

152202

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

**SOMA VE TAVŞANLI YERALTI LİNYİT MADEN
OCAKLARINDA RADON GAZI KONSANTRASYON
SEVİYELERİNİN BELİRLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Fiz. Lis. Selim ÇİLE
(304001002)**

152202

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 22 Nisan 2004
Tezin Savunulduğu Tarih : 18 Mayıs 2004**

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Nesrin ALTINSOY

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Hasan SAYGIN

Doç. Dr. Cenap Ş. ÖZBEN

[Signature] 08/06
[Signature] 03/06
[Signature] 08/06

MAYIS 2004

ÖNSÖZ

Soma (Manisa) ve Tavşanlı (Kütahya)'daki yeraltı linyit maden ocaklarında radon gazı ölçümleri yapmak amacıyla yapılan bu tez çalışmasında bana aşamada çok yardımcı olan tez danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Nesrin ALTINSOY' a sonsuz teşekkürlerimi ederim.

Çalışmamın özellikle deneysel kısmında yaptıkları katkılardan dolayı ÇNAEM Sağlık Fiziki Bölüm Başkan' ı Sayın Dr. Nilgün ÇELEBİ' ye ve Sayın Teknisyen Güner KOPUZ' a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarında yardımları dokunan E.L.İ.' de görevli Maden Yüksek Mühendisi Sayın Gülsi YILMAZ' a ve G.L.İ.' de görevli Maden Mühendisi Sayın Tuncay ATA KURU' ya teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca bu tez çalışması süresince bilgilerine başvurduğum Sayın Araştırma Görevlisi Abdullah FİŞNE' ye, Sayın Yrd. Doç. Dr. Birsen AYAZ' a ve beni yalnız bırakmayıp, hep destek olan değerli dostum Berkant MERDANOĞLU' na teşekkür ederim.

Son olarakta her zaman beni seven ve destekleyen, bugünlere gelmemde büyük emekleri olan başta annem olmak üzere tüm aileme en içten duygularıyla teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Nisan 2004

Selim ÇİLE

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	viii
ÖZET	ix
SUMMARY	x
1. GİRİŞ	1
2. ÇEVRESEL RADYASYON KAYNAKLARI	4
2.1. Radyoaktivite ve Radyasyon	4
2.2. Doğal ve Yapay Radyasyon Kaynakları	5
2.1.1. Doğal Radyasyon Kaynakları	6
2.2.1.1. Kozmik Radyasyon Kaynakları	7
2.2.1.2. Karasal Radyasyon Kaynakları	8
2.2.2. Yapay Radyasyon Kaynakları	14
3. RADON VE BOZUNUM ÜRÜNLERİ	15
3.1. Radon	15
3.2. Radonun Bozunum Ürünleri	16
3.3. Radon ve Radonun Bozunum Ürünlerinin Sağlığa Etkileri	16
3.4. Özel Büyüklükler ve Birimler	18
3.4.1. Potansiyel Alfa Parçacık Enerji Konsantrasyonu	18
3.4.2. Denge Eşdeğer Konsantrasyonu	19
3.4.3. Denge Faktörü	19
3.4.4. Çalışma Düzeyi	19
3.4.5. Aylık Çalışma Düzeyi	22
3.5. Radon Konsantrasyon Değerleri	22
3.5.1. Havadaki Radon Değerleri	22
3.5.2. Evlerdeki Radon Değerleri	23
3.5.3. Yeraltı Madenlerinde Radon Değerleri	24
3.6. Radon Konsantrasyon Limitleri	25
3.7. Radon Gazı Ölçüm Teknikleri	26
3.7.1. Kısa Dönem Ölçüm Teknikleri	27
3.7.1.1. Aktif Kömür Tekniği	27
3.7.1.2. Sıvı Sintilasyon Sayım Sisteminde Aktif Kömür	28
3.7.1.3. Alfa İz Dedektörleri	28
3.7.1.4. Elektret İyon Odaları	28
3.7.1.5. Sürekli Monitörler	30
3.7.1.6. Radon Tuzağı Tekniği	31
3.7.2. Uzun Dönem Ölçüm Teknikleri	32
3.7.2.1. Katı Hal Nükleer İz Dedektörleri	32
3.7.2.2. Elektret İyon Odaları	33

3.8. Radon Riskinin Azaltılması İçin Alınabilecek Tedbirler	33
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	37
4.1. Türkiye’ de Kömür Madenciliği	37
4.2. Ölçüm Yapılan Madenlerin Tanıtılması	40
4.2.1. Garp Linyitleri İşletmesi	40
4.2.2. Ege Linyitleri İşletmesi	40
4.3. Ölçüm Tekniği ve Dedektörlerin Hazırlanması	41
4.3.1. Ölçüm Tekniği	41
4.3.2. Dedektörlerin Hazırlanması	41
4.4. Maden Ocaklarındaki Dedektör Yerleştirme Noktaları	42
4.4.1. Tunçbilek Maden Ocağı	43
4.4.2. Ömerler Maden Ocağı	43
4.4.3. Eynez Maden Ocağı	43
4.5. Kimyasal İz Kazıma İşlemi	44
4.6. Kalibrasyon İşlemi	46
4.7. Sayım Tekniği	48
5. ÖLÇÜM SONUÇLARI	49
5.1. Garp Linyitleri İşletmesi Ölçüm Sonuçları	49
5.1.1. Tunçbilek Maden Ocağı Ölçüm Sonuçları	49
5.1.2. Ömerler Maden Ocağı Ölçüm Sonuçları	49
5.2. Ege Linyitleri İşletmesi Ölçüm Sonuçları	52
5.3. Doz Değerlendirmesi	52
6. SONUÇ VE TARTIŞMA	57
KAYNAKLAR	61
EKLER	64
ÖZGEÇMİŞ	67

KISALTMALAR

ASTM	: American Standarts for Testing Materials
ÇNAEM	: Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi
ELİ	: Ege Linyitleri İşletmesi
EPA	: United States Environmental Protection Agency
GLİ	: Garp Linyitleri İşletmesi
ICRU	: International Commission on Radiation Units and Measurements
ICRP	: International Commission on Radiological Protection
NCRP	: National Council on Radiation Protection and Measurements
NRPB	: The National Radiological Protection Board
SLİ	: Seyitömer Linyitleri İşletmesi
TAEK	: Türkiye Atom Enerjisi Kurumu
TKİ	: Türkiye Kömür İşletmeleri
UNEP	: United Nations Environment Programme
UNSCEAR	: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. Radyasyon birimleri ve dönüşüm faktörleri	5
Tablo 2.2. Doğada tek başına bulunan radyoizotoplar	10
Tablo 3.1. Radon ve bozunum ürünlerinin özellikleri	17
Tablo 3.2. Radon ve bozunum ürünlerinin 3700 Bq' deki atom sayıları	20
Tablo 3.3. Çalışma düzeyinin hesaplanması	21
Tablo 3.4. Farklı yerler için havadaki yıllık ortalama radon konsantrasyon değerleri (Bq/m ³)	23
Tablo 3.5. Farklı ülkeler için evlerdeki ortalama radon konsantrasyon değerleri (Bq/m ³)	24
Tablo 3.6. Radon konsantrasyon limitleri (Bq/m ³)	26
Tablo 4.1. Kömürleşme derecelerine göre ASTM kömür sınıflaması	38
Tablo 4.2. Linyit rezervlerinin bölgelere göre dağılımı	39
Tablo 4.3. Tunçbilek İşletmesi dedektör yerleştirme noktaları	44
Tablo 4.4. Ömerler İşletmesi dedektör yerleştirme noktaları	45
Tablo 4.5. Eynez İşletmesi dedektör yerleştirme noktaları	45
Tablo 5.1. Tunçbilek İşletmesi ölçüm sonuçları	50
Tablo 5.2. Ömerler İşletmesi ölçüm sonuçları	51
Tablo 5.3. Eynez İşletmesi ölçüm sonuçları	53
Tablo 5.4. Tunçbilek İşletmesi WLM değerleri	55
Tablo 5.5. Ömerler İşletmesi WLM değerleri	55
Tablo 5.6. Eynez İşletmesi WLM değerleri	56

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Çevremizdeki radyasyon kaynaklarından maruz kalınan radyasyon dozlarının oransal değerleri	6
Şekil 2.2 : Kozmik radyasyon yüksekliğe bağlı olarak değişimi	8
Şekil 2.3 : Uranyum bozunum serisi	11
Şekil 2.4 : Toryum bozunum serisi	11
Şekil 2.5 : Aktinyum bozunum serisi	12
Şekil 3.1 : Radon ve bozunum ürünleri	21
Şekil 3.2 : Havalandırmanın radon konsantrasyonuna etkisi	35
Şekil 4.1 : CR-39 nükleer iz dedektörü	42
Şekil 4.2 : İz örneği	46
Şekil 4.3 : Radon kalibrasyon odası	47
Şekil 4.4 : (x200) Büyütmeli optik mikroskop	48
Şekil 5.1 : Tunçbilek İşletmesi radon konsantrasyon dağılımı	50
Şekil 5.2 : Ömerler İşletmesi radon konsantrasyon dağılımı	51
Şekil 5.3 : Eynez İşletmesi radon konsantrasyon dağılımı	53

SEMBOL LİSTESİ

A	: Aktivite
t	: Zaman
λ	: İzotopun bozunma olasılığı



SOMA VE TAVŞANLI YERALTI LİNYİT MADEN OCAKLARINDA RADON GAZI KONSANTRASYON SEVİYELERİNİN BELİRLENMESİ

ÖZET

İnsanların maruz kaldığı doğal radyasyonun %69' u radon gazından kaynaklanmaktadır. Radon gazı radyoaktif olan uranyum, toryum ve aktinyum elementlerinin bozunumu sonucu açığa çıkmaktadır. Bu radyoaktif elementler doğadaki pek çok maddede bulunduğu gibi kömürde de bulunmaktadır. Yeraltı kömür madenlerinde çalışan işçiler radyoaktif elementlerin bozunumu sonucu açığa çıkan radon gazına maruz kalmaktadırlar. Bu durum yeraltı kömür madenlerinde çalışan işçilerin sağlığını tehdit eden bir unsurdur.

İnsan sağlığı üzerindeki olumsuz etkileri nedeniyle birçok ülkede ev, işyeri ve maden ocaklarında radon gazı ölçümleri yapılmaktadır. Bu çalışmada Soma (Manisa) ve Tavşanlı (Kütahya)' da bulunan yeraltı linyit kömür ocaklarında radon gazı ölçümleri yapılmıştır.

Radon gazı ölçümlerinde Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi (ÇNAEM)' nden temin edilen, ticari adı CR-39 olan "allil diglikol karbonat" nükleer iz dedektörleri kullanılmıştır. Dedektörler maden ocaklarına yerleştirilmiş ve 51 gün süreyle radon gazına maruz bırakılmışlardır. Dedektörlerin kimyasal iz kazıma ve sayım işlemleri ÇNAEM' de gerçekleştirilmiştir.

Ölçüm sonuçları, Uluslararası Radyasyon Korunması Komitesi (ICRP)' nin yeraltı madenleri için belirlediği 500 - 1500 Bq/m³ ve Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK)' nun belirlediği 1000 Bq/m³ radon gazı konsantrasyon limitlerine göre değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçların 50 - 587 Bq/m³ arasında değiştiği bulunmuştur. Bu sonuçlara bakarak elde edilen sonuçların müsaade edilen limitlerin çok altında kaldığı görülmektedir. Dolayısıyla bu maden ocaklarının radon ve radonun bozunum ürünlerinin oluşturacağı sağlık riskleri açısından güvenli oldukları söylenebilir.

DETERMINATION OF RADON GAS CONCENTRATION LEVELS IN SOMA AND TAVSANLI LIGNITE MINES

SUMMARY

Sixty-nine percent of natural radiation that people are exposed is caused by radon gas. Radon gas is the decay product of the uranium, thorium and actinium series. These radioactive elements are available in coal as well as in many materials in nature. In coal mining, the mine workers are exposed to the radon gas, which is produced as a result of the radioactive elements. This is a health threatening issue for coal mine workers.

In many countries, radon gas measurements are performed because of the negative effects on human health. In this work, radon gas measurements were performed in lignite mines in Soma (Manisa) and Tavşanlı (Kütahya).

“Allil diglikol carbonate” CR-39 nuclear track detectors, supplied from Cekmece Nuclear Research and Training Center (CNRTC) were used in these radon gas measurements. The detectors were placed in lignite mines and were exposed to the radon gas for 51 days. Chemical etching of the detector tracks and subsequent counting were performed at CNRTC.

The measured results were evaluated according to International Commission of Radiation Protection (ICRP) and the Turkish Atomic Energy Association (TAEA) whose concentration limits are 500-1500 Bq/m³ and 1000 Bq/m³, respectively. The radon gas concentrations in the lignite mines were determined to be between 50-587 Bq/m³. The results obtained in these experiments are far under the permissible limits. As a result, it can be concluded that the radon gas and radon gas products in these lignite mines are safe in terms of risk to health.

1. GİRİŞ

İlk canlı organizmanın oluşumundan bu yana tüm canlılar sürekli olarak radyasyona maruz kalmaktadırlar. Hemen her türlü kaya ve toprakta bulunan ^{238}U ' in zincirleme bozunumu esnasında oluşan çekirdeklerden biri ^{226}Ra ' dır. Bozunma zincirinin devamı olarak, ^{226}Ra ' nın bozunması sonunda radon atomları oluşmaktadır. Radon gazı bu atomların birikmesiyle oluşan, renksiz, kokusuz ve tatsız bir gazdır. Radon gazı, 86 atom numarasıyla periyodik cetvelin soygazlar sınıfında yer almaktadır (EPA, 1987; Durrani ve Iliç, 1987).

Radonun kaynağı, bütün kaya ve topraklarda bulunan ^{238}U olduğu için, ev ortamlarında, maden ocaklarında, tünellerde, mağaralarda ve yer altı sularında radona rastlanmaktadır.

Radonun, uzun bozunum zinciri içindeki gaz olan tek element olması önemini arttırmaktadır. Çünkü gaz oluşu nedeniyle yeryüzünde uzak mesafelere kolayca taşınabilmektedir. Ayrıca yine gaz olması nedeniyle teneffüs edilebilmekte, bu da ciddi sağlık sorunlarına yol açmaktadır (Durrani ve Iliç, 1997).

Radon gazı alfa ve beta parçacıkları yaymakta olup, solunum yoluyla akciğerlere ulaşarak akciğer kanserine yakalanma riskini arttırmaktadır. Radon bozunduğu zaman, kısa yarı ömürlü bozunum ürünleri oluşmaktadır. Örneğin bunlardan Polonyum-228' in yarı ömrü 3 dakika civarındadır. Bu süre elektrik yüklü Polonyum' un mikroskobik boyuttaki havadaki toz parçacıklarına yapışması için yeterli bir süredir. Bu hava teneffüs edildiğinde, bu küçük parçacıklar bronşlardaki nemli epital hücrelerine yapışırlar. Bronşlardaki pek çok toz parçacığı aslında mukus tarafından temizlenir. Fakat bu süreç radonun bozunum ürünlerinin alfa parçacığı yayınlamasını engelleyecek kadar hızlı gerçekleşmez. Menzilleri kısa olan alfa parçacıkları fazla uzağa gidemedikleri için, ciğerlerdeki hassas hücrelere zarar vermeye başlarlar. Bir alfa parçacığı, epital hücreleri öldürecek yada dönüştürecek yeterli miktarda enerjiye sahiptir. Dönüşen hücre diğer hücrelerle etkileşerek bu olayı bir akciğer kanserine kadar götürebilmektedir (EPA, 1987).

Amerika Birleşik Devletleri'nde her yıl 80.000 civarında akciğer kanseri vakası görülmektedir. Bunların %6-12 kadarlık kısmının radondan kaynaklandığı tahmin edilmektedir (Eisenbud, 1987). Bu da her yıl radondan kaynaklanan yaklaşık 5.000-10.000 akciğer kanseri vakası anlamına gelmektedir.

Bu nedenle, Uluslararası Radyasyon Korunması Komitesi, radona maruz kalma konusunu inceleyerek "Evde ve İşyerinde Radon-222' ye Karşı Korunma" konusunda 65 No' lu bir rapor yayınlamıştır. Bu raporda radona maruz kalma sınırlandırılarak, limit değerler tavsiye edilmiş ve yıllık doz için bir eylem seviyesi tespit etmiştir. Eylem seviyesinin 3-10 mSv arasında sınırlandırılması tavsiye edilmiştir. Bu doz değerlerine karşılık gelen radon konsantrasyonu için evler de 200-600 Bq/m³, iş yerlerinde ise 500-1500 Bq/m³ arasında bir değer tespit edilmesi önerilmiştir (Çelebi, 1995).

Örneğin evlerde eylem seviyesi olarak radon miktarını, İngiltere' de NRPB (The National Radiological Protection Board) 200 Bq/m³, Kanada 800 Bq/m³, Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı EPA 148 Bq/m³ olarak belirlemiştir. Türkiye' de ise "TAEK Radyasyon Güvenliği Yönetmeliği" inde solunum yoluyla izin verilen radon konsantrasyonu değerleri yıllık ortalama olarak evlerde 400 Bq/m³, iş yerlerinde 1000 Bq/m³ olarak belirlenmiştir (Fişne, 2002).

Tarihsel olarak bakıldığında, 16. Yüzyıldan beri Almanya ve Çekoslavakya' daki yeraltı maden işçileri aşırı derecede solunum sistemi ve ona bağlı hastalıklara maruz kalmışlardır. 18. yüzyılın sonunda yeraltı uranyum madenlerinde çalışan pek çok işçinin ani ölümü, problemi had safhaya ulaştırmıştır. Tıbbi tarih ve otopsi çalışmalarına bakıldığında bu ölümlerin % 50' sinin akciğer kanserinden kaynaklandığı görülmüştür. 1924 yılında, radon-222' nin akciğer kanserine ve solunum yolu hastalıklarına sebebiyet verebileceğine dikkat çekilmiştir. Daha sonra Amerika Birleşik Devletleri' indeki madenlerde yapılan çalışmalar, radon-222 ve onun kısa yarı ömürlü bozunum ürünlerine maruz kalınmasıyla akciğer kanseri arasında pozitif bir ilişki olduğunu göstermiştir. Bu nedenle ev ve iş yerlerinde radon-222 konsantrasyonunun belirlenmesi önemli bir problemdir (Qureshi ve diğ., 1999).

Bu tez çalışmasının amacı ülkemizin en eski linyit ocaklarına sahip olan TKİ (Türkiye Kömür İşletmeleri) bünyesindeki Ege Linyitleri İşletmesi' ne bağlı Soma

(Manisa) ve Garp Linyitleri İşletmesi' ne bağı Tavşanlı (Kütahya) kapalı maden ocaklarında radon gazı konsantrasyonun belirlenmesi ve maden işçileri üzerindeki etkilerinin araştırılmasıdır. Bu amaçla Tavşanlı (Kütahya) bölgesinde Tunçbilek ve Ömerler kapalı maden ocaklarına ve Soma (Manisa) bölgesindeki Eynez kapalı maden ocağına dedektörler yerleştirilmiştir. Elde edilen radon konsantrasyon değerlerinden yararlanılarak doz hesabı yapılmış ve bu doz değerleri uluslararası müsaade edilen doz değerleriyle karşılaştırılarak bir değerlendirme çalışması gerçekleştirilmiştir.



2. ÇEVRESEL RADYASYON KAYNAKLARI

2.1 Radyoaktivite ve Radyasyon

Radyoaktivite; atom çekirdeklerinin, bazı parçacıklar ve enerji yayınlayarak kendiliğinden bozunmasıdır. Çekirdek kendiliğinden kararlı hale gelinceye kadar bu bozunma devam etmektedir. Radyoaktif bozunuma uğrayan çekirdekler radyoizotop (veya radyonüklit) olarak anılmaktadır. Bozunuma uğrayan radyoizotop doğada bulunuyor veya doğada bulunan diğer radyoizotopların bozunmasından ortaya çıkıyorsa buna “doğal radyoaktivite”, radyoizotop insan tarafından yapay olarak reaktörlerde veya hızlandırıcılarda üretiliyorsa buna da “yapay radyoaktivite” denmektedir.

