

**AFYON DEPREM FAY HATTI ÜZERİNDE BULUNAN
KAPLICA VE KUYU SULARINDAKİ RADON
DEĞİŞİMİNİN ÖLÇÜMÜ**

Ayla Sandıkçiođlu
Yüksek Lisans Tezi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı
Eylül, 2004

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

AYLA SANDIKÇIOĞLU

AFYON DEPREM FAY HATTI ÜZERİNDE BULUNAN KAPLICA VE KUYU SULARINDAKİ RADON DEĞİŞİMİNİN ÖLÇÜMÜ

Anadolu Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Önder Orhun

2004, 100 sayfa

Yeryüzündeki doğal radyasyon kaynaklarının büyük bir kısmını radon gazı ve bozunum ürünleri oluşturmaktadır. Uranyum ve bozunum ürünlerinin suda kolaylıkla çözünebilmesi nedeniyle, radon suda çözünerek yeraltı sularının radyoaktivite seviyesinin yüksek olmasına yol açar. İçme sularındaki radyoaktif elementlerin ulusal veya uluslar arası kuruluşlar tarafından belirlenmiş limitlerin altında bulunması istenir. Diğer yandan, radon gazı seviyesinde meydana gelen değişimler, depremin önceden tahminine yönelik çalışmalarda da kullanılabilmekte ve radon konsantrasyonunun bölgenin jeolojik yapısına bağlı olarak farklılık gösterdiği bilinmektedir.

Bu çalışmada, termal sular bakımından zengin olan ve Akşehir fay hattı üzerinde yer alan Afyon'da, 150 metre derinliği olan 10 farklı kuyudan 7 ay boyunca (4 Ağustos 2003-25 Şubat 2004) 10 kez numune alınarak Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezinde (ÇNAEM) incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar radon-sağlık ve radon-deprem ilişkileri açısından değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Radon, Kaynak Suları, Kuyu Suları, Radyoaktivite,
Radon-Deprem, Radon-Sağlık

ABSTRACT**MASTER OF SCIENCE THESIS****AYLA SANDIKÇIOĞLU****THE VARIATION OF RADON IN THERMAL-WATERS AND
WELL-WATERS ON EARTHQUAKE FAULT IN AFYON****Anadolu University
Graduate School of Natural and Applied Science
Physics Programme****Supervisor: Prof. Dr. Önder Orhun****2004, 100 pages**

Most of the radiation sources on the earth is made of inert radon gas and its progenies. Since uranium and its progenies are easily soluble, radon is solved in ground water and causes and increases in radioactivity level. Radioactivity level in drinking water is expected to be lower than the limits set by national and international health institutions. On the other hand, the changes in the radon level are considered as a predictor in the earthquake studies. Also it is known that the radon concentration level can change depending on the geological structure of an area.

This study was conducted on Akşehir fault and geothermal water rich region in Afyon by taking samples from 10 different 150 meters deep well waters 10 times in seven months. All analysis were done in Çekmece Nuclear Research and Education Center. All findings were evaluated in point of view of radon-health and radon-earthquake.

Keywords: Radon, Thermal Waters, Well Waters, Radioactivity, Radon-Earthquake, Radon- Health

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
SİMGELER ve KISALTMALAR.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. RADYOAKTİVİTE	10
2.1. Doğal Radyoaktivitenin Keşfi	10
2.2. Radyumun Bulunuşu	11
2.3. Farklı Türdeki Radyasyonların Varlığı	12
2.4. Radyoaktif Bozunma Türleri.....	13
2.4.1. Alfa Bozunması (α Bozunması).....	13
2.4.2. Beta-Negatif Bozunması (β^- Bozunması).....	15
2.4.3. Beta-Pozitif (Pozitron) Bozunması (β^+ Bozunması).....	16
2.4.4. Elektron Yakalanması	18
2.4.5. İç Dönüşüm (IC).....	18
2.4.6. İzomerik Geçiş	19
2.4.7. Gama Işını Yayınlanması	19
2.4.8. Nötron Yayınlanması	20
2.5. Radyoaktif Bozunma Bağıntısı	20
2.6. Aktiflik	22
2.7. Bozunma Sabiti, Yarılanma Süresi (Yarı Ömür), Ortalama Ömür	23
2.8. Yarı Ömür.....	23
2.9. Ortalama Ömür.....	25
2.10. Radyoaktif Denge.....	25
2.11. Biyolojik Yarı Ömür ($T_{1/2B}$)	26
2.12. Etkin Yarı Ömür ($T_{1/2}$ etkin)	27
2.13. Radyoaktivite Birimi	27
2.13.1. Becquerel (Bq)	28

2.13.2. Işınlama (exposure) Birimi.....	28
2.13.3. Soğurulan Doz.....	28
2.13.4. Eşdeğer Doz: rem (rad equivalent man).....	29
2.13.5. Etkin Eşdeğer Doz (Etkin Doz).....	29
2.13.6. Risk.....	29
3. BAZI RADYOAKTİF ELEMENTLER VE ÖZELLİKLERİ.....	30
3.1. Uranyum.....	30
3.2. Radyum	33
3.3. Radon.....	34
3.3.1. Başlıca Radon Kaynakları.....	37
3.3.1.1. Toprak Gazında Radon.....	38
3.3.1.2. Binalarda Radon.....	40
3.3.1.3. Sularda Radon	42
3.3.1.4. Doğal Gazda Radon.....	44
3.3.1.5. Termal sular ve Radon	45
3.3.2. Radon Gazının Sağlık Etkileri.....	47
4. MATERYAL VE METOD.....	50
4.1. İncelenen Su Kaynakları	50
4.2. Numune Alımı.....	53
4.3. Numune Hazırlanması.....	53
4.4. Sıvı Sintilasyon Cihazında Sayım	54
4.4.1. Sıvı Sintilasyon Cihazı.....	57
4.4.1.1. Sintilasyon Dedektörlerinin Prensipleri:	57
4.4.1.2. Sintilatör Tipleri	57
4.4.1.3. Sıvı Sintilasyon Sayıcısının Önemi.....	57
4.4.1.4. Sıvı Sintilasyon Sayıcısının Kullanım Alanları.....	58
4.4.1.5. Ölçüm Tekniği ve Sayım Şişeleri.....	58
4.4.1.6. Fotoçoğaltıcı Tüpler	59
4.4.1.7. Sıvı Sintilasyon Tekniğinin Üstünlükleri.....	60

4.4.1.8. Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi	
Sağlık Fiziki Bölümünde Sıvı Sintilasyon Cihazı ile	
Yapılan Çalışmalar	60
4.5. Sıvı Sintilasyon Cihazı ile Südaki Radon-222'nin Hesaplama Metodu	62
4.5.1. Cihazın Verimi	62
4.5.1.1. Prosedür	62
4.5.1.2. Verimin Hesaplanması	62
4.5.2. Örnekteki Radon-222'nin Saptanması	63
4.5.3. Aktif Konsantrasyondaki Standart Sapma	63
5. DENEYSEL BULGULAR.....	65
5.1. Verilerin Değerlendirilmesi.....	65
5.1.1. Aynı numune alım zamanı için kaynakların radon seviyelerinin	
incelenmesi.....	65
5.1.2. Kaynakların 4 Ağustos 2003-25 Şubat 2004 tarihleri arasındaki	
radon seviyesi değişimlerinin incelenmesi.....	75
6. SONUÇ VE TARTIŞMA.....	85
6.1. Radon-Sağlık	85
6.2. Radon-Deprem	88
7. KAYNAKLAR.....	93
EKLER.....	100

ŞEKİLLER DİZİNİ

2.1	: Bir magnetik alan tarafından α , β ve γ ' ların saptırılmalarını gösteren denel düzenek.....	13
2.2	: Spektral çizgiler vasıtasıyla alfa parçacıklarının He^{++} olduğunun gösterilmesi metodu	14
2.3	: α - parçacıklarının havadaki bulunma oranı.	15
2.4	: Beta parçacıklarının enerji spektrumu.....	16
2.5	: α ve β ışınmaları.....	18
2.6	: Radyoaktif atomların sayısı azalırken, bozunmuş (n_0-n) atomların sayısının arttığı görülmektedir.....	22
2.7	: Farklı bozunma sabitinin bozunma eğrisine etkisi	23
2.8	: Radyoaktif Denge.....	26
3.1	: ^{238}U 'in bozunma ürünleri şeması	31
3.2	: İnsanların maruz kaldığı radyoaktif dağılım ve Radon oranı.....	34
3.3	: ^{222}Rn ve ^{220}Rn 'nin bozunma zinciri	36
3.4	: Toprağın radon geçirgenliği	38
3.5	: Yapılarda radon kaynakları	41
3.6	: Radonun toprak içindeki dağılımı	43
3.7	: Sıcak ve mineralli su çıkışları	45
3.8	: Radon ve havalandırma	49
4.1	: Akşehir Fay hattı üzerinde numunelerin alındığı kaynakların konumu (1'den 10'a kadar olan numaralar çalışmada su numunelerinin alındığı kaynakları göstermektedir).....	51
4.2	: Çalışmada numunelerin alındığı kaynakların yakınında bulunan Akşehir fay hattının Türkiye içerisindeki konumu.	51
4.3	: Akşehir fay zonu ve bu zon içinde gelişmiş önemli depremleri gösteren yalınlaştırılmış harita.....	52
4.4	: Sayım şişesi (20 mlt'lik Packard cam şişe).....	53
4.5	: Bilgisayar programında Edit protokol adının (12) verilmesi	55
4.6	: Bilgisayar Programında Radon ölçümünün adlandırılması	55
4.7	: Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi'nde kullanılan sıvı sintilasyon cihazının çeşitli açılardan fotoğrafları.....	56

4.8	: Sıvı sintilasyon sayımlarında düşük K-40 içeren cam kaplar	58
4.9	: Fotoçoğaltıcı tüp şeması.....	59
4.10	: Sıvı sintilasyon cihazında kullanılan bilgisayar programında α ve β sayım protokolu.....	61
5.1	: İncelenen kaynakların 4 Ağustos 2003 tarihi itibariyle radon seviyeleri...	65
5.2	: İncelenen kaynakların 14 Ağustos 2003 tarihi itibariyle radon seviyeleri.	66
5.3	: İncelenen kaynakların 29 Ağustos 2003 tarihi itibariyle radon seviyeleri.	67
5.4	: İncelenen kaynakların 29 Ağustos 2003 tarihi itibariyle radon seviyeleri.	68
5.5	: İncelenen kaynakların 18 Eylül 2003 tarihi itibariyle radon seviyeleri	69
5.6	: İncelenen kaynakların 18 Eylül 2003 tarihi itibariyle radon seviyeleri	70
5.7	: İncelenen kaynakların 13 Ekim 2003 tarihi itibariyle radon seviyeleri	71
5.8	: İncelenen kaynakların 22 Ekim 2003 tarihi itibariyle radon seviyeleri	72
5.9	: İncelenen kaynakların 17 Kasım 2003 tarihi itibariyle radon seviyeleri ...	73
5.10	: İncelenen kaynakların 25 Şubat 2004 tarihi itibariyle radon seviyeleri.....	74
5.11	: 1 Nolu kaynağın 4 Ağustos 2003-25 Şubat 2004 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi	75
5.12	: 2 Nolu kaynağın 4 Ağustos 2003-25 Şubat 2004 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi	76
5.13	: 3 Nolu kaynağın Ağustos 2003-25 Şubat 2004 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi	77
5.14	: 4 Nolu kaynağın 4 Ağustos 2003-25 Şubat 2004 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi	78
5.15	: 5 nolu kaynağın 4 Ağustos 2003-25 Şubat 2004 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi	79
5.16	: 6 nolu kaynağın 4 Ağustos 2003-25 Şubat 2004 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi	80
5.17	: 7 nolu kaynağın 4 Ağustos 2003-25 Şubat 2004 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi	81
5.18	: 8 nolu kaynağın 4 Ağustos 2003-25 Şubat 2004 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi	82
5.19	: 9 nolu kaynağın 4 Ağustos 2003-25 Şubat 2004 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi	83

5.20 : 10 nolu kaynağın 4 Ağustos 2003-25 Şubat 2004 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi 84

ÇİZELGELER DİZİNİ

3.1	: Çeşitli kayalardaki ortalama uranyum konsantrasyonu.....	31
3.2	: Normal bölgelerde Uranyum-238, Toryum-232 ve bozunma ürünlerinden yıllık alınan radyoaktivite değerleri	32
3.3	: Radyumun Doğal İzotopları	33
3.4	: Radonun ve Ürünlerinin Aktivite Özellikleri.....	37
3.5	: Maden suyu ve termal sularda radyoaktivite.....	46
3.6	: U.S Environmental Protection Agency (EPA)'nın ve United States Environmental Protection Agency (USEPA)'nın üst sınır değerleri.....	48
4.1	: Su numunelerin alındığı kaynakların numaralandırılması	50
5.1	: İncelenen kaynakların 4 Ağustos 2003 tarihi itibarıyla radon seviyeleri..	65
5.2	: İncelenen kaynakların 14 Ağustos 2003 tarihi itibarıyla radon seviyeleri	66
5.3	: İncelenen kaynakların 29 Ağustos 2003 tarihi itibarıyla radon seviyeleri	67
5.4	: İncelenen kaynakların 29 Ağustos 2003 tarihi itibarıyla radon seviyeleri	68
5.5	: İncelenen kaynakların 18 Eylül 2003 tarihi itibarıyla radon seviyeleri	69
5.6	: İncelenen kaynakların 18 Eylül 2003 tarihi itibarıyla radon seviyeleri	70
5.7	: İncelenen kaynakların 13 Ekim 2003 tarihi itibarıyla radon seviyeleri	71
5.8	: İncelenen kaynakların 22 Ekim 2003 tarihi itibarıyla radon seviyeleri	72
5.9	: İncelenen kaynakların 17 Kasım 2003 tarihi itibarıyla radon seviyeleri...	73
5.10	: İncelenen kaynakların 25 Şubat 2004 tarihi itibarıyla radon seviyeleri....	74
5.11	: 1 Nolu kaynağın 4 Ağustos 2003-25 Şubat 2004 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi	75
5.12	: 2 Nolu kaynağın 4 Ağustos 2003-25 Şubat 2004 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi	76
5.13	: 3 Nolu kaynağın Ağustos 2003-25 Şubat 2004 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi	77
5.14	: 4 Nolu kaynağın 4 Ağustos 2003-25 Şubat 2004 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi	78
5.15	: 5 nolu kaynağın 4 Ağustos 2003-25 Şubat 2004 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi	79

5.16	: 6 nolu kaynağın 4 Ağustos 2003-25 Şubat 2004 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi	80
5.17	: 7 nolu kaynağın 4 Ağustos 2003-25 Şubat 2004 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi	81
5.18	: 8 nolu kaynağın 4 Ağustos 2003-25 Şubat 2004 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi	82
5.19	: 9 nolu kaynağın 4 Ağustos 2003-25 Şubat 2004 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi	83
5.20	: 10 nolu kaynağın 4 Ağustos 2003-25 Şubat 2004 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi	84
6.1	: Kaynakların 04.08.2003 ve 25.02.2004 tarihleri arasındaki radon konsantrasyonlarının ortalaması.....	86
6.2	: Çalışma dönemi boyunca Afyon ve yakınlarında meydana gelen depremler	90

SİMGELER ve KISALTMALAR

A°	: Angstrom
1 Bq	: Becquerel, 1 parçalanma s^{-1}
1 Ci	: Curie, $3,7 \times 10^{10}$ parçalanma s^{-1}
1 mCi	: Mili Curie, $3,7 \times 10^7$ parçalanma s^{-1}
1 μ Ci	: Mikro Curie, $3,7 \times 10^4$ parçalanma s^{-1}
1 nCi	: Nano Curie, 37 parçalanma s^{-1}
1 pCi	: Piko Curie, $3,7 \times 10^{-2}$ parçalanma s^{-1}
c	: Işık hızı (3×10^8 m/s)
$^{\circ}C$: Santrigrat derece
1 Gy	: Gray, 1 kg'lık bir maddeye 1 Joule (J)'lük enerji veren herhangi bir iyonlayıcı radyasyonun dozudur.
1 R	: Röntgen, eski ışınlama birimi, 1 gram hava içinde 87,7 erg, 1 gramlık su içinde 97 erg'lik enerjinin soğurulmasıdır.
1 rad	: Radiation absorbed dose, herhangi bir maddenin gramı başına 100 erg'lik enerji soğurumuna eşdeğerdir.
1 Sv	: Sievert, radyasyonun biyolojik etkileri göz önünde bulundurulmuş bir birim olup, doku veya organlarda, birim kütlede soğurulan enerji miktarlarıyla orantılı bir değerdir.
α -ışınları	: Alfa
He^{++}	: İki kere iyonlaşmış helyum atomu
β^{+}	: Beta-pozitif
β^{-}	: Beta-negatif
γ	: Gama
Z	: Kütle numarası
^{238}U	: Uranyum
^{232}Th	: Toryum
^{226}Ra	: Radium
^{222}Rn	: Radon
^{220}Rn	: Toron
^{219}Rn	: Aktinon
^{234}Pa	: Protaktinyum

^{206}Pb	: Kurşun
^{212}Bi	: Bizmut
^{212}Po	: Polonyum
^{208}Tl	: Talyum
^{87}Br	: Brom
^{87}Kr	: Krom
λ	: Bozunma sabiti
eV	: Elektron volt
MeV	: Mega elektron volt
ÇNAEM	: Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi
DA	: Düşük aktivite
EC	: Elektron capture (Elektron yakalanması)
EPA	: Environmental Protection Agency (Çevre Koruma Ajansı)
IC	: Internal conversion (İç dönüşüm)
IT	: Isomeric transition (izomerik geçiş)
LPG	: Sıvı petrol gazı
LSC	: Sıvı Sintilasyon Cihazı
USEPA	: United States Environmental Protection Agency (Birleşmiş Milletler Çevre Koruma Ajansı)
SI	: International System of Unit (Uluslararası Birim Sistemi)
TAEK	: Türkiye Atom Enerjisi Kurumu

1. GİRİŞ

Canlılar ve özellikle de insanlar yaşamları süresince sürekli olarak uzaydan gelen kozmik ışınlar ve doğada bulunan radyoaktif elementlerin kendiliğinden bozunmalarından kaynaklanan radyasyona maruz kalırlar. Kozmik ışınların neden olduğu radyasyon, dünyanın her yerinde aşağı yukarı homojen bir dağılım göstermektedir. İnsanların maruz kaldıkları bu tür radyasyonlardan etkilenmeleri kaçınılmazdır. Doğal radyoaktif maddelerin dağılımı ise düzgün olmayıp, radyasyon seviyeleri birçok faktöre bağlı olarak değişiklikler göstermektedir. Yerkabuğundaki doğal radyasyon konsantrasyonları bölgenin jeolojik ve coğrafi yapısına bağlı olarak değişmektedir. İnsanlar, yaşam standartları, yaşadıkları ortamların fiziksel özellikleri ve coğrafi şartlarına bağlı olarak değişik dozlarda radyasyona maruz kalırlar. İnsanların yaşadığı ortamdaki radyoaktivite seviyelerinin belirlenmesi ve maruz kaldıkları radyasyon dozlarının bulunması amacıyla çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar insanların maruz kaldıkları doza en büyük katkıyı yerkabuğunda toprak ve kayalarda yüksek konsantrasyonlarda bulunan ^{238}U ve ^{232}Th radyoaktif elementlerinin ve bunların bozunma ürünlerinin oluşturduklarını göstermiştir (Duenas ve ark. 1993).

^{238}U ve ^{232}Th radyoaktif elementleri ve bozunum ürünleri toprak, kayalar, yapı malzemeleri, gıda maddeleri, su ve hava gibi çevresel ortamlarda farklı dağılım gösterirler. Toprakta var olan bu radyoaktif elementler, toprakla sürekli temas eden sular içerisinde çözünebilmekte ve sulardaki radyoaktivite seviyesini oluşturmaktadır. Yeraltı sularının, yer yüzeyindeki sulara göre daha yüksek seviyede radyoaktif element içermesi beklenir. Bunun nedeni, doğal radyoaktif elementlerin toprağın farklı derinliklerinde çeşitli elementlerde bulunma ihtimallerinin yüksekliğidir (Yu ve ark. 1994). Bu nedenle özellikle fay hatları civarında yeraltı sularında bazı elementler ve radyoaktif izotopları yüzey sularına göre daha yüksek oranda bulunurlar (Canbazoğlu 1998).

^{238}U 'un ara bozunum ürünü olan radon ve kısa yarı ömürlü ürünleri insan sağlığı için risk oluşturan radyoaktif elementler arasındadır. Renksiz, kokusuz, tatsız bir asal gaz olan radon, radyumun radyoaktif bozunumundan oluşur. Yer yüzeyine topraktaki radyumun bozunmasıyla çıkar ve göç yoluyla topraktaki mevcut delik ve gözeneklerden hareket eder. Araştırmalar radon

gazının biri toprakta diğeri ise yeraltı ve yüzey sularında olmak üzere başlıca iki ortamda bulunduğunu ve atmosfere bu ortamlardan yayıldığını göstermektedir. Yerkabuğundan atmosfere yayılan radon miktarı genellikle küçüktür, ancak fay hatlarında, jeotermal kaynaklarda ve uranyum depozitlerinde volkanik hareketler sırasında ve depremlerin oluşumundan önce ölçülen radon miktarlarında anomaliler gözlenmektedir (King 1978; Khan ve Qureshi 1994). Paulus ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada Idaho'daki jeolojik bölgelerin yeraltı sularının radon konsantrasyonları kimyasal, radyolojik ve kuyu parametreleri açısından incelenmiştir (Paulus ve ark. 1998). Paulus ve arkadaşları çalışılan bölgenin yeraltı sularındaki radon konsantrasyonunun kimyasal, radyolojik ve kuyu parametrelerinden bağımsız olduğunu gözlemişlerdir.

Radon ve ürünleri havadaki toz parçacıklarına yapışarak, solunum yoluyla akciğerlere girmekte ve yayınladıkları alfa parçacıklarıyla akciğer dokularını ışınlamaya tahrip etmektedirler (Arıcı 1996). Solunum yoluyla alınan radonun bir kısmı ise akciğer sıvısında çözünerek vücudun diğer taraflarına taşınmakta ve birtakım kritik hücreleri tahrip ederek kansere yol açabilmektedir. Radonun sağlık üzerine etkilerinden dolayı dünyada çeşitli ülkeler tarafından radon konsantrasyonlarını belirlemek üzere çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda radonun sudaki konsantrasyonları incelenerek sağlık riski taşıyıp taşımadığı tespit edilmeye çalışılmıştır.

Yeryüzünde canlılar için en önemli doğal kaynaklardan biri olan su, canlıların ve bitkilerin biyolojik yapısını oluşturan temel maddedir. İnsanların ve bütün canlıların hayatta kalabilmeleri için mutlaka suya ihtiyaçları vardır. İnsan vücudunun çalışan sistemleri için su hayati bir öneme sahiptir. İnsan vücudunda önemli fonksiyonları olan dolaşım sisteminin ana maddesi de sudur. Su aynı zamanda vücut içerisindeki her türlü maddenin taşınmasında da yaşamsal bir rol üstlenir.

