

**T.C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TOPRAKTAKİ RADON KONSANTRASYONU ÖLÇÜMÜ VE
DEPREM İLİŞKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

Feride KULALI

Danışman: Doç. Dr. İskender AKKURT

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI
ISPARTA - 2009**

İÇİNDEKİLER

	sayfa
İÇİNDEKİLER.....	i
ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Radyasyon.....	1
1.1.1. Alfa (α) Bozunması.....	2
1.1.2. Beta (β) Bozunması.....	2
1.1.3. Gama (γ) Işıması.....	3
1.1.4. Radyasyon Çeşitleri.....	4
1.2. Radyasyon Kaynakları.....	5
1.2.1. Yapay Radyasyon Kaynakları.....	5
1.2.1.1. Tıbbi Uygulamalar.....	5
1.2.1.2. Endüstriyel Uygulamalar.....	6
1.2.1.3. Nükleer Serpinti.....	6
1.2.1.4. Nükleer Güç Santralleri.....	7
1.2.1.5. Tüketici Ürünleri.....	7
1.2.2. Doğal Radyasyon Kaynakları.....	7
1.2.2.1. Kozmik Işımlar.....	8
1.2.2.2. Yeryüzü kaynaklı doğal radyasyon.....	9
1.2.2.3. Vücuttaki Radyoaktivite	11
1.2.2.4. Sindirim Yolu ile İç Işınlama	11
1.2.2.5. Solunum Yolu ile İç Işınlama.....	11
1.3. Radon ve Özellikleri.....	12
1.4. Radonun Biyolojik Etkileri.....	16
1.5. Radon ve Deprem İlişkisi.....	17

2. KAYNAK ÖZETLERİ.....	21
2.1. Fay İzi Belirlenmesinde Toprak Radon Ölçümünün Kullanılması.....	21
2.2. Toprak Gazı ve Yeraltı Suyu Radon Konsantrasyonu ve Deprem İlişkisi.....	22
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	24
3.1. Radyasyon Ölçüm Teknikleri.....	24
3.1.1. İyon Odası Dedektörü.....	24
3.1.2. Geiger-Müller Dedektörü.....	24
3.1.3. Orantılı Sayaçlar.....	24
3.1.4. Sintilasyon Dedektörleri (Pırıldama).....	25
3.1.5. Yarı İletken Dedektörler.....	25
3.1.6. Nötron Dedektörleri.....	25
3.2. Radon Ölçüm Teknikleri.....	26
3.2.1. Toprak Gazı ve Yeraltı Sularında Radon Ölçümü.....	26
3.2.1.1. Nükleer İz Dedektörleri.....	28
3.2.1.2. Alfa sintilasyon dedektörleri.....	29
3.2.3. AlphaGUARD Radon Dedektörü.....	32
3.2.3.1. AlphaGUARD Detektörünün Yapısı.....	34
3.2.3.2 AlphaGuard Kalibrasyonu.....	40
3.2.3.3 Genitron AlphaPUMP.....	44
3.3. AlphaGUARD İle Toprak Gazındaki Radon Yoğunlunun Ölçümü.....	45
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	51
4.1 Günlük Radon Sonuçları.....	51
4.2. Aylık Radon Sonuçları.....	53
4.3. Ölçülen Radonun Deprem Verileri İle Karşılaştırılması.....	53
4.3. Ölçülen Radonun Meteorolojik Veriler İle Karşılaştırılması.....	59
5. SONUÇ.....	62
6. KAYNAKLAR.....	63
EKLER.....	66
ÖZGEÇMİŞ.....	67

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TOPRAKTAKİ RADON KONSANTRASYONU ÖLÇÜMÜ VE DEPREM İLİŞKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Feride Kulalı

**Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı**

Juri: Prof. Dr. Nevzat Özgür

Doç. Dr. İskender Akkurt (Danışman)

Yrd. Doç. Dr. M. Ertan Kürkcüoğlu

Radon, radyum elementinin radyoaktif bozunumundan meydana gelen, renksiz kokusuz ve radyoaktif bir gazdır. Kayaçlarda ve topraktaki doğal radyoaktif uranyum elementi, radyum ve radonun olduğu uzun bozunma serisinin birinci üyesidir. Radon kayaçlar ve topraktan ayrılarak toprak zerreleri arasındaki boşluklara kolayca geçebilmektedir. Ayrıca suda ve organik çözücülerde oldukça kolay çözünmektedir. Buna bağlı olarak radon bozunmadan önce uzun mesafeler kat edebilir. Doğada bulunan birçok radon izotopundan en önemlisi ^{222}Rn 'dir. Radon yüksek taşınabilirliğine ve yüksek doğal oluşumuna bağlı olarak deprem tahmini için kullanılabilir. Günümüze kadar birçok çalışma, radon anomalilerinin gözlenmesinin sismik olayların takibi için yararlı bir metot olduğunu göstermiştir. Bu çalışmada, Yunanistan'ın Midilli adasında, AlphaGUARD cihazı kullanılarak, depremlerle ilişkilendirmek üzere Rn konsantrasyon ölçümleri yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Radon, Radon Anomali, Toprak Gazı, Deprem Tahmini

2009, 62 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

THE MEASUREMENT OF RADON CONCENTRATION IN SOIL AND INVESTIGATION ITS EARTHQUAKE RELATIONS

**Süleyman Demirel University Graduate School of Applied and Natural Sciences
Physics Department**

Thesis Committee: Prof. Dr. Nevzat Özgür

Assoc. Prof. Dr. İskender Akkurt (Supervisor)

Asst. Prof. Dr. M. Ertan Kürkçüoğlu

Radon is a colorless, odorless and radioactive gas which produced by the radioactive decay of the element radium. Naturally radioactive Uranium is the first element in a long series of decay that produces radium and radon which placed in rocks and soil. Radon can leave the rocks and soils easily into the pore spaces between grains of soil. It is also fairly soluble in water and organic solvents. Accordingly that it can travel a great distance before it decays .Radon exists in many isotopic forms, the most important being ^{222}Rn . Radon can be used for the earthquake prediction because of the high mobility characteristics, high natural production rate. Until recently many studies had shown that the observation of radon anomalies is an useful method for following sismic events. In this thesis Rn concentration have been measured in soil gas by AlphaGUARD to search any corelation with earthquakes in Lesvos island of Grecee.

Key Words: Radon, Radon Anomalies, Soil Gas, Earthquake Prediction

2009, 62 pages

TEŞEKKÜR

Bu çalışmamın gerçekleşmesini sağlayan, her aşamasında benden yardım ve desteğini esirgemeyen ve ayrıca Erasmus programı çerçevesinde anlaşma yaparak bu programdan faydalanmama vesile olan değerli danışman hocam Doç. Dr. İskender Akkurt'a teşekkür ederim. Deney çalışmam için beni yönlendiren, gerekli araçları sağlayan Yunanistan'daki değerli hocam Efstratios Vogianis'e ve teknik aşamada bana destek veren değerli hocam Dr. Christos Matsoukas'a teşekkürlerimi sunarım. Erasmus programı çerçevesindeki her türlü teknik konuda bana destek veren Süleyman Demirel Üniversitesi Dış İlişkiler biriminden Öğretim Görevlisi S. Tulga Telli, Nilüfer İpek Karadağ ve H. Evrim Tütünsatar'a ve son olarak çalışmamı tamamlamak üzere beni gayretlendiren ve bana daima güven duyan ailem ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Feride KULALI
ISPARTA, 2009

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 Radyasyon geçirgenliği.....	2
Şekil 1.2 Radyoaktif ^{238}U çekirdeğin bozunma serisi (y = yıl, g = gün, d = dakika).....	12
Şekil 1.3 Radonun toprak gazı ve suya geçişi.....	14
Şekil 1.4 Radonun toprak gazı ile hareketi.....	15
Şekil 1.5 Çeşitli alanlarda radon konsantrasyonu.....	16
Şekil 3.1 Pasif radon dedektörleri ile ölçme ve değerlendirme işlemlerinin şematik gösterimi	28
Şekil 3.2 Sintilasyon dedektör düzeneği	30
Şekil 3.3 Lucas hücresinin kullanıldığı bazı yöntemler.....	31
Şekil 3.4 AlphaExpert programı ile AlphaGUARD'ın ölçtüğü radon konsantrasyonu, sıcaklık, basınç ve nem verilerinin bilgisayar ekranında görüntülenmesi.....	34
Şekil 3.5.a AlphaGUARD cihazının önden görünüşü ve ebatları.....	35
Şekil 3.5.b AlphaGUARD cihazının arkadan görünüşü ve ebatları.....	35
Şekil 3.5.c AlphaGUARD cihazının alttan görünüşü ve ebatları.....	36
Şekil 3.5.d AlphaGUARD cihazının sol yandan görünüşü ve ebatları.....	37
Şekil 3.5.e AlphaGUARD cihazının sağ yandan görünüşü ve ebatları.....	38
Şekil 3.6 AlphaGUARD iyonizasyon odasının şematik gösterimi.....	39
Şekil 3.7 Dijital sinyal işleme blok diyagramı.....	40
Şekil 3.8 AlphaGUARD kalibrasyon araçları.....	41
Şekil 3.9 Kalibrasyon işlemleri için kullanılan yayılma tüpü.....	42
Şekil 3.10. AlphaGUARD kalibrasyon bağlantı şeması.....	43
Şekil 3.11 AlphaPUMP şematik gösterimi	44
Şekil 3.12 Toprak gazı radon ölçümünde kullanılan ekipmanın tanıtımı.....	45

Şekil 3.13 Lesvos (Midilli) adasının termal tesisleri, sıcak su kaynakları ve fay haritası.....	46
Şekil 3.2 Toprak gazı sondasının ölçüm alanına yerleştirilmesi.....	47
Şekil3 Deney düzeneğinin laboratuvar içindeki bölümü.....	48
Şekil 3.16 Ölçüm noktası (Mytilene) ve deprem verilerinin toplandığı alan.....	49
Şekil 4.1 Günlük radon yoğunluğu değişim grafiği.....	51
Şekil 4.2 Radon yoğunluğunun periyodik değişimi.....	52
Şekil 4.3 Aylık radon yoğunluğu değişim grafiği.....	53
Şekil 4.4 Radon yoğunluğu ve deprem etki grafiği.....	54
Şekil 4.5 20/06/08-22/06/08 Arasındaki radon/deprem ilişkisi.....	54
Şekil 4.6 2007/07/08-10/07/08 Arasındaki radon/deprem ilişkisi.....	56
Şekil 4.7 19/08/08-24/08/08 Arasındaki radon/deprem ilişkisi.....	58
Şekil 4.8.a 24 saatlik radon konsantrasyon, sıcaklık, basınç ve nem değişimi grafiği.....	59
Şekil 4.8.b Aegean Üniversitesi Coğrafya Bölümü tarafından ölçülen değerler ile hazırlanan bir günlük radon konsantrasyon, sıcaklık, basınç ve nem değişimi grafiği.....	59
Şekil 4.8.c AlphaGUARD tarafından ölçülen parametrelerle hazırlanan bir günlük radon konsantrasyon, sıcaklık, basınç ve nem değişimi grafiği.....	60
Şekil 4.9. Yağmurun radon yoğunluğuna ve ölçümlerine etkisi.....	61

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Radon ve izotoplarının yarılanma süreleri.....	13
Çizelge 3.1. Başlıca radon ölçüm araçları.....	28
Çizelge 3.2. AlphaGUARD monitörünün bazı teknik ve fiziksel özellikleri.....	33
Çizelge 4.1. 20/06/08-22/06/08 Arasındaki deprem büyüklük, uzaklık ve etki tablosu.....	55
Çizelge 4.2. Aynı merkeze sahip depremler.....	56
Çizelge 4.3. 07/07/08-10/07/08 Arasındaki deprem büyüklük, uzaklık ve etki tablosu.....	57

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ADC	Analog-Digital Converter
Bq	Becquerel
Ci	Curie
CPM	Dakikadaki sayım
d	Deprem merkezinin derinliği
eV	Elektron Volt
D	Deprem merkez üssü ile ölçüm noktası arasındaki mesafe
DC	Doğru Akım
DSP	Sayısal Sinyal İşleme
EPA	USA Çevre Koruma Ajansı
GM	Geiger-Müller
Gy	Gray
IAEA-BSS	Uluslararası Atom Enerji Ajansı Temel Güvenlik Standartları
M	Deprem büyüklüğü
M_e	Deprem ölçüm noktasına etkisi
M_i	İdeal deprem büyüklüğü
N	Nötron sayısı
NRPB	National Radiological Protection Board
NIST	National Institute of Standards and Technology
P	Basınç
R	Dünyanın yarıçapı
Ra	Radyum
RAK	Radon aktivite konsantrasyonunun
rH	Bağıl Nem
Rn	Radon
Sv	Sievert
T	Sıcaklık
TAEK	Türkiye Atom Enerjisi Kurumu
U	Uranyum
UV	Ultraviyole
Z	Atom numarası

1. GİRİŞ

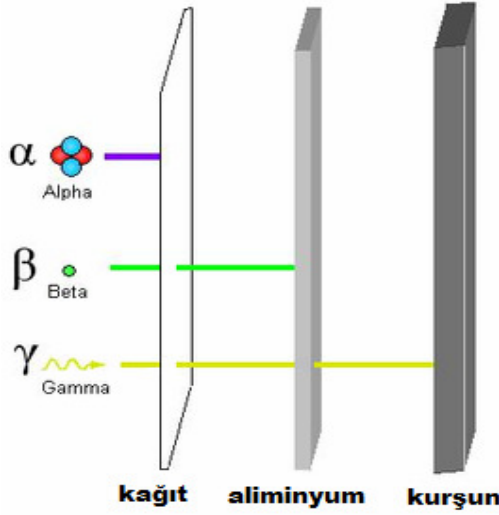
1.1. Radyasyon

1895 yılında W. C. Roentgen X - ışınlarını keşfetmiştir. 1896 yılında ise H. Becquerel uranyumun bir etki olmaksızın gözle görülmeyen ışınlar yaydığını bulmuştur. Daha sonra M. Curie ve P. Curie uranyum örneklerinden başka radyoaktif izotoplar bulup ayırmayı başarmışlardır. Curie çifti ve H. Becquerel çalışmalarından dolayı 1903 yılında Nobel Fizik ödülüne layık görülmüşlerdir.

Radyoaktif ışımların özellikleri üzerine çalışmalar ise E. Rutherford tarafından başlatılmıştır. 19. yüzyılın sonuna gelirken pek çok bilim adamı artık fizikte gerçekleştirilecek bir yenilik kalmadığı kanısındaydı. Ama Rutherford üç yıl gibi kısa bir süre içinde tümüyle yeni bir fizik dalı ortaya çıkardı: Radyoaktiflik. Radyoaktifliğin bir elementin atomlarının başka bir elementin atomlarına kendiliğinden dönüşme süreci olduğu sonucuna vardı (wikipedia).

Bir çekirdeğin kararlı olması, belli sayıda nötron/protona oranına sahip olması gerekir. Bu oranın dışına çıkıldığı zaman veya çekirdek fazla enerjiye sahip olduğu zaman kararsız bir yapı kazanır. Kararsız çekirdekler kararlı hale gelebilmek için "radyoaktif ışımlar" yaparlar bu tür çekirdeklere "radyoaktif çekirdek"ler denir. Radyoaktif ışımalara da kısaca "radyasyon" denir. Radyoaktif bozunma sürecinde, çekirdekler alfa (α), beta (β) ve gama (γ) radyasyonlarından birini veya birkaçını yayımlayabilirler.

Alfa (α), beta (β) ve gama (γ) radyasyonları bazı maddelerden geçebilmekte bazıları tarafından bloke edilmektedir (Şekil 1.1)



Şekil 4.1. Radyasyon geçirgenliği (Nuclearnewcomer)

1.1.1. Alfa (α) Bozunması

Atom numaraları 83'ten büyük olan yani kararlılık kuşağının ötesindeki elementler (ağır elementler) kararlı nötron/proton oranına erişmek için, hem proton hem de nötron kaybederek kararlı hale geçmeye çalışırlar. 2 proton, 2 nötrona sahip helyum çekirdeği yayınlayarak parçalanırlar. Bu helyum çekirdeklerine alfa parçacıkları denir. Alfa ışınları bu parçacıkların yayılmasından oluşur.

88 proton ve 138 nötrona sahip $^{226}_{88}\text{Ra}$ örnek olarak alınabilir. Nötron sayısı, proton sayısına göre daha fazla olduğu için, bu atomun çekirdek yapısı sağlam değildir. Bu yüzden radyum, çekirdeğinden bir helyum çekirdeği ayırarak parçalanır ve radyumdan, 86 proton ve 136 nötrona sahip olan yeni element radon oluşur. Radyum çekirdeğinden ayrılan 2 protonlu helyumdan alfa ışınları oluşur:



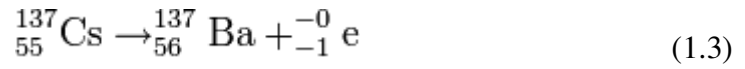
1.1.2. Beta (β) Bozunması

Beta ışınları da alfa ışınları gibi kararsız bir çekirdeğin kararlı hale geçerken yaydığı ışınlardır. Eğer çekirdeğin kararsızlığı nötron ve proton sayılarının farklı

olmasından ise β^- yayınlar. Bu farklılık $N > Z$ şeklinde ise çekirdeğin içindeki bir nötron bir protona dönüşür. Bu dönüşümden çekirdekte oluşan elektronlara β^- parçacıkları denir.



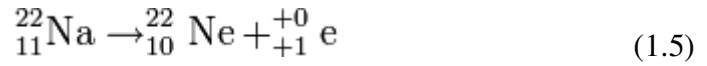
Örneğin 55 protonlu bir sezyum atomundan, β^- parçalanmasında 56 protonlu baryum oluşur:



Eğer kararsızlığın şekli $Z > N$ ise çekirdekteki bir proton nötrona dönüşür ve pozitron adı verilen β^+ yayınlar.

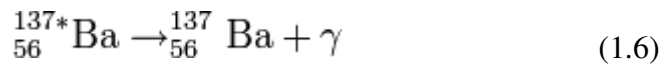


Bu durumda atomun proton sayısı bir eksilir. Örneğin 11 protonlu sodyum çekirdeğinden bir pozitron ayırarak 10 protonlu neona dönüşür:



1.1.3. Gama (γ) Işınması

Gama ışınması elementin atom numarasını ve kütle numarasını değiştirmez. Gama radyasyonu ışık gibi fotonlardan oluşur ve ışık hızıyla yayılır. Alfa (α) ve beta (β) bozunması sırasında atom çekirdeği fazla enerjiye sahip halde kalır, bu yarı kararlı atom çekirdekleri temel duruma gelmek için elektromanyetik ışınım yaparlar, yani gama ışını yayımlaması yaparlar. Enerji seviyesi yüksek olan baryum atomu kararsız yapıdır ve bu enerjiyi gama ışınları şeklinde çekirdeğinden ayırır:



1.1.4. Radyasyon Çeşitleri

Radyasyon, madde üzerinde meydana getirdiği etkilere göre iyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon olarak ikiye ayrılır. Gama ışınları, alfa, beta radyasyonları ayrıca X-ışınları, kozmik radyasyon ve nötron radyasyonu iyonlaştırıcı özelliktedirler.

İyonlaştırıcı radyasyon hücrelere nüfuz etme özelliği, atomlar arasında enerjinin gelişigüzel olarak birikimini sağladığı için biyolojik olarak oldukça zararlıdır. Radyasyonun absorbe olan dozu radyasyon etkisi altında kalan materyalin birim kütlesi başına düşen enerjidir. Absorbe olan doz birimi kilogram başına bir Joule olarak tanımlanır ve ifade etmek için Gray (Gy) terimi kullanılır. Ancak absorbe edilen dozun ne kadar etkili olduğu absorbe edilen radyasyon türüne bağlı sabitle çarpımı sonucu elde edilen ve sievert (Sv) olarak bilinen terimle ifade edilir.

İyonlaştırıcı olmayan radyasyon; ultraviyole, kızılötesi, radyo dalgaları, mikrodalgalar gibi sıralanabilir.

Ultraviyole ışınlarının temel kaynağı güneştir. Elektrik arkları, kaynak arkları, ultraviyole lambaları ve güneş lambası olarak bilinen ultraviyole lambalarının bu özelliği bulunmaktadır. Ultraviyole ışık, iyonlayıcı radyasyondan daha düşük enerjili ve dalga boyuna bağlı olarak soğurma özelliği nedeni ile ayrılır. Güneşten dünyaya ulaşan ışın miktarı: Koruyucu ozon tabakası, bulut durumu, mevsim, günün saati, enlem, deniz düzeyinden yükseklik gibi durumlarda bağlıdır. UV ışınları su, kar veya kumdan yansıyarak etkili olabilir. Normal pencere camları yüksek frekanslı ışınların büyük bölümünü engeller. Açık renkli elbiselerde aynı etkiyi yapmaktadır. Açık renk elbiseler hemen hemen tüm frekansları engellemektedir. Ultraviyole ışınlarının etkisi belirli bir düzeye ulaşmadan önce görülemediğinden kişiler farkına vardıklarında büyük oranda etkilenmiş ve zarar görmüş durumda olmaktadır. Deride erken yaşlanma, bulantı, kusma, bitkinlik durumlarına neden olmaktadır.

Bütün cisimler düşük yüzeysel sıcaklık değerine sahip olan diğer cisimlere infrared ışınlar yayarlar. Sıcaklığın artması radyasyonun enerjisinin ve frekansının artmasına neden olmaktadır. İleri derecede sıcaklık artırımına bağlı olarak emisyon enerjileri infrared bölümünden görünür ışık bölümüne hatta düşük ultraviyole spektrum bölgelerine kayabilmektedir. Bu durum demir çelik endüstrisinde görülen bir durumdur ve meydana gelen beyaz sıcaklık, kırmızı sıcaklıktan daha fazla sıcaktır. Mikrodalgalar, frekansı 1-300 GHz arasında olan elektromagnetik bir dalgadır. Radar, uydu veya uzak telefon haberleşmeleri, telgraf, televizyon yayınları, radyo astronomi ve diğer amaçlarda kullanılır. Mikrodalga, görme mesafelerinde atmosfer içerisinde karşıdan karşıya veya kısa mesafelerde dalga kılavuzu veya koaksiyel kablolarla yönlendirilerek kullanılır (Güler ve Çobanoğlu, 1997).

1.2. Radyasyon Kaynakları

1.2.1. Yapay Radyasyon Kaynakları

1.2.1.1. Tıbbi Uygulamalar

Tıbbi alandaki radyasyon uygulamaları, radyasyonla görüntü elde edebilme ve radyasyonun hücre veya tümörleri yok edebilme yeteneğine sahip olması temeline dayanır. Bu iki özelliğinden dolayı radyasyon hastalıkların teşhis ve tedavisinde önemli rol oynar.

Radyasyonun tıbbi alanda yaygın kullanılmakta olan ve gün geçtikçe geliştirilen en eski çeşidi X ışınlarıdır. Genellikle hastalıkların teşhisi amacıyla kullanılan X ışınları, hastadan geçirilerek hastalıklı bölgenin görüntüsü röntgen filmi olarak da adlandırılan radyografi filmi şeklinde elde edilir.

Vücuttaki organ veya dokuların işlevleriyle ilgili çalışmalar yapmak üzere bazı radyoaktif maddeler kullanılır. Bu tür çalışmalarda radyoaktif madde, vücuda, radyoaktif maddenin incelenecek dokuda toplanmasını ve geçici bir süre buraya yerleşmesini sağlayacak bir kimyasal madde ile birleştirilerek verilir. Radyoaktif

maddenin vücuttaki dağılımı veya akışı, vücuda verilen radyoaktif maddeden salınan gama ışınlarını algılayacak özelliklere sahip cihazlarla elde edilir.

Kanser hastalıklarının %50'sinin tedavisinde etkin olarak kullanılır. Yaygın olarak yüksek enerjili elektron hızlandırıcılar ve ^{60}Co radyoaktif kaynaklı cihazlar kullanılır. Tedavinin amacına ulaşması tedavi edilecek bölgeye tedavi için gerekli doz verilirken sağlam doku ve organların dozunun minimum düzeyde tutulmasıyla mümkün olur (TAEK).

1.2.1.2. Endüstriyel Uygulamalar

X ve gama ışınlarından yararlanılarak röntgen filmleri çekilen endüstriyel ürünlerin (borular, buhar kazanları, her türlü makine aksamaları, vs.) her hangi bir hata içerip içermediği tespit edilebilmektedir. Bu çalışmalar genel olarak radyografi olarak adlandırılırlar. Radyografi dışında radyasyondan yararlanılarak yine birçok sanayi ürününün (demir, çelik, lastik, kâğıt, plastik, çimento, şeker, vs.) üretim aşamasındaki seviye, kalınlık, nem ve yoğunluk ölçümleri yapılmaktadır. Işınlama tesislerinde gıda ışınlaması, tek kullanımlık atılabilir tıbbi malzemelerin sterilizasyonu yapılmaktadır.