Radyasyon; parçacık veya dalga tabiatına uygun olarak, bir maddeye veya ortama enerji transfer edilişidir. Radyasyon, maddesel ortamlarda yayılırken önüne çıkan atomlarla veya moleküllerle etkileşmektedir. Parçacık veya foton yeterli enerjiye sahipse çarptığı atomdan elektron koparabilmektedir. Böylece atom elektron kaybederek iyonlaşmaktadır. Bu olayı oluşturacak kadar enerjiye sahip olan radyasyon “iyonlaştırıcı radyasyon” olarak isimlendirilmektedir. İyonlaşma sağlayacak kadar enerjisi olmayan radyasyon ise “iyonlaştırıcı olmayan radyasyon” olarak nitelenmektedir (Shapiro, 1990). Alfa, beta ve elektronlar gibi elektrik yüklü olan parçacıklar “doğrudan iyonlaştırıcı radyasyon”, X-ışınları, gama ışınları ve nötron gibi elektrik yükü olmayan girici radyasyonlar ise “dolaylı iyonlaştırıcı radyasyon” olarak anılmaktadır.

Radyasyonun fiziksel etkilerini anlamlı bir şekilde tanımlamak için bazı büyüklüklere ve birimlere ihtiyaç vardır (Gollnick 1988). Radyasyon korunması teknolojisi alanındaki büyüklükler aktivite, ışınlama, absorblanan doz ve eşdeğer doz'dur.

Uluslararası

Radyasyon

Birimleri

Komisyonu

(ICRU) yaptığı çalışmalar sonucunda aktivite için curie, ışınlama için röntgen, absorblanan doz için rad ve eşdeğer doz için rem' i radyasyon birimleri olarak tanımlamıştır. MKS sistemini esas alan Uluslararası Birimler Sistemi (International System of Unit, SI)' nin kabul edilmesiyle ICRU 1971 yılında SI birimlerini tanımlamıştır. Bu kabule göre eski birimlerin yerine yenilerinin kullanılması gerekmektedir. Tablo 2.1' de radyasyon birimleri ve dönüşüm faktörleri verilmiştir.

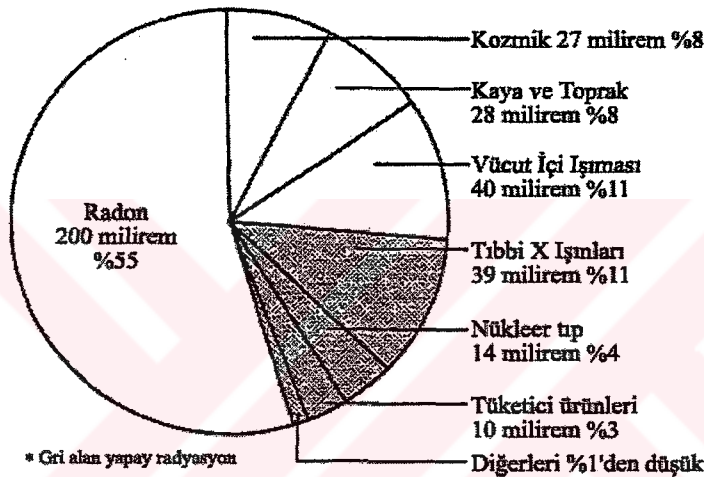
Tablo 2.1 Radyasyon birimleri ve dönüşüm faktörleri

Büyüklik	Açıklama	SI Birimi ve Sembolü	Eski Birimler ve Sembolü	Dönüşüm Faktörü
Aktivite	Radyoaktif kaynağın birim zamanda yaydığı radyasyon miktarıdır	Becquerel (Bq)	Curie (Ci)	$1 \text{ Bq} = 2.7 \times 10^{-11} \text{ Ci}$
İşinlama	1 kg havada 2.57×10^{-4} C' luk yük meydana getiren radyasyon miktarıdır	Röntgen (C/kg)	Röntgen (R)	$1 \text{ C/kg} = 3876 \text{ R}$
Absorblanan Doz	1 kg ortamda 1 J' luk enerji absorpsiyonu meydana getiren radyasyon miktarıdır	Gray (Gy)	Rad (rad)	$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$
Eşdeğer Doz	Biyolojik faktörler gözönüne alınarak hesaplanan absorblanmış doz birimidir	Sievert (Sv)	Rem (rem)	$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$

2.2 Doğal ve Yapay Radyasyon Kaynakları

Atom numarası 83' ten büyük izotoplar radyoaktiftir. Doğada 340 civarında radyonüklit bulunmaktadır (Eisenbud, 1987). Bu nedenle doğa insanlar için önemli bir radyasyon kaynağı durumundadır. Bütün canlılar sürekli ve kaçınılmaz olarak doğal radyasyon kaynaklarından yayılan radyasyonlara maruz kalmaktadır. İnsanlar doğal kaynaklardan gelen radyasyondan iki şekilde etkilenmektedir: Birincisi, kozmik ışınlarla, yer kabuğunda, inşaat malzemelerinde ve havada bulunan doğal radyoaktif maddelerden yayınlanan radyasyonun neden olduğu "dış ışınlama"dır. İkincisi ise, havada ve gıda maddelerinde bulunan doğal radyoaktif maddelerin solunum yada sindirim sistemi yoluyla vücuda girdikten sonra, vücut içinde sürdürdükleri "iç ışınlama"dır. Gama ve betalar dış ışınlamalarla, alfa ise iç ışınlamalarla insana daha çok zarar vermektedirler.

Radyasyon kaynaklarından alınan yıllık doz miktarı yeryüzünün değişik bölgelerinde oldukça farklı değerler almaktadır. Örneğin Hindistan ve Brezilya' nın toryum içeren bölgelerinde yıllık dozun 600 mrem' e kadar çıktığı bilinmektedir (Eisenbud, 1987). Çevremizdeki radyasyon kaynaklarından maruz kalınan radyasyon dozlarının oransal değerleri Şekil 2.1' de görülmektedir. Radonun yıllık doza olan katkısının 200 mrem olduğu fark edilinceye kadar ortalama yıllık doz değeri 100 mrem olarak kabul edilmekteydi. Ancak son zamanlarda radonun da göz önünde bulundurulmasıyla yıllık doz için ortalama değer olarak 360 mrem öngörülmektedir (Murray, 2001).



Şekil 2.1 Çevremizdeki radyasyon kaynaklarından maruz kalınan radyasyon dozlarının oransal değerleri (NCRP 93, 1998)

Çevresel radyasyon kaynaklarını Şekil 2.1'den de görüldüğü gibi,

- Doğal Radyasyon Kaynakları
- Yapay (İnsan Yapımı) Radyasyon Kaynakları

olarak iki gruba ayırabiliriz.

2.2.1 Doğal Radyasyon Kaynakları

İnsanların almış olduğu radyasyonun en büyük kısmını doğal radyasyon kaynakları oluşturmaktadır. İnsanların maruz kaldıkları bu doğal radyasyon kaynaklarını iki grupta toplayabiliriz. Bunlar:

- Kozmik Radyasyon Kaynakları
- Karasal Radyasyon Kaynakları' dır.

2.2.1.1 Kozmik Radyasyon Kaynakları

Yeryüzü varoluşundan beri sürekli olarak kozmik radyasyonlardan etkilenmektedir. Kozmik radyasyonlar değişik yüklerde ve farklı enerjilerde yayınlanan partikül veya elektromanyetik ışınlardan ibarettir. Kozmik radyasyonu, yeryüzüne ulaşana kadar uğradığı değişimler açısından birincil ve ikincil kozmik radyasyon olarak ele alabiliriz.

Kesin kaynağı hâlâ tam olarak bilinemeyen birincil kozmik radyasyon yüksek enerjiye sahip parçacıklardan meydana gelmiştir. Bu parçacıkların şu ana kadar ölçülen en yüksek değeri 10^{20} eV' tur. Birincil kozmik radyasyonun en düşük enerjili bileşenleri en yakın yıldızımız olan güneşteki patlamalardan kaynaklanmaktadır (Gollnick, 1988).

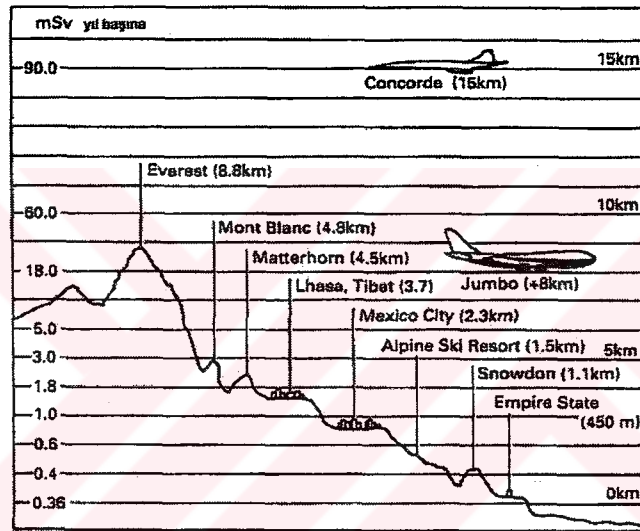
Dünya atmosferinin üst tabakalarındaki kozmik radyasyonun, % 87' si proton, % 11' i alfa parçacığı ve % 2' si diğer hafif çekirdeklerden meydana gelmiştir. Bileşimine bakarak bu radyasyonun kaynağının yıldızlar olduğunu söyleyebiliriz. Çünkü yıldızların kütesinin büyük çoğunluğunu, yıldızlarda meydana gelen fisyon reaksiyonları sonucu ortaya çıkan hidrojen (proton) ve helyum (alfa parçacığı) oluşturmaktadır. Yıldızın yüzeyine yakın olan hidrojen ve helyum çekirdekleri yıldızdan kaçacak yeterli enerjiye sahiptirler. Kaçmayı takip eden bir dizi olay sonucunda kozmik ışın meydana gelmektedir. Birincil kozmik radyasyon yaklaşık 25 km yukarıdaki stratosfer tabakasında baskındır (Gollnick, 1988; Pentreath, 1980).

Zamanla birincil kozmik radyasyon birkaç yüz mil kalınlığındaki atmosfere sızmaya başlar ve atmosferle etkileşir. Bu etkileşim esnasında birincil kozmik radyasyonun bileşimi tamamen değişerek, ikincil kozmik radyasyon yayınlanır. Deniz seviyesinde ikincil kozmik radyasyonun bileşimi, % 63 mezon, % 15 elektron ve % 21 nötrondur. Buradaki mezonlar, birincil kozmik radyasyonun atmosferin yapısında bulunan azot ve oksijen çekirdekleriyle çarpışması esnasında yayınlanır (Gollnick, 1988). Bu arada kozmojenik radyoizotoplar olarak bilinen C-14, H-3, Be-7, Na-22 ve Na-24 gibi radyoizotoplar da oluşabilmektedir.

Kozmik ışınlardan aldığımız yıllık doz miktarı enleme ve daha çokta deniz seviyesinden olan yüksekliğe bağlıdır. Enlem etkisi, birincil kozmik radyasyonun yüklü parçacık doğasından kaynaklanmaktadır. Birincil kozmik radyasyon dünyaya yaklaştığı zaman dünyanın manyetik alanı kozmik radyasyonu ekvatorдан kutuplara

doğru saptırmaktadır. Yıllık doz oranı, ekvatordan 50° kuzey enleme gittikçe yaklaşık % 8 artmaktadır (Gollnick, 1988).

Deniz seviyesinden olan yüksekliğin etkisi ise, atmosfer tabakasının kozmik radyasyona karşı bir zırh görevi üstlenmesi ile ilgilidir. Bu zırhlama sayesinde kozmik radyasyonun dünya yüzeyine ulaşan miktarı azalmaktadır. Dolayısıyla kozmik radyasyondan alacağımız doz, deniz seviyesinden olan yükseklik arttıkça artacaktır. Deniz seviyesinden 1500 m yukarıda ve 50° enlemdeki kozmik radyasyon yoğunluğu deniz seviyesindekinden % 60 daha fazla, 3000 m de ise deniz seviyesindekinin üç katından daha fazladır. Şekil 2.2 bu durumu daha iyi açıklamaktadır.



Şekil 2.2 Kozmik radyasyonun yüksekliğe bağlı olarak değişimi (UNEP, 1991)

2.2.1.2 Karasal Radyasyon Kaynakları

Karasal radyasyonun kaynağı, yerkabuğunun yapısında bulunan radyoizotoplardır. Yerkabuğunu şekillendiren izotopların büyük bir çoğunluğu radyoaktiftir. Karasal radyasyon kaynaklarını dış ve iç karasal radyasyon kaynakları olarak iki grupta ele alabiliriz.

• Dış Karasal Radyasyon Kaynakları

Yer kabuğunun oluşumunda doğal olarak var olan radyoizotoplar ve bunların bozunum ürünleri, yayınladıkları gama ışınları ile çevresel radyasyonun büyük kısmını oluşturmaktadırlar. Dış gama ışını alanını oluşturan radyasyon kaynaklarının başında Ra-226, U-238, Th-232 ve K-40 radyoizotopları gelmektedir. İnsanların

bunlardan etkilenmeleri o bölgedeki radyoaktif elementlerin konsantrasyonlarına bağlıdır (Gollnick, 1988).

Doğada bulunan radyoizotopları

-Tabiatta tek başına varolan radyoizotoplar

-Radyoaktif bozunum serileri içinde yer alan radyoizotoplar

olarak iki gruba ayırabiliriz.

-Tabiatta Tek Başına Varolan Radyoizotoplar

Doğada tek başına bulunan karasal kökenli bazı doğal radyonüklitler vardır. Bunlar arasında en önemli olanlarından biri 1.27×10^9 yıl yarı ömre sahip olan K-40' tır (Gollnick, 1988). Doğadaki potasyumun % 0.01' ini K-40 oluşturmaktadır (Eisenbud, 1987).

Bir diğer önemli radyoizotop 4.8×10^{10} yıl yarı ömürlü Rb-87' dir. Rb-87 beta radyasyonu yayınlar. Tablo 2.2' de tabiatta tek başına varolan radyoizotopların bir listesi verilmektedir.

-Radyoaktif Bozunum Serileri İçinde Yer Alan Radyoizotoplar

Tabiatta tek başına varolan radyoizotopların aksine, iki radyoizotop, uranyum ve toryum, bozunarak üç farklı radyoaktif seri oluşturlar (Eisenbud, 1987). Bunlar;

-Uranyum serisi

-Toryum serisi

-Aktinyum serisidir.

Uranyum serisi U-238 ile, toryum serisi Th-232 ile ve aktinyum serisi U-235 ile başlayıp, bozunarak sonunda kararlı kurşun izotoplarına dönüşmektedirler. Uranyum serisi Pb-206, toryum serisi Pb-208 ve aktinyum serisi Pb-207 ile son bulmaktadır (Gollnick, 1988). Şekil 2.3 – Şekil 2.5' de bu bozunum serileri verilmektedir.

Tablo 2.2 Doğada tek başına bulunan radyoizotoplar (Valkovic, 2000)

Radyonüklit	Yarı ömür (10 ⁶ yıl)	Spesifik aktivite/ Ci/gr	Radyoaktivite
⁴⁰ K	1.27	8.3×10 ⁻¹⁰	β
²³⁸ U	6×10 ⁸	2.8×10 ⁻¹⁴	β
⁸⁷ Rb	47	2.5×10 ⁻⁸	β
¹¹⁵ In	6×10 ⁵	5×10 ⁻¹²	β
¹³⁸ La	110	2.1×10 ⁻¹²	β
¹⁴² Ce	6×10 ⁶	5.7×10 ⁻¹⁴	α
¹⁴⁷ Sm	110	3.4×10 ⁻⁹	α
¹⁴⁸ Sm	1.2×10 ⁴	2.2×10 ⁻¹¹	α
¹⁴⁹ Sm	4×10 ⁵	8.2×10 ⁻¹³	α
¹⁵² Gd	1.1×10 ⁵	4.1×10 ⁻¹²	α
¹⁷⁴ Hf	4.3×10 ⁶	8.4×10 ⁻¹⁴	α
¹⁴⁴ Nd	5×10 ⁵	1.2×10 ⁻¹³	α
¹⁹⁰ Pt	700	3.3×10 ⁻¹³	α
¹⁹² Pt	10 ⁶	1.4×10 ⁻¹⁴	α
²⁰⁴ Pb	1.4×10 ⁸	1.8×10 ⁻¹⁶	α
²³² Th	14	1.1×10 ⁻⁷	α
²³⁵ U	0.71	1.5×10 ⁻⁸	α
²³⁸ U	4.5	3.3×10 ⁻⁷	α

Zincirleme bozunumun olduğu bu serilerde, bir sonraki izotopun aktivitesinin bir önceki izotopun aktivitesine oranının zamanla değişimi aşağıdaki gibi olmaktadır (Turner, 1995; L'Annunziata, 1998):

$$N_i \xrightarrow{\lambda_i} N_{i+1}$$

$$\frac{A_{i+1}}{A_i} = \frac{\lambda_{i+1}}{\lambda_{i+1} - \lambda_i} [1 - e^{(\lambda_i - \lambda_{i+1})t}] \quad (2.1)$$

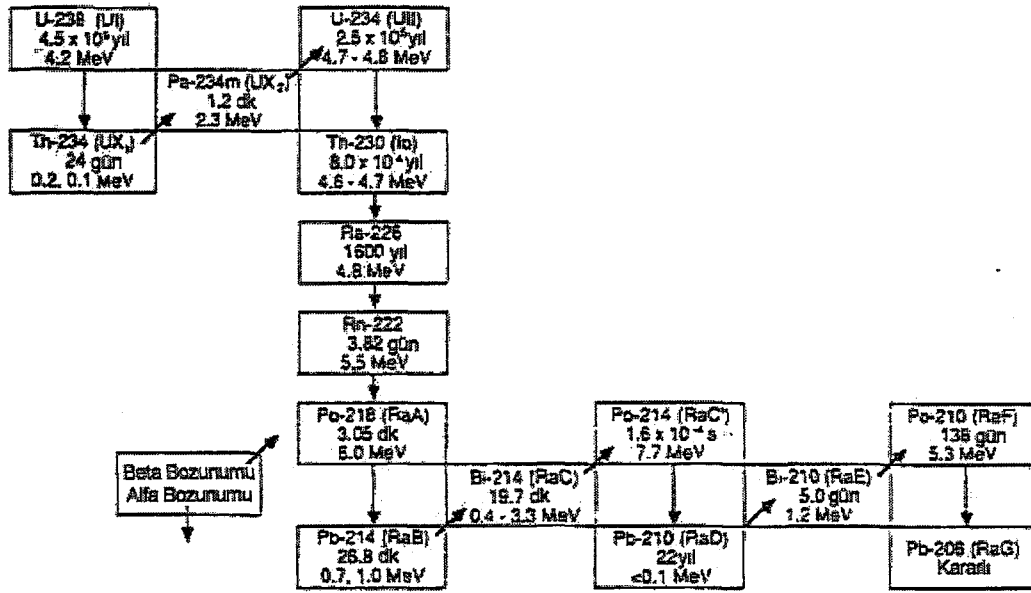
Burada;

λ_i : i. İzotopun bozunma olasılığı

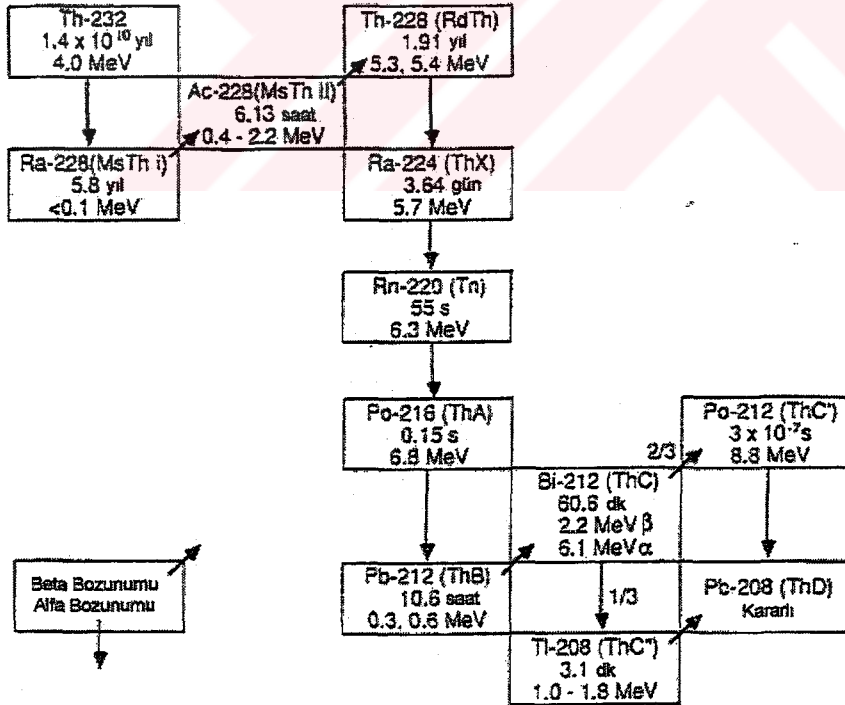
A_i : i. İzotopun aktivitesi

t : zamanı

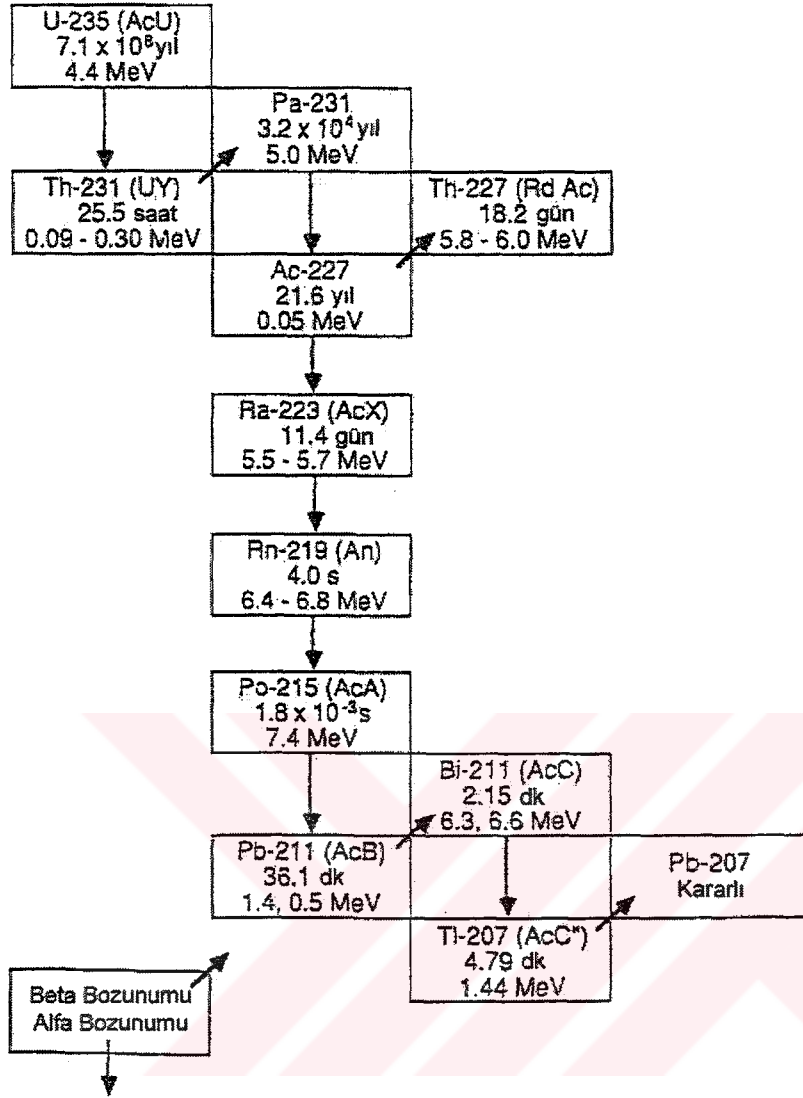
temsil etmektedir.



Şekil 2.3 Uranyum bozunum serisi



Şekil 2.4 Toryum bozunum serisi



Şekil 2.5 Aktinyum bozunum serisi

Bu denklem bazı özel durumlarda daha basite indirgenmektedir. Bu özel durumu belirleyecek olan ise birbirini takip eden izotopların bozunma olasılıklarının birbirine göre büyüklükleridir. Doğadaki üç bozunum serisinde olduğu gibi eğer $\lambda_{i+1} \gg \lambda_i$ ise diğer bir deyişle bozunum ürünlerinin yarı ömrü ana radyonüklidin yarı ömrüne nazaran çok küçükse bu durumda Denklem 2.1;

$$\frac{A_{i+1}}{A_i} = [1 - e^{-\lambda_{i+1}t}] \quad (2.2)$$

olarak yazılabilecektir. Çok uzun bir zaman sonunda ($\lambda_{i+1}t \gg 1$) seri radyoaktif dengeye ulaşacağından $A_{i+1}/A_i = 1$ olacaktır. Denge durumunda serideki her bir izotopun aktivitesi bu serideki en uzun yarı ömürlü izotopun aktivitesi ile eşit olacaktır.

- **İç Karasal Radyasyon Kaynakları**

Doğal radyoizotopların bir kısmı insanların tükettikleri yiyeceklerle, suya ve radyoaktif gaz veya parçacık olarak soludukları havaya geçebilirler. Bunların bir kısmı vücudun içerisine yerleşirler ve vücudun içerisindeki bu radyoizotoplar bozunarak radyasyona yol açarlar (Gollnick, 1988).

Yaklaşık 70 farklı doğal radyoizotop mevcut olup bunlar iç doza katkıda bulunurlar. Bu dozun yaklaşık % 80' i K-40' tan kaynaklanmaktadır. Fakat bu bütün vücuda düzgün bir şekilde dağılmamıştır. Bu nedenle potasyum için ortalama bir değer kolayca hesaplanamaz. Potasyum ile ilgili hesaplarda yetişkin bir insanda 1 kg için 2 gr potasyum ortalama değeri dikkate alınır. Yani 70 kg ağırlığındaki bir insanda 140 gr potasyum bulunmaktadır. K-40 konsantrasyonu 59.2 Bq/kg ve buna karşılık gelen yıllık doz miktarı 170 μ Gy' dir.

Bir diğer doğal olarak varolan radyoizotop Rb-87'dir. Rubidyumun doğadaki davranışı çok az bilinmektedir. Bütün vücutta 9.7 mg/kg Rubidyum bulunmaktadır. Rb-87'nin konsantrasyonu 8.5 Bq/kg ve buna karşılık gelen yıllık doz miktarı 4 μ Gy' dir.

Uranyum ve toryum serilerindeki radyoizotoplar da iç radyasyona katkıda bulunurlar. Bu radyoizotoplar insanın vücudunda, yediği yiyeceklerde ve bir kısmı da soluduğu havada bulunabilmektedir. Yetişkin bir insan günde yaklaşık olarak 52 μ Bq U-238 ve 37 μ Bq Th-232 teneffüs etmektedir.

Radyum doğal olarak var olan bir diğer önemli radyoizotoptur. Bilinen 30 tane radyoizotopu vardır. Fakat yalnızca alfa aktif olan Ra-226 ve beta aktif olan Ra-228 insan sağlığı için risk oluşturmaktadır. Teneffüs yoluyla günde yaklaşık olarak 37 μ Bq radyum alınmaktadır (Eisenbud, 1987).

Doğal olarak varolan radyoizotoplar arasında önemli bir yere sahip olan radon ve radonun bozunum ürünleri Bölüm 3' te ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

2.2.2 Yapay Radyasyon Kaynakları

Yapay radyasyon kaynaklarını genel olarak şu başlıklarla ele alabiliriz.

- Radyoaktif Serpinti
- Tıbbi Uygulamalar
- Endüstriyel Uygulamalar (Tüketici Ürünleri)

- **Radyoaktif Serpinti**

Savaş zamanında nükleer silahların kullanılması ve hatta barış zamanında bu nükleer silahların test edilmesi sonucu radyoaktif kirlilik meydana gelmektedir. Bu silahların kullanımı esnasında açığa çıkan radyasyon atmosfere karışarak global bir radyoaktif kirliliğe sebep olmaktadır. Yapay radyasyon kaynaklarının % 1' den daha az bir kısmını radyoaktif serpinti oluşturmaktadır (Gollnick, 1988).

- **Tıbbi Uygulamalar**

Yapay radyasyon kaynaklarının % 90' ını tıbbi uygulamalar oluşturmaktadır. Radyoaktivite tıpta teşhis ve tedavi amaçlı olarak kullanılmaktadır. Teşhis için kullanılan yöntemler arasında, x ışını makinaları, radyografi, floroskopi, fotofloroskopi, mamografi, tomografi, radyofarmasötik uygulamaları sayılabilir. Tedavi için kullanılan yöntemler ise kanser hücrelerinin ışınlanması ve çeşitli radyofarmasötik uygulamalara yöneliktir (Gollnick, 1988).

- **Endüstriyel Uygulamalar (Tüketici Ürünleri)**

Yapay radyasyon kaynaklarının % 3 gibi bir kısmını endüstriyel uygulamalar oluşturmaktadır. Tüketicinin kullanımına sunulan ürünler ve endüstriyel amaçlı yapılmış aletler bu radyasyonun kaynağını oluşturmaktadır. Tüketici ürünleri arasında renkli televizyonlar, video, sigara ürünleri, yakıtlar (kömür vs.) sayılabilir. Endüstriyel amaçlı aletlere örnek olarak ise hava alanı bagaj kontrol sistemleri, elektron mikroskobu vs. örnek olarak gösterilebilir (Gollnick, 1988).

3. RADON VE BOZUNUM ÜRÜNLERİ

3.1 Radon

Radyoaktif bozunum serilerinin tek gaz ürünü olan radon, radyumun bozunması sonucu oluşan bir asal gazdır. Rn-222 (radon), Rn-220 (toron) ve Rn-219 (aktinon) sırasıyla uranyum, toryum ve aktinyum bozunum serilerine ait radyoaktif gazlardır (Durrani ve Ilic, 1997).

Bu gazların yarı ömürleri sırasıyla 3.82 gün, 55.6 s ve 3.96 s' dir. Ortalama ömürleri ise gene sırasıyla 5.51 gün, 80.2 s ve 5.71 s' dir (Durrani ve Ilic, 1997). Şimdi bu gazlara daha ayrıntılı bir şekilde bakalım.

- **Rn-219 (Aktinon)**

U-235 ile başlayan aktinyum serisinin bir üyesi olan radonun bu izotopu en az bulunanıdır. U-235' in kaya ve topraklardaki ağırlıkça konsantrasyonu, U-238 konsantrasyonunun % 1' inden de daha azdır. Rn-219' un yarı ömrü yaklaşık olarak 4 s' dir. Bu iki husus Rn-219' un doğrudan ölçümünü engellemektedir (NCRP 97, 1988).

- **Rn-220 (Toron)**

Th-232 ile başlayan toryum serisinin bir üyesidir. U-238 ve Th-232' nin aktiviteleri eşit kabul edildiğinde üç radon izotopu arasında topraktaki en yüksek akıya $1.5 \text{ Bq/m}^2\text{s}$ ($40 \text{ pCi/m}^2\text{s}$) değeri ile Rn-220 sahiptir. Rn-220' nin yarı ömrü 55.6 s' dir. Kısa yarı ömründen dolayı çok az doğrudan ölçümü yapılabilmektedir (NCRP 97, 1988).

- **Rn-222 (Radon)**

U-238 ile başlayan uranyum serisinin bir üyesidir. Radon, 3.82 gün ile en uzun yarı ömürlü radon izotopudur. Topraktaki akısı $17 \text{ mBq/m}^2\text{s}$ ($0.45 \text{ pCi/m}^2\text{s}$)' dir. Bu

değer Rn-220' nin değerinden yaklaşık 100 kat daha azdır. Buna rağmen daha uzun yarı ömründen dolayı atmosferde geniş bir dağılıma sahiptir (NCRP 97, 1988).

Radonun bu izotopik özellikleri nedeniyle konsantrasyon ölçümlerinde Rn-222 ön planda tutulur ve radon dendiğinde akla Rn-222 gelir. Bu çalışmada da bundan sonraki bölümlerde radon dendiğinde Rn-222 kastedilecektir.

3.2 Radonun Bozunum Ürünleri

Radon kaynaklı sağlık problemleri aslında doğrudan radonun kendisinden kaynaklanmaz. Çünkü radon, nefes alma süresiyle kıyaslandığında daha uzun yarı ömüre sahip olan bir gazdır. Teneffüs edilen radonun büyük bir kısmı daha radon bozunmadan tekrar teneffüs yoluyla dışarı atılır. Ya da radon ciğerlerde takılır ve daha sonra bozunur (Durrani ve Ilic, 1997).

Radonun aksine radonun bozunum ürünleri olan Po-218 (RaA), Pb-214 (RaB), Bi-214 (RaC), Po-214 (RaC') tipik aerosoller gibi yüzeylere yapışırlar (Durrani ve Ilic, 1997). Çünkü radon kimyasal olarak aktif olmamasına karşın periyodik tabloda hemen altında bulunan Polonyum (Po), Bizmut (Bi) ve Kurşun (Pb) kimyasal olarak aktiftirler. Po-218 gibi elektriksel olarak yüklü de olunca atmosfer içinde herhangi bir parçacığa yapışmak eğilimindedirler. Bu sayede kolayca teneffüs edilebilirler. Teneffüs edildikten sonra ciğerlerdeki epital hücrelere yapışırlar ve kısa bir süre sonra bozunurlar. Bu dört bozunum ürünü arasında 26,8 dakika ile en uzun yarı ömre sahip olan Pb-214 ciğerlerden normal temizleme işlemleriyle atılmadan önce bozunumun bütün aşamalarını tamamlayabilir. Bunun sonucunda bronşlardaki hassas yüzeyler bu bozunumlar nedeniyle ışınlanırlar (Durrani ve Ilic, 1997). Sonuç olarak radonun bozunum ürünleri, havadaki parçacıklara yapışmış bulunsun veya bulunmasınlar, solunmaları halinde önemli sağlık sorunlarına sebep olurlar. Radon ve bozunum ürünlerinin özellikleri Tablo 3.1' de verilmektedir.

3.3 Radon ve Radonun Bozunum Ürünlerinin Sağlığa Etkileri

Radon ve radonun bozunum ürünlerinin insan sağlığına etkileri üzerine yapılan çalışmalar radon gazına maruz kalma arttıkça akciğer kanserine yakalanma riskinin artış gösterdiğini ve bu ikisi arasında lineer bir ilişkinin olduğunu ortaya koymuştur (Durrani ve Ilic, 1997).

Tablo 3.1 Radon ve bozunum ürünlerinin özellikleri

İzotop	Yarı Ömür	Bozunma Sabit (sn ⁻¹)	Temel Radyasyon Enerjileri (MeV)		
			α	β	γ
²²² Rn	3,825 gün	2,1x10 ⁻⁶	5,49		
²¹⁸ Po (RaA)	3,05 dk	3,79x10 ⁻³	6,00		
²¹⁴ Pb (RaB)	26,8 dk	4,31x10 ⁻⁴		0,65	0,24
²¹⁴ Bi (RaC)	19,7 dk	5,86x10 ⁻⁴		3,27	0,61
²¹⁴ Po (RaC')	1,5x10 ⁻⁴	4,62x10 ³	7,69		
²¹⁰ Pb	22,3 yıl	-	-	-	-

Radonun kendisinin sağlığa olumsuz etkisi oldukça azdır denilebilir. Bir soygaz olarak radon, teneffüs edildiğinde dikkate değer ölçüde vücut tarafından tutulmaz (Turner, 1995). Gene teneffüs yoluyla dışarı atılır. Çünkü radon nefes alma süresiyle kıyaslandığında daha uzun bir yarı ömre sahip olan bir asal gazdır. Ayrıca radonun kimyasal reaktivitesi zayıftır. Bu nedenle teneffüs edildiğinde dokulara kimyasal olarak bağlanmaz. Buna ilaveten dokulardaki çözünürlüğü de çok düşüktür. Sadece bir miktar radon gazı vücut sıvılarında çözünerek kan dolaşımına girmektedir. Kan dolaşımına giren radon ve vücut içindeki bozunmasıyla oluşan radon ürünleri çeşitli organların ısınlmasına neden olacak ise de bu ihmal edilebilecek düzeydedir (Durrani ve Ilic, 1997; Fişne, 2002; www.taek.gov.tr/taek/rsgd/yayinlarimiz/brosurler/radon.htm).

Sağlıkla ilgili olumsuz etkiler radonun gaz olmayan radyoaktif bozunum ürünlerinden kaynaklanmaktadır (Turner, 1995). Radonun bozunum ürünlerinin bir kısmı atmosfer içindeki herhangi bir parçacığa yapışmak, bazıları ise serbest radyoaktif atomlar olarak kalma eğilimindedirler. Radonun bozunum ürünlerinden yapışma eğiliminde olanlar toz ve diğer parçacıklara tutunarak radyoaktif aerosoller oluştururlar. Bunlar mikron ve mikron altı aerosollere ve toz parçacıklarına yapışırlar. Bu nedenle taşınarak solunum yoluyla alınabilirler (www.taek.gov.tr/taek/rsgd/yayinlarimiz/brosurler/radon.htm). Radonun bozunum ürünlerinden, serbest olarak kalma eğiliminde olanları taşıyan hava bulunduğu zaman bunlar üst solunum yollarında, yapışma eğiliminde olanlar ise akciğerlerin derinliklerinde tutulma eğilimi gösterirler. Ve ciğerlerin normal temizleme mekanizmasından önce bozunmaya başlarlar (Turner, 1995). Bozunum ürünleri kararlı hale gelinceye kadar bozunmaya devam ederler ve bozunma sürecinin her aşamasında radyasyon salınımı olur. Radon gazının teneffüs edilmesi, solunum yetmezliği, baş ağrısı, öksürük gibi

akut etkilere neden olmaz. Radyoaktif bozunmaya uğrayan radon gazı, teneffüs edildiğinde akciğerler tarafından tutulabilecek parçacıklara dönüşür. Bu parçacıkların bozunması devam ettiğinde ortaya çıkan enerji, akciğer dokusunda hasara, dolayısıyla zaman içerisinde kansere sebep olur (www.taek.gov.tr/taek/rsgd/yayinlarimiz/brosurler/radon.htm).

Radonun bozunum ürünlerinden kaynaklanan beta ve gama radyasyonundan ciğerdeki hücrelerin aldığı doz, alfa parçacıklarıyla kıyaslandığında çok küçüktür. Ciğerlerde bir alfa parçacığı yayınlandığı zaman lokal olarak yakın mesafelerdeki dokulara enerjisinin tamamını bırakır. Örneğin Po-214' ün yayınladığı 7.69 MeV enerjili bir alfa parçacığı yaklaşık 70 μ metre içerisinde bütün enerjisini bırakır. Öte yandan Pb-214' dün yayınladığı 1 MeV enerjili bir beta parçacığı 4000 μ metre gibi çok daha büyük bir mesafe içerisinde enerjisini bırakır. Bu nedenle teknik olarak “radon problemi” dendiğinde, radonun bozunum ürünlerinden yayınlanan alfa parçacıklarının hassas ciğer dokularını ısınlaması ve buna bağlı olarak meydana gelen akciğer kanseri riski kastedilmektedir (Turner, 1995).

3.4 Özel Büyüklükler ve Birimler

Radonun bozunum ürünlerinin konsantrasyonuna ilişkin ölçümlerde kullanılan bazı kavram ve büyüklüklere sırasıyla değinilecektir.

3.4.1 Potansiyel Alfa Parçacık Enerjisi Konsantrasyonu (PAEC)

Bölüm 3.3' te anlatıldığı üzere radonun insan sağlığı üzerinde meydana getirdiği olumsuz etki, radonun kısa yarı ömürlü bozunum ürünlerinin yayınladığı alfa parçacıklarından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle söz konusu sağlık sorunu, potansiyel alfa parçacık enerji konsantrasyonu (Potential Alpha – Particle Energy Concentration, PAEC) ile yakından alakalıdır. PAEC, havadaki radon ürünleri karışımında havanın birim hacminde radonun tüm bozunum ürünleri tarafından yayınlanan alfa enerjileri toplamıdır. PAEC, J/m^3 veya MeV/m^3 birimleriyle ifade edilmektedir (Turner, 1995).