İnsan sağlığında pek çok yönüyle ciddi şekilde ilişki halinde olan suyun uygun ve güvenilir olması son derece önemli bir konudur. Bu bakımdan içme sularının gerek içerdikleri metal ve kimyasal maddeler ve gerekse radyoaktif elementler açısından ulusal veya uluslararası kuruluşlar tarafından belirlenmiş üst limitlerin altında bulunması istenir. Özellikle yeraltı suları farklı

konsantrasyonlarda ^{235}U ve ^{232}Th grubundan olan radyoaktif elementler içermektedirler (Duenas ve ark. 1993). Sularda çözülmüş uranyum serisine ait olan radyoaktif elementler genellikle sağlık riski taşıyan ^{223}Ra , ^{226}Ra ve ^{222}Rn 'den meydana gelir ve bu elementlerin bulunma olasılıkları çok yüksektir.

Bu radyoaktif izotoplardan en önemlisi $4,5 \times 10^9$ yıl yarı ömre sahip olan ^{238}U 'dur. ^{238}U canlılar için çok tehlikeli olan alfa radyasyonu yayınlamaya azalır. Uranyum, eğer içme sularında büyük miktarda bulunursa, kimyasal zehir olması nedeniyle çok zararlı etki gösterir (D'Alessandro ve Vita 2003). Uranyumun doğal seri ürünü olan ^{222}Rn 'nin de toprak ve kayalardan sulara geçme olasılığı son derece yüksektir (Olguin ve Ark. 1993). Radyoaktif maddelerin yeraltı sularındaki konsantrasyonlarının, çevredeki kayalardan salınmasına, sıcaklık, basınç, yağış ve deprem gibi faktörlere bağlı olduğu belirtilmiştir (Danali ve ark. 1993).

Sulardaki radon konsantrasyonunu belirlemeye yönelik çalışmalar XX. yüzyılın ikinci yarısında başlamış ve giderek yoğunluk kazanmıştır. Çalışmalar genel olarak iki ana gruba ayrılır. Bunlardan birisi radonun canlı sağlığı üzerindeki etkisinin belirlenmesi diğeri ise radon konsantrasyonundaki değişimlerin olası bir depremin habercisi olabileceğinden depremin önceden tahminine yönelik çalışmalardır.

Radonun sağlık üzerindeki olumsuz etkilerinden yola çıkarak sulardaki radon seviyesini belirlemek amacıyla yapılmış olan çalışmalardan bazıları şunlardır:

Mcgregor ve Gourgon'un Kanada'da sulardaki radon konsantrasyonunu belirlemek amacıyla yaptıkları çalışma sonucunda, sulardaki radon konsantrasyonunun 14000 Bq/L olarak yüksek konsantrasyonda olduğunu belirtmişlerdir (Mcgregor ve Gourgon 1980). ABD'de yapılan benzer bir çalışmada ise sulardaki radon konsantrasyonu ortalama olarak 20 Bq/L bulunmuştur (Gesell ve ark. 1982). Finlandiya'da yapılan bir başka araştırmada ise sulardaki radon konsantrasyonu 77000 Bq/L gibi oldukça yüksek bir oranda ölçülmüştür (Salonen 1987).

Amerika'da içme ve kullanım suyunun karşılandığı bir çok sondaj kuyusunda yapılan çalışmalar bulunmaktadır. Bu kuyularda Gosink ve arkadaşları

(1990) tarafından yapılan çalışmada ^{222}Rn konsantrasyonları ortalama olarak 39,96 Bq/L ölçülmüştür (Gosink ve ark. 1990).

Nijerya'da Farai ve Sanni tarafından yapılan bir çalışmada, doğrudan gama sayımları kullanılarak su analizleri yapılmıştır. Bu çalışmada 20 farklı kuyudan alınan örneklerle bir kuyu haftada 3 defa incelenmiştir. Çalışmada daha önceden belirlenmemiş numaralarla rasgele zamanlarda örneklendirme yapılmıştır. En sık örnek alınan kuyuda maksimum % 20'lik bir sapma ile 15 Bq/L (400 pCi/L) \pm % 9,5 (1 δ) oranında radon konsantrasyonuna sahip olduğu bulunmuştur. 18 kuyudaki radon aktivitesinin nisbi sapmaları % 1,5 ile % 18 arasında ortalama değişime sahip olduğu belirtilmiştir (Farai ve Sanni 1992).

Kuzey Carolina'da dört genel ve beş özel su kaynağının radon konsantrasyonları 1993'ün sonbaharından 1994'ün ilkbaharına kadar 7 ay süreyle Hightower ve Watson tarafından incelenmiştir (Hightower ve Watson 1995). Bu çalışmayla sudaki radon konsantrasyonlarının geçici değişkenleri gözlenmiştir. Sonuçlara dayanarak radon konsantrasyonunun bozuk ortalamasının önceden bilinmesi halinde, içme suyu kaynaklarındaki radon değişiminin daha güvenli bir şekilde bulunabileceği belirtilmiştir.

Amrani ve arkadaşları "Cezayir'de yeraltı sularındaki radon ölçümleri" adlı çalışmalarında aldıkları su örneklerinin radon konsantrasyonlarının 0,50 Bq/L ile 19,37 Bq/L arasında değişim gösterdiğini tespit etmişlerdir (Amrani ve ark 2000).

Kozłowska ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada ise Polonya'nın güneybatısındaki bölgede Sudety dağlarında Klodzka vadisinde bulunan farklı kaplıca sularında radon konsantrasyonları incelenmiştir (Kozłowska ve ark 1999). Elde ettikleri radon konsantrasyonları verilerini Polish Ulusal standartları olan 74 Bq/L'e göre değerlendirmişlerdir.

Mt Etna'nın aktif volkanik bölgesi boyunca D'Alessandro ve Vita tarafından yeraltı sularındaki radon konsantrasyonları ölçülmüştür (D'Alessandro ve Vita 2003). Çalışmalarında toplanan 119 su örneğindeki radon seviyeleri aktivite değerlerinin 1,8 Bq/L ile 52,7 Bq/L arasında olduğunu ölçmüşlerdir.

Türkiye'de sularındaki radon konsantrasyonlarını belirlemeye yönelik çalışmalar oldukça yenidir. Yapılan literatür incelemesi sonucunda Saç ve Kumru

(2003) tarafından Ege bölgesinin bir kısmında yapılmış olan bir çalışmaya rastlanmıştır. Saç ve Kumru tarafından yapılan bu çalışmada İzmir ili içme ve kullanım sularında ^{222}Rn ve ^{226}Ra konsantrasyonları belirlenmiştir. Bu çalışmada İzmir iline bağlı Halkapınar, Menemen ve Gaziemir, Manisa iline bağlı Sarıkız ve Göksu ilçelerindeki sondaj kuyularından alınan su örnekleri incelenmiştir. Toplanan su örneklerinde kollektör yöntemi ve ZnS(Ag) alfa sayım cihazı kullanılarak ^{222}Rn ve ^{226}Ra konsantrasyonları belirlenmiştir. Çalışmanın sonucunda, İzmir ilinin içme ve kullanım suyu ihtiyacının karşılandığı sondaj kuyularından alınan su örneklerindeki radon konsantrasyonlarının en yüksek 6 Bq/L ve ortalama radon konsantrasyonunun ise 2 Bq/L (50 pCi/L) olduğu saptanmıştır. Çalışmada radyum konsantrasyonları için en yüksek 0,8 Bq/L (22 pCi/L), ortalama 0,2 Bq/L (5 pCi/L) elde edilmiştir. Sonuçlar U.S. Environmental Protection Agency (EPA)'nın içme suları için kabul ettiği radon ve radyum konsantrasyonları ile karşılaştırılmıştır.

Simones ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada yeraltı sularındaki radon konsantrasyonlarının kısa süreli değişimleri incelenmiştir (Simones ve ark. 1988). 20 değişik kuyu suyu 1987 Aralık ayından 1988 Şubat ayına kadarlık sürede aylık olarak incelenmiştir. Kısa süredeki bu incelemede 3 aylık periyotta radon konsantrasyonunda hiçbir değişim olmadığı istatistiksel olarak gösterilmiştir. Bu deneysel çalışmayla yeraltı sularında radon etkisiyle kısa süreli değişiminin olamayacağı gösterilmiştir. Bununla beraber elde edilen verilerin istatistiksel olarak uzun periyotlu ölçümler için kullanılabileceği belirtilmiştir.

Radonun insanlar için sağlık riski taşımasının yanı sıra teknolojinin gelişmesiyle yararlarından da bahsetmek mümkündür. Radon gazının varlığı 19. yüzyıldan beri bilinmesine rağmen, depremin önceden belirlenebilmesi çalışmalarında izlenmesi nispeten yeni bir olaydır.

Son yıllarda çok sayıda insan kaybına neden olan en önemli doğal felaketlerden biri olan depremin, önceden sezilmesine yönelik çalışmalar hız kazanmıştır. Depremin önceden sezilmesine yönelik çeşitli işaretler arasında, toprak gazında ve yeraltı sularında radon değişimlerinin gözlenmesi, deprem tahmininde kullanılabilecek en önemli jeokimyasal izleyici olarak

sınıflandırılmaktadır (King ve ark. 1996; Zmazek ve ark. 2002). Radonun iki izotopu olan Rn^{220} ($t_{1/2}=55,3$ s, Th^{232} serisi) ve Rn^{219} ($t_{1/2}=4$ s, U^{235} serisi), Rn^{222} 'ye göre kısa yarı ömürlü olmaları nedeniyle depremin önceden sezilmesi çalışmalarında dikkate alınmazlar.

Radon ve deprem arasındaki ilişkiye ait ilk çalışmalar Japon bilim adamı Okobe tarafından 1956'da yapılmıştır (Khan 1994; Teng 1980). Okobe çalışmasında sismik hareketler ile yüzey yakınında atmosferik günlük radon değişimleri arasında pozitif bir korelasyon olduğunu göstererek, radonu yeni bir deprem izleyicisi olarak işaret etmiştir. Bu nedenle, radonun yeraltı sularındaki konsantrasyonlarındaki dalgalanmanın büyük ölçüde tektonik hareketlere bağlı olduğu öne sürülmektedir (Teng 1980; Virk ve Singh 1993).

1967 ve 1971'de Ulomov ve Malashev tarafından yapılan çalışmada 1966'daki Taşkent depreminden önce kuyu sularında radon konsantrasyonunda önemli değişimler gözlenmiştir. Böylece ilk kez derin kuyu sularında radon anomalilerinin deprem için faydalı bir izleyici olduğu ortaya konulmuştur (Ulomov ve Malashev 1971).

Yeraltı sularındaki radon anomalilerinin incelenmesine yönelik bu çalışmalara ek olarak, 1974 yılında ilk kez toprak gazı radon gözlemleri ölçüm teknikleri geliştirilmiştir (Bichard ve Libby 1980).

Radon ve depremin önceden sezilmesine yönelik en önemli çalışma Çin'de 7,3 büyüklüğündeki Haicheng depremi öncesi yapılmıştır. Yeraltı sularında radon anomalileri gözlemlenerek depremin birkaç saat önce bildirilmesiyle milyonlarca insanın hayatı kurtarılmıştır (Tanner 1980).

Yapılan çok sayıdaki araştırmada yeraltı sularındaki ve toprak gazındaki radon değişimlerinin, birçok depremin önceden tahminine yönelik bir işaret olduğu ve radon anomalilerinin sismik olaylar için faydalı bir izleyici olduğu rapor edilmiştir. (King 1978; King 1980; Tanner 1980; Teng 1980; Bichard ve Libby 1980; Fleischer ve Mogro-Campero 1980; Shapiro ve ark. 1980; Smith ve ark. 1980; Reimer 1980; Virk ve Singh 1993; Khan ve Qureshi 1994; King ve ark. 1996; Monnin ve Seidel 1997; Wattananikorn ve ark. 1998; Planinic ve ark. 2001; Zmazek ve ark. 2002).

Radonun deprem öncesi uygun bir ön izleyici olduğu bilinmesine rağmen, sismik hareketler öncesi radon anomalilerinin mekanizmaları hala tam olarak anlaşılamamıştır. Bu mekanizmanın anlaşılabilmesi için birçok model öne sürülmüştür. Bu modellerden biri radonun açığa çıkması ile ilgili olan sıkışma modelidir (King 1978; King ve ark. 1996). Bu modele göre bir deprem başlamadan önce kabukta sıkışma meydana gelir ve bu nedenle derinlerdeki toprak gazında zenginleşmiş radon yukarı sızar. Böylece yüzeyde radon konsantrasyonu değişir ve radon anomalisine neden olur. King modeline göre radon konsantrasyonunun artan derinlikle artacağı ve bu nedenle sığ derinliklerde radon fazlaşmasının ancak derindeki gazın yukarıya doğru itilmesiyle oluşacağı savunulmaktadır. King'in bu modeline göre, toprak gazında ve yeraltı sularında radonun yanında CO₂ ve He gazlarının da gözlenmesi gerekecektir. Bunu deneysel olarak doğrulayan çalışmalar mevcuttur (Reimer 1980). Bunun yanında deprem sırasında ve öncesinde meydana gelen bazı olağanüstü olaylar da (kuyu sularındaki hava kabarcıkları, sis, koku vb.) bu savı desteklemektedir. 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 davranışları havadaki iyonların (radon ve izotoplarının oluşturduğu) artması ile ilişkilendirilmektedir.

Kuzey Anadolu, Doğu Anadolu ve Akşehir fay hatları üzerinde bulunan Türkiye'de depremin önceden belirlenmesine yönelik yapılmış çalışmalar mevcuttur. Doğu Anadolu bölgesinde bazı diri fay hatlarındaki yeraltı sularının doğal radyoaktivite seviyelerinin belirlenmesi amacıyla, fay hatları üzerindeki bazı noktalardan alınan yeraltı sularının toplam alfa ve beta radyoaktivite seviyeleri ölçülmüştür. Sonuçlar suların radyoaktivite seviyelerine etki eden çeşitli faktörler açısından değerlendirilmiştir (Baykara ve ark. 2002).

Manisa ve Alaşehir'de depremin önceden tahminine yönelik çalışmalar yapılmıştır (Yaprak ve ark. 2003). Bu çalışmada, depremin ön sezisi için toprak gazında radon konsantrasyonları Gediz Graben sisteminde yer alan Alaşehir Bölgesindeki aktif faylarda sürekli olarak gözlenmiştir. İz kazıma tekniği

kullanılarak toprak gazında radon ölçümü yapılan bu çalışmada, aktif tektonik alanları tanımlamada toprak gazı radon profillerini elde etmek için bölgedeki fay hattı boyunca 42 radon ölçüm istasyonu gözlem altına alınmıştır. Bu istasyonlardan elde edilen iki haftalık entegre radon ölçümleri Alaşehir fay sisteminde oluşan 3M büyüklüğündeki depremle ilişkisi olabilecek değişimler göstermiştir. Deprem öncesinde ve sonrasında 3 istasyonda gözlenen radon anomalilerinin pik yüksekliğinin yaklaşık ortalamasının 3 katı olduğu saptanmıştır. Aynı çalışmada, yaz mevsiminde oluşan radon anomalilerinin meteorolojik koşullarla değişen sistematik bir ilişki göstermediği belirtilmiştir.

Belin ve arkadaşları tarafından Türkiye, Adapazarı-Kuzuluktaki termal suların kimyasal ve radyoaktif değişikliklerinin incelenmesi çalışması yapılmıştır (Belin ve ark. 2002). Çalışmada Kuzuluk'taki termal su sağlayan 2 kuyudan örnekler alınmıştır. Deprem öncesi ve sonrasında alınan su örnekleri analiz edilerek bazı elementlerin içeriklerindeki artış ve azalışlar incelenmiştir. Çalışma sonucunda uranyum konsantrasyonlarında dikkat çekici bir şekilde artış gözlemlenmiştir. Belin ve arkadaşları çalışmaları sonucunda sismik bölgelerdeki yeraltı sularının kimyasal içeriklerindeki değişimlerin depremle ilişkili sonuç olabileceğini vurgulamışlardır.

Türkiye'de depremin kestirimi amacıyla yürütülmekte olan en kapsamlı çalışma TÜBİTAK MAM (Marmara Araştırma Merkezi) ve İstanbul Büyükşehir Belediyesi işbirliği ile Ekim 2001'de başlatılan "Deprem Kestirimini Amaçlayan Yeni Metotların Uygulanması Projesi" dir. Proje dahilinde Marmara Bölgesi'nde 8 radon gazı ve 16 yeraltı suyu gözlem istasyonunda elde edilen veriler değerlendirilmektedir.

Bu çalışmanın amacını iki madde şeklinde ele almak mümkündür. Birincisi, Afyon'un fay hattına yakın kaynak sularında radon konsantrasyonları değişimlerinin gözlenmesi ve radon-deprem arasındaki ilişki kapsamında yapılan çalışmalarda kullanılmak üzere veri elde edilmesidir. Çalışmanın ikinci amacı ise aynı bölgede radon konsantrasyon seviyelerini ölçerek insan sağlığını tehdit eder boyutta olup olmadığını belirlemektir.

Afyon ve çevresi jeotermal bir bölgedir. Aynı zamanda Afyon ilinin aktif fay hattı üzerinde olması, bölgenin yeraltı su kaynaklarının radyasyon içeriği

bakımından incelenmesini gerekli kılmaktadır. Bugüne kadar bölgede radon konsantrasyon değerlerini belirleme üzerine yapılmış bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu amaçla radon- deprem ilişkini belirleyebilmek için böyle bir çalışma yapılmasına karar verilmiştir.

Tezin ilk bölümünde çalışılan konu ile ilgili bir giriş ve literatür bilgisi yer almaktadır. Bir sonraki bölümde (2. Bölüm) radyoaktivite hakkında temel bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölüm uranyum, radyum ve radon gibi önemli radyoaktif elementler hakkında bilgi ihtiva etmektedir. Daha sonraki bölüm çalışmanın yapılması için kullanılan materyal ve metot ile ilgilidir. Beşinci bölümde elde edilen deneysel bulguların hesaplamaları yapılmış ve ilgili çizelgeleri ile grafikleri verilmiştir. Son bölümde ise elde edilen sonuçlar radon-sağlık ve radon-deprem ilişkileri açısından tartışılmıştır.

2. RADYOAKTİVİTE

2.1. Doğal Radyoaktivitenin Keşfi

Radyoaktiflik, 24 Şubat 1896'da Henry Becquerel tarafından bulunmuştur. Becquerel belirli floresans tuzlarının güneş ışınlarıyla aktifledikten sonra yayınladıkları radyasyonlar üzerinde çalışıyordu. Şans eseri kalın bir kağıda sarılmış uranyum ve potasyum sülfattan ibaret numuneyi karanlık bir odada fotoğraf levhalarının yanında bıraktı. Bu levhaların banyo edildiklerinde ışığa karşı tamamen korunmuş oldukları halde ışıpta kalmış gibi sonuç verdiklerini görmüştür. 1895 yılında keşfedilmiş olan x ışınları ile floresans arasındaki ilişkiyi incelerken uranyum bileşikleri yakınına bırakılan fotoğraf plakalarının kararmış olduklarını gördü. Becquerel önceleri bu etkinin nedeninin floresans madde olduğunu sanmış fakat diğer floresans maddelerin aynı olayı oluşturmadıklarını gözlemlemiştir. Bu deneyi tekrarlayan Becquerel, fotoğraf levhalarının etkilenmesinin floresans veya x ışınları ile ilgisi olmadığını, sadece uranyum elementinin bir özelliği olduğunu gösterdi.

Bu olay esnasında uranyumun yayınladığı bu ışınlara Becquerel ışınları denmiştir. Daha sonra bu ışınlara **radyoaktif ışınlar** adı verilmiştir. Uranyum tuzu tarafından yayınlanan ve fotoğraf filmine etki eden bu ışınlar, uranyumun fiziksel ve kimyasal durumuna bağlı değildir (Yaramış 1985). Bu ışınlar saydam olmayan cisimlerden geçebilirler ve havayı iletken hale getirebilirler.

Radyoaktif ışın veren maddelere **radyoaktif madde**, bu ışınlar yardımı ile ortaya konulan maddenin bu özelliğine **radyoaktiflik**, bu olayı meydana getiren elementlere **radyoaktif element**, radyoaktiflik ile ilgili olayları, metotları ve araçları bir arada inceleyen bilim dalına da **radyoaktivite** adı verilmiştir. 1934'de Curie ve Joliot önceleri kararlı olan elementleri radyoaktif hale getirmenin mümkün olduğunu keşfetmişlerdir. Bu olaya da **yapay radyoaktivite** adı verilmiştir.

O zamandan beri ve özellikle fisyon olayının keşfinden sonra pek çok yapay radyoaktif madde üretilmiştir. Radyoaktif olarak bilinen atomların çekirdeği **kararsız** olduklarından radyoaktivite özelliğine sahiptirler. Kararsız çekirdekler parçalanır ve parçalanma sonucu yeni bir çekirdek meydana gelir. Atom çekirdeklerindeki bu değişimler sonucu **radyasyon** yayınlanırlar. Atomun

uğradığı bu değişikliğe **bozunma** olayı adı verilir. İlk bozunma sonu oluşan yeni atoma 1. ürün denir, 1. ürün de kararsız bir atom olabilir ve parçalanarak radyasyon yayınlar ve yeni bir atoma dönüşürse buna da 2. ürün denir. Sonuç olarak bir kararsız atom, kararlı atom haline gelinceye kadar bir seri dönüşüme uğrar. Böylece meydana gelen seriye **bozunma serisi** veya **bozunma zinciri** denir (Yülek 1992).

Becquerel'in keşfinden sonra Rutherford deneylere devam ederek 1897'de uranyumdan çıkan bu ışınların niteliğini inceledi ve uranyumun yayınladığı ışınların iki çeşit olduğunu ileri sürdü. Alfa (α) ve beta (β) ışınımları olarak adlandırdığı bu ışınımların iyonlaştırma etkilerini ve madde içine giricilik yeteneklerini araştırdı. Alfa ışınlarının ince metal levhalar tarafından kolayca absorplanan ve çok iyonlaştırıcı, betaların ise daha girici fakat daha az iyonlaştırıcı özellikte olduğunu gözlemledi. Aynı yıllarda Nillard, radyoaktif çekirdeklerden α ve β ışınımlarından başka, çok daha girici olan üçüncü tür bir ışın çeşidini keşfetti ve gama (γ) ışınları adını verdi.

1898'de Marie Curie, ışınım yayınlayan elementin kimyasal özelliklerinden bağımsız olduğunu, bunun atom çekirdeğine özgü bir davranış olduğunu gösterdi. Marie Curie ve eşi Pierre Curie, uranyum cevherinden polonyum (Po) ve radyum (Ra) gibi iki radyoaktif elementi ayırmayı başardılar.