Akarsularda debi ölçümü, barajlarda su kaçaklarının tespiti, yeraltı sularının hareketlerinin takibi, radyasyondan yararlanılarak mutasyona uğratılan tohumlar daha verimli ve dayanıklı hale getirilmektedirler.

1.2.1.3. Nükleer Serpinti

Atmosferde gerçekleştirilen nükleer bomba denemeleri sonucu meydana gelen radyoaktif serpintiler, radyoaktif çevre kirliliğine neden olan en büyük yapay radyasyon kaynağıdır. Ancak 1960'lı yılların başlarında bu yolla maruz kalınan radyasyon dozu günümüzde nispeten azalmıştır. Bununla birlikte, yer üstü ve hatta yeraltında yapılan bu tür denemeler bölgesel kirliliğe neden olmaktadır.

1.2.1.4. Nükleer Güç Santralleri

Ağır radyoaktif (Uranyum gibi) atomların bir nötronun çarpması ile daha küçük atomlara bölünmesi (filyon) veya hafif radyoaktif atomların birleşerek daha ağır atomları oluşturmaları (füzyon) sonucu çok büyük bir miktarda enerji açığa çıkar. Bu şekilde elde edilen enerjiye nükleer enerji denir. Nükleer reaktörlerde filyon reaksiyonu ile edilen enerji yardımıyla elektrik enerjisi elde edilir. Nükleer yakıt döngüsü, uranyumun madencilik aşamasından işlenişi, taşınması ve enerji üretimi dahil olmak üzere her aşamada radyasyon kaynağıdır.

1.2.1.5. Tüketici Ürünleri

Televizyonlar, duman dedektörleri, fosforlu saatler, inşaat malzemeleri, bazı yanıcı gazlar, paratonerler ve lüks lambası fitilleri gibi bazı tüketici ürünleri az miktarlarda da olsa radyoaktif madde içerirler. Kömür ve fosfat kayaları uranyum, radyum, ⁴⁰K ve toryum içerirler. Fosfatın gübre ve kömürün yakıt olarak kullanılması esnasında çevreye az da olsa belli bir radyasyon dozu verilir.

1.2.2. Doğal Radyasyon Kaynakları

İnsanoğlu ve diğer canlılar, milyonlarca yıldan beri evrenden gelen kozmik ışınlar ve yerkürede bulunan doğal radyoaktif maddelerden yayılan radyasyonla ışınlanmakta olup; tüm canlıların varoluşlarından bu yana sürekli olarak doğal radyasyonla iç içe yaşamaktadırlar.

Vücudumuza solunum ve sindirim yollarıyla, hava, su, tüm bitkisel ve hayvansal besinlerde az da olsa bulunan radyoaktif maddeler alınmakta, bunlarda zamanla çeşitli organlarda birikmektedir. Buna ek olarak kozmik ışınlardan ve yerkürede bulunan doğal radyoaktif maddelerden etkilendiğimiz de düşünüldüğünde, insan vücudu hem iç hem de dış radyasyon ışınlanmasına doğal olarak maruz kalmaktadır.

Doğal radyasyondan kaynaklanan ışınlanma,

- Uzaydan dünya atmosferine gelen yüksek enerjili kozmik ışınlara ait paracıklardan ve
- Yer kabuğunda (toprak, hava, su, bitkiler ve diğer canlılar) bulunan doğal radyoaktif izotoplardan olmak üzere iki ana nedenden kaynaklanır.

Doğal radyasyon yolu ile alınan ortalama yıllık etkin doz 2,4 mSv civarındadır. Bununla birlikte, bazı ülkelerde bu miktar 10 mSv'in üzerindedir (TAEK).

1.2.2.1. Kozmik Işınlr

Dünyamız uzaydan gelen yüksek enerjili parçacıklarla sürekli olarak bombardıman edilmektedir. Yüksek enerjili parçacıkların büyük bir çoğunluğu atmosfere ulaşan protonlardır. Güneşin aktif durumuna (güneş patlamalarına), yerin manyetik alanına ve yerküreden yüksekliğe bağlı olarak kozmik ışınların yoğunluğu değişir. Protonlar elektrik yüklü parçacıklar olduklarından atmosfere ulaştıklarında dünyanın manyetik alanının etkisine girerler. Bu nedenle kozmik ışın yoğunluğu ekvator dan kutuplara gidildikçe artar. Böylece, İnsanların aldığı radyasyon enlem arttıkça artar. Bu ışınların büyük bir kısmı dünya atmosferinden geçmeye çalışırken tutulurlar. Yani atmosferimiz kısmi olarak radyasyonu zırhlar. Bu nedenle, deniz seviyesine yaklaştıkça kozmik ışınların yoğunluğu dolayısıyla doz miktarı da azalır. UNSCEAR tarafından yapılan hesaplamalara göre, kozmik ışınlardan kaynaklanan yer seviyesindeki yıllık etkin doz enlem ve yükseklikle değişse de 0,4 mSv civarındadır (TAEK). İnsanların büyük çoğunluğu rakımı düşük bölgelerde yaşadıkları için kozmik radyasyon nedeni ile maruz kaldıkları dozlarda fazla farklılıklar gözlenmez. Bununla birlikte dünyada önemli sayılabilecek yoğunlukta nüfus barındıran yüksek rakımlı yerleşim bölgelerinde yaşayan insanların aldıkları yıllık dozlar deniz seviyesinde yaşayan insanlara oranla birkaç kat daha fazla olabilir.

Yüksek enerjili kozmik ışınlara ait nötronlar ve protonlar atmosferin alt tabakalarına kadar uzanarak bu bölgelerde de atmosferde bulunan elementlerle etkileşerek çeşitli

radyoizotoplar (^3H , ^{14}C , ^7Be , ^{22}Na) oluşturabilmektedir. Atmosferik şartlara bağılı olarak yeryüzüne inen bu radyoizotoplar, gerek solunum gerekse de besinler yolu ile iç ışınlanmaya neden olurlar. Bu radyoizotoplardan kaynaklanan yıllık tahmini ortalama etkin doz değerleri trityum için 0,01 μSv , berilyum-7 için 0,03 μSv , ^{14}C için 12 μSv ve sodyum-22 için 0,15 μSv 'dir (TAEK).

1.2.2.2. Yeryüzü kaynaklı doğal radyasyon

Dünyanın oluşumundan itibaren yerkabuğunda doğal olarak bulunan radyoizotoplar, vücudumuzu iki şekilde ışınlanmaya maruz bırakırlar:

- Dış ışınlanma
- İç ışınlanma

İnsan vücudunun dış kaynaklı ışınlamaya maruz kalmasının temel nedeni doğal olarak bulunan ^{238}U ve ^{232}Th serilerinden ve ^{40}K radyoizotoplarından kaynaklanan gama ışınlarıdır.

Bu radyoizotoplar, insan vücudu içerisinde ayrıca bulunmakta ve gama ışınlarında olduğu gibi, alfa ve beta parçacıkları ile çeşitli organlarda iç ışınlanmaya neden olmaktadır.

Dış ışınlanma:

Yeryüzündeki radyoizotopların yaydığı gama ışınları nedeniyle tüm vücudumuz dış kaynaklı radyasyona maruz kalır. Özellikle granit gibi volkanik kayalarda, fosfat kayalarda, tortularda yüksek radyoaktivite bulunabilmektedir. Yapı malzemeleri taş ve topraktan üretildikleri için düşük oranda da olsa radyoaktivite içerebilirler. Böylece insanlar konutları dışında olduğu gibi, bina içinde de radyasyona maruz kalırlar. Yaşanılan bölgenin jeolojik özellikleri yanında, binada kullanılan yapı malzemeleri alınan radyasyon dozunu etkilemektedir.

Gama yayınlayan ^{238}U ve ^{232}Th serileri ile ^{40}K dış kaynaklı radyasyon alanının belirlenebilen üç önemli bileşenidir. Uranyum, kaya ve toprak katmanları boyunca düşük konsantrasyonlarda dağılmıştır. ^{238}U birçok elementin uzun radyoizotop bozunma serisinin başlangıç kaynağı olup, kararlı ^{206}Pb haline gelinceye kadar bozunur. Oluşan ilk ürünler arasında yer alan ve radyoaktif gaz olan radon radyoizotopu (^{222}Rn) atmosfere dağılır ve bozunmaya devam eder. Toryum da benzer şekilde yeryüzüne dağılmıştır ve ^{232}Th , başka bir radyoaktif serinin başlangıç kaynağıdır. Yerkabuğunun ağırlık olarak % 2,4' ünü oluşturan ^{40}K 'ın aktivite konsantrasyonu genelde, ^{238}U ve ^{232}Th ' den büyüktür.

Taş ve topraktan üretilen yapı malzemeleri düşük oranda radyoaktivite içerebilirler. Böylece insanlar yaşam alanları dışında olduğu gibi bina içinde de radyasyona maruz kalırlar. Alınan radyasyon dozu yaşanan bölgenin jeolojik özelliklerine, binada kullanılan yapı malzemelerine bağlı olarak değişmektedir. Betonarme binalardaki radyasyon dozu, ahşap yapılara oranla daha fazladır.

Doğal gama radyasyonu nedeniyle alınan yıllık toplam etkin doz değeri yaklaşık 0,48 mSv'dir. Bazı insanların aldıkları doz bu ortalamanın altında, bazılarının ise üstünde olabilir. Doğal toprak yapısının yüksek radyoizotop konsantrasyonu içeren yerler az da olsa vardır. Örneğin Hindistan'ın Kerala bölgesinde, Fransa ve Brezilya'nın bazı bölgelerinde alınan doz dünya ortalamasının 20 katına kadar ulaşabilmektedir (TAEK).

İç Işınlanma:

İç ışınlama, yeryüzü kaynaklı doğal olarak bulunan radyoizotopların solunum ve sindirim yolu ile alınmasından kaynaklanır. Havada bulunan ^{238}U ve ^{232}Th bozunum zincirlerindeki radyoizotoplardan oluşan toz parçacıkları solunum yolu ile vücuda alınmaktadır. Solunum yolu ile iç ışınlamanın en önemli bileşenini radon ürünleri oluşturmaktadır. Yiyecek ve içeceklerde bulunan ^{40}K , ^{238}U ve ^{232}Th serileri, sindirim yolu ile alınan dozun temel nedenini oluşturmaktadır.

1.2.2.3. Vücuttaki Radyoaktivite

Vücudumuzda bulunan radyoaktif elementlerden (özelikle ^{40}K radyoaktif elementinden) dolayı da belli bir radyasyon dozuna maruz kalırız. İnsan vücudundaki potasyum miktarının biyolojik süreçlerle kontrol edildiği bilinmesine rağmen toplam değerin kişiden kişiye nasıl değiştiği hakkında çok az bilgi bulunmaktadır.

Çok yüksek miktarda radyoaktivite içeren yiyeceklerin yenmemesi dışında iç ışınlanmayı önleyecek herhangi bir yol bulunmamaktadır.

1.2.2.4. Sindirim Yolu ile İç Işınlama

Doğal radyoizotopların sindirim yolu ile vücuda alınması yiyecek ve içeceklerin tüketim hızına ve radyoizotop konsantrasyonuna bağlı olarak değişir. Besin maddelerinde doğal olarak bulunan radyoizotop konsantrasyonu bölgenin doğal fon seviyelerine, iklimine ve tarım uygulamalarına bağlı olarak değişir. Aynı şekilde beslenme alışkanlıkları da bölgeden bölgeye, ülkeden ülkeye farklılıklar göstermektedir.

Uranyum ve toryum serilerinin diğer radyonüklitleri, özellikle ^{210}Pb ve ^{210}Po hava, su ve gıdalarda bulunur ve iç ışınlanmaya sebep olur. ^{40}K da normal beslenme yoluyla vücuda giren radyonüklitlerden birisidir. Bu iç ışınlanma kaynaklarından alınan yıllık ortalama etkin doz miktarının 0,3 mSv olduğu ve bunun yarısının ^{40}K 'dan kaynaklandığı tahmin edilmektedir (TAEK).

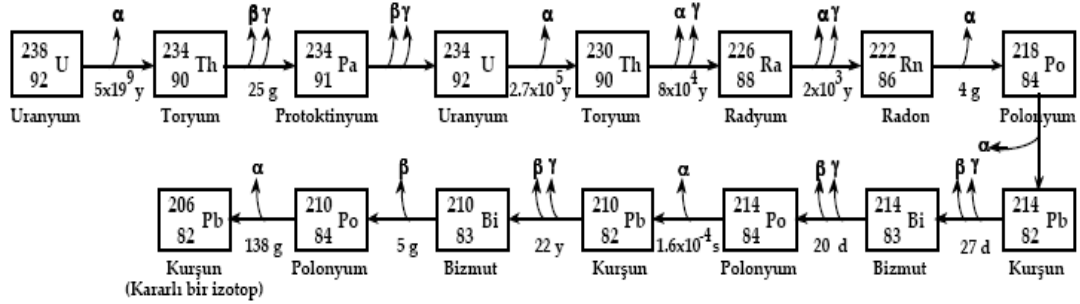
1.2.2.5. Solunum Yolu ile İç Işınlama

Radon haricinde doğal radyoizotopların solunum yolu ile vücuda alınmasından kaynaklı iç ışınlamaya katkısı oldukça azdır. Genelde toprak içerisindeki ^{238}U ve ^{232}Th konsantrasyonunun hava içerisinde yol açacağı aktivite değeri 1 – 2 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ tür. Toprak haricinde özellikle sanayi bölgelerinde ve kış aylarında havada bulunan kül parçacıkları içerisinde uranyum konsantrasyonu yüksek olabilmektedir (TAEK).

1.3. Radon ve Özellikleri

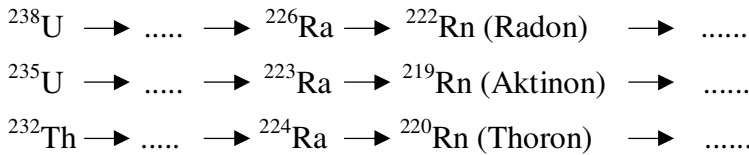
Radon, renksiz, kokusuz, tatsız, 86 atom numarası ile periyodik cetvelin soy gazlar sınıfında yer alan radyoaktif bir gazdır. Yoğunluğu 0°C derecede 9.72 g/l'dir. Havadan yedi buçuk kez, hidrojenden ise 100 kez daha ağırdır, -61,8°C derecede sıvılaşır ve -71°C derecede donar. Daha çok soğutulacak olursa yumuşak sarı bir renk vererek parlar. Sıvı hava sıcaklığı olan -195°C derecede turuncu-kırmızı arası bir renk alır (Güler ve Çobanoğlu, 1997).

Radon; kaya, toprak ve sudaki doğal uranyumun radyoaktif bozunması sonucunda oluşur.



Şekil 2.2. Radyoaktif ^{238}U çekirdeğin bozunma serisi (y = yıl, g = gün, d = dakika) (ANADOLU)

Şekil 1.2'den de görüldüğü gibi radyoaktif radyumun stabil özellikteki kurşuna dönüşümü sırasında ^{226}Ra 'nın bozunumundan yarı ömrü 3, 8235 gün olan ^{222}Rn ortaya çıkar. Radon bozunarak alfa ışınımı ile ^{218}Po 'e dönüşür. ^{218}Po 'in yarı ömrü 3 dakikadır. Radon terimi bazen sadece ^{222}Rn için kullanılır. Diğer iki doğal izotopu Toron ve Aktinondur. Toron ^{220}Rn ve Aktinon ise ^{219}Rn 'dur.



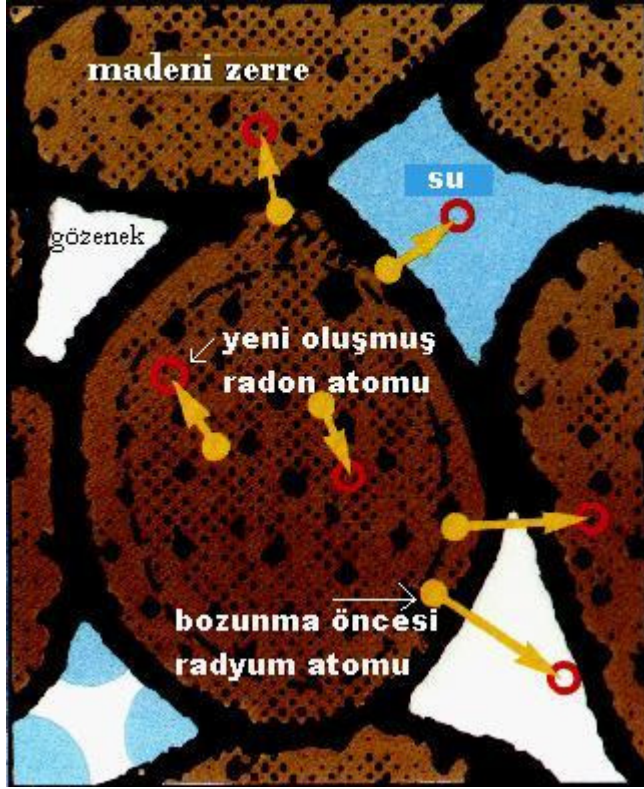
Çizelge 1.1. Radon ve izotoplarının yarılanma süreleri (Kimyaevi).

İzotop	Yarılanma Süresi (saniye)
^{211}Rn	52560
^{212}Rn	1440
^{213}Rn	25.10^{-3}
^{214}Rn	27.10^{-6}
^{215}Rn	23.10^{-7}
^{216}Rn	45.10^{-6}
^{217}Rn	6.10^{-4}
^{218}Rn	35.10^{-3}
^{219}Rn	3.96
^{220}Rn	55.6
^{221}Rn	1500
^{222}Rn	330350,4

Aktinonun yarı ömrünün çok kısa ve doğal uranyumdaki $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ oranının 0,00725 gibi çok düşük seviyelerde olması sebebiyle aktinonun etkisi ihmal edilebilir düzeydedir.

Radon konsantrasyonu radyoaktif birim Ci (Curies) ile gösterilir. Becquerel (Bq) Curieye göre daha yeni bir birimdir ve bir saniyedeki bozunma sayısı olarak tanımlanır. Son yıllarda ölçüm araçlarında ve hesaplamalarda yaygın olarak Becquerel kullanılmaktadır. $1\text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10}\text{ Bq}$ olarak çevrilebilir. “eman” isimli bir birim bazen yeraltı suyu ve toprak gazı için kullanılır. Bir eman $10^{-10}\text{ CiRn} / \text{l}^3$ ye eşdeğerdir.

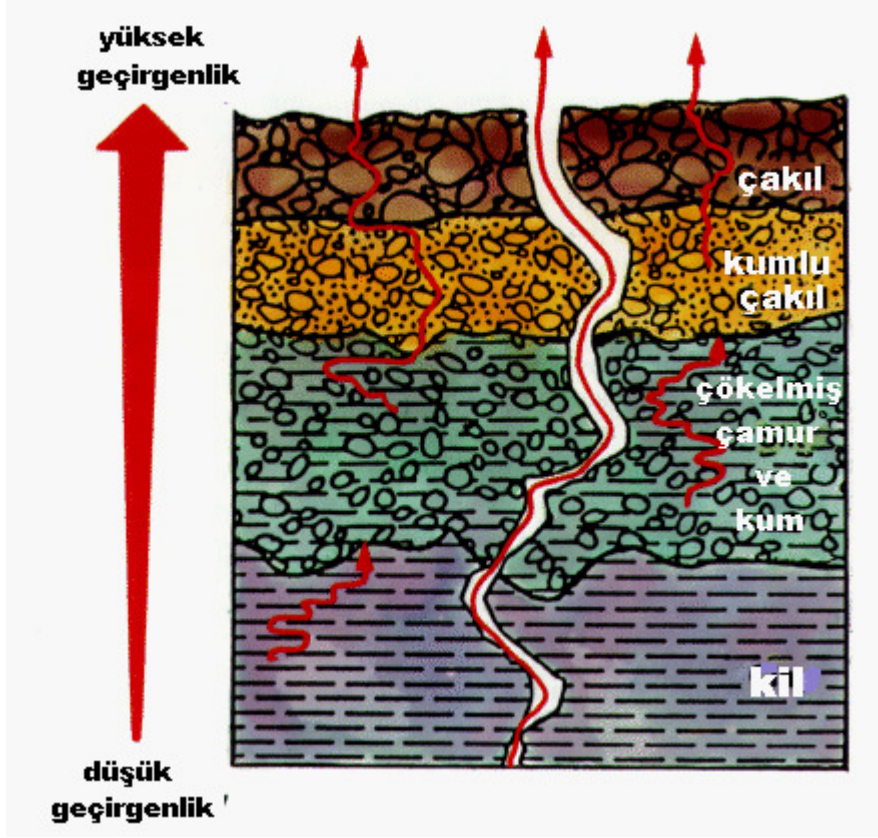
Radon doğal olarak oluşan radyoaktif bir gazdır. Coğrafik bölgenin jeolojik yapısıyla yakından ilişkili olarak çevreye yayılım göstermektedir.



Şekil 1.3. Radonun toprak gazı ve suya geçişi (USGS)

Madensel zerreler içerisinde oluşan çoğu radon atomu yine bu zerreler içinde gömülü kalır. Sadece %10 ila %50 oranındaki kısmı gözeneklere çıkabilir. Eğer bu gözeneklerde su mevcut ise radon atomlarının burada kalması kolaylaşır fakat kuru ise radon atomları boşluğu geçerek hareket edemeyeceği bir diğer zerreye gömülebilir (Şekil 1.3).

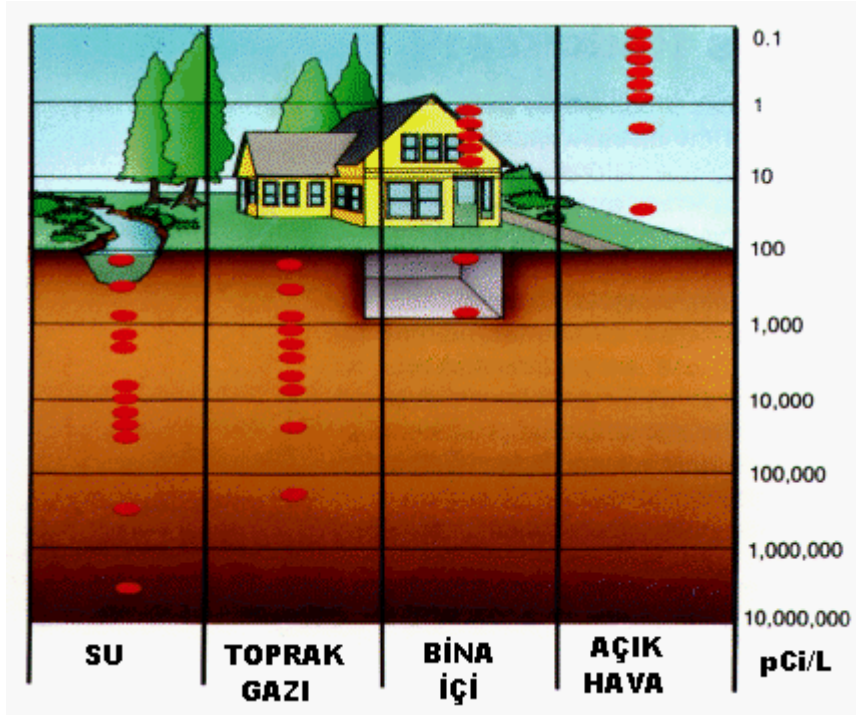
Radon gazı, kayalar ve topraklar arasından atmosfere yayılmakta ve böylece atmosfer içinde yaklaşık 0,1 pCi / litrelik bir ortalama radon konsantrasyonu bulunmaktadır. Yer kabuğundaki kayalarda bulunan Radon ya doğrudan gaz olarak ya da yeraltı suyundan çözünerek yeryüzüne ulaşır (Özmen, 1995).



Şekil 1.4. Radonun toprak gazı ile hareketi (USGS)

Yerkabuğundaki şekil değişimleri ve episantır alanı içinde veya yakınındaki kayalarda gerilmeler nedeniyle meydana gelecek genleşmeler sonucu kayalardan yeraltı su sistemine radon geçişi artmaktadır. Bunun sonucu olarak da sismik faaliyetin başlamasından önce çevredeki kuyu ve kaynak sularındaki radon konsantrasyonunda da bir artış görülmektedir. Radyoaktivite yeraltında iki şekilde gözlenir. Bunlar geçici ve kalıcı radyoaktivitedir. Sıcak sularda gözlenen radyoaktivite genellikle geçici radyoaktivitedir. Geçici radyoaktivite suların radyoaktif kütlelerden geçerken kazandığı radyoaktivitedir. Sürekli radyoaktivitede ise radyoaktif elementlerin emanasyonu sonucu oluşan radyoaktivitedir. Suyun radyoaktifliği, suda çözülmüş halde bir veya birkaç radyoaktif elementin bulunmasından ileri gelmektedir. Radon gazının nispeten uzak mesafelere göçü ancak sulu ortamlarda mümkün olmaktadır. Yerkabuğu içindeki radyoaktif elementlerin difüzyona uğraması sonucu kayalarda ve bunlar içindeki sularda radyoaktivite oluşmaktadır. Suların içindeki radon derin kökenli değildir. Çünkü bu gazın suda erimesi sıcaklık yükselince birdenbire azalmaktadır. Geldiği yerlerin 100

$^{\circ}\text{C}$ den az sıcaklıkta olması gerekir. Bu yüzden soğuk ve ılık sular daha çok radyoaktiftir. Radon difüzyon sonucunda kayaç çatlaklarında taşınma ile günde 100 m. kadar göç etmektedir (Özmen, 1995).



Şekil 1.5. Çeşitli alanlarda radon konsantrasyonu (USGS)

Topraktan havaya sızan radon önemli bir kapalı ortam kirletici faktör olarak belirlemektedir. Normal atmosferde hava olaylarına bağlı olarak düşük konsantrasyonlara ulaşır. Ancak kapalı ortamlarda veya radyoaktif su kaynaklarından oluşan kapalı havuz sistemlerinde yüksek konsantrasyona ulaşabilir. Binalarda birikebilmekte ve kimi zaman yüksek derişimlere ulaşabilmektedir.

1.4. Radonun Biyolojik Etkileri

Son zamanlarda yapılan çalışmalar radonun yüksek konsantrasyonda inhalasyonuna bağlı olarak akciğer kanseri riskinde önemli oranda artım olduğu ortaya çıkmıştır. Avrupa'nın birçok bölgesinde radon ikinci önemli akciğer kanseri nedenidir.

İlk olarak Paracelsus 16. yy da gümüş madeninde çalışanların Almanya'nın Saksonya Eyaletinin Schneeberg kentinde daha yüksek oranda akciğer hastalığından öldüğünü belirledi. Bu çalışmayı on yedinci ve on sekizinci yy da gümüş, bakır, kobalt madenlerinde çalışanlarla ilgili değerlendirmeler izledi. Ölçümler ilk kez 1901 yılında Schneeberg madeninde yapıldı ve radonunun yüksek konsantrasyonda bulunduğu belirlendi. Sonuçta o tarihten beri radon-akciğer kanseri ilişkisi ile ilgili kuramlar geliştirilmeye başlandı. 1920'li yılların başında aynı kent madenlerinde ve diğer maden ocaklarında yapılan daha kesin çalışmalar bu ilişkinin varlığını güçlendirdi. Özellikle Bohemya'da Jachymov bölgesinde maden yataklarında bu çalışmalar ayrıntılı olarak yapıldı. Bütün bu çalışmalara rağmen olayın kesin epidemiyolojik bağları kurulamamıştı. 1940'lı yıllarda uranyum maden etkinlikleri arttı. 1950'li yıllara kadar radon ölçümleri rutin hale gelemedi. 1950'li yıllarda yapılan hayvan deneyleri radonunun fareler üzerindeki kanserojen etkisinin belirlenmesini sağladı. 1960'lı yılların ortalarında gerçekleştirilen epidemiyolojik çalışmalar radonun insanlar üzerinde oluşturduğu etki ilgili olarak, bu etkinin kansere yol açma olasılığının yüksek olduğunu gösterdi. Maden ocaklarında yüksek doz radyumun bulunmasına bağlı olarak akciğer kanseri riskinin arttığını ileri süren kaynaklar giderek artmaya başladı. 1967 yılında ABD Federal Araştırma konseyi madenlerde radon etkilenimini azaltmaya yönelik önerileri yayınladı. 1980'li yıllarda sadece uranyum madenlerinde değil kalay ve demir madenlerinde de radonla ilgili çalışmalar yapıldı (Güler ve Çobanoğlu, 1997).

1.5. Radon ve Deprem İlişkisi

Radon gazının, yerkabuğundan atmosfere yayınlanması 19. yüzyıldan beri bilinmesine rağmen, depremin tahmin edilmesi için radonun yayılımının incelenmesi nispeten yeni bir olaydır. Yerkabuğundan atmosfere yayınlanan radon miktarı genellikle küçüktür, ancak fay hatlarında, jeotermal kaynaklarda, uranyum depozitlerinde, volkanik hareketler sırasında ve depremlerin oluşumundan önce ölçülen radon miktarlarında anomaliler gözlenmektedir (King, 1978; Khan ve Qureshi, 1994).

Öne sürülen modellerden biri olan dilatancy difüzyonuna (genişleme modeline) göre, bölgesel stres arttığında kaya kütlelerindeki genişleme, ya kırılma nedeniyle kayaların yüzey alanlarında ya da sıkışma yoluyla gözenekten atılan sıvının hızında bir artışa neden olur. Sonuçta her iki olayda radonun kapalı olduğu orijinal ortamından dışarıya transportunu arttırır. Bu nedenle gözlenen radon anomalileri dilatancy hacmi içindeki mekanik kırığın gelişme hızıyla veya yeraltı suyunun akış hızının değişmesiyle ilişkili olacaktır. Dilatancy modeli genel anlamda uzun süreli ön izleyicilerin uyum sağlayabileceği bir çatı hazırlamıştır. Taşkent depremi ile örtüşen bu model, Haithceng'deki büyük deprem öncesi gözlenen kısa süreli radon anomalilerini tanımlayamamaktadır (Yaprak vd., 2003).

Değişken ön izleyici parametreler (sismik hızların oranı, yöresel manyetik alanın uzunluğundaki ve dünyanın elektriksel resistivitesindeki değişimler, ayrıca yeraltı sularında ve yüzey altı radon içeriğinde gözlenen anomaliler) için olan zaman skalası dilatancy model tarafından açıklanmaktadır.

Genelde, depremden önce gelen stres gelişimi periyodunun büyük depremde, küçük depreme göre daha uzun olduğuna inanılır. Bu anlamda, büyük bir depremden önce ön izleyici sinyallerin büyüklüğü ve görüldüğü zaman aralığı, olması muhtemel depremin büyüklüğü ile ilişkilendirilebilir.

Bu uzun süreli ön işaret sinyaller, bir depremin olası yerini ve büyüklüğünü bir dereceye kadar tanımlayabilirler. Ancak, gerçek oluşum zamanı ile ilgili çok az bilgi içermektedirler. Örneğin, ön izleyicinin gözlendiği zaman skalası 1 gün ise beklenen depremin büyüklüğü 2.0; 20 ile 30 gün ise 4.0, 400 ile 600 gün ise 6.0, vb.dir. Bu görüş geniş bölgelere yayılmış yüzeye yakın depremlerde geçerli olabilmektedir (Reimer, 1980). Benzer şekilde çeşitli ön izleyici olaylarını birlikte değerlendiren Scholz, depremden önce oluşan deprem göstergesi işaretlerin oluşum veya açığa çıkma zamanlarının, sonuçlanan depremin Richter ölçeğindeki büyüklüğü ile kabaca orantılı olduğunu rapor etmiştir. Ancak, bu modelin mantığa aykırı yanı, depremin merkez üssünden uzaklarda da gerilme veya gerginlikte büyük değişimler olması gerektiğidir. Başka bir alternatif modele göre de, yer altı sularıyla kaya matrisi

doğunluğa ulaştığında, gerginliğe dayalı yavaş kırık büyümesiyle radon anomalileri oluşmaktadır. Stres korozyonu tarafından oluşturulan kırık büyümesinin, yaş çevre içindeki herhangi bir mekanik kırılmayı ilerletmesi gerektiği tartışılmaktadır ve Atkinson deneysel olarak yüksek nemlilik durumunda, düşük gerilme hızlarında jeolojik materyalin kırık gelişimine izin verdiğini doğrulamıştır (Bichard, 1980). Gerginlik korozyon modeli, radon anomalilerinin oluşumunun gerilme hızına, kaya tipine, elastik çapa, deprem şekline, suyun doğunluk derecesine, sıcaklığa, gerginlik şiddetine ve hidrolik özelliklerine bağlı olduğunu öne sürmektedir.

Radonun açığa çıkması ile ilgili olan sıkışma modeline göre, bir deprem başlamadan önce kabuktaki sıkışmadan dolayı derindeki toprak gazında zenginleşmiş radon yukarı sızarak yüzeyde radon konsantrasyon profilinin değişmesine ve radon anomalisine neden olmaktadır. Modelini radon transportuna dayandıran King, radon konsantrasyonunun artan derinlikle arttığını ve bu nedenle sığ derinliklerde radon zenginleşmesinin ancak derindeki gazın yukarıya doğru itilmesiyle oluşacağını savunmaktadır. Bu modele göre, toprak gazında ve yeraltı sularında radonun yanında CO₂ ve He gazlarının da gözlenmesi gerekecektir. Bunu deneysel olarak doğrulayan çalışmaların yanında deprem sırasında ve öncesinde meydana gelen bazı olağanüstü olaylar da (kuyu sularındaki hava kabarcıkları, garip sesler, sis, koku vb.) bu savı destekler görünmektedir. Kabuktan çıkan gaz, atmosferik gazın kompozisyonundan farklıdır ve bu farklılık bazı hayvanların depremle ilişkili garip davranışlarını açıklayabilmektedir. Örneğin derinden gelen yer gazı, oksijen bakımından fakir olduğundan yüzey altında yaşayan bazı hayvanlar hayatta kalabilmek için yerlerini terk etmektedirler. Bunun yanı sıra diğer hayvanların garip davranışı havadaki iyonların (radon ve izotoplarının oluşturduğu) artması ile ilişkilendirilmektedir.

Radon anomalileri ve sismik hareketlerle ilişkili bugüne kadar toplanan veriler, radon zenginleşmesi ve deprem oluşumu arasında pozitif bir ilişki göstermesine rağmen, tam ve doğru deprem tahmininde radon anomalilerinin rolü sık sık tartışılmaktadır.

Elde edilen radon ölçüm verileri aşağıdaki bilgileri sağlamıştır (Wakita vd., 1998).

1. Radon anomalileri her zaman değil ama sık sık depremlerle birlikte dir.
2. Radon sinyali, sismik hareketler sırasında normal seviyenin üstünde artabilmekte veya azalabilmektedir. Anomali süresi çok kısa olabileceği gibi çok uzunda (birkaç saatten birkaç yıla kadar) olabilmektedir.
3. Radon anomalisinin boyutları ile deprem zamanını (deprem öncesinde veya sonrasında anomali gözlenebilmektedir), büyüklüğünü ve yerini ilişkilendirilebilmek (merkez üssünden çok uzaklarda da anomali saptanabilmektedir) mümkün olamamaktadır.
4. Sürekli radon monitörlerinden elde edilen bilgiler sık sık günlük değişimler göstermektedir. Bu durum, ayın oluşturduğu med-cezir olaylarına ve sıcaklık değişimlerine bağlanmaktadır.
5. Yüzeye yakın alınan toprak gazı ve yeraltı su örneklerindeki radon konsantrasyonlarının, kısa süreli atmosferik değişimlerden ve yağıştan etkilendiği görölmüştür.
6. Bazı radon anomalileri depremin birkaç saat öncesinde gözlendiğinden (Haicheng depremi), iyi bir radon izleme programı (monitoring), devamlı gözlem yapabilecek kapasitede olmalıdır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1. Fay İzi Belirlenmesinde Toprak Radon Ölçümünün Kullanılması

Arazide morfolojik belirti vermeyen ancak son 10 000 yıllık dönemde hareket etmiş kırık izlerinin tespit edilmesi hendek çalışmalarında zaman ve ekonomik açıdan çok önemlidir. Hendeklerin bu izlerin üzerinde isabetli bir şekilde açılması, uzun yıllar deprem üretmemiş ve tortul depolanmanın fazla olduğu, gömülü yerlerde oldukça zor olmaktadır. Bu amaçla uygulanan toprak radon değerinin ölçümü yöntemi pratik ve anında sonuç vermesi açısından önemlidir. Bu yöntemde; arazide yapılan gözlemsel çalışmalarla aktif kırığın geçtiği yerin kabaca belirlenmesinden sonra, portatif Markus 10 toprak radon ölçüm cihazı ile birkaç metrelik aralıklarla alınan ölçümlerle kırık izinin yeri hassas bir şekilde saptanır (Erkmen vd., 2007).

Bu yöntem aktif faylar üzerinde kullanılarak alfa izi ölçümü esasına dayanmaktadır. Yöntem iki şekilde uygulanmaktadır. Bunlardan birincisi fay izini saptamaya yarayan "kısa süreli ölçüm yöntemi", diğeri, ise fay aktivitesini değerlendirmekte kullanılan "uzun süreli ölçüm yöntemi"dir. Kısa süreli ölçümlerden, alfa izi ölçümlerinin, sadece deprem üreten aktif fayların izlenmesinde değil, aynı zamanda aktif olmayan fayların izlenmesinde de yararlı olduğu hatta bu fayların da bir miktar radon aktif alanlar oluşturduğu sonucu elde edilmiştir. Uygulamada birkaç metrelik aralıklarla varlığından şüphelenilen fayın doğrultusuna dik ve onu kesen bir hat boyunca ölçüm alınmalıdır (Kuşçu v.d., 1992).

Adıyaman Gölbaşı Balkar beldesinin güneybatısında Karaçemçe deresinde KB-GD doğrultulu bir hat boyunca yapılan radon ölçümü örnek çalışmasında Markus 10 toprak radon cihazı ile kBq/m³ değerinden radon sayımı yapılmıştır. 0–36 kBq/m³ arasında radon konsantrasyon değerleri elde edilmiştir. fayın geçtiği hat boyunca ve yakınında yapılan ölçümlerde radon değerinde yükselme görülmüş, muhtemel fay hattından uzaklaştıkça ise değerlerde çok net bir düşme gözlenmiştir. Bu sonuçların muhtemel fay hattı hakkında verdiği bilgi ile arazide herhangi bir kazım işlemi olmadan zamandan ve ekonomiden kazanım sağlayarak uygun hendek yeri seçimi yapılabileceği düşünülmüştür (Erkmen vd., 2007).

2.2. Toprak Gazı ve Yeraltı Suyu Radon Konsantrasyonu ve Deprem İlişkisi

Radon ve depremin olabilirliği arasındaki ilişkiye ait ilk çalışmalar ise 1956'da Okobe tarafından yapılmıştır. Japon bilim adamı Okobe, radonu yeni deprem izleyicisi olarak işaret etmiş ve yüzey yakınında atmosferik günlük radon değişimleri ile sismik hareketler arasında pozitif bir ilgileşim olduğunu göstermiştir. Suda kolaylıkla çözünen radon, asal bir gaz olduğundan bileşik yapmaz ve yer altı sularındaki konsantrasyonu, genel hidrolojik karakteristiklerden (suyun kompozisyonu, mineralizasyonu v.b) etkilenmez. Bu nedenle, yeraltı sularındaki radon konsantrasyonlarındaki dalgalanmaların büyük ölçüde tektonik hareketlere bağlı olarak geliştiği öne sürülmektedir (Teng, 1980; Virk, 1993).

Taşkent artezyenlerinde, Rus bilim adamları (Semasko Scientific Institute) tarafından yapılan uzun süreli radon ölçümleriyle, ilk kez derin kuyu sularında radon anomalilerinin deprem için faydalı bir izleyici olduğu ortaya konmuştur. 1966'daki Taşkent depreminden önce derin kuyu sularında radon içeriğinin önemli değişimlerine ait gözlemler 1967 ve 1971'de Ulomov ve Mavashev tarafından rapor edilmiştir.

Depremin önceden sezilmesiyle ilgili en önemli çalışma Çin'de 7.3 büyüklüğündeki Haicheng depremi öncesi yapılmıştır. Yeraltı sularında radon izleme çalışmaları sonucu, oluşacak depremin birkaç saat önce bildirilmesiyle milyonlarca insanın hayatı kurtarılmıştır (Tanner, 1980).

Yeraltı sularında, radon emisyonu ve bölgesel stresin gelişimi arasındaki ilişkiyi ortaya koyan bu çalışmaların yanında, Birchard ve Libby'nin önerisi ile 1974 yılında ilk kez toprak gazı radon gözlemleri ölçüm teknikleri ve ortamları farklı olmasına rağmen, bu amaç için kullanılmıştır (Birchard vd., 1980).

Meksika'nın Pasifik kıyısında selüloz nitrat film içeren (LR 115 tip II) katı hal nükleer iz dedektörü ile 13 farklı istasyonda uzun süreli radon konsantrasyonu

ölçümleri yapılmış ve bölgedeki sismik ve volkanik hareketliliğe bağlı olarak yüksek değerler gözlenmiştir. 1997 yılında bölgede meydana gelen $M>6$ şiddetindeki depremlerden önce birkaç istasyonda eşzamanlı olarak radon konsantrasyonunda artış meydana gelmiştir. Bu istasyonlarda ayrıca meydana gelen fırtına ve tayfunların radon çıkışını etkilediği gözlemlenmiştir. Ölçülen radon konsantrasyon değerlerinin ölçüm yapılan yerin jeolojik yapısı ile bağlantılı olarak değişim gösterebildiği saptanmış $0-35 \text{ kBq/m}^3$ arasında değişen radon konsantrasyon değerleri ölçülmüştür (Segovia vd., 1999)

Günümüze kadar yapılan çok sayıdaki çalışmada, yeraltı sularında ve toprak gazında anormal radon değişimlerinin, birçok deprem için uyarı işareti olduğu ve radon konsantrasyonunda görülen anomalilerinin sismik olaylar için faydalı bir ön izleyici olduğu bilinmektedir. Buna karşın, deprem öncesi gözlenen radon anomalilerinin mekanizmaları ve kökeni birçok matematiksel modele ve laboratuvar çalışmasına rağmen hala tam olarak anlaşılamamıştır.

Yeraltı suları ile ilgili olarak Türkiye’de de yapılan birçok ölçüm mevcuttur. Örneğin Afyon yöresi termal su kaynaklarında yapılan ölçümlerde radon konsantrasyonu tayin edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre radon konsantrasyonu $0.42- 28.82 \text{ Bq/L}$ arasında değişmektedir (Yalın vd., 2007).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Radyasyonun varlığının anlaşılması duyu organları ile mümkün olmadığından, algılanması ve ölçümleri radyasyona hassas cihazlar ile yapılır. Radyasyonun ölçülmesinin temeli, radyasyon ile maddenin etkileşmesi esasına dayanır.

3.1. Radyasyon Ölçüm Teknikleri

3.1.1. İyon Odası Dedektörü

İyon odaları X, γ ışınları ve β parçacıkları ölçümünde kullanılırlar. Alçak radyasyon şiddetine duyarlı olmamakla beraber yüksek doz şiddetlerini ölçmede son derece yararlıdır. Çeşitli radyasyonları ayırt etme özelliği olmamakla beraber 60-300 Volt'luk çalışma aralığında etkindir. Gaz olarak genellikle atmosfer basıncında hava kullanılır.

3.1.2. Geiger-Müller Dedektörü

GM detektörü 'Q-gazı' (%98 Helyum ve %1.3 Bütan) ile dolu bir tüpten oluşur. İyon odalarında olduğu gibi, oluşan birçok reaksiyon sonrası meydana gelen averaj akımı ölçmek yerine, detektör her bir etkileşimi kaydeder. Yani, tek bir iyonlaştırıcı olay GM tüp tarafından puls ya da sayım üretir. Prosesi başlatan orijinal iyon çiftlerinin sayısını dahi göz önüne almayarak bütün pulsuları aynı büyüklükte üretir. Dolayısı ile GM sayacı radyasyon tiplerini veya enerjilerini ayırt edemez. Bu nedenle GM sayaçlarının çoğu dakika başına sayma (CPM) olarak kalibre edilir. GM sayaçları esas olarak, radyoaktif materyalin varlığını detekte etmekte kullanılır, 900-1300 V'luk çalışma aralığında etkindir.

3.1.3. Orantılı Sayaçlar

Çalışma voltajı orantılı bölgede olup, meydana gelen yüksek alan şiddeti ile anottaki yük miktarı, dolayısıyla voltaj pulsu büyür. Bu tip dedektörlerle;

1. Düşük enerjili X ve gama Işınları ölçülebilir,
2. İyon odasına açılan naylon veya mikalardan yapılmış ince pencere ile alfa parçacıklarının ölçümü yapılır.

Gazın çoğaltma faktörü 105-106 ve çalışma voltaj aralığı 1500-4000 V'tur. Orantılı cihazların radyasyonları ayırt etme özelliği vardır.

3.1.4. Sintilasyon Dedektörleri (Pırladama)

Elektrona verilen enerji onu ortamdaki yerinden koparmaya yeterli olmadığı zaman uyarılan elektron, tekrar eski haline dönerken görünür ışık yayar. Sintilasyon fosforlarının yaydığı ışık, foto çoğaltıcı tüpler tarafından toplanarak, voltaj pulsu haline getirilir. Meydana gelen pulsun büyüklüğü radyasyonun enerjisi ile orantılıdır. Bu dedektörler sayım ve aynı zamanda enerji ayırımı için kullanılır.

3.1.5. Yarı İletken Dedektörler

Silisyum (Si) ve Germanyum (Ge) gibi yarı iletken maddelerden yapılır. Bu dedektörler radyasyonun bu maddelerde oluşturduğu iyonizasyon ilkesi ile çalışırlar. Genellikle radyasyonun enerjisini ölçmek için kullanılırlar.

3.1.6. Nötron Dedektörleri

Diğer radyasyonların ölçüldüğü sistemlerle (n, α), (n, β), (n,p) ve (n, γ) reaksiyonları sonucunda oluşan ikincil iyonlayıcı ışınlar ölçülür. Nötron etkileşmesinden doğan izotopun kendisi radyoaktif olabileceğinden bu yöntem çoğunlukla indium, tantal ve altın plakaları bir araya getirerek kaza dozimetresinde kullanılır.

3.2. Radon Ölçüm Teknikleri

Radon miktarı ölçüm cihazları ile saptanabilir. Her ülke veya uluslararası örgütler örneğin Uluslararası Atom Enerjisi Kurumu evlerde müsaade edilebilir seviyede olması gereken miktarı belirlemiştir. Söz konusu limit değerlerin aşılması halinde, radon konsantrasyonunu düşürücü tedbirlerin alınması tavsiye edilmektedir.

Uluslararası Atom Enerji Ajansı Temel Güvenlik Standartları (IAEA-BSS) çerçevesinde, radon için tavsiye edilen düzeyler 200-600 Bq /m³ olarak belirlenmiştir. Türkiye'de müsaade edilebilir radon konsantrasyonu ise 400 Bq /m³ 'tür. İngiltere'de NRPB (The National Radiological Protection Board) radon miktarını dışarda ortalama 4 Bq/m³, evlerde ortalama 20 Bq/m³ olarak belirlemiş eğer radon mikarı evlerde 200 Bq/m³'ün üzerine çıkar ise müdahale edilmesi gerektiğini (action level) ifade etmiştir. USA Çevre Koruma Ajansı (EPA)'da benzer bir limit koymuştur. EPA'ya göre saptanan maksimum limit 148 Bq/m³'tür.

3.2.1. Toprak Gazı ve Yeraltı Sularında Radon Ölçümü

Yeryüzüne çıkan toprak gazının ihtiva ettiği radon miktarı, (aktif fay hatları boyunca dolaşan ve derin kuyulardan elde edilen) yeraltı sularında olduğu kadar önemli deprem habercilerinden biridir (Wakita vd., 1998).

Deprem araştırmalarında radon ve bozunum ürünlerinin ölçümü genellikle enerjisi 5,5 MeV ile 7,7 MeV arasında değişen (²²²Rn 5,5 MeV, ²¹⁸Po 6,0 MeV, ²¹⁴Po 7,7 MeV) alfa partiküllerinin izlenmesi üzerinedir. Kullanılan araç ve metotlar ölçülen radon ve bozunum ürünlerine bağlıdır. Sürecine bağlı olarak ölçümler üç çeşittir:

- i) Numune Alıntı ve Anlık ölçüm: Bu teknikte, toplanan hava numunesi beş ila yirmi litrelik cam, metal veya plastik kaplara konularak analiz

yapılmak üzere laboratuara getirilir. Gaz konsantrasyonundaki dalgalanmaların zaman skalası gibi kısa zaman aralıklarında, numunedeki radon ve radon ürünleri konsantrasyonun anlık ölçümleri yapılır.

- ii) Tümlayıcı: Tümlayıcı yöntemlerde, genellikle birkaç günden birkaç aya kadar uzun zaman süreçlerinde meydana gelen radyoaktif olayların toplamı üzerinden bilgi toplanır. Bu yöntemde sonuç olarak, o çevredeki yaklaşık ortalama konsantrasyon tahminleri elde edilir.
- iii) Sürekli: Bu teknikte numunenin sürekli bir biçimde ölçüm yapılan araçlara aktarımı söz konusudur, bu da ölçümün otomatik olarak yapılmasını gerektirir. Uzun bir periyotta kısa zaman aralıklarıyla ölçüm yapılır. Bu teknikte sonuç olarak, ölçüm yapılan zaman müddetince gerçekleşen konsantrasyon değişimleriyle oluşturulan bir grafik üzerinden bilgi verebilecek ölçüm serileri elde edilir.

Radon örnekleme yöntemleri, numune toplamak için elektrik gücüne ihtiyaç duyulan aktif yöntemler ve elektrik gücüne ihtiyaç duyulmayan pasif yöntemler olarak ayrılabilir. Radon ölçüm cihazlarının tasarımında kullanılan kriterler arasında ölçüm alanına göre uygulanabilirlik, taşınabilirlik, kolaylık, güvenilirlik ve maliyet yer alır. Radon araştırmalarında kısa süreli ölçümler için basit yöntemler kullanılırken, uzun süreli ölçümler için daha kompleks ve ayrıntılı araçlar kullanılır (Cothorn ve Smith, 1987).

Radon ve bozunum ürünleri tarafından yayılan alfa parçacıklarının deteksiyonunda kullanılan araç ve yöntemler aşağıda verilmiştir (Papastefanou, 2007):

- 1- Gümüşle aktive edilmiş çinko-sülfat fosfor gibi alfa sintilasyon dedektörleri.
- 2- Alfa parçacık izlerinin katı-hal materyalleri üzerine kaydeden alfa iz dedektörleri ve nükleer iz dedektörleri.

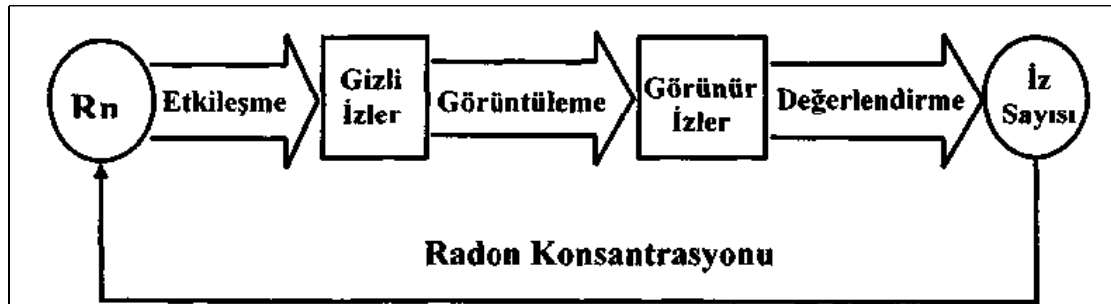
- 3- Ya yüzey bariyeri ya da yayılmış kavşak dedektörü, silikon diyetli alfa sintilasyon spektrometreleri

Çizelge 3.1. Başlıca radon ölçüm araçları (Papastefanou, 2007)

Metot	Tip	Materyal	Hacim	Duyarlılık	Zaman Periyodu
Alfa Sintilasyon Dedektörleri	Anlık	Gaz/Su	0.1 l-3.0 l	0.8-16 cph/Bq m ⁻³	1-5 dk
Alfa iz Dedektörleri	Tümleyici	Gaz	456 ml	0.03-0.09 tracks cm ⁻² /kBq m ⁻³ h	1-2 hafta
Elektret İyon Odaları	Tümleyici	Gaz	50-960 ml	3 Bq m ⁻³ h -1.05 kBq m ⁻³ h	2-40 gün
Barasol Dedektörleri	Sürekli	Gaz	590 ml	0.02 puls h ⁻¹ /Bq m ⁻³	15-240 dk
Clipperton Dedektörleri	Sürekli	Su	590 ml	1 cph/362 Bq m ⁻³	1 dk-48 s
Radon/Toron Monitörleri	Sürekli	Gaz/Su	0.27 l	0.01 cpm/Bq m ⁻³	1 dk-24 s (standart 6 dk)

3.2.1.1. Nükleer İz Dedektörleri

Nükleer iz Dedektörleri ile radon konsantrasyon ölçümleri çeşitli plastik maddelerden yapılmış film tabakaları kullanılarak gerçekleştirilir. Bu yöntem, plastik plakalar üzerine çarpan alfa parçacıklarının gözle görülmeyen bir iz bırakması ve bu izin kimyasal iz kazıma yöntemi ile büyütülerek mikroskopta sayılması esasına dayanmaktadır (Şekil 3.1). Selüloz Asetat, Polikarbonat ve Allil Diglikol Karbonat gibi plastik maddelerden yapılmış nükleer iz dedektörleri yaygın olarak kullanılmaktadır (Durrani ve Iliç, 1997).



Şekil 3.1 Pasif radon dedektörleri ile ölçme ve değerlendirme işlemlerinin şematik gösterimi.

Radosys sistemi, radonun radyoaktif bozunumu sırasında verdiği alfa parçacıklarının CR-39 pasif radon dedektörleri üzerinde bıraktığı izlerin kimyasal işlemle görünür hale getirilmesi ve bu izlerin mikroskopla sayılmasını baz alır. Nükleer iz kazıma yöntemi olarak da isimlendirilen bu yöntem evlerde ve işyerlerinde uzun süreli havada radon ölçümleri için yaygın olarak kullanılmaktadır.

Radosys sistemi ile radon ölçümü dışında toron ve nötron ölçümleri de yapılabilir. Laboratuvarda CR-39 dedektörleri ve Radosys cihazı kullanılarak nötron konsantrasyonu tespit deneme çalışmaları sürdürülmektedir.

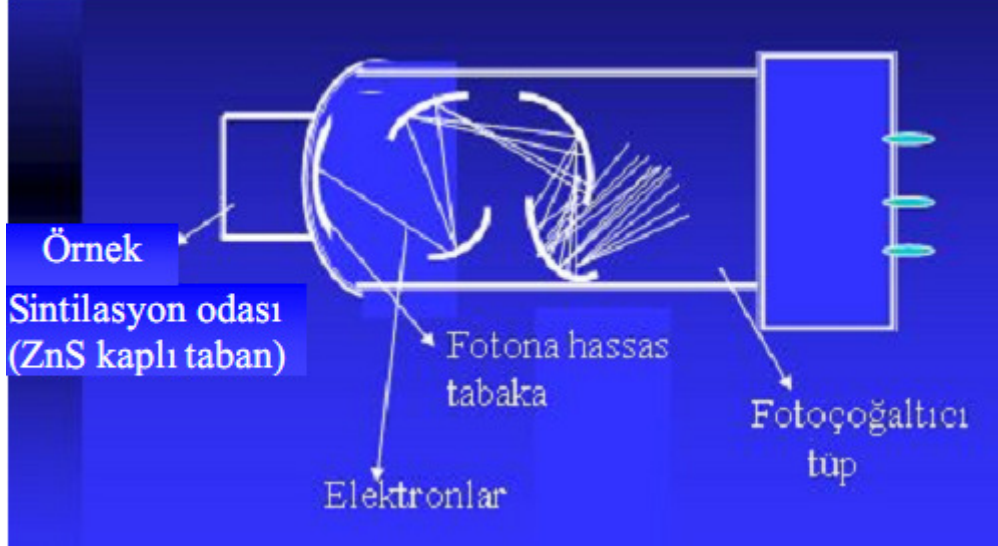
Radosys sistemi ile radon ölçüm işlem basamakları;

- Radopotlara CR-39 dedektörlerinin yerleştirilmesi; evlere, işyerlerine veya maden ocaklarına posta ile gönderilecek test kaplarının hazırlanması,
- Kapların test alanlarında 2-3 ay bekletilerek Radona maruz bırakılması,
- Kapların laboratuara ulaşmasını takiben dedektörlerin kaplarından çıkarılarak kimyasal kazıma “**etching**” işlemine hazır duruma getirilmesi,
- 4 saat sürecek etching işlemi için Radobath ve NaOH çözeltisinin hazırlanması,
- Dedektör slaytlarının sirke çözeltisi ile nötralize edilmesi, damıtılmış su ile durulanması ve kendi halinde kurumaya bırakılması,
- Dedektörlerin üzerindeki izlerin, Radometre mikroskobu ile sayılması, bilgisayar programı ile verilerin alınması, değerlendirilmesi ve radon aktivite konsantrasyonunun (RAK) hesaplanmasıdır (TAEK).

3.2.1.1. Alfa sintilasyon dedektörleri

Sintilatör; içerisinden iyonlayıcı parçacık geçtiğinde kıvılcım oluşturan, ışık parıldaması yapan katı, sıvı veya gaz malzemelerdir. Temel prensipleri, ışılda

fosforu adı verilen maddeye radyasyon enerjisinin nakli ile bu maddenin, görünür ışık veya görünen ışığa yakın dalga boyunda radyasyon yayınlamasıdır.



Şekil 3.2. Sintilasyon dedektör düzeneği

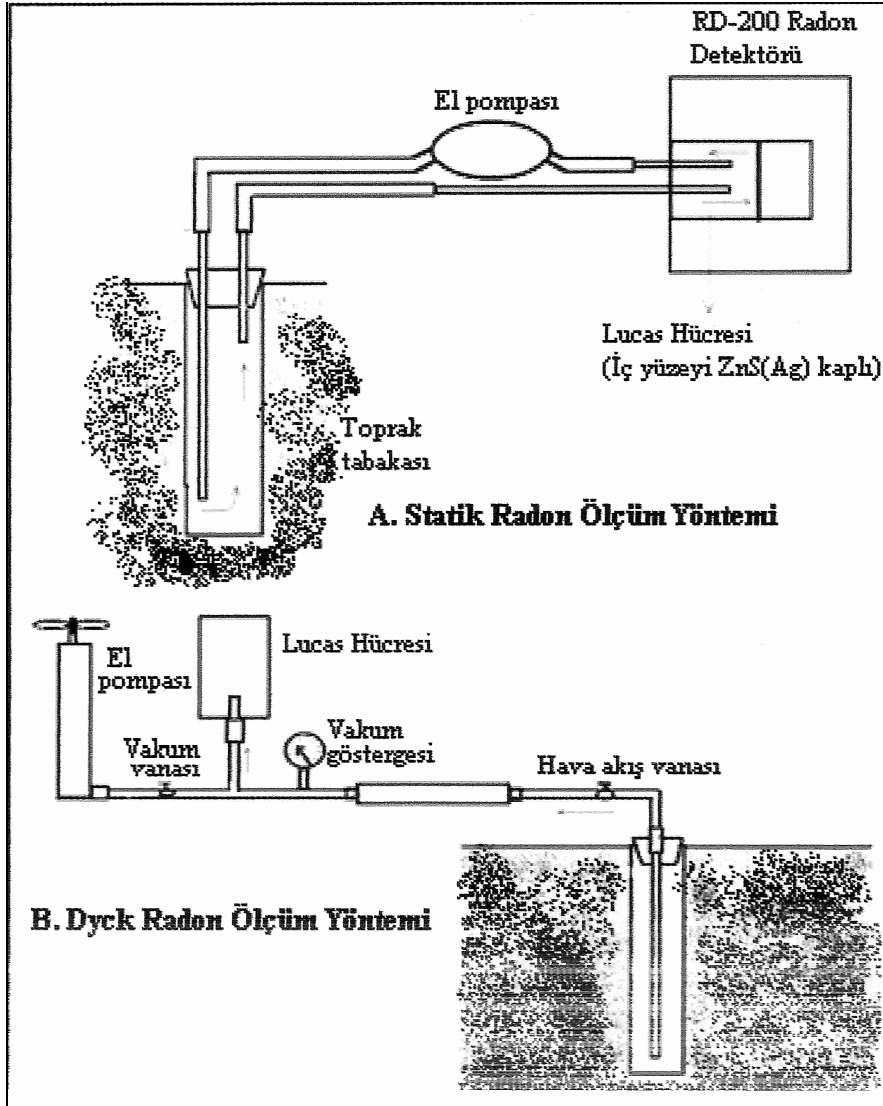
Sintilasyon odasına yerleştirilen radyoaktif katkılı numuneden yayınlanan iyonlaştırıcı α , β parçacıkları ve γ fotonlarının varlıklarını gösterebilmek ve ölçülebilir büyüklük haline getirebilmek için sintilasyon odasının tabanına veya duruma göre çevresine, α , β parçacıkları ve γ fotonlarıyla etkileştiğinde foton yayabilecek, aşağıdaki sensörlerden birisi kullanılır.

1. Tek Organik Kristaller (Tntracene, Stilbene)
2. Organik Sıvılarda Çözülmüş Organik Maddeler
3. Katı Eriyikler (Terphenyl +Polystrene)
4. Tek inorganik Kristaller (NaI(Tl), LiI(Sn))
5. İnorganik Pudra (ZnS(Ag))
6. Gazlar (Xenon)

Genelde; alfa parçacıkları için; gümüşle aktive edilmiş ZnS fosforlar, beta parçacıkları için; en fazla Antracene, daha sonraki sıralamada naftalin ve stilben, gamalar için; talyumla aktive edilmiş NaI kristaller kullanılır (Saç ve Camgöz, 2005).

Lucas hücresi olarak da bilinen sintilasyon hücresi radon ve bozunum ürünlerinin ölçümünde kullanılan en eski ve yaygın metotlardan biridir.

Statik yöntemde çapı 2-3 cm, derinliği ise 0,60-1 m olan bir delik açılarak radon ölçüm cihazının sondası bu delikten sokulur(şekil3.2). Delikteki gaz ile dedektör odasındaki gaz homojen oluncaya kadar pompalamaya devam edilir ve pompaj durdurularak sayım yapılır (Saç ve Camgöz, 2005).



Şekil 3.3. Lucas hücresinin kullanıldığı bazı yöntemler

Dyck yönteminde ise Lucas hücresi ile birlikte hücrenin takıldığı sistem vakum yapılır. Topraktaki hava ve diğer gazlar vakum yapılmış Lucas hücresine çekilir.

Yaklaşık 4 dakika süren bu işlem sonunda topraktaki radonun bir kısmı Lucas hücresini doldurduktan sonrahücre içinde radon gazı ürünleri ile dengeye gelineceye kadar bekletilir(yaklaşık 4 saat). Lucas hücresi radon dedektörüne yerleştirilerek radon ve ürünleri ölçülür. Her iki yöntem ile elde edilen radon sonuçları cpm(dakikadaki sayım) olarak verilir (Saç ve Camgöz, 2005).

3.2.2. AlphaGUARD Radon Dedektörü

Yerinde ölçümler yapılmasında kullanılan AlphaGUARD PQ 2000PRO cihazında bulunan iyon odası (alfa spektroskopi pulse sayımı) vasıtası ile ortamın o anki radon değeri ile birlikte hava sıcaklığı, hava basıncı ve havanın nemi gibi diğer parametreler de ölçülmektedir. Taşınabilir nitelikte olan cihazla 2-2.000.000 Bq/m³ aralığındaki radon yoğunlukları ölçülmektedir. Cihaz bilgisayara bağlanarak veri depolanabilir ve değerlendirilebilir.

AlphaGUARD Radon detektörü gelişmiş bir atma (puls) iyonlaşma çemberi veya alfa (α) spektroskopisi yöntemi kullanmaktadır. Yüksek Radon ölçüm hassasiyetine sahiptir ve yoğunluk gradientleri ile küçük yoğunluk dalgalanmalarını algılayabilecek derecede hassas elektronik yapıya sahiptir. Uzun süreli ölçümler yapabilmektedir ve ölçümler esnasında doğrudan bir güç kaynağına bağlanabildiği gibi yüksek kapasiteli pilleri sayesinde seçilen ölçüm moduna göre 6 aya kadar ölçüm yapabilmektedir.

AlphaGUARD Radon detektörü ölçüm ünitesine tümleşik olan bir pompa yardımı ile havayı detektörün iyonizasyon odasına alır. Emme sonucunda iyonizasyon odasına giren ²²²Rn ve ²²⁰Rn izotopları bozunarak oda içerisinde iyonizasyona sebep olarak bir elektrik sinyalleri meydana getirirler. Bu sürekli emme esnasında Radon yan ürünleri bir plaka şeklindeki filtre tarafından tutulur ve filtre plakası üzerinde biriken Radon yavru ürünlerinin alfa aktivitesi ise filtre plakasının diğer yüzüne yerleştirilmiş hassas bir sayısal işlemcili modülü olan, alfa duyarlı TN-WL.02 mikroçip modülü vasıtasıyla ölçülür. Yapılan tüm ölçümlerden elde edilen elektrik sinyalleri, AlphaGUARD PQ 2000PRO'nun Counter-Module sayıcı birimine TTL

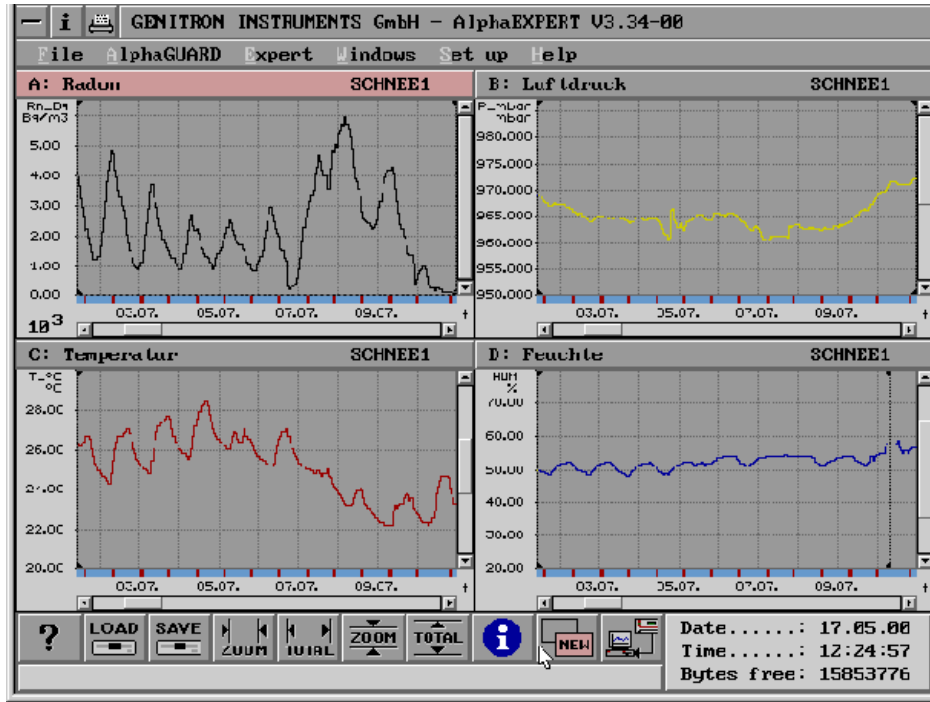
sinyali olarak gönderilir ve detektörün kalibrasyon bilgileri de kullanılarak yazılım tarafından okunabilir veriler haline dönüştürülür.

Çizelge 3.2. AlphaGUARD monitörünün bazı teknik ve fiziksel özellikleri (P.R.M.A. Kullanım Kılavuzu).

Toplam ağırlık	4,5 kg
Rn detektör tipi	İyonizasyon odası
Detektör gerilimi	DC 750 V
İşletim modu	Akım modu ve 3D α spektroskopisi
Toplam detektör hacmi	0,62 litre
Etkin detektör hacmi	0,56 litre
Detektör dolum mekanizması	Hızlı pasif difüzyon veya aktif adaptörle otomatik dolma
Detektör sinyal işleme birimi	3 ayrı ADC kanallı hızlı sinyal işleme
Spektral sinyal üretme birimi	DSP(Digital Signal Processing), on-line çapraz korelasyon algoritması
Detektör hassaslığı	1 CPM/20 Bq/m ³
Rn222 ölçüm sınırları	
Alt sınır	2 Bq/m ³
Üst sınır	2x10 ⁶ Bq/m ³
LCD ekran çözünürlüğü	1 Bq/m ³
Sistem doğrusalılık hatası	< %3
Rn222 kalibrasyon hatası	± % 3
Ölçüm sıklıkları	
Difüzyon modu	10 veya 60 dak
Akış modu	1 veya 10 dak
Veri depolama kapasitesi	1 dak döngüyle 3 gün 10 dak döngüyle 1 ay 60 dak döngüyle 6 ay
Dâhili batarya kapasitesi	10 gün
İklim parametreler Sıcaklık	-10°C - +50°C

Atmosfer basıncı	700 mbar . 1100 mbar
Nem	0 %rH . 95 %rH

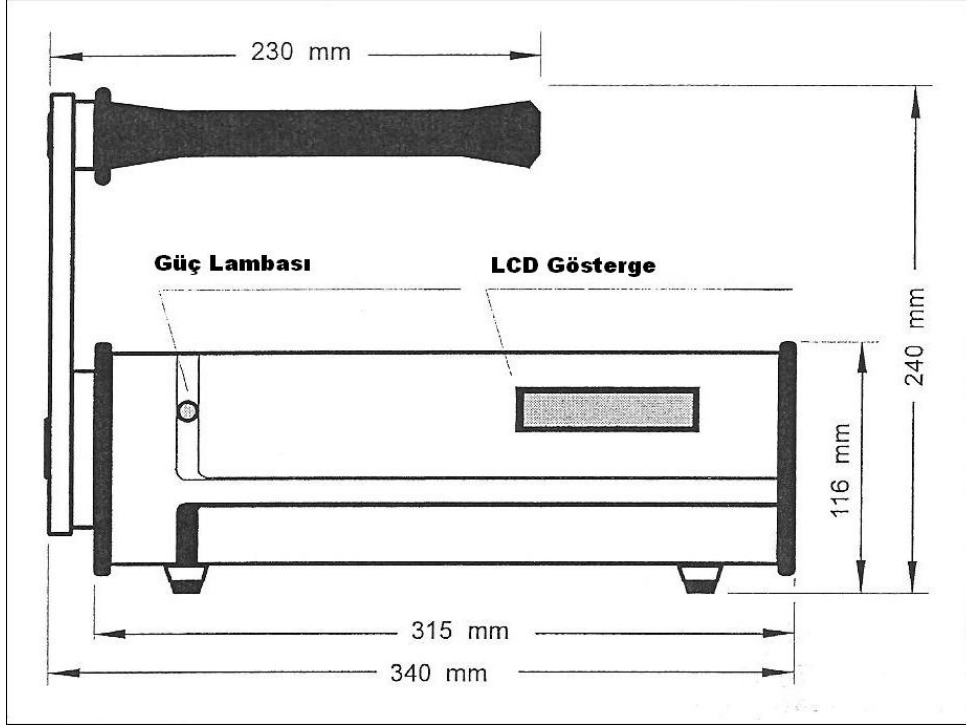
Alınan verilerin grafiksel olarak işlenmesi, geliştirilmesi, arşivlenmesi ve sanal ortamda sunulması için ise AlphaGUARD için geliştirilmiş çeşitli yazılım paketleri kullanılır. Bunlar AlphaVIEW, AlphaEXPERT ve en son geliştirilmiş olan DataEXPERT yazılımlarıdır.



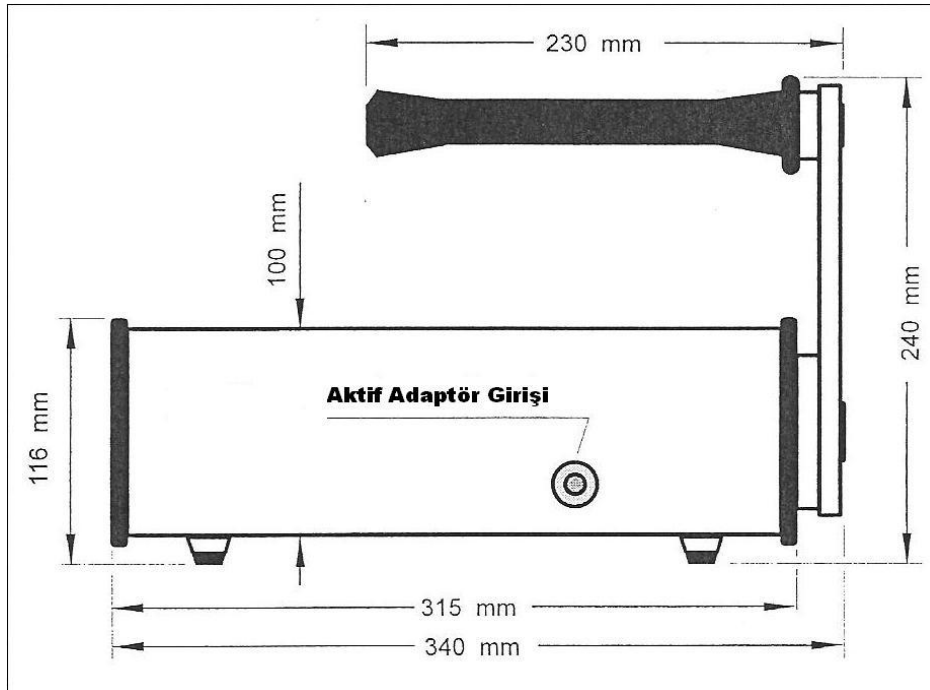
Şekil 3.4. AlphaEXPERT programı ile AlphaGUARD'ın ölçtüğü radon konsantrasyonu, sıcaklık, basınç ve nem verilerinin bilgisayar ekranında görüntülenmesi

3.2.2.1. AlphaGUARD Detektörünün Yapısı

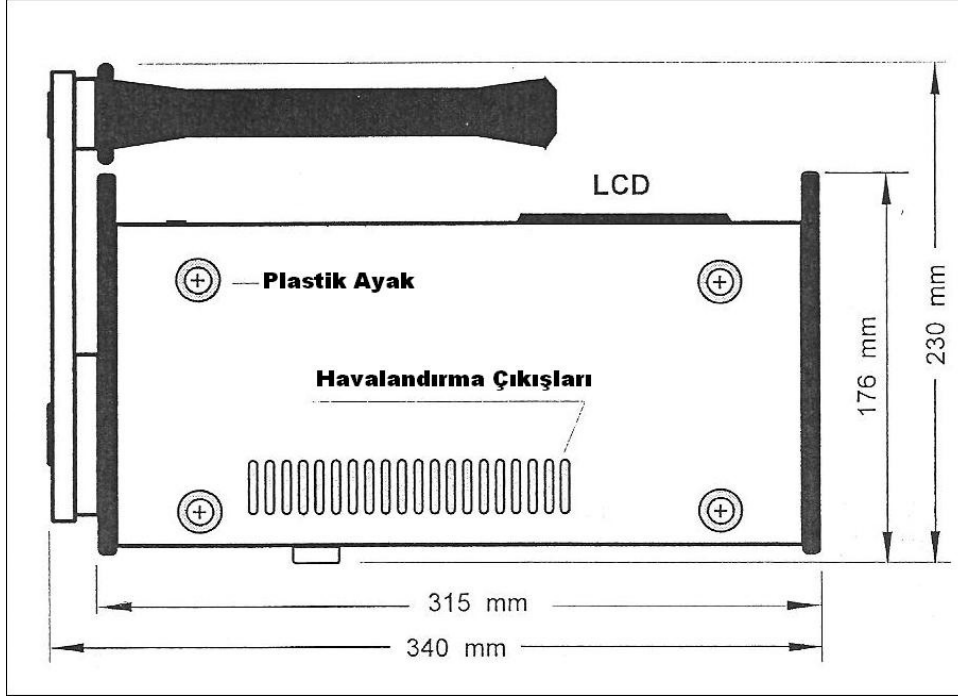
AlphaGUARD PQ 2000PRO Radon detektörünün ölçüm yapmasını sağlayan ölçüm ve elektronik aksam bileşenleri dayanıklı bir alüminyum dış gövde içine yerleştirilmiştir. AlphaGUARD cihazın farklı görünüşleri ile ebatları aşağıdaki gibidir (Şekil 3.5.a,b,c,d,e) .



Şekil 3.5.a AlphaGUARD cihazının önden görünüşü ve ebatları (P.R.M.A. Kullanım Kılavuzu)

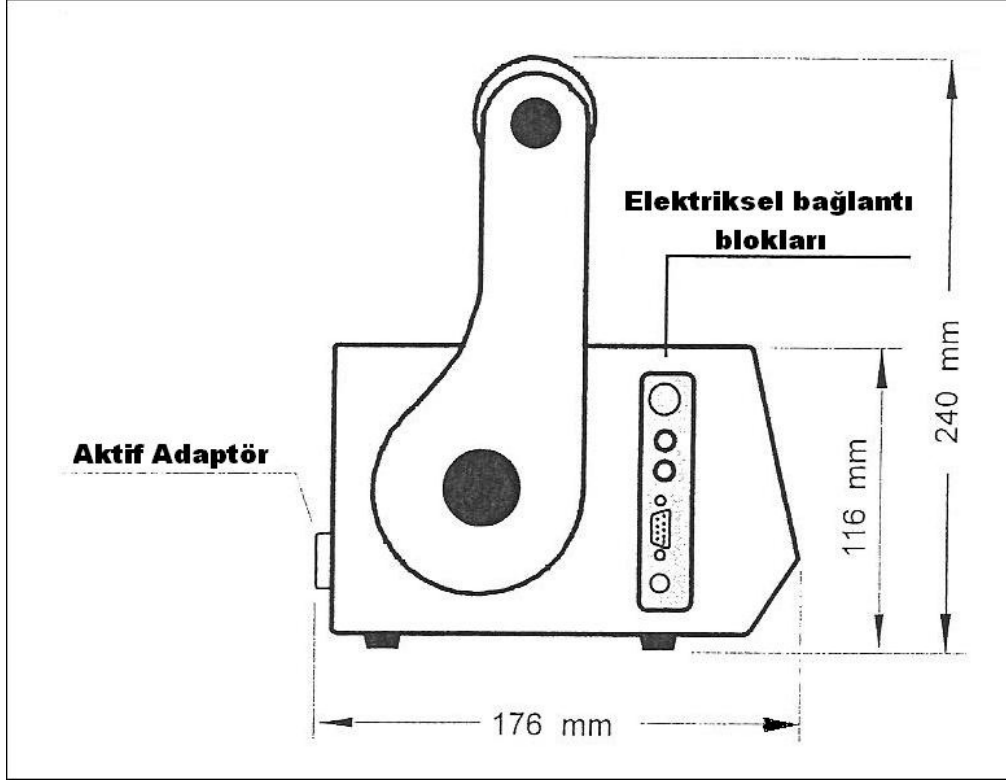


Şekil 3.5.b AlphaGUARD cihazının arkadan görünüşü ve ebatları (P.R.M.A. Kullanım Kılavuzu)



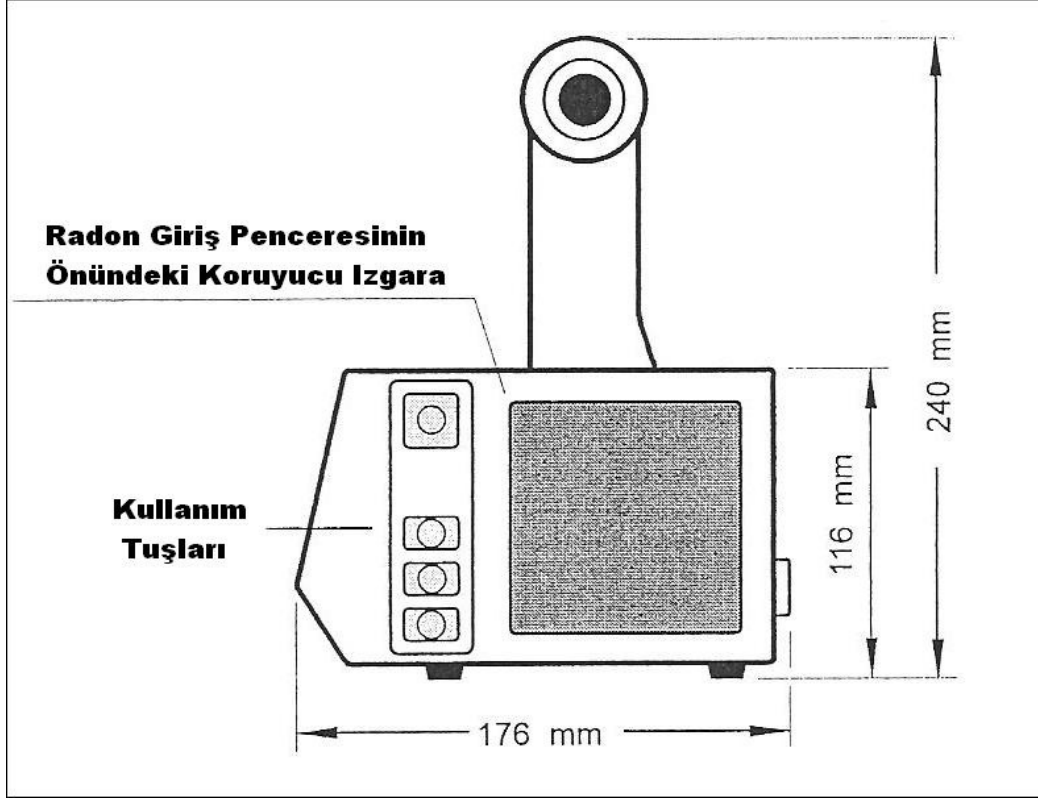
Şekil 3.5.c AlphaGUARD cihazının alttan görünüşü ve ebatları (P.R.M.A. Kullanım Kılavuzu)

Cihazın arka kısmındaki vida yuvası plastik bir kapakla kapatılmıştır. AlphaGUARD PQ 2000PRO'da bu kapağın arkasında bulunan yuva cihazın iyonizasyon odasıyla buraya bağlanan etkin hava pompası arasındaki bağlantıyı sağlar. Yani buradan detektör içerisine hava girişi sağlanmaktadır. Bu da AlphaPUMP ile yapılır. Alt kısımda alüminyum gövdenin yerle temasını kesen plastik ayaklar ve havalandırma kanalları bulunmaktadır. İç kısımda bulunan bir fan sayesinde, özellikle uzun süreli kullanımlarda cihazın soğutulmasını sağlamak için sıcak hava buralardan dışarıya atılmaktadır.



Şekil 3.5.d AlphaGUARD cihazının sol yandan görünüşü ve ebatları (P.R.M.A. Kullanım Kılavuzu)

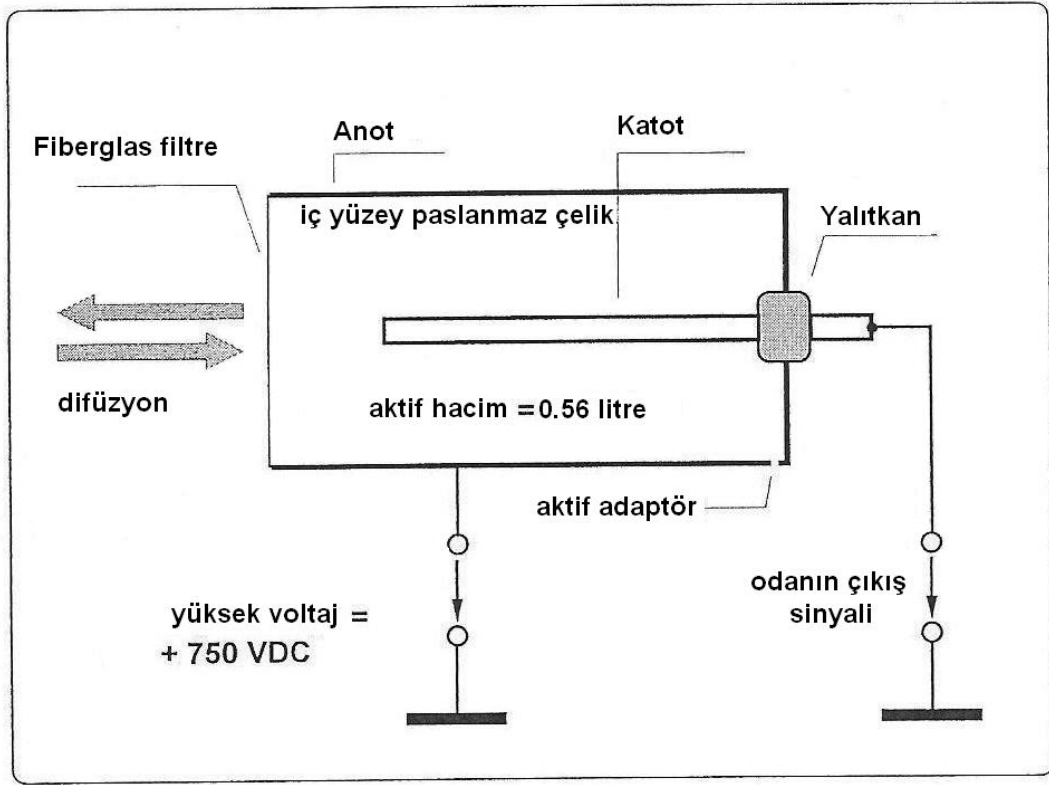
AlphaGUARD PQ 2000PRO'nun taşıma kolunun bağlı olduğu sol kısımda elektrik bağlantı girişleri bulunmaktadır. Burada harici sensor girişi için bir adet MINI-DIS. 85 soketi, iki adet 4 mm'lik soket, PC ile bağlantıyı sağlamak için bir adet RS232 girişi ve 12V DC adaptör girişi bulunmaktadır. Cihazın sağ tarafında koruyucu ızgara ile kapatılmış Radon gazı giriş paneli ve AlphaGUARD menü kontrolünü sağlayan tuş takımı bulunmaktadır



Şekil 3.5.e AlphaGUARD cihazının sağ yandan görünüşü ve ebatları (P.R.M.A. Kullanım Kılavuzu)

Cihazın alüminyum korumasının altında ölçüm yapılmasını sağlayan detektör (iyonizasyon odası) ve detektörden gelen sinyalleri işleyip sayısal veri haline getiren sinyal işleme birimi DSP (Digital Signal Processing-Sayısal Sinyal İşleme) bulunmaktadır.

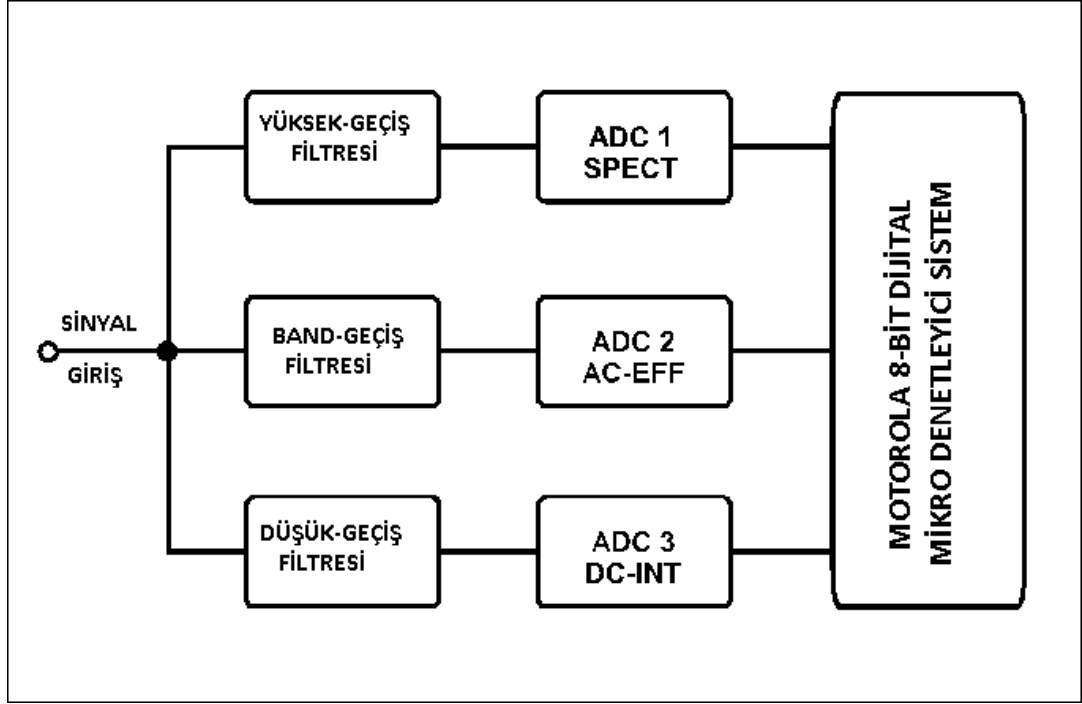
Düzenli işletimde Radon içeren hava iyonizasyon çemberi içerisine geniş yüzeyli bir cam fiber filtreden geçerek girmektedir. Burada sadece ^{222}Rn 'nin geçmesine izin verilirken yan ürünlerin iyonizasyon odasına girmesi engel olmaktadır. Aynı zamanda filtre, iyonizasyon odasının iç kısmını toz zerreciklerinin birikmesiyle oluşacak kirlenme ve paslanmadan korur. Buna destek olarak cihaz içine dışarıdan miktarı kontrol edilebilen temiz hava girişi sağlayacak bir pompa (AlphaPUMP) da kullanılmaktadır.



Şekil 3.6. AlphaGUARD iyonizasyon odasının şematik gösterimi (P.R.M.A. Kullanım Kılavuzu)

AlphaGUARD'ın silindirik iyonizasyon odası 0.56 litrelik aktif hacme sahiptir. Metalik iç kısmın gerilimi alet açıkken +750 voltur. Merkezde yatay eksen boyunca uzanan potansiyeli 0 V olan elektrot yer almaktadır. Merkez elektrotu yüksek hassasiyetteki ön amplifikatörün sinyal girişi ile bağlantılıdır. Ön amplifikatörün işlenen ölçüm sinyalleri daha fazla dijital işlem için elektronik bir şebekeye iletilir.

AlphaGUARD PQ 2000PRO cihazının iç yapısının ikinci temel bileşeni elektronik birimdir. Bu elektronik birim detektör tarafından elektrik sinyallerine dönüştürülen Radon verilerini alıp işlemekle sorumlu birimdir.



Şekil 3.7. Dijital sinyal işleme blok diyagramı (P.R.M.A. Kullanım Kılavuzu)

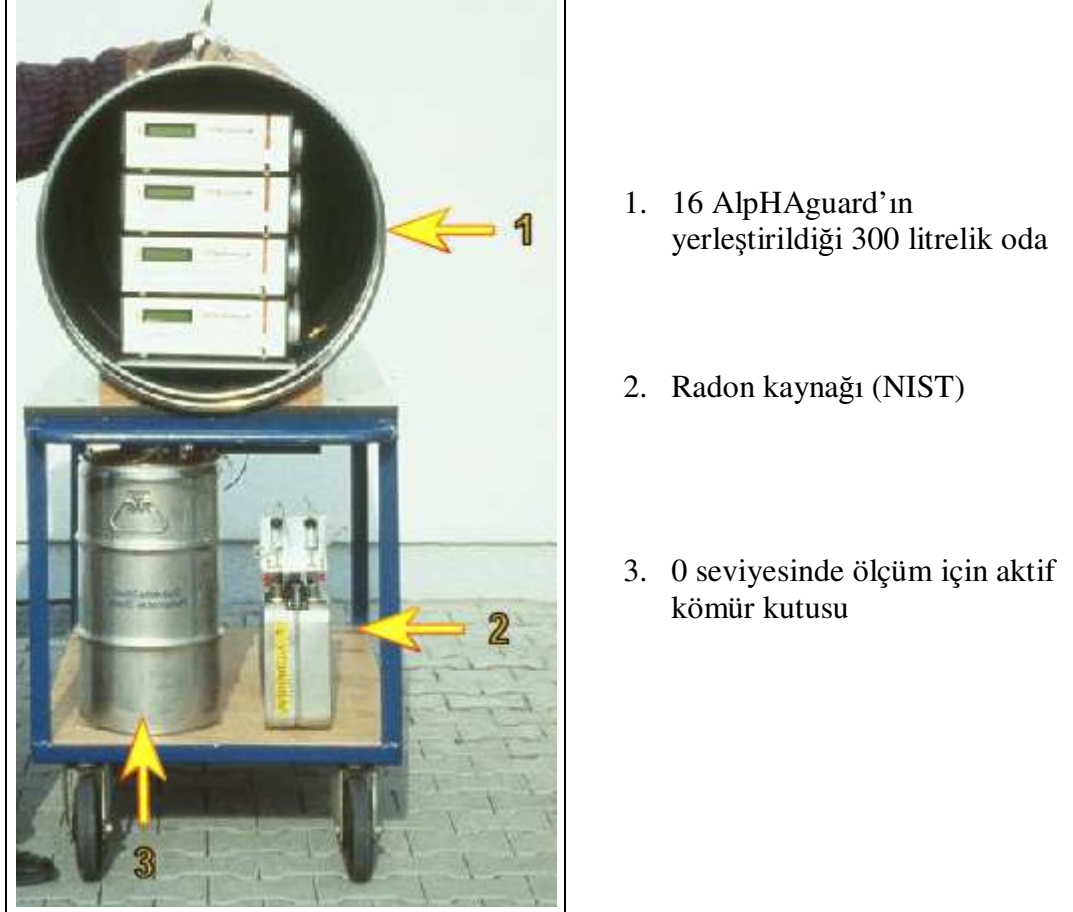
Dijital sinyal işleme için üç bağımsız sinyal işleme kanalı vardır. Her kanal kendine özgü bir analog-dijital dönüştürücüye sahiptir. Bu şebeke kavramı ön amplifikatöre gelen sinyallerin üç farklı kompleks özelliğe göre eşzamanlı analiz edilmesine imkan sağlar.

Bu üç sinyal karakteristiğinin temelinde altı değişik matematiksel algoritma yatmaktadır. Tüm işlemler sonucunda optimize edilmiş yoğunluk prosedürü vasıtasıyla gerçek Radon yoğunluğu belirlenmektedir. Her bir Radon değeri yaklaşık olarak 50 milyon matematiksel işlemin sonucunda elde edilir ve bu işlemler için AlphaGUARD PQ 2000PRO'nun ihtiyaç duyduğu akım ise sadece 3 mA'dir (P.R.M.A. Kullanım Kılavuzu).

3.2.2.2 AlphaGUARD Kalibrasyonu

Birçok elektronik cihazda olduğu gibi ölçülecek niteliğin doğru sonuç verebilmesi için öncelikle kalibrasyonun yapılması gerekir. Yapılan kalibrasyon sonucunda kalibrasyon faktörü veya standart sapma denilen bir değer elde edilir ve bu değer

verilerin ayarlanmasında kullanılır. Bütün ölçüm yapan cihazlar daha doğru ölçüm sonuçları elde etmeleri için değeri büyük bir doğrulukla bilinen bir referansa göre ayarlanmak veya kalibre edilmek zorundadır



Şekil 3.8. AlphaGUARD kalibrasyon araçları (Genitron)

NIST standart referans materyali yaklaşık 0,31 g ağırlığında, poli etilen bir kapsül içinde çözelti halde bulunan radyoaktif ^{226}Ra izotopu içeren bir numunedir. ^{226}Ra seçilmesinin temel sebepleri şunlardır:

- 1) ^{222}Rn 'nin ^{226}Ra 'dan sonraki ilk ürün olması,
- 2) ^{226}Ra izotopunun ^{222}Rn ile karşılaştırıldığında kararlı olmasıdır.

AlphaGuard'ın kalibrasyonu üretici firma tarafından gerçekleştirilmekte ve beş yıl süreyle geçerliliğini korumaktadır. Bu sebeple bu çalışmada kalibrasyona ihtiyaç

duyulmamıştır. İhtiyaç duyulması halinde kalibrasyon işlemi aşağıdaki şekilde gerçekleştirilir.

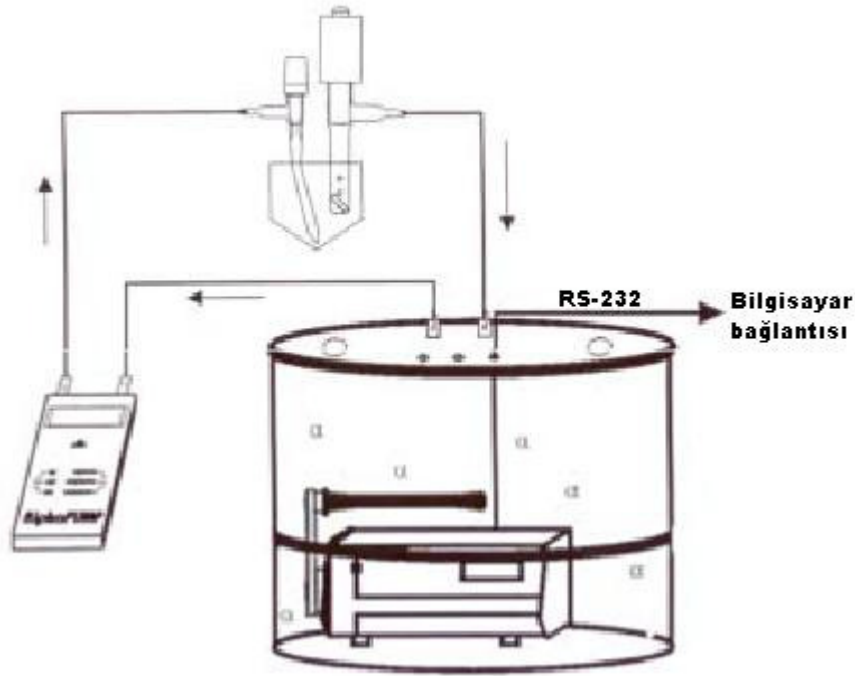
NIST standardı, yayılma tüpünün gözenekli kolu içerisinde bulunur. Konteynır üzerindeki hava giriş vanaları arasına AlphaPUMP bağlanarak konteynır içerisinde hava sirkülasyonu sağlanır. Sirküle eden hava NIST standardının içinde bulunduğu yayılma tüpünden geçerken damıtılmış suda çözünen Radon atomlarını da beraberinde sürükler. Böylece ortaya çıkan hesaplanabilir yoğunluktaki Radon gazı kalibrasyon konteynırı içinde birikmeye başlar ve bu gaz kalibrasyonun yapılması için kullanılır (Akyıldırım, 2005).



Şekil 3.9 Kalibrasyon işlemleri için kullanılan yayılma tüpü

Kalibrasyon konteynırı 50 Litre hacminde, paslanmaz çelikten yapılmış silindir şeklinde bir kaptır. Konteynır kapağı kapalı iken gaz sızdırmazdır ve çelikten yapıldığı için dış radyasyonun içeriye girmesini de engeller Kalibrasyon işlemleri yanı sıra Radon yayılma ölçümleri için de kullanılır. Bu durumda içeriye hava giriş ve çıkışı kapak üzerindeki vanalarla sağlanabilmektedir. Bağlantılar yapıldıktan

sonra konteynır vanaları açılır ve AlphaPUMP çalıştırılmak suretiyle konteynır iç havasının temizlenmesi sağlanır. Konteynır iç havasının temizlenmesinden sonra AlphaPUMP ve tüm vanalar kapatılarak AlphaGUARD takip eden 3 gün boyunca arka alan radyasyonu ölçmesi sağlanır. Arka alan radyasyonunun ölçülmesi süreci sonunda konteynır vanaları kapalı iken sisteme NIST SRM standardı içeren yayılma tüpü Şekil 3.10'daki gibi bağlanır. Konteynırın vanaları açılarak AlphaPUMP çalıştırılır ve Ra226 içeren hava sirkülasyonu sağlanır. Son olarak da AlphaPUMP durdurulur ve konteynır vanaları kapatılarak belli bir süre boyunca Rn222 yoğunluk ölçümü yapılır. Bu süre içerisinde Rn222'nin zaman içinde bozunumunun üstel değişimi gözlenir (Akyıldırım, 2005).



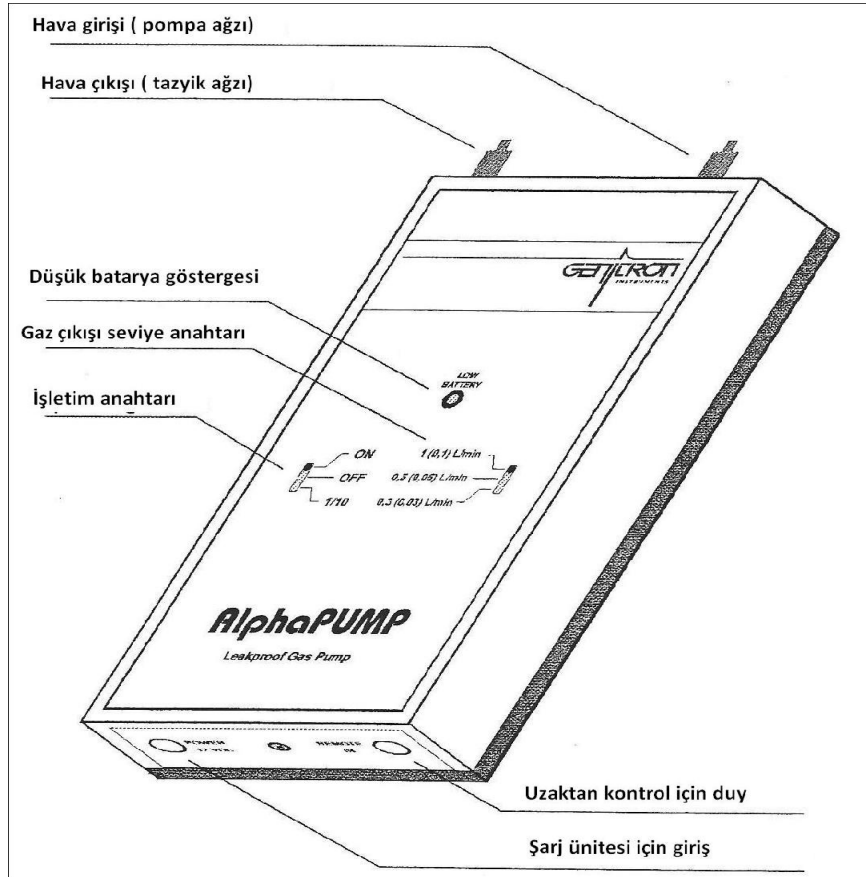
Şekil 3.10. AlphaGUARD kalibrasyon bağlantı şeması (Akyıldırım, 2005).

AlphaPUMP'ın temel işlevi ise sistem için gerekli hava sirkülasyonunu sağlamaktır. 12 V DC ile çalışan bu pompa 0,03 litre/dk ile 1 litre/dk arasında hava akışı sağlayabilmektedir.

Yüksek doğruluğuna bağlı olarak Alphaguard diğer aktif ve pasif radon ölçüm aletlerinin kalibrasyon çalışmaları ve kalite güvencesi için referans birimi olarak kullanılmaktadır.

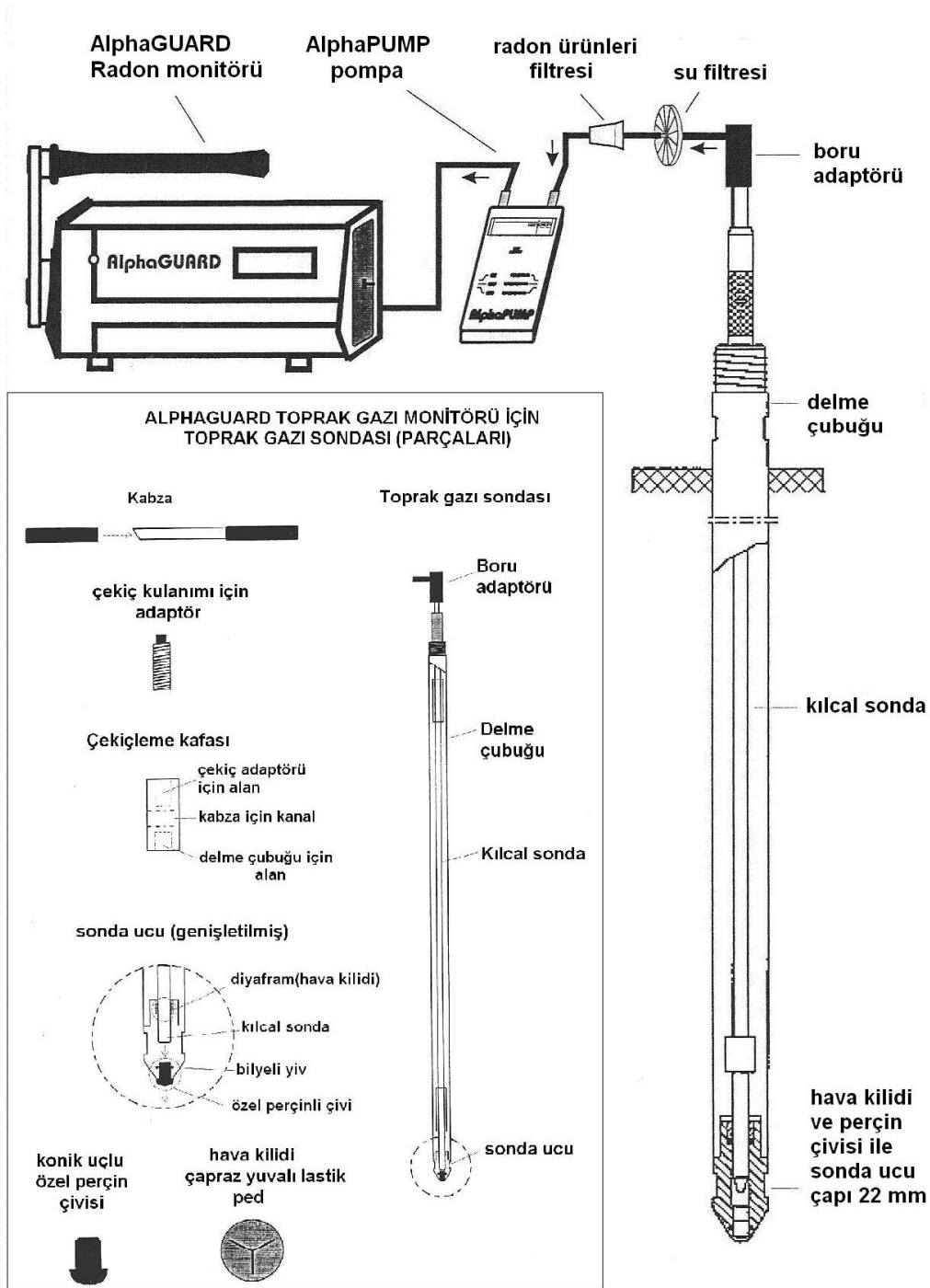
3.2.2.3 Genitron AlphaPUMP

Bu pompa AlphaGUARD'a göndermek istediğimiz gaz miktarını ayarlamaktadır. Açık, kapalı ve 1/10 modlarını içeren anahtar; 1/10 modunda ise onda bir performansla yani zaman biriminin onda birini açık, onda dokuzunu kapalı olarak kullanılmaktadır. İkinci anahtar pompalanacak gaz miktarını dakikada 1, 0.5 ve 0.3 litre olarak ayarlamaktadır.



Şekil 3.11. AlphaPUMP şematik gösterimi(P.R.M.A. Kullanım Kılavuzu)

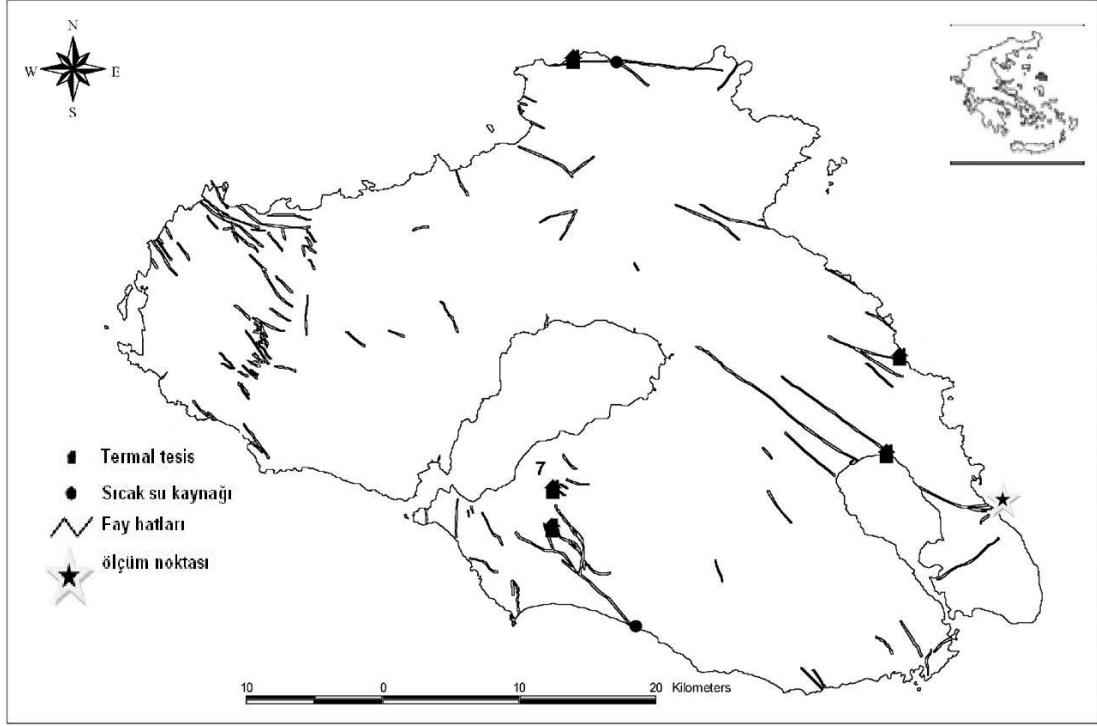
3.3. AlphaGUARD İle Toprak Gazındaki Radon Yoğunlunun Ölçümü



Şekil 3.12. Toprak gazı radon ölçümünde kullanılan ekipmanın tanıtımı (P.R.M.A. Kullanım Kılavuzu)

Bu çalışma Avrupa Birliği Erasmus Öğrenci Değişim Programı çerçevesinde Yunanistan'ın Aegean Üniversitesinin Midilli Adasındaki Çevrebilimleri Departmanında gerçekleştirilmiştir. Burada daha önce radon ölçümlerinde yaygın

olarak kullanılan AlphaGuard cihazı ile Adanın birçok yerinde termal tesislerde ve sıcak su kaynaklarında radon yoğunluğu tespit çalışmaları yapılmıştır (Vogiannis, 2005). Adanın termal tesisleri, sıcak su kaynakları ve fay haritası şekil 3.13'teki gibidir.



Şekil 3.13. Lesbos (Midilli) adasının termal tesisleri, sıcak su kaynakları ve fay haritası

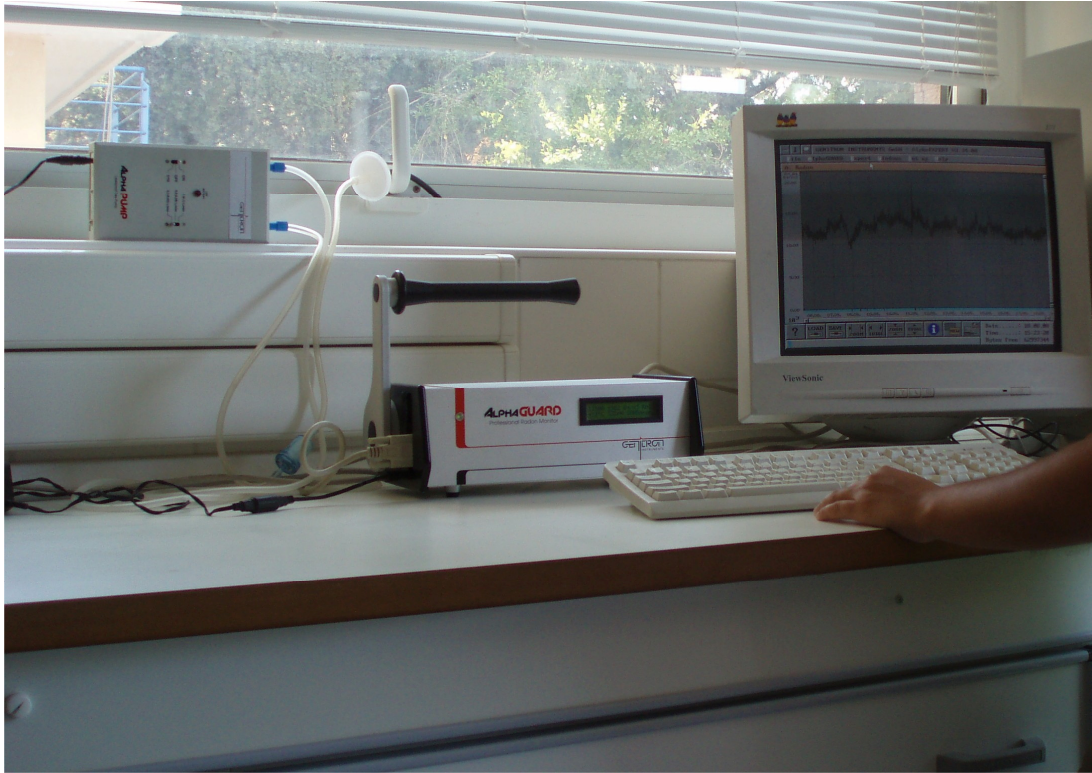
Ölçümlerin yapıldığı yer tam olarak $26^{\circ}57'$ doğu meridyeni ile $39^{\circ}05'$ kuzey paralelinin kesişme noktasındadır. Bu nokta deniz seviyesinden yüksekliği yaklaşık 20 m olan bir tepe üzerinde Aegean Üniversitesi Çevrebilimleri departmanının bahçesindedir. Toprak gazı sondasının yerleştirilmesi için uygun bir toprağa sahip bahçe laboratuvar ile sonda arasında iletişim kurulmasına ve ölçüm cihazlarının korunmasına olanak sağlamıştır.



Şekil 3.14. Toprak gazı sondasının ölçüm alanına yerleştirilmesi

Toprak gazı sondası ucu yüzeyden 1 m derinlikte olacak şekilde dik olarak yerleştirilen demir çubuk ve kılcal sondadan oluşmaktadır. Kılcal sonda çubuk içine yerleştirildikten sonra uçtaki perçin çivisinin ayrılması sağlanacak kadar aşağı itilip daha sonra aynı miktar geri çekilir. Böylece demir çubuğun ucu açılır ve toprak gazının girişine olanak sağlar. Çubuğun ucundaki conta kılcal sondayı sararak gelen tüm havanın kılcal sondaya girmesine yardımcı olur. Kılcal sondanın üstündeki parça gazın laboratuara aktarımı için kullanılan plastik boruyla birleştirilmesinde kolaylık sağlar. Bu plastik boru yaklaşık 10 m uzunluğunda ve 0,5 cm çapındadır. Laboratuara ulaşan plastik boruya ölçüm araçlarını korumak maksadıyla su filtresi monte edilir. Bunu radon ürünleri filtresi izler çünkü AlphaGuard tek başına sadece radon ölçümü yapmaktadır. Bir sonraki parça toprak gazını AlphaGuard'a pompalayan AlphaPump'tır. Sürekli pompalama işlemini sağlamak için

AlphaPump'ın üzerindeki birinci anahtar 'ON' konumuna getirilir. Diğer anahtar 0,3(0,03) L/min konumuna getirilerek dakikada 0,3 litre gaz pompalanması sağlanır. Bağlantı kurulduktan sonra AlphaGuard menüden 10 min FLOW seçilerek 10 dakikalık periyotta ölçülen radon konsantrasyonun kaydı sağlanır. AlphaGuard üzerindeki monitörden ölçülen radon konsantrasyonu, radon hata payı, sıcaklık, nem ve basınç değerleri okunabilir. AlphaGuard'ın 10 dakikalık periyot için veri depolayabileceği süre 21 gündür. Bu yüzden veriler bu süreden önce bilgisayara aktarılarak saklanmalıdır. Bu süreden sonra yenileri eskileri silinerek kaydedilmektedir.



Şekil 3.15. Deney düzeneğinin laboratuvar içindeki bölümü

Ölçümler 28.2.2008 tarihinde başlayıp 17.09.2008 tarihine dek sürmüştür. Bu zaman içerisinde 28924 radon konsantrasyon değeri kaydedilmiştir. Bu radon verilerinden bir kısmı meteorolojik etkilerden dolayı ölçümün sağlıklı yapılamamasından kullanım dışı kalmıştır. Ölçüm yapılan arazi eğimli olduğundan sondanın yerleştirildiği toprak yeraltı su akışına maruz kalmış ve uzun süre yüksek nem barındırmıştır. Bu da toprağın çamur haline gelmesini ve içindeki gözeneklerin kapanmasını sağlamış, gaz akışını engellemiştir.

Ölçümlerin yapıldığı süre boyunca 23°-29°30' doğu meridyenleri ile 36°-42° kuzey paralelleri arasındaki bölgede meydana gelen depremler üç ayrı internet sitesinden takip edilip karşılaştırılarak kaydedilmiştir (BOUN, EMSC, GI-NOA, 2008).



Şekil 3.16. Ölçüm noktası (Mytilene) ve deprem verilerinin toplandığı alan

Depremin ölçüm yapılan yere uzaklığı, radon anomalilerinin oluşmasında, depremin şiddeti kadar etkili olmaktadır. Bu nedenle hesaplamalarımızda kullanılan kriterlerden biri bu mesafedir. Depremlerin meydana geldiği nokta ile ölçüm noktası arasındaki mesafe (D), R dünyanın yarıçapı, d deprem merkezinin derinliği olmak üzere;

$$x = R \sin \varphi \cos \theta$$

$$y = R \sin \varphi \sin \theta$$

$$z = R \cos \varphi$$

(θ : boylam açısı, φ : enlem açısı)

$$R' = R - d$$

$$x' = R' \sin \varphi \cos \theta$$

$$y' = R' \sin \varphi \sin \theta$$

$$z' = R' \cos \varphi$$

$$D = \sqrt{(x - x')^2 (y - y')^2 (z - z')^2} \quad (4.1)$$

Şeklinde hesaplanır.

E. Hauksson ve J. Goddard İzlanda'da yaptığı çalışmalarda değerlendirmeye alınacak depremin büyüklüğü (M) için aşağıdaki kriterleri kullanmışlardır.

$$M \geq 2,4 \log D - 0,43 \quad \text{ve} \quad M \geq 2 \quad (\text{Hauksson ve Goddard, 1981}) \quad (4.2)$$

Bu çalışmada kriterlerden birincisi kullanılarak depremin merkez üssü ile radon ölçüm noktası arasındaki mesafeye bağlı bir ideal deprem büyüklüğü (M_i) hesaplanmıştır. Depremin ölçüm noktasına olan etkisini (M_e) değerlendirebilmek için gerçek büyüklüğün (M) bu değere yakınlığı göz önüne alınarak;

$$M_e = 10 - (M_i - M) \quad (4.3)$$

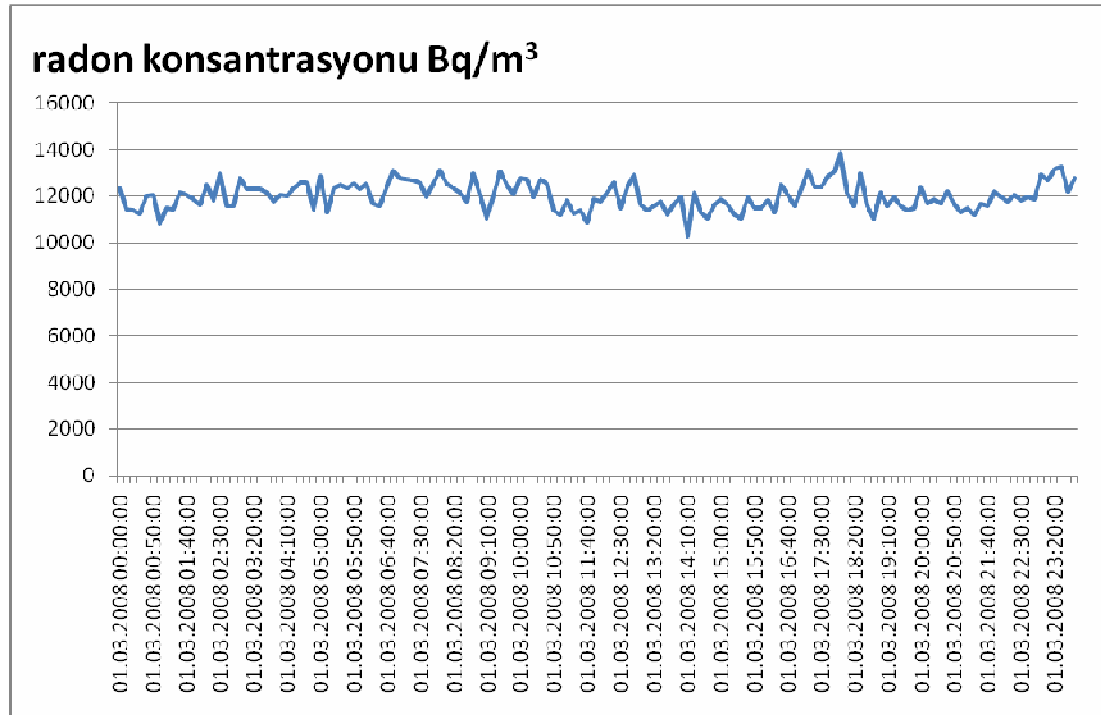
şeklinde hesaplanmıştır. Burada sabitin 10 alınması hesaplamada negatifliğe düşülmemesi için yeterli bir sayı olmasından kaynaklanmaktadır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde 28/02/2008-17/09/2008 arasında ölçülen radon değerleri günlük, aylık olarak değerlendirilmiş, deprem verileri ile karşılaştırılmış ve meteorolojik etkilerin radon yoğunluğu üzerine etkisi incelenmiştir.

4.1 Günlük Radon Sonuçları

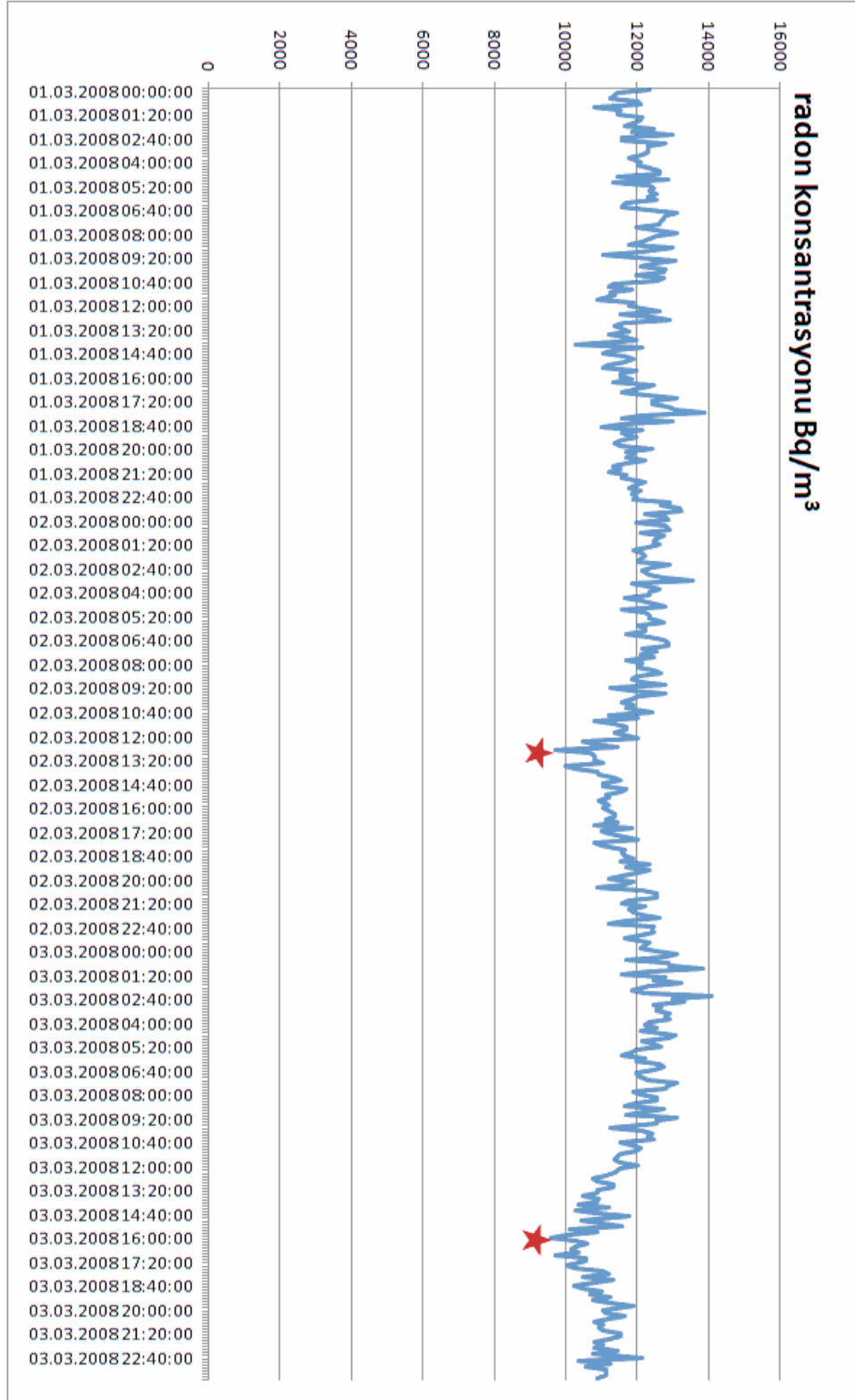
Ölçülen radon konsantrasyonunun ideal ölçümlerde $8.000\text{--}20.000\text{ Bq/m}^3$ arasında değiştiği gözlenmiştir. Ölçüm yapılan gaz toprağın bir metre altından direk ölçüm cihazına aktarıldığı için toprağın filtreleme etkisinden kısmen kurtulmakta ve toprak gazının açık havada dağılmasına fırsat kalmaksızın radon yoğunluğu saptanmaktadır.



Şekil 4.1. Günlük radon konsantrasyonu değişim grafiği

01/03/2008 tarihinde ölçülen radon konsantrasyonları 24 saatlik grafik olarak şekil 4.1’de verilmiştir. Bu şekilden görüldüğü gibi bu tarihte radon konsantrasyonu 10.10^3 Bq/m^3 ile 14.10^3 Bq/m^3 arasında değişmektedir. Burada günlük olarak anlamlı

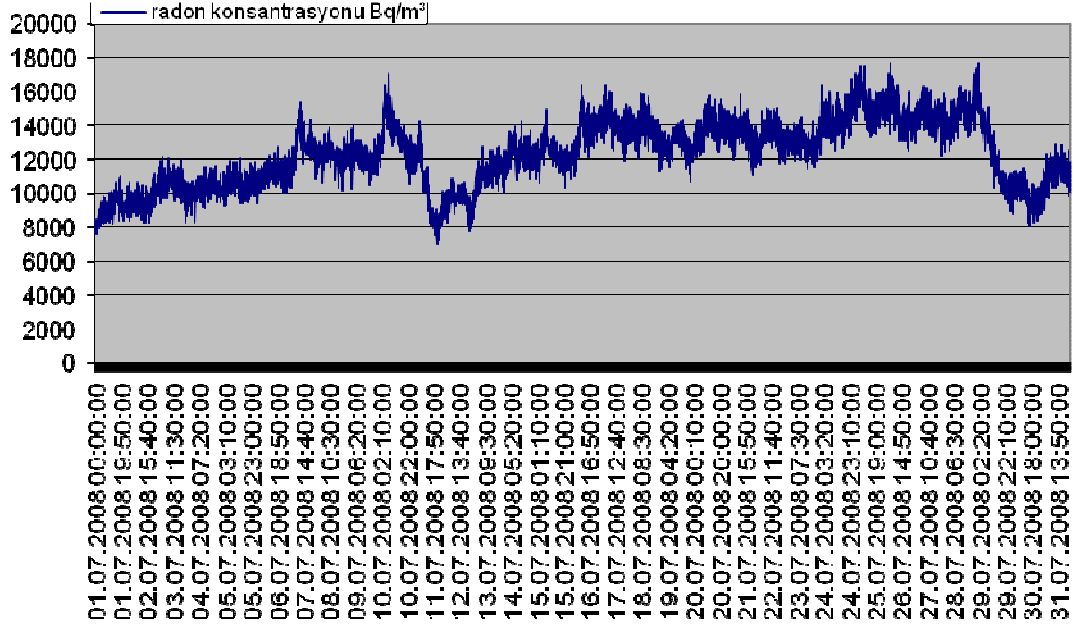
bir değişim gözlenmemektedir. Ancak birbirini izleyen birkaç günlük radon değerleri incelendiğinde periyodik bir değişim gösterdiği anlaşılmaktadır (Şekil 4.2).



Şekil 4.2. 01/03/2008–03/03/2008 Arasında radon konsantrasyonunun periyodik değişimi

4.2. Aylık Radon Sonuçları

Radon konsantrasyonlarının aylık değişiminin incelenmesi Temmuz-2008 ayı içerisinde ölçülen değerler kullanılarak yapılmıştır. Çünkü bu ayda yağış gibi doğal etkilerin az olması yapılan ölçümü daha geçerli kılmaktadır.



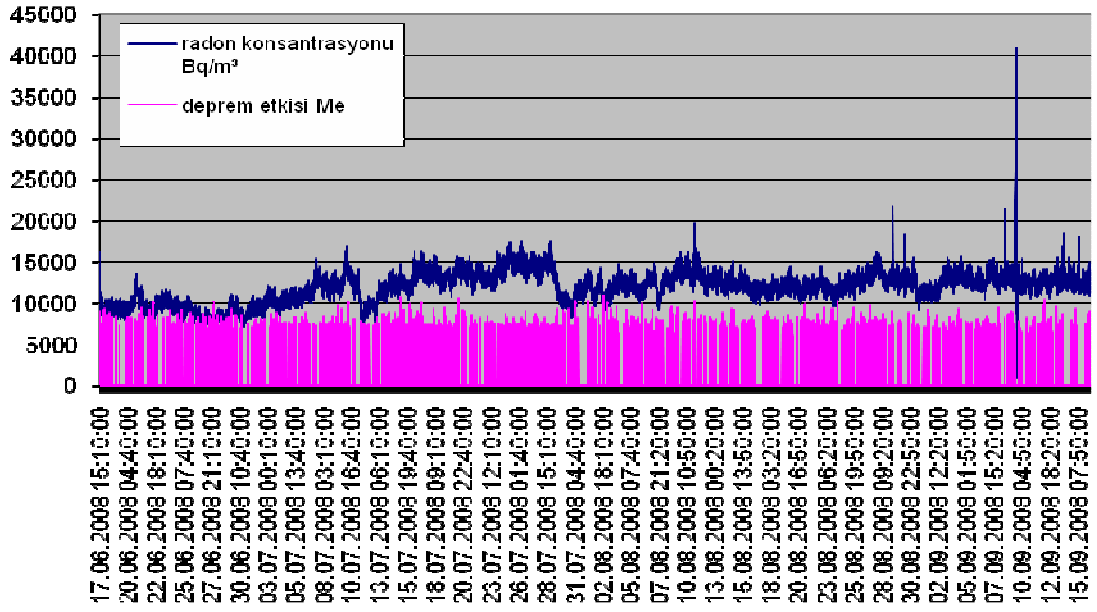
Şekil 4.3. Aylık radon konsantrasyonu değişim grafiği

Aylık radon değerlerindeki değişim (Şekil 4.3) incelendiğinde doğal periyodunun dışında oldukça önemli miktarda anomalilere sebep olan bir faktör olduğu gözlenebilmektedir. Bu faktörün ölçüm yapılan bölgedeki sismik hareketlilik olma olasılığı üzerinde inceleme yapmak için aynı dönemdeki deprem verileri ile karşılaştırılmakta fayda görülmektedir.

4.3. Ölçülen Radonun Deprem Verileri İle Karşılaştırılması

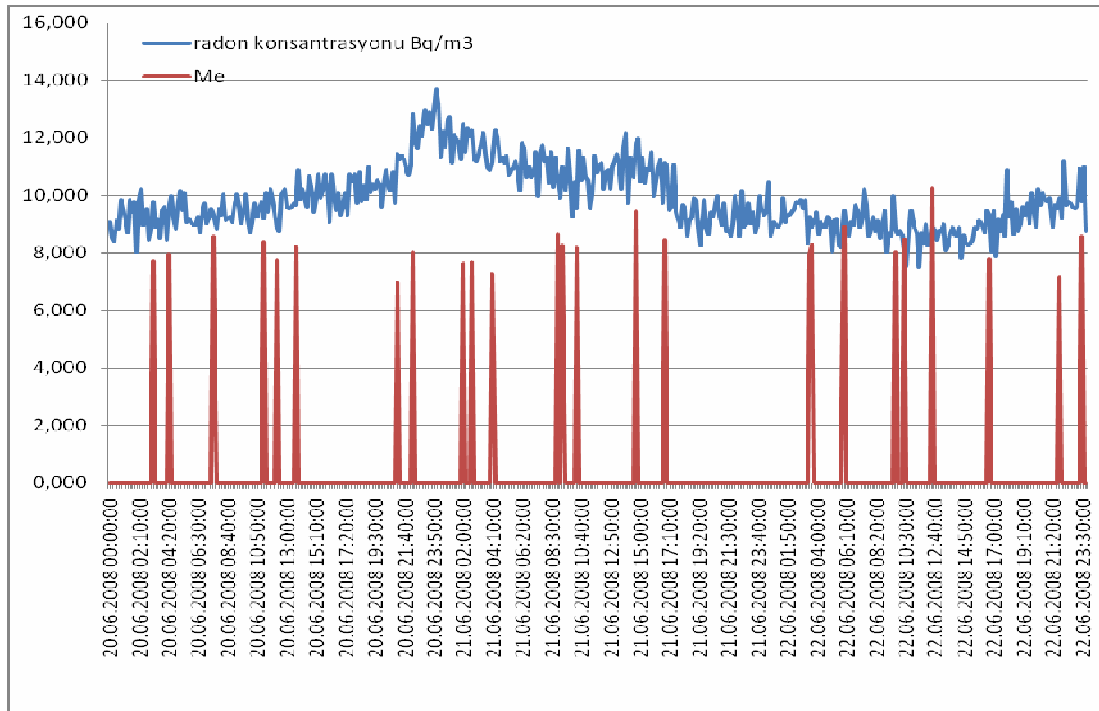
Radon konsantrasyonundaki değişimler ile deprem verilerinin karşılaştırılması radon takibinin deprem tahminindeki yerinin anlaşılması bakımından önemlidir.

Şekil 4.4’de, 17/06/2008 ile 17/09/2008 tarihleri arasındaki üç aylık periyotta, radon konsantrasyonundaki değişimler ve ele alınan bölgedeki depremlerin ölçüm yapılan noktaya etkisi gösterilmektedir. Bu şekil daha ayrıntılı olarak Ek-1’de verilmiştir.



Şekil 4.4. Radon konsantrasyonu ve deprem etki grafiği

Radon yoğunluğu ve deprem etki grafiği, depremin gözlemlenen radon anomalilerinden ne kadar süre sonra meydana geldiğini, uzaklığın ve büyüklüğün bu süreyi etkileyip etkilemediğini anlayabilmek üzere kısım kısım incelenmiştir.



Şekil 4.5. 20/06/08-22/06/08 Arasındaki radon/deprem ilişkisi

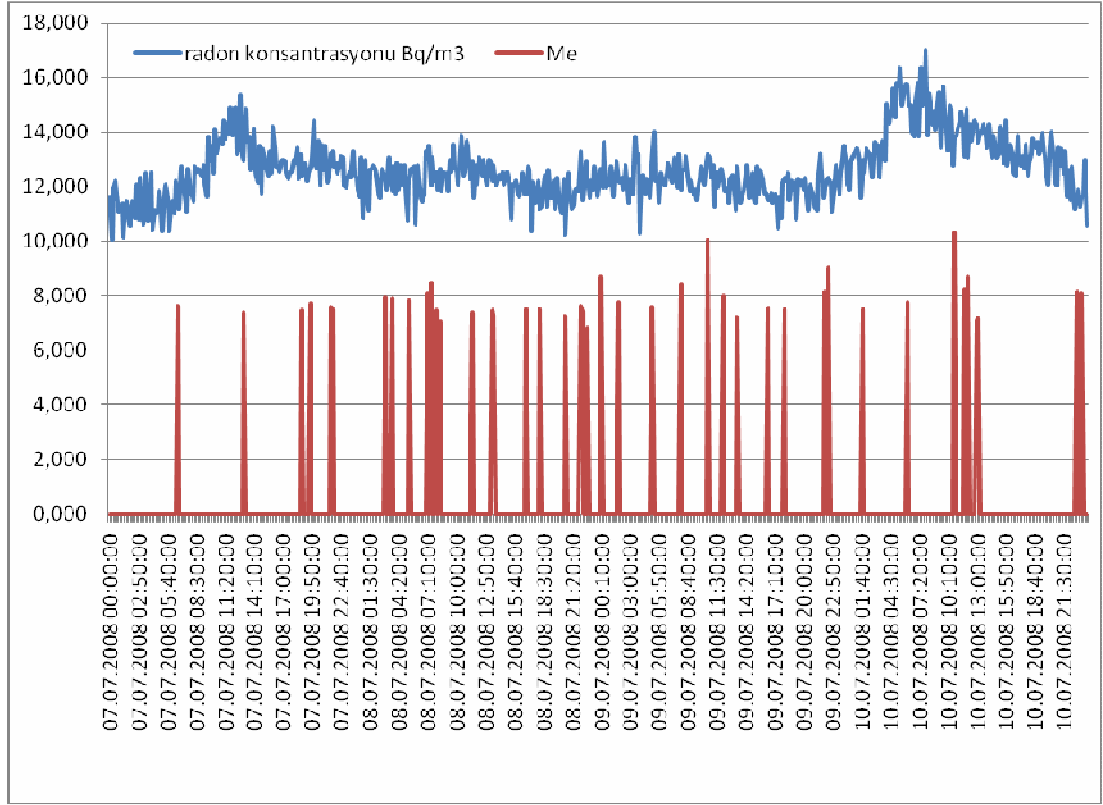
Şekil 4.5' ten görüldüğü gibi radon yoğunluğu 20/06/08 saat 21:30 civarında artış göstermeye başlamış, 21/06/08 saat 00:00'da pik yapmış ve bunu izleyen yüksek değerler okunmuştur. Bundan yaklaşık 12 saat sonra Çizelge 4.1'de de gösterilen büyüklüğü $M > 4$ olan depremler meydana gelmiştir. Bunlar şiddeti büyük fakat merkezi uzak depremlerdir.

Düşüş gözlenen radon yoğunluğunu takiben incelenen bölgede deprem gerçekleşmediğini görülmektedir.

Bir diğer radon yoğunluğu artışı 21/06/08 saat 15:00 civarında gözlenmektedir ve 22/06/08 12:30 da ölçüm noktasına yakın bir mesafede gerçekleşen depremden dolayı hesaplanan M_e değeri pik yapmıştır. Bu kez aradaki zaman yaklaşık 22 saattir.

Çizelge 4.1. 20/06/08-22/06/08 Arasındaki deprem büyüklük, uzaklık ve etki tablosu

Tarih	Uzaklık(km)	M	M_i	M_e
20.06.2008 03:07:04	291,24	3,2	5,484200182	7,715799818
20.06.2008 04:16:13	287,67	3,4	5,471349044	7,928650956
20.06.2008 07:33:16	143,12	3,3	4,743679748	8,556320252
20.06.2008 11:20:20	139,90	3,1	4,719952005	8,380047995
20.06.2008 12:18:52	230,97	3	5,242529799	7,757470201
20.06.2008 13:37:40	122,79	2,8	4,583955328	8,216044672
20.06.2008 21:10:34	274,04	2,4	5,420764582	6,979235418
20.06.2008 22:19:00	312,23	3,6	5,556724931	8,043275069
21.06.2008 01:54:20	289,43	3,1	5,477689803	7,622310197
21.06.2008 02:35:02	300,72	3,2	5,517574721	7,682425279
21.06.2008 04:09:49	409,45	3,1	5,83927956	7,26072044
21.06.2008 08:57:16	552,19	4,8	6,151006617	8,648993383
21.06.2008 09:15:12	551,33	4,4	6,149384541	8,250615459
21.06.2008 10:20:13	587,65	4,4	6,215881928	8,184118072
21.06.2008 14:36:25	551,58	5,6	6,149855019	9,450144981
21.06.2008 16:43:35	554,14	4,6	6,154684043	8,445315957
22.06.2008 03:27:37	561,31	4,1	6,168084683	7,931915317
22.06.2008 03:40:13	539,29	4,4	6,126380423	8,273619577
22.06.2008 05:54:08	124,45	3,5	4,597981757	8,902018243
22.06.2008 09:46:25	258,02	3,4	5,357985095	8,042014905
22.06.2008 10:22:47	540,35	4,6	6,128427737	8,471572263
22.06.2008 12:23:47	97,91	4,6	4,347938436	10,25206156
22.06.2008 16:33:49	251,86	3,1	5,332774362	7,767225638
22.06.2008 21:48:28	451,94	3,1	5,942184103	7,157815897
22.06.2008 23:28:00	170,48	3,5	4,926001245	8,573998755



Şekil 4.6. 07/07/08-10/07/08 Arasındaki radon/deprem ilişkisi

Şekil 4.6 incelendiğinde 07/07/08 saat 13:00 civarında radon yoğunluğunda kayda değer bir artış olduğu görülüyor. Fakat bunu izleyen yakın mesafede gerçekleşen önemli büyüklükte deprem olmadığı da yine şekilden görülmektedir. Bu durum “radon yoğunluğunu etkileyen üçüncü bir faktör olabilir mi?” sorusunu gündeme getirmektedir. Şekil üzerinde rahatça fark edilen üçüncü bir faktör depremlerin oluş sıklığıdır. Özellikle birbirine çok yakın veya aynı merkezli depremler ardı ardına gerçekleştiğinde böyle bir anomaliye sebep olabilir. Nitekim bu gözlenen artışın yaklaşık 13 saat sonrasında hemen hemen aynı merkeze sahip birbirini izleyen dört deprem meydana gelmiştir (Çizelge 4.2).

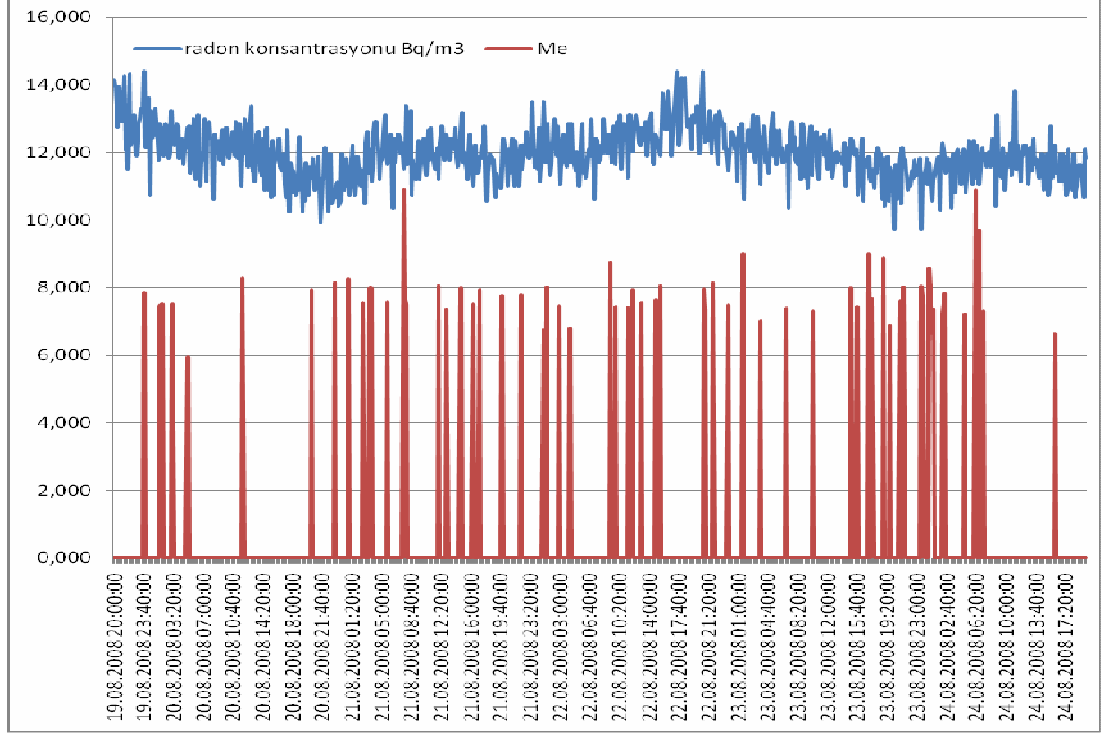
Çizelge 4.2. Aynı merkeze sahip depremler

Tarih	M	Boylam	Enlem
08.07.2008 02:58:59	2,9	25,75	40,36
08.07.2008 03:32:57	2,8	25,84	40,26
08.07.2008 05:16:11	2,8	25,76	40,35
08.07.2008 07:07:51	3	25,85	40,33

Çizelge 4.3. 07/07/08-10/07/08 Arasındaki deprem büyüklük, uzaklık ve etki tablosu

Tarih	Uzaklık(km)	M	M _i	M _e
07.07.2008 06:37:32	232,31	2,9	5,248562123	7,651437877
07.07.2008 13:08:25	360,32	3,1	5,706064695	7,393935305
07.07.2008 18:43:21	252,87	2,8	5,33695519	7,46304481
07.07.2008 19:31:38	221,47	2,9	5,198736844	7,701263156
07.07.2008 21:37:18	321,98	3,2	5,588800945	7,611199055
07.07.2008 21:40:33	357,18	3,2	5,696915679	7,503084321
08.07.2008 02:58:59	175,31	2,9	4,955154852	7,944845148
08.07.2008 03:32:57	164,12	2,8	7,85853592	7,913634168
08.07.2008 05:16:11	173,11	2,8	4,94196854	7,85803146
08.07.2008 07:07:51	167,44	3	4,907239417	8,092760583
08.07.2008 07:22:00	152,21	3,3	4,807895799	8,492104201
08.07.2008 07:53:40	303,56	3	5,5273719	7,4726281
08.07.2008 08:17:02	308,05	2,6	5,542688184	7,057311816
08.07.2008 11:25:24	353,75	3,1	5,686879727	7,413120273
08.07.2008 13:33:40	302,43	3	5,52349594	7,47650406
08.07.2008 13:38:02	297,78	2,8	5,507357557	7,292642443
08.07.2008 16:50:55	296,86	3	5,504114269	7,495885731
08.07.2008 18:02:47	195,11	2,6	5,066690928	7,533309072
08.07.2008 20:40:52	328,39	2,9	5,609331296	7,290668704
08.07.2008 22:06:21	313,92	3,2	5,562370538	7,637629462
08.07.2008 22:10:54	316,15	3	5,569746704	7,430253296
08.07.2008 22:41:29	313,98	2,4	5,562569212	6,837430788
09.07.2008 00:10:15	104,30	3,1	4,413922319	8,686077681
09.07.2008 01:46:14	229,82	3	5,237334643	7,762665357
09.07.2008 05:07:07	297,44	3,1	5,506157005	7,593842995
09.07.2008 07:54:48	215,55	3,6	5,170532089	8,429467911
09.07.2008 10:38:52	25,35	3	2,939584135	10,06041586
09.07.2008 12:02:53	579,90	4,2	6,202048158	7,997951842
09.07.2008 13:24:50	427,96	3,1	5,885370026	7,214629974
09.07.2008 16:25:44	303,29	3,1	5,526456759	7,573543241
09.07.2008 18:10:57	219,98	2,7	5,19170612	7,50829388
09.07.2008 22:02:36	404,77	4	5,827308711	8,172691289
09.07.2008 22:30:39	92,20	3,3	4,285352817	9,014647183
10.07.2008 01:46:44	237,84	2,8	5,273066911	7,526933089
10.07.2008 06:01:50	232,23	3	5,248206885	7,751793115
10.07.2008 10:49:53	120,66	4,9	4,565782182	10,33421782
10.07.2008 11:42:44	118,79	2,8	4,549493656	8,250506344
10.07.2008 12:02:36	123,41	3,3	4,589209529	8,710790471
10.07.2008 12:54:28	297,09	2,6	5,504919019	7,095080981
10.07.2008 13:05:30	302,28	2,7	5,522998394	7,177001606
10.07.2008 22:46:40	307,18	3,7	5,539747929	8,160252071
10.07.2008 23:17:16	140,14	2,8	4,721768872	8,078231128

Şekil 4.6’da dikkat çeken bir diğer nokta 17.10^3 Bq/m^3 seviyesine ulaşan 10/07/08 saat 08:00 sularındaki piktir. Bu pikin ardından yaklaşık 2,5 saat sonra ölçüm noktasına 25 km uzaklıkta bir deprem meydana gelmiştir. Diğerleriyle karşılaştırıldığında deprem üssünün çok yakın olduğu görülmektedir (Çizelge 4.3).

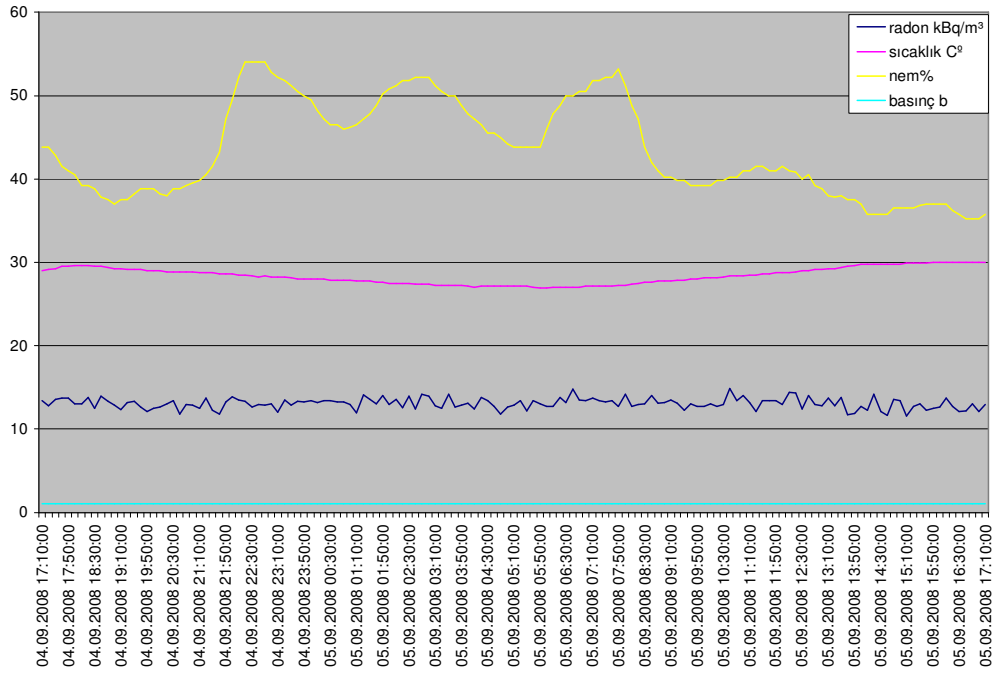


Şekil 4.7. 19/08/08-24/08/08 Arasındaki radon/deprem ilişkisi

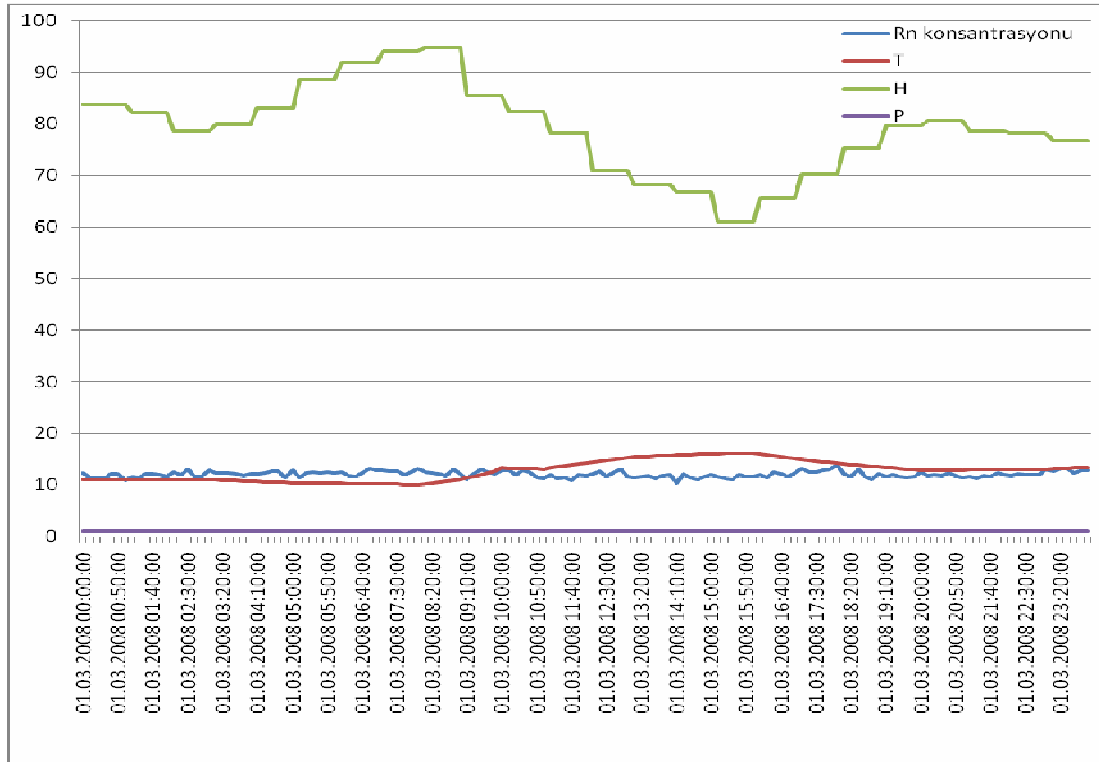
Şekil 4.7 iki bölgede 14.10^3 Bq/m^3 ün üzerine çıkan radon yoğunluk değerleri içermektedir. Birinci 19/08/08 saat 20:00 ikincisi de 22/08/08 18:00 civarındadır. Her iki anomaliden yaklaşık 12 saat sonra $M_e > 10$ olan pikler görülmüştür. Bu her iki depremin özelliği merkez üssünün (13-15 km) çok yakın olmasıdır. Ve benzer özellik göstererek tekrarlanması değerlendirme açısından önemli bir sonuçtur.

4.3. Ölçülen Radonun Meteorolojik Veriler İle Karşılaştırılması

Şekil 4.8.a’da görüldüğü gibi basınç hemen hemen sabit kabul edilebilecek kadar önemsiz değişimler göstermektedir. Sıcaklık ve nem ise birbiriyle ters orantılı değişimler göstermektedirler. Radon konsantrasyonu ile ilişkilendirilmek üzere şekil 4.8.a,b,c incelendiğinde sıcaklığın en yüksek olduğu saatlerde radon değerlerinin düşük olduğu söylenebilir.

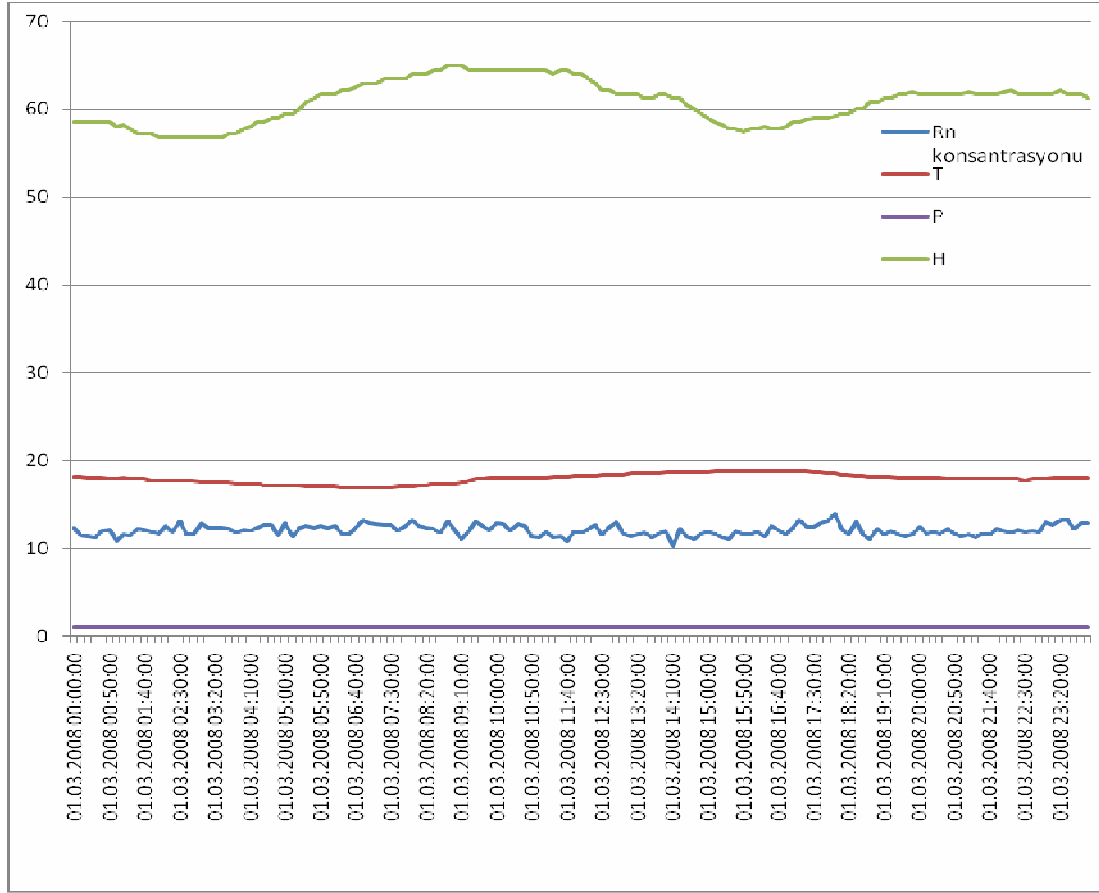


Şekil 4.8.a. 24 saatlik radon konsantrasyon, sıcaklık, basınç ve nem değişimi grafiği



Şekil 4.8.b. Aegean Üniversitesi Coğrafya Bölümü tarafından ölçülen değerler ile hazırlanan bir günlük radon konsantrasyon, sıcaklık, basınç ve nem değişimi grafiği

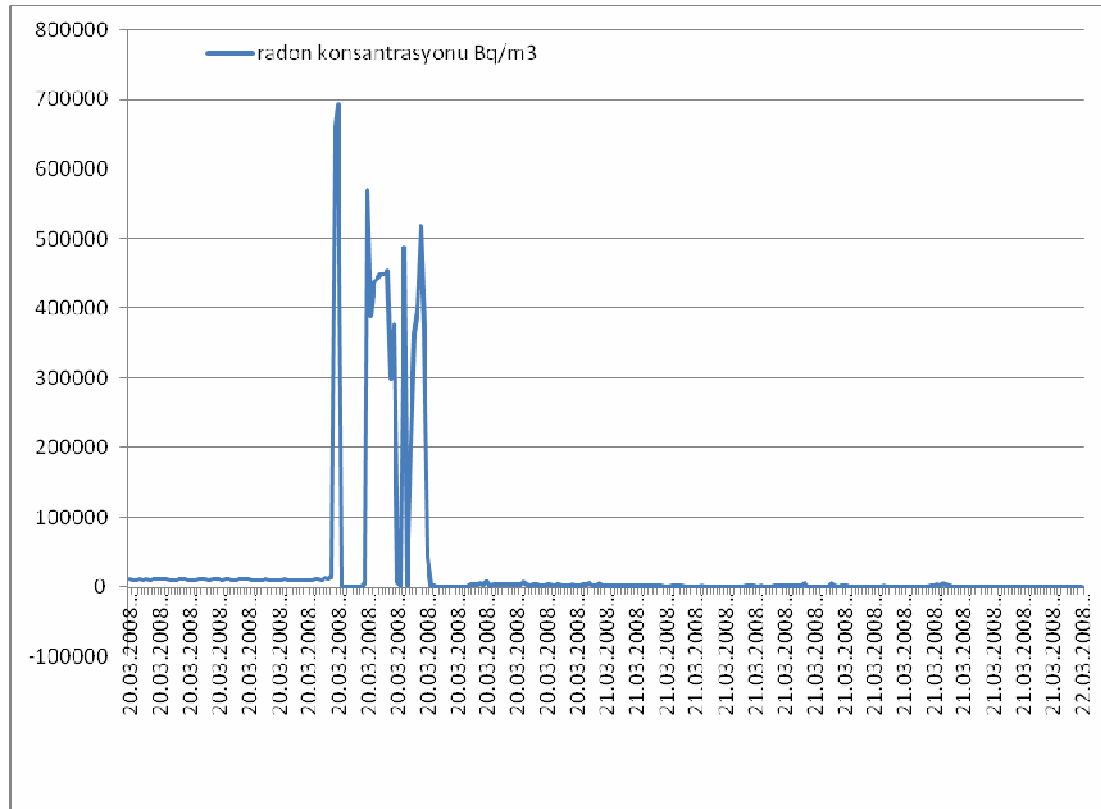
Şekil 4.8.b ve 4.8.c’de mavi çizgi ile gösterilen radon konsantrasyonu kBq/m^3 , kırmızı ile gösterilen sıcaklık $^{\circ}\text{C}$, mor çizgi ile gösterilen basınç ise bar cinsindendir. Yeşil renk ile gösterilen çizgi nem yüzdesini ifade etmektedir.



Şekil 4.8.c. AlphaGUARD tarafından ölçülen parametrelerle hazırlanan bir günlük radon konsantrasyon, sıcaklık, basınç ve nem değişimi grafiği

Günlük periyotların günlük ısı ve nem değişimine bağlı olarak gerçekleşebileceği varsayımında bulunulabilir. Fakat kesin etkisi gözlemlenen en önemli faktör yağıştır. Yağış yağmur şeklinde ise birkaç saat içinde, su topraktaki gözeneklere inerek buradaki gazın ani çıkışını sağladığı için, yüksek miktarda radon çıkışı gerçekleşmektedir. Bu olayı izleyen günlerde ise toprağın barındırdığı aşırı nem gaz çıkışını tamamen engellemektedir (Şekil 4.9). Özellikle eğimli arazilerde toprağın nemini kaybetmesi oldukça uzun bir süreçte gerçekleşmektedir. Bu sebeple

kurulacak radon ölçüm merkezinde alınabilecek en önemli tedbir ölçüm alanının yağıştan korunmasıdır.



Şekil 4.9. Yağmurun radon konsantrasyonuna ve ölçümlerine etkisi

5. SONUÇ

Elde edilen deneysel bulgular ışığında radon konsantrasyonundaki anomalilerin meydana gelecek olan depremin uzaklığına, büyüklüğüne ve sıklığına bağlı değişimler göstererek ortaya çıktığı ve göz ardı edilemeyecek bir deprem habercisi olduğu görülmektedir.

Radon konsantrasyonu ile deprem etkisi (Me) ilişkisinin Ek-1’de verilen üç aylık grafiğinin özelliği sürekli radon konsantrasyon ölçümüne eşlik eden bölgesel deprem takibidir. Grafiğin tamamında dördüncü bölümde verilen örneklerdekine benzer bulgulara rastlanmaktadır. Bu bulgular radon konsantrasyonunda tespit edilen anomaliler ile gerçekleşen depremler arasında bir korelasyon olabileceğini işaret etmektedir. Bu korelasyon anomaliyi takiben birkaç saat ile birkaç gün içinde depremin meydana gelmesi şeklindedir.

Radon takibi gerçekleşecek depremin yeri ve zamanının öngörülmesinde tek başına yeterli olmasa da deprem tahmini ile ilgili yürütülen jeolojik çalışmalara eşlik edebilecek önemli bir yardımcı olacaktır. Deprem üssünün ölçüm noktasına olan yakınlığının radon yoğunluğuna etkisi göz önüne alındığında, belirli aralıklarla kurulacak radon ölçüm istasyonlarının deprem yerinin tespitinde etkili olacaktır.

6. KAYNAKLAR

- Akyıldırım, H., 2005, Isparta İlinde Radon Yoğunluğunun Ölçülmesi ve Haritalandırılması, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, 74-75.
- ANADOLU, Anadolu Üniversitesi Açık Öğretim Fakültesi Yayınları, e-kitap www.aof.anadolu.edu.tr/kitap/IOLTP/2280/unite19.pdf, Yrd. Doç. Dr. H. BERBER, ünite 19 Radyoaktivite, 456, Erişim Tarihi: 21/01/2009.
- Bichard, G. F. ve Libby, W. F., 1980, Soil Radon Concentration Changes Preceding and Following Four Magnitude 4.2-4.7 Earthquakes on the San Jacinto Fault in Southern California, Journal of Geophysical Research, Vol. 85, NO. B6, 3100-3106.
- BOUN, Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü İnternet Sitesi, www.koeri.boun.edu.tr, Erişim Tarihi: 28/02/2008–17/09/2008.
- Cothern C. R., Smith, J. E., 1987, “Environmental Radon” Plenum Press, New York.
- Durrani, S. A. ve Iliç, R., 1997, Radon Measurements by Etched Track Detectors: Applications in Radiation Protection, Earth Sciences and the Environment, World Scientific, New Jersey, U.S.A., 387.
- EMSC, European-Mediterranean Seismological Centre, İnternet Sitesi, www.emsc-csem.org, Erişim Tarihi: 28/02/2008–17/09/2008.
- Erkmen, C., Kuterdem, N. K., Özseraç, V., Tekin, B. M., Eravcı, B., Yaman, M., Aktan, T., Albayrak, H., Tepeuğur, E., Doğu Anadolu Fayı’nın Gölbası - Türkoglu Arasında Kalan Kesiminin Tektonik Özellikleri Ve Paleosismolojisi, Esen ARPAT Doğu Anadolu Fay Zonu Sempozyumu 24-27 Mayıs 2007 Diyarbakır.
- Genitron Instruments (Saphymo GmbH) İnternet Sitesi, www.genitron.de, Erişim Tarihi: Eylül 2008-Mayıs 2009.
- GI-NOA, Institute Of Geodynamics National Observatory Of Athens. İnternet Sitesi, www.gein.noa.gr, Erişim Tarihi: 28/02/2008–17/09/2008.
- Güler, Ç. ve Çobanoğlu, Z., 1997. Radon Kirliliği. Çevre Sağlığı Temel Kaynak Dizisi No:44, 9-11.
- Hauksson, E., Goddard, J., 1981, Radon Earthquake Precursor Studies in Iceland, Journal of Geophysical Research 86,7037–7054.
- İnternet sitesi www.nuclearnewcomer.com, Erişim Tarihi: 28/12/2008.

İnternet sitesi www.kimyaevi.org, Erişim Tarihi: 03/03/2009.

İnternet sitesi www.wikipedia.org, Erişim Tarihi: 14/02/2009.

King, C. Y., 1978, Radon Emanation on San Andreas Fault, Nature Volume 271, 516-519.

Khan, H. A. ve Qureshi, A. A., 1994, Solid State Nuclear Track Detection: A Useful Geological / Geophysical Tool, Nucl. Geophys. Vol.8, No.1, 1-37.

Kuşçu, İ., Barka, A. A., Kato, H., Katoh, K., 1992, Kuzey Anadolu Fayı Zonundaki Bazı Faylarda Radon Gazı (Alpha İzi) Ölçümleri Jeoloji Mühendisliği, 33-40.

Özmen, B., 1995, Depremlerin Önceden Bilinmesinde Kullanılan Yöntemler, Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü.

Papastefanou, C., 2007, Measuring radon in soil gas and groundwaters: a review, Annals Of Geophysics, Volume 50, N. 4, 569-570.

P.R.M.A (Portatif Radon Monitörü “AlphaGUARD”) Kullanım Kılavuzu.

Reimer, G.M., 1980, Use of Soil-Gas Helium Concentrations for Earthquake Prediction: Limitations Imposed by Diurnal Variation, J. Geophys. Res., Vol. 85, No. B6, 3107-3114.

Saç, M. M., Camgöz, B., Ekim 2005, İzmir’de Sismik Aktiviteler ile Radon Konsantrasyonları Arasındaki Korelasyonun İncelenmesi, DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi cilt:7 sayı:3, 49-51.

Segovia, N., Mena, M., Pena, P., Tamez, E., Seidel, J. L., Monnin, M., Valdes, C., 1999, Soil Radon Time Series: Surveys In Seismic and Volcanic Areas, Radiation Measurements 31, 307-312.

TAEK, Türkiye Atom Enerjisi Kurumu İnternet sitesi, www.taek.gov.tr , Erişim Tarihi: Şubat-Mayıs 2009

Tanner, A. B., 1980, Radon migration in the ground. A supplementary review. In The Natural Radiation Environment III. Symposium Proceedings, Houston, TX, 23-28 April (Ed. Gesell F.F. and Lowder W.M.), Rep. CONF-780422, U.S. Department of Energy, Washington, D.C. 1, 5-56.

Teng, T.L., 1980, Some Recent Studies on Groundwater Radon Content as an Earthquake, Journal of Geophysical Research, Volume 85, No. B6, 3089-3099.

USGS, United States Geological Survey İnternet sitesi, www.usgs.gov, Erişim Tarihi: 9/04/2009.

- Virk, H. S., Singh, B., 1993, Radon Anomalies in Soil-gas and Groundwater as Earthquake Precursor Phenomena, Tectonophysics, 227, 215-224.
- Vogiannis, E., 2005, Radon in thermal baths, PhD Thesis, Environmental Science Department University of the Aegean.
- Wakita, H., Nakamura, Y. ve SANO, Y., 1998, Short-term and intermediate-term geochemical precursorrs, Pure Appl. Geophys., 126, 267-278.
- Yalın, H. A., Akkurt, İ., Özdemir, F.B., Ünal, R., Sandıkçioğlu, A., Akkurt, A., 2007, The Measurement of Radon and Radium Concentrations in Well Water in the Afyonkarahisar area of Turkey, Indoor Built Environ , 16;1, 77-81
- Yaprak, G., Candan, O., Gür, F., Batmaz, İ., Camgöz, B., Aktif Gediz Grabeninde Yeralan Alaşehir/Manisa Yöresinde Tektonik Aktiviteye Dayalı Radon Anomalilerinin İncelenmesi, VIII. Ulusal Nükleer Bilimler ve Teknolojileri Kongresi, 15-17 Ekim 2003, Erciyes Üniversitesi, Kayseri.

EK-1 RADON/DEPREM İLİŞKİSİNİN ÜÇ AYLIK SÜREKLİ GRAFİĞİ

ÖZGEÇMİŞ



Adı Soyadı: Feride Kulalı

Doğum Yeri ve Yılı: Ödemiş 1980

Medeni Hali: Bekar

Yabancı Dili: İngilizce

Eğitim Durumu

Lise: Kaya Aldoğan Lisesi 1998

Lisans: Süleyman Demirel Üniversitesi 2005

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl: M.E. B. 2006