3.4.2 Denge Eşdeğer Konsantrasyonu (Equilibrium Equivalent Concentration, EEC)

Denge Eşdeğer Konsantrasyonu (EEC), havadaki kısa yarı ömürlü radon ürünlerinin dengede olmayan bir karışımını ifade eder ki, bu karışım ile aynı potansiyel alfa enerjisi konsantrasyonuna sahip kısa yarı ömürlü ürünleri ile radyoaktif dengede olan radonun, radyoaktivite konsantrasyonu anlamındadır (Fişne, 2002; NCRP 97, 1988; Turner, 1995).

Nümerik olarak, bozunum ürünlerinin ölçülen konsantrasyon değerleri kullanılarak

$$EEC = 0.105[RaA] + 0.516[RaB] + 0.379[RaC] \quad (3.1)$$

ifadesiyle hesaplanabilir. Burada EEC, Bq/m³ veya pCi/l birimindedir. RaA Po-218, RaB Pb-214 ve RaC Bi-214 olup radonun bozunum ürünleridir (NCRP 97, 1988).

3.4.3 Denge Faktörü (F)

Denge faktörü, EEC ile radon konsantrasyonun birbirine oranıdır. Yani denge eşdeğer radon konsantrasyonun, havadaki radonun radyoaktivite konsantrasyonuna oranı olarak tanımlanır. Bu faktör, eğer radon ve radonun bütün kısa yarı ömürlü bozunum ürünleri radyoaktif dengede ise tanım gereği olarak 1'e eşittir. Denge Faktörü'nün değeri uygulamada çok değişik olup nadiren 1 değerini almaktadır. Denge faktörü iç mekanlarda 0,2 ile 0,6 aralığındadır (Turner, 1995).

3.4.4 Çalışma Düzeyi (Working Level, WL)

Belli miktar hava içindeki radonun kısa yarı ömürlü bozunum ürünlerinde potansiyel olarak bulunan toplam radyasyon enerjisinin bir ölçüsü olarak Çalışma Düzeyi (Working Level, WL) kavramı tanımlanmıştır.

Radonun bozunma ürünlerinde potansiyel olarak bulunan toplam radyasyon enerjisini hesaplayabilmek için, öncelikle her bir ürün için 3700 Bq aktivite oluşturacak atom sayılarının bilinmesi gerekir. Tablo 3.2' de bu atom sayıları verilmiştir.

Tablo 3.2 Radon ve bozunum ürünlerinin 3700 Bq' deki atom sayıları

Radyonüklid	Atom Sayısı (3700 Bq' de)
Radon	222
RaA(Po-218)	977
RaB(Pb-214)	8580
RaC(Bi-214)	6310
RaC'(Po-214)	0,0009

Şekil 3.1' den de görüldüğü gibi RaA' nın her atomu öncelikle 6.00 MeV enerjili alfa parçacığı yayınlamaya RaB' ye dönüşmektedir. Oluşan RaB atomu beta ışını yayınlamaya RaC ve RaC' 'ye dönüşmektedir. RaC' atomu ise 7.69 MeV enerjili alfa parçacığı yayınlamaya en sonunda RaD (Pb-210) atomuna dönüşür. Dolayısıyla bir RaA atomu RaD atomuna dönüştüğü zaman toplam 13.69 MeV (6.00+7.69) enerjili alfa parçacığı yayınlamış olur. Benzer şekilde RaB, RaC ve RaC' atomlarının RaD'ye dönüşürken yayınlacakları alfa parçacıklarının toplam enerjileri bulunabilir. Çalışma düzeyine ilişkin bu sonuçlar Tablo 3.3' te toplu olarak verilmiştir.

Çalışma Düzeyi (WL) hesaplamalarında alfa ışımaları dikkate alınmaktadır. Çünkü RaB ve RaC tarafından yayınlanan beta ve gama ışımalarının akciğer dozuna katkısı ihmal edilebilir düzeydedir. Tablo 3.3' den de görüleceği gibi kısa yarı-ömrürlü bozunma ürünleriyle dengede olan 3700 Bq radon en sonunda 1.3×10^5 MeV' luk toplam alfa enerjisi yayınlamaktadır.

Dolayısıyla radyoaktif denge durumları ne olursa olsun 1.3×10^5 MeV toplam alfa enerjisi yayınlamaya olan radon ürünlerinin herhangi bir karışımı aynı hava içinde dağılmış olarak bulunuyorsa, denge karışımı ile aynı potansiyel tehlikeyi oluşturacaktır. Hava hacmi 1 litre olarak alındığı takdirde yeni bir birim olan Çalışma Düzeyi (WL) ortaya çıkmaktadır.

3.4.5 Aylık Çalışma Düzeyi (Working Level Months, WLM)

Çalışma düzeyi (WL) birim hacimdeki radon ürünlerinin konsantrasyon birimidir. O havayı soluyan bir kişinin maruz kaldığı radyasyonu bulmak için WL değeri maruz kalma süresi, ortalama nefes alma oranı ve havanın akciğerde kalma oranı ile çarpılmalıdır. Ancak genelde nefes alma ve akciğerde kalma oranları ihmal edilmektedir. Radonun bozunum ürünlerine maruz kalma, WL ve zamanın bir fonksiyonu olarak hesaplanmaktadır (EPA, 1987; Fişne, 2002). Yaygın olarak kullanılan maruz kalma süresi ortalama bir aylık çalışma süresi olan 170 saattir ve maruz kalma değerleri “Aylık Çalışma Düzeyi” (WLM) cinsinden ölçülür. 1 WL’ lik radon ürünleri konsantrasyonundaki solunum havasının bir ay içindeki çalışma saatleri ile çarpımı 1 WLM’ lik ışınlamayı vermektedir. SI birim sisteminde 1 WLM 0.0035 J h/m^3 değerine eşittir (NCRP 97, 1988).

WLM/yıl ise ışınlama hızını (maruz kalma hızı) ölçmede kullanılan bir birimdir. Her ay 1 WLM’ lik toplam ışınlamaya maruz kalan bir kişi yılda 12 WLM’ lik bir hızla ışınlanmış olmaktadır (Fişne, 2002).

3.5 Radon Konsantrasyon Değerleri

Hava, ev ve maden ortamlarına ilişkin radon konsantrasyon değerleri ayrı ayrı ele alınmıştır.

3.5.1 Havadaki Radon Değerleri

Radon, uranyumun mevcut olduğu tüm kayalardan, topraktan gelmekte ve gaz olması nedeniyle bulunduğu ortamın boşluklarında ilerleyerek atmosfere kaçma eğilimi göstermektedir. Radon topraktan moleküler difüzyon veya konveksiyonla sızarak yerden havaya doğru hareket etmekte ve atmosfere ulaşmaktadır (www.taek.gov.tr/taek/rsgd/yayinlarimiz/brosurler/radon.htm).

Dünyanın çeşitli yerlerindeki bazı yıllık ortalama radon konsantrasyon değerleri Tablo 3.4’ de görülmektedir (Yaşar, 1970).

Tablo 3.4 Farklı yerler için havadaki yıllık ortalama radon konsantrasyon değerleri

Yer	Radon Konsantrasyonu (Bq/m ³)
Bratislava(Çekoslavakya)	5,18
Budapeşte(Macaristan)	2,59
Chicago(A.B.D)	1,11
Cincinnati(A.B.D)	9,62
Deniz Kıyıları(A.B.D)	0,07
Rio de Janerio(Brezilya)	1,85
Japonya	3,33
Filipinler	0,15
Kuzey Atlantik Okyanusu	0,22
Güney Pasifik Okyanusu	0,07
Güney Kutbu	0,02

Tablo 3.4’ den de görüldüğü gibi karasal bölgelerde radon konsantrasyonu kıyı bölgelerine nazaran daha yüksektir.

3.5.2 Evlerdeki Radon Değerleri

Binalardaki radon kaynağının büyük bir kısmı, binanın temelindeki toprak ve kayalardır. Radon gazı, toprak boyunca yükselerek, binanın altında hapsolmakta ve basınç oluşturmaktadır. Binanın altındaki bu yüksek basınç nedeniyle gazlar yerden ve duvarlardan, özellikle çatlak ve boşluklardan, bina içlerine sızarlar. Topraktaki ve yapı malzemelerindeki Ra-226 miktarı, toprak ve yapı malzemelerinin nem oranı, difüzyon potansiyeli, toprakla temasta olan yapının yüzey alanı ve izolasyon niteliği, bina zemini, binadaki havalandırma kapasitesi, iklim koşulları, iç-dış hava sıcaklık ve basınç farkı binalardaki radon konsantrasyonunu etkileyen temel unsurlardır.

Özellikle iyi havalandırılmayan binalardaki radon konsantrasyonu dış hava konsantrasyonundan çok daha yüksek olabilmektedir. Çeşitli ülkelerde evlerde ölçülmüş ortalama radon konsantrasyonu aşağıdaki Tablo 3.5’ de görülmektedir (www.taek.gov.tr/taek/rsgd/yayinlarimiz/brosurler/radon.htm).

Tablo 3.5 Farklı ülkeler için evlerdeki ortalama radon konsantrasyon değerleri (Bq/m³)

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

3.5.3 Yeraltı Madenlerinde Radon Değerleri

Maden ortamındaki toprak ve kayaların yapısında bulunan uranyum, toryum gibi radyoaktif elementler, maden atmosferinde radon ve radonun bozunum ürünlerinin oluşmasına neden olmaktadır (Durrani ve Ilic, 1997). Kayaların içerisindeki bu radyoaktif maddelerin bozunması sonucu radon gazı çatlak ve gözeneklere kaçarak buralarda birikmekte daha sonra yayılma yolu ile maden atmosferine geçmektedir.

Özellikle havalandırılmayan yeraltı uranyum madenlerindeki radon konsantrasyonları açık hava ve binalardaki konsantrasyonlardan çok daha yüksek seviyelere erişebilmektedir.

Sadece doğal havalandırmanın kullanıldığı Almanya'nın Schneeberg ve Çekoslovakya'nın Jachimov madenlerinde, havadaki radon konsantrasyonlarının 111.000 – 555.000 Bq/m³ arasında olduğu çeşitli araştırmacılar tarafından tahmin edilmektedir. Gene sadece doğal havalandırmanın kullanıldığı ABD' nin bazı madenlerinde 1940' larda ölçülen ortalama radon konsantrasyonları, Colorado' da 92.500 Bq/m³ , Utah' ta ise 185.000 Bq/m³ olarak bulunmuştur (Yaşar, 1970).

Uranyumdan başka diğer yeraltı madenlerinde de yüksek radon konsantrasyonları bulunabilmektedir. Güney Afrika Altın Madenlerinde 1989 - 1991 yılları arasında yapılan araştırmalarda, çalışanların % 97' sinin maruz kaldığı radon

konsantrasyonunun 1.100 Bq/m^3 ' den az olduğu ve 3.700 Bq/m^3 ' den fazla radon konsantrasyonuna hiç kimsenin maruz kalmadığı bulunmuştur (UNSCEAR, 2000).

Hindistan kömür madenlerinde 1995 yılında radon gazı ölçümü yapılmıştır. Bu çalışmada ilkbahar, yaz, sonbahar ve kiş olmak üzere yılın dört mevsiminde ayrı ayrı ölçümler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar sırasıyla $9 - 262 \text{ Bq/m}^3$, $37 - 281 \text{ Bq/m}^3$, $40 - 228 \text{ Bq/m}^3$ ve $41 - 354 \text{ Bq/m}^3$ arasında değişmektedir (Rao ve diğ., 2001; Jha ve diğ., 2001).

Pakistan' da 1999 yılında altı farklı kömür madeninde radon konsantrasyon ölçümü yapılmıştır. Bu kömür ocaklarında radon konsantrasyonlarının $121 - 408 \text{ Bq/m}^3$ arasında, işçilerin maruz kaldığı yıllık dozun ise $1,38 - 4,67 \text{ mSv}$ arasında değiştiği bulunmuştur (Qureshi ve diğ., 1999).

Türkiye'de ise Ege Üniversitesi Nükleer Enerji Enstitüsü Ege bölgesindeki yeraltı maden ocakları çalışanlarının maruz kaldığı radyasyon dozlarının belirlenmesi amacıyla bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada, ocakların radon konsantrasyonunun bor için $29 - 197 \text{ Bq/m}^3$, kömür için $26 - 166 \text{ Bq/m}^3$ ve krom için $10 - 35 \text{ Bq/m}^3$ arasında değiştiği bulunmuştur (Yener ve Küçüktaş, 1998).

3.6 Radon Konsantrasyon Limitleri

Yapılan alışmalar, yüksek seviyede radon ve bozunum ürünleri dolayısıyla radyasyona maruz kalmış bireylerde akciğer kanseri oranlarının yüksek olduğunu göstermiştir. İngiltere Ulusal Radyasyondan Korunma Komitesi (NRPB), İngiltere' deki yıllık toplam 41.000 akciğer kanserinden en az 2.500' n, ABD Halk Sağlığı Servisi ise yıllık akciğer kanseri vakalarının, sigara içmeyenlerden 5.000, sigara içenlerden ise 15.000' ini, Uluslararası Radyasyondan Korunma Komitesi (ICRP) ise toplam akciğer kanserlerinin % 10' unu radona bağlamaktadırlar (www.taek.gov.tr/taek/rsgd/yayinlarimiz/brosurler/radon.htm).

Bu nedenle, Uluslararası Radyasyondan Korunma Komitesi (ICRP), radona maruz kalma konusunu inceleyerek "Evde ve İşyerinde Radon-222' ye Karşı Korunma" konusunda 65 No' lu bir rapor yayınlamıştır. Bu raporda radona maruz kalma sınırlandırılarak, limit değerler tavsiye edilmiş ve yıllık doz için bir eylem seviyesi (action level) tespit etmiştir. Eylem seviyesinin $3 - 10 \text{ mSv}$ arasında sınırlandırılması

tavsiye edilmiştir. Bu doz değerlerine karşılık gelen radon konsantrasyonu için evlerde 200 - 600 Bq/m³, iş yerlerinde ise 500 - 1500 Bq/m³ arasında bir değer tespit edilmesi önerilmiştir (Çelebi, 1995).

Tablo 3.6' da, çeşitli ülkeler ve uluslararası kuruluşlar tarafından benimsenen kapalı ortamlar için müsaade edilebilir radon konsantrasyonları verilmektedir (www.taek.gov.tr/taek/rsgd/yayinlarimiz/brosurler/radon.htm).

Tablo3.6 Radon konsantrasyon limitleri (Bq/m³)

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

*Avrupa Birliği, **Uluslararası Radyasyondan Korunma Komitesi,

***Dünya Sağlık Örgütü

Türkiye' de "TAEK Radyasyon Güvenliği Yönetmeliği" nde müsaade edilen radon konsantrasyon değerlerinin yıllık ortalama olarak evlerde 400 Bq/m³, işyerlerinde ise 1.000 Bq/m³ değerlerini aşamayacağı belirtilmiştir (Yönetmelik, 2000).

Ayrıca ICRP tarafından maden işçilerinin maruz kaldığı dozlar mesleki ışınlama olarak kabul edilip yıllık doz limiti 2 WLM olarak saptanmıştır (Küçüktaş, 1996).

3.7 Radon Gazı Ölçüm Teknikleri

Radon renksiz, tatsız ve kokusuz radyoaktif bir gaz olduğu için insan duyu organlarıyla tespit edilemez. Ancak özel geliştirilmiş tekniklerle radon ölçümleri yapılabilmektedir. Günümüzde kullanılan pek çok radon ölçüm tekniği bulunmaktadır. Bu ölçüm teknikleri pek çok değişik şekilde sınıflandırılabilir. Genel olarak uzun dönem ve kısa dönem ölçüm teknikleri olmak üzere iki grupta incelenebilmektedir

(www.uic.edu/sph/glakes/radon_course/final/ppts/revised/device_characteristics/index.htm; www.epa.gov/iaq/radon/pubs/physics.htm).

3.7.1 Kısa Dönem Ölçüm Teknikleri

Kısa dönem ölçümlerde amaç bir an önce sonuçları almaktır. En sık kullanılan kısa dönem ölçüm teknikleri aktif kömür, sıvı sintilasyon sayım sisteminde aktif kömür, alfa iz dedektörleri, elektret iyon odaları, sürekli monitörler ve radon tuzağı (grap samples)' dir. (www.epa.gov/iaq/radon/pubs/physics.htm).

3.7.1.1 Aktif Kömür Tekniği

Bu teknik bir adsorblayıcı ortamda (kömür gibi) radon gazının adsorbe olmasına ve daha sonra da bu malzemenin analiz edilmesiyle radonun bozunum ürünleri olan Pb-214 ve Bi-214' ün yayınladığı gama ışınlarının aktivitelerinin ölçülmesi esasına dayanmaktadır (Durrani ve Ilic, 1997). Bu sayede radon miktarı tespit edilmiş olmaktadır.

Bu teknikte metal bir kap içerisine birkaç gram aktive edilmiş kömür konulur. Uygun bir kapakla metal kap kapatılır. Metal kap ölçüm yapılacak yere yerleştirilir ve radon yüklü havanın kömüre yani karbon yatağına difüze edebilmesi için kapağı açılır (www.uic.edu/sph/glakes/radon_course/final/ppts/revised/device_characteristics/index.htm; Durrani ve Ilic, 1997). Kabin bu şekilde kalma süresi birkaç gün kadardır. Ölçüm süresi sonunda kabin kapağı tekrar kapatılır ve analiz için laboratuara götürülür. Laboratuarda genellikle NaI sayıcıları kullanılarak gama aktivite ölçümü gerçekleştirilir (www.epa.gov/iaq/radon/pubs/physics.htm; Eisenbud, 1987).

Kullanılan metal kaplar farklı boyutlarda ve şekillerde olabilmektedir. Bazı metal kaplarda toron girişini engellemek yada nemi minimize etmek için difüzyon bariyerleri kullanılmaktadır (Garcia-Leon ve Madurga, 1988).

Bu yöntemin avantajları;

- Ekonomiktir.
- Taşınması kolaydır.
- Kullanımı basittir.
- Ölçüm süresi kısadır.

Bu yöntemin dezavantajları ise;

- Kullanılan metal kap sıcaklığa, neme ve aşırı hava akımına hassas olabilir.
- Ölçüm süresi birkaç günle sınırlıdır. Yani uzun süreli radon ölçümüne uygun değildir

(www.uic.edu/sph/glakes/radon_course/final/ppts/revised/device_characteristics/index.htm).

3.7.1.2 Sıvı Sintilasyon Sayım Sisteminde Aktif Kömür

Bu teknikte aktif kömür tekniğinde olduğu gibi, radon gazının aktive edilmiş kömür üzerinde adsorblanması esasına dayanmaktadır. Fakat analiz için farklı bir ekipman kullanılmaktadır (www.ohd.hr.state.or.us/rps/radon/guide.htm). Dedektör, tipik olarak içerisinde 1 - 3 gram kömür bulunan 20 ml' lik sıvı sintilasyon şişesinden oluşmaktadır (www.uic.edu/sph/glakes/radon_course/final/ppts/revised/device_characteristics/index.htm).

Ölçüm için sintilasyon şişesi açılarak radonun kömüre difüze etmesi sağlanır. Difüzyon sonrasında sintilasyon şişesi tekrar kapatılır ve analiz için laboratuara götürülür. Analize hazırlamak için radon yayılımı kullanılarak kömür üzerine adsorbe olmuş radonun büyük bir kısmı sıvı sintilasyon şişesindeki özel sıvıya transfer edilir. Radon ve radonun bozunum ürünlerinin çözündüğü sıvıyı içeren sintilasyon şişesi sıvı sintilasyon sayıcısına yerleştirilir ve sayım alınır (www.uic.edu/sph/glakes/radon_course/final/ppts/revised/device_characteristics/index.htm).

3.7.1.3 Alfa İz Dedektörleri

Bu teknik Bölüm 3.7.2.1' de anlatılmaktadır.

3.7.1.4 Elektret İyon Odaları

Elektret kalıcı elektriksel yük gösterebilen bir dielektrik malzemedir (Durrani ve Ilic, 1997). Çelik bir kap içerisine elektret malzemesi (teflon gibi) yerleştirilir (www.epa.gov/iaq/radon/pubs/physics.htm). Bu malzeme güçlü bir elektrostatik alan oluşturur. Kabın tabanındaki küçük bir giriş radon gazının içeri girmesini sağlar (Durrani ve Ilic, 1997). Radon ve radonun bozunum ürünleri bozunduğu zaman alfa, beta ve gama ışınları yayınlar. Bu yüksek enerjili parçacıklar hava içerisinde

ilerlerken havadaki oksijen, azot gibi atomlarla çarpışırlar ve kap içerisinde iyonizan parçacıklar üretirler. Bu iyonlar elektret tarafından oluşturulmuş olan elektrik alan tarafından çekilerek toplanır ve elektretin toplam yükü değişir (www.uic.edu/sph/glakes/radon_course/final/ppts/revised/device_characteristics/index.htm; Durrani ve Ilic, 1997). Bu değişimden yararlanılarak radon konsantrasyonu bulunur.

Tipik olarak hergün 1 pCi/L radona maruz kalan elektret yaklaşık olarak 2 volt kaybeder. Örneğin, ölçümden önce elektrete bağlı olan voltmetre 250 voltu gösterebilir ve iki gün radona maruz kaldıktan sonra 150 volt değerini gösterebilir.

$250 - 150 = 100$ voltluk bir değişim söz konusudur.

$$\frac{100 \text{ volt}}{2 \text{ volt} / \text{pCi} / \text{L gün}} = 50 \text{ pCi/L gün}$$

2 gün için ortalama radon; $\frac{50 \text{ pCi} / \text{L gün}}{2 \text{ gün}} = 25 \text{ pCi/L}$ olacaktır.

İki çeşit elektret kullanmak mümkündür. Kısa dönem ölçümler için daha hassas elektretler, uzun dönem ölçümler için daha az hassas elektretler kullanılır. Kullanılan elektrete göre kısa dönem yada uzun dönem ölçüm yapmak mümkündür.

Bu yöntemin avantajları;

- Elektretler ile pek çok kez ölçüm yapılabilir. Tek kullanımlık değildir.
- Uygun taşınabilir bir voltmetre ve programlanabilir bir hesap makinesiyle sahada da analizler gerçekleştirilebilir.

Bu yöntemin dezavantajları;

- Aşırı nem voltmetrenin hassasiyetini etkiler
- Elektretler gama background radyasyonuna karşı hassastırlar. Eğer gama background radyasyonu ölçülmez ve düzeltme yapılmazsa hata verebilir.

(www.uic.edu/sph/glakes/radon_course/final/ppts/revised/device_characteristics/index.htm).

3.7.1.5 Sürekli Monitörler

Radon ölçümleri için kullanılan üç çeşit sürekli radon monitörü vardır. Bunlar; alfa sintilasyon, iyonizasyon odası ve katı hal dedeksiyonudur (www.ohd.hr.state.or.us/rps/radon/guide.htm).

Sürekli radon monitörlerinin avantajları;

- Çoğu çeşidi taşınabilirdir.
- Sahada sonuç almak mümkündür.
- Radon konsantrasyonunun gerçek zamanlı değişimi görülebilir.
- Ölçüm aralıklarında esneklik sağlar.

Sürekli radon monitörlerinin dezavantajları;

- Pahalı sistemlerdir.
- Bazı modelleri büyük ve ağırdır.
- Düzenli kalibrasyon gereklidir.
- Yetişmiş elemana ihtiyaç vardır.
- İyonizasyon odası sürekli monitörü bazı durumlarda neme karşı hassastır (www.uic.edu/sph/glakes/radon_course/final/ppts/revised/device_characteristics/index.htm).

• Alfa Sintilasyon Sürekli Radon Monitörleri

Bir alfa sintilasyon hücresi ile foto çoğaltıcı tüp sayım sistemine bağlı zamanlama devresi ve kontrol sisteminden meydana gelir. Pasif difüzyon yoluyla ya da aktif difüzyon yoluyla hava numuneleri alınır. Belirli bir zaman aralığı için alınan sayımlar hafızaya kaydedilir ve bir sonraki zaman aralığı için yeni sayım alınır. Ve bu şekilde devam eder. Kısa dönem alınan bu sonuçlar zamanla radon konsantrasyonunun değişimini yansıtır (www.uic.edu/sph/glakes/radon_course/final/ppts/revised/device_characteristics/index.htm).

• İyonizasyon Odaları Sürekli Radon Monitörleri

Bir elektrometre ve veri kaydedicisine bağlı iyonizasyon odasından meydana gelir. Pasif difüzyon yada aktif difüzyonla alınan hava numunesi dedektöre yollanır. Radonun bozunum ürünleri elektrostatik olarak yok edilir ve böylece dedektöre girmesi engellenir. Radon, iyonizasyon odasının hacmi içerisinde bozunur ve iyonlar

oluşturur. Bunlar elektrik sinyallerine dönüştürülür. Bu sinyallerde sayılır, yüklenir ve elektrometre ve data kaydedici tarafından görüntülenir.

- **Katı Hal Sürekli Radon Monitörleri**

Bu teknikte alfa bozunumuna hassas bir katı hal silikon dedektörü kullanılır. Sürekli alınan verilerin yazıcıyla çıkışı alınır ve böylece radon konsantrasyonu görüntülenmiş olur. Diğer sürekli ölçüm monitörlerine göre daha az duyarlı olmasına rağmen kullanımı kolay ve nispeten ucuz olmaları nedeniyle tercih edilebilmektedir (www.uic.edu/sph/glakes/radon_course/final/ppts/revised/device_characteristics/index.htm).

3.7.1.6 Radon Tuzağı (Grab Samples) Tekniği

Bu teknikte Lucas Hücresi olarak da bilinen bir alfa sintilasyon hücresi ve bir veya iki fototüp kullanılır. Sintilasyon hücresinin duvarları ZnS(Ag) fosfor ile kaplanmıştır. Sintilasyon hücresi bir veya iki vanalı olabilmektedir. Hava numunesi toplamak için bu vana (veya vanalar) açılır. Numune alındıktan sonra vana kapatılarak radonun bozunum ürünleriyle radyoaktif dengeye gelebilmesi için yaklaşık olarak dört saat beklenir. Bu süre sonunda sintilasyon hücresi sayım için fototüpün ağzına yerleştirilir. Radon ve radonun bozunum ürünlerinin yayınladığı alfa parçacıklarının sintilasyon hücresinin duvarlarındaki ZnS ile etkileşimi sonucu oluşan pulslar (elektrik sinyalleri) sayılır ve gerekli hesaplamalar yapılarak radon konsantrasyonu belirlenir (www.uic.edu/sph/glakes/radon_course/final/ppts/revised/device_characteristics/index.htm; Garcia-Leon G.Maduga, 1988).

Bu yöntemin avantajları;

- Çabuk sonuç almak mümkündür.
- Hem sahada hemde laboratuarda analizi mümkündür.
- Aynı gün içerisinde birkaç numune alınabilmektedir.

Bu yöntemin dezavantajları;

- Kısa dönem örnekleme ile elde edilen sonuçların uzun dönem ortalaması ile arasındaki korelasyon bilinmemektedir.
- Numune almak ve sayım için yetişmiş elemanlara ihtiyaç vardır.

-Pahalıdır

(www.uic.edu/sph/glakes/radon_course/final/ppts/revised/device_characteristics/index.htm).

3.7.2 Uzun Dönem Ölçüm Teknikleri

Radon seviyesi günden güne, mevsimden mevsime göre değişebileceği için yıllık ortalama radon seviyesini tespit edebilmek adına uzun dönem radon ölçümü gerçekleştirilir. En sık kullanılan uzun dönem ölçüm teknikleri alfa iz dedektörleri ve elektret iyon dedektörleridir (www.epa.gov/iaq/radon/pubs/physics.htm).

3.7.2.1 Katı Hal Nükleer İz Dedektörleri (Alfa İz Dedektörleri)

Katı hal nükleer iz dedektörleri uzun süreli radon ölçümleri için kullanılmaktadır (www.uic.edu/sph/glakes/radon_course/final/ppts/revised/device_characteristics/index.htm; Durrani ve Ilic, 1997). Daha önce anlatıldığı üzere radon ve radonun bozunum ürünleri genelde alfa aktiflerdir. Radon ve radonun bozunum ürünlerinin yayınladıkları bu alfa parçacıkları tespit edilerek (sayılarak) radon konsantrasyonu bulunabilir. Çünkü yayınlanan alfa parçacıklarıyla radon konsantrasyonu arasında doğrudan bir orantı vardır (Garcia-Leon G.Maduga, 1988).

Bu teknikte radonun yayınladığı enerji aralığındaki alfa parçacıklarına hassas olan plastik filmler kullanılır. Kullanılan filmler selüloz nitrat, selüloz asetat, polikarbonat, allil diglikol karbonat gibi plastik maddelerden yapılmıştır Alfa parçacıkları bu filmler üzerinde izler oluşturur. Radonun bozunum ürünleri alfa parçacığı dışında beta ve gama ışınları da yayınlamalar. Fakat bu filmler büyük ölçüde beta ve gama ışınlarına hassas değildirler. Dolayısıyla beta ve gama ışınları bu filmler üzerinde iz oluşturmazlar. Alfa parçacıklarının bu filmler üzerinde bıraktıkları izler daha sonra kimyasal iz kazıma yöntemiyle büyütülerek mikroskopta sayılır. Gerekli hesaplamalardan sonra radon konsantrasyonu belirlenir.

(www.uic.edu/sph/glakes/radon_course/final/ppts/revised/device_characteristics/index.htm; Durrani ve Ilic, 1997).

Kimyasal iz kazıma esnasında alkali (NaOH veya KOH) yada asit çözeltileri (HF veya HNO₃) kullanılır (Durrani ve Ilic, 1997).

Nükleer iz dedektörlerinin avantajları;

- Küçüktürler (1cmx1cm ve yaklaşık 100-500 μ metre kalınlığında)
- Kullanılması kolaydır.
- Elektronik bir cihaza gerek yoktur.
- Taşınması kolaydır.
- İşlenmesi ve okunması kolaydır.
- Ucuzdur.
- Uzun süreli radon ölçümüne uygundur.
- Nemden, makul seviyedeki ısıdan ve ışıktan etkilenmezler.

Nükleer iz dedektörlerinin dezavantajları ise;

- Radon konsantrasyonu yüksek değilse anlık ölçüm almaya uygun değildir.
- Düşük konsantrasyonlarda hata oranı yüksektir (Durrani ve Ilic, 1997; www.uic.edu/sph/glakes/radon_course/final/ppts/revised/device_characteristics/index.htm).

3.7.2.2 Elektret İyon Odaları

Bu teknik Bölüm 3.7.1.4' de anlatılmıştır.

3.8 Radon Riskinin Azaltılması İçin Alınabilecek Tedbirler

Genelde insanlar zamanlarının büyük bir kısmını kapalı mekanlarda geçirdikleri için radona maruz kalmaları önemli bir problem olarak ortaya çıkmaktadır. Binalara radon; zemindeki çatlaklar, yapı bağlantı noktaları, duvar çatlakları, asma kat boşlukları, tesisat boşlukları, duvar arası boşluklarından girmekte, ayrıca yapı malzemelerinde, mutfakta veya ısınma amaçlı kullanılan doğal gaz ve içme sularında bulunan radon da bina içi konsantrasyonu arttırmaktadır. Binalardaki radon konsantrasyonunu belirleyen unsurlar:

- Topraktaki ve yapı malzemelerindeki Ra-226 miktarı
- Toprak ve yapı malzemelerinin nem oranı
- Toprak ve yapı malzemelerinden yayılma (difüzyon) potansiyeli
- Toprakla temasta olan yapının yüzey alanı ve izolasyon niteliği
- Bina zemini

- Binadaki havalandırma kapasitesi
- İklim koşulları
- İç-dış hava sıcaklık ve basınç farkıdır.

Bölüm 3.5.2' de de belirtildiği gibi binalardaki radon konsantrasyonu dışarıdaki havanın radon konsantrasyonundan çok daha yüksek olabilmektedir. Ortalama radon konsantrasyon değerleri; dış hava için $7,5 \text{ Bq/m}^3$ ve binalar için 55 Bq/m^3 civarındadır. Toprak ve yerküre orijinli pek çok yapı malzemesi atmosferdekenden $10^3 - 10^4$ kat daha fazla radon gazı konsantrasyonuna sahiptir.

Radon özellikle yeraltı suyu olmak üzere, suda da çözünebilmektedir. Yeraltı suyunda erimiş halde bulunan radon miktarı $4 - 1.000.000 \text{ Bq/L}$ arasında değişmektedir. Tipik olarak, musluktan akan su içindeki radonun 10.000' de biri havaya yayılmaktadır.

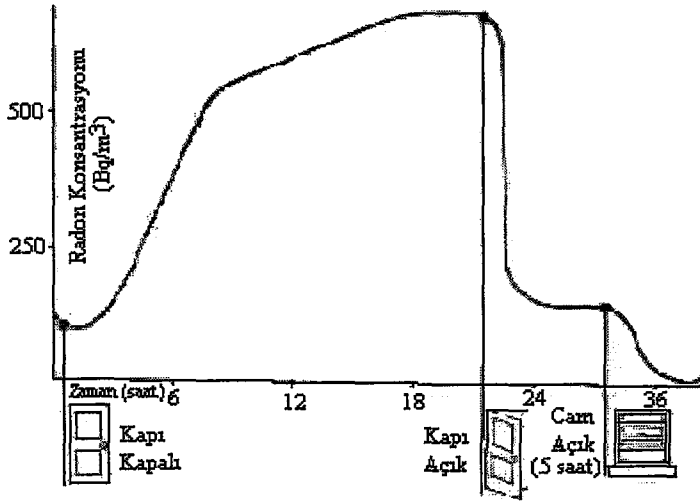
Doğal gaz üretim kuyularında 50 kBq/m^3 seviyelerine kadar radon bulunabilmektedir. Ancak kullanıma kadar geçen taşıma, işleme ve depolama aşamalarında bozunma yoluyla aktivite azalmaktadır.

Radonun bir binaya giriş hızı, yaklaşık olarak yapı malzemeleri ve topraktan 60 kBq/gün , dış ortam havasından 10 kBq/gün , sudan 4 kBq/gün ve doğal gazdan 3 kBq/gün ' dir (www.taek.gov.tr/taek/rsgd/yayinlarimiz/brosurler/radon.htm).

Bütün bu nedenlerden ötürü binalarda radon risklerinin azaltılabilmesi için aşağıdaki tedbirler alınmalıdır:

- Yapı malzemelerinin radyoaktivite analizleri ve doz değerlendirmeleri yapılarak, değerlendirme sonuçları tavsiye edilen radyoaktivite düzeylerinin üzerinde olan malzemeler bina yapımında kullanılmamalıdır.
- Binaların toprak ile temas eden yüzeyleri ve birleşim yerleri sızıntıya imkan vermeyecek şekilde izole edilmelidir.
- Evlerin duvarlarında, su ve kanalizasyon borularının geçtiği yerlerde bulunan çatlaklar, açıklıklar onarılmalı ve kapatılmalıdır.
- Yerden ve duvarlardan bina içine sızan radon gazı bina dışına kaçamazsa bina içindeki konsantrasyonu arttıracaktır. Bu nedenle, kapalı ortamların havalandırılması özen gösterilmelidir. Evlerde, kapı ve pencerelerde izolasyon yapıldıysa havalandırma süresi arttırılmalıdır.

-Radonun kanser riskini arttırdığı göz önünde tutularak kapalı ortamlarda sigara içilmemelidir. Havalandırmanın radon konsantrasyonuna etkisi Şekil 3.2' de görülmektedir (www.taek.gov.tr/taek/rsgd/yayinlarimiz/brosurler/radon.htm).



Şekil 3.2 Havalandırmanın radon konsantrasyonuna etkisi

Binalar için alınması gereken tedbirlerin arasında yer alan havalandırma, yeraltı madenleri ve bizim araştırma konumuz olan kömür madenlerinde gerçekleştirilmesi gereken en önemli husustur.

Bölüm 3.5.3' de sadece doğal havalandırmanın kullanıldığı madenlerdeki radon konsantrasyonlarına ilişkin örnekler verilmişti.

Uluslararası Radyasyon Korunması Komitesi (ICRP)' nin iş yerlerinde 500 - 1500 Bq/m³ arasında bir değer tespit edilmesini önermesi sadece doğal havalandırmanın kullanıldığı madenlerdeki değerin ne kadar yüksek olduğunu daha açık bir şekilde ortaya koymaktadır.

Bu nedenle kapalı kömür ocaklarında ;

- Radon seviyesinin sürekli olarak kontrol edilmesi
- Maden atmosferine karışan radonun bir an önce dışarı atılması yani havalandırmanın iyi bir şekilde yapılması
- Radonun maden atmosferine karışmasını sınırlandırmak, bu amaçla;
 - Eski imalat yerlerinin sızdırmaz bir şekilde kapatılması
 - Yeraltı suyunun kapalı kanallar içinde sevk edilmesi
 - Kazılmış kömürün mümkün olduğu kadar çabuk ocaktan uzaklaştırılması

tedbirlerinin alınması gerekmektedir (Fişne, 2002).



4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1 Türkiye’de Kömür Madenciliği

Ülkelerin gelişmişlik düzeylerinin en önemli göstergelerinden birisi, enerji üretimidir. Enerji üretimi, onu sağlayan kaynakların bulunmasına ve bu kaynaklardan optimum düzeyde yararlanılmasına bağlıdır. Enerji üretiminde, fosil yakıtlar (kömür, petrol, doğal gaz) büyük öneme sahiptir. 1970 yılındaki petrol krizi nedeniyle, kömür tüketimi ve kömürle ilgili araştırmalar hızlı bir artış göstermiştir.

Kömür, uygun ortamlarda, bozunma ve çürümeden kurtulan bitki kalıntısı birikimlerinin, zamanla biyokimyasal ve fiziksel etkilerle değişimi sonucu oluşan, yapısında organik ve organik olmayan yapıcı bileşenler içeren, ana elemanı karbon olan ve geçirdiği karbonlaşma evreleriyle değişen, tortul bir kayadır. Kömürleşmenin oluşması için coğrafi (ilk konum, iklim), biyolojik (bitki evrimi), jeolojik, biyokimyasal ve fiziksel etmenlerin tamamının eksiksiz oluşması gerekmektedir (Ercan, 1998).

Literatürde pek çok kömür sınıflaması bulunmaktadır. Kömürle uğraşan saha jeologları, kömürlerin çoğunlukla fiziksel özellikleriyle ve içindeki minerallerin görünüşleriyle ilgili olarak parlak kömür, lifsi kömür, killi kömür gibi tanımlamalar yapmaktadırlar. Ancak, bilimsel sınıflamalarda, kömürlerin daha çok elementsel özellikleri (karbon, oksijen ve hidrojen içerikleri) kömür sınıflaması için kullanılmaktadır. Kömürler oluşum aşamalarına göre; turba, linyit, taş kömürü ve antrasit olarak sınıflandırılmaktadır. Turba, bir kömür olmamakla birlikte kömür oluşumunun (kömürleşme) ilk evresini oluşturmaktadır. Kömürleşme; turbalaşma ile başlar, jeolojik ve kimyasal etmenlerin çalışması ve karbonlaşma artışıyla süren evrim, linyitin, yarı bitümlü ve bitümlü kömürlere, antrasite ve meta antrasite

dönüşmesi ile son bulur. Turbalaşma ve kömürleşme; karasal ortamda ve su altı ortamında olabilmektedir.

Ticari kömür sınıflamalarında en çok kullanılanı, ASTM kömür sınıflamasıdır. Kömürün sabit karbon içeriğini ve ısı değeri esas alan bu sınıflama Tablo 4.1’ de verilmektedir. Ülkemizdeki kömürler genel olarak linyit ve taş kömürü olarak sınıflandırılmaktadır (Karayiğit ve Köksoy, 1998; ASTM, 1991).

Tablo 4.1 Kömürleşme derecelerine göre ASTM kömür sınıflaması (ASTM, 1991)

Sınıf	Gruplar	Sabit karbon (dmmf)		Uçucu madde (dmmf)		Üst ısı değeri (mmmf, Btu/lb)		Kekleşme özelliği
		Eşit veya büyük	Daha küçük	Eşit veya büyük	Daha küçük	Eşit veya büyük	Daha küçük	
Antrasit	Meta-antrasit	98	-	-	2	-	-	Kekleşmez
	Antrasit	92	98	2	8	-	-	
	Semi-antrasit	86	92	8	14	-	-	
Bitümlü kömür	Düşük uçuculu	78	86	14	22	-	-	İyi kekleşir
	Orta uçuculu	69	78	22	31	-	-	
	Yüksek uçuculu-A	-	69	31	-	14 000	-	
	Yüksek uçuculu-B	-	-	-	-	13 000	14 000	
	Yüksek uçuculu-C	-	-	-	-	11 500	13 000	Kekleşir
						10 500	11 500	
Altbitümlü kömür	Altbitümlü-A	-	-	-	-	10 500	11 500	Kekleşmez
	Altbitümlü-B	-	-	-	-	9 500	10 500	
	Altbitümlü-C	-	-	-	-	8 300	9 500	
Linyit	Linyit-A	-	-	-	-	6 300	8 300	Kekleşmez
	Linyit-B	-	-	-	-	-	6 300	

Açıklamalar (eşitlikler bünye nemi içeren kömürdeki değerleri göstermektedir):

Kuru, mineral-maddesiz (dmmf) bazda sabit karbon:
 $= 100 (FC - 0.15S) / (100 - (M + 1.08A + 0.55S))$
 Kuru, mineral-maddesiz (dmmf) bazda uçucu madde:
 $= 100 - FC$ (dmmf)
 Nemli, mineral-maddesiz (mmmf) bazda üst ısı değeri:
 $= 100 (Btu - 50S) / (100 - (1.08A + 0.55S))$

Kısaltmalar:

Btu = üst ısı değeri, Btu/lb
 FC = sabit karbon, %
 VM = uçucu madde, %
 M = nem, %
 A = kül, %
 S = kükürt, %

Türkiye’de Zonguldak Havzası dışında bulunan tüm kömürler linyit kömürü olarak anılmaktadır. Anadolu’ nun hemen her köşesinde linyit oluşumuna rastlanmaktadır. Bu özellik, Anadolu’ nun jeolojik evriminin linyit oluşumuna uygun olmasından kaynaklanmaktadır. Halbuki Tunçbilek ve Soma’ da büyük rezervler halinde bulunan kömürler, linyit kömürü olarak anılmalarına rağmen ASTM (American Standards for Testing Materials) sınıflandırmasına göre Alt Bitümlü C sınıfına girmektedir (Özdoğan ve Ünver, 1998).

Türkiye’ de linyit yatakları genellikle, Alpin dağ oluşum hareketlerinin etkisi sonucu oluşmuş, dağ silsileleri arasındaki çöküntü havuzlarında gelişmiştir. Anadolu’ daki oluşumlara denizin etkisi yoktur. Trakya’ daki linyit yataklarının bazıları denizle irtibatlı özellik gösterirler. Türkiye’ de linyitler genel olarak, Paleozoik ve Mesozoik

yaşlı kayaçların oluşturduğu, temel üzerine çökelmiş, 2-65 milyon yıl önce oluşan Tersiyer yaşlı sedimentler içinde yer alır. Damarlar devamlı ve kalındır. Türkiye’de yaklaşık 8.4 milyar ton linyit rezervi tespit edilmiştir (Özdoğan ve Ünver, 1998). İşletilebilir olan kısmı ise 3.9 milyar ton civarındadır (GLİ, 2000).

Bölgeler itibariyle bakılacak olursa; Doğu, İç ve Batı Anadolu’ da kayda değer miktarda Neojen yaşlı linyit rezervleri bulunmaktadır. Akdeniz, Karadeniz ve Güneydoğu Anadolu’ da önemli linyit oluşumlarına rastlanmamaktadır. Linyit rezervlerinin bölgelere göre dağılımı Tablo 4.2’ de verilmektedir.

Tablo 4.2 Linyit rezervlerinin bölgelere göre dağılımı (Özdoğan ve Ünver, 1998)

Bölgeler	Toplam Rezerv (milyon ton)
Marmara Bölgesi	825
Karadeniz Bölgesi	215
İç Anadolu Bölgesi	1325
Güneydoğu Anadolu Bölgesi	53
Ege Bölgesi	2014
Doğu Anadolu Bölgesi	3580
Akdeniz Bölgesi	363
Toplam	8375

Türkiye’ de linyit üretimi, kamu kesimi ve özel sektör tarafından yapılmakta ve yılda yaklaşık 50-55 milyon ton linyit üretilmektedir. Üretim, özellikle önemli linyit havzalarının Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu (TKİ)’ na devrinden sonra, önemli ölçüde artmıştır. Türkiye’de üretilen linyit kömürünün %85’ i TKİ tarafından çıkarılmaktadır. Türkiye’ deki linyitler, kül, uçucu madde ve nem oranı yüksek, ısı değerleri düşük, niteliksiz kömürlerdir. Bu nedenle rezervin %80’ i sanayi kullanımına uygun değildir; ancak, termik santrallerde elektrik enerjisi üretiminde kullanılabilmektedir (Ercan, 1998).

4.2 Ölçüm Yapılan Madenlerin Tanıtılması

4.2.1 Garp Linyitleri İşletmesi

Garp Linyit İşletmeleri (G.L.İ) Müessesesi; Değirmisaz, Tunçbilek ve Soma Linyit Ocaklarının birleştirilmesiyle 01.01.1940 tarihinde Etibank' a bağlı olarak kurulmuş olup, 15.09.1957 tarihinden itibaren de 6974 sayılı kanunla kurulan Türkiye Kömür İşletmeleri (T.K.İ) Kurumu içinde yer almıştır. Başlangıçta Balıkesir' de bulunan Müessese Merkezi 07.07.1941 tarihinde Tavşanlı' ya nakledilmiştir.

Kütahya ili hudutları içinde yer alan Seyitömer Linyit havzası ise 01.06.1960 tarihinde Müessesenin bir üretim bölgesi olarak işletmeye açılmıştır. Değirmisaz Linyit İşletmesi 1966 yılında rezervi tükenerek kapatılmış, Soma Linyit İşletmesi ise 1978 yılında yeni kurulan Ege Linyit İşletmesi (E.L.İ) Müessesesi' ne devredilmiştir. Seyitömer İşletmesi "Seyitömer Linyit İşletmesi (S.L.İ) Müessesesi" olması nedeniyle 01.07.1990 tarihinden itibaren G.L.İ.' den ayrılmıştır. 1940 yılından 01.09.1995 tarihine kadar "müessese" olarak faaliyetini sürdüren Garp Linyit İşletmesi, bu tarihten itibaren G.L.İ Bölge Müdürlüğü' ne dönüştürülmüştür.

2000 yılı itibariyle rezerv; yer altı toplam 264.304.000 ton, açık ocaklarda toplam, 70.419.000 ton olmak üzere genel rezerv, 334.723.000 tondur.

GLİ İşletme Müdürlüğü yeraltı kömür üretimini, Tunçbilek Yeraltı ve Ömerler Yeraltı Ocağı olmak üzere iki yeraltı ocağından gerçekleştirmektedir (GLİ, 2000; www.garplinyitleri.gov.tr).

4.2.2 Ege Linyitleri İşletmesi

Ege Linyitleri İşletmesi (E.L.İ) Bölge Müdürlüğü hukuki olarak 28.07.1978 tarihinde E.L.İ Müessesesi Müdürlüğü olarak kurulmuştur. Ancak Soma havzasında maden kömürü sahalarının işletilmeye başlaması 1913 yıllarına kadar uzanmaktadır. E.L.İ. Manisa ilinin Soma ilçesinde faaliyet göstermektedir.

Bölge Müdürlüğü' ne ait ruhsat sahalarında bu güne kadar yapılan arama ve araştırma çalışmalarında tespit edilmiş görünür ve muhtemel rezerv 313.000.000 tondur. Ege Linyitleri İşletmesi bünyesinde Eynez yeraltı linyit ocağı bulunmaktadır. (ELİ, 2000; www.ege-linyitleri.gov.tr/ozgecmis.htm).

4.3 Ölçüm Tekniğı ve Dedektörlerin Hazırlanması

4.3.1 Ölçüm Tekniğı

Bu çalışmada Garp Linyitleri İşletmesi ve Ege Linyitleri İşletmesi bünyesindeki yeraltı linyit kömürü maden ocaklarında radon gazı konsantrasyon seviyelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla Bölüm 3' te ayrıntılı bir şekilde anlatılan radon gazı ölçüm tekniklerinden Nükleer İz Dedektörlerinin kullanılmasına karar verilmiştir. Çünkü amacımız uzun süreli radon gazı ölçümü yaparak, bu madenlerde çalışan işçilerin yılda maruz kaldığı doz değerini belirlemektir. Bu dedektörler bizim bu amaçlarımıza cevap vermektedir. Zaten nükleer iz dedektörleri yeraltı madenlerinde uzun süreli radon konsantrasyon değerlendirmeleri için yaygın olarak kullanılmaktadırlar.

Bu çalışmada ticari adı CR-39 olan “allil diglikol karbonat” plakalarından yapılmış nükleer iz dedektörleri kullanılmıştır.

4.3.2 Dedektörlerin Hazırlanması

Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi (ÇNAEM) tarafından temin edilen 500 μ m kalınlığındaki CR-39 plakaları 20x20 mm boyutlarında kesilmiştir. Kesilen dedektörler 100 ml (100 cm³) hacmindeki plastik kapların (difüzyon kabı) tabanına yerleştirilmiştir (Köksal ve diğ., 1993). Kabin ağzı radonun bozunum ürünlerini ve aeresollerini filtre ederek yalnız radon gazını geçirecek şekilde özel bir kapakla kapatılmıştır (Fişne, 2000; Köksal ve diğ., 1993). Şekil 4.1' de hazırlanan CR-39 nükleer iz dedektörü görülmektedir.

Difüzyon kabına giren radon gazının radyoaktif bozunması sonucu açığa çıkan alfa parçacıkları dedektör ile etkileşerek film üzerinde iz bırakırlar. Bu izlerin sayısı radon konsantrasyonu ile orantılıdır.

Her bir yeraltı maden ocağı için 50 adet dedektör bu şekilde hazırlanmıştır. Hazırlanan dedektörlerin ölçüm yapılacak medenlere götürülmesi esnasında dış ortamda bulunabilecek radon gazından etkilenmemesi için alüminyum folyolarla kaplanarak muhafazası sağlanmıştır.

4.4 Maden Ocaklarındaki Dedektör Yerleştirme Noktaları

Manisa Soma' da Eynez yeraltı maden ocağına ve Kütahya' da Tunçbilek ve Ömerler yeraltı maden ocaklarına 50' şer tane dedektör yerleştirilmiştir. Her bir noktaya 2 adet dedektör konulmuştur. Dolayısıyla her bir maden ocağında 25 noktaya dedektör yerleştirilmiştir. Her bir noktadaki radon konsantrasyon değeri iki dedektörün ortalaması alınarak belirlenmiştir.



Şekil 4.1 CR-39 nükleer iz dedektörü

Maden ocaklarında dedektörlerin hangi noktalara yerleştirileceğine oradaki maden mühendisleriyle birlikte karar verilmiştir. Maden mühendislerinden temin edilen ocakların havalandırma ve üretim planları üzerinde noktaların yerlerine karar verirken; madencilik faaliyetlerinin yoğun olduğu ve işçilerin fazla zaman geçirdiği yerler tespit edilmiş, aynı zamanda bu noktaların ocağın havasını en iyi şekilde temsil etmesi amaçlanmıştır. Dedektörleri yerleştirirken temiz hava girişinin ve kirli hava çıkışının olduğu yerler de dikkate alınmıştır. Bununla birlikte yerleştirilen dedektörler orada uzun süreli kalacağı için dedektörlerin zarar görmemesi adına “ayak” tabir edilen kömürün çıkarıldığı yerlere dedektör konulamamıştır. Çünkü bu “ayaklar” sabit değildir ve kömür çıkarıldıkça ilerlemektedir.

Her bir maden ocağı için hangi noktalara dedektör yerleştirildiği Tablo 4.3 - 4.5' de ve Ek A1 - A3' de verilen maden ocaklarının havalandırma planları üzerinde

gösterilmiştir. Bu planlarda kırmızı çizgiler temiz havayı, mavi çizgiler ise kirli havayı temsil etmektedir.

4.4.1 Tunçbilek Maden Ocağı

Maden mühendisleriyle tesbit edilen 25 noktaya her bir noktaya 2 tane olmak üzere toplam 50 tane dedektör yerleştirilmiştir. Yerleştirilen dedektörler 18 Kasım 2003 - 7 Ocak 2004 tarihleri arasında toplam 51 gün radon gazına maruz bırakılmışlardır. Dedektörlerin yerleştirildiği noktalar Tablo 4.3' de verilmektedir. Ayrıca bu noktalar Ek A1' de verilen havalandırma planı üzerinde de gösterilmiştir.

4.4.2 Ömerler Maden Ocağı

Ömerler maden ocağında da toplam 50 dedektör 25 noktaya 18 Kasım 2003' de yerleştirilmiştir. Toplam 51 gün radon gazına maruz bırakılan dedektörler 7 Ocak 2004' de toplanmışlardır. Dedektörlerin yerleştirildiği noktalar Tablo 4.4' de verilmektedir. Dedektör yerleri Ek A2' de verilen havalandırma planı üzerinde de gösterilmiştir.

4.4.3 Eynaz Maden Ocağı

Eynaz maden ocağında maden mühendisleriyle tesbit edilen 25 noktaya her bir noktaya 2 tane olmak üzere toplam 50 tane dedektör yerleştirilmiştir. Yerleştirilen dedektörler 19 Kasım 2003 - 8 Ocak 2004 tarihleri arasında toplam 51 gün radon gazına maruz bırakılmışlardır. Dedektörlerin yerleştirildiği noktalar Tablo 4.5' de verilmektedir. Bu maden ocağına ilişkin ölçüm noktalarının gösterildiği havalandırma planı Ek A3' dedir.

Madenlerde 51 gün süreyle radon gazına maruz bırakılan dedektörler, bu sürenin sonunda yerleştirildikleri noktalardan alınarak kimyasal iz kazıma ve sayım işlemlerini gerçekleştirmek üzere Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi (ÇNAEM) Sağlık Fiziki Bölümü' ne getirilmiştir. Dedektörler laboratuara nakilleri esnasında da dış ortamdaki radon gazından etkilenmelerini önlemek için alüminyum folyo ile kaplanmışlardır.

4.5 Kimyasal İz Kazıma İşlemi

Laboratuara getirilen dedektörler, üzerlerinde oluşan izlerin görünür hale gelmesini sağlamak için kimyasal iz kazıma işlemine tabi tutulmuşlardır. Bunun için dedektörler daha önceden hazırlanmış %30' luk sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisi içerisinde, 65 °C sıcaklıkta 17 saat süreyle bekletilmişlerdir. Daha sonra saf suyla yıkanarak temizlenmiş ve kurumaya bırakılmışlardır. Bu sayede filmler üzerindeki izler mikroskopta görünür hale getirilmiş olmaktadır. Şekil 4.2' de filmler üzerindeki izlerin (x200) büyütmeli mikroskoptaki görüntüsüne bir örnek verilmektedir.

Tablo 4.3 Tunçbilek İşletmesi dedektör yerleştirme noktaları

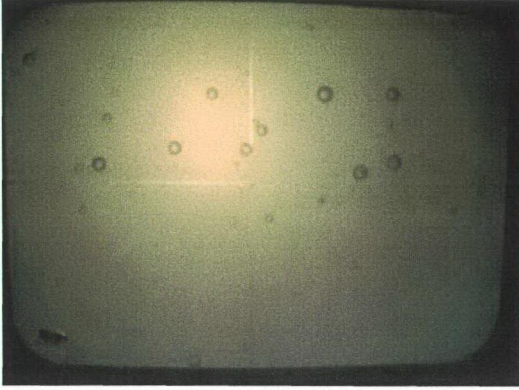
No	Konum	No	Konum
1	Ocak Girişi	14	107 Kuyruk Sonu
2	Katar Durağı	15	Şalter Önü
3	Trafik Önü	16	Pompa
4	Dinamit Ambarı Önü	17	Pompa İlerisi
5	Trafo Önü	18	Üç Yol
6	1.Bant Başı	19	Direk Test
7	2.Bant Boyu	20	Yemek Yeri
8	Ambar Önü	21	Yemek Yeri Kapı Önü
9	105 Ayak Hava Giriş	22	Monoray Yolu
10	105 Ayak Kuyruk	23	Monoray Yolu
11	Dört Yol	24	Monoray Yolu
12	105-107 Sabit	25	Monoray Yolu
13	107 Ayak Kuyruğu		

Tablo 4.4 Ömerler İşletmesi dedektör yerleştirme noktaları

No	Konum	No	Konum
1	M-5 Pano Hazırlık Bacası	14	Mekanize Panolar Hava Çıkışı
2	M-4 Pano Sabit Yolu	15	Ocak Hava Çıkışı
3	M-4 Pano Kuyruk Yolu	16	Taban Bant Yolu
4	M-6 Pano Hazırlık Bacası	17	1/C Hava Çıkışı
5	Mekanize Panolar Hava Girişi	18	Bant Yolu
6	Mekanize Panolar Hava Çıkışı	19	Panolar Kirli Hava Yolu
7	M-6 Pano Hava Yolu (Kuyruk)	20	Panolar Temiz Hava Yolu
8	M-6 Pano Hava Yolu (Sabit)	21	1/C Nakliye Yolu
9	Büyük Hazırlık Yolu	22	1/C Pano Yolu
10	Mekanize Nakliyat Yolu (2.Bant Kuyruğu)	23	1/C Sabit Yolu
11	Mekanize Nakliyat Yolu (2.Bant Başı)	24	1/C Kuyruk Yolu
12	Mekanize Kirli Hava Bağlantı Yolu	25	1/C Kirli Hava Çıkışı
13	Dinamit Ambarı Yolu		

Tablo 4.5 Eynaz İşletmesi dedektör yerleştirme noktaları

No	Konum	No	Konum
1	Genel hava girişi	14	Mekanize tavan yolu takımhane
2	Panolar hava girişi	15	Mekanize tavan yolu pano giriş
3	Ana nakliye desandre kaçak (100 m)	16	Mekanize tavan taban yolu irtibat
4	Ana nakliye desandre kaçak (250 m)	17	Mekanize tavan yolu hava giriş
5	Ana nakliye desandre hava giriş (350 m)	18	Mekanize tavan yolu hava çıkış
6	Ana nakliye desandre hava giriş (450 m)	19	Mekanize pano hava çıkış
7	Mekanize pano rekup motor başı	20	Mekanize pano hava çıkış
8	Klasik hava çıkış	21	Mekanize pano hava çıkış
9	Klasik hava çıkış (Sensör yanı)	22	Klasik ayakhava giriş desandre
10	Klasik hava giriş rekup	23	İstihsal desandre dibi tulumba
11	Klasik istihsal desandre dibi (Trafo)	24	Mekanize hazırlık baca karşısı
12	İstihsal desandre şartel karşısı	25	Güney hava çıkış trafo karşısı
13	Mekanize baca içi		



Şekil 4.2 İz örneği

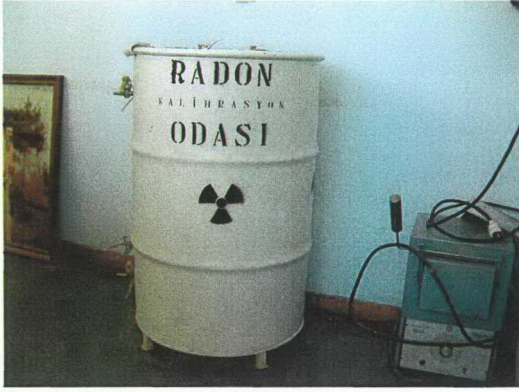
4.6 Kalibrasyon İşlemi

Pasif radon dozimetrelerini radon gazı konsantrasyonu cinsinden değerlendirmek için radon konsantrasyonu bilinen bir ortama ihtiyaç vardır. ÇNAEM Sağlık Fizik Bölümü'nde bu amaçla geliştirilmiş bir radon kalibrasyon odası bulunmaktadır. Bu çalışmada söz konusu radon kalibrasyon odasından yararlanılmıştır.

Radon kalibrasyon odası, tabanına alfa aktif olan bir ^{226}Ra kaynağı yerleştirilen 222 litrelik bir bidondan oluşmaktadır. Bidon içerisinde dedektörlerin konulacağı raflar bulunmaktadır.

Bidon içerisindeki radonun denge konsantrasyonu 3.2 kBq/m^3 tür. Şekil 4.3' de Kalibrasyon odası görülmektedir.

Kalibrasyon için 10 tane dedektör hazırlanmıştır. Hazırlanan bu dedektörler ikili gruplar halinde 1-5 gün süreyle kalibrasyon odasında bırakılarak radon gazına maruz kalmaları sağlanmıştır. Kalibrasyon odasındaki bu dedektörler daha sonra kimyasal iz kazıma işlemine tabi tutulmuş ve mikroskopta sayılarak üzerlerindeki iz miktarı belirlenmiştir (Köksal ve diğ., 1993).



Şekil 4.3 Radon Kalibrasyon Odası

Fon (background) değerini belirlemek için de 10 tane dedektör ayrılmıştır. Burada background değerinden kastedilen ortamın backgroundu değildir. Filmlerin zaman içerisinde üzerinde oluşan iz değeridir. Ölçüm sonuçlarını etkilememesi için filmler üzerindeki bu izlerin belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla dedektörlerin kimyasal iz kazıma işlemine tabi tutularak sayımları yapılmıştır. Bütün bu değerlerin ortalaması alınarak tek bir fon (background) değeri elde edilmiştir. Çalışmamızda bu değer 31,76 iz olarak belirlenmiştir.

Kalibrasyon dedektörleri üzerinden okunan iz sayılarından fon (background) iz sayıları çıkarılarak “net iz sayısı” bulunmuştur. Net iz sayısı dedektörlerin kalibrasyon odasındaki bekleme sürelerine bölünerek her bir dedektörde birim zamanda oluşan net iz sayısı elde edilmiştir. Daha sonra bu değerlerin ortalaması alınarak kalibrasyon dedektörleri üzerinde birim zamanda oluşan net iz sayısı hesaplanmıştır (Fişne, 2000; Köksal ve diğ., 1993). Bu değer 0,41 iz/saat olarak bulunmuştur. Kalibrasyon odasının konsantrasyonu bu değere bölünerek konsantrasyonu bilinen bir kaynağa göre bir kalibrasyon faktörü bulunmuştur. Çalışmamızda Kalibrasyon Faktörü:

$$7,8 \text{ (kBq/m}^3\text{)/(iz/saat)}$$

olarak tespit edilmiştir.

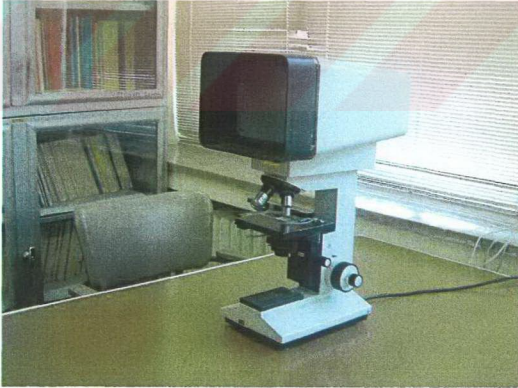
4.7 Sayım Tekniği

Kimyasal iz kazıma işlemiyle görünür hale getirilen izlerin (x200) büyütmeli optik mikroskop yardımıyla sayımı gerçekleştirilmiştir. şekil 4.4' de sayım işleminde kullanılan mikroskop görülmektedir.

Sayım işleminde, her bir dedektör üzerinde 10 farklı bölgede izler sayılmış ve bunlar kaydedilmiştir. Daha sonra da bu sayımların ortalaması alınmıştır. Ortalama iz sayısından fon (background) değeri çıkarılarak net iz sayısı bulunmuştur. Net iz sayısı, dedektörün madende kalma süresine (saat olarak) bölünerek "iz yoğunluğu" tespit edilmiştir. Herbir dedektör için bu işlem tekrarlanarak dedektörlerin iz yoğunlukları bulunmuştur. İz yoğunluk değerleri kalibrasyon faktörüyle çarpılarak, elde edilen iz sayıları radon konsantrasyonuna (Bq/m³) d n şt r lm ştir. Bu işlem aşağıdaki bağıntıda da görülmektedir.

$$\text{Radon Konsantrasyonu} = \frac{\text{Dedektör  zerindeki Net İz Sayısı} \times \text{Kalibrasyon Faktörü}}{\text{Dedektörün Radon Gazına Maruz Kaldığı Süre}} \quad (4.1)$$

Madenlerde bir noktaya iki dedektör yerleştirilmiştir. Her noktaya ait konsantrasyon değeri, o noktadaki iki dedektörün ortalaması alınarak bulunmuştur.



şekil 4.4 Mikroskop

5. ÖLÇÜM SONUÇLARI

Bu çalışmada Garp Linyitleri İşletmesine bağlı Tunçbilek ve Ömerler maden ocaklarında ve Ege Linyitleri İşletmesine bağlı Eynez maden ocağında uzun süreli radon gazı ölçümü gerçekleştirilmiştir. Bölüm 4' te anlatıldığı üzere dedektörler hazırlanmış ve 51 gün süreyle madenlerde bekletilmişlerdir. Bu süre sonunda dedektörler madenlerden alınmış ve Bölüm 4' te ayrıntılı olarak anlatılan kimyasal iz kazıma ve sayım işlemlerine tabi tutulmuşlardır. Bu işlemler sonunda radon konsantrasyon değerleri elde edilmiştir.

Garp Linyitleri ve Ege Linyitleri İşletmelerine ait hesaplanan radon konsantrasyon değerleri ayrı ayrı verilmiştir.

5.1 Garp Linyitleri İşletmesi Ölçüm Sonuçları

5.1.1 Tunçbilek Maden Ocağı Ölçüm Sonuçları

Tunçbilek maden ocağında gerçekleştirilen radon gazı ölçüm sonuçları Tablo 5.1' de verilmiştir. Ölçüm yapılan noktalardaki radon gazı konsantrasyonu $50 - 272 \text{ Bq/m}^3$ arasında değişmektedir. Tunçbilek maden ocağı için elde edilen ortalama radon konsantrasyonu $172 \pm 54 \text{ Bq/m}^3$ dür.

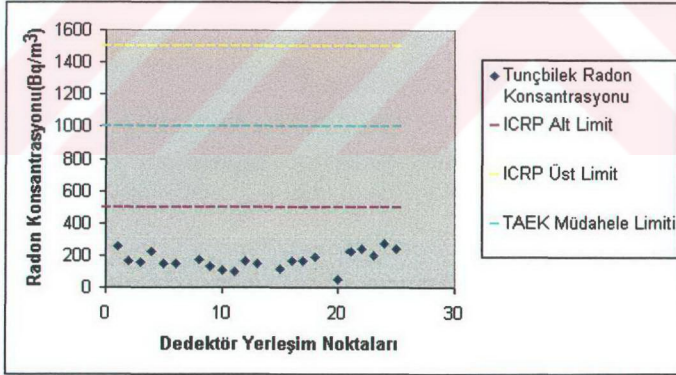
Tunçbilek maden ocağına ait radon konsantrasyon dağılımı Şekil 5.1' de görülmektedir.

5.1.2 Ömerler Maden Ocağı Ölçüm Sonuçları

Ömerler maden ocağında gerçekleştirilen radon gazı ölçüm sonuçları Tablo 5.2' de verilmiştir. Ölçüm yapılan noktalardaki radon gazı konsantrasyonu $109 - 587 \text{ Bq/m}^3$

Tablo 5.1 Tunçbilek İşletmesi ölçüm sonuçları

No	Hava Hızı (m/s)	Hava Miktarı (m ³ /dk)	Radon Konsantrasyonu (Bq/m ³)
1	0,45	446	254
2	0,45	446	164
3	0,78	439	155
4	0,78	439	224
5	0,60	515	150
6	0,88	360	151
7	2,07	1466	Kayıp
8	0,48	387	174
9	0,58	235	131
10	0,72	288	110
11	0,90	374	100
12	0,18	71	166
13	0,90	374	152
14	0,90	374	Kayıp
15	0,90	374	116
16	0,90	374	167
17	0,90	374	166
18	0,80	506	193
19	0,80	506	Kayıp
20	0,18	71	50
21	0,18	71	220
22	0,80	506	239
23	0,80	506	197
24	0,80	506	272
25	0,80	506	239



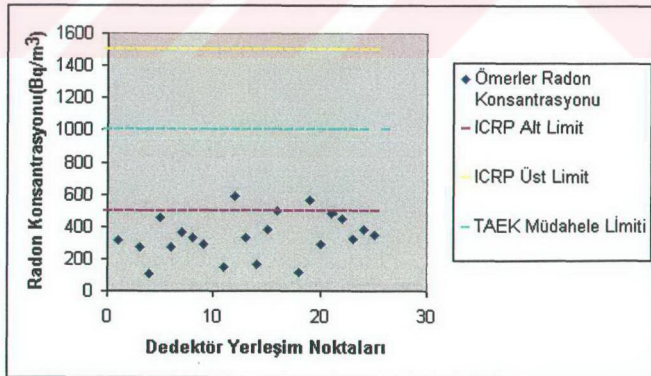
Şekil 5.1 Tunçbilek İşletmesi radon konsantrasyon dağılımı

arasında değişmektedir. Ömerler maden ocağı için elde edilen ortalama radon konsantrasyonu $340 \pm 132 \text{ Bq/m}^3$ dür.

Ömerler maden ocağına ait radon konsantrasyon dağılımı Şekil 5.2' de görülmektedir.

Tablo 5.2 Ömerler İşletmesi ölçüm sonuçları

No	Hava Hızı (m/s)	Hava Miktarı (m ³ /dk)	Radon Konsantrasyonu (Bq/m ³)
1	0,15	120	315
2	0,46	360	Kayıp
3	0,46	360	276
4	0,14	110	109
5	0,47	370	454
6	0,47	370	276
7	0,14	110	363
8	0,14	110	328
9	0,18	85	289
10	0,09	70	Kayıp
11	0,09	70	151
12	1,02	370	587
13	0,25	120	334
14	1,16	560	170
15	0,90	700	381
16	0,30	210	497
17	0,30	210	Kayıp
18	0,16	60	117
19	0,31	150	564
20	-	-	287
21	0,30	150	477
22	0,10	50	451
23	0,10	50	323
24	0,33	150	381
25	0,50	210	351



Şekil 5.2 Ömerler İşletmesi radon konsantrasyon dağılımı

5.2 Ege Linyitleri İşletmesi Ölçüm Sonuçları

Ege Linyitleri İşletmesine bağlı Eynez maden ocağı bulunmaktadır. Eynez maden ocağında gerçekleştirilen radon gazı ölçüm sonuçları Tablo 5.3' te verilmektedir. Ölçüm yapılan noktalardaki radon gazı konsantrasyonu $75 - 442 \text{ Bq/m}^3$ arasında değişmektedir. Eynez maden ocağı için elde edilen ortalama radon konsantrasyonu $205 \pm 89 \text{ Bq/m}^3$ dür.

Eynez maden ocağına ait radon konsantrasyon dağılımı Şekil 5.3' te görülmektedir.

5.3 Doz Değerlendirmesi

Bu çalışmada Garp Linyitleri İşletmesine bağlı Tunçbilek ve Ömerler yeraltı maden ocaklarında ve Ege Linyitleri İşletmesine bağlı Eynez yeraltı maden ocağında gerçekleştirilen radon gazı ölçümlerinden elde edilen konsantrasyon değerleri kullanılarak bu madenlerde çalışan işçilerin radon ve radonun bozunum ürünlerinden dolayı maruz kaldıkları etkin eşdeğer dozlar ile sadece radonun bozunum ürünlerinden aldıkları dozlar hesaplanmıştır.

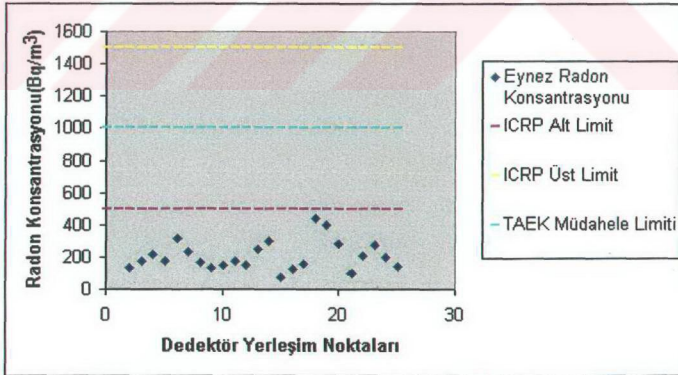
Doz hesapları UNSCEAR-2000 (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation) raporunda önerilen model kullanılarak yapılmıştır. Bu modele göre işçilerin çalışma ortamında saatte $1,2 \text{ m}^3$ hava soluduğu ve yılda 2000 saat çalıştığı kabul edilmiştir. Denge Eşdeğer Konsantrasyonu (EEC) 0,4 olarak alınmıştır. İşyerlerinde ölçümlenen radonun yıllık etkin doz eşdeğerini hesaplamak için etkin doz katsayısının belirlenmesi gerekmektedir. Etkin doza çevirme katsayısı ^{222}Rn için $9 \text{ (nSv/saat)/(Bq/m}^3\text{)}$ olarak verilmektedir (ICRP 65, 1993).

Ortalama radon konsantrasyon değerleri kullanılarak maden ocaklarında çalışan işçilerin radon ve radonun bozunum ürünlerinden aldıkları toplam yıllık etkin dozlar Denklem 5.1' e göre hesaplanır.

$$\text{Yıllık Etkin Doz} = (\text{EEC}) \times (\text{Ortalama Radon Konsantrasyonu}) \times (\text{Etkin Doza Çevirme Katsayısı}) \times (\text{Yıllık Çalışma Süresi}) \quad (5.1)$$

Tablo 5.3 Eynez İşletmesi ölçüm sonuçları

No	Hava Hızı (m/s)	Hava Miktarı (m³/dk)	Radon Konsantrasyonu (Bq/m³)
1	2,20	1320	129
2	2,74	1151	170
3	0,48	374	214
4	0,48	374	173
5	1,00	780	312
6	0,90	540	228
7	0,41	157	163
8	0,54	151	129
9	0,63	151	148
10	0,83	263	176
11	Kör Baca İçİ Hava Hızı Ölçülemiyor	-	151
12	0,72	346	250
13	0,13	101	297
14	Kör Baca İçİ Hava Hızı Ölçülemiyor	-	75
15	0,49	382	127
16	0,62	204	160
17	0,23	179	442
18	0,63	178	399
19	1,00	378	279
20	1,00	178	101
21	0,90	178	210
22	0,33	83	274
23	Kör Baca İçİ Hava Hızı Ölçülemiyor	-	203
24	0,72	346	142
25	1,57	942	170



Şekil 5.3 Eynez İşletmesi radon konsantrasyon dağılımı

Garp Linyitleri İşletmesi' ne bağlı Tunçbilek ve Ömerler yeraltı maden ocaklarında ortalama radon konsantrasyonları sırasıyla $172 \pm 54 \text{ Bq/m}^3$ ve $340 \pm 132 \text{ Bq/m}^3$ olarak bulunmuştur. Ege Linyitleri İşletmesi' ne bağlı Eynez yeraltı maden ocağında ortalama radon konsantrasyonu ise $205 \pm 89 \text{ Bq/m}^3$ olarak bulunmuştur.

Denklem 5.1 kullanılarak, Tunçbilek, Ömerler ve Eynez maden ocakları için yıllık etkin doz hesabı verilmiştir.

Tunçbilek Maden Ocağı;

$$(0,4) \times (172 \text{ Bq/m}^3) \times (9 \text{ nSv/ saat/Bq/m}^3) \times (2000 \text{ saat/yıl}) = 1,23 \text{ mSv/yıl}$$

Ömerler Maden Ocağı;

$$(0,4) \times (340 \text{ Bq/m}^3) \times (9 \text{ nSv m}^3/\text{Bq saat}) \times (2000 \text{ saat/yıl}) = 2,44 \text{ mSv/yıl}$$

Eynez Maden Ocağı;

$$(0,4) \times (205 \text{ Bq/m}^3) \times (9 \text{ nSv m}^3/\text{Bq saat}) \times (2000 \text{ saat/yıl}) = 1,47 \text{ mSv/yıl}$$

Radonun bozunum ürünleri konsantrasyonuna toplam maruz kalma aylık çalışma seviyesi (WLM) olarak ölçülür. WLM hesapları ICRP-65 raporuna göre yapılmıştır.

ICRP-65 raporunda; denge faktörü 0,4 alınmış ve işçilerin yılda 2000 saat çalıştığı varsayılmıştır. Bu kabullerle 1 Bq/m^3 radon konsantrasyonuna maruz kalma sonucu radonun bozunum ürünlerinden alınacak doz miktarı $1,26 \times 10^{-3}$ WLM olarak verilmektedir (ICRP 65, 1993). Buna göre WLM, Denklem 5.2' ye göre hesaplanır.

$$\text{WLM} = (\text{Radon Konsantrasyonu}) \times (1,26 \times 10^{-3}) \quad (5.2)$$

Buna göre Tunçbilek, Ömerler ve Eynez yeraltı maden ocakları için WLM değerleri dedektör yerleştirilen her bir nokta için Denklem 5.2' ye göre hesaplanmış ve bunlar Tablo 5.4 – 5.6' da verilmiştir.

Tunçbilek için WLM değerleri 0,06 – 0,34 WLM/yıl arasında değişmektedir. Ortalama WLM değeri $0,22 \pm 0,11 \text{ WLM/yıl}$ olarak hesaplanmıştır.

Ömerler için WLM değerleri 0,15 – 0,74 WLM/yıl arasında değişmektedir. Ortalama WLM değeri $0,43 \pm 0,17 \text{ WLM/yıl}$ olarak hesaplanmıştır.

Eynez için WLM değerleri 0,09 – 0,56 WLM/yıl arasında değişmektedir. Ortalama WLM değeri $0,26 \pm 0,07 \text{ WLM/yıl}$ olarak hesaplanmıştır.

Tablo 5.4 Tunçbilek İşletmesi WLM değerleri

No	Aylık Çalışma Düzeyi (WLM)	No	Aylık Çalışma Düzeyi (WLM)
1	0,32	14	
2	0,21	15	0,16
3	0,2	16	0,21
4	0,29	17	0,21
5	0,19	18	0,24
6	0,19	19	
7		20	0,06
8	0,22	21	0,28
9	0,17	22	0,3
10	0,16	23	0,25
11	0,13	24	0,34
12	0,21	25	0,3
13	0,19		

Tablo 5.5 Ömerler İşletmesi WLM değerleri

No	Aylık Çalışma Düzeyi (WLM)	No	Aylık Çalışma Düzeyi (WLM)
1	0,4	14	0,21
2		15	0,48
3	0,35	16	0,63
4	0,16	17	
5	0,6	18	0,15
6	0,35	19	0,71
7	0,46	20	0,36
8	0,41	21	0,6
9	0,36	22	0,57
10		23	0,41
11	0,19	24	0,48
12	0,74	25	0,44
13	0,42		

Tablo 5.6 Eynez İşletmesi WLM değerleri

No	Aylık Çalışma Düzeyi (WLM)	No	Aylık Çalışma Düzeyi (WLM)
1	0,16	14	0,09
2	0,26	15	0,16
3	0,27	16	0,2
4	0,22	17	0,56
5	0,4	18	0,5
6	0,29	19	0,35
7	0,21	20	0,13
8	0,17	21	0,26
9	0,19	22	0,36
10	0,22	23	0,26
11	0,26	24	0,18
12	0,31	25	0,22
13	0,38		

6. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışmada Türkiye Kömür İşletmeleri (TKİ) bünyesindeki Ege Linyitleri İşletmesi' ne bağlı Eynez ve Garp Linyitleri İşletmesi' ne bağlı Tunçbilek ve Ömerler kapalı maden ocaklarında radon gazı ölçümleri yapılmıştır.

Radon gazı ölçümlerinde nükleer iz dedektörleri kullanılmıştır. Her bir maden ocağına 50 adet olmak üzere toplam 150 adet dedektör yerleştirilmiştir. Dedektörler maden ocaklarında 51 gün süreyle radon gazına maruz bırakılmışlardır.

Uluslararası Radyasyon Korunması Komitesi (ICRP) yeraltı maden ocakları için radon gazı konsantrasyon limit değerlerini belirlemiştir. Bu değerler 500 – 1500 Bq/m³ dür. Bunun yanı sıra ICRP, müdahale edilmesi gereken limit (action level) değerinin seçimini her ülkenin kendi şartlarını göz önünde bulundurarak bu aralıktan seçmesini tavsiye etmiştir. Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK) ülkemiz için bu değeri 1000 Bq/m³ olarak belirlemiştir (ICRP 65, 1993).

Garp Linyitleri İşletmesi' ne bağlı Tunçbilek maden ocağında yapılan ölçümlerde radon gazı konsantrasyonunun 50 – 272 Bq/m³ arasında değiştiği bulunmuştur. Tunçbilek maden ocağı için elde edilen ortalama radon konsantrasyonu ise 172 ± 54 Bq/m³ dür.

Tunçbilek maden ocağında elde edilen en yüksek radon gazı konsantrasyon değerleri 254 Bq/m³ ve 272 Bq/m³ olarak sırasıyla 1. ve 24. noktalarda ölçülmüştür (Tablo 5.1). Bu noktalar ocağın giriş ve çıkış yolu üzerindedir. Ocağın bu giriş ve çıkış yerlerinden aynı zamanda kirli hava çıkışı sağlanmaktadır. Bu sebeple bu noktalarda radon gazı konsantrasyonunun diğer noktalara göre yüksek olması beklenen bir sonuçtur.

Dedektör yerleştirilen 20. noktada 50 Bq/m³ ile en düşük radon gazı konsantrasyonu tespit edilmiş olup, bu noktada ölçülen hava miktarı 71 m³/dk' dir. Hava miktarının 20. nokta ile aynı olduğu 12. ve 21. noktalarda ise Tablo 5.1' den de görüleceği gibi daha yüksek radon konsantrasyon değerleri ölçülmüştür. 20. noktada en düşük radon konsantrasyon değerinin elde edilmesinin nedeni, Ek A1' deki havalandırma

planından da görüldüğü gibi havanın bu noktaya maden içinde dolaşmadan, doğrudan hava pompasından gelmesidir. Bu nedenle hava akışı düşük olsa bile sürekli temiz hava sirkülasyonu olduğundan radon gazı konsantrasyonu düşük çıkmaktadır.

Tunçbilek maden ocağındaki radon gazı konsantrasyon değerlerinin tamamı ICRP' nin belirlediği alt limit değeri olan 500 Bq/m^3 ten düşüktür. Bu nedenle radondan kaynaklanabilecek sağlık riskleri bakımından kritik olan nokta bulunmadığı söylenebilir.

Garp Linyitleri İşletmesi' ne bağlı Ömerler maden ocağında yapılan ölçümlerde radon gazı konsantrasyonunun $109 - 587 \text{ Bq/m}^3$ arasında değiştiği bulunmuştur. Ömerler maden ocağı için elde edilen ortalama radon konsantrasyonu ise $340 \pm 132 \text{ Bq/m}^3$ dür. En yüksek radon gazı konsantrasyonu 587 Bq/m^3 olarak 12. noktada, en düşük radon gazı konsantrasyonu ise 109 Bq/m^3 olarak 4. noktada tespit edilmiştir (Tablo 5.2).

En yüksek radon gazı konsantrasyonunun elde edildiği 12. nokta mekanize kirli hava bağlantı yolu üzerindedir. Bu husus göz önünde bulundurulduğunda bu noktadaki radon gazı konsantrasyonun yüksek olması beklenen bir sonuçtur.

Diğer noktalara göre yüksek radon konsantrasyonuna sahip olan bir diğer nokta da 564 Bq/m^3 lük radon gazı konsantrasyonu ile 19. noktadır. Bu nokta panolar kirli hava yolu üzerindedir. Bu husus göz önünde bulundurulduğunda bu noktadaki radon gazı konsantrasyonun da yüksek olması beklenen bir sonuçtur.

11. noktada ölçülen hava miktarı $70 \text{ m}^3/\text{dk}$ olarak en az hava akışının olduğu yerlerden biridir. Bundan dolayı bu noktada radon gazı birikmesi beklenebilir. Fakat bu noktada radon gazı konsantrasyon değeri (151 Bq/m^3), Ömerler maden ocağı için elde edilen ortalama radon konsantrasyonu değerinin altında bulunmuştur. Bu sonuç, bu noktanın madendeki dört temiz hava girişlerinden birine yakın olmasıyla izah edilebilir.

Ömerler maden ocağındaki ölçüm yapılan bütün noktalar ICRP' nin radon gazı konsantrasyonu için belirlediği üst limit ve TAEK' in belirlediği müdahale limiti değerlerinden düşüktür (Şekil 5.2). Sadece iki noktada (12. ve 19. noktalar) ICRP' nin alt limit değeri olan 500 Bq/m^3 ü geçen değerler tespit edilmiştir.

Ege Linyitleri İşletmesi' ne bağlı Eynez maden ocağında yapılan ölçümlerde radon gazı konsantrasyonunun 75 - 442 Bq/m³ arasında değiştiği bulunmuştur. Eynez maden ocağı için elde edilen ortalama radon gazı konsantrasyonu ise 205±89 Bq/m³' dür. En yüksek radon gazı konsantrasyonu 442 Bq/m³ olarak 17. noktada, en düşük radon gazı konsantrasyonu ise 75 Bq/m³ olarak 14. noktada tespit edilmiştir.

ICRP' nin belirlediği alt limit değerine en yakın olan nokta 442 Bq/m³, lük radon gazı konsantrasyonu ile 17. noktadır. Bu noktaki ölçülen hava miktarı 179 m³/dk' ır. Hava miktarının nispeten az olması nedeniyle diğer noktalara göre daha yüksek radon konsantrasyonu elde edilmesi beklenen bir sonuçtur.

Eynez maden ocağındaki radon konsantrasyon değerlerinin tamamı ICRP' nin belirlediği alt limit değeri olan 500 Bq/m³' ten düşüktür. Bu nedenle radondan kaynaklanabilecek sağlık riskleri bakımından kritik olan nokta bulunmadığı söylenebilir.

Tunçbilek, Ömerler ve Eynez maden ocaklarında gerçekleştirilen radon gazı ölçümlerinden hareketle bu ocaklarda çalışan işçilerin maruz kaldıkları yıllık etkin eşdeğer doz ile radonun bozunum ürünlerinden dolayı aldıkları dozlar da hesaplanmıştır.

Buna göre yıllık etkin dozlar Tunçbilek, Ömerler ve Eynez maden ocakları için sırasıyla ortalama 1,23 mSv/yıl, 2,44 mSv/yıl ve 1,47 mSv/yıl olarak hesaplanmıştır.

ICRP yıllık etkin dozlar için limit değerlerini belirleyerek, yıllık etkin dozların 3 – 10 mSv arasında kalmasını tavsiye etmiştir (**ICRP 65, 1993**). Buna göre Tunçbilek, Ömerler ve Eynez yeraltı maden ocakları için hesaplanan yıllık etkin dozların alt limit olan 3 mSv/yıl değerinin altında kaldığı görülmektedir.

Radonun bozunum ürünlerinden dolayı işçilerin aldıkları dozlar ise Tunçbilek maden ocağı için ortalama 0,22±0,11 WLM/yıl, Ömerler maden ocağı için ortalama 0,43±0,17 WLM/yıl ve Eynez maden ocağı için ortalama 0,26±0,07 WLM/yıl olarak hesaplanmıştır.

ICRP radonun bozunum ürünlerine maruz kalma dozunu 2 WLM/yıl olarak belirlemiştir. Ayrıca ABD, Kanada, Avustralya, Fransa, Almanya, İngiltere ve İtalya' da çoğu kömür olmak üzere çok sayıda maden ocağında yapılan araştırmalarda ortalama olarak radonun bozunum ürünlerine maruz kalma değerlerinin 0,1 - 0,6

WLM/yıl arasında değiştiği bulunmuştur. Dünya genelinde ise ortalama radonun bozunum ürünlerine maruz kalma dozu, kömür ocakları için 0,2 WLM/yıl olarak tespit edilmiştir (**Küçüktaş, 1996**).

Buna göre Tunçbilek, merler ve Eyzey yeraltı maden ocakları için bulunan WLM değerleri ICRP' nin belirlediği limit değerin altındadır. Bu sonuçlar dünya ortalamasıyla kıyaslandığında ise Tunçbilek ve Eyzey yeraltı madenlerinin dünya ortalaması civarında olduğu, merler yeraltı maden ocağının ise dünya ortalamasının yaklaşık 2 katı üstünde olduğu görülmektedir.

Her üç maden ocağında da elde edilen radon gazı konsantrasyon değerleri hem ICRP' nin hem de TAEK' in limitlerinin oldukça altındadır. Bu nedenle genel olarak her üç maden ocağının da radon gazından kaynaklanabilecek sağlık riskleri bakımından güvenli oldukları söylenebilir. Fakat Bölüm 4' de de anlatıldığı gibi madenlerde "ayak" tabir edilen kömürün çıkarıldığı yerlere dedektör yerleştirilememiştir. Bu noktalarda radon gazı konsantrasyonunun diğer noktalara göre daha yüksek olması beklenir. Bunun için kazılan kömürün bir an önce madenden dışarı çıkarılması radon gazının maden atmosferine karışmasını sınırlandıracaktır.

Her üç maden ocağından da görüştüğümüz işçi sağlığından sorumlu maden mühendislerinden aldığımız bilgiler ışığında, maden ocaklarındaki havalandırmaya büyük önem verildiği grlmştir. Elde edilen radon gazı konsantrasyonlarının limitlerin altında olması da, bu maden ocaklarındaki havalandırmanın iyi bir şekilde yapıldığının göstergesidir.

Bu tez çalışmasının gerçekleştirildiği maden ocaklarında elde edilen sonuçların limitlerin altında bulunmasına rağmen radon gazı seviyesini kontrol etmek adına belirli aralıklarla konsantrasyon ölçümleri yapılması faydalı olacaktır.

KAYNAKLAR

- ASTM, 1991, "Annual Book of ASTM Standards", part 26, Philadelphia
- Çelebi, N., 1995. Çevresel örneklerde uranyum, radyum ve radon ölçüm tekniklerinin geliştirilmesi, *Doktora Tezi*, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Durrani, S.A. ve Iliç, R., 1997. Radon measurements by etched track detectors : applications in radiation protection, earth sciences, and the environment, World Scientific, Singapore.
- Eisenbud, M., 1987. Environmental radioactivity : from natural, industrial, and military sources, Academic Press, San Diego
- E.L.İ., 2000. Ege Linyitleri İşletmesi Bölge Müdürlüğü Bülteni, Soma.
- Ercan, A., 1998, "Kömürün jeofizik yöntemlerle aranması", Kömür, (Kural, O., Ed.), İstanbul, s. 17-57.
- EPA, 1987. Radon reference manual, United States Environmental Protection Agency, Washington DC.
- Fişne, A., 2002. Yeraltı madenlerinde radon gazı konsantrasyon seviyelerinin belirlenmesi ve işçi sağlığı üzerine etkilerinin araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Garcia-Leon, M. ve Madurga, G. (Editor), 1988, Low-Level Measurements and Their Application to Environmental Radioactivity: Proceedings, World Scientific Pub. Co.
- G.L.İ., 2000. Garp Linyitleri İşletmesi Bölge Müdürlüğü Bülteni, Tavşanlı.
- Gollnick, D.A., 1988. Basic radiation protection technology, Pacific Radiation, Altadena
- <http://www.taek.gov.tr/taek/rsgd/yayinlarimiz/brosurler/radon.htm>
- http://www.uic.edu/sph/glakes/radon_course/final/ppts/revised/device_characteristics/index.htm
- <http://www.epa.gov/iaq/radon/pubs/physics.htm>
- <http://www.ohd.hr.state.or.us/rps/radon/guide.htm>
- <http://www.ege-linyitleri.gov.tr/ozgecmis.htm>
- <http://www.garplinyitleri.gov.tr>
- ICRP 65, 1993. Protection against ²²²Rn at home and at work, *International Commission on Radiological Protection (ICRP)*, Annals of ICRP, Publication No. 65, Oxford: Pergamon Press

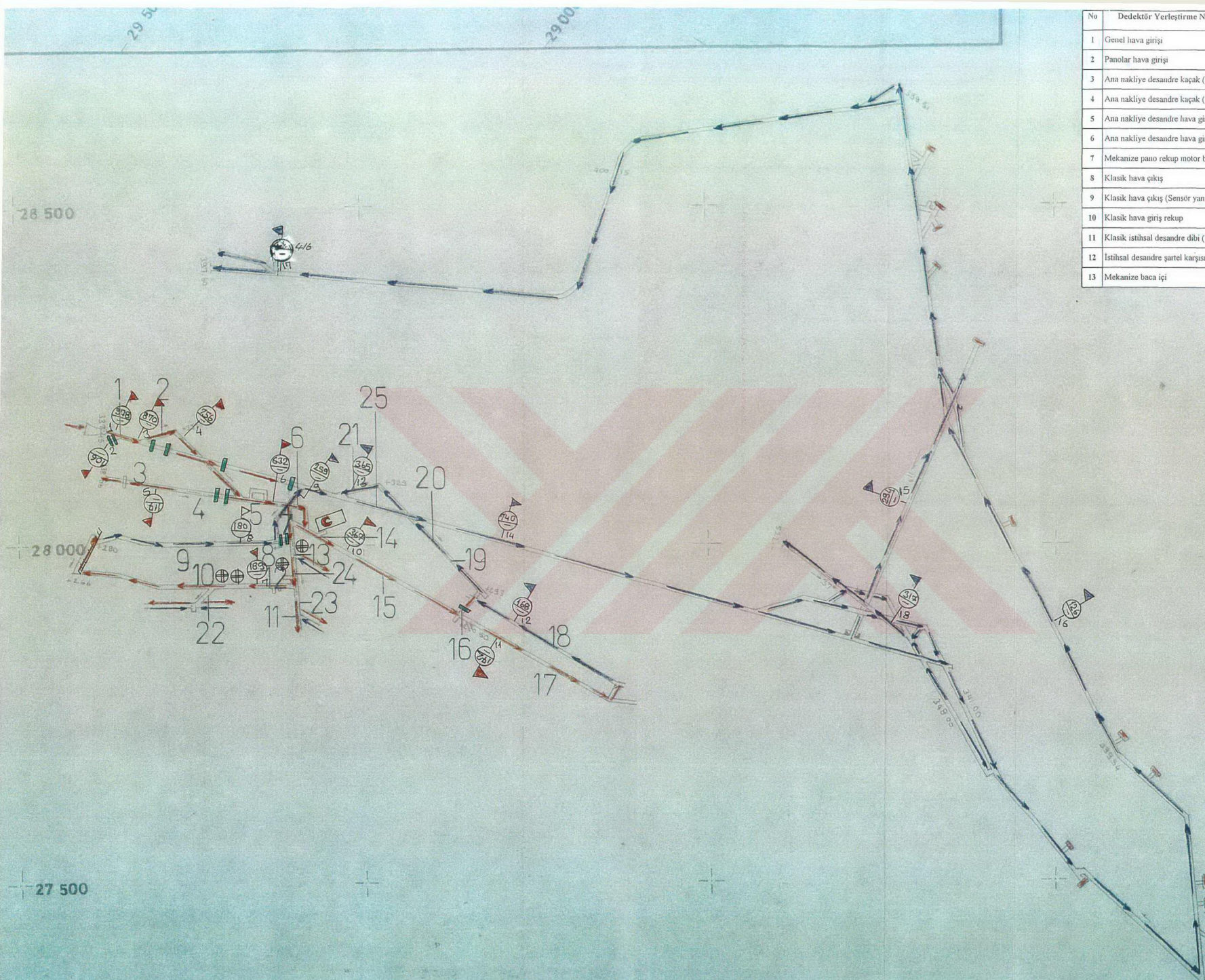
- Jha, S., Khan, A.H. ve Mishra, U.C.,** 2001. A study of technologically modified sources of ^{222}Rn and its enviromental impact in an Indian U mineralised belt, *Journal of Environmental Radioactivity*, **53**, 183–197.
- Karayığıt, A.H., Köksoy, M.,** 1998, “Kömürün oluşumu ve sınıflandırılması”, Kömür, (Kural, O., Ed.), İstanbul, s. 59-70.
- Köksal, E.M., Çelebi, N. ve Özçınar, B.,** 1993. Indoor ^{222}Rn concentrations in İstanbul houses, *Health Phys.*, **65**(1), 87-88.
- Küçüktaş, E.,** 1996. Maden ocaklarındaki radyonüklit konsantrasyonlarının birikimi etkileyen parametrelere bağlı olarak ölçülmesi, maruz kalınan dozların analitik bir yöntem geliştirilerek hesaplanması, *Doktora Tezi*, Ege Üniversitesi, Nükleer Enerji Enstitüsü, İzmir.
- L'Annunziata, M. F. (ed.),** 1998. Handbook of radioactivity analysis, San Diego: Academic Press.
- Murray R.L.,** 2001. Nuclear Energy an introduction to the concepts, system, and applications of nuclear proceses, Butterworth Heineman.
- NCRP 97,** 1988. National Council on Radiation Protection and Measurements; Measurements of Radon and Radon Daughters in Air, NCRP Report No: 97
- Önder, F.,** 1996. Türkiye’ de var olan ve tasarlanan termik santraller ile bunlara ait hava kirlетici emisyonlar ve önlem alma projeksiyonları, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Özdoğan, S. ve Ünver, Ö.,** 1998, Türkiyenin taş kömürü ve linyit envanteri ile ilgili ekonomik değerlendirme, Kömür, (Kural, O., Ed.), İstanbul, s. 7-16.
- Pentreath, R.J.,** 1980. Nuclear power, man, and the environment, London: Taylor and Francis.
- Qureshi, A.A., Kakar, D.M., Akram, M., Khattak, N.U., Tufail, M., Mehmood, K., Jamil, K. ve Khan, H.A.,** 2000. Radon concentrations in coal mines of Baluchistan, Pakistan, *Journal Of Enviromental Radioactivity*, **48**, 203-209.
- Rao, K.V., Reddy, B.L., Reddy, P.Y., Ramchander, R.B. ve Reddy, K.R.,** 2001. Airborn radon and its progeny levels in the coal mines of Godavarikhani, Andhra Pradesh, India, *Journal of Radiological Protection*, **21**, 259-268.
- Sengupta, M.,** 1990. Mine environmental engineering, CRC Press, Florida.
- Shapiro, J.,** 1990. Radiation protection: a guide for scientists and physicians, Cambridge, Mass. : Harvard University.
- Turner, J.E.,** 1995. Atoms, radiation, and radiation protection, J. Wiley, New York.
- UNEP,** 1991. Radiation: doses, effects, risks, United Nations Environment Programme, Oxford, OX, UK : B. Blackwell.
- UNSCEAR,** 2000. Sources, effects and risks of ionizing radiation, *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation*, Report to General Assembly, UNO.
- Varinlioğlu, A., Akyüz, T. ve Köse, A.,** 1988. Technical note the radioactivity measurement of turkish lignites, *Journal Of Enviromental Radioactivity*, **Vol. 41**, No. 3, 381-387.

ÖZGEÇMİŞ

1978 yılında İstanbul' da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimimi İstanbul' da tamamladı. 2000 yılında Marmara Üniversitesi Fizik Bölümü' nden mezun oldu. Aynı yıl İTÜ Nükleer Enerji Enstitüsü' nde yüksek lisans eğitimine başladı.

Selim ÇİLE





No	Dedektör Verleştirme Noktaları	No	Dedektör Verleştirme Noktaları
1	Genel hava girişi	14	Mekanize tavan yolu takımhanne
2	Panolar hava girişi	15	Mekanize tavan yolu pano giriş
3	Ana nakliye desandre kaçak (100 m)	16	Mekanize tavan yolu irtibat
4	Ana nakliye desandre kaçak (250 m)	17	Mekanize tavan yolu hava giriş
5	Ana nakliye desandre hava giriş (350 m)	18	Mekanize tavan yolu hava çıkış
6	Ana nakliye desandre hava giriş (450 m)	19	Mekanize pano hava çıkış
7	Mekanize pano rekup motor başı	20	Mekanize pano hava çıkış
8	Klasik hava çıkış	21	Mekanize pano hava çıkış
9	Klasik hava çıkış (Sensör yanı)	22	Klasik ayakhava giriş desandre
10	Klasik hava giriş rekup	23	İstihsal desandre dibi tulumba
11	Klasik istihsal desandre dibi (Trafo)	24	Mekanize hazırık bace karşısu
12	İstihsal desandre şartel karşısu	25	Güney hava çıkış trafo karşısu
13	Mekanize bace içi		