2.2. Radyumun Bulunuşu

Radyum Pitch-Blend cevheri içerisinde 3000.000 kısım uranyuma karşılık 1 kısım kadar miktarda bulunur. Bu elementin radyoaktifliği uranyumun 1.000.000 katı kadardır (İrez 2002). Radyumu cevherinden metal halinde ilk elde eden Madam Curie'dir. Curie Pitch-Blend cevherinden $BaCl_2$ halinde ayırmayı başarmıştır. Böyle bir tuzu cevherinden ayırmak için 10.000 defa kristalizasyon yapmış ve ancak birkaç mg $BaCl_2$ elde edebilmiştir.

Radyum doğada daima uranyum tuzları ile birlikte bulunur. Bugün en zengin radyum bulunduran uranyum yatakları Kanada'da bulunmaktadır (İrez 2002).

2.3. Farklı Türdeki Radyasyonların Varlığı

Radyoaktivitenin keşfinden sonra radyasyonun özelliklerinin incelenmesine yönelik büyük çalışmalar yapılmıştır. Araştırmalar radyasyonun aşağıdaki maddeler altındaki davranışları üzerinde yoğunlaşmıştır:

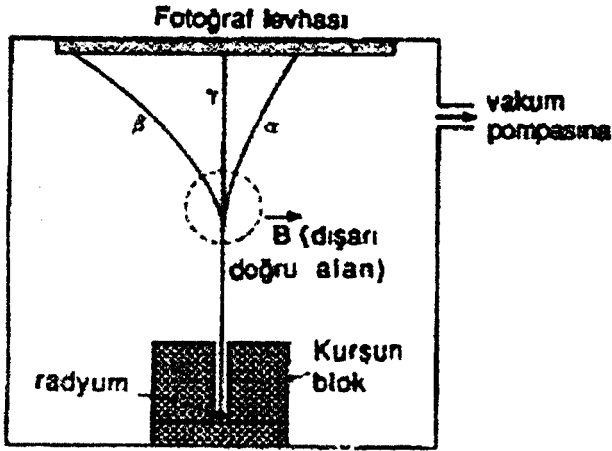
- a) Farklı maddelerden delip geçme gücü (girici güç),
- b) Farklı gazlardaki özel iyonlaştırma,
- c) Elektrik ve manyetik alan etkisi.

(Arya 1999).

Doğal radyoaktif maddelerin radyasyonları, girme güçlerine bağlı olarak üç ayrı grupta sınıflandırılmıştır. Birinci grup, girici güçleri çok zayıf olanları ihtiva etmiştir. Bunlar herhangi bir kağıt parçası tarafından bile durdurulabiliyordu. Havada yoğun iyonlaşmalara sebep olan bu ışınlar alfa ışınları adını almıştır. İkinci grup, iyonlaştırma güçleri daha az, ancak α ışınlarından daha büyük girici güce sahip ve birkaç milimetre kalınlığındaki metal levhalardan kolayca geçebilen β ışınlarıdır. Üçüncü gruptakiler ise az iyonlaşmaya sebep olurlar, fakat farklı maddelerin santimetrelerce kalınlığından geçebilmektedir. Bunlar da γ ışınlarıdır.

Yapılan çalışmalar belirli bir kısım radyasyonun kuvvetli bir manyetik alan uygulanmasıyla saptığını göstermiştir (Arya 1999). Rutherford'un yaptığı çalışmalarda, α parçacıkları kuvvetli bir manyetik alan altında küçük sapmalar göstermiş ve pozitif yüklüymüş gibi davranmışlardır. γ ışınlarının ise çok kuvvetli elektrik ve manyetik alanlarda bile sapmadıkları ispatlanmıştır. Bu üç tip radyasyonun varlığı Curie'nin gerçekleştirdiği basit bir deneyle gösterilmektedir.

Radyoaktif bir numunenin, örneğin radyumun, az bir miktarı bir kurşun blok içerisine oyulmuş bir çukurun tabanına yerleştirilir (Arya 1999). Şekil düzlemine dik açılı ve yönü kağıttan dışarıya doğru olacak şekilde kuvvetli bir magnetik alan uygulanır. Bu şartlar altında, pozitif yüklü parçacıklar sağa doğru, negatif yüklü parçacıklar sola doğru sapacaklar ve yüksüz parçacıklar hiçbir sapma göstermeyeceklerdir (Arya 1999). Sapma miktarı hıza, yük miktarına ve parçacık kütlesine bağlı olacaktır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 : Bir magnetik alan tarafından, β ve γ ışınlarının sapmalarını gösteren deneysel düzenek (Arya 1999).

2.4. Radyoaktif Bozunma Türleri

Radyoaktif bozunma sonunda, bozunan atom bozunmadan öncekinden daha az enerjili olarak kalır. Kararsız atom bozunurken belirli birkaç yol takip eder, bazen kararsız atomlar iki veya daha fazla yolla bozunabilirler. Sekiz çeşit radyoaktif bozunma modeli mevcuttur, bunlar;

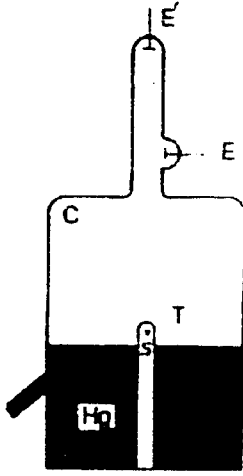
- 1) Alfa bozunması (α bozunması)
- 2) Beta-pozitif bozunması (β^+ bozunması)
- 3) Beta-negatif bozunması (β^- bozunması)
- 4) Elektron yakalanması (EC-Elektron Capture)
- 5) İç dönüşüm (IC=Internal Conversion)
- 6) İzomerik geçiş (IT=Isomeric Transition)
- 7) Gama ışını yayınlanması (γ -yayma)
- 8) Nötron yayınlanması (n-yayma)

(Radyoaktif bozunma türleri ile ilgili bilgiler derlenirken ağırlıklı olarak Yülek 1992 kaynağından yararlanılmıştır).

2.4.1. Alfa Bozunması (α Bozunması)

Alfa taneciklerinin varlığı 1899 yılında Rutherford tarafından tespit edilmiş, anlaşılması Rutherford ve Royd tarafından yapılan spektroskopik metotlar sonunda mümkün olmuştur. Bu çalışmalarla alfa radyasyonunun helyum atomunun çekirdeğine eşit olduğu bulunmuştur. Alfa parçacıklarının gerçekten

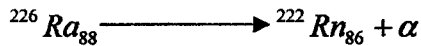
hızlı hareket eden ve iki kere iyonlaşmış helyum atomlarından (He^{++}) ibaret olduğunu gösteren deney düzeneği Şekil 2.2'de görülmektedir.



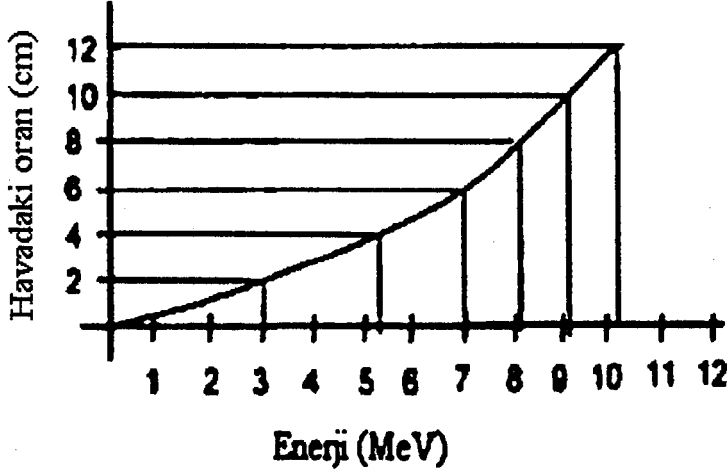
Şekil 2.2 : Spektral çizgiler vasıtasıyla alfa parçacıklarının He^{++} olduğunun gösterilmesi metodu (Arya 1999)

Şekil 2.2 alfa parçacıklarının spektrumlarının belirlenmesine yarayan bir düzeneği göstermektedir. Alfa parçacıkları üreten radyoaktif bir S kaynağı ince bir T cam tüpüne yerleştirilmiştir. Camdan geçerek kaçan alfa parçacıkları boşaltılmış C kutusunda yavaşlarlar. Elektron yakalandıktan sonra nötr atomlar haline gelirler. Yeterli miktarda atom C kutusunda toplandığı zaman bunların optik spektrumları E ve E' elektrotları arasındaki boşalma sayesinde görülebilir. Bu spektrumun helyum spektrumunun aynısı olduğu ortaya çıkarılmıştır (Arya 1999).

Çekirdeklerin bağlanma enerjisi incelenirken özellikle helyumun çekirdeğinin çok kararlı olduğu ve helyum çekirdeğinin kararlılığının ona tek bir parçacık olarak bakacak kadar büyük olduğu gösterilmiştir. Alfa parçacığı yayınlanan çekirdeklerin kütle numarası 4, atom numarası 2 azalır. Örnek;



Ebatlarının büyük olmasından dolayı girişim güçleri çok küçük olup kağıt, ince metal foil veya birkaç cm'lik hava ile durdurulabilirler (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 : α - parçacıklarının havadaki bulunma oranı (Barnes ve Taylor 1963).

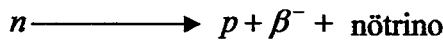
α - parçacıklarının enerjileri yaklaşık olarak 4 ile 9 MeV arasında ve buna bağlı olarak havada bulunma oranları 2,5 ile 8,5 cm'dir.

Radyoaktif elementlerden salınan alfa parçacıklarının büyük bir kısmı $1,4 \times 10^4$ cm/s ile $2,2 \times 10^9$ cm/s arasında hızlara sahiptirler; ancak belli bir hıza ve dolayısıyla belirli bir enerjiye sahiptirler (Arya 1999).

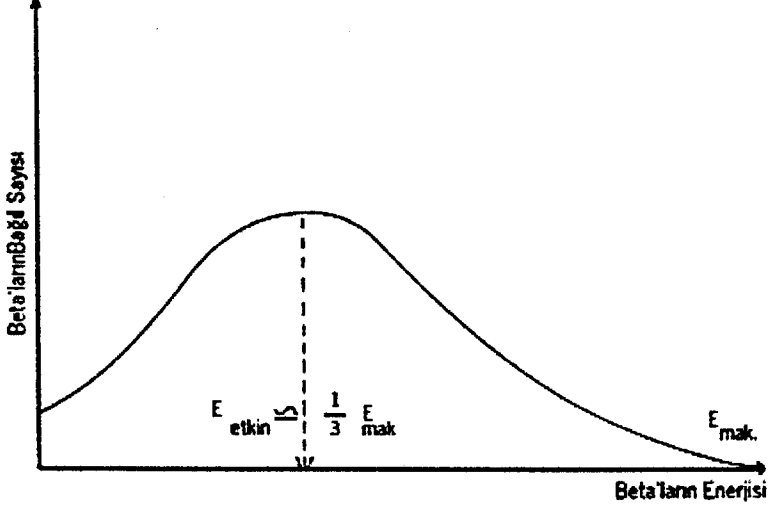
Alfa ışınları atomun çekirdeğinden çıkan nükleer radyasyon olarak da tanımlanabilir. Alfa ışınları elektriksel yük de taşırlar ve daima negatif (-) yüklüdürler. Bu ışınlar insan vücudunda sadece 45 mikron kadar ilerleyebilirler. Alfa ışınlarının havadaki yolları ilk hızlarının küpü ile orantılıdır. Bu kanunun geçerli olduğu sınırlar içinde alfa partiküllerinin iyonlaştırma gücü partikülün hızı ile ters orantılıdır (Berkem 1974).

2.4.2. Beta-Negatif Bozunması (β^- Bozunması)

Bu bozunmada negatif beta parçacığı yayınlanır. Bu parçacıklar elektronlarla aynıdır. Negatif beta parçacıkları ışık hızına yakın çok yüksek hızlarla kararsız olan atom çekirdeğinden fırlatılırlar. Atom çekirdeğinde elektron olmadığına göre bu elektron nereden gelmektedir? Bu β^- 'ler, atom çekirdeğindeki fazla nötronlardan birisi protona dönüşürken meydana gelirler;



Bu bozunma atomun kütlesi üzerine etki etmez, çünkü β^- 'ların kütlesi ihmal edilecek kadar küçüktür. β yayınlayan radyoaktif madde incelendiğinde, betaların sürekli bir spektrumu olduğu görülür (Şekil 2.4).



Şekil 2.4 : Beta parçacıklarının enerji spektrumu

Beta parçacıklarının enerji spektrumunun sürekli olması oldukça ilginç bir durumdur. Kuantum teorisine göre, çekirdekten yayınlanan parçacıkların aynı miktarda enerji taşıması gerekir. Çünkü, çekirdeğin bozunması sonucu, çekirdekten salınan enerji belirli büyüklükte olmalıdır ve kuantum teorisine göre çekirdeklerin bazılarında daha büyük enerjili parçacıklar salmasını açıklamak mümkün değildir.

Bunun sebebi çekirdekten β^- 'la beraber yüksüz ve elektrona göre ihmal edilebilir ağırlıklı nötrino denen bir parçacığın salınmasıyla açıklanabilmiştir. Nötrinolar, çekirdeğin fazla enerjisinin bir kısmını taşır, yüksüz olduklarından madde ile etkileşmez ve β^- 'ların iyonlaştırma özelliğine etki etmezler. Bu sebepten dolayı da nötrinolar radyasyon dozimetresinde, enerjileri dokuda absorplanmadığından bir problem yaratmazlar.

2.4.3. Beta-Pozitif (Pozitron) Bozunması (β^+ Bozunması)

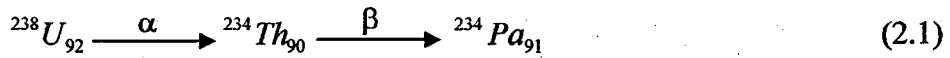
Bu olayda pozitron yayınlanır. Bu bozunma olayı β^- ile benzerlik gösterir. Pozitronlar 1932'de keşfedilmiştir. Elektrik yükleri hariç elektronlarla aynıdır. İsminden de anlaşılacağı gibi yükleri pozitiftir. Pozitron yayınlanmasına,

mutlaka yörünge elektronlarından birinin yayınlanması (iç dönüşüm) eşlik eder; çünkü çekirdekdeki bir protonun ($p \longrightarrow n + \beta^+$) nötrona dönüşmesiyle çekirdeğin pozitif yükü bir azaldığından elektronik yapının dengede kalması için elektron yörüngesindeki elektronların da bir azalması gerekir.

Beta ışınları da, alfa ışınları gibi nükleer radyasyonlardır. Beta parçacıkları, alfa parçacıklarından daha az iyonlaşmaya sebep olurlar ve parçacıklarından yüz kere daha giricidirler. Beta parçacıkları alfa parçacıklarına kıyasla çok hafiftirler ve hava molekülleriyle çarpıştıklarında yönlerini değiştirebilirler. Beta parçacıklarının hızları, c ışık hızı olmak üzere 0,99c'ye kadar ulaşabilir ($c = 3 \times 10^8$ m/s). İzotopların çoğu tarafından salınan β -ışımalarının maksimum enerjisi 0,5 ile 3,5 MeV arasındadır, fakat bu aralığın altında ve üstünde de bir miktar olabilir.

Beta parçacığının kütlesi elektronun kütlesine eşittir. Kütleleri ve elektriksel yükleri nedeniyle bu tür radyasyonlar maddeye fazla nüfus edemezler. Beta ışını insan vücuduna en çok 10 mm kadar girebilir. Beta ışınlarının yoğun metallere etkisi ise pratik olarak sıfırdır (Şeker ve Çerezci 1997).

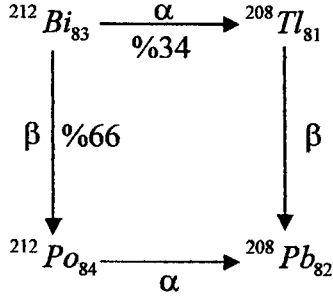
α - ve β -ışımalarına örnekler, doğal uranyum olarak adlandırılan ^{238}U 'un izotopları ile verilebilir. Uranyumun atom numarası 92'dir ve $^{238}\text{U}_{92}$ 'den atom numarası 90 ve kütle numarası 234 olan ($^{234}\text{Th}_{90}$) toryum meydana gelir. Bu yine radyoaktif bir üründür ve β -ışınması sonucunda atom numarası 91 ve kütle numarası 234 olan ($^{234}\text{Pa}_{91}$) protaktinyum oluşur. Bu da yine radyoaktif bir elementtir ve bırakacağı değişik ışımalar sonucunda kararlı bir element olan ($^{206}\text{Pb}_{82}$) kurşun ortaya çıkar. Denklem olarak gösterilecek olunursa,



şeklinde olur.

Zaman zaman bir radyoaktif element iki alternatif yolla ışımaya yapabilir, bunlar α - ve β -ışımalarıdır. Bu durumun gerçekleşmesi halinde daima her bir durumun kesin bir oranı vardır. Yine bu oran farklı elementlerde fazlaca değişebilir. Örneğin bizmut ($^{212}\text{Bi}_{83}$) elementinin benzer durumuna bakacak olursak bozunmasının yaklaşık üçte ikisi β^- -ışınması ile olur ve polonyum ($^{212}\text{Po}_{84}$) oluşur ve kalan üçte biri α -ışınması ile gerçekleşir, talyum ($^{208}\text{Tl}_{81}$) açığa

çıkar. Sonuçta bu ürünlerin ikisi de tekrar ışınım yaparak kararlı kurşun ($^{208}\text{Pb}_{82}$) meydana gelir (Şekil 2.5).



Şekil 2.5 : α ve β ışınları

2.4.4. Elektron Yakalanması

Elektron yakalanması (Elektron Capture = EC) olayında atomun çekirdeği yörünge elektronlarından birini yakalar. Bu elektron çekirdekteki protonlardan biri ile birleşerek nötron haline gelir ($p + e^- \longrightarrow n$). Bu olay atomun Z 'sinin $Z-1$ haline gelmesine sebep olur. Yani β^+ bozunmasına benzer. Yörüngedeki bir elektronun çekirdek tarafından yakalanması yörüngede bir elektron boşluğu meydana getirir, bundan dolayı yörüngeler arasındaki elektron geçişleri başlar ve bunun sonucunda da X- ışınları meydana gelir. Yani birinci ürünler X- ışınları salarak ikinci ürün haline gelirler. Bu sebeple elektron yakalanması iki safhalı bir olaydır. Birinci kısımda elektron çekirdek tarafından yakalanır ve bu atomu uyarılmış bir halde bırakır, ikinci kısımda ise elektromanyetik radyasyon yayınlanır. Bu olayda yakalanan elektron genellikle iç tabaka yani K tabakası elektronlarıdır ve bu sebeple bu olaya çoğunlukla "K yakalanması" denir. Bu olay genellikle β^+ bozunmasına uğrayan atomlar için alternatif bir bozunma şeklidir ve proton fazlalığı olan kararsız atomlar genellikle bu iki yoldan birine göre bozunma şansına sahiptir.

2.4.5. İç Dönüşüm (IC)

İç dönüşüm, (Internal Conversion = IC) olayında çekirdek, fazla enerjisini doğrudan yörüngedeki elektrona iletir ve bu elektronu yörüngeden fırlatır. Bu olayda elektron tarafından taşınan enerji, çekirdek tarafından salınan enerjiden daha küçüktür, çünkü enerjinin bir kısmı elektronunu bulunduğu yörüngeden koparabilmek için harcanmıştır. Bu sebeple, elektron tarafından

taşınan enerji, çekirdek tarafından salınan enerjiden, elektronun bağlanma enerjisinin çıkarılmasına eşittir. Bu olay genellikle K yörüngesi elektronları ile olursa da bazen diğer yörünge elektronları da bu olaya karışabilir. Çekirdeğin enerjisi doğrudan atomun elektronlarına iletilir yani bu olayda foton yoktur. Bu iletişim doğrudan sağlanır ve elektron yörüngeden fırlatılır. Bu dönüşüm sonunda yörüngede bir elektron boşluğu olur, bu boşluğu diğer yörüngelerden bir elektron gelerek doldurur ve bir X ışını yayınlanır. Bu X ışını, belirli atom ve yapıya bağlı olarak o elemente ait karakteristik ışınlardır. Yayınlanan karakteristik X ışınları elektron yakalanmasında birinci ürünün karakteristiğidir. İç dönüşümde ise nükleer yükte bir değişim yoktur ve yayınlanan karakteristik radyasyon orjinal atoma aittir. İç dönüşümde yayınlanan elektron belli bir elementten aynı enerji ile salınır ve buna “beta ışını çizgi spektrumu” denir. Belli bir β^- yayınlayan radyoaktif madde incelendiğinde, β^- parçacıklarının devamlı bir spektrumu olduğu ve bu belli spektrum üzerinde bir çizgi spektrumu varsa bunun da bir iç dönüşüm nedeniyle meydana gelen beta ışını çizgi spektrumu olduğu söylenir.

2.4.6. İzomerik Geçiş

Bazı radyoaktif atomlar bozunmalardan sonra, uyarılmış durumda (metastabil = yarı kararlı durum) kalırlar ve kararlı duruma geçmek için γ ışını yayarlar. Bu olay izomerik geçiş (Isomeric Transition = IT) olarak adlandırılır ve izomerik geçişe uğrayan bir atomun A ve Z'si değişmez. İzomerik geçişler genellikle iç dönüşümlerle rekabet halindedirler. İzomerik geçişlerde, uyarılmış atomun enerjisinin gama ışını halinde yayınlanması oldukça uzun bir zaman alır. Bu nedenle uyarılmış atom genellikle başka bir radyoaktif element olarak kabul edilir ve o şekilde muamele görür.

2.4.7. Gama Işını Yayınlanması

Gama ışınları enerji fazlalığı olan çekirdekler tarafından yayınlanan elektromanyetik radyasyonlardır. Gama ışını yayınlanması, çekirdeğin A ve Z'sini değiştirmeksizin uyarılmış haldeki çekirdeğin enerjisini dışarı vermesidir.

Gama ışınları çıkış şekline göre X ışınlarından farklıdır ve atom çekirdeğinin yeniden düzenlenmesiyle meydana gelir. γ ışınlarının enerjileri 0.1 MeV ile 3 MeV arasında değişir. Değişik olaylar sonucunda γ ışınları meydana gelebilir. Bu olaylar;

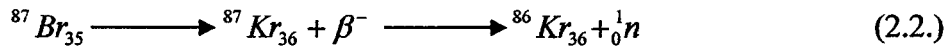
- a) Radyoaktif bozunma,
- b) Nükleer fisyon,
- c) Çekirdeğe nötron girmesiyle oluşan yakalama reaksiyonlarıdır.

Gama ışınları çok yüksek enerjili elektromanyetik dalgalarıdır. Genel olarak gama ışınları tek başlarına meydana gelmezler. Bir takım radyoaktif bozunma veya çekirdek tepkimelerinin ardından meydana gelirler. Örneğin alfa ve beta parçacıkları oluşturan bazı radyoaktif bozunma tepkimeleri sonucunda çekirdek enerjili hale gelir. Bu yüksek enerjili çekirdek gama ışını yayarak daha düşük enerjili çekirdeğe dönüşür.

Gama ışınları doğrudan doğruya iyonlaştırıcı değildirler. Ama meydana getirdikleri elektronlarla bunu yaparlar. Gama ışınlarının etki gücü çok yüksektir. Beta ışınlarına göre 100 kat daha fazla nüfuz etme özelliğine sahiptirler. Gama ışınları birkaç santimetre kalınlığındaki kurşundan geçebilir. Gama ışınlarını ancak kalın kurşun levhalar, 2-3 m.'lik beton bloklar durdurabilir. Gama ışınları yüksüz olduklarından elektrik ve manyetik alanda sapmazlar. Gama parçacıklarının kütlesi ve yükü sıfır olduğu için gama bozulmasına uğrayan bir elementin atom ve kütle numarası değişmez (Berkem 1974).

2.4.8. Nötron Yayınlanması

Radyoaktif atomların bozunma olaylarında, sadece birkaç tanesi nötron yayınlar. En iyi bilinen örnek $^{87}\text{Br}_{36}$ izotopudur. Burada;



şeklinde ifade edilir.

2.5. Radyoaktif Bozunma Bağıntısı

Bir atomun çekirdeğinin bir alfa parçacığı, bir beta parçacığı, bir gama ışını veya başka herhangi bir parçacık yayınlanması ya da ekstra-çekirdek kabuğundan bir elektron yakalaması olayına **radyoaktif bozunma** adı verilir. Bir radyoaktif bozunma olayında, ana çekirdek, ürün (kız) çekirdek ve radyasyon olmak üzere üç bileşen mevcuttur. Bir bozunma olayı genel olarak aşağıdaki şekilde ifade edilir:



Ortamda, başlangıçta sadece A atomu mevcutken bozunmayla birlikte A ile B atomları ve bozunma bittiği zamanda sadece B atomu bulunacaktır. Yani A

atomlarının tümü B atomuna dönüşmüş olacaktır. Ortamda başlangıçta mevcut olan A atomlarının sayısı kadar sonuçta B atomları meydana gelecek yani atomların sayısı değişmeyecektir.

Bozunmamış herhangi bir atomun gelecek bir saniye içindeki bozunma ihtimalinin ölçüsüne λ denilirse (aynı zamanda $\lambda \ll 1$ olduğu kabul edilirse) ve başlangıçta N sayıda radyoaktif atom olduğu kabul edilirse, dT zaman aralığında dN kadar atom bozunmaya uğrayacaktır (Arya 1999). Bir radyoaktif elementin birim zamanda bozunan atom sayısına o atomun aktivitesi denir. Bozunan dN atom, başlangıçtaki N radyoaktif atom sayısı, geçen dT zamanı ve bozunma sabiti, λ ile de orantılı olacaktır:

$$dN = -\lambda.N.dT \quad (2.4)$$

Bu eşitlikten anlaşılacağı gibi kısa bir dT süresindeki bozunma sayısı, bozunmamış atomların sayısıyla N ve dT zaman aralığıyla doğru orantılıdır. Burada (-) işareti dT'nin artışıyla N'in azalışını gösterir. (2.4) bağıntısı radyoaktif bozunma temel bağıntısıdır. Parçalanma sabiti, her radyoaktif element için o elemente ait bir sabit olup zamana bağlı değildir. Bu, belirli bir kararsız atomlar grubunda bozunmamış bir atomun aynı bozunma şansına sahip olduğu anlamına gelir, yani radyoaktif atomların bozunma şansı daima sabittir. (2.4) bağıntısından,

$$\lambda = -\frac{dN}{NdT} \quad (2.5)$$

elde edilir. dT = 1 alınırsa (2.5) bağıntısından $\lambda = -dN/N$ elde edilir ki bu da bozunma sabitinin birim zamanda bozunan atomlarının sayısının, kararsız atomlarının sayısına bölümü olduğunu gösterir.

(2.4) bağıntısının integrali, bozunmamış radyoaktif atomların sayısını verir. T = 0 anında (başlangıç) n_0 radyoaktif atom olduğu t zaman sonra n radyoaktif atom olduğu kabul edilirse, (2.4) bağıntısının integrali,

$$\int_{N=n_0}^{N=n} \frac{dN}{N} = - \int_{T=0}^{T=t} \lambda.dT \quad (2.6)$$

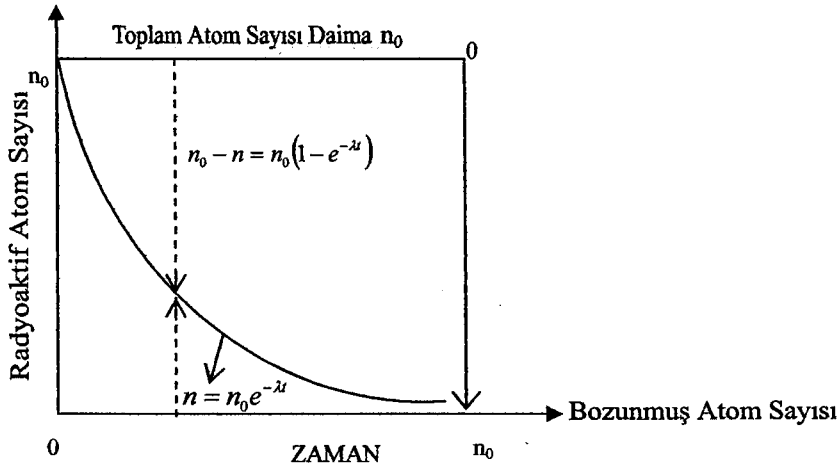
şeklinde yazılır ve buradan aşağıdaki ifadeler elde edilir:

$$n = n_0 e^{-\lambda t} \quad (2.7)$$

$$n_0 - n = n_0(1 - e^{-\lambda t}) \quad (2.8)$$

Denklem (2.7) ifadesi radyoaktif atomların sayısının eksponansiyel olarak azaldığını gösterir (Şekil 2.6).

Denklem (2.7) ile ifade edilen radyoaktif bozunma yasası yalnızca doğal radyoaktif maddelerin değil, bütün radyoaktif olayların uyduğu bir yasadır. Yapay radyoaktif maddeler, çok kısa ömürlü kararsız temel parçacıklar, çok uzun yarı ömürlü radyoaktif elementler ve uyarılmış durumlar hep bu yasaya göre bozunuma uğrarlar.



Şekil 2.6 : Radyoaktif atomların sayısı azalırken, bozunmuş ($n_0 - n$) atomların sayısının arttığı görülmektedir

2.6. Aktiflik

Çoğu kez, verilen bir radyoaktif numunedeki mevcut radyoaktif atomların sayısını bilmekten ziyade, birim zamanda bozunmaya uğrayan atomların sayısını bilmek daha önemlidir. Bu sayı radyoaktif numunenin aktifliği kullanılarak bulunur. **Aktiflik**, verilen bir numunenin saniyedeki parçalanma sayısı olarak tanımlanır. (2.7) bağıntısından

$$\text{Aktiflik} = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda n_0 e^{-\lambda t} \quad (2.9)$$

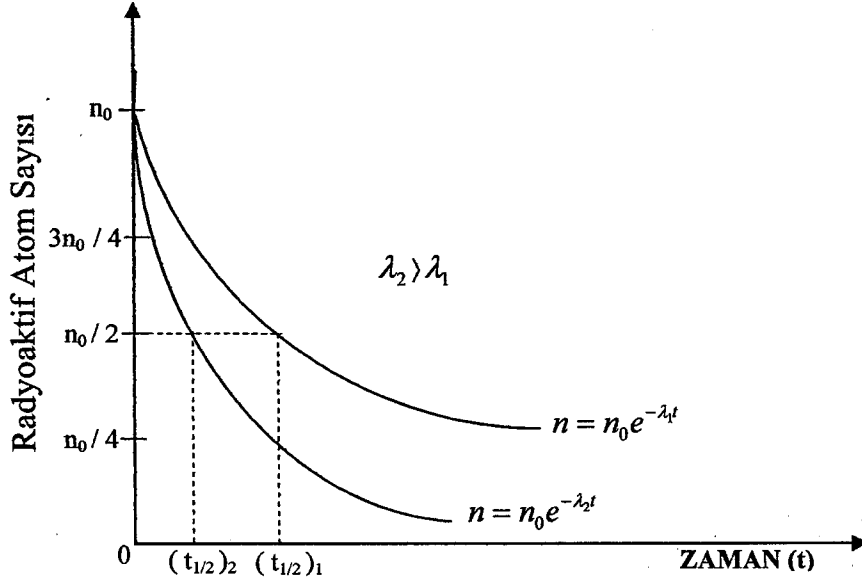
elde edilir ve (2.7) bağıntısında tanımlanan $n = n_0 e^{-\lambda t}$ ifadesi (2.9) eşitliğinde yerine yazılırsa

$$\text{Aktiflik} = \lambda n \quad (2.10)$$

olur ve bir numunenin aktifliğinin mevcut radyoaktif atomların sayısına (n) ve bozunma sabitine (λ) bağlı olduğu görülür.

2.7. Bozunma Sabiti, Yarılanma Süresi (Yarı Ömür), Ortalama Ömür

Bozunma sabiti, radyoaktif maddenin birim zamandaki parçalanma kesridir. (2.7) bağıntısı ve Şekil (2.7)'den görüleceği gibi, bozunma sabiti büyük olan bir radyoaktif madde küçük olandan daha hızlı bir parçalanmaya uğrar.



Şekil 2.7 : Farklı bozunma sabitinin bozunma eğrisine etkisi

Başlangıçta aynı atom sayısına sahip iki farklı radyoaktif maddeden belli bir süre sonra bozunma sabiti büyük olanın radyoaktif madde sayısının, bozunma sabiti küçük olana göre daha az olacağı Şekil 2.7'den kolayca görülebilir. Bundan dolayı bozunma sabiti, radyoaktif atomların kararlı atomlara dönüşüm hızını gösterir. Bozunma hızını ifade etmek için bozunma sabitinden başka bir de yarı ömür yada yarılanma süresi kullanılır.

2.8. Yarı Ömür

Radyoaktivitede önemli başka bir nicelik de $T_{1/2}$ ile gösterilen yarı ömürdür. Bir radyoaktif maddenin başlangıçtaki sayısının yarıya inmesi için geçen zamandır. Bu yarı ömre aynı zamanda fiziksel yarı ömür de denir.

(2.7) bağıntısı ile verilen eksponansiyel fonksiyonun unutulmaması gereken özelliği, verilen zaman diliminde radyoaktif atomların sayısındaki azalmanın sabit olacağıdır.

Aktiflik, bozunmamış mevcut atomların sayısı ile doğru orantılı olduğundan, $T_{1/2}$ 'de bozunmamış atomların sayısının yarıya düşmesi için gerekli zaman aralığına eşittir.

Bozunma sabiti ile yarı ömür arasındaki bağıntı; (2.7) bağıntısında t , geçen süre için $T_{1/2}$ ve n için de $n_0/2$ değeri konarak bulunur:

$$\frac{n_0}{2} = n_0 e^{-\lambda T_{1/2}} \quad (2.11)$$

$$\frac{1}{2} = e^{-\lambda T_{1/2}}$$

$$0,693 = \lambda T_{1/2}$$

$$\lambda = \frac{0,693}{T_{1/2}} \quad (2.12)$$

elde edilir. (2.7) bağıntısında λ yerine $\frac{0,693}{T_{1/2}}$ konursa,

$$n = n_0 e^{-\frac{0,693}{T_{1/2}} t} \quad (2.13)$$

bulunur.

Bu bağıntıda, t ile $T_{1/2}$ 'nin zaman biriminin aynı olması gerekir. Yani $T_{1/2}$ saniye ise t 'de saniye olmalıdır. Yarı ömür, belirli bir süre sonra radyoaktif maddenin geriye kalan kısmının kolay ve pratik bir şekilde hesaplanabilmesini sağlar. Bir yarı ömürden sonra mevcut radyoaktif maddenin yarısı kalır, bunu takip eden 2. yarı ömür sonunda başlangıçtaki dördte biri, 3. yarı ömürden sonra başlangıçtaki sekizde biri kalır ve böylece devam eder. Sonuç olarak, verilen bir süre sonunda ne kadar radyoaktif madde kaldığı bu süre içinde kaç yarı ömür olduğu hesaplanarak kolayca bulunur. Şöyle ki k . yarı ömür sonunda kalan radyoaktif madde miktarı $(1/2)^k$ ile orantılı olacaktır. Bir radyoaktif maddenin kalan kısmının hesaplanmasında, bazen "onda bir ömür" kullanılabilir ki bu radyoaktif maddenin onda birinin kalması yani onda dokuzunun parçalanması için geçen zamandır. (2.7) bağıntısından;

$$\frac{n_0}{10} = n_0 e^{-\lambda t_{1/10}}$$

$$e^{+\lambda t_{1/10}} = 10$$

olur, e tabanına göre logaritması alınırsa,

$$\lambda t_{1/10} = 2,302$$

olur, buradan da;

$$t_{1/10} = \frac{2,302}{\lambda} = \frac{2,302}{0,693} T_{1/2}$$

elde edilir ve

$$t_{1/10} = 3,322 T_{1/2} \quad (2.14)$$

bulunur. Bu bağıntıdan görüldüğü gibi, radyoaktif maddelerin onda dokuzunun parçalanması için yaklaşık olarak 3 yarı ömür geçmesi gerekir.

2.9. Ortalama Ömür

Bir radyoaktif elementi oluşturan atomlar arasında bazıları çok kısa, bazıları ise çok daha uzun ömürlüdür. Bu nedenle radyoaktif maddenin kalan kısmının hesaplanmasında bazen de ortalama ömür kullanılır. Ortalama ömür tanımı, radyoaktif atomların verilen bir süre kadar bozunmadan kaldığı ve sürenin sonunda hepsinin aynı anda bozunduğu şeklinde yapılır. Matematiksel olarak ortalama ömür, bozunma sabitinin tersine eşittir ve

$$t_m = \frac{1}{\lambda} = \frac{T_{1/2}}{0,693} = 1,44 T_{1/2} \quad (2.15)$$

bağıntısı ile verilir. Görüldüğü gibi ortalama ömür yarı ömürden büyüktür. (2.15) bağıntısı (2.7) bağıntısında yerine konursa;

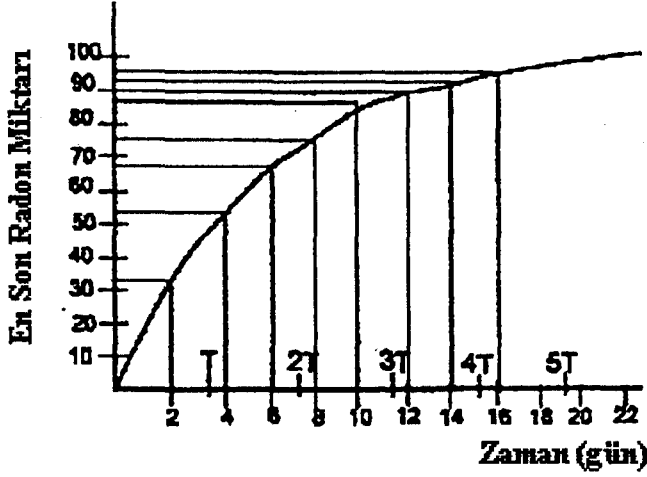
$$n = n_0 e^{-\lambda t_m} = n_0 e^{-\lambda \frac{1}{\lambda}} = \frac{n_0}{e} \quad (2.16)$$

elde edilir ki, bu da ortalama ömrün, radyoaktif atom sayısının, orjinal sayının % 36,8'e düşmesi için geçen süre olduğunu gösterir.

2.10. Radyoaktif Denge

Bir radyoaktif elementten yeni bir radyoaktif ürün çıkar ise, bu ürünün yarı ömrü elementin yarı ömründen daha küçük olur. Ürün çekirdeğin miktarı ana elementin miktarına eşit oluncaya kadar hızlı bir şekilde artar. Böylece bunlar

dengededir denir ve bu denge ürün çekirdek taşınamaz hale gelinceye kadar korunur (Şekil 2.8).



Şekil 2.8 : Radyoaktif Denge (Radonun Radyumla dengeye gelmesi)

Başlangıçta ana elementten fazla olduğundan, oluşan ürün element miktarı fazla olmakta ve zaman ilerledikçe azalan ana elementten dolayı oluşan ürün elementte azalmaktadır. Herhangi bir andaki ürün element miktarı,

$$N_d = N_p \frac{\lambda_p}{\lambda_d - \lambda_p} (e^{-\lambda_p t} - e^{-\lambda_d t}) \quad (2.17)$$

denklemleri ile ifade edilir. Burada N_d , herhangi bir t anındaki ürün element sayısı ve λ_p ve λ_d ise sırasıyla ana ve ürün disintegrasyon (bozunma) sabitleridir.

Radyoaktif denge ise $\lambda_p \ll \lambda_d$ durumunda olur. Bu şart denkleme uygulanırsa $N_d \lambda_d = N_p \lambda_p = \dots = N_n \lambda_n$ bulunur ki radyoaktif denge bu ifadeye denir. Eğer ürün elementin yarı ömür zamanı ana elementinkinden daha uzun ise, hiçbir zaman denge durumu oluşmaz. Ancak ana elementin tamamı ürün elemente dönüşüncüye kadar ürün element miktarı artmaya devam edecektir.

2.11. Biyolojik Yarı Ömür ($T_{1/2B}$)

Solunum veya sindirim sistemi yoluyla yada damardan enjeksiyonla vücut içine alınan bir radyoaktif maddenin, biyolojik olaylar sonunda alınan miktarın yarısının vücut dışına atılması için geçen zamana **biyolojik yarı ömür** denir. Vücut içerisine alınabilen her radyoaktif maddenin belirli bir biyolojik yarı ömrü vardır.

Örneğin; radon-222, 3,82 gün; karbon-14, 0,4 gün; Sezyum-137, 70 gün; kobalt-60, 125 gün; altın-198, 1,5 gün; İndiyum-113, 60 gün; fosfor-32, 1155 gün, Plutonyum-238, 100 yıl; Stronsiyum-90, $1,8 \times 10^4$ gün biyolojik yarı ömre sahiptir.

2.12. Etkin Yarı Ömür ($T_{1/2}$ etkin)

Bir radyoaktif maddenin fiziksel yarı ömrünün tersi ile biyolojik yarı ömrünün tersleri toplamı **etkin yarı ömrün** tersini verir. Yani

$$\frac{1}{T_{1/2\text{etkin}}} = \frac{1}{T_{1/2}} + \frac{1}{T_{1/2B}}$$

olur. Buradan işlem yapılarak,

$$T_{1/2\text{etkin}} = \frac{T_{1/2} \times T_{1/2B}}{T_{1/2} + T_{1/2B}} \quad (2.18)$$

elde edilir.

2.13. Radyoaktivite Birimi

Radyoaktif atomların sayısı doğrudan ölçülemediğinden ölçme metodlarında;

$$\frac{dN}{dT} = -\lambda N \quad (2.19)$$

bağıntısı kullanılır. Bu radyoaktif atomların herhangi bir zamandaki bozunma hızının, aynı zamandaki mevcut radyoaktif atomların sayısının, bozunma sabitiyle çarpımına eşit olduğunu gösterir. (2.7) bağıntısının her iki tarafı, bozunma sabiti ile çarpılırsa,

$$\lambda n = \lambda n_0 e^{-\lambda t}$$

olur. Bundan dolayı (2.19) bağıntısından

$$\frac{dn}{dt} = \frac{dn_0}{dt} e^{-\lambda t} \quad (2.20)$$

bulunur, herhangi bir zamandaki atomların bozunma hızları arasındaki ilişki, atomların toplam sayıları arasındaki ilişki ile aynı olduğundan (2.19) bağıntısında,

$$\frac{dn}{dt} = a, \quad \frac{dn_0}{dt} = a_0$$

denirse, ki bunlar aktivitedir;

$$a = a_0 e^{-\lambda t} \quad (2.21)$$

elde edilir.

(2.21) eşitliğinde a ve a_0 'nın her ikisi birim zamandaki bozunan atomların sayısı cinsinden ölçülmektedir.

2.13.1. Becquerel (Bq)

Aktivitenin yani parçalanma hızının SI (Standart International) daki birimi, birim zamandaki 1 parçalanma (1/s) olarak tarif edilir, buna Becquerel denir ve Bq ile gösterilir.

Eski birim ise, Curie olup Ci ile gösterilir. Eski ve SI birimlerinin birbirleriyle olan ilişkisi şöyledir (Çelebi 1995):

$$1\text{Bq} = 2,7 \times 10^{-11} \text{Ci}$$

$$3,7 \times 10^{10} \text{Bq} = 1 \text{Ci}$$

$$3,7 \times 10^7 \text{Bq} = 1 \text{mCi (mili Curie)}$$

$$3,7 \times 10^4 \text{Bq} = 1 \mu\text{Ci (mikro Curie)}$$

$$37 \text{Bq} = 1 \text{nCi (nano Curie)}$$

$$3,7 \times 10^{-2} \text{Bq} = 1 \text{pCi (piko Curie)}$$

2.13.2. Işınlama (exposure) Birimi

Birim hava kütlesi içerisinde meydana gelen iyonizasyondur. SI birim sisteminde ışınlama biriminin özel adı yoktur. Işınlama birimi C kg^{-1} (Coulomb kg^{-1}) olarak ifade edilir. Eski ışınlama birimi ise Röntgen (R) olup, SI birim sistemine göre değeri aşağıda verilmiştir:

$$1 \text{R} = 2,58 \times 10^{-4} \text{C kg}^{-1} \text{(hava)}$$

$$1 \text{R} = 10^3 \text{mR}$$

$$1 \text{R} = 10^6 \mu\text{R}$$

2.13.3. Soğurulan Doz

Soğurulan doz her ortam ve her türdeki iyonlayıcı radyasyonlar için tanımlanmıştır. Radyasyonlarla ışınlanan bir maddenin birim miktarında soğurulan radyasyon enerjisidir. SI birim sisteminde soğurulan doz birimi Gray (Gy) olup, Gray; 1 kg^{-1} lık bir maddeye 1 Joule (J)'lük enerji veren herhangi bir iyonlayıcı radyasyonun dozudur. Eski özel birimi rad (radiation absorbed dose) olup, 1 rad, herhangi bir maddenin gramı başına 100 erg'lik enerji soğurumuna eşdeğerdir.

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J kg}^{-1}$$

$$1 \text{ rad} = 10^{-2} \text{ J kg}^{-1} = 100 \text{ erg g}^{-1}$$

$$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad'dır.}$$

2.13.4. Eşdeğer Doz: rem (rad equivalent man)

Radyasyonun biyolojik etkileri göz önünde bulundurularak tanımlanan bir birim olup, doku veya organlarda, birim kütlede soğurulan enerji miktarlarıyla orantılı bir değerdir. Vücut için eşdeğer doz olarak tanımlanır. SI birim sisteminde eşdeğer doz birimi Sievert (Sv) olup,

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

$$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem'dir.}$$

2.13.5. Etkin Eşdeğer Doz (Etkin Doz)

Vücudun bütün olarak ışınlaması durumunda çeşitli organ veya dokuların maruz kaldıkları eşdeğer dozların ağırlıklı toplamı olup birimi Sievert'tir.

2.13.6. Risk

Radyasyon ışınlamalarının sonucunda, kişilerde hasar meydana gelme olasılığıdır.

3. BAZI RADYOAKTİF ELEMENTLER VE ÖZELLİKLERİ

Doğada bulunan radyoaktif elementler dünyanın oluşumu esnasında yüksek enerji içeren nükleer reaksiyonlar sonucu meydana gelmiştir. Dünya üzerindeki doğal radyoaktivitenin büyük bir kısmı ^{235}U , ^{238}U , ^{232}Th , ve ^{40}K orjinlidir (Özbal 1999).

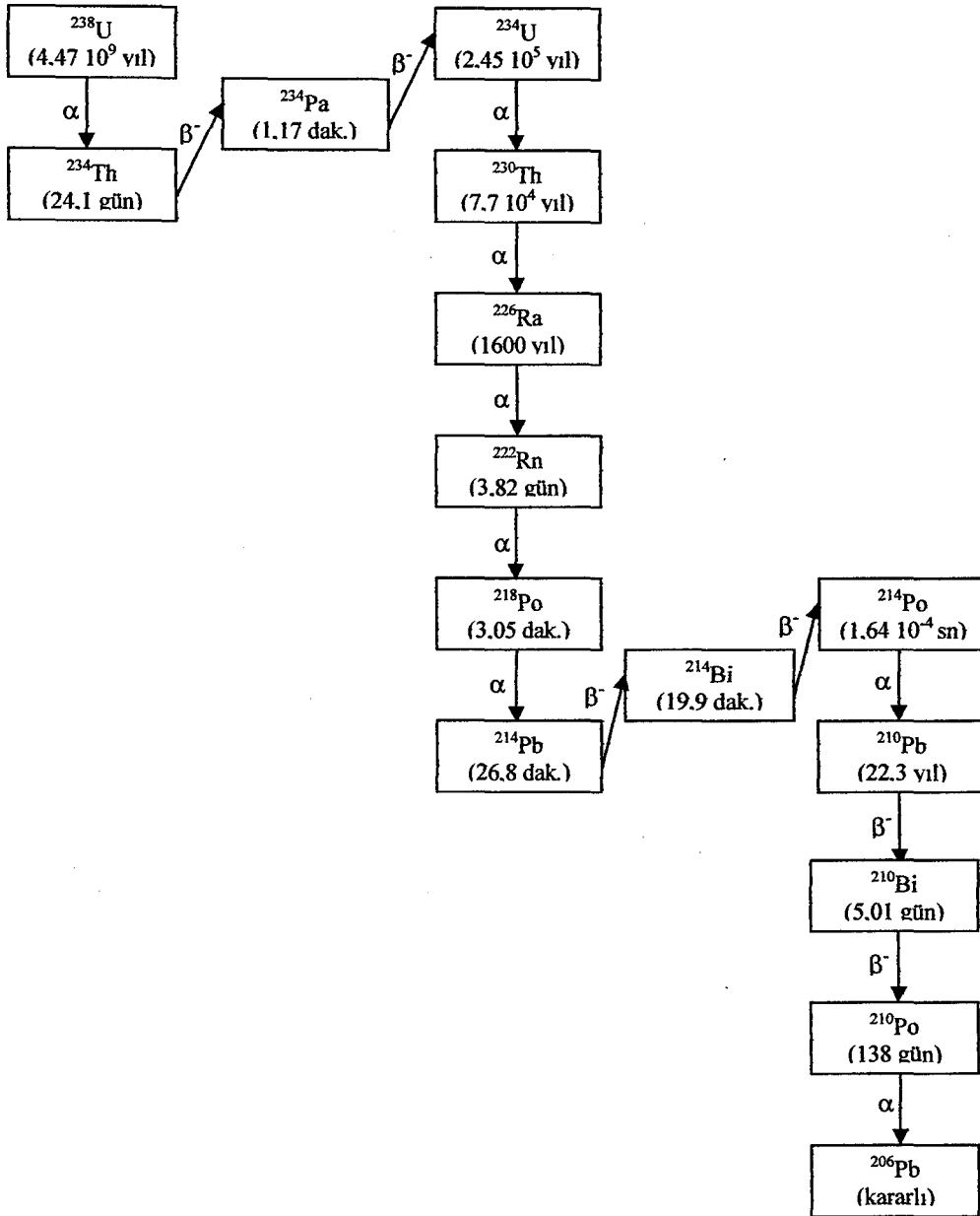
Yerkabuğu ve yer yüzeyi dünyanın oluşumundan sonra bir çok tektonik fiziksel ve meteorolojik olaylara maruz kalmıştır. Bu nedenle uranyum ve toryum dünyanın üst kabuğunda kütle halinde ve yüksek yoğunlukta bulunmamaktadır (Özbal 1999). Buna karşılık yer yüzeyinden 10 km derinliğe kadar yerkabuğunun her yerinde az yada çok bir uranyum yoğunluğu vardır. Dünyanın 1 km kalınlıktaki kabuğunda yaklaşık 10^{12} ton, denizlerde ise 4×10^9 ton uranyum olduğu tahmin edilmektedir (Porstendorfer ve Wicke 1980).

3.1. Uranyum

Uranyumun doğada kütle numaraları 230, 234, 235, 238 olmak üzere dört izotopu bulunur. Doğal elementlerin en ağırı olan doğal uranyumun (^{238}U 'un) bulunma oranı % 99,28 olup genellikle ^{234}U ile dengededir. ^{238}U atomunun çekirdeğinde 92 proton, 146 nötron ve 7 katlı yörüngesinde 92 elektron bulunur. Atom yarıçapı $1,43 \text{ \AA}$ 'dur. Ağır bir metal olan uranyumun yoğunluğu $19,1 \text{ gr/cm}^3$ 'tür, $1132 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de erir ve $3818 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de kaynar. Uranyum değişik sıcaklıklarda farklı özellikler gösterir. Bu farklılık kristal yapısındaki değişmeden ileri gelir, yani allotropik bir metaldir.

Doğada bulunan radyoaktif elementlerin çoğunluğu uranyum-238'in bozunma zincirinde yer alır. Uranyum-238, 14 esas çekirdeğin başıdır ve alt serilere bölünür. Radyoaktif enerjinin en önemli kısımları üç bozunum serisinden meydana gelir. Bu seriler ^{238}U ve ^{235}U ve ^{232}Th 'dir. ^{235}U , Aktinyum serisinin ana izotopu olup bulunma oranı % 0,71'dir. ^{230}U ise ^{238}U serisinin bir üyesi olup yarı ömrü 20,8 gündür (Çelebi 1995).

Uranyumun bozunma zinciri Şekil (3.1)'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 : ^{238}U 'in bozunma ürünleri şeması

Uranyum tüm kayalarda ve topraklarda bulunmaktadır. Uranyumun sulara taşınması ise onunla temas halinde olan toprak veya kayalardan gelmektedir. Çeşitli kayalardaki ortalama uranyum konsantrasyonu Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1 : Çeşitli kayalardaki ortalama uranyum konsantrasyonu (Çelebi 1995)

Kaya Tipleri	Uranyum konsantrasyonu (ppm)
Vulkanik Kayalar	3,0
Fosfat Kayalar (Florida)	120,0
Fosfat Kayalar (Kuzey Afrika)	20-30
Granit	4,0
Kireçtaşı	1,3
Tortul kayalar	1,2

Atmosferde, uranyum doğal kaynağının ve radon izotoplarının varlığı, topraktan gelen toz parçacıklarının havada asılı kalmasından kaynaklanmaktadır (Çelebi 1995). Her alt seri için, solunum ile ve yutma ile vücuda alınan radyoaktivite konsantrasyonları Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2 : Normal bölgelerde Uranyum-238, Toryum-232 ve bozunma ürünlerinden yıllık alınan radyoaktivite değerleri (Çelebi 1995)

Kaynak	Yıllık Alınan (Bq)	
	Solunum ile	Yutma ile
²³⁸ U serisi		
²³⁸ U	0.01	5
²³⁰ Th	0.01	2
²²⁶ Ra	0.01	15
²²² Rn	200000	300
²¹⁰ Pb	4	40
²¹⁰ Po	0,3	40
²³² Th serisi		
²³² Th	0,01	2
²²⁸ Ra	0,01	15
²²⁰ Rn	100000	-

3.2. Radyum

^{226}U ailesi elemanı olup, toprakta, kayalarda, yapı malzemelerinde, su ve gıda maddelerinde bulunmakta ve oldukça geniş bir dağılım göstermektedir. Bir α -yayınlayıcısı olup atom numarası 88'dir. Kütle numarası 213'den 230'a kadar, yarı ömrü ise 10^{-3} saniyeden 1620 yıla kadar değişen yapay ve doğal 14 radyoaktif izotopu olduğu bilinmektedir. Ra-223, Ra-224, Ra-226 ve Ra-228 radyumun doğal izotoplarıdır. Radyumun doğal izotopları Çizelge 3.3'de verilmiştir.

Çizelge 3.3 : Radyumun Doğal İzotopları

İzotop	Bozunma Serisi	Ana Element	Ürün Element	Yarı Ömür	Bozunma Türü
Ra-228	Th-232	Th-232	Ac-228	5,8 yıl	β , γ
Ra-226	U-238	Th-230	Rn-222	1620 yıl	α , γ
Ra-224	Th-232	Th-228	Rn-220	3,66 gün	α , γ
Ra-223	U-235	Th-227	Rn-219	11,4 gün	α , γ

Radyum bozunma sonucu, yarı ömrü 3,8 gün olan radyoaktif ^{222}Rn gazına dönüşür. Radyum uzun yarı ömürlü olması nedeniyle ^{222}Rn oluşumunda bir üreteç görevi yapar. Radonun bozunması ile α ve β yayınlanan, kısa yarı ömürlü radon ürünleri olan $^{218}\text{Po}(\text{RaA})$, $^{214}\text{Pb}(\text{RaB})$, $^{214}\text{Bi}(\text{RaC})$ ve $^{214}\text{Po}(\text{RaD})$ meydana gelir. Radyoaktif bozunmada yarı ömrü 22 yıl olan ^{210}Pb , yarı ömrü 5 gün olan ^{210}Bi ve o da 138 gün yarı ömürlü olan ^{210}Po 'a, ^{210}Po ise α -yayınlayarak kararlı ^{206}Pb izotopuna dönüşür (Şekil 3.1).

Radyum ve bozunma ürünlerinin solunma ve yutulması insan sağlığı açısından risk oluşturmaktadır. Özellikle radon gazı bozunduğu zaman ilk oluşan $^{218}\text{Po}(\text{RaA})$ atomları, iyonize halde hava içindeki herhangi bir parçacığa yapışma eğilimindedirler. ^{214}Pb , ^{214}Bi ve ^{214}Po atomlarının pek çoğu oluştuklarında bir parçacığa yapışmış haldedirler. Radonun bozunma ürünlerinin, genellikle akciğer mukozasına yerleşerek akciğer kanseri riskini arttırdığı bilinmektedir (Çelebi 1995).

Radyum yer kabuğunun çeşitli katmanlarındaki toprak ve kayalarda uranyumla beraber bulunabilir. Bunun yanı sıra uranyumun bulunduğu

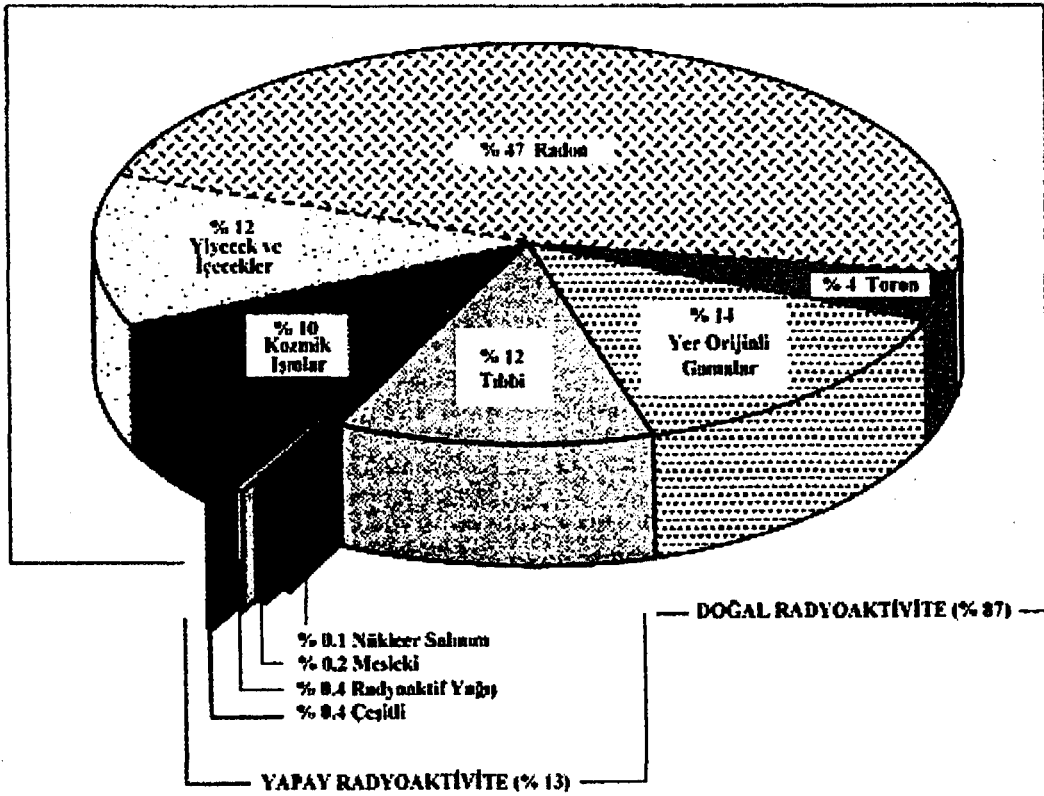
noktalardan yüksek çözünürlüğü nedeniyle çok uzaklara taşınıp birikim oluşturabilir. Radyum volkanik kayalarda, kumtaşı ve kireçtaşına göre daha yüksek konsantrasyonlarda bulunur (Çelebi 1995).

3.3. Radon

^{226}Ra α -yayınlayarak ^{222}Rn ' ye dönüşür. Radon 3,8 gün yarı ömrüyle, doğada bulunan tek radyoaktif gazdır. Radon periyodik tabloda 86. sırada bulunan; tatsız, renksiz, kokusuz, hiçbir bileşik oluşturmayan ve reaksiyona girmeyen tek ve en ağır radyoaktif elementtir. Soğuk suda çözünebilir, çözünürlüğü artan sıcaklıkla düşer. 1898'de Fredrich Ernst Dorn tarafından bulunmuştur.

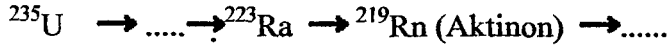
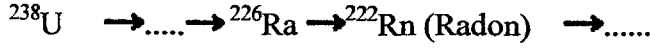
Erime noktası -71°C , kaynama noktası ise -61.8°C 'dir. Bütün dünyada yalnız 100 ton, toprakta ise ortalama 1pCi/L civarında bulunmaktadır.

Doğal kaynaklardan alınan dozun en önemli bileşeni, radon gazı ve onun kısa yarı ömürlü bozunma ürünleridir (Şekil 3.2). Radon gazından dolayı maruz kalınan yıllık doz yaklaşık 1.3 mSv'dir.



Şekil 3.2 : İnsanların maruz kaldığı radyoaktif dağılım ve radon oranı (TAEK)

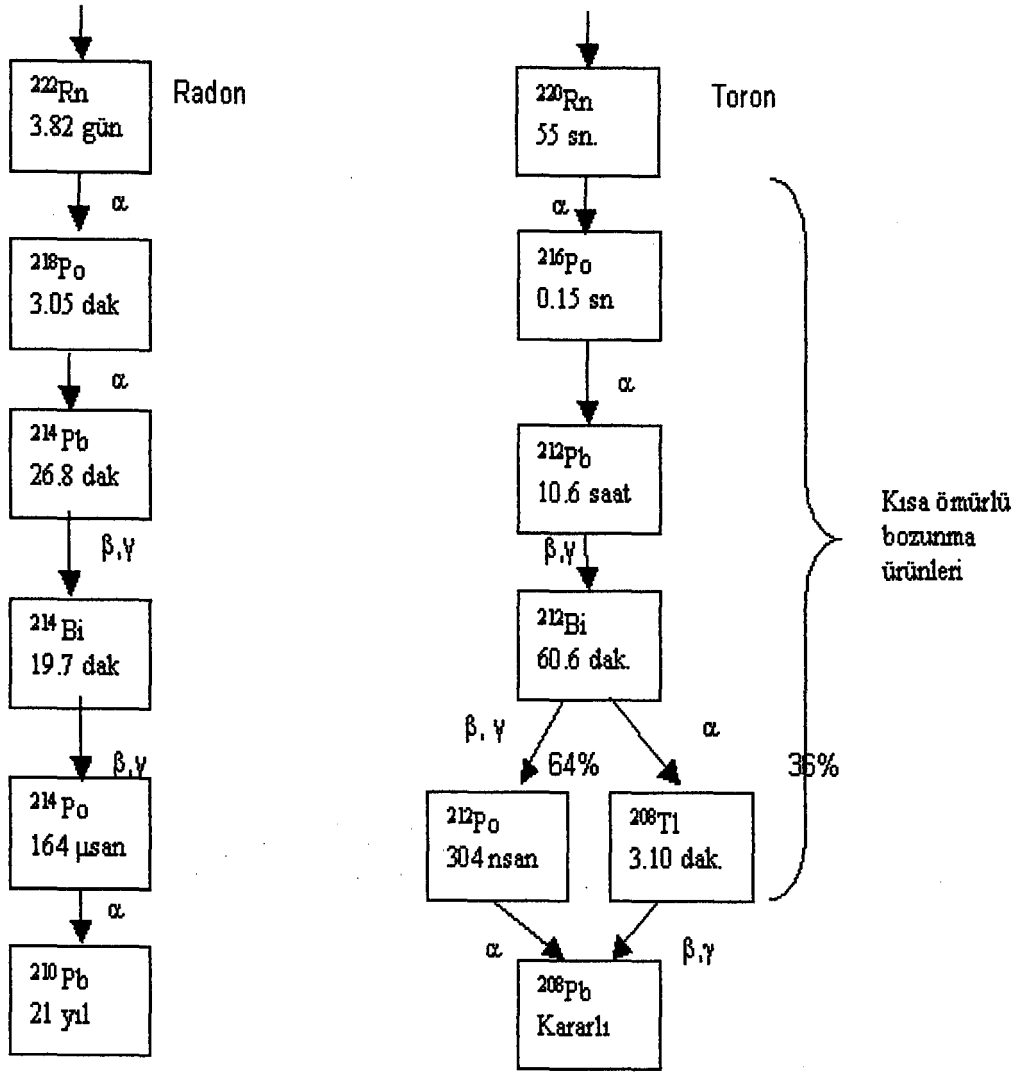
Radon; kaya, toprak ve sudaki doğal uranyumun radyoaktif bozunması sonucunda oluşur. Radonun Rn-222 (emanon), Rn-220 (toron), Rn-219 (aktinon) olmak üzere üç izotopu bilinmektedir. Bunlar sırasıyla U-238, Th-232 ve U-235'in radyoaktif parçalanma ürünüdür. Bozunma şeması aşağıdaki gibidir.



Bu bozunma zincirinin ana atomları bütün doğal malzemelerde bulunabilir. Radonun yarılanma ömrü 3.8 gün, toronun yarılanma ömrü 55 saniye ve aktinonun yarı ömrü 3.9 saniyedir. 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.

Aktinon, U-235'in radyoaktif parçalanma ürünüdür. U-235 doğada U-238 ile birlikte bulunur ve saf uranyum içerisindeki yoğunluğu % 0,7'dir. U-235'in az bolluğu ve kısa ömrü nedeniyle aktinonun bozunmadan önce toprağın dışına çıkışı az olur. Bu nedenle doğal radyoaktif çevrede az bulunur (Özbal 1999).

^{232}Th 'un bozunmasıyla oluşan ^{224}Ra 'un α bozunmasıyla, toron olarak bilinen, 55 sn yarıömürlü, ^{220}Rn ortaya çıkmaktadır. Th-232'nin doğada önemli miktarda bulunuşu Rn-220'nin yoğunluğunun oluşumuna neden olur. Toronun yarı ömrü aktinona göre daha uzun olduğundan aktinona oranla toprak gazında ve yer atmosferinde daha fazla bir yoğunluk oluşturur. U-238'in doğada bol miktarda bulunuşu nedeniyle radyoaktif parçalanma ürünü olan Rn-222'nin atmosferdeki yoğunluğu yüksektir. ^{222}Rn ve ^{220}Rn 'nin bozunma zinciri Şekil 3.3'de, radonun ve ürünlerinin aktivite özellikleri Çizelge 3.4'de verilmiştir.



Şekil 3.3 : ^{222}Rn ve ^{220}Rn 'nin bozunma zinciri

Çizelge 3.4 : Radonun ve ürünlerinin aktivite özellikleri

Radyoaktif element	Yarı Ömür	Temel Radyasyon Enerjileri (MeV)		
		α	β	γ
Rn-222	3,82 gün	5,49		
Po-218	3,05 gün	6,00		
Pb-214	26,8 dak		0,67	2,95
			0,73	0,352
			1,02	
Bi-214	19,7 dak		1,00	0,609
			1,51	1,12
			3,26	1,764
Po-214	164 μ s	7,69		
Pb-210	22,3 yıl		0,015	0,047
			0,061	
			1,161	

Bu çizelgeye bakıldığında Pb-210'un çok uzun yarı ömre sahip olduğu ve bu nedenle bozunum zincirini bloke ettiği görülür. En önemli radon ürünleri Po-218, Pb-214 ve Po-214'dür.

Radon izotopları, kısa yarı ömürlü toron çekirdeklerinden atmosfere kaçma yönüyle ayrılırlar. Radon atmosfere toprak-hava arakesitinden geçerek girer. Okyanus, yeraltı suyu, doğal gaz, jeotermal akıntılar, kömürün yanması da radon kaynaklarını oluşturmaktadır (Surbeck 1991).

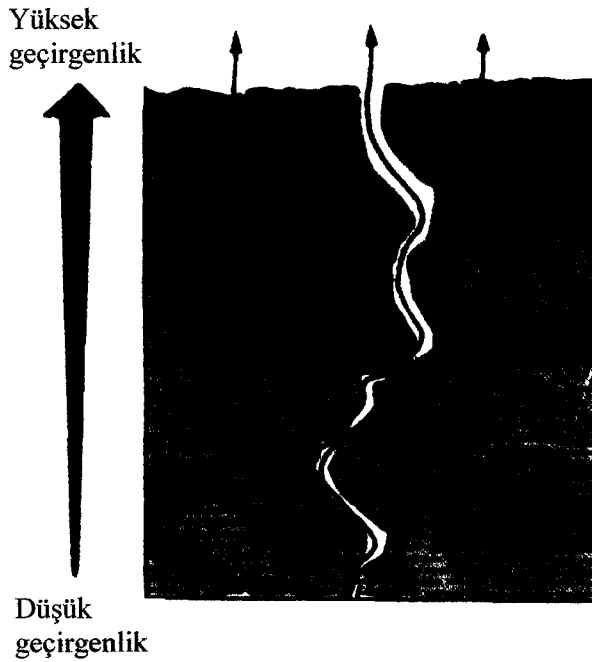
Araştırmalar radon gazının biri toprakta diğeri ise yeraltı ve yüzey sularında olmak üzere başlıca iki ortamda bulunduğunu ve atmosfere bu ortamlardan yayıldığını göstermektedir.

3.3.1. Başlıca Radon Kaynakları

Radon, kayadaki Ra'dan ve topraktan; dışarıdaki havadan evlere; yapı malzemelerinden; doğalgazdan ve sudan yayılır. Kayaçların ve toprağın içinden yukarı yükselerek bina temellerinin yada boru sistemlerinin içinden dışarı sızabilir.

3.3.1.1. Toprak Gazında Radon

Yeraltı uranyum yataklarının keşfinde toprak gazı ve yer atmosferinde radon ölçümleri kullanılır. Radon ölçümlerinin bu araştırmaların en önemlilerinden bir tanesi olmasının nedeni; yer kabuğunun çeşitli derinliklerinde gömülü uranyum kaynaklarından yeryüzüne göç sonucu toprak gazında ve yer atmosferinde bir yoğunluk oluşmasıdır. Eğer uranyum yatağı çok derinlerde ise radonun aktif ömrü bu mesafeyi katetmek için yeterli olmayabilir ve korelasyonda sapmalar olabilir. ^{226}Ra toprakta bozunduğu zaman, ^{222}Rn önce toprak partiküllerinden hava dolu gözeneklere kaçar ve bu gözenekler arasından atmosfere geçmek için hareket eder (Çelebi 1995). Şekil 3.4'de radon atomlarının topraktan havaya doğru olan akımı gösterilmektedir.



Şekil 3.4 : Toprağın radon geçirgenliği

^{226}Ra 'nın bozunumu ile oluşan ^{222}Rn atomları toprak gazının oluştuğu yerde toprak parçacıkları ya da mineralleri arasında difüzyonla serbest kalırlar (Özbal 1999). Toprak partiküllerinden, hava dolu gözeneklere kaçma olayı, esas olarak ^{226}Ra bozunması ile ortaya çıkan radon atomlarının, tepkisinin bir sonucudur. Radon atomları, topraktaki her bir taneciğin yüzeyine yakınsa,

tanecikler arasındaki gözeneklerin içine çekilirler. Toprakta oluşup, gözeneklere kaçan radonun kesri, yayılma gücü, katsayı, oran veya kesir olarak tanımlanır ve bu değer % 1 ile % 80 arasında değişmektedir (Surbeck 1991; Morawska 1989).

Toprak ve hava arasındaki atmosferik basınç farkı radon atomlarının topraktan havaya olan hareketini etkileyen faktörlerden biridir. Atmosferik basınçtaki azalma toprak havasında da basıncın düşmesine neden olur. Bu nedenle toprağın derinlerinden gelen radon taşınması artar. Yağışlı havalarda yüzey toprakları nemlenir. Bu nemlenme toprak gözeneklerini kapatır. Dolayısıyla radon toprağın üst gözeneklerinde tuzaklanır ve aşağıdan yukarıya olan difüzyonu zorlaştırır. Böylece toprak yüzeyindeki radon yoğunluğu azalır. Sıcaklık artışı ise toprağın kurummasına sebep olur ve toprağın gözenekleri artar. Bunun sonucu olarak radonun topraktan kaçıışı kolaylaşır. Topraktan havaya geçen radon, rüzgarların etkisi ile atmosfere karışır.

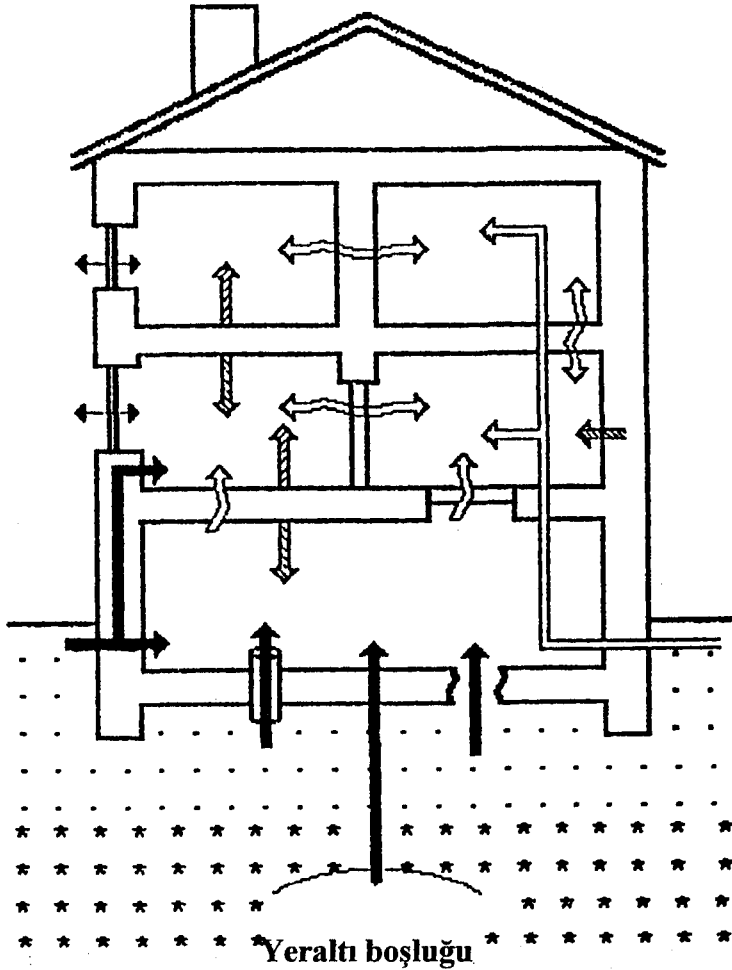
Havadaki radon konsantrasyonu bölgeye, zamana, yerden yüksekliğe ve meteorolojik şartlara bağlıdır. Havadaki radon konsantrasyonu, binaların havalandırma oranına, hacmine ve bütün radon kaynakların toplamına bağlı olarak değişir (Akerblom ve Wilson 1981). Radonun kaynağının toprak olmasından ve çok kısa yarı ömre sahip olmasından dolayı, radon konsantrasyonu yükseklikle sabit bir şekilde azalma gösterir. Coğrafik yerleşim önemlidir. Radon çıkışını sağlayan toprağın azaldığı yerleşim bölgelerinde, radon konsantrasyonu düşüktür. Topraktan havaya ^{222}Rn 'nin geçişi yada akısı ölçümlerinde bulunan değerleri etkileyen faktörler:

- a) Radyumun toprak ve kayalarındaki konsantrasyonu
- b) Toprağın suya doyma derecesi
- c) Toprak ve hava arasındaki atmosferik basınç farkı
- d) Topraktaki gözenekli yapı

şeklindedir.

3.3.1.2. Binalarda Radon

Topraktaki ve yapı malzemelerindeki radyum konsantrasyonuna bağlı olarak binalarda yüksek miktarlarda radon birikmesi olur. Binalar dışarıdan gelen radyasyonu kısmen durdurmasına rağmen bina yapı malzemesindeki ve binanın bulunduğu zemindeki radyoaktif element konsantrasyonundan dolayı bina içi radyasyon düzeyi daha fazla olabilir. Şekil 3.5 binalarda radon dağılım yollarıdır.



- ➔ Topraktan gelen radon
- ➔ Yapı malzemesinden gelen radon
- ➔ İç ve dış havanın değişiminden gelen radon
- ➔ İç havanın değişmesi
- ➔ Su ve gaz kaynaklarından gelen radon
- ⊠ Temel
- ⊠ Jeolojik yapı

Şekil 3.5 : Yapılarda radon kaynakları (Lehmann ve Czarwinski 1993)

Kapalı alan radon aktivite konsantrasyonu ,

$$c_i = \frac{\Phi A + kVC_0}{(\lambda + k)V} \quad (3.1)$$

şeklinde ifade edilir (Lehmann ve Czarwinski 1993).

Burada Φ , radon sızma katsayısı;

A , sızma yüzeyi;

k , havalandırma katsayısı;

V , odanın hacmi;

C_0 , radonun dış ortamdaki konsantrasyonu;

λ radonun bozunma sabitini göstermektedir.

Yapı malzemelerinde radon sızma katsayısı,

$$\Phi = \frac{EV\lambda / S}{T + \frac{1}{\lambda}(e^{-\lambda T} - 1)} \quad (3.2)$$

denklemleri ile verilir (Rawad ve ark. 1991).

Burada Φ , sızma katsayısı;

E , plastik iz dedektöründe ölçülen radon miktarı;

V , dedektör kabının hacmi;

T , dozlanma zamanı;

λ , radonun bozunma sabiti;

S , dedektör kabı tarafından işgal edilen alandır.

Kapalı bir ortamda radon konsantrasyonuna katkıda bulunan kaynaklar şunlardır:

- 1) Yapı malzemelerinin radyum içermesi nedeniyle radon dış solunması.
- 2) Toprak içindeki radon gazının binanın temelindeki gözeneklerden ve çatlaklardan bina içine girişi.
- 3) Toprak gazının topraktan dışarıya kaçması ile yer atmosferinde radon konsantrasyonu oluşması ve bina içi basınç ve sıcaklık farklılıkları nedeniyle açık pencere ve kapılardan içeriye radon girişi.
- 4) Bina içi aktiviteler nedeniyle sulardan (içme yada kullanma) bina içi atmosfere radon karışmasıdır.

(Sextro 1987).

Radon gazının binalarda birikmesinde etkili olan kaynaklar şunlardır:

- 1) Yapı malzemeleri ve binadaki malzemeler.
- 2) Su ve enerji kaynakları.
- 3) Radon bakımından zengin olan topraktan sızmalar:
 - a) Temel veya zemindeki çatlaklar.
 - b) Hasarlı taban bağlantıları.
 - c) Zayıf tutturulmuş borular.
 - d) Dranjaj ve kanalizasyon sistemleri.

(Khan 1991; Rawat ve ark.1991; Lehmann ve Czarwinski 1993).

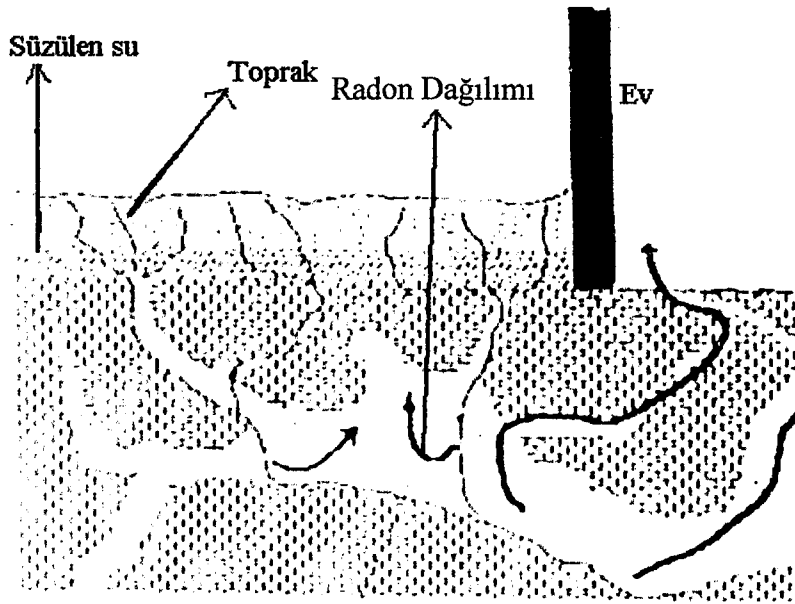
Evdeki radonun kaynağı olan suyun kısmi ortalaması, suyun içindeki radonun miktarına ve diğer kaynakların büyüklüğüne bağlıdır. ABD’de yapılan bir araştırmada evin içindeki radonun ana kaynağının toprak olduğu durumlarda, en yüksek radon ölçümünün seviyesi zemin katlarda görülmüştür. Banyoda tespit edilen uzun vadeli ortalama radon seviyeleri diğer yaşanan yerlerden çok yüksek çıkmıştır. Ev içindeki havada bulunan radon konsantrasyonu ve suyun içindeki radon konsantrasyonu normal olarak yayılır. Her 10^5 pCi/L (su) içinde 4 pCi/L’lik (yatak odası havası) bir oran bulunmuştur (Bruno 1983). Evlerde enerji korunumu amaçlı tedbirler radon yoğunluğunu büyük ölçüde arttırabilir. Evlerin yalıtımı ve hava cereyanlarının durdurulması evlerdeki havalandırmayı azaltır. Isı korunduğu halde radon birikimi artar.

Türkiye’de Manisa ili bina içinde insanların maruz kaldığı radon konsantrasyonlarını belirlemek amacıyla; konut ve işyerlerinde CR-39 polikarbonat filmler kullanılmıştır (Gültekin ve ark. 2003). Çalışmada aynı zamanda CR-39 dedektörleri kullanılarak bir apartmanda farklı kat yüksekliğine göre radon değişimleri incelenmiştir. Sonuçta toplam 23 binada yapılan çalışmalarda radon konsantrasyonu $47-154 \text{ Bq/m}^3$ arasında değiştiği belirlenmiştir.

3.3.1.3. Sularda Radon

Su kaynakları arasında termal ve mineralli su membarları (ılıca, kaplıca ve maden suları) içerikleri bakımından uranyum araştırmaları için en uygun kaynaklardır. Yeraltı uranyum yataklarının keşfi için yapılan çalışmalar için radon ölçümleri genellikle memba ve kuyu sularında gerçekleştirilir. Çünkü bu suların

ölçümleri genellikle memba ve kuyu sularında gerçekleştirilir. Çünkü bu suların kaynağı yeraltı akarsular sistemidir. Eğer bu akarsu sisteminin kollarından bir ya da bir kaç yeraltı uranyum yataklarından geçiyorsa bu yatağı yıkayan sularda uranyum ve radyum elementleri çözünür ve suların içinde çözelti olarak kalır. Radon ise bu sulara ve içindeki taneciklere absorbe olur. Böylece yeraltı sularının çıkış noktalarında yani memba ve kuyu sularının bileşiminde uranyum, radyum ve radon bulmak doğaldır (Şekil 3.6).



Şekil 3.6 : Radonun toprak içindeki dağılımı

Sudaki radonun ortaya çıkışı, topraktaki radyumun kimyasal konsantrasyonu ve radonun suyun içine yayılması ile kontrol edilir. Yeraltı sularındaki radon konsantrasyonu yüzeysel sulardan daha yüksektir. Yüzeysel sularda radon konsantrasyonunun radyum konsantrasyonuna benzer olması beklenir. Sulardan gelen radon ev içlerine sular kullanıldığı zaman girer. Sudaki radon seviyesi, ev içi radon seviyesini önemli derecede etkileyebilecek kadar yüksektir. Bazı bölgelerde evlere ulaşan sular özel kuyulardan gelir. Derin kuyulardan sağlanan musluk suyundaki radon konsantrasyonu 100 Bq/L ile 100.000 Bq/L arasında değişmektedir (UNSCEAR 1988). Ev içinde kullanılan bu

makinesi gibi suyun püskürtülmesi veya çalkalanması büyük miktarda radonun salınmasına neden olur.

3.3.1.4. Doğal Gazda Radon

Radon topraktaki doğal gaza geçer. Böylece doğal gaz önemli bir ev içi radon kaynağı olabilmektedir. Doğal gazın kullanıcıya ulaşmadan önce işlemlere maruz kalması ve depolanması, radonun bir kısmını yok etmektedir. Doğal gaz evlerde ısıtma ve yemek pişirme amaçlı olmak üzere kullanıldığında radon gazı ortaya çıkarak ev içi radon seviyesini artırır. Eğer doğal gazla çalışan aletler evin dışına doğru havalandırılıyorsa bu artış ihmal edilebilir düzeydedir.

Doğal gazın endüstriyel işlemleri sonunda yan ürün olarak sıvı petrol gazı (LPG) elde edilir. Bu işlemler sırasında doğal gazdan arıtılan radonun büyük bir kısmı LPG içine girmektedir. Doğal gaz daha radyoaktif olan LPG'den evlere 10 ile 100 kat arasında daha çok radyasyon sağlamaktadır. Çünkü LPG'nin büyük bir kısmı yakılmaktadır.

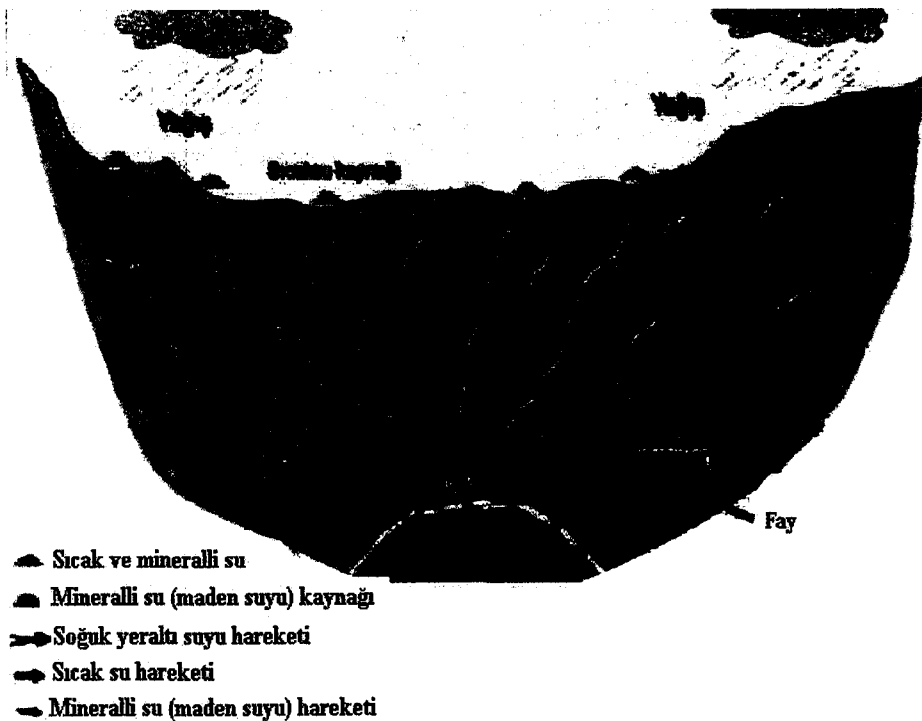
Ev içi radonun önemli kaynakları özetlenirse:

- 1) Topraktaki ve yapı malzemelerindeki Ra-226 miktarı ve radon sızması,
- 2) Toprak ve yapı malzemelerinin nem oranı,
- 3) Toprak ve yapı malzemelerinde yayılma (difüzyon) potansiyeli,
- 4) Toprakla temasta olan yapının yüzey alanı ve izolasyon niteliği,
- 5) Bina zemini,
- 6) Binadaki havalandırma kapasitesi,
- 7) İç-dış hava sıcaklık ve basınç farkı,
- 8) Su ve enerji kaynakları (gaz, kömür v.s),
- 9) Ev tabanında veya bodrum kat duvarlarındaki çatlaklar,
- 10) Bozuk üst duvar bağlantıları,
- 11) Tesisat boru boşlukları,
- 12) İçme suyu

3.3.1.5. Termal sular ve Radon

Termal ve mineralli su membaları (ılıca, kaplıca ve maden suları) hem yeraltı ortamını yıkamış hem de büyük çoğunluğu yeraltında magmaya yakın bölgelerden geçerlerken yeryüzeyine normalin üzerinde bir sıcaklığa erişmiş olarak çıkarlar. Isının etkisi ile kazanılan yüksek sıcaklıkla daha iyi bir çözücü olarak mineralli bölgeleri yıkarlar ve yüksek yoğunlukta radyoaktif element taşırlar. Sıcak sularda daha fazla radyum çözülmesi radon yoğunluğunun artmasına neden olur. Böylelikle termal sular yeraltı ortamının jeofiziksel ve jeokimyasal yapı ve karakteristiklerini yeryüzeyine yansıtır. Bunun yanı sıra yeraltında tuzaklanmış olan gazların yeryüzeyine çıkabilmesine de yardımcı olur (Özbal 1999).

Türkiye'de deprem kuşakları üzerinde sıcaklıkları 20-101 °C arasında 1500 dolayında, kaynak çıkışı ve rezervuar sıcaklıkları 30-242 °C arasında değişen 400 kuyudan sıcak ve mineralli su çıkışı mevcuttur (Şekil 3.7) . Türkiye'deki bu jeotermal kaynaklar başlıca Kuzey Anadolu Fay hattında, Batı Anadolu grabenler sistemi üzerinde, Orta ve Doğu Anadolu'daki volkanik bölgelerde ve yoğun tektonik zonlarda yer almaktadır (Şimşek 1997; Pfister ve ark. 1998).



Şekil 3.7 : Sıcak ve mineralli su çıkışları

Termal sularda radon ölçümleri ile yapılan çeşitli çalışmalar bulunmaktadır (Kobal ve ark. 1978, 1979; Sabol 1995).

Termal suların içerdiği Rn ve Ra ölçüm çalışmalarına örnek olarak Kobal ve arkadaşları tarafından 1979'da Slovenya'da yapılan çalışma verilebilir (Kobal ve ark. 1979). Bu çalışmaya ait Rn ve Ra ölçüm sonuçları Çizelge 3.5'de verilmiştir.

Çizelge 3.5 : Maden suyu ve termal sularda radyoaktivite

Örnek Sayısı	T(°C)	Rn(Bq/L)	Ra(Bq/L)
1	22	4,81	0.007
2	20	17,77	0,01
3	19	12,96	0,007
4	20	62,96	0,007
5	25	23,52	0,011
6	30	14,44	-
7	32	51,48	0,114
8	36	0,63	0,03
9	32	9,26	0,07
10	34	6,11	0,09
11	40	9,48	0,037
12	39	5,18	0,048
13	39	0,185	0,126

Tayvan'da Sabol ve arkadaşları 1995 tarafından termal su örneklerinde radon ölçümleri yapılmıştır (Sabol 1995). Dokuz bölgede sıcak sularda alınan radon ölçüm sonuçlarının 2 Bq/L ile 17.4 Bq/L arasında değiştiği görülmüştür.

Dünyada depremlerin önceden tahmin edilmesi amacıyla yer kabuğunun derinliklerinden gelen termal sular, mineralli sular ve gaz çıkışları özellikle, Çin

ve Japonya'da gözlem altında tutulmaktadır (Wakita 1996). Yeraltı sularının düzenli olarak gözlenmesi ve ölçüm alınması deprem mekanizmasının gelişimi ve erken uyarı açısından önem taşımaktadır. Aktif deprem kuşaklarında jeokimyasal ve hidrojeolojik araştırmalar kapsamında, sulardaki kimyasal değişiklikler (klorür, radon, trityum) ve su seviyelerindeki değişiklikler ölçülmektedir.

3.3.2. Radon Gazının Sağlık Etkileri

İnsan vücuduna radon ve benzer izotoplarının girişi genellikle solunum yoluyla olmaktadır. Küçük bir miktarı ise ağızdan alınan besinlerdeki radyumun bozunmasından kaynaklanmaktadır. Radon-222'nin yarı ömrü, ürünlerine kıyasla daha uzun olduğu için yapacağı etki diğerlerinden daha az olur. Radon gazı reaktivitesinin düşük oluşu nedeniyle dokulara kimyasal bağlanmaz, doku içindeki çözünürlüğü de çok küçüktür; insan akciğerinde yarı ömrünü tamamlamadan geri atılır. Fakat, radon bozunumuyla ortaya çıkan polonyum, bizmut ve kurşunun radyoaktif izotopları, radon gibi gaz halinde olmadıklarından, toz yada havadaki diğer parçacıklara çok çabuk yapışırlar ve solunma yoluyla insan vücuduna alınırlar.

Radon veya ürünleri bulunduğu zaman, nasal geçişinde trakeobronsiyal bölgenin üst kısımlarındaki bronş epitelinin bazal hücrelerini, kısmen de pulmozer bölgeyi etkilemektedir (Çelebi 1989). Bu parçacıklar akciğer içinde bozunmalarını kararlı hale gelinceye dek sürdürürler ve yerleştikleri bölgelerde alfa, beta veya gama ışınması yaparak ayrılırlar. Vücut içerisinde bu ışınmalardan en önemlisi alfa ışınmasıdır. Akciğer üzerinde beta ve gama ışınlarının etkisi alfa ışınlarının etkisine göre ihmal edilebilir düzeydedir. Bozunma sürecinin her aşamasında salınan radyasyon, öncelikle akciğer dokusunda hasara, zamanla da akciğer kanserine neden olabilir.

Akciğerlerde maruz kalınan dozun miktarını bilmek için solunum yoluyla kaç tane atomun alındığı ve biyolojik ömrünün ne kadar olduğu bilinmelidir. Radon ürünlerinin biyolojik yarı ömürleri 20 dakika ile 4,8 saat arasındadır. USA Çevre Koruma Ajansı (EPA-Environmental Protection Agency) yılda 20.000 akciğer kanseri vakasının radon gazına bağlı olduğunu söylemektedir.

U.S Environmental Protection Agency (EPA)'nın içme sularında ^{226}Ra ve ^{222}Rn konsantrasyonu için izin verilebilir üst sınırı Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.6 : U.S Environmental Protection Agency (EPA)'nın ve United States Environmental Protection Agency (USEPA)'nın üst sınır değerleri

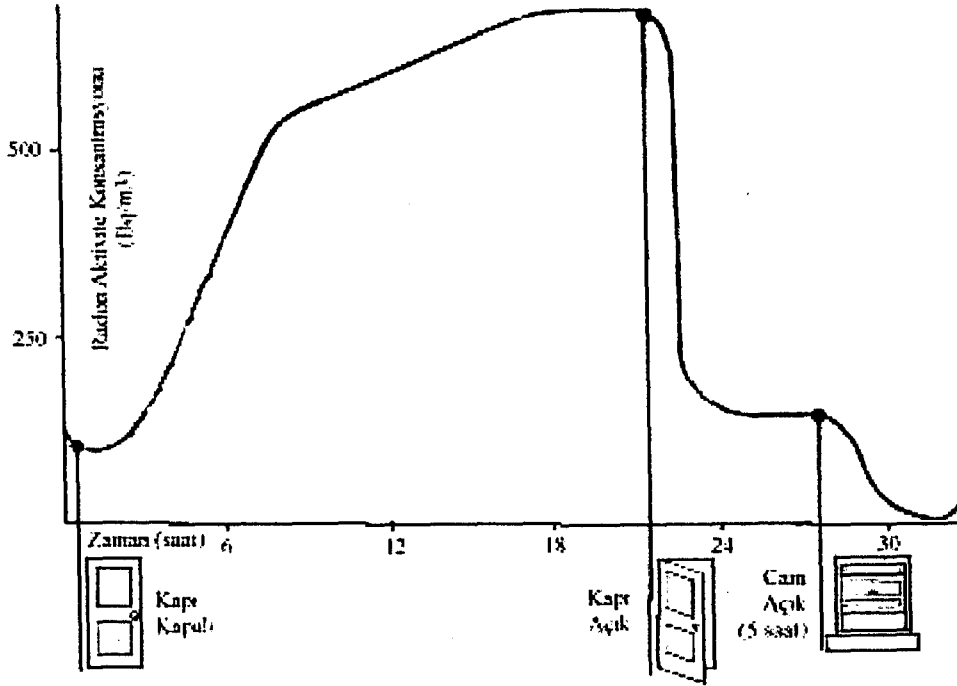
EPA'nın izin verilebilir üst sınırı	(Bq/L)	(pCi/L)
^{226}Ra	0,19	5
^{222}Rn	22,2	600
USEPA'nın izin verilebilir üst sınırı		
^{222}Rn	11	300

Yapılan araştırmalar insanların yaşamları süresince maruz kaldıkları X ışını ve tıpta kullanılan radyoaktif element dozlarının üç katını kapalı yerlerde aldıklarını göstermiştir. Doğal radyasyonun % 62'sinin radon ve ürünleri oluşturmaktadır (Khan 1991).

Radon ev ortamının yanında özellikle maden ocaklarında, tünellerde, mağaralarda ve yeraltı sularında görülmektedir. BEIR (Rapor No: VI)'in yayınına göre kapalı madenlerde yapılan epidemiyolojik araştırmada madenlerde çalışan 68.000 maden işçisinin içinde 2.700 işçi radona bağlı mesleki akciğer kanserine yakalanmıştır.

Sigara, kanser riskini arttırmaktadır. Hem sigara içip hem de yüksek dozda radona maruz kalmış kişilerde kansere yakalanma riski oldukça yüksektir. Sigaranın bırakılıp, maruz kalınan radon seviyesinin düşürülmesiyle kanser riski azaltılacaktır.

Radon genel olarak binalar havalandırılmadığında binanın içinde birikim gösterir. Bu bakımdan evlerde, kapı ve pencerelerde izolasyon yapıldıysa havalandırma süresi arttırılmalıdır (Şekil 3.8).



Şekil 3.8 : Radon ve havalandırma (TAEK)

4. MATERYAL VE METOD

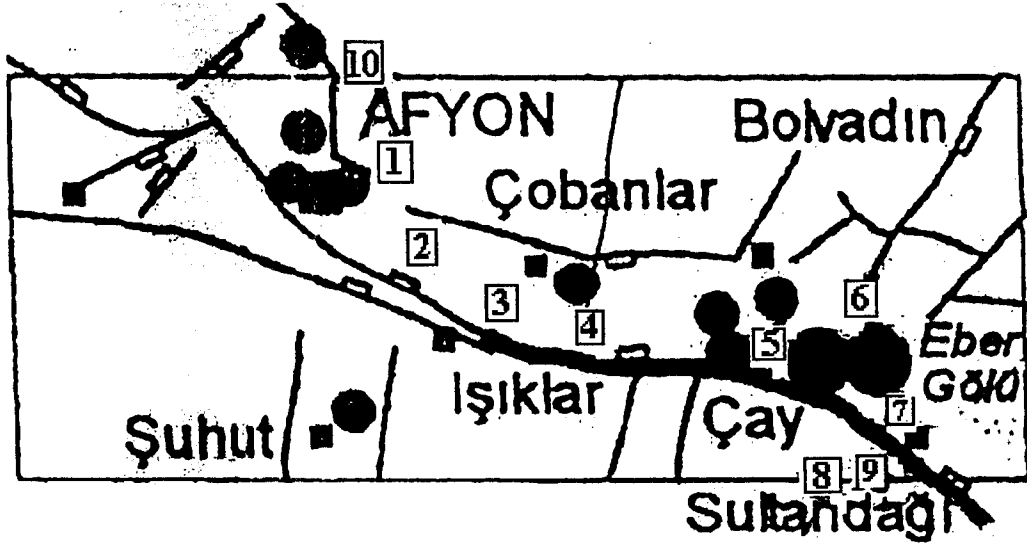
4.1. İncelenen Su Kaynakları

Su örnekleri Afyon fay hattı üzerinde bulunan bir kısmı çeşme bir kısmı ise Devlet Su İşlerinin açmış olduğu sondaj kuyularından alınmıştır. Bu kaynaklardan bazıları içme suyu olarak kullanılmaktadır. Numuneler Ağustos 2003 ile Şubat 2004 tarihleri arasında, 7 aylık süre içinde 10 farklı noktadan 10 farklı tarihte alınmıştır. İncelenen kaynakların isimleri Çizelge 4.1’de gösterilmiştir:

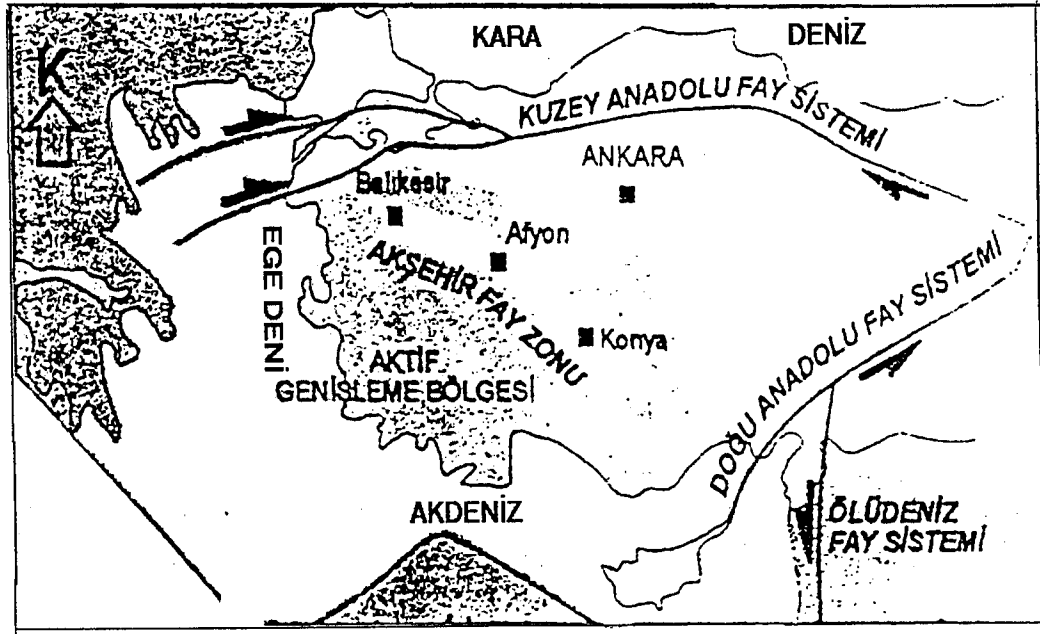
Çizelge 4.1 : Su numunelerin alındığı kaynakların numaralandırılması

Numunelerin alındığı kaynaklara verilen numaralar	Kaynakların buldukları bölgeler
1	Çeşme
2	Devlet Su İşleri Arıtma tesisleri
3	Çeşme
4	Kaplıca suyu (Devlet Su İşleri 36610 nolu sondaj kuyusu)
5	Çay
6	Çay
7	Çay (Devlet Su İşleri 49601 nolu sondaj kuyusu)
8	Kuyu (Devlet Su İşleri 49602 nolu sondaj kuyusu)
9	Kuyu
10	Kuyu

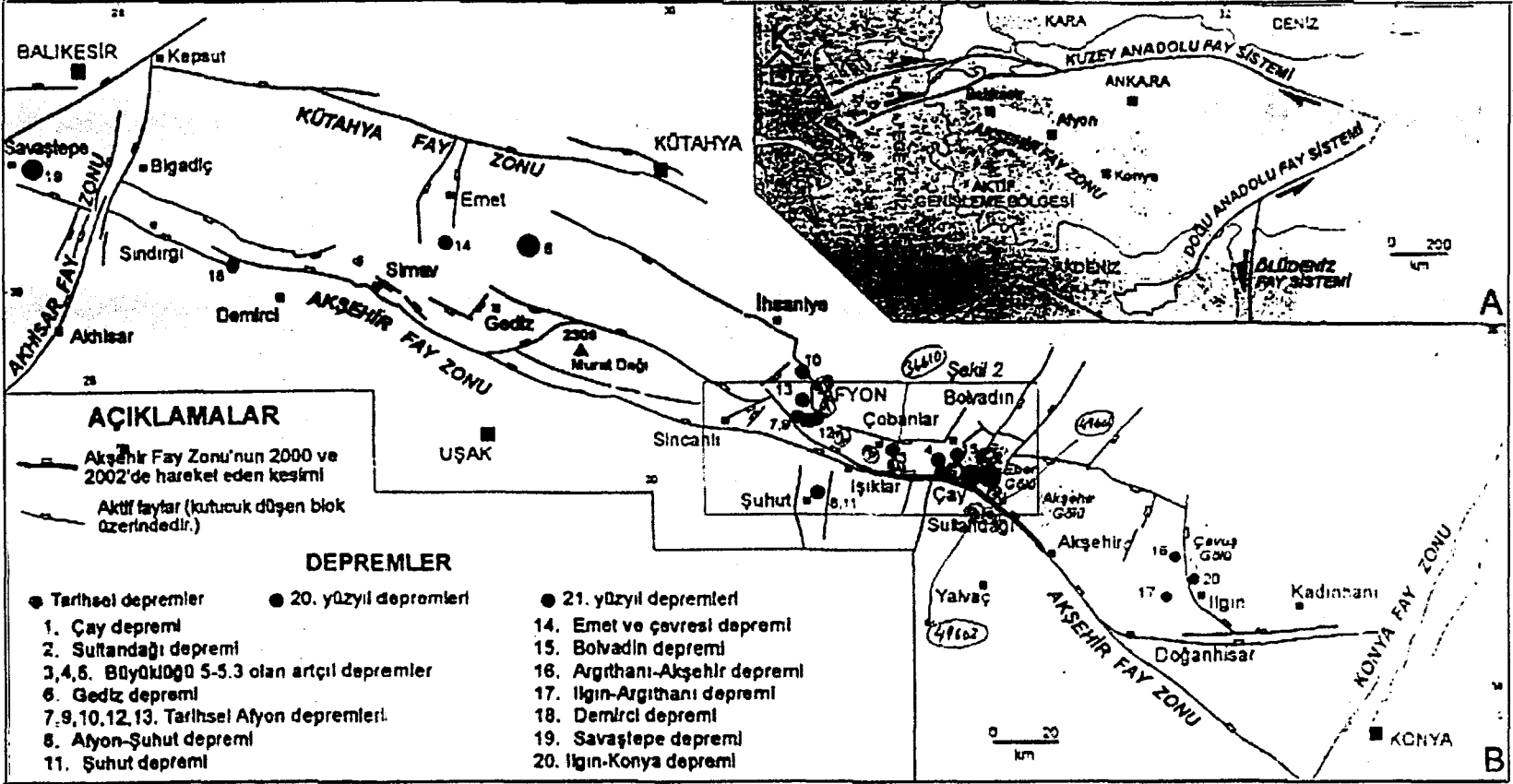
İncelenen kaynakların bulunduğu noktalar Şekil 4.1’de, bölgenin Türkiye coğrafyasındaki yeri Şekil 4.2 ve 4.3’te görülmektedir.



Şekil 4.1 : Akşehir Fay hattı üzerinde numunelerin alındığı kaynakların konumu (1'den 10'a kadar olan numaralar çalışmada su numunelerinin alındığı kaynakları göstermektedir)



Şekil 4.2 : Çalışmada numunelerin alındığı kaynakların yakınında bulunan Akşehir fay hattının Türkiye içerisindeki konumu.



Şekil 4.3 : Akşehir fay zonu ve bu zon içinde gelişmiş önemli depremleri gösteren yalnızlaştırılmış harita.

4.2. Numune Alımı

Numuneler Devlet Su İşlerinin açmış olduğu sondaj kuyularından alınmıştır. Bu kuyuların her birinin derinliği 150 m'dir. Kaynaktan örnek alınmasına geçmeden önce su, temiz su elde edilinceye kadar akıtılmıştır. Temiz su 0,5 lt'lik plastik şişelere konulmuştur. Radonun atmosfere kaçmasını önlemek için şişeler hemen kapatılmıştır. Kaynak civarında bulunan jeolojik yapılardaki suyun, kaynaktan uzak mesafelerde bulunan suların daha çok radon konsantrasyonu üreteceği tahmin edilir (Drane ve ark. 1997). Bu nedenle numunelerin kaynaklara yakın yerlerden alınmasına gayret edilmiştir. Numuneler alındıktan sonra İstanbul Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi (ÇNAEM)'e götürülmüştür. Burada numuneler, Packard Tri-Carb 2770 TRISL marka, A-277001 model sıvı sintilasyon sayıcısında incelenmiştir. Su numuneleri 7 ay boyunca, aynı metotla toplanmış ve incelemeye tabi tutulmuştur. ÇNAEM laboratuvarında numuneler sıvı sintilasyon cihazında ölçüme alınmadan önce sayıma hazır hale getirilmiştir.

4.3. Numune Hazırlanması

Su numunelerinin sıvı sintilasyon cihazında ölçme işlemine alınabilmeleri için, sıvı sintilasyon cihazında kullanılan PACKARD 22 mm vial cam şişelere konulmuştur. Sıvı sintilasyon cihazının sayım esnasında su numunesinden radon miktarını ölçebilmesi için radon kokteyli kullanılmaktadır. Bir adet cam şişeye ilk aşamada 10 mlt'lik radon kokteyli, ikinci aşamada ise plastik şişelerle getirilen su örneklerinden 10 mlt konulmuştur. Deneyde kullanılan cam şişelerinin bir kesiti Şekil 4.4'de gösterilmiştir.



Şekil 4.4 : Sayım şişesi (20 mlt'lik Packard cam şişe)

Sıvı sintilasyon cihazının sağlıklı ölçümler alabilmesi için cam şişenin içinde hava kabarcıklarının oluşmaması ve şişenin kenarlarına radon kokteyli sıçramaması gerekir. Bu yüzden kokteylin şişeye alımı dikkatli bir şekilde yapılmıştır. Cam şişenin içinde küçük bir hava kabarcığı oluşumu veya şişe çeperlerine radon kokteyli sıçratıldığı görüldüğünde bu şişe atılarak işlem başka bir şişede tekrarlanmıştır. 20 mlt'lik cam şişelere radon kokteylinin alınmasından sonra ikinci aşama olan toplanmış numunelerden su örneklerinin bu cam şişelere aktarılmasına geçilmiştir. Plastik şişelerde bulunan su örneklerinin 20 mlt'lik cam şişelere alınması tek kullanımlık şırıngalar yardımıyla yapılmıştır. Şırınga çekilecek sıvı miktarı ayarlanabilen ve her bir işlemde ucu değiştirilebilen ölçekli bir şırıngadır. Su çekilme işlemine geçmeden önce şırınga boş iken birkaç kez çekilip havası alınmaya çalışılmıştır. 10 mlt'ye ayarlanan şırınga, 0,5 lt su numunesinin bulunduğu plastik şişeye daldırılmıştır. Bu işlem esnasında da tıpkı radon kokteylinde olduğu gibi hava kabarcığı oluşmaması ve sıçrama olmaması çok önemlidir. Bu nedenle bu işlemlere geçmeden önce el alışkanlığının olması için saf su kullanılarak şırınga ile el deneyimi kazanılmıştır. Dikkatli bir şekilde su şırıngaya çekildikten sonra şırınganın ucu radon kokteylinin bulunduğu 20 mlt'lik şişenin tam dibine yerleştirilmiştir. Şırıngaya alınmış olan suyun radon kokteyli bulunan şişeye aktarılması esnasında iki sıvı bir araya geldiğinden, hava kabarcığı oluşmaması için büyük dikkat gösterilmiştir. Şırınga yavaş bir şekilde ve hep aynı hızda radon kokteylinin dibine verilmiştir. İşlem tamamlandıktan sonra radon kokteylinin kaçmasını önlemek için çok hızlı bir şekilde 20 mlt'lik cam şişenin kapağı kapatılmıştır. Böylece numuneler sıvı sintilasyon cihazında ölçüme hazır hale getirilmiştir.

4.4. Sıvı Sintilasyon Cihazında Sayım

Sıvı sintilasyon cihazında radon ölçümü için bir protokol hazırlanmıştır. Sıvı sintilasyon cihazının çalıştırıldığı bilgisayar programından protokol ismi verilme kısmı Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da gösterilmiştir.

```

Edit Protocol --- Protocol: 3 --- Name: Wipe Test

Edit Protocol 3: 3
F1-Exit Edit

Data Reduction:
F2-Protocol Id (Modified)
F3-Count Conditions (Modified)
F4-Sample Order (Default)

Data Output:
F5-Printer Output (Default)
F6-RS232 Output (Default)
F7-Disk File Output (Default)
F8-Data Cell Format (Default)
F9-Select Application (Default)

F10-Worklist

```

Şekil 4.5 : Bilgisayar programında Edit protokol adının (12) verilmesi

```

aF1-Help aF2-SC Control aF3-Decay aF4-SpectraView aF5-Nuclides aF6-Move

Protocol #: Protocol Name:
Spr Edit Protocol --- Protocol: 27 --- Name: Alpha Beta Assay
Count Conditions --- Protocol: 27 --- Name: Alpha Beta Assay
Count Time? 5.00
Cycles? 1
Data Mode? ALPHA/BETA
Radionuclide? MANUAL
Count Termination? No
Background Subtract? No
Quench Indicator? SIS
ES Terminator? Count
Half Life Correction? No
Special Conditions? No

F1-Exit F2-CPM F3-ALPHA/BETA F4-SINGLE DPM F5-MIAL DPM
F6-PS DPM F7-RT DPM F8-SFC F9-Coded F10-etc

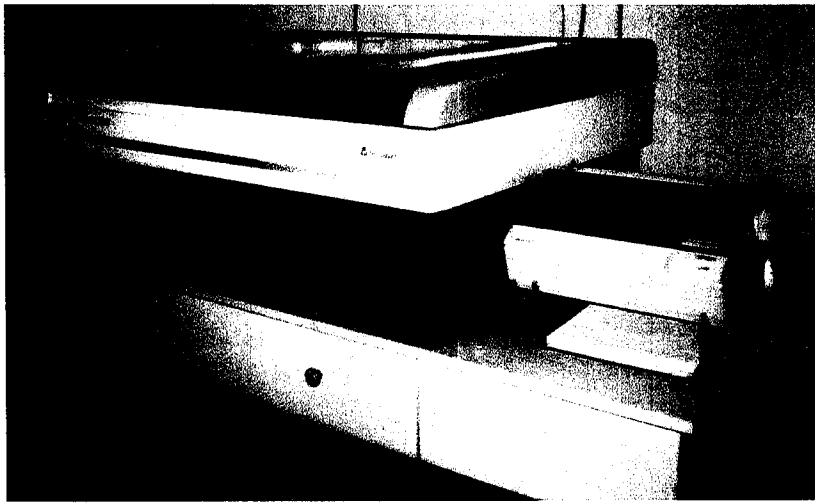
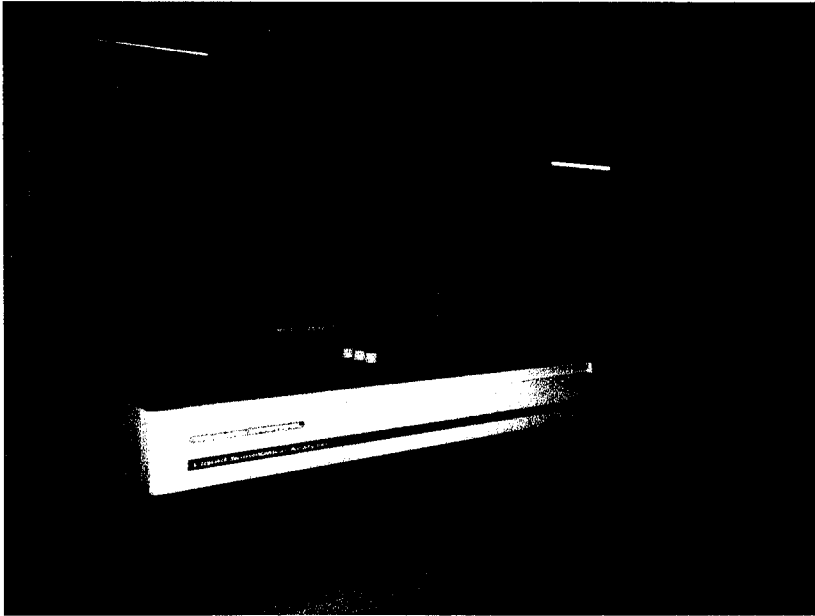
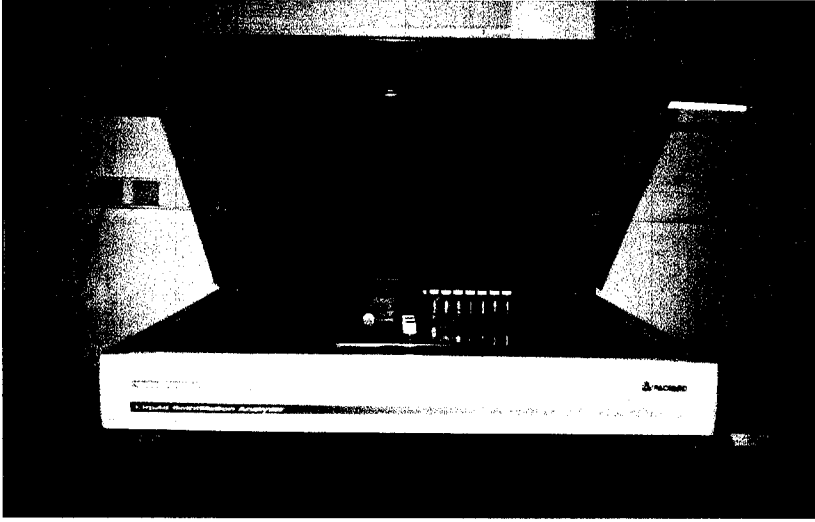
F1-Edit Prot. F2-Printstat F3-User Pgm. F4-IP0 F5-Replay
F6-Print Prot. F7-Histogram F8-Spect Map F9-Spect Unf F10-etc

```

Şekil 4.6 : Bilgisayar Programında Radon ölçümünün adlandırılması

Numunelerin isimleri ve alındıkları tarihler programa girildikten sonra sıvı sintilasyon cihazında bir şişenin sayım süresi programa girilmiştir. Bir şişe ne kadar fazla sayıma uğratılırsa istatistiksel olarak ortalama alınacağı için o kadar sağlıklı sonuç alınır. Cihazın kaç kez dönerek sayımı tekrarlayacağı komutu çalışmamızda 4 kez olarak belirlenmiş ve programa girilmiştir. Böylece sıvı sintilasyon cihazı bir numuneyi toplam 400 dk. boyunca sayarak değerleri yazıcıya aktarmıştır.

Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi'nde çalışmada kullanılan sıvı sintilasyon cihazının fotoğrafları Şekil 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4.7 : Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi'nde kullanılan sıvı sintilasyon cihazının çeşitli açılardan fotoğrafları

4.4.1. Sıvı Sintilasyon Cihazı

4.4.1.1. Sintilasyon Dedektörlerinin Prensipleri:

İyonlayıcı radyasyonların bir ortamda ürettikleri sintilasyon ışımalarının kaydedilmesi yöntemiyle dedeksiyonları, bilinen en eski yöntemlerden biridir. Örnekler, içinde bir yada daha fazla fosfor içeren ve sintilatör olarak adlandırılan bir çözücü ile karıştırılır. Örnek tarafından yayınlanan radyasyon enerjisi, sintilatöre transfer edilir. Bu enerji foton enerjisi olarak yayınlanır ve ışık parıltıları oluşur. İdeal bir sintilasyon maddesinin özellikleri şunlardır:

- 1) Yüklü parçacıkların kinetik enerjisini yüksek sintilasyon verimiyle dedekte edilebilir ışığa çevirir.
- 2) Üretilen ışık, parçacıkların enerjisiyle orantılıdır.
- 3) İyi ışık toplanımı için ortam saydam olmalıdır.
- 4) Oluşan lüminesansın bozunma zamanı, hızlı sinyal pulslarının üretilebileceği kadar kısa olmalıdır.
- 5) Madde iyi optik kalitede olmalıdır.

4.4.1.2. Sintilatör Tipleri

- 1) Organik Kristaller (Anthracene, Stilbene)
- 2) Sıvı Organik Solüsyonlar
 - a) *Sıvı sintilasyon çözücüleri* (ksilen, toluen gibi alkil benzenler, eterler, anisol ve 1,4 dioksan)
 - b) *Sıvı sintilasyon katıları* (PPO, Butil-PBD, POPOP)
- 3) Plastik Sintilatörler
- 4) İnce Film Sintilatörler
- 5) İnorganik Sintilatörler (NaI(Tl), ZnS(Ag), CsF)

4.4.1.3. Sıvı Sintilasyon Sayıcısının Önemi

Sıvı sintilasyon sayıcısı (Liquid Scintillation Counter = LSC), radyoaktif element konsantrasyonu çok düşük olan radyoaktif elementlerin ölçümünde kullanılır. Bu nedenle ölçümlerin doğruluğuna, cihazın background katkısı çok önemlidir. Son yıllarda "low level" diye adlandırılan çok düşük aktiviteli

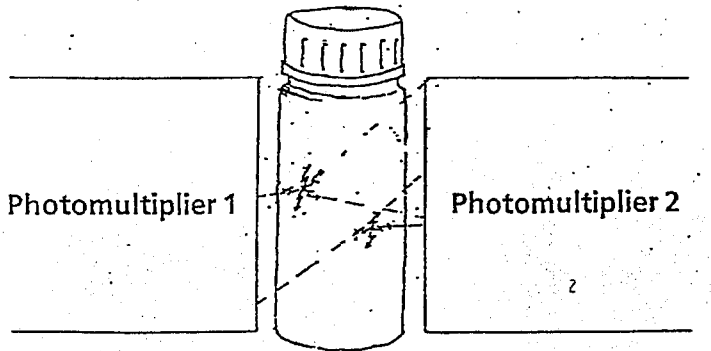
radyoaktif elementleri, yüksek verimle değerlendirebilecek cihazlar geliştirilmiştir. Sıvı sintilasyon cihazları, çok kanallı analizörler (Multi Channel Analyser = MCA) ve mikrobilgisayarlar ile birleştirilerek spektrometrik ve çok detaylı bilgi sunabilme yeteneğine sahip hale getirilmişlerdir. Bu nedenle, çevresel analizler için diğer cihazlardan çok daha fazla önem kazanmışlardır.

4.4.1.4. Sıvı Sintilasyon Sayıscısının Kullanım Alanları

- 1) Doğal radyoaktif element serilerinin ölçümünde; Radium (Ra), Uranyum (U), ^{210}Pb , ^{222}Rn , ^{231}Pa , ve ^{234}Th .
- 2) Nükleer güç endüstrisi ile çevreye dağılan genellikle beta yayımlayıcısı olan radyoaktif elementlerin ölçümünde: ^3H , ^{14}C , ^{35}S , ^{55}Fe , ^{85}Kr , $^{89,90}\text{Sr}$, ^{99}Tc ve ^{241}Pu .
- 3) Nükleer serpintilerle havaya yayılan toplam alfa aktivitelerinin ve yüzey kirliliğinin belirlenmesinde.
- 4) Radyokarbon ile tarihleme.
- 5) Yeraltı sularında ve çevrede ^3H ölçümlerinde.

4.4.1.5. Ölçüm Tekniği ve Sayım Şişeleri

Sıvı sintilasyon sayımlarında düşük K-40 içeren cam kaplar, plastik şişeler kullanılmaktadır (Şekil 4.8). Kuvars cam kaplar düşük Background'a sahiptir. Ancak çok pahalıdır. Plastik şişeler, rutin analizlerde cama göre daha düşük backgrounda sahip olması ve çok daha ucuz olması nedeniyle tercih edilirler.



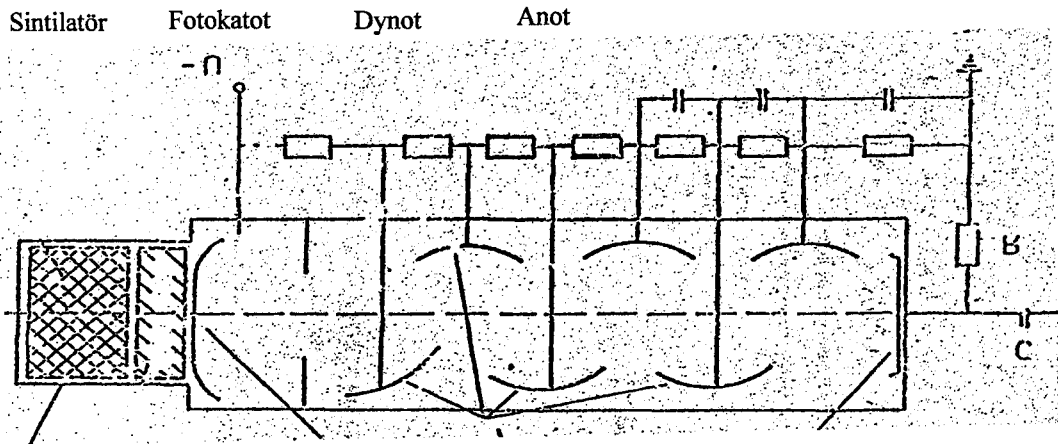
Şekil 4.8 : Sıvı sintilasyon sayımlarında düşük K-40 içeren cam kaplar

4.4.1.6. Fotoçoğaltıcı Tüpler

Fototüpler ışık parıltılarını elektrik pulslarına dönüştüren elektronik tüplerdir (Şekil 4.9). Sintilatör içinde oluşan fotonlar, fotoçoğaltıcı tüpün fotokatoduna ulaştıklarında düşük-enerjili elektronlara çevrilirler. Elektronlar dinotlar yardımıyla çoğalarak, ölçülebilir elektrik sinyallerine dönüştürülür. Dinotlar, fotoçoğaltıcı tüp içinde fotoelektronların, verimli çarpışma geometrisinde yerleştirilmişlerdir. İdeal bir çoğaltıcı (amplifier) görevinde bulunurlar. Bir sintilasyon pulsu 107-1010 elektron üretir ve sintilasyon olayının, elektrik sinyali olarak alınabilmesi için yeterli elektron sayısına ulaştırır. Bu yük anotta toplanarak fotoçoğaltıcı tüpün çıkış yükünü oluşturur.

Bir sıvı sintilasyon sayıcısı bir fotoçoğaltıcı tüp, bir puls amplifikatörü, bir sayıcı ve kaydedici sistemden oluşur. Bugün bu sistemler çift fotoçoğaltıcı tüp, çok kanallı analizörler ve bilgisayarlı sistemlerden oluşmaktadır (kaydeden, hesaplayan, spektrumları çizen).

Çift tüp kullanmak farklı enerjilerin elektriksel pulsları arasında ayırma sağlayacağından sadece radyoaktif elementten gelen pulsların yüksek bir verimle, gürültü pulslarından ve diğer izotop pulslarından ayrılmış olarak sayılmasına olanak sağlar. Ayrıca aynı örnek içinde iki yada daha fazla radyoaktif izotop birbirinden bağımsız olarak sayılabilir.



Şekil 4.9 : Fotoçoğaltıcı tüp şeması

4.4.1.7. Sıvı Sintilasyon Tekniğinin Üstünlükleri

- 1) Radyoaktif elementler, uygun bir sintilatör içinde homojen bir dağılım içinde buldukları için 4Π sayım geometrisinde sayılırlar.
- 2) Self-absorbsiyon riski yoktur.
- 3) Alfa ve beta radyasyonunun sayım verimi % 100' e yakındır.
- 4) Örnek hazırlama kolay ve çabuktur.
- 5) Son 20 yıldır özellikle beta sayımlarında çok daha fazla kullanılmaktadır.
- 6) Aynı örnek içinde aynı anda toplam alfa ve beta radyoaktivite değeri saptanabilmektedir.
- 7) Alfa sayımlarında alfa radyasyonuna beta ve gamalarda karıştığından alfa sayımları için sıvı sintilasyon tekniği çok fazla kullanılmamaktadır. Sayım cihazlarının geliştirilmesi ve bazı analitik yöntemlerin uygulanması ile bu problemin çözümüne gidilmektedir. Alfa yayınlayıcılar için ölçümlerden önce alfa yayınlayıcıları ayırmak için kimyasal ayırım yöntemleri kullanılmaktadır.
- 8) LSC 20 mL'lik örnek kapları kullanılarak 408 örnek, 7 mL'lik örnek kapları kullanılarak da 720 örneği peşpeşe değerlendirebilme kapasitesine sahiptir.
- 9) Farklı sayım protokolları kullanılarak farklı örnek tiplerinde (su, hava, idrar, toprak gibi) farklı radyoaktivite değerlendirmeleri yapılabilir (Şekil 4.10).

4.4.1.8. Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi Sağlık Fiziki Bölümünde Sıvı Sintilasyon Cihazı ile Yapılan Çalışmalar

- 1) Karadeniz projesi çerçevesinde Karadeniz'den gelen su örneklerinde 3H ölçümleri
- 2) Sr-90 ölçümleri
- 3) Su örneklerinde toplam alfa/beta radyoaktivite ölçümleri
- 4) Radon ölçümleri

aF1-Help	aF2-SC Control	aF3-Decay	aF4-SpectraView	aF5-Nuclides	aF6-Move
Protocol #: 84			Protocol Name: Peptidoglycan Assay		
SN	Time		CPM	2S%	
2	1.04	Region A:	11200.0	2.95	
		Region B:	11815.0	3.01	
		Region C:			
PN	Protocol Name	Status	PN	Protocol Name	Status
1-			2-	Quench Standards	
3-	Wipe Test		4-	Peptidoglycan Assay	
5-	Radon Assay		6-	Carbon Dating	
7-			8-		
9-			10-		
11-H-3 CPM			12-C-14 CPM		
13-H-3 DPM			14-C-14 DPM		
15-H-3/C-14 DPM			16-		
17-			18-		
F1-Edit Prot.	F2-Preostat	F3-User Pgm.	F4-IPN	F5-Replay	
F6-Prt.Prot.	F7-Histogram	F8-Spect Map	F9-Spect Unf	F10-etc	

Edit Protocol --- Protocol: 3 --- Name: Wipe Test

Edit Protocol #: 3
F1-Exit Edit

Data Reduction:

F2-Protocol Id (Modified)
F3-Count Conditions (Modified)
F4-Sample Order (Default)

Data Output:

F5-Printer Output (Default)
F6-AS232 Output (Default)
F7-Disk File Output (Default)
F8-Data Cell Format (Default)
F9-Select Application (Default)

F10-Worklist

aF1-Help	aF2-SC Control	aF3-Decay	aF4-SpectraView	aF5-Nuclides	aF6-Move
Protocol #: 27			Protocol Name:		
Spr Edit Protocol --- Protocol: 27 --- Name: Alpha Beta Assay					
Count Conditions --- Protocol: 27 --- Name: Alpha Beta Assay					
Count Time?	5.00				
Cycles?	1				
Data Mode?	ALPHA/BETA				
Radionuclides?	MANUAL				
Count Termination?	No				
Background Subtract?	No				
Quench Indicator?	SIS				
ES Terminator?	Count				
Half Life Correction?	No				
Special Conditions?	No				
F1-Exit	F2-CPM	F3-ALPHA/BETA	F4-SINGLE DPM	F5-DUAL DPM	
F6-FS DPM	F7-BT DPM	F8-SPC	F9-Coded	F10-etc	
F1-Edit Prot.	F2-Preostat	F3-User Pgm.	F4-IPN	F5-Replay	
F6-Prt.Prot.	F7-Histogram	F8-Spect Map	F9-Spect Unf	F10-etc	aF6-Move

Şekil 4.10 : Sıvı sintilasyon cihazında kullanılan bilgisayar programında α ve β sayım protokolu

4.5. Sıvı Sintilasyon Cihazı ile Sudaki Radon-222'nin Hesaplama Metodu

4.5.1. Cihazın Verimi

4.5.1.1. Prosedür

Ölçüm verimini saptamak amacıyla, aktivitesi belli olan eşit hacimde Ra-226 standart çözeltisi ile damıtılmış su kullanılarak sıvı sintilasyon cihazı şişelerine eşit hacimde numune hazırlanır. Her şişede sulandırılmış çözeltinin toplam hacmi 10 ml olmalıdır. 10 ml organik sintilasyon çözeltisi eklenir ve şişenin kapağı sıkıca kapatılır. Bu şişeler radyum-226 ve radon 222 arasında denge sağlanması için en az 25 gün karanlık bir yerde bekletilir.

Periyodun sonunda, kalibrasyon şişeleri çalkalanır ve sayımdan önceki 3 saatlik periyoda bırakılır. Sulandırılmış fazda kalan radyum-226, organik sintilasyon cihazının sayım oranına önemli bir katkıda bulunmaz.

Sıvı sintilasyon cihazında her bir şişedeki sayım aşağıdaki şekilde hesaplanır.

4.5.1.2. Verimin Hesaplanması

Tek bir kalibrasyon çözeltisi için, verim hesabı (4.1) denklemi ile verilir:

$$E = \frac{R - R_0}{A_s} \quad (4.1)$$

Burada,

E = Radyum-226 kalibrasyon çözeltisinin saniyedeki sayımında sistemin sayım verimidir.

R = Kalibrasyon çözeltisinin (radon-222 ve bozunum ürünleri) saniyedeki sayım oranıdır.

R₀ = Boş sayım örneğinin (saf su ile hazırlanmış numune) saniyedeki sayım oranıdır.

A_s = 1 Becquerel de, kalibrasyon çözeltisindeki radyum-226 aktivitesidir.

4.5.2. Örnekteki Radon-222'nin Saptanması

Bir su örneğindeki radon-222 konsantrasyonunun belirlenmesi için aşağıdaki denklem kullanılır:

$$c_s = \frac{(R - R_0) \exp(\lambda \Delta t)}{V \times E} \quad (4.2)$$

Burada,

R = Örneğin saniyedeki sayım oranıdır.

R₀ = Boş sayım şişelerinin (Background = saf su kullanılarak hazırlanmış numuneler) saniyedeki sayım oranıdır.

λ = Radon-222'in bozunum sabitidir (0,182 gün⁻¹).

V = Hazırlanan örneklerin hacmi (L).

Δt = Örneklerin toplanması ve sayıma başlanması arasında geçen süre.

E = Cihazın verimi

4.5.3. Aktif Konsantrasyondaki Standart Sapma

Background radyasyonun ve radyoaktif ürünlerin doğal istatistikleri nedeniyle aktif konsantrasyondaki standart sapma hesaplanır. Eşitlik aşağıdaki gibidir:

$$S_c = \frac{\sqrt{\left(\frac{R}{t}\right) + \left(\frac{R_0}{t_0}\right)}}{V \times E \exp(-\lambda \Delta t)} \quad (4.3)$$

Burada,

S_c = Becquerel per litredeki C_s'nin standart sapması.

E = Cihazın verimi.

R = Örneğin saniyedeki sayım oranıdır.

R₀ = Boş sayım şişelerinin (Background = saf su kullanılarak hazırlanmış numuneler) saniyedeki sayım oranıdır.

λ = Radon-222'in bozunum sabitidir (0,182 gün⁻¹).

V = Hazırlanan örneklerin hacmi (L).

t = Örneğin saniyedeki sayım periyodu.

t_0 = Boş şişenin (Background = saf su kullanılarak hazırlanmış numune) saniyedeki sayım periyodu.

5. DENEYSEL BULGULAR

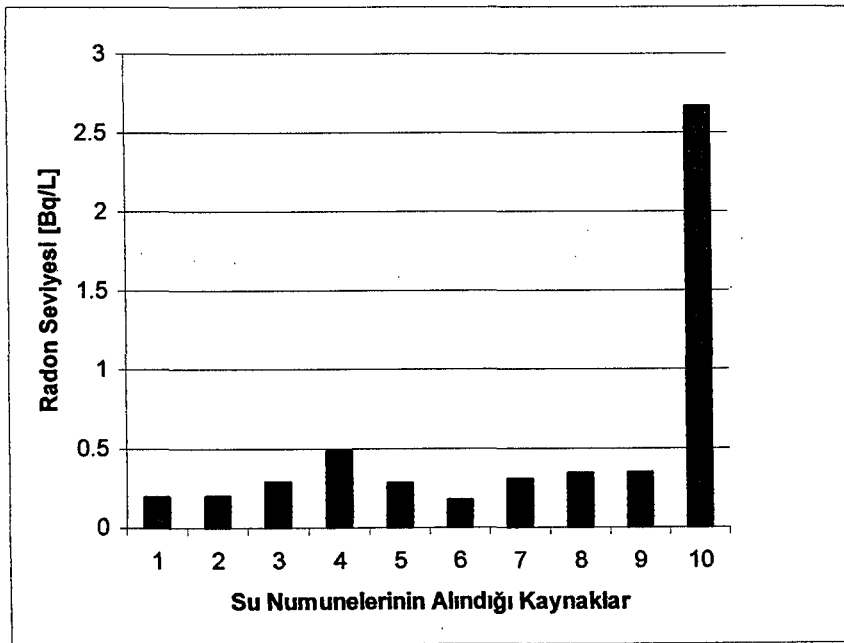
5.1. Verilerin Değerlendirilmesