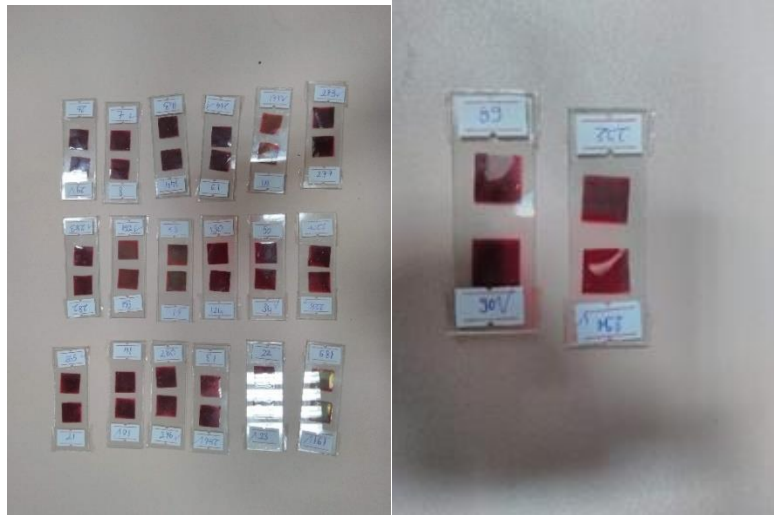
#### 3.4.1. Kimyasal Kazıma Süreci

LR-115 filmleri 1.5 cm x 1.5 cm ebatlarında kesilir. Çukur ve parlak yüzeyi dışa gelecek şekilde (alfa ışınlarına duyarlı kısmı) plastik bardakların tabanına yapıştırılır. Hazırlanan bardakların üzerine karışmamaları için numara verilir. Bardakların numaralandırma işlemi bittikten sonra alüminyum folyo ile sarılır ve ölçüm yapılacak alanlara götürülür. Dedektörler yerleştirilirken tarihe ve hangi noktaya hangi numaralı dedektör yerleştirildiğine dikkat edilir. Belirlenen süre sonrasında bardakların toplanma zamanı geldiğinde bardaklar tekrar alüminyum folyo ile

sarılarak analiz için laboratuvar ortamına getirilir. Ölçüm süreci tamamlanarak laboratuvar ortamına getirilen filmler yine numaralarına ve konumlarına dikkat edilerek Radon seviyelerini belirlemek için alfa izlerini belirginleştirmek amacıyla banyo işlemlerine tabii tutulurlar. %10'luk NaOH (Sodyum Hidroksit) çözeltisi hazırlanır. 100 ml'lik cam beherler içindeki çözelti banyo cihazının içine yerleştirilir (Şekil 3.20). Yaklaşık 60°C de filmler çözelti içinde banyo cihazının içerisine yerleştirilir. Yaklaşık 95 dakika banyo işlemine tabii tutulan filmler saf su içerisinde manyetik karıştırıcılar yardımı ile durulanır. Durulanan filmler kurutucu fırında kuruyana kadar yaklaşık 40 dakika ısıya tabii tutulurlar. Kurutucudan çıkan filmler sıra numaraları göz önünde bulundurularak lamlara dizilirler. Lam üzerindeki filmler mikroskop yardımı ile belirginleştirilir ve sayılır (Şekil 3.21).



Şekil 3.20: LR-115 filmlerinin NaOH çözeltisi içinde banyo süreci.



Şekil 3.21: Banyo analiz süreçleri tamamlanan filmlerin mikroskop yardımıyla okunmadan önce lamlara yerleştirilmiş halleri.



Kimyasal kazıma ve filmlerin mikroskop yardımıyla okunması işleminden sonra iz sayımları elde edilmiştir. Laboratuvar ortamında 138 iz olarak background değerleri belirlenmiştir. Her bir film için sayım izinden background değerleri çıkarılarak net iz sayıları hesaplanmıştır. Nükleer kazıma dedektörlerinde tam sayımın belirlenmesi için background sayımlarının iz sayımından çıkarılarak net iz sayımlarının bulunması gerekmektedir. Background değerleri için banyo işlemlerinin gerçekleştirildiği aynı ortamda aynı koşullarda filmler bekletilmiştir. Background filmlerinin aritmetik ortalaması alınarak background değeri 138 Bq/m<sup>3</sup> bulunmuştur.

Birim alan başına iz sayısı (iz/cm<sup>2</sup>) ve kalibrasyon faktörü kullanılarak istasyonlarda depolanan Radon miktarı Bq/m<sup>3</sup> cinsinden hesaplanmıştır. Kalibrasyon faktörü 2.33(iz.m<sup>3</sup>)/(kBq.saate.cm<sup>2</sup>)] olarak hesaplanmıştır.

### 3.4.2. Etkin Doz Hesabı

Radyasyon dozu; hedef kütle tarafından, belli bir sürede soğurulan veya alınan radyasyon enerjisi miktarıdır. Radyasyon dozunun hedef kütlede meydana getireceği etki, radyasyonun çeşidine, doz hızına ve bu doza maruz kalış süresine bağlıdır. Etkin doz ise radyasyonun türüne ve enerjisine bağlı olarak farklı doku veya organın maruz kaldığı doz miktarlarının toplamıdır. Yıllık etkin doz değerlerini belirlemek için ortam Radon konsantrasyonları belirlenir. Denklem 3.1 ile ortamdaki net iz sayısının kalibrasyon faktörüne ve ortamda bulunma süresine bölümü ile Radon konsantrasyonu bulunur.

$$C_{RN} = \frac{X_{ORTAM}}{K_F} \quad (3.1)$$

$X_{ORTAM}$ =Ortamdaki Radon miktarının bir saatte cm<sup>2</sup> başına oluşturduğu net iz sayısıdır. [iz/(cm<sup>2</sup>.saat)]

$C_{RN}$  = Ortamdaki Radon konsantrasyonu (kBq/m<sup>3</sup> )

$K_F$ = Kalibrasyon Faktörü [( iz . m<sup>3</sup> ) / ( kBq . saat . cm<sup>2</sup> )].

Yapılan çalışmada pasif ölçüm tekniği olan nükleer iz kazıma dedektörlerinin kalibrasyon işlemi, Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi'nin Sağlık Fiziği Bölümü'nde 3,2 kBq/m<sup>3</sup> konsantrasyona sahip olan Radon kalibrasyon odasında yapılmıştır.

$$K_F = \frac{X}{S \cdot h \cdot C_{RO}} \quad (3.2)$$

$K_F$  : Kalibrasyon faktörü

$X$  : Radon odasına yerleştirilen dedektörlerin üzerinde bulunan net iz sayısı ( iz )

$S$  : LR – 115 film dedektörünün alanı ( 2,25 cm<sup>2</sup> )

$h$  : Radon odasında radona maruz kalma süresi ( saat )

$C_{RO}$  : ÇNAEM Radon odası konsantrasyon miktarı ( 3,2 kBq / m<sup>3</sup> )

Bu çalışma kapsamında Kalibrasyon Faktörü  $[2.33(iz.m^3)/(kBq.saatt.cm^2)]$  olarak hesaplanmıştır [76].

Denklem 3.1 ile istasyonlardaki Radon konsantrasyonları belirlenmiştir. Yolcular ve çalışanlar için yıllık etkin doz değerlerinin belirlenmesi için Denklem 3.3 kullanılmıştır [48].

$$\text{Yıllık Etkin Doz Değeri} = C_{RN} \times E \times D \times T \quad [4]. \quad (3.3)$$

$E$  = Denge Faktörü (kapalı ortamlar için 0.4 tür) [25].

$D$  = Doz dönüşüm faktörü  $[9 \times 10^{-6} \text{ mSv (Bq.m}^{-3} \cdot \text{h)}^{-1}]$ .

$T$  = Ortamda geçirilen süre [saat/yıl].

UNSCEAR 1993 raporunda, kapalı ortamlar için denge faktörü 0.4, dış hava için yerden 1 m yükseklikte 0.8 olarak verilmektedir.

Çalışma kapsamında yer altı istasyonlarında çalışan ve yolcuların Radon kaynaklı maruz kaldıkları yıllık etkin doz değerlerinin belirlenmesi için istasyon peronlarında geçirdikleri süre çalışanlar için günde 8 saat olmak üzere yılda 2000 saat, yolcular için günde ortalama 1 saatlerini istasyonlarda geçirdikleri varsayılarak yılda 250 saat olarak düşünülmüştür.

## 4. BULGULAR

### 4.1.METRO VE MARMARAY İSTASYONLARI RADON KONSANTRASYONLARI

Bu bölümde çalışma kapsamında 6 metro hattı ile 1 Marmaray hattı olmak üzere toplam 70 istasyon üzerinde elde edilen veriler tablolandırılmıştır. İlk kısımlarda istasyon verileri bağlı oldukları hatlar üzerinde ve daha sonra tüm hatlar bir arada listelenmiştir.

Sırası ile metro hatlarındaki sonuç değerleri tabloları aşağıda verilmiştir. Her hattın her yer altı istasyonunda istasyon amirleri odası olarak nitelendirdiğimiz çalışma ofisleri, bilet geçiş turnikeleri ve tren bekleme platformu olan peronlarda yapılan ölçümler ve peron derinlikleri tablolarda listelenmiştir ve her bir değerde sırası ile Radon değeri, sıcaklık değeri, nem değeri ve basınç değerleri yer almaktadır. Pasif LR-115 dedektör sonuçları da ayrı olarak tablolandırılmıştır.

#### 4.1.1. M1a Hattı Ölçüm Sonuçları

M1a hattına ait 10 dakikalık AlphaGUARD aktif yöntem ölçüm sonuçları Tablo 4.1 de sunulmuştur. AlphaGUARD tekniği ile yapılan Radon tespiti ölçüm sonuçlarının yanı sıra sıcaklık, nem ve basınç değerleride aynı tabloda yer almaktadır. Tren bekleme alanı olan peronların bir başka deyişle platformların derinlikleri de aynı tabloda verilmiştir.

**Tablo 4.1:** M1a istasyonları Radon konsantrasyonları, AlphaGUARD ölçümü.

<b>M1a Hattı İstasyonları Radon Konsantrasyonları, AlphaGUARD Ölçümü</b>			
İstasyon adı	Ölçüm Yeri	AlphaGUARD Sonuçları (Radon, sıcaklık, nem, basınç)	Peron Derinlik (m)
Yenikapı	Ofis	9±5 Bq/m <sup>3</sup> , 20°C 56% 1018mbar	20,08
	Turnike	7±4 Bq/m <sup>3</sup> , 18°C 62% 1018mbar	
	Peron	9±5 Bq/m <sup>3</sup> , 19°C 65% 1017mbar	
	Ofis	14±6 Bq/m <sup>3</sup> , 18°C 59% 1014mbar	
	Turnike	Cadde seviyesindedir.	

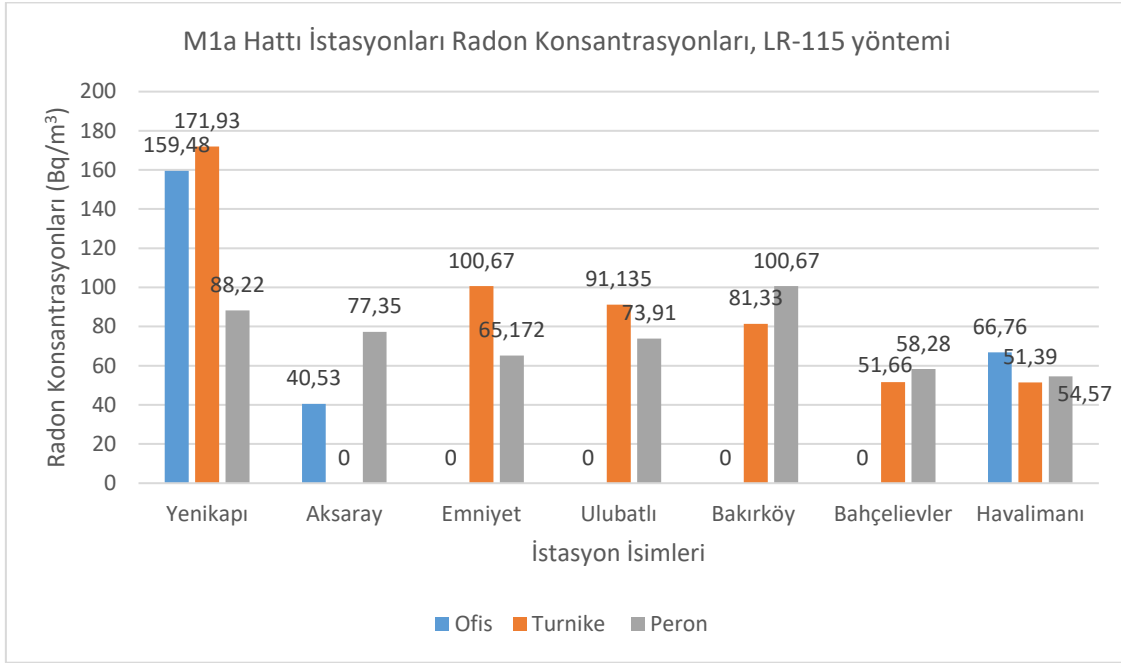
Aksaray	Peron	14±5 Bq/m <sup>3</sup> , 18°C 65% 1015mbar	17
Emniyet/Fatih	Ofis	Ofis bulunmamaktadır.	11
	Turnike	9±5 Bq/m <sup>3</sup> , 18°C 57% 1014mbar	
	Peron	4±3 Bq/m <sup>3</sup> , 18°C 67% 1014mbar	
Ulubatlı/Topkapı	Ofis	Ofis bulunmamaktadır.	11
	Turnike	9±5 Bq/m <sup>3</sup> , 17°C 68% 1014mbar	
	Peron	9±5 Bq/m <sup>3</sup> , 18°C 67% 1014mbar	
Bakırköy /İncirli	Ofis	Ofis bulunmamaktadır.	18
	Turnike	9±5 Bq/m <sup>3</sup> , 17°C 62% 1010mbar	
	Peron	7±4 Bq/m <sup>3</sup> , 16°C 64% 1011mbar	
Bahçelievler	Ofis	Ofis bulunmamaktadır	16
	Turnike	21±8 Bq/m <sup>3</sup> , 19°C 52% 1011mbar	
	Peron	11±5 Bq/m <sup>3</sup> , 17°C 56% 1012mbar	
Atatürk Havalimanı	Ofis	9±5 Bq/m <sup>3</sup> , 20°C 62% 1011mbar	10
	Turnike	9±5 Bq/m <sup>3</sup> , 18°C 52% 1012mbar	
	Peron	19±7 Bq/m <sup>3</sup> , 19°C 57% 1012mbar	

M1a hattına ait LR-115 yöntemi ile 30 gün süresince elde edilen Radon konsantrasyon verileri Tablo 4.2’de gösterilmiştir. Bu tabloda Emniyet, Ulubatlı, Bakırköy ve Bahçelievler istasyonlarında çalışma ofisleri bulunmadığından ölçüm yapılamamıştır. Aksaray istasyonu turnike bölgesi ise cadde seviyesinde bulunmaktadır. M1a hattı Radon ortalamaları ise ofisler için 88.92 Bq/m<sup>3</sup>, turnikeler için 91.35 Bq/m<sup>3</sup> ve peronlar için 74.00 Bq/m<sup>3</sup> bulunmuştur.

**Tablo 4.2:** M1a hattı istasyonları Radon konsantrasyonları, LR-115 yöntemi.

M1a hattı istasyon Radon konsantrasyonları, LR-115 yöntemi (Bq/m <sup>3</sup> )				
İstasyon adı	Ofis (Bq/m <sup>3</sup> )	Turnike (Bq/m <sup>3</sup> )	Peron (Bq/m <sup>3</sup> )	Peron Derinlik(m)
Yenikapı	159.48±7.85	171.93±8.05	88.22±6.53	20
Aksaray	40.53±5.48	-	77.35±6.31	17
Emniyet	-	100.67±6.59	65.17±6.65	11
Ulubatlı	-	91.13±6.59	73.91±6.24	11
Bakırköy	-	81.33±6.39	100.67±6.78	18
Bahçelievler	-	51.66±5.74	58.28±5.90	16
Havalimanı	66.7±6.68	51.39±5.74	54.57±5.81	10
Ortalama	88.92	91.35	74.00	

LR-115 sonuçlarına göre Yenikapı istasyonu peronu cadde seviyesine göre diğer istasyonlara nazaran daha derinde yer almasına rağmen istasyon yüzey alanı geniş olduğundan Radon değeri daha düşük bulunmuştur. Turnike ve ofis bölgeleri kıyaslanıldığında ise en derin olan istasyonda diğer istasyonlara kıyasla biraz daha fazla değerler çıkmıştır. TAEK limit değeri kapalı ortamlarda ve iş yerlerinde 1000 Bq/m<sup>3</sup> değeri ile kıyaslanacak olursa M1a hattındaki tüm değerler sınır değerlerin altındadır. M1a hattı LR-115 tekniği Radon değerleri grafiği Şekil 4.1'de verilmiştir. Yapısal olarak benzer özellik gösteren Aksaray, Emniyet ve Ulubatlı istasyonlarında benzer değerler bulunmuştur. Peron bekleme platformlarındaki yürüme mesafeleri kısadır. Genellikle yan peron şeklinde istasyonlara sahip hatta havalandırma tren sirkülasyonu ile sağlanmaktadır. Bakırköy istasyonu fay hattı üzerinde ve alüvyon yapıda üzerine inşa edilmiştir ve yapım yılı itibariyle (1999) daha fazla miktarda Radon birikmiştir.



**Şekil 4.1:** M1a hattı istasyonları Radon konsantrasyonları grafiği.

M1a hattı yıllık etkin doz değerleri ise Tablo 4.3'te paylaşılmıştır. Ofislerde sadece günde 8 saat üzerinden çalışan görevliler için, turnikelerde yine günde 8 saat çalışan görevliler için ve peronlarda hem çalışanlar hem de yolcular için yıllık etkin doz değerleri hesaplanmıştır. ICRP değerlerine göre yıllık etkin doz değer limiti 10 mSv/yıl olarak sınırlandırılmıştır. Bu kapsamda istasyonlardaki Radon değerleri ve yıllık etkin doz değerleri limit değerlerin altındadır.

**Tablo 4.3:** M1a hattı yıllık etkin doz eşdeğerleri.

<b>M1a hattı yıllık etkin doz değerleri (mSv/yıl)</b>			
İstasyon adı	Ofis	Turnike	Peron
	Çalışan	Çalışan	Çalışan/ Yolcu
Yenikapı	1.14	1.23	0.63 / 0.079
Aksaray	0.29	Cadde seviyesindedir.	0.55 / 0.069
Emniyet	Ofis bulunmamaktadır	0.72	0.46 / 0.058
Ulubatlı	Ofis bulunmamaktadır	0.65	0.53 / 0.066
Bakırköy	Ofis bulunmamaktadır	0.58	0.72 / 0.09
Bahçelievler	Ofis bulunmamaktadır	0.37	0.41 / 0.052
Havalimanı	0.48	0.37	0.39 / 0.049

#### 4.1.2. M1b Hattı Ölçüm Sonuçları

M1b hattına ait dört yer altı istasyonun AlphaGUARD ölçüm sonuçları Tablo 4.4'te verilmiştir. İstasyonların sıcaklık değerlerinin 18-21°C arasında değiştiği görülmektedir. Nem ve basınç değerleri de birbirlerine yakın değerler çıkmıştır.

**Tablo 4.4:** M1a hattı istasyonları Radon konsantrasyonları, AlphaGUARD ölçümü.

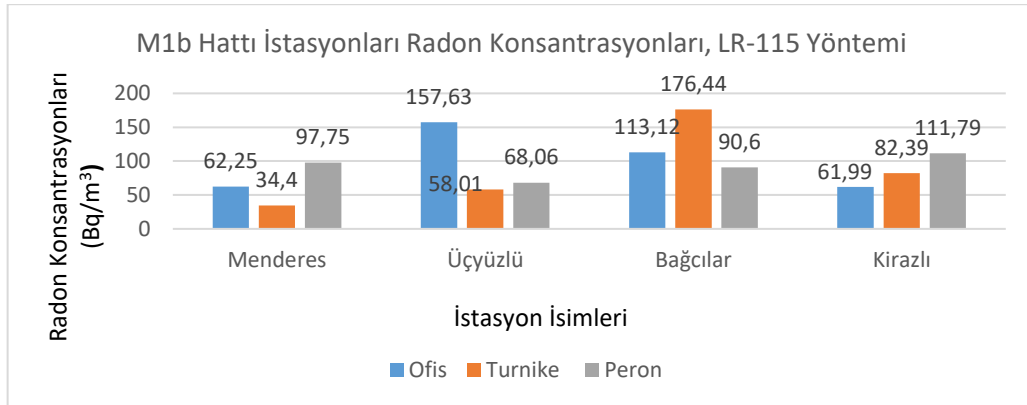
M1a hattı istasyonları Radon konsantrasyonları, AlphaGUARD ölçümü			
İstasyon adı	Ölçüm Yeri	AlphaGUARD Sonuçları (Radon, sıcaklık, nem ,basınç)	Peron Derinlik (m)
Menderes	Ofis	9±5Bq/m <sup>3</sup> , 19°C 55% 1009mbar	25
	Turnike	11±5 Bq/m <sup>3</sup> , 21°C 48% 1009mbar	
	Peron	7±4 Bq/m <sup>3</sup> , 19°C 50% 1011mbar	
Üçyüzlü	Ofis	4±3 Bq/m <sup>3</sup> , 19°C 59% 1012mbar	12
	Turnike	19±7 Bq/m <sup>3</sup> , 17°C 54% 1012mbar	
	Peron	7±4 Bq/m <sup>3</sup> ,18°C 50% 1013mbar	
Bağcılar Meydanı	Ofis	27±9 Bq/m <sup>3</sup> ,20°C 59% 1011mbar	50
	Turnike	11±5 Bq/m <sup>3</sup> , 19°C 56% 1011mbar	
	Peron	9±5 Bq/m <sup>3</sup> , 18°C 61% 1012mbar	
Kirazlı	Ofis	14±6 Bq/m <sup>3</sup> , 20°C 57% 1014mbar	26
	Turnike	16±7 Bq/m <sup>3</sup> , 19°C 54% 1013mbar	
	Peron	18±7 Bq/m <sup>3</sup> , 19°C 56% 1015mbar	

LR-115 yöntemi ile elde edilen Radon verileri ise Tablo 4.5'te gösterilmiştir.

**Tablo 4.5:** M1b hattı istasyonları Radon konsantrasyonları, LR-115 yöntemi.

M1b hattı istasyonları Radon konsantrasyonları, LR-115 yöntemi (Bq/m <sup>3</sup> )				
İstasyon adı	Ofis (Bq/m <sup>3</sup> )	Turnike (Bq/m <sup>3</sup> )	Peron (Bq/m <sup>3</sup> )	Peron Derinlik(m)
Menderes	62.25±5.98	34.4±5.33	97.75±6.72	25
Üçyüzlü	157.63±7.81	58.01±5.89	68.06±6.11	12
Bağcılar	113.12±7.02	176.44±8.13	90.6±6.58	50
Kirazlı	61.99±5.99	82.39±6.41	111.79±6.99	26
Ortalama	98.74	87.81	92.00	

Genellikle istasyonlarda ofisler kapalı ortamlar olduğu için ve doğal havalandırmaya sahip olmadıklarından Radon miktarları bu mekanlarda daha fazla çıkmaktadır. Peronlarda ise derinliğin yanı sıra doğal havalandırma piston etkisi tren sirkülasyonu ile sağlanan hava akışı Radon gazı birikmesine engel olmaktadır. Turnikelerde ise turnike bölgesinde hava akışı ve yolcu yoğunluğu ile cadde seviyesinden olan derinlik, Radon miktarlarına etki eden parametrelerdir. Tablo 4.5'ten görüldüğü gibi 50 m derinliğe sahip Bağcılar istasyonunda turnikelerin bulunduğu bölgelerin derinliği göz önünde bulundurulursa Radon miktarı bu ölçüm noktasında daha fazla çıkmıştır. M1b hattının Radon ölçüm ortalamaları ise şu şekildedir; Ofislerde 98.74 Bq/m<sup>3</sup>, turnike bölgelerinde 87.81 Bq/m<sup>3</sup> ve peronlarda 92 Bq/m<sup>3</sup> tür. M1b hattı Radon seviyelerinin görsel grafiği ise Şekil 4.2'de sunulmuştur.

**Şekil 4.2:** M1b hattı istasyonları Radon konsantrasyonları grafiği.



Çalışanlar ve yolcular için hesaplanan yıllık etkin eşdeğer doz değerleri ise Tablo 4.6'da paylaşılmıştır.

**Tablo 4.6:** M1b hattı yıllık etkin doz değerleri (mSv/yıl).

<b>M1b hattı yıllık etkin doz değerleri (mSv/yıl)</b>			
İstasyon adı	Ofis	Turnike	Peron
	Çalışan	Çalışan	Çalışan/ Yolcu
Menderes	0.44	0.24	0.70 / 0.08
Üçyüzlü	1.13	0.41	0.49 / 0.06
Bağcılar	0.81	1.27	0.65 / 0.08
Kirazlı	0.44	0.59	0.80 / 0.10

Bu hattaki istasyonlarda hesaplanan Radon ve yıllık etkin doz değerleri limit değerlerin altında olup sağlık riski oluşturmamaktadır.

#### 4.1.3. M2 Hattı Ölçüm Sonuçları

M2 hattı hem istasyon sayısı hem de istasyonların varış noktaları ile metro ağında geniş bir kullanıma sahiptir. Tablo 4.7'den aktif ölçüm sonuçları görülmektedir.

**Tablo 4.7:** M2 hattı istasyonları Radon konsantrasyonları, AlphaGUARD ölçümü.

<b>M2 hattı istasyonları Radon konsantrasyonları, AlphaGUARD ölçümü</b>			
İstasyon adı	Ölçüm Yeri	AlphaGUARD Sonuçları (Radon, sıcaklık, nem, basınç)	Peron Derinlik (m)
Yenikapı	Ofis	9±5 Bq/m <sup>3</sup> , 20°C 56% 1018mbar	20.98
	Turnike	7±4 Bq/m <sup>3</sup> , 18°C 62% 1018mbar	
	Peron	9±5 Bq/m <sup>3</sup> , 18°C 70% 1020mbar	
Vezneciler	Ofis	6±5 Bq/m <sup>3</sup> , 23°C 55% 1016mbar	43.53
	Turnike	14±6 Bq/m <sup>3</sup> , 20°C 62% 1016mbar	
	Peron	4±3 Bq/m <sup>3</sup> , 19°C 66% 1017mbar	
	Ofis	7±4 Bq/m <sup>3</sup> , 21°C 68% 1014mbar	

Şişhane	Turnike	11±5 Bq/m <sup>3</sup> , 20°C 67% 1019mbar	33.53
	Peron	11±5 Bq/m <sup>3</sup> , 18°C 60% 1016mbar	
Taksim	Ofis	9±5 Bq/m <sup>3</sup> , 21°C 59% 1009mbar	25.71
	Turnike	14±6 Bq/m <sup>3</sup> , 19°C 61% 1010mbar	
	Peron	9±5 Bq/m <sup>3</sup> , 19°C 69% 1012mbar	
Osmanbey	Ofis	11±5 Bq/m <sup>3</sup> , 22°C 76% 1007mbar	-
	Turnike	14±6 Bq/m <sup>3</sup> , 22°C 74% 1007mbar	
	Peron	19±7 Bq/m <sup>3</sup> , 22°C 77% 995mbar	
Şişli/Mecidiyeköy	Ofis	11±5 Bq/m <sup>3</sup> , 23°C 64% 1006mbar	29.4
	Turnike	4±3 Bq/m <sup>3</sup> , 22°C 67% 1006 mbar	
	Peron	14±6 Bq/m <sup>3</sup> , 21°C 70% 1008mbar	
Gayrettepe	Ofis	4±3 Bq/m <sup>3</sup> , 22°C 63% 1007mbar	26.4
	Turnike	11±5 Bq/m <sup>3</sup> , 21°C 55% 1007mbar	
	Peron	11±5 Bq/m <sup>3</sup> , 21°C 67% 1007mbar	
Levent	Ofis	7±4 Bq/m <sup>3</sup> , 22°C 67% 1004mbar	25.12
	Turnike	14±6 Bq/m <sup>3</sup> , 22°C 65% 1004mbar	
	Peron	7±4 Bq/m <sup>3</sup> , 21°C 67% 1005mbar	
4.Levent	Ofis	9±5 Bq/m <sup>3</sup> , 23°C 63% 1003mbar	17.87
	Turnike	11±5 Bq/m <sup>3</sup> , 21°C 62% 1003mbar	
	Peron	14±6 Bq/m <sup>3</sup> , 20°C 69% 1004mbar	
Sanayı Mah	Ofis	9±5 Bq/m <sup>3</sup> , 21°C 58% 1004mbar	28.02
	Turnike	7±4 Bq/m <sup>3</sup> , 21°C 54% 1004mbar	
	Peron	11±5 Bq/m <sup>3</sup> , 20°C 71% 1006mbar	

ITÜ Ayazağa	Ofis	11±5 Bq/m <sup>3</sup> , 21°C 70% 1005mbar	31.42
	Turnike	11±5 Bq/m <sup>3</sup> , 19°C 70% 1004mbar	
	Peron	11±5 Bq/m <sup>3</sup> , 20°C 70% 1006mbar	
A.Oto Sanayi	Ofis	19±7 Bq/m <sup>3</sup> , 21°C 67% 1003mbar	25.79
	Turnike	9±5 Bq/m <sup>3</sup> , 20°C 67% 1003mbar	
	Peron	11±5 Bq/m <sup>3</sup> , 19°C 70% 1004mbar	
Darüşşafaka	Ofis	7±4 Bq/m <sup>3</sup> , 20°C 70% 1004mbar	25.58
	Turnike	7±4 Bq/m <sup>3</sup> , 19°C 68% 1004mbar	
	Peron	14±6 Bq/m <sup>3</sup> , 18°C 76% 1007mbar	
Haciosman	Ofis	14±6 Bq/m <sup>3</sup> , 19°C 62% 1006mbar	40.49
	Turnike	16±7 Bq/m <sup>3</sup> , 19°C 63% 1006mbar	
	Peron	9±5 Bq/m <sup>3</sup> , 19°C 64% 1009mbar	

Tablo 4.8 den ise M2 hattı LR-115 yöntemi ile elde edilen Radon konsantrasyonları görülmektedir. M2 hattı yolcu yoğunluğu fazla olan, istasyon peron bekleme platformlarındaki yürüme mesafesinin fazla olduğu, yan peron şeklindeki peronlardan oluşmaktadır. Hat boyunca tüm istasyonların derinlikleri birbirine yakın sayısal veriler olup Radon değerleri de hem aynı istasyonda hem de hattaki diğer istasyonlarda benzer değerler bulunmuştur.

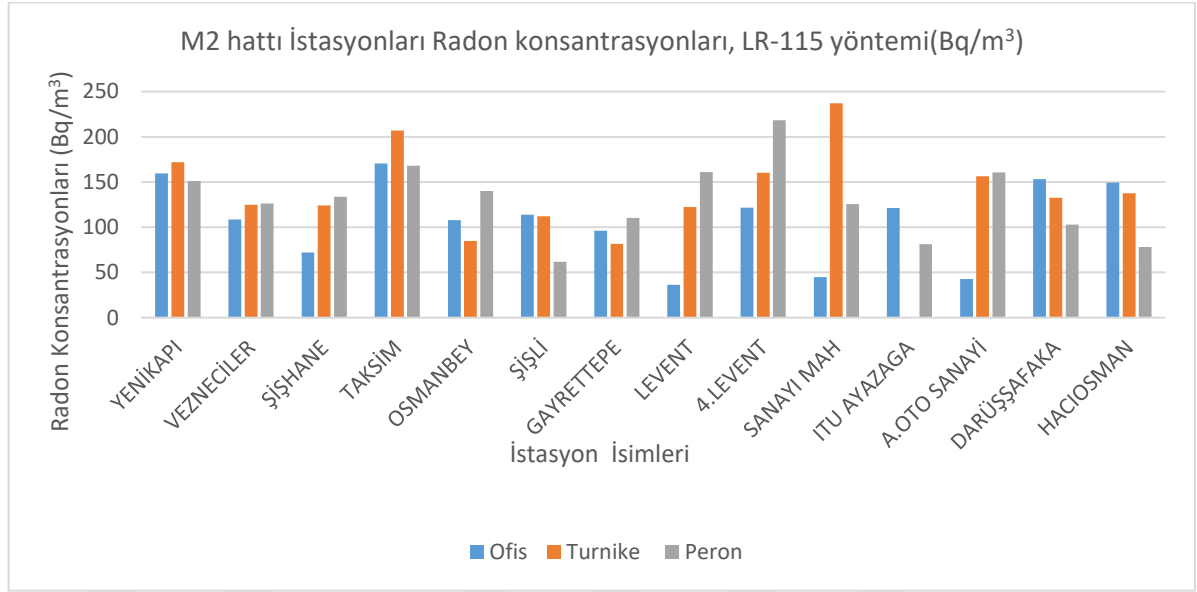
**Tablo 4.8:** M2 hattı istasyonları Radon konsantrasyonları, LR-115 yöntemi.

M2 hattı istasyonları Radon konsantrasyonları, LR-115 yöntemi, (Bq/m <sup>3</sup> )				
İstasyon adı	Ofis (Bq/m <sup>3</sup> )	Turnike (Bq/m <sup>3</sup> )	Peron (Bq/m <sup>3</sup> )	Peron Derinlik(m)
Yenikapı	159.48±7.85	171.93±8.05	151.00±7.70	20.98
Vezneciler	108.62±6.93	124.78±7.24	126.37±7.26	43.53
Şişhane	72.06±6.20	124.25±7.23	133.78±7.40	33.53

Taksim	170.3±8.03	206.9±8.61	167.96±7.99	25.71
Osanbey	107.82±6.92	84.77±6.46	140.14±7.51	-
Şişli/Mecidiyeköy	113.91±7.03	112.06±7.00	61.99±5.98	29.4
Gayrettepe	96.16±6.69	81.59±6.40	110.47±6.97	26.4
Levent	36.29±5.38	122.39±7.19	161.07±7.87	25.12
4.Levent	121.6±7.18	160.28±7.86	218.3±8.78	17.87
Sanayi Mah	44.77±5.58	237.11±9.06	125.57±7.25	28.02
ITU Ayazaga	121.33±7.17	kayıp	81.33±6.39	31.42
A.Oto Sanayi	42.65±5.53	156.3±7.79	160.54±7.86	25.79
Darüşşafaka	153.12±7.74	132.46±7.38	103.05±6.83	25.58
Hacıosman	149.15±7.67	137.76±7.47	78.15±6.33	40.49
Ortalama	154.31	154.84	114.57	

Ofisler ve turnikeler için bu hat üzerindeki Taksim istasyonunda çalışma kapsamındaki en yüksek değerlerin bulunması bu hattaki en havasız ve yolcu yoğunluğunun en fazla olduğu ve istasyon içi mesafede yürüme mesafesinin en fazla olduğu içerdeki havanın akışının sağlanacağı bir ortam olamayışına bağlanabilir. İstasyonlarda genellikle seramik/fayans ve bekleme platformlarındaki tren geçiş yollarında beton yapılar kullanılmıştır. İstasyonların nem oranları ve tren geçiş yollarındaki su sızıntıları da Radon miktarlarına etki etmektedir. M2 hattında Taksim istasyonu peron katı duvar yapısı panel diye adlandırılan metal sacdan yapılmıştır. Darüşşafaka ve Hacıosman İstasyonları peronları duvar malzemesi sinterfleks malzemedir.

Şekil 4.3'ten M2 hattı istasyonlarındaki Radon konsantrasyonlarının grafiksel görünümüne ulaşılabilir.



**Şekil 4.3:** M2 hattı istasyonları Radon konsantrasyon grafiği.

M2 hattında ofisler arasında en fazla değer Taksim İstasyonunda, turnike bölgeleri arasında en fazla değer Sanayi Mahallesi İstasyonunda ve peronlardaki en fazla değer ise Levent istasyonunda bulunmuştur.

Yıllık etkin doz değerlerinin tablolandırılmış hali ise Tablo 4.9 da sunulmuştur. M2 hattındaki yıllık etkin doz değerleri uluslararası standartlara göre belirlenen limitlerin altındadır.

M2 hattı istasyonlarına ait çalışanlar ve yolcular için tespit edilen Radon kaynaklı yıllık etkin doz değerleri Tablo 4.9'da görülmektedir.

**Tablo 4.9:** M2 hattı yıllık etkin doz değerleri (mSv/yıl).

M2 hattı yıllık etkin doz değerleri (mSv/yıl)			
İstasyon adı	Ofis	Turnike	Peron
	Çalışan	Çalışan	Çalışan/ Yolcu
Yenikapı	1.14	1.23	1.08 / 0.11
Vezneciler	0.78	0.89	0.90 / 0.11
Şişhane	0.51	0.89	0.96 / 0.12
Taksim	1.22	1.48	1.20 / 0.15
Osmanbey	0.72	0.61	1 / 0.12
Şişli	0.82	0.80	0.44 / 0.05
Gayrettepe	0.69	0.58	0.79 / 0.09
Levent	0.26	0.88	1.15 / 0.14
4.Levent	0.87	1.15	1.57 / 0.19
Sanayi Mah	0.32	1.70	0.90 / 0.11

Itu Ayazaga	0.87	-	0.58/ 0.07
A.Oto Sanayi	0.30	1.12	1.15 / 0.14
Darüşşafaka	1.10	0.95	0.74 / 0.09
Hacıosman	1.07	0.99	0.56 / 0.07

#### 4.1.4. M3 Hattı Ölçüm Sonuçları

M3 hattına ait Radon verileri aşağıda sunulmuştur. 11 istasyondan oluşan M3 hattı turnike bölgeleri çok rüzgarlı ve soğuktur. Turnike bölgeleri ise yüzey alanı bakımından geniştir. Tablo 4.10'da M3 hattına ait aktif ölçüm tekniği kullanılarak elde edilen sonuçlar verilmiştir. M3 hattı yapısı itibarıyla geniş fakat soğuk, peron seviyesine daha yakın turnike bölgesi alanlarına sahiptir. Bu hattaki istasyonların hepsi yapı bakımından birbirine benzemektedir. Metro ağında turnike bölgeleri genellikle çalışma ofisleri ile aynı katta yer almaktadır.

**Tablo 4.10:** M3 hattı istasyonları Radon konsantrasyonları, AlphaGUARD ölçümü.

M3 hattı istasyonları Radon konsantrasyonları, AlphaGUARD ölçümü			
İstasyon adı	Ölçüm Yeri	AlphaGUARD Sonuçları (Radon, sıcaklık, nem, basınç)	Peron Derinlik (m)
Metrokent(Başakşehir)	Ofis	9±5 Bq/m <sup>3</sup> , 19°C 55% 995 mbar	34.87
	Turnike	14±5 Bq/m <sup>3</sup> , 17°C 57% 1001mbar	
	Peron	14±6 Bq/m <sup>3</sup> , 20°C 61% 993mbar	
Başak Konutları	Ofis	14±6 Bq/m <sup>3</sup> , 20°C 61% 993mbar	20.5
	Turnike	7±4 Bq/m <sup>3</sup> , 17°C 59% 993mbar	
	Peron	9±5 Bq/m <sup>3</sup> , 18°C 62% 994mbar	
Siteler	Ofis	11±5 Bq/m <sup>3</sup> , 20°C 57% 996mbar	22.8
	Turnike	14±6 Bq/m <sup>3</sup> , 17°C 56% 996mbar	
	Peron	9±5 Bq/m <sup>3</sup> , 18°C 64% 997mbar	
Turgut Özal	Ofis	7±4 Bq/m <sup>3</sup> , 19°C 61% 996mbar	
	Turnike	9±5 Bq/m <sup>3</sup> , 17°C 62% 995mbar	

	Peron	17±7 Bq/m <sup>3</sup> , 17°C 67% 997mbar	20.71
İkitelli	Ofis	11±5 Bq/m <sup>3</sup> , 17°C 57% 1000mbar	21.97
	Turnike	4±3 Bq/m <sup>3</sup> , 15°C 58% 1000mbar	
	Peron	9±5 Bq/m <sup>3</sup> , 16°C 64% 1001mbar	
Olimpiyat	Ofis	18±7 Bq/m <sup>3</sup> , 24°C 46% 999mbar	16.49
	Turnike	Turnike bulunmamaktadır.	
	Peron	4±3 Bq/m <sup>3</sup> , 20°C 45% 1001mbar	
Ziya Gökalp Mh	Ofis	9±5 Bq/m <sup>3</sup> , 21°C 50% 998mbar	33.28
	Turnike	7±4 Bq/m <sup>3</sup> , 19°C 49% 997mbar	
	Peron	21±8 Bq/m <sup>3</sup> , 17°C 59% 1001mbar	
İstoç	Ofis	7±4 Bq/m <sup>3</sup> , 20°C 59% 999mbar	25.14
	Turnike	7±4 Bq/m <sup>3</sup> , 18°C 55% 999mbar	
	Peron	11±5 Bq/m <sup>3</sup> , 17°C 65% 1000mbar	
Mahmutbey	Ofis	4±3 Bq/m <sup>3</sup> , 19°C 62% 995 mbar	29.5
	Turnike	19±7 Bq/m <sup>3</sup> , 18°C 60% 995mbar	
	Peron	9±5 Bq/m <sup>3</sup> , 17°C 63% 1006mbar	
Yenimahalle	Ofis	19±7 Bq/m <sup>3</sup> , 21°C 58% 1000mbar	35.28
	Turnike	4±3 Bq/m <sup>3</sup> , 19°C 55% 1000mbar	
	Peron	11±5 Bq/m <sup>3</sup> , 17°C 56% 1002mbar	
Kirazlı	Ofis	14±6 Bq/m <sup>3</sup> , 20°C 57% 1014mbar	17
	Turnike	9±5 Bq/m <sup>3</sup> , 17°C 58% 1003mbar	
	Peron	16±7 Bq/m <sup>3</sup> , 15°C 63% 1004mbar	

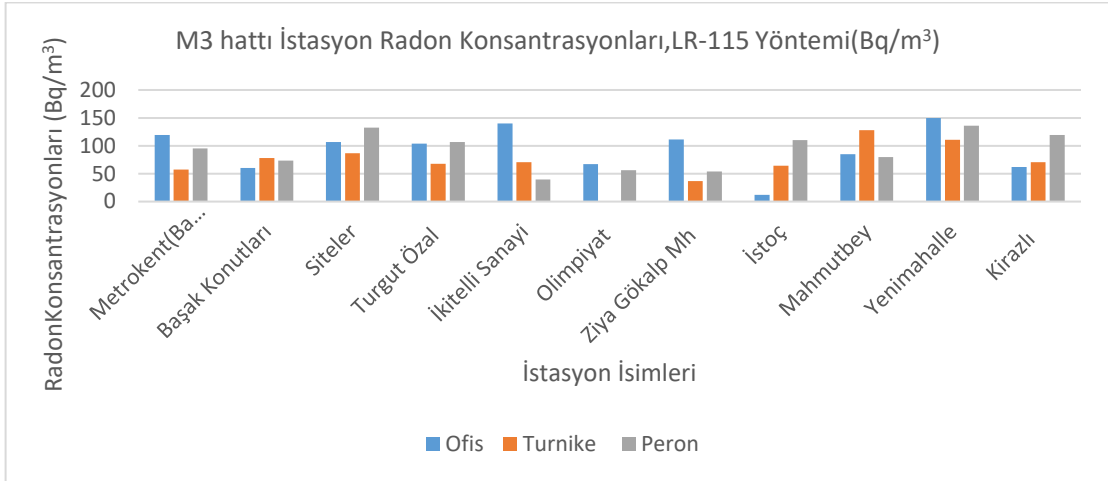
M3 hattına ait pasif LR-115 yöntemi ile alınan verilere göre Radon konsantrasyonları Tablo 4.11’de verilmiştir.

**Tablo 4.11:** M3 hattı istasyonları Radon konsantrasyonları, LR-115 yöntemi.

<b>M3 hattı istasyonları Radon konsantrasyonları, LR-115 yöntemi, (Bq/m<sup>3</sup>)</b>				
İstasyon adı	Ofis(Bq/m <sup>3</sup> )	Turnike(Bq/m <sup>3</sup> )	Peron(Bq/m <sup>3</sup> )	Peron Derinlik(m)
Metrokent(Başakşehir)	119.48±7.14	57.22±5.87	95.37±6.68	34.87
Başak Konutları	60.13±5.94	77.88±6.32	73.65±6.32	20.5
Siteler	106.76±6.90	86.36±6.50	132.72±7.38	22.8
Turgut Özal	103.58±6.84	67.82±6.11	106.50±6.89	20.71
İkitelli Sanayi	140.14±7.51	70.73±6.17	39.47±5.46	21.97
Olimpiyat	67.02±6.09	Turnike bulunmamaktadır.	56.42±5.85	16.49
Ziya Gökalp Mh	111.127±6.98	36.56±5.39	53.78±5.79	33.28
İstoç	11.92±4.74	64.37±6.03	109.94±6.96	25.14
Mahmutbey	85.04±6.47	128.22±7.30	79.47±6.35	29.5
Yenimahalle	149.94±7.68	110.74±6.97	135.90±7.44	35.28
Kirazlı	61.99±5.98	70.47±6.41	119.48±6.99	17
Ortalama	92.46	77.03	100	

M3 hattında en derin istasyon olan Yenimahalle istasyonunda peron ve ofis alanlarında bu hat içinde en yüksek değerler elde edilmiştir. İstasyonlar arası ölçüm noktalarında benzer ve orantılı değerler elde edilmiştir. Kirazlı istasyonu ofisi M1 hattı ile ortak olup M1 hattı Kirazlı istasyonu 26 m derinliktedir. M3 hattı Kirazlı istasyonu ise 17 m derinliktedir. Aynı bölgelerde yer alan bu iki ayrı hat için Kirazlı istasyonu turnike bölgesi ve peron bölgesi değerleri M1 turnike 82.39 Bq/m<sup>3</sup> ve peron 111.79 Bq/m<sup>3</sup> ile M3 turnike 70.47 Bq/m<sup>3</sup> ve peron 119.48 Bq/m<sup>3</sup> bulunmuştur. Radon seviyelerinin grafiksel hali Şekil 4.4’te sunulmuştur.





**Şekil 4.4:** M3 hattı istasyonları Radon konsantrasyonları grafiği.

Bu hatta istasyonların fiziksel yapıları benzer özellik gösterdiğinden istasyonlar arası değerler ve istasyon içi değerler daha uyumlu çıkmıştır. Söz konusu hat içinde en derin istasyonda en yüksek değerler bulunmuştur. Kirazlı istasyonunda M1b de olduğu gibi en yüksek değerler bulunmuştur. Bu hatta ofisler eski yapıdadır.

Bu hat dahil tüm hatlarda Radon konsantrasyonları ve yıllık etkin doz değerleri limit değerlerin altında bulunmuştur.

Tablo 4.12 de ise M3 hattına ait çalışan ve yolcular için bulunan yıllık etkin doz değerleri paylaşılmıştır.

**Tablo 4.12:** M3 hattı yıllık etkin doz değerleri (mSv/yıl).

M3 hattı yıllık etkin doz değerleri (mSv/yıl)			
İstasyon adı	Ofis	Turnike	Peron
	Çalışan	Çalışan	Çalışan/ Yolcu
Metrokent(Başakşehir)	0.8	0.41	0.68 / 0.08
Başak Konutları	0.43	0.56	0.53 / 0.066
Siteler	0.76	0.62	0.95 / 0.011
Turgut Özal	0.74	0.48	0.76 / 0.095
İkitelli Sanayi	1	0.5	0.28 / 0.035
Olimpiyat	0.48	-	0.40 / 0.05
Ziya Gökalp Mh	0.80	0.26	0.38 / 0.04
İstoç	0.08	0.46	0.79 / 0.09
Mahmutbey	0.61	0.92	0.57 / 0.07
Yenimahalle	1.07	0.79	0.97 / 0.12
Kirazlı	0.44	0.50	0.86 / 0.10

#### 4.1.5. M4 Hattı Ölçüm Sonuçları

M4 hattına ait aktif ölçüm sonuçları Tablo 4.13 te verilmiştir.

**Tablo 4.13:** M4 hattı istasyonları Radon konsantrasyonları, AlphaGUARD ölçümü.

<b>M4 hattı istasyonları Radon konsantrasyonları, AlphaGUARD ölçümü</b>			
İstasyon adı	Ölçüm Yeri	AlphaGUARD Sonuçları (Radon, sı°C aklık, nem, basınç)	Peron Derinlik (m)
Kadıköy	Ofis	9±5 Bq/m <sup>3</sup> , 23°C 54% 1012mbar	34.6
	Turnike	4±3 Bq/m <sup>3</sup> , 20°C 52% 1013mbar	
	Peron	16±7 Bq/m <sup>3</sup> , 20°C 58% 1017mbar	
Ayrılık Çeşmesi	Ofis	9±5 Bq/m <sup>3</sup> , 22°C 61% 1004mbar	30.17
	Turnike	4±3 Bq/m <sup>3</sup> , 20°C 57% 1004mbar	
	Peron	4±3 Bq/m <sup>3</sup> , 17°C 50% 1006mbar	
Acıbadem	Ofis	9±5 Bq/m <sup>3</sup> , 21°C 70% 1000mbar	35.5
	Turnike	14±6 Bq/m <sup>3</sup> , 19°C 60% 1000mbar	
	Peron	9±5 Bq/m <sup>3</sup> , 20°C 77% 1002mbar	
Ünalan	Ofis	14±6 Bq/m <sup>3</sup> , 21°C 70% 1005mbar	39.02
	Turnike	9±5 Bq/m <sup>3</sup> , 20°C 73% 1005mbar	
	Peron	4±3 Bq/m <sup>3</sup> , 21°C 72% 1008mbar	
Göztepe	Ofis	7±4 Bq/m <sup>3</sup> , 21°C 61% 1006mbar	40.29
	Turnike	11±5 Bq/m <sup>3</sup> , 20°C 64% 1006mbar	
	Peron	11±5 Bq/m <sup>3</sup> , 20°C 76% 1009mbar	
Yenisahra	Ofis	11±5 Bq/m <sup>3</sup> , 21°C 67% 1001mbar	35.16
	Turnike	7±4 Bq/m <sup>3</sup> , 19°C 61% 1001mbar	
	Peron	9±5 Bq/m <sup>3</sup> , 20°C 74% 1004mbar	

Kozyatağı	Ofis	19±7 Bq/m <sup>3</sup> , 21°C 62% 1000mbar	31.92
	Turnike	4±3 Bq/m <sup>3</sup> , 20°C 55% 1001mbar	
	Peron	11±5 Bq/m <sup>3</sup> , 20°C 78% 1004mbar	
Bostancı	Ofis	9±5 Bq/m <sup>3</sup> , 21°C 61% 1004mbar	37.35
	Turnike	4±3 Bq/m <sup>3</sup> , 20°C 55% 1004mbar	
	Peron	7±4 Bq/m <sup>3</sup> , 20°C 76% 1006mbar	
Küçükyalı	Ofis	16±7 Bq/m <sup>3</sup> , 21°C 71% 1005mbar	30.88
	Turnike	7±4 Bq/m <sup>3</sup> , 20°C 76% 1006mbar	
	Peron	4±3 Bq/m <sup>3</sup> , 21°C 80% 1007mbar	
Maltepe	Ofis	9±5 Bq/m <sup>3</sup> , 21°C 70% 1008mbar	30.91
	Turnike	4±3 Bq/m <sup>3</sup> , 21°C 61% 1006 mbar	
	Peron	11±5 Bq/m <sup>3</sup> , 19°C 73% 1009mbar	
Huzurevi	Ofis	14±6 Bq/m <sup>3</sup> , 21°C 72% 999mbar	37.9
	Turnike	11±5 Bq/m <sup>3</sup> , 21°C 65% 1000mbar	
	Peron	16±7 Bq/m <sup>3</sup> , 19°C 72% 1002mbar	
Gülsuyu	Ofis	4±3 Bq/m <sup>3</sup> , 22°C 55% 997mbar	31.93
	Turnike	11±5 Bq/m <sup>3</sup> , 21°C 58% 997mbar	
	Peron	14±6 Bq/m <sup>3</sup> , 21°C 71% 1000mbar	
Esenkent	Ofis	14±6 Bq/m <sup>3</sup> , 21°C 67% 999mbar	31.5
	Turnike	11±5 Bq/m <sup>3</sup> , 20°C 69% 999mbar	
	Peron	18±7 Bq/m <sup>3</sup> , 20°C 69% 1000mbar	
Hastane/Adliye	Ofis	11±5 Bq/m <sup>3</sup> , 21°C 59% 996mbar	
	Turnike	33±30 Bq/m <sup>3</sup> , 21°C 59% 996mbar	

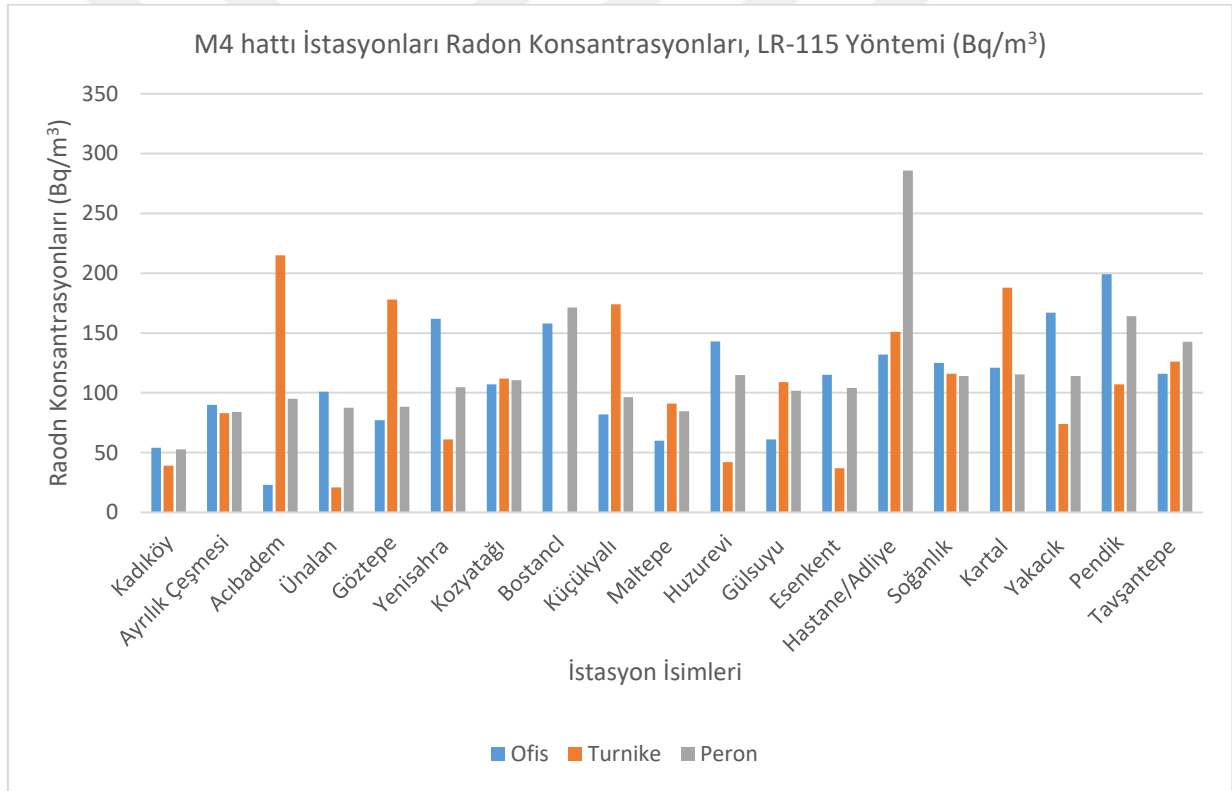
	Peron	4±3 Bq/m <sup>3</sup> , 20°C 69% 999mbar	32.33
Soğanlık	Ofis	7±4 Bq/m <sup>3</sup> , 21°C 57% 996mbar	36.07
	Turnike	11±5 Bq/m <sup>3</sup> , 21°C 56% 996mbar	
	Peron	11±5 Bq/m <sup>3</sup> , 21°C 69% 998mbar	
Kartal	Ofis	11±5 Bq/m <sup>3</sup> , 22°C 69% 993mbar	35.79
	Turnike	14±6 Bq/m <sup>3</sup> , 21°C 62% 992mb	
	Peron	9±5 Bq/m <sup>3</sup> , 21°C 69% 995mbar	
Yakacık	Ofis	7±4 Bq/m <sup>3</sup> , 23°C 48% 999mbar	33.87
	Turnike	11±5 Bq/m <sup>3</sup> , 21°C 50% 999mbar	
	Peron	14±6 Bq/m <sup>3</sup> , 20°C 62% 1001mbar	
Pendik	Ofis	7±4 Bq/m <sup>3</sup> , 21°C 57% 999mbar	34.35
	Turnike	7±4 Bq/m <sup>3</sup> , 21°C 47% 999mbar	
	Peron	16±7 Bq/m <sup>3</sup> , 20°C 64% 1001mbar	
Tavşantepe	Ofis	7±4 Bq/m <sup>3</sup> , 20°C 55% 997mbar	38.82
	Turnike	9±5 Bq/m <sup>3</sup> , 21°C 59% 997mbar	
	Peron	16±7 Bq/m <sup>3</sup> , 21°C 58% 999mbar	

M4 Kadıköy-Tavşantepe hattı en uzun hat olmakla beraber yolcu yoğunluğunun fazla olduğu bir hattır. 19 istasyonun bulunduğu söz konusu hat fay hattı üzerinde yer almaktadır ve 1.derece deprem bölgesi kapsamına girmektedir. Fay hatlarının Radon miktarlarını doğrudan artırdığı ve deprem habercisi olarak Radon miktarlarının gözlemlenmesi gerektiği açıklanmıştır. Fay hattı üzerindeki bir bölgede Radon miktarlarının sürekli ölçülmesi ve takibinin yapılması, miktarda olağan bir artış olması depremin tespitinde fayda sağlamaktadır. Tablo 4.14'den pasif ölçüm tekniği ile elde edilen ölçüm sonuçlarına ulaşılabilir.

**Tablo 4.14:** M4 hattı istasyonları Radon konsantrasyonları, LR-115 yöntemi.

<b>M4 hattı istasyonları Radon konsantrasyonları, LR-115 yöntemi (Bq/m<sup>3</sup>)</b>				
İstasyon adı	Ofis(Bq/m <sup>3</sup> )	Turnike(Bq/m <sup>3</sup> )	Peron(Bq/m <sup>3</sup> )	Peron Derinlik(m)
Kadıköy	54.04±5.80	39.47±5.46	52.72±5.77	34.6
Ayrılık Çeşmesi	90.34±6.58	82.65±6.42	83.98±6.45	30.17
Acıbadem	23.04±5.04	215.65±8.74	95.10±6.67	35.5
Ünalan	100.93±6.79	20.66±4.98	87.42±6.52	39.02
Göztepe	77.35±6.31	178.29±8.16	88.22±6.53	40.29
Yenisahra	162.13±7.89	60.93±5.95	104.64±6.86	35.16
Kozyatağı	107.82±6.92	112.06±7.00	110.47±6.97	31.92
Bostancı	158.95±7.84	kayıp	171.40±8.04	37.35
Küçükyalı	82.12±6.41	174.05±8.09	96.43±6.70	30.88
Maltepe	60.13±5.94	90.87±6.59	84.51±6.46	30.91
Huzurevi	142.79±7.56	42.12±5.52	114.71±7.05	37.9
Gülsuyu	60.66±5.95	109.15±6.94	101.73±6.80	31.93
Esenkent	114.97±7.05	36.82±5.39	104.11±6.85	31.5
Hastane/Adliye	132.46±7.38	151.00±7.70	285.85±9.75	32.33
Soğanlık	125.04±7.24	116.56±7.088	113.91±7.37	36.07
Kartal	120.80±7.16	188.09±8.31	115.24±7.06	35.79
Yakacık	166.90±7.97	74.44±6.25	113.91±7.03	33.87
Pendik	198.69±8.48	106.76±6.90	163.99±7.92	34.35
Tavşantepe	116.03±7.07	126.10±7.26	142.79±7.56	38.82
Ortalama	110.27	106.98	117.42	

30 ile 40 m arasında derinliklere sahip bu hat istasyonlarında birbirine yakın değerler bulunmuştur. Bu hat üzerindeki Hastane/Adliye, Soğanlık, Huzurevi, Pendik gibi istasyonlarda istasyon içi yürüme mesafesinin fazla oluşu ve hava akışının olmayışı özellikle ofislerde daha fazla değerler bulunmasını sağlamıştır. Hastane/Adliye istasyonu peron değerinin fazla olması istasyon ortamının ferah olması fakat biriken Radon gazının sirkülasyonunu sağlayacak hava akışının olmamasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca bu hattaki tüm istasyonlar yan peron şeklinde dizayn edilmiştir. Tavşantepe istasyonu granit üzerinde yer aldığı için bu istasyonda ve bu istasyona yakın diğer istasyonlarda hem granit yapı üzerine inşa edilmesi hem de fay hattı üzerinde olması sebebiyle diğer istasyonlara kıyasla daha fazla değerler çıkmıştır. Genel olarak hat üzerinden değerler birbiriyle benzer verilerdir.



Şekil 4.5: M4 hattı istasyonları Radon konsantrasyonları grafiği.

M4 hattındaki ondokuz adet istasyona ait çalışanlar ve yolcular için hesaplanan yıllık etkin doz değerleri ise Tablo 4.15' te sunulmuştur.

**Tablo 4.15:** M4 hattı yıllık etkin doz değerleri.

<b>M4 Hattı İstasyonları Yıllık Etkin Doz Değerleri mSv/Yıl</b>			
İstasyon adı	Ofis	Turnike	Peron
	Çalışan	Çalışan	Çalışan / Yolcu
Kadıköy	0.38	0.28	0.37/ 0.04
Ayrılık Çeşmesi	0.65	0.59	0.60/ 0.07
Acıbadem	0.16	1.55	0.68/ 0.08
Ünalan	0.72	0.14	0.62 / 0.07
Göztepe	0.55	1.28	0.63 / 0.07
Yenisahra	1.16	0.43	0.75 / 0.09
Kozyatağı	0.77	0.80	0.79 / 0.09
Bostancı	1.14	-	1.23 / 0.154
Küçükyalı	0.59	1.25	0.69 / 0.08
Maltepe	0.43	0.65	0.60 / 0.07
Huzurevi	1.02	0.0	0.82 / 0.10
Gülsuyu	0.43	0.78	0.73 / 0.09
Esenkent	0.82	0.26	0.74 / 0.09
Hastane/Adliye	0.95	1.08	2.05 / 0.25
Soğanlık	0.9	0.83	0.94 / 0.11
Kartal	0.86	1.35	0.82 / 0.10
Yakacık	1.20	0.53	0.82 / 0.10
Pendik	1.43	0.76	1.18 / 0.14
Tavşantepe	0.83	0.90	1.02 / 0.12

#### 4.1.6. M5 Hattı Ölçüm Sonuçları

M5 hattına Radon konsantrasyonları aşağıda listelenmiştir. Tablo 4.16' da aktif tönem olan AlphaGUARD ölçüm sonuçları paylaşılmıştır.

2017 yılında hizmete açılışıyla en son ve en yakın zamanda açılan bu hatta Radon gazı miktarları düşük çıkmıştır. Yapım yılının, daha eski yıllarda inşa edilmiş yapıtlarda daha çok Radon gazı birikimine sebebiyet verdiği şeklinde etki ettiği gözlemlenmiştir. M5 hattı da fay hattı üzerinde bulunuyor diyebiliriz fakat yeni bir hat olması ve havalandırma etkisiyle Radon miktarı daha düşük gözlemlenmiştir. LR-115 yöntemi ile elde edilen sonuç değerleri ise Tablo 4.17' de paylaşılmıştır.

**Tablo 4.16:** M5 hattı istasyonları Radon konsantrasyonları, AlphaGUARD Ölçümü.

<b>M5 Hattı İstasyonları Radon Konsantrasyonları, AlphaGUARD Ölçümü</b>			
İstasyon adı	Ölçüm Yeri	AlphaGUARD Sonuçları (Radon, sıcaklık, nem, basınç)	Peron Derinlik (m)
Üsküdar	Ofis	11±5 Bq/m <sup>3</sup> , 21°C 63% 1013mbar	19.89
	Turnike	9±5 Bq/m <sup>3</sup> , 21°C 57% 1013mbar	
	Peron	16±7 Bq/m <sup>3</sup> , 18°C 69% 1014mbar	
Fıstıkağacı	Ofis	11±5 Bq/m <sup>3</sup> , 18°C 70% 1007mbar	31.19
	Turnike	16±7 Bq/m <sup>3</sup> , 18°C 73% 1006mbar	
	Peron	7±4 Bq/m <sup>3</sup> , 17°C 75% 1008mbar	
Bağlarbaşı	Ofis	11±5 Bq/m <sup>3</sup> , 20°C 69% 1001mbar	35.12
	Turnike	9±5 Bq/m <sup>3</sup> , 19°C 68% 1001mbar	
	Peron	9±5 Bq/m <sup>3</sup> , 19°C 72% 1004mbar	
Altunizade	Ofis	7±4 Bq/m <sup>3</sup> , 19°C 73% 1001mbar	19.96
	Turnike	14±6 Bq/m <sup>3</sup> , 18°C 68% 1000mbar	
	Peron	14±6 Bq/m <sup>3</sup> , 19°C 73% 1001mbar	
Kısıklı	Ofis	9±5 Bq/m <sup>3</sup> , 23°C 61% 991mbar	42.9
	Turnike	16±7 Bq/m <sup>3</sup> , 21°C 60% 991mbar	
	Peron	11±5 Bq/m <sup>3</sup> , 18°C 74% 995mbar	
Bulgurlu	Ofis	14±6 Bq/m <sup>3</sup> , 20°C 67% 995mbar	25.48
	Turnike	11±5 Bq/m <sup>3</sup> , 18°C 68% 995mbar	
	Peron	21±8 Bq/m <sup>3</sup> , 21°C 59% 997mbar	
Ümraniye	Ofis	9±5 Bq/m <sup>3</sup> , 19°C 74% 991mbar	
	Turnike	7±4 Bq/m <sup>3</sup> , 17°C 70% 991mbar	



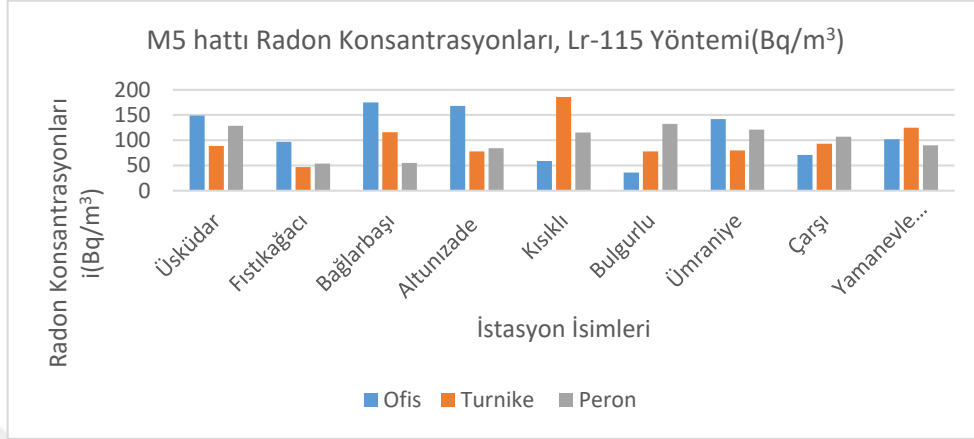
	Peron	25±9 Bq/m <sup>3</sup> , 17°C 76% 993mbar	25.52
Çarşı	Ofis	9±5 Bq/m <sup>3</sup> , 19°C 71% 991mbar	27.9
	Turnike	4±3 Bq/m <sup>3</sup> , 18°C 67% 991mbar	
	Peron	7±4 Bq/m <sup>3</sup> , 18°C 67% 992mbar	
Yamanevler İstasyonları	Ofis	9±5 Bq/m <sup>3</sup> , 19°C 71% 990mbar	24.52
	Turnike	14±6 Bq/m <sup>3</sup> , 18°C 69% 990mbar	
	Peron	16±7 Bq/m <sup>3</sup> , 18°C 72% 992mbar	

**Tablo 4.17:** M5 hattı istasyonları Radon konsantrasyonları, LR-115 yöntemi.

M5 hattı İstasyonları Radon konsantrasyonları, LR-115 yöntemi, (Bq/m <sup>3</sup> )				
İstasyon adı	Ofis(Bq/m <sup>3</sup> )	Turnike(Bq/m <sup>3</sup> )	Peron(Bq/m <sup>3</sup> )	Peron Derinlik(m)
Üsküdar	149.68±7.68	89.28±6.55	128.75±7.31	19.89
Fıstıkağacı	96.96±6.71	46.62±5.63	54.04±5.80	31.19
Bağlarbaşı	175.11±8.10	116.30±7.08	55.10±5.82	35.12
Altunizade	167.96±7.99	77.62±6.31	84.24±6.45	19.96
Kısıklı	59.07±5.91	185.98±8.28	115.5±7.06	42.9
Bulgurlu	35.50±5.36	77.62±6.31	132.46±7.38	25.48
Ümraniye	142.00±7.54	80.27±6.37	121.33±7.17	25.52
Çarşı	71.26±6.18	93.51±6.64	107.03±6.90	27.9
Yamanevler İstasyonları	102.26±6.81	125.57±7.25	89.81±6.56	24.52
Ortalama	111.08	99.19	98.69	

9 istasyona sahip bu hatta genellikle çalışma ofislerindeki Radon değerleri, diğer ölçüm noktaları Radon değerlerine göre daha yüksek bulunmuştur.

Şekil 4.6' dan M5 hattına ait LR-115 yöntemi ile elde edilen Radon konsantrasyonlarına ait verilerin görseli sunulmuştur.



Şekil 4.6: M5 hattı istasyonları Radon konsantrasyonları grafiği.

M5 Üsküdar-Yamanevler hattına ait çalışan ve yolcuları kapsayan yıllık etkin doz değerleri ise Tablo 4.18'de sunulmuştur.

Tablo 4.18: M5 hattı yıllık etkin doz değerleri (mSv/yıl).

M5 hattı yıllık etkin doz değerleri (mSv/yıl)			
İstasyon adı	Ofis	Turnike	Peron
	Çalışan	Çalışan	Çalışan/ Yolcu
Üsküdar	1.07	0.64	0.92 / 0.11
Fıstıkağacı	0.69	0.33	0.38 / 0.04
Bağlarbaşı	1.26	0.83	0.39 / 0.04
Altunzade	1.20	0.55	0.60 / 0.07
Kısıklı	0.42	1.33	0.95 / 0.11
Bulgurlu	0.25	0.55	0.83 / 0.1
Ümraniye	1.02	0.57	0.87 / 0.10
Çarşı	0.51	0.67	0.77 / 0.09
Yamanevler İstasyonları	0.73	0.90	0.64 / 0.08

#### 4.1.7. M6 Hattı Ölçüm Sonuçları

M6 hattına ait toplam 4 yer altı istasyonunda AlphaGUARD aktif ölçüm tekniği ile elde edilen sayısal veriler Tablo 4.19'da gösterilmiştir.

**Tablo 4.19:** M6 hattı istasyonları Radon konsantrasyonları, AlphaGUARD ölçümü.

<b>M6 hattı istasyonları Radon Konsantrasyonları, AlphaGUARD ölçümü</b>			
İstasyon adı	Ölçüm Yeri	AlphaGUARD Sonuçları (Radon, sıcaklık, nem, basınç)	Peron Derinlik (m)
Hisarüstü/Boğaziçi Üniv	Ofis	14±6 Bq/m <sup>3</sup> , 23°C 62% 993mbar	40
	Turnike	11±5 Bq/m <sup>3</sup> , 20°C 67% 999mbar	
	Peron	31±30 Bq/m <sup>3</sup> , 19°C 81% 994mbar	
Etiler	Ofis	7±4 Bq/m <sup>3</sup> , 20°C 69% 992mbar	27.51
	Turnike	4±3Bq/m <sup>3</sup> , 19°C 67% 992mbar	
	Peron	14±6 Bq/m <sup>3</sup> , 19°C 79% 994mbar	
Nispetiye	Ofis	9±5 Bq/m <sup>3</sup> , 20°C 66% 991mbar	29.23
	Turnike	14±6 Bq/m <sup>3</sup> , 17°C 63% 991mbar	
	Peron	11±5 Bq/m <sup>3</sup> , 18°C 76% 992mbar	
Levent	Ofis	7±4 Bq/m <sup>3</sup> , 21°C 76% 995mbar	28.16
	Turnike	21±8 Bq/m <sup>3</sup> , 21°C 74% 995mbar	
	Peron	19±7 Bq/m <sup>3</sup> , 20°C 77% 995mbar	

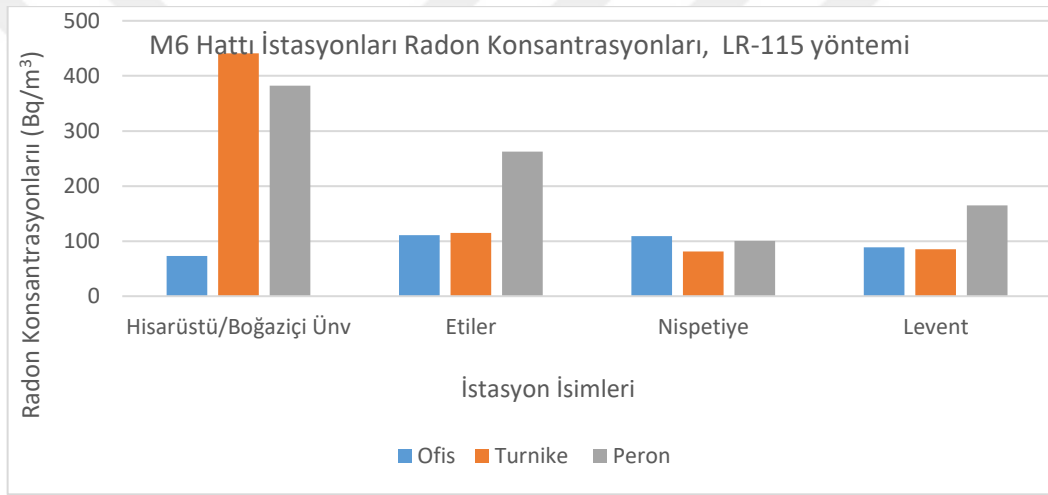
LR-115 yöntemi ile elde edilen M6 Hattı istasyonların Radon konsantrasyonları Tablo 4.20 'de verilmiştir.

M6 hattı hat uzunluğu ile en kısa mesafeye sahip ve yolcu yoğunluğunun en az olduğu hatlardandır. Sakin ve istasyon peron yapısının da kısa mesafeli olduğu bu hatta 4 istasyon bulunmaktadır ve M2 Levent hattından M6 Levent hattına geçiş sağlanmaktadır. Bu tablodan görüldüğü gibi bu çalışma kapsamında elde edilen en yüksek veriler bu istasyonun turnike ve peron bölgesinden elde edilmiştir.

**Tablo 4.20:** M6 hattı istasyonları Radon konsantrasyonları, LR-115 yöntemi.

M6 Hattı İstasyonları Radon Konsantrasyonları, LR-115 (Bq/m <sup>3</sup> )				
İstasyon adı	Ofis	Turnike	Peron	Derinlik(m)
Hisarüstü/Boğaziçi Üniv	72.59±6.21	441.63±11.67	382.02±10.98	40
Etiler	111.00±6.98	115.50±7.06	262.54±9.43	27.51
Nispetiye	109.68±6.95	81.06±6.39	100.40±6.78	29.23
Levent	88.75±6.54	85.30±6.47	165.05±7.94	28.16
Ortalama	95.50	180.87	227.50	

Şekil 4.7' de ise M6 hattına ait istasyonların pasif yöntemle elde edilen sonuçlarının grafiksel hali paylaşılmıştır.

**Şekil 4.7:** M6 hattı istasyonları Radon konsantrasyonları grafiği.

Tüm istasyonlarda yapılan ölçümlere bakıldığında en yüksek değer M6 hattında 40 m derinlikteki Hisarüstü/Boğaziçi Üniversitesi İstasyonunda elde edilmiştir. Söz konusu istasyonun turnikesinde 441 Bq/m<sup>3</sup> ve peronunda 382.02 Bq/m<sup>3</sup> değerleri ile bu çalışmanın en yüksek değerleri elde edilmiştir. İstasyon peron tren geçiş yolları betondan yapılmıştır ve su birikintisi/sızıntısı bulunmamaktadır. İstasyon peron yürüme alanı diğer istasyonlardaki yürüme alanları ile benzer ölçülerdedir ve ada tipi istasyonlardan oluşmaktadır.

M6 hattına ait yıllık etkin doz değerleri ise Tablo 4.21' de sunulmuştur.

**Tablo 4.21:** M6 hattı yıllık etkin doz değerleri (mSv/yıl).

<b>M6 hattı yıllık etkin doz değerleri (mSv/yıl)</b>			
İstasyon adı	Ofis	Turnike	Peron
	Çalışan	Çalışan	Çalışan/ Yolcu
Hisarüstü/Boğaziçi Ünv	0.52	3.17	2.75 / 0.34
Etiler	0.79	0.83	1.89 / 0.23
Nispetiye	0.78	0.58	0.72 / 0.09
Levent	0.63	0.61	1.18 / 0.14

#### 4.1.8. Marmaray Hattı Ölçüm Sonuçları

İstanbul ulaşımının en önemli parçası olan Marmaray hattına ait yer altı istasyonlarının verileri aşağıda gösterilmiştir. Tablo 4.22’de aktif ölçüm tekniği ile alınan değerler görülmektedir.

**Tablo 4.22:** Marmaray hattı istasyonları Radon konsantrasyonları, AlphaGUARD ölçümü.

<b>Marmaray hattı istasyonları Radon konsantrasyonları, AlphaGUARD ölçümü</b>			
İstasyon adı	Ölçüm Yeri	AlphaGUARD Sonuçları (Radon, sıcaklık, nem, basınç)	Peron Derinlik (m)
Yenikapı	Ofis	19±7 Bq/m <sup>3</sup> , 23°C 54% 1016mbar	13
	Turnike	19±7 Bq/m <sup>3</sup> , 23°C 54% 1016mbar	
	Peron	16±7 Bq/m <sup>3</sup> , 20°C 54% 1017mbar	
Sirkci	Ofis	18±7 Bq/m <sup>3</sup> , 20°C 61% 1014mbar	53
	Turnike	14±6 Bq/m <sup>3</sup> , 20°C 64% 1015mbar	
	Peron	16±7 Bq/m <sup>3</sup> , 18°C 65% 1019mbar	
Üsküdar	Ofis	7±4 Bq/m <sup>3</sup> , 20°C 63% 1014mbar	23
	Turnike	4±3 Bq/m <sup>3</sup> , 19°C 59% 1014mbar	
	Peron	11±5 Bq/m <sup>3</sup> , 20°C 60% 1017mbar	

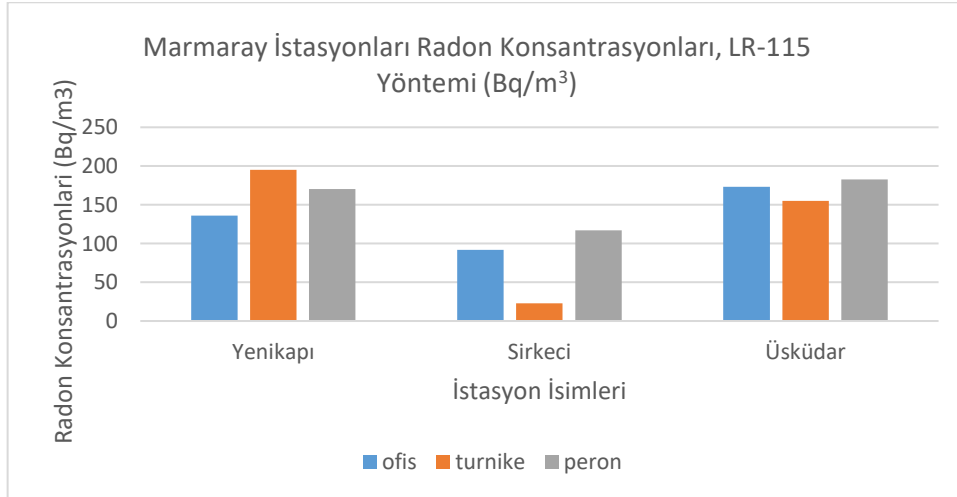
Tablo 4.23 ise LR-115 yöntemi ile elde edilen sonuçları vermektedir.

**Tablo 4.23:** Marmaray hattı Radon konsantrasyonları, LR-115 Yöntemi.

Marmaray Hattı Radon Konsantrasyonları, LR-115 Yöntemi (Bq/m <sup>3</sup> )				
İstasyon adı	Ofis(Bq/m <sup>3</sup> )	Turnike(Bq/m <sup>3</sup> )	Peron(Bq/m <sup>3</sup> )	Peron Derinlik(m)
Yenikapı	135.90±6.88	195.17±7.71	170.31±7.38	13
Sirkeci	92.30±6.19	23.16±4.91	117.17±6.59	53
Üsküdar	173.03±7.41	154.98±7.16	182.91±7.55	23
Ortalama	133.74	124.43	156.79	

En derin istasyon olan Sirkeci istasyonunda peron üstündeki havalandırmaların katkısıyla Radon değerleri beklenenden daha düşük bulunmuştur. Tüm istasyonlarda yapılan ölçümlerin yanı sıra Marmarayda Yenikapıda bulunan gar müdürü odasında  $33\pm 30$  Bq/m<sup>3</sup>, 23°C, 56% 1016 mbar ve pasif ölçüm değeri 87.88 Bq/m<sup>3</sup> ve Üsküdar istasyonunda bulunan Kumanda merkezinde yapılan ölçüm değerleri ise  $33\pm 11$  Bq/m<sup>3</sup>, 21°C 63% 1013 mbar ve pasif sonuçlar 137,27 Bq/m<sup>3</sup> olarak bulunmuştur. İnşası bakımından metro istasyonlarından farklı olan Marmaray istasyonlarına ait AlphaGUARD değerleri Tablo 4.22’de sunulmuştur.

Marmaray sisteminde elde edilen veriler TAEK limit değerlerinin altında bulunmuştur ve kuvvetli havalandırma ile tren sirkülasyonunun sağladığı hava akışı ve peronların yüzey alanı büyüklüğü Radon gazını düşürücü şekilde etki etmektedir.



Şekil 4.8: Marmaray hattı Radon konsantrasyonları grafiği.

**Tablo 4.24:** Marmaray hattı yıllık etkin doz değerleri (mSv/yıl).

Yıllık Etkin Doz Değerleri(mSv/yıl)			
İstasyon adı	Ofis (Çalışan)	Turnike (Çalışan)	Peron(Çalışan/Yolcu)
Yenikapı	0.97	1.40	1.22 / 0.15
Sirkeci	0.66	0.16	0.84 / 0.10
Üsküdar	1.24	1.11	1.31 / 0.16

En derin İstasyon olan Sirkeci İstasyonunda bile Radon miktarları sağlık açısından risk oluşturmamaktadır.

#### 4.1.9. Makinist Odaları Radon Değerlerinin Kıyaslanması

Makinist odaları her hatta son istasyonlarda ve peron katlarında bulunmaktadır. Bir makinist günde en az 8 saat çalışmaktadır.

Pencere gibi doğal hava akımları olmadığından havalandırma, klima ve benzeri yöntemlerle sağlanmaktadır. En az 5 kişi aynı anda odada bulunmaktadır. Güneş görmeyen ve tren geçiş hızı ile havalanan yerlerdir. Çalışma ofislerine benzer yapıdadır fakat daha derinde bulunurlar.

Tablo 4.25'ten tüm hatlardaki makinist odalarının bulunduğu istasyonların peronlarındaki Radon değeri ve peronlarla aynı seviyede bulunan makinist odalarının Radon değerleri görülmektedir.

**Tablo 4.25:** Makinistlerin maruz kaldıkları Radon değerleri.

	Alphaguard Sonuçları 10 dak	Makinist Odası Radon Değeri LR115-Bq/m <sup>3</sup>	Peron Radon Değerleri LR115-Bq/m <sup>3</sup>	Peron Derinliği (m)
<b>M1</b> (M1 a Yenikapı)	14+6 Bq/m <sup>3</sup> 19C 74% 1017mbar	18,01	88	20,98
<b>M2</b> (Hacıosman)	16+7 Bq/m <sup>3</sup> 20C 60% 1009mbar	34,17	78,15	40,49
<b>M3</b> (Başakşehir)	24+9 Bq/m <sup>3</sup> 19C 67% 996mbar	37,61	95,37	34,87
<b>M4</b> (Kadıköy)	11+5 Bq/m <sup>3</sup> 21C 62% 1017mbar	28,08	52,72	34,6
<b>M5</b> (Sürücüsüz metro)	-	-	-	-
<b>M6</b> (Levent)	-	-	65,05	28,16

Tablo 4.26'dan ise makinistlerin maruz kaldıkları yıllık etkin doz değerlerinin 0.03-0.07 mSv/yıl aralığında değiştiği görülmektedir.

**Tablo 4.26:** Makinistlerin maruz kaldıkları yıllık etkin doz değerleri

İstasyon adı	Yıllık etkin doz değeri (mSv/yıl)
<b>M1</b> (M1 a Yenikapı)	0.12
<b>M2</b> (Hacıosman)	0.24
<b>M3</b> (Başakşehir)	0.27
<b>M4</b> (Kadıköy)	0.20
<b>M5</b> (Sürücüsüz metro)	-
<b>M6</b> (Levent)	-

#### 4.1.10. Tüm İstasyonların Karşılaştırılması

Bu bölümde, ölçüm yapılan tüm istasyonlara ait veriler tek bir tabloda toplanmıştır. Ölçüm yapılan 70 istasyonun tamamının sıcaklık, basınç, nem, Radon ve derinlik parametreleri tek bir tablo halinde verilmiştir Tüm istasyonların peron Radon konsantrasyon ortalaması 114,60 Bq/m<sup>3</sup> bulunmuştur. En yüksek peron değeri 40 m derinlikteki M6 hattı Hisarüstü/Boğaziçi Üniversitesi istasyonunda 382 Bq/m<sup>3</sup>, en düşük değer ise 21.97 m derinlikteki M3 İkitelli istasyonunda 39.47 Bq/m<sup>3</sup> olarak bulunmuştur. Her iki hatta Avrupa yakasında bulunmaktadır. Tablo 4.27'den görüldüğü gibi sıcaklık, basınç, nem ve Radon miktarları arasında bir korelasyon bulunmamaktadır. Tablo 4.27'de görüldüğü gibi parametreler çeşitlilik göstermekle beraber bulunan tüm veriler TAEK sınırlarının altındadır.



**Tablo 4.27:** Tüm istasyonların peronlarının Radon, sıcaklık, nem, basınç ve derinlik değerleri.

İstasyon adı	Peron Derinlik(m)	Peron Radon(Bq/m <sup>3</sup> )	Sıcaklık (°C)	Basınç (mbar)	Nem (%)
M1a Yenikapı	20	88.22	19	1017	65
M1 a Aksaray	17	77.35	18	1015	65
M1a Emniyet	11	65.17	18	1014	67
M1a Ulubatlı	11	73.91	18	1014	67
M1a Bakırköy	18	100.67	16	1011	64
M1a Bahçelievler	16	58.28	17	1012	56
M1a Havalimanı	10	54.57	19	1012	57
M1b Menderes	25	97.75	19	1011	50
M1b Üçyüzlü	12	68.06	18	1013	50
M1b Bağcılar Meydanı	50	90.6	18	1012	61
M1b Kirazlı	26	111.79	19	1015	56
M2 Yenikapı	20.98	151.00	18	1020	70
M2 Vezneciler	43.53	126.37	19	1017	66
M2 Şişhane	33.53	133.78	18	1016	60
M2 Taksim	25.71	167.96	19	1012	69
M2 Osmanbey	-	140.14	22	995	77
M2 Şişli/Mecidiyeköy	29.4	61.99	21	1008	70
M2 Gayrettepe	26.4	110.47	21	1007	67
M2 Levent	25.12	161.07	21	1005	67
M2 4.Levent	17.87	218.3	20	1004	69
M2 Sanayi Mah	28.02	125.57	20	1006	71
M2 İTÜ Ayazaga	31.42	81.33	20	1006	70
M2 A.Oto Sanayi	25.79	160.54	19	1004	70
M2 Darüşşafaka	25.58	103.05	18	1007	76
M2 Hacıosman	40.49	78.15	19	1009	64
M3 Metrokent(Başakşehir)	34.87	95.37	20	993	61
M3 Başak Konutları	20.5	73.65	18	993	62
M3 Siteler	22.8	132.72	18	994	64
M3 Turgut Özal	20.71	106.50	17	997	67
M3 İkitelli Sanayi	21.97	39.47	16	1001	64
M3 Olimpiyat	16.49	56.42	20	1001	45
M3 Ziya Gökalp Mh	33.28	53.78	17	1001	59
M3 İstoç	25.14	109.94	17	1000	65
M3 Mahmutbey	29.5	79.47	17	1006	63
M3 Yenimahalle	35.28	135.90	17	1002	56
M3 Kirazlı	17	119.48	15	1004	63
M4 Kadıköy	34.6	52.72	20	1017	58
M4 Ayrılık Çeşmesi	30.17	83.98	17	1006	50
M4 Acıbadem	35.5	95.10	20	1002	77
M4 Ünalın	39.02	87.42	21	1008	72
M4 Göztepe	40.29	88.22	20	1009	76
M4 Yenısahra	35.16	104.64	20	1004	74

M4 Kozyatağı	31.92	110.47	20	1004	78
M4 Bostancı	37.35	171.40	20	1006	76
M4 Küçükyalı	30.88	96.43	21	1007	80
M4 Maltepe	30.91	84.51	19	1009	73
M4 Huzurevi	37.9	114.71	19	1002	72
M4 Gülsuyu	31.93	101.73	21	1000	71
M4 Esenkent	31.5	104.11	20	1000	69
M4 Hastane/Adliye	32.33	285.85	20	999	69
M4 Soğanlık	36.07	113.91	21	998	69
M4 Kartal	35.79	115.24	21	995	69
M4 Yakacık	33.87	113.91	20	1001	62
M4 Pendik	34.35	163.99	20	1001	64
M4 Tavşantepe	38.82	142.79	21	999	58
M5 Üsküdar	19.89	128.75	18	1014	69
M5 Fıstıkağacı	31.19	54.04	17	1008	75
M5 Bağlarbaşı	35.12	128.75	19	1004	72
M5 Altunzade	19.96	54.04	19	1001	73
M5 Kısıklı	42.9	55.1	18	995	74
M5 Bulgurlu	25.48	84.24	21	997	59
M5 Ümraniye	25.52	115.5	17	993	76
M5 Çarşı	27.9	132.46	18	992	67
M5 Yamanevler İstasyonları	24.52	121.33	18	992	72
M6 Hisarüstü/Boğaziçi Üniv	40	382.02	19	994	81
M6 Etiler	27.51	262.54	19	994	79
M6 Nispetiye	29.23	100.4	18	992	76
M6 Levent	28.16	165.05	20	995	77
Marmaray Yenikapı	13	170.31	20	1017	54
Marmaray Sirkeci	53	117.17	18	1019	65
Marmaray Üsküdar	23	182.91	20	1017	60

Ölçüm noktası olan yetmiş tane istasyonun peronlarında yapılan ölçümlerin % 41.42 si 100 Bq/m<sup>3</sup> değerinden küçük, % 54.28'i 100-200 Bq/m<sup>3</sup> değer aralığında, %2.85'i 200-300 Bq/m<sup>3</sup> değer aralığında ve % 1.42'si 300 Bq/m<sup>3</sup> ten büyük değerler çıkmıştır. Her bir istasyon peronunda birden fazla alınan ölçümlerin ortalaması alınmıştır ve bu ortalama değerler her bir istasyon için değerlendirildiğinde sadece bir istasyonda 300 Bq/m<sup>3</sup> ten büyük değer bulunmuştur. Sadece iki istasyonda ise 200-300 Bq/m<sup>3</sup> aralığında değerler, 38 tane istasyonda 100-200 Bq/m<sup>3</sup> aralığında değerler ve 29 istasyonda 100 Bq/m<sup>3</sup> den küçük değerler bulunmuştur.

#### 4.1.11. Tüm İstasyonların Gama Değerleri

Tablo 4.28 de istasyonlarda ölçülen gama değerleri verilmektedir.

**Tablo 4.28:** İstasyonlarda ölçülen gama değerleri.

İstasyon adı	Gama Değeri( $\mu\text{Sv/yıl}$ )			İstasyon adı	Gama Değeri ( $\mu\text{Sv/yıl}$ )		
	Ofis	Turnike	Peron		Ofis	Turnike	Peron
M1a Yenikapı		-	0.08	M4 Kadıköy	0.09	0.07	0.03
M1a Aksaray	0.08	-	0.05	M4 Ayrılık Çeşmesi	0.09	0.02	0.04
M1a Emniyet	-	0.07	0.04	M4 Acıbadem	0.03	0.02	0.01
M1a Ulubatlı	-	0.08	0.04	M4 Ünalın	0.02	0.02	0.06
M1a Bakırköy	-	0.07	0.15	M4 Göztepe	0.04	0.03	0.03
M1a Bahçelievler	-	0.06	0.08	M4 Yenısahra	0.03	0.04	0.03
M1a Havalimanı		0.06	0.08	M4 Kozyatağı	0.04	0.1	0.05
M1b Menderes	0.04	0.04	0.03	M4 Bostancı	0.02	0.02	0.04
M1b Üçyüzlü	0.02	0.02	0.01	M4 Küçükyalı	0.05	0.02	0.04
M1b Bağcılar Meydanı	0.01	0.01	0.01	M4 Maltepe	0.1	0.06	0.04
M1b Kirazlı		0.04	0.05	M4 Huzurevi	0.03	0.04	0.02
M2 Yenikapı	0.03	0.14	0.03	M4 Gülsuyu	0.02	0.03	0.06
M2 Vezneciler	0.04	0.07	0.04	M4 Esenkent	0.01	0.02	0.03
M2 Şişhane	0.01	0.03	0.04	M4 Hastane/Adliye	0.04	0.03	0.03
M2 Taksim	0.07	0.06	0.03	M4 Soğanlık	0.05	0.05	0.01
M2 Osmanbey	0.05	0.03	0.05	M4 Kartal	0.04	0.04	0.03
M2 Şişli	0.03	0.09	0.08	M4 Yakacık	0.04	0.03	0.01
M2 Gayrettepe	0.04	0.06	0.08	M4 Pendik	0.07	0.07	0.06
M2 Levent	0.04	0.04	0.08	M4 Tavşantepe	0.03	0.04	0.06
M2 4.Levent	0.08	0.06	0.07	M5 Üsküdar	0.02	0.05	0.04
M2 Sanayi Mah	0.07	0.13	0.06	M5 Fıstıkahacı	0.02	0.03	0.01
M2 İtu Ayazaga	0.05	0.04	0.08	M5 Bağlarbaşı	0.03	0.08	0.03
M2 A.Oto Sanayi	0.06	0.08	0.07	M5 Altunizade	0.04	0.02	0.02
M2 Darüşşafaka	0.08	0.08	0.04	M5 Kısıklı	0.03	0.01	0.02
M2 Haciosman	0.06	0.09	0.07	M5 Bulgurlu	0.02	0.07	0.01
M3 Metrokent(Başakşehir)	0.07	0.03	0.06	M5 Ümraniye	0.03	0.01	0.01
M3 Başak Konutları	0.09	0.04	0.02	M5 Çarşı	0.03	0.06	0.04
M3 Siteler	0.04	0.02	0.03	M5 Yamanevler İstasyonları	0.03	0.06	0.01
M3 Turgut Özal	0.04	0.05	0.05	M6 Hisarüstü /Boğaziçi Üniv	0.06	0.11	0.03
M3 İkitelli Sanayi	0.06	0.03	0.04	M6 Etiler	0.1	0.11	0.05
M3 Olimpiyat	0.09	-	0.04	M6 Nispetiye	0.06	0.10	0.05
M3 Ziya Gökalp Mh	0.06	0.04	0.01	M6 Levent	0.07	0.06	0.05
M3 İstoç	0.06	0.03	0.03	Marmaray Yenikapı	0.01	0.02	0.06
M3 Mahmutbey	0.06	0.01	0.02	Marmaray Sirkeci	0.03	0.03	0.04
M3 Yenimahalle	0.02	0.02	0.01	Marmaray Üsküdar	0.04	0.07	0.06
M3 Kirazlı	0.05	0.03	0.03				

Yer altı olması ve güneş ışığı görmemesi sebebiyle gircilikleri çok yüksek olmasına rağmen gama radyasyonları çok düşük değerlerde bulunmuştur. Kozmik olarak yerküreye ulaşan gama radyasyonunun yanı sıra alfa, beta bozunumu sonucu ve yapay olarak üretilen gama ışınları da vardır. Dünyada gama kaynaklı maruz kalınan yıllık etkin doz ortalama 1.15 mSv'dir.

## 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

İnsanlar her gün toprak ve kayalardaki radyoaktif Uranyum elementinin doğal bozulması sonucunda radyasyona maruz kalmaktadırlar. Uranyum bozunum ürünü olan Radonun yer altında daha yoğun bulunuyor olması ve Radon miktarının fazlasının sağlığa zararlı olması ve akciğer kanserine sebep olduğunun bilinmesi Radon konsantrasyonlarının belirlenmesini gerekli kılmaktadır.

İstanbul ili Anadolu ve Avrupa yakasında bulunan toplam 70 adet metro ve Marmaray istasyonlarına yerleştirilen LR-115 pasif nükleer iz kazıma dedektörleri ile Radon konsantrasyonu tespiti çalışmasında peronlar için 39.47 Bq/m<sup>3</sup> ile 382.02 Bq/m<sup>3</sup> aralığında değerler bulunmuştur. Bulunan en yüksek değer 382.02 Bq/m<sup>3</sup> tür. Tüm istasyonların ortalama Radon değeri ise peronlar için 114.60 Bq/m<sup>3</sup> bulunmuştur. Yıllık etkin doz değerleri ise peronlarda çalışanlar için 0.12-2.75 mSv/yıl aralığında değişirken yolcular için 0.035-0.34 mSv/yıl aralığında veriler bulunmuştur. Ölçüm sonuçları arasındaki farklar istasyonların jeolojik yapısına, derinlik, sıcaklık, nem, basınç parametrelerine, havalandırma yapılarına, mekan büyüklüklerine, istasyon tipine, yapı malzemesi cinsine, istasyon yapım yılına ve istasyonda peron ayırıcı güvenlik kapılarının bulunup bulunmaması ile yorumlanmıştır.

İstasyonlarda ölçülen değerler uluslararası kuruluşlarının limitlendirdiği değerlerin altında bulunmuştur. Bu duruma rağmen çalışanlara gün içinde özellikle mola aralarında açık havaya çıkmaları ve sigara kullanmamaları tavsiye edilmektedir. Diğer taraftan çalışma ofisi ya da SOR odası diye adlandırılan istasyon amirleri odasında bulunan ve elektromanyetik radyasyon yayan cihazların mümkün olduğunca bu odalar dışına konumlandırılması, bu tip odalarda pencere ve doğal havalandırma olmadığı için kapılarının sürekli açık tutulması önerilmektedir.

Yeni yapılacak istasyonlarda inşa öncesi Radon tespiti, fay hattı üzerinde olup olmaması, kullanılacak yapı maddesinin içerdiği radyonüklidlerin aktiviteleri gibi etmenlere dikkat edilerek ve mekanik havalandırmaların da aktif olarak kullanılabilecek şekilde dizayn edilmesine dikkat edilmelidir. Tren geçiş yollarındaki su sızıntısı veya çatlakların ivedilikle tamir edilmesine dikkat edilmelidir. Ofis, kumanda odası, güvenlik odası veya makinist odalarının mümkün olduğunca cadde seviyesine yakın bir alana konumlandırılmasına dikkat edilmelidir. Sürekli kapalı ortamda bulunan metro çalışanlarının mola aralarında açık havaya

çıkmaları kendilerini hem doğal hem elektromanyetik radyasyon hem de istasyonlarda bulunan demir tozu vb kimyasal etmenlerden korumaktadır.

Güvenlik otomatik kapılarının da Radonu azaltıcı yönde etki ettiği gözlemlenmektedir. Hem çalışanlar hem de yolcular için limit değerlerin altında değerler bulunsa bile gereğinden fazla süre tünel peronlarında bulunulmaması gerekmektedir. Ölçüm sonuçlarının farklılığı ölçüm noktası alanlarının büyüklüğü ve havalandırma koşulları ile de değişebilmektedir.

Bazı ölçüm noktalarında farklı iki hattın istasyonları bulunmaktadır. Bazen bu iki istasyonun derinlikleri aynı olsa bile farklı konsantrasyonlar olabilmektedir. Mesela M2 hattında Yenikapı istasyonunda peron değeri yaklaşık  $150 \text{ Bq/m}^3$  çıkmışken M1 hattı Yenikapı istasyonunda bu değer  $88 \text{ Bq/m}^3$  olarak bulunmuştur. Halbuki M1 ve M2 hatlarında bulunan Yenikapı istasyonlarının derinlikleri aynı seviyededir ve 20 m dir. Bu farklılık havalandırma koşulları başta olmak üzere yolcu yoğunluğu, yüzey alanı ve sıcaklık gibi fiziksel etmenlerden kaynaklanmaktadır. Yenikapı istasyonları fay hattı üzerindedir.

M2 hattında derin istasyonlarda diğer istasyonlara kıyasla daha yüksek değerler bulunmuştur. Peronlarda ise tren sirkülasyonu ve peron alanının büyüklüğünden dolayı Yenikapı seviyesi daha düşük değerler çıkmıştır. Genellikle peronlarda derinlikler birbirine yakın seviyede olduğu için Radon konsantrasyonları da birbirine yakın değerlerde çıkmıştır. Ofislerin pencere gibi doğal hava kaynakları olmadığından bu mekanlarda Radon gazı birikmiş olup bir istasyondaki ofis, turnike ve peronları kıyasladığımızda en yüksek veriler ofislerde çıkmaktadır. Peronlarda ölçüm aletlerinin şaft bölgesi ya da peron duvarına konulması elde edilen Radon konsantrasyonlarına büyük oranlarda etki etmemektedir. Yapım yılları da Radon miktarlarına etki eden faktörlerdendir. Daha eski yapım tarihli bina/tünel ortamlarında Radon gazı daha çok birikme yapmaktadır. Ayrıca zaman geçtikçe yapı malzemelerinde oluşan çatlak, kırık vb deformeler Radon gazının kaçışına imkan vermektedir.

Havalandırma ise yer altı yapılarında Radon miktarının etkileyen en önemli faktördür. Kuvvetli havalandırmalar Radon seviyesini düşürürken havalandırmanın olmadığı yerlerde zamanla yoğun bir şekilde Radon birikmektedir. Metro istasyonlarında havalandırma genellikle trenlerin geçişlerinde oluşturduğu hava akışı ile sağlanmaktadır. İstanbul metrolarında tren sefer sıklıkları 4 dakika olduğu için genellikle 2 dakikada bir hava temizlenmektedir. Yaz ve kış aylarında istasyonların sıcaklıkları arasında büyük bir fark olmadığından aynı durum geçerlidir.

Bu çalışma kış döneminde yapılmıştır. İstasyon peron sıcaklıkları genellikle 18-20 °C arasında değişim göstermiştir. İstasyon tipinin Radon miktarına etkisi son zamanlarda dikkat çeken bir parametredir. Yolcu yoğunluğu ise temiz havayı azaltan bir faktördür.

M1 hattında, Yenikapı istasyonu çalışma ofisi bu hattaki diğer istasyonlara göre daha derinde bulunduğu için ofisler arasında en çok değer burada gözlemlenmiştir. Diğer istasyonlarda ofisler cadde seviyesine çok yakındır. Turnikeler içinde aynı durum söz konusudur. Turnikeler cadde seviyesine çıkan yürüyen merdiven bantlarının hemen yakınındadır. Peronlar için Bakırköy ve Yenikapı istasyonlarında söz konusu hat içinde yüksek değerler çıkmıştır. Bu durum derinlik ile ilişkilendirebilir. Bakırköy istasyonunun bir tarafı açık olup gün ışığı almaktadır ve peron alanı diğer istasyonlara göre daha geniştir. Trenler yan yana geçiş yapmaktadır ve tren geçiş alanı tünel yolu diğer istasyonlara göre daha geniştir. Bahçelievler ve Bakırköy aynı yapıdadır fakat Bahçelievler'in tünel girişleri açık hava almamaktadır. Bu hatta genel olarak peron ve turnike-ofis katları arasında yükseklik farkı çok az olduğu için Radon değerleri birbirine yakın bulunmuştur. Ayrıca Radon–derinlik değerleri de uyum içerisindedir. İstasyon genel yapısı benzer şekilde olup orta peron şeklinde dizayn edilmiştir. Peron, turnike ve ofis basınç değerleri birbirine çok yakındır. Bakırköy istasyonu alüvyon, Bahçelievler mahali ise kireçtaşı yapısındadır.

M1a hattındaki Radon konsantrasyon farkları, bazı istasyonların fayans/seramik ile kapatılması bazılarının beton kalması ya da peronların bir kısmının fayans bir kısmının beton duvar olması ile ilişkilendirilebilir. Eski bir hat olmasına rağmen hat üzerindeki benzer yapıdaki istasyonlarda benzer Radon değerleri görülmüştür ve derinlik değerleri birbirine yakındır. Yapım yılının eski olmasına rağmen Radon değerlerinin düşük olması fazla derin olmamalarıyla açıklanabilir. Trenler yan yana geçecek şekilde orta peron modelinde dizayn edilmişlerdir. Rüzgârlı ya da çok soğuk bir hat değildir. Yenikapı istasyonu 2014 yılında hizmete açılmış olup 20 m derinliğindedir. Bakırköy istasyonu 1995 yılında hizmete açılmış olup 18 m derinliğindedir. Peron seviyelerinde, Bakırköy İstasyonunda daha fazla miktarda Radon çıkması yapım yılından kaynaklanmaktadır.

M1b hattında en derin istasyon Bağcılar istasyonudur ve burada en derin turnike Bağcılarda bulunduğu için Radon seviyesi bu turnike de daha fazla çıkmıştır. Çalışma ofisleri için derinlik seviyeleri farklı olmakla beraber ilgili kuruluş olan belediyede bu derinlik bilgileri mevcut olmadığından çalışma ofislerinde derinlik-Radon kıyaslaması yapamayız. M1b hattında

istasyonlarda peron platformları seramik ve tren geçiş yolları betondur. Kirazlı istasyonunun ofis alanı daha havadar ve rüzgârlı alanda olduğu için buradaki çalışma odasında daha düşük Radon değeri bulunmuştur. Bağcılar istasyonu alüvyon yapı üzerine inşa edilmiştir.

M2 hattında ise Haliç İstasyonu, Haliç Metro Köprüsü üzerinde yer almaktadır. Bunun dışında kalan tüm istasyonlar tünel/yeraltı istasyonu olarak inşa edilmiştir. 4 adet orta peron ve 10 adet yan peron bulunan hatta Yenikapı İstasyonu 3 yol - 2 orta peron, Sanayi Mahallesi İstasyonu 3 yol - 3 yan peron ile inşa edilmiştir. M2 hattında Hacıosman derin bir istasyon olmasına rağmen 2011 yılında hizmete açıldığı için peron Radon değeri daha düşük bulunmuştur. Ofis ve turnikelerdeki değerlerin yüksek oluşu derin bir istasyon olmasıdır. 2014 yılında hizmete açılan Vezneciler istasyonunda ise derinlik söz konusu olduğundan beklenen ve diğer istasyonlar ile uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Taksim istasyonundaki Radon değerlerinin en eski istasyon olması(2000 yılı) ve dolayısıyla Radon gazı birikimiyle açıklayabiliriz. Ayrıca en yoğun istasyonlardan biri olması ve insan kalabalığı, temiz hava yetersizliği sebebiyle bu değer yüksek çıkmıştır. Yenikapı istasyonu ise 2014 yılında açılmış olup değerler insan yoğunluğu ile açıklanabilir. Ofislerin bazılarının havalandırmasının çalışan personel tarafından açılması veya kapıların açık olması ve cadde seviyelerine yakınlık, ofislerdeki Radon değerlerindeki değişimlerin sebebidir. Şişhane istasyonu ise 2009 yılında açılan derin bir hattır fakat ofisler, istasyonun geniş olması ve yolcu azlığı sebebiyle daha temiz havaya sahiptir. Ofis Radon seviyesi bu sebeple düşüktür. Bu hat üzerindeki istasyonlardaki derinlik ve Radon değerleri birbirine yakındır. Gayrettepe tren yolu ve bekleme platformu seranittir ve orta peron kullanılmaktadır. Vezneciler tren yolu betondur peron bekleme alanları seranittir. Yenikapı bekleme alanları seranit ve mermer içermektedir. Tren geçiş yolu betondur. Darüşşafaka peron duvarları sinterfleks olmakla beraber tren geçiş yolu betondur. Hacıosman bekleme platformu sinterfleks ve tren yolu betondur. Yan peronlar kullanılmakla beraber yan peronlar arası mesafe geniştir ve aynı anda tren geçişleri hava sirkülasyonuna sebep olmaktadır. Levent istasyonu dar bir alandır. Tren yolu seranit ile kaplanmıştır. Sanayi istasyonu tren geçiş yolu beton ve bekleme platformu seranittir. Sonuçları yapım yılı, derinlik ve havalandırma ile yolcu yoğunluğuna bağlayabiliriz. Bu hatta istasyonların pek çoğu yan peron şeklindedir. Yolcu yoğunluğu fazladır. Genellikle seranit peron platformları ve beton tren yolu içermektedir. Genel olarak derinlikler birbirine yakın değerlerdir ve İstanbul hatları için derin bir hattır bu sebeple Radon miktarları birbirine yakındır ve uluslararası kuruluşların belirttiği değerlerin altında değerler elde edilmiştir.

M3 Başakşehir Metro Hattında; Olimpiyat İstasyonu 2 peron - 3 hat, İkitelli Sanayi İstasyonu konkors katında aktarma imkanı veren 2 orta peron ve 4 hat ile inşa edilmiştir. Hattın tüm istasyonları, tünel/yer altı istasyon olarak inşa edilmiştir. M3 hattı en eski görünümlü hattır. Duvarlar pütürlü ve nemli, aşırı soğuk ve rüzgârlı hattır fakat yapım yılı bakımından en yeni hatlardan biridir. Hattın tamamı 2013 yılında hizmete açılmıştır. Bu hatta en derin istasyonda en yüksek ofis, turnike ve peron değerleri bulunmuştur. Genel olarak değerlerin düşük çıkışı yolcu azlığına ve yapım yılı itibarıyla yeni bir hat olmasına bağlıdır. Alan olarak geniş bir hattır. Bu durumunda Radon birikimini azaltıcı bir etkisi vardır. İstasyonlardaki havanın soğuk olması ve rüzgarın kendisini fazlasıyla hissettirmesi Radon birikiminin az olmasına katkıda bulunmuştur. İstasyonlar genellikle orta peron şeklindedir.

M4 hattında, Bostancı İstasyonu dışında tüm istasyonlar, yan peron olarak inşa edilmiştir. İstasyon boyları 180 metredir. Yüzey alanı bakımından geniş istasyonlardır ve 8'li tren vagon işletmesine uygun yapıdadır. Bu hat 2012 yılında açılmıştır. Yakacık-Pendik-Tavşantepe etapı ise 2016 yılında açılmıştır. Bu hattın derinlikleri birbirlerine çok yakın olmakla beraber genel olarak istasyon içi mesafeleri geniş ve ferahdır. M2 hattında olduğu gibi istasyonlar arası derinlikler ve Radon değerleri birbirine yakın çıkmıştır. Fay hattı üzerinde bulunmaktadır fakat havalandırmanın iyi olması Radon miktarlarının orantılı olmasına imkan vermiştir. Trenlerin geçişinde hava sirkülasyonu hissedilmektedir. Yeni açılan bir hat olmasına rağmen Radon miktarları derinlik ve istasyon metrekare genişliği ile ilişkilendirilebilir. Yolcu yoğunluğu M1 hatlarına göre daha düşüktür ama Radon değerleri daha fazla bulunmuştur. Bunu derinliğe bağlayabiliriz. İstasyonların sıcaklık değerleri birbirine çok yakındır. M4 hattı kendi içinde benzer derinliklere sahip istasyonları ile hem de yapısal açıdan ve derinlik bakımından benzerlik gösteren M2 hattı ile benzer Radon konsantrasyonlarına sahiptir.

M5 hattında istasyonların tamamı yer altında inşa edilmiştir. İstasyon boyu 140 metredir (Üsküdar İstasyonunda 150 metre). Bu hat, tam otomatik sürücüsüz şekilde işletildiği için tüm peronlarda PAKS (Peron Ayırıcı Kapı Sistemi) bulunmaktadır. Derin istasyonlarda daha yüksek değerler elde edilmiştir. Bağlarbaşı peron bölgesinin düşük çıkma sebebi filmin hasar görmüş olmasıdır. Dedektör filmlerin yerleştirildikleri yerlerde çalışan ya da yolcuların fiziksel teması filmlere zarar vermektedir. Bu hat bünyesinde bulunan otomatik güvenlik kapısı sistemiyle, İstanbul ağının bu özellikteki tek istasyonudur. Radon miktarı bu kapılar sayesinde azalsa da tren piston etkisi ile gelmekte olan temiz hava sirkülasyonuna engel olmaktadır.



İstanbul ağında en son açılan hat olmasına rağmen derinliğinden dolayı değerler yüksektir. Genel ağ yapısında benzer derinliklere sahip hatlarla benzer oranlarda Radon miktarları gözlemlenmiştir. Sürücüsüz tek hat güzergâhıdır. Ölçüm aletlerinin peron duvarları ya da şaft duvarlarına konulması ya da tren yolunun ön veya arka tarafında kalması Radon değerlerini değiştirmemektedir. Hat boyunca peron bekleme platformları seramik olup tren geçiş yolları betondan yapılmıştır. Peron zeminleri ise granit ile kaplanmıştır. Fay hattı üzerinde bulunuyor olması Radon değerlerinin fazla çıkmasına katkıda bulunmuştur. Yan peron şeklinde inşa edilmişlerdir.

M6 hattında ise tüm istasyonları yer altında inşa edilmiştir. M6 hattı 2015 yılında açılmış olup peron uzunlukları en kısa olan ve yolcu sayısı en az olan istasyondur. Ofisler genellikle cadde seviyesinden 5-6 m derinlikte olup peronlar orta peron şeklinde kullanılmaktadır. Tren geçiş yolu betondur. Tüm istasyonlar için en yüksek değer bu hatta Hisarüstü/Boğaziçi istasyonunda bulunmuştur. Söz konusu hat için derinliği en fazla olan istasyon olduğundan turnike ve peronlardaki değerlerin yüksek bulunması, çalışma ofislerin ise caddeseviyesinden yaklaşık 5 m aşağı seviyede bulunduğundan  $73 \text{ Bq/m}^3$  gibi daha az bir değerde çıkmıştır. Nemin fazla olduğu yerlerde Radon miktarı da fazladır. Peronlardaki değerlerin yüksek çıkması tren hava akımının etkili olmamasına bağlanabilir. Bekleme yerleri ile tren yolu birbirine çok yakındır. Buda birikmiş Radon gazının sirküle olmadan solunmasına yol açıyor diyebiliriz. İstasyon tipinin de Radon miktarını arttırdığı gözlemlenmektedir.

Marmaray hattında ise Kazlıçeşme-Ayrılık Çeşmesi bölümü 13.6 km olup, 3 yeraltı 2 yüzey olmak üzere toplam 5 durak ve istasyon mevcuttur. Üsküdar, Sirkeci ve Yenikapı istasyonlarında ölçüm yapılmıştır. Yolcu yoğunluğu en fazla olan ulaşım vasıtasıdır. Yapım yılı olarak en yeni hatlardandır. 2006 yılında yapımına başlanıp 2013 yılında hizmete açılmıştır. Tünel içerisinde LVT bloklar kullanılmıştır. Yenikapı istasyonunda peronların geniş yapısı ve havalandırma etkisi ile Radon değerleri limit değerlerin altında çıkmıştır. İstasyonlarda peron bekleme platformu seramik olup tren geçiş yolu betondur (sıkılaştırılmış beton). Ülkemiz açısından yolcu yoğunluğunun fazla olduğu bu ulaşım vasıtasında Radon değerlerinin düşük çıkması bu bakımdan değerlendirildiğinde güvenle kullanabileceğimizi göstermektedir. Benzer derinliğe sahip metro istasyonları ile kıyaslandığında daha düşük değerlerin çıkmasının sebebi havalandırmasının çok kuvvetli olması, peronların üstünde havalandırma kanallarının bulunması, peron uzaklıklarının çok uzun olması ve peronların geniş ve havadar olması ile

açıklanabilir. Sirkeci istasyonunda havalandırma kanallarının çok etkin bir şekilde kullanılması İstanbuldaki en derin istasyon olması ve dünyadaki metro ağlarında derinliğiyle ilk sıralarda yer almasına rağmen Radon konsantrasyonlarının düşük çıkmasını sağlamıştır. Marmaray çalışma ofsilerinde ve turnikelerinde metro istasyonlarında olduğu gibi doğal havalandırma kanallarının bulunmaması ve kapalı mekanlar olması sebebiyle yüksek çıkmıştır. Yapım yılından dolayı yeni bir hat olması Radon miktarının birikmemesine katkıda bulunmuştur. Sirkeci istasyonu deniz üstüne inşaa edildiği için yapılan teknik tasarımlar, beton yapısı, delik, çatlak vs bulunmaması Radon miktarının düşük olmasını sağlamıştır. Fay hattı üzerindedir.

Marmaray Yenikapı Peron değerini (13 m-170 Bq/m<sup>3</sup>), M1(20 m-88 Bq/m<sup>3</sup>) ve M2(20 m ve 150 Bq/m<sup>3</sup>) hattı peron değerleri ile kıyasladığımızda biraz daha fazla değer bulunmuştur.

Bu çalışma genelinde en fazla Radon değerlerinin bulunduğu mahaller Hisarüstü, Etiler, 4.Levent ve Hastane /Adliye mevkii, en az çıktığı mahaller ise Atatürk Havalimanı, Kısıklı ve Kadıköy mevkileridir.

Ölçüm noktası olan yetmiş tane istasyonun peronlarında yapılan ölçümlerin % 41.42'si 100 Bq/m<sup>3</sup> değerinden düşük, % 54.28'i 100-200 Bq/m<sup>3</sup> değer aralığında, % 2.85'i 200-300 Bq/m<sup>3</sup> değer aralığında ve % 1.42 si 300 Bq/m<sup>3</sup> ten büyük değerler çıkmıştır.

Sonuç olarak yaşadığımız ortamlarda, iş yerlerinde özellikle kapalı ortamlarda ve yer altı alanlarında Radon gazının tespiti sağlımız açısından önem taşımaktadır. Öyledir ki bazı dünya ülkelerinde ev alım satımlarında ve bina inşaatlarında Radon değerlerine göre sonuca varılmaktadır. Bu çalışma kapsamında İstanbul yer altı ulaşım ağında Radon seviyeleri belirlenmiştir. Elde edilen veriler ülkemizde radyasyondan korunmada tek yetkin kurum olan TAEK'in uluslararası standartlara göre belirlediği limit değerlerin altında bulunmuştur. İstanbul gibi nüfus yoğunluğu dolayısıyla trafik yoğunluğunun bulunduğu şehirlerde yer altı ulaşım sistemleri önemli bir yer arz etmektedir. Bu çalışma sonucunda yer altı Radon miktarlarına etki eden parametreler, derinlik, sıcaklık-nem, basınç, yüzey alanı, insan yoğunluğu, doğal ve mekanik havalandırma, bina yapım yılı, bina yapım malzemesi, fay hattı üzerinde olup olmadığı, bina çatlak sızıntı kırık yapısı, cadde seviyesinden derinlik, inşa edilen yerin kayaç/toprak yapısı olduğu sonuçlarına varılmıştır. Ayrıca zemindeki yer altı sularının da az da olsa Radon miktarını artırıcı etkisi olmaktadır. Ülkemizde de yeni inşaat başlangıcından önce çevresel doğal radyoaktivite ölçümü yapılmalıdır. İnsanlar radyasyondan korunma

konusunda bilinçlendirilmelidir. Yeni yapılacak olan yer altı istasyonlarında çalışma ofislerinin mümkünse cadde seviyesi veya bu seviyeye yakın yerlerde yapılması, pencere imkânıyla dizayn edilmesi, çalışma ofislerinde radyasyon yayan başka kaynakların bulunmaması, havalandırmaların düzenli olarak çalışması hususlarına dikkat edilmelidir. Aynı şekilde istasyon turnike bölgelerinin de havalandırılmasına önem verilmelidir. İstasyon peronlarında ise zemin ve duvar kaplama malzeme seçiminde yapı malzemelerinin içerdikleri radyoaktivitelere bakılması ve gerekirse TAEK' ten destek alınmasına, kuvvetli bir havalandırma yapılmasına, ortamdaki çatlakların derhal giderilmesine, çevresel radyasyon ölçümü yapılmasına, inşa bölgesindeki jeolojik yapılara dikkat edilmelidir.

Kurum yetkililerince çalışanları radon gazı maruziyetinden korumak için alınabilecek önlemler;

Yapı malzemelerinde kullanılan bileşenler Uranyum, Toryum veya fosfor gibi radyoaktif çekirdekler barındırmaktadır. Yapı malzemesi olarak seçilecek materyallerin yetkili kuruluş TAEK tarafından doğal radyasyon içeriğine bakılabilir ve bunun sonucunda yapı malzemesi olarak kullanımına karar verilebilir.

Ortamlarda özellikle bodrum veya cadde seviyesinden daha derinde bulunan iş yerlerinde toprak ile irtibatının kesilmesi için çatlak vb kapatılması, zeminlerin kimyasallara karşı dayanıklı olan membran ile kaplanması sağlanabilir.

Yapılan bir çalışmada (Ayşe Pişkin, 2016) bina yapılmadan önce yapılan subasman betonunun altında radon gazını hapsedecek kanallar ve boşluklar oluşturulması gerektiğinden bahsedilmiştir. Bu boşluklar, yapı sektöründe sıkça kullanılan kör kalıp sistemleri ile oluşturulabilir. Kör kalıplar tek kullanımlık olup temele yerleştirildikten sonra çıkarmaya gerek kalmaz ve binaların toprakla irtibatını keser. Böylece oluşturulan boşluklarda hapsolan radon gazı binaya giriş yapamaz. Zamanla yapıların yıpranmasıyla hem temelinde hem de duvarlarında delikler, çatlamlar ve yarıklar oluşur. Bu şekilde yıpranmış yapılarda radon gazı seviyesi yüksek olacağından gerek yapı temelinde bulunan gerekse de yapı içinde bulunan çatlaklar, yarıklar ve delikler sıva işlemi ile kapatılmalıdır. Böylelikle Radon gazı yapı içine sızamaz ve birikim oluşturamaz. Yapılarda kullanılan PVC pencereler iyi bir yalıtım sağladıklarından radon gazı birikimine eğilimli binalarda radon gazı tahliyesini engelleyecektir. Ahşap pencereler ise doğal malzemedan üretilmekte ve hava akışını kısmen sağlamaktadır. PVC pencerelerin kullanılmasının zorunlu olduğu durumlarda vasistas kullanılması Radon gazı

birikimini önlemede yardımcı olacaktır. Fakat yer altı çalışma yerlerinde bu faktörün etkisinden söz edilemez. Diğer taraftan Radon gazının yapı içinde birikim yapmasını önlemenin en etkili, en ucuz ve en kolay yöntemi iyi bir havalandırma sistemidir. Çalışılan ya da yaşanan ortamlarda her gün düzenli olarak kapı ve pencere açma gibi basit bir yolla etkin bir havalandırma sağlanması bile radon gazı miktarını azaltacaktır. Son zamanlarda inşa edilen yapılarda yapı sektörünün de gelişmesiyle beraber enerji verimliliği için sızdırmaz kapı ve pencereler bulunmaktadır. Ancak bu sızdırmazlık, radyoaktivite analizi yapılmamış dolayısıyla doz değerleri bilinmeyen inşaat malzemelerinin kullanıldığı yapılarda yapı malzemelerinden kaynaklı olan bina içi radon ışıması sonucu oluşan radon gazının birikimini kolaylaştırabilir. Kapalı ortamlarda temiz hava bulunmasının bilincine ulaşılmasıyla son yıllarda ayarlanabilir ve otomatik havalandırma sistemine sahip pencereler tasarlanmıştır. Bu tasarımlar pencere kapalıyken bile ortamda devamlı taze hava olmasını sağlar.

Evlerde yapılan çalışmalar ile kıyaslanıldığında yer altında olmasına rağmen istasyonlarda elde edilen veriler düşük miktarlarda ve risk oluşturmamaktadır.

Sigaranın sağlığa zararları bilinmesiyle beraber Radon ve sigara dumanının aynı anda solunmasının sağlığa zararı artarak sürmektedir. Yaşadığımız ortamın Radon tespitinin yapılması ve sigara içilmemesi sağlık açısından önem arz etmektedir. Sigara dumanının yapısında bulunan zararlı partiküller havada asılı kalmaktadır. Radon gazının bozunum ürünü olan toron ve aktinon asılı partiküllere yapışır. Bu durumda ortamdaki bu partiküllerin solunmasıyla birlikte akciğerlere sigara dumanının verdiği zarar Radon gazının zararıyla birleşerek katlanarak artmış olur. Bu sebeple Radon gazının ve sigara dumanının birlikte oluşturduğu zarardan korunmak için kapalı ortamlarda sigara içilmemelidir.

İstanbul metro ağında iş sağlığı ve güvenliği bakımından gürültü, toz, sıcaklık, hava akım hızı ve nem gibi termal konfor parametreleri, aydınlatma, titreşim düzeyleri gibi faktörler düzenli olarak ölçülmektedir. Bunlara ilaveten Radon gazının insan sağlığı etkilerinin özellikle yer altı ve kapalı ortamlardaki belirlenmesi için istasyonlarda düzenli olarak Radon ölçümü yapılmalıdır.

İstanbul metro ve Marmaray yer altı istasyonları Radon sağlığı açısından risk taşımamaktadır.

## KAYNAKLAR

- [1]. *Günlük hayatımızda radyasyon (Radon Ve Sigara)*, [http://www.taek.gov.tr/ogrenci/bolum4\\_02.html](http://www.taek.gov.tr/ogrenci/bolum4_02.html), [Ziyaret tarihi: 15 Eylül 2018].
- [2]. Zeeb, H., ve Shannoun, F., 2009, Who handbook on indoor Radon a public health perspective, *WHO Library Cataloguing-in-Publication Data*, ISBN 9789241547673.
- [3]. UNSCEAR, 1988, *Sources, effects, and risks of ionizing radiation*, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 1988 report to the General Assembly, 88 (7).
- [4]. ICRP, 1993, “Protection against Radon-222 at home and at work”, ICRP Publication 65 Ann, ICRP 23 (2).
- [5]. Schrobilgen, G.J, *Radon*, <https://www.britannica.com/science/Radon>, [Ziyaret Tarihi:18 Aralık 2018].
- [6]. Kürkçüoğlu M.E. ve Bayraktar G., 2012, Süleyman Demirel Üniversitesi’nde bina içi Radon konsantrasyonlarının nükleer iz dedektörleri kullanılarak belirlenmesi, *Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 16 (2) ,167-183.
- [7]. NCRP, 1988 Report, *Measurements of Radon and Radon daughters in air*, 97, 174.
- [8]. Durrani, S.A. ve Ilic. R., 1997, Radon measurements by etched track detectors, applications in radiation protection, *World Scientific Publishing Company*, ISBN-10: 9810226667.
- [9]. Uluslararası Radyasyondan Korunma Komitesi, ICRP, 2009.
- [10]. Çimen B., Erdoğan M., Oğul R., 2017, İyonlaştırıcı radyasyon ve korunma yöntemleri, *Selçuk Üniversitesi Fen Fakültesi Fen Dergisi*, 43 (2), 139-147.
- [11]. Değerlier M., 2007, *Adana ili ve çevresinin çevresel doğal radyoaktivitesinin saptanması ve doğal radyasyonların yıllık etkin doz eşdeğerlerinin bulunması*, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi.
- [12]. *Radon and health*, 2016, <http://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/Radon-and-health>, [Ziyaret tarihi: 13 Ekim 2018].
- [13]. [www.radon.com.tr](http://www.radon.com.tr), [Ziyaret tarihi: 22 Kasım 2018].
- [14]. TAEK, Radyasyon Güvenliği Yönetmeliği, Resmi Gazete Tarihi: 24.03.2000 Resmi Gazete Sayısı: 23999
- [15]. Kanada Nükleer Güvenlik Komitesi, CNSC, 2011, Radon and Health INFO-0813.
- [16]. Andersén C., 2015, *Time-resolved measurements of Radon concentration in the Stockholm subway tunnels*, Yüksek Lisans Tezi, Gothenburg Üniversitesi.

- [17]. www.taek.gov.tr, [Ziyaret tarihi: 13 Ekim 2018].
- [18]. Zielinski J.M., 2014, *Mapping of residential Radon in the world*, Health Canada and Department of Epidemiology and Community Medicine, Ottawa Üniversitesi.
- [19]. TAEK, 2014, *Konutlarda Radon Ölçümü*, Teknik Rapor.
- [20]. Ayotte. P. ve diğerleri., 1998, Indoor exposure to 222Rn: a public health perspective, *Health Physics*, 75, 297-302.
- [21]. ICRP, 2007, The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, *ICRP Publication 103*, 37 (2-4), 1-332.
- [22]. ICRP, 2011, Radiological Protection Against Radon Exposure, *Draft report for consultation*.
- [23]. Çelebi N., Ataksoy B., Taşkın H. ve Albayrak Bingöldağ N., 2014, Indoor Radon measurements in Turkey dwellings, *Radiation Protection Dosimetry*, 167 (4), 626-632.
- [24]. UNSCEAR, 2000, *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.
- [25]. Öztürk. E., 2012, *Erzincan ili ev içi Radon konsantrasyonunun mevsimsel değişimi ve topraktaki radyoaktivitenin tayini*, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi.
- [26]. Kearfortt, K. J., Metzger. R. L., Holbert. K. E, 1992, Underground air returns as active transportation pathways for Radon as entry into homes, *Health Physics*, 63, 665-673.
- [27]. Bozkurt V., 2008, *Niğde ilinde bulunan tarihi mekanlardaki Radon gazı ölçümleri*, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi.
- [28]. Li. Y., Schery. D. S., ve Turk. B., 1992, Soil as a source of indoor Radon, *Health Physics*, 62, 453-457.
- [29]. TAEK, 2017, *Kapalı Ortamlarda Radon ve Yapı Malzemelerindeki Radyoaktiviteye ilişkin Kılavuz*, RSGD-KLV-013.
- [30]. IAEA, 2015, Protection of the Public against Exposure Indoors due to Radon and Other Natural Sources of Radiation, *Specific Safety Guide*, 32, International Atomic Energy Agency, Vienna.
- [31]. Haner B., Yılmaz A., Kürkçüoğlu M.E., Karadem A., 2010, *Mencilis (Bulak) Mağarasında Radon seviyesi ölçümleri*, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 14 (3), 218-224.
- [32]. UNSCEAR, 1988, Report. A.B.D., Çevre Koruma Ajansı (EPA, Environmental Protection Agency).
- [33]. Örgün Y, Çelebi N., Radyasyon, Radon (Rn) ve toplum sağlığı, *Jeoloji Mühendisleri Odası Haber Bülteni*.

- [34]. Fişne A., Ökten G., Çelebi N., 2004, Türkiye Taşkömürü Kurumu (TTK) yeraltı maden ocaklarında Radon gazı yayılımının incelenmesi, *Türkiye 14. Kömür Kongresi Bildiriler Kitabı*, Zonguldak, Türkiye, Bildiri kitabı, 193-202.
- [35]. Tarakçı M., 2013, *Tektonik aktivite İle Radon değişimleri arasındaki ilişkilerin doğrusal olmayan analiz ile değerlendirilmesi*, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi.
- [36]. Ghosh. D., Dep. A., ve Sengupta. R., 2009, Anomalous Radon emission as precursor of earthquake, *Journal of Applied Geophysics*, 69, 67-81.
- [37]. Asada T., 1982, Earthquake prediction techniques, their application in Japan, *Japan University of Tokyo Press*, 64, 11.
- [38]. Igarash I.G., Saek.N., Takahata K., 1995, Ground-water Radon anomaly before the Kobe earthquake in Japan, *Science*, 269 (5220), 60-61.
- [39]. Kapdan E., 2009, *Adapazarı merkezi kış dönemi Radon ölçüm ve analizleri*, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi.
- [40]. *Doğal Radyasyon Kaynakları*, <http://www.taek.gov.tr/tr/2016-06-09-00-43-46/1087-dogal-radyasyon-kaynaklari.html>, [Ziyaret tarihi: 27 Aralık 2018].
- [41]. Davutoğlu H., 2008, *Radon gazı ölçme metotları*, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi.
- [42]. Pişkin A, 2016, *Ofis çalışanlarının Radon gazı maruziyetinin nükleer iz dedektör yöntemine göre belirlenmesi ve sağlık üzerine etkileri*, Yüksek Lisans Tezi, Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı.
- [43]. Karakaş T., 2017, *İzmir metrosu kapalı istasyonlarında Radon aktivite konsantrasyonlarının belirlenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi.
- [44]. K.N. Yu., E. C. M. Young., ve K C Wong., 1996, A survey of Radon properties in underground railway stations in Hong Kong, *J. Radiol. Prot.* 16 (1), 37-43.
- [45]. A.F.Hafez., A.S. Hussein and N.M.Rasheed., 2000, Radon measurments in underground metro stations in Cairo City, Egypt, *Cairo, Egypt Seventh Conference of Nuclear Sciences & Applications*.
- [46]. Sabol J., 1996, Radon exposure of passengers in the Prague Metro, *IRPA9 International congress on radiation protection*.
- [47]. M. Doi and S. Kobayashi, 1996, Surveys of concentration of Radon isotopes in indoor and outdoor air in Japan, *Environment International*, 22 (1), 649-655.
- [48]. Myeong Han Song, Byung-Uck Chang, Yong Jae Kim, Hwa Yong Lee ve Dong-Hey Heo, 2010, Radon in the underground workplaces; assessment of the annual effective dose due to inhaled radon for the Seoul subway station staffs, *Journal Of Radiation Protection*, 35, 4.

- [49]. Myeong Han Song, Byung-Uck Chang, Yong Jae Kim, Hwa Yong Lee ve Dong-Hey Heo, 2011, Radon exposure assessment for underground workers: a case of Seoul subway police officers in Korea, *Radiation Protection Dosimetry*, 147 (3), 401-405.
- [50]. Yoon S., Chang B., Kim Y., Byun J., Yun L., 2010, Indoor Radon distribution of subway stations in a Korean major city, *Journal of Environmental Radioactivity*, 101 (4), 304-308.
- [51]. Sung Ho Hwang, Jae Bum Park ve Wha Me Park, 2018, Radon ve NO2 levels and related environmental factors in 100 underground subway platforms over two-year period, *Journal of Environmental Radioactivity*, 181, 102-108.
- [52]. J. Liendo., L. Sajo-Bohus., J. Palfalvi., E.D. Greaves ve N. Gomez., 1997, Radon monitoring for health studies in the Caracas Subway using ssntds, *Radiation Measurements*, 28 (I-6), 729-732.
- [53]. Çoşgun A., 2012, *Antalya ilinde farklı ortamlarda iç hava kalitesinin araştırılması ve modellenmesi*, Doktora tezi, Balıkesir Üniversitesi.
- [54]. 'M. Talaeepour., 'F. Moattar., 'F. Atabi., 'S. Borhan Azad ve 'A.R. Talaeepour, 2006, Investigation on Radon concentration in the Tehran subway stations in regard with environmental effects, *Journal of Applied Sciences*, 6 (7), 1617-1620.
- [55]. I.Elyasian., H. Meisami., 2015, Disadvantages of Radon in metro station, İran, *International Conference On Modern Research In Civil Engineering, Architectural, And Urban Development*.
- [56]. G. Espinosa ve R.B Gammage, 1995, Radon levels survey in the underground transport metro system in Mexico City, *Radiation Protection Dosimetry*, 59 (2), 145-148.
- [57]. Font, L., Baixeras, C. ve Moreno, V., 2008, Indoor Radon levels in underground workplaces of Catalonia, Spain, *Radiation Measurements*, 43, 467-470.
- [58]. M. Annanmäki and E. Oksanen., 1992, Radon in the Helsinki Metro, *Radiation Protection Dosimetry*, 45, 179-181.
- [59]. TÜİK 2018, *Adrese dayalı nüfus kayıt sistemi sonuçları*, 2017, <http://www.tuik.gov.tr/PreHaberBultenleri.do?id=27587> [Ziyaret tarihi: 12 Aralık 2018].
- [60]. *Ağ Haritaları*, [www.metro.istanbul](http://www.metro.istanbul), [Ziyaret tarihi: 14 Aralık 2018].
- [61]. Sertel, S., 2010, *Metro tünellerinde ve istasyonlarında havalandırma sistemleri ve Marmaray örneği*, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi.
- [62]. *İstanbul*, <http://www.cografya.gen.tr/tr/istanbul/iklim.html>, [Ziyaret tarihi: 1 Aralık 2018].
- [63]. *Anadolu Yakası Mikrobölgeleme Rapor ve Haritalarının Yapılması*, <http://www.ibb.gov.tr/tr->



TR/SubSites/DepremSite/Pages/AnadoluYakasiMikrobolgelemeProjesi.aspx, [Ziyaret tarihi: 31 Aralık 2018].

- [64]. *Avrupa Yakası Güneyi Mikrobölgeleme Rapor ve Haritalarının Yapılması*, <http://www.ibb.gov.tr/tr-TR/SubSites/DepremSite/Pages/AvrupaYakasiGuneyiMikrobolgelemeProjesi.aspx>, [Ziyaret tarihi: 31 Aralık 2018].
- [65]. AFAD, 2018, *Türkiye Deprem Tehlike Haritası*.
- [66]. N. Eskin, 1993, Bir metro istasyon modülünün havalandırma sistemi tasarımı, *TMMOB Makina Mühendisleri Odası Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 8, 52-58.
- [67]. T. R. Kuesel. E. H. King. J. O. Bickel, 1996, *Tunnel engineering handbook*, Springer US, eBook ISBN: 978-1-4613-0449-4.
- [68]. American society of heating refrigerating and air-conditioning engineers (ashrae), heating, ventilating and air-conditioning applications handbook, 1999.
- [69]. E. Tabar, 2010, *Dikili ve Bergama bölgelerindeki tektonik aktivitenin jeotermal sularda Radon ölçümleri ile değerlendirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi.
- [70]. R.L. Fleisher., 1975, Nuclear tracks in solids: principles and applications, *California University of California Press*, ISBN 0520026659, 9780520026650.
- [71]. Tüfekçioğlu F., 2015, *Radon konsantrasyonlarının ölçümü ve süreksizliklerinin araştırılması*, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi.
- [72]. Öztürk, H., 2015, *Gama Işını ya da Işınımı*, [http://www.yaklasansaat.com/evren/yildiz\\_ve\\_yasami/gama\\_isini1.asp](http://www.yaklasansaat.com/evren/yildiz_ve_yasami/gama_isini1.asp), [Ziyaret tarihi: 27 Aralık 2018]
- [73]. Metro İstanbul A.Ş., *Faaliyet Raporu*, 2017.
- [74]. *Hatlarımız*, <https://www.metro.istanbul/Hatlarimiz>, [Ziyaret tarihi: 15 Kasım 2018].
- [75]. 2018, *Haberler*, <https://www.metro.istanbul/haber/detay/m5-surucusuz-metro-hatti-avrupada-1-dunyada-3>, [Ziyaret tarihi: 23 Kasım 2018].
- [76]. Kurt, A., 2015, *İstanbul ili Fatih ilçesi ilköğretim okullarında iç hava Radon konsantrasyonlarının belirlenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi.

**EKLER****Ek 1: İstasyon Koordinatları**

<b>İstasyon adı</b>	<b>Enlem</b>	<b>Boylam</b>
M1a Yenikapı	41.005098	28.950342
M1a Aksaray	41.011613	28.948713
M1a Emniyet	41.017996	28.938766
M1a Ulubathı	41.023978	28.929565
M1a Bakırköy	40.996613	28.875307
M1a Bahçelievler	40.995644	28.863534
M1a Havalimanı	40.979866	28.819917
M1b Menderes	41.042743	28.878610
M1b Üçyüzlü	41.036968	28.871116
M1b Bağcılar	41.034683	28.856261
M1b Kirazlı	41.032481	28.842889
M2 Yenikapı	41.005098	28.950342
M2 Vezneciler	41.011980	28.959756
M2 Şişhane	41.028661	28.974896
M2 Taksim	41.037010	28.985768
M2 Osmanbey	41.053784	28.987096
M2 Şişli/Mecidiyeköy	41.063964	28.992404
M2 Gayrettepe	41.069626	29.011355
M2 Levent	41.075896	29.015034
M2 4.Levent	41.084807	29.007047

M2 Sanayi Mah	41.094866	29.005233
M2 İTÜ Ayazaga	41.108463	29.019559
M2 A.Oto Sanayi	41.118491	29.023942
M2 Darüşşafaka	41.130156	29.025264
M2 Hacıosman	41.139699	29.030233
M3 Metrokent(Başakşehir)	41.107617	28.801279
M3 Başak Konutları	41.097350	28.791040
M3 Siteler	41.088140	28.796367
M3 Turgut Özal	41.080769	28.797318
M3 İkitelli Sanayi	41.071555	28.803249
M3 Olimpiyat	41.079451	28.768459
M3 Ziya Gökalp Mh	41.074488	28.786825
M3 İstoç	41.064641	28.826323
M3 Mahmutbey	41.054309	28.830606
M3 Yenimahalle	41.041073	28.835898
M3 Kirazlı	41.032481	28.842889
M4 Kadıköy	40.991250	29.022274
M4 Ayrılık Çeşmesi	41.000358	29.030229
M4 Acıbadem	41.002000	29.045400
M4 Ünalán	40.997328	29.059367
M4 Göztepe	40.99367	29.070305
M4 Yenisahra	40.984560	29.090225
M4 Kozyatağı	40.974663	29.100060

M4 Bostancı	40.964680	29.104818
M4 Küçükyalı	40.948758	29.122404
M4 Maltepe	40.935826	29.139286
M4 Huzurevi	40.929849	29.146042
M4 Gülsuyu	40.923718	29.155043
M4 Esenkent	40.920795	29.166276
M4 Hastane/Adliye	40.915041	29.181184
M4 Soğanlık	40.912821	29.193359
M4 Kartal	40.906692	29.211069
M4 Yakacık	40.895110	29.228960
M4 Pendik	40.888369	29.238842
M4 Tavşantepe	40.882203	29.247212
M5 Üsküdar	41.025599	29.015024
M5 Fıstıkağacı	41.028245	29.028575
M5 Bağlarbaşı	41.021390	29.035060
M5 Altunızade	41.022250	29.045690
M5 Kısıklı	41.022490	29.062290
M5 Bulgurlu	41.016557	29.075503
M5 Ümraniye	41.024810	29.086200
M5 Çarşı	41.025760	29.096640
M5 Yamanevler İstasyonları	41.024920	29.105580
M6 Hisarüstü/Boğaziçi Üniv	41.085514	29.045447
M6 Etiler	41.820073	29.037487

M6 Nispetiye	41.077070	29.023899
M6 Levent	41.075896	29.015034
Marmaray Yenikapı	41.005177	28.951780
Marmaray Sirkeci	41.014948	28.976462
Marmaray Üsküdar	41.025583	29.015019



## ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Hatice YILMAZ ALAN
Doğum Yeri	Ankara
Doğum Tarihi	19.11.1984
Uyruğu	<input checked="" type="checkbox"/> T.C. <input type="checkbox"/> Diğer:
Telefon	
E-Posta Adresi	hyalan@ankara.edu.tr
Web Adresi	



Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	Dumlupınar Üniversitesi
Fakülte	Fen Edebiyat Fakültesi
Bölümü	Fizik
Mezuniyet Yılı	22.08.2007

Yüksek Lisans	
Üniversite	Dumlupınar Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı	Fizik
Programı	Yüksek Enerji ve Plazma Fiziği

Doktora	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı	Fizik Anabilim Dalı
Programı	Nükleer Fizik Programı

Makale ve Bildiriler	
<ul style="list-style-type: none"> <li>H.Duran Yıldız, H.Yılmaz, 2009, Turkish Accelerator Center Structure of Optical Cavities, <i>BPL</i>,16,161023.</li> </ul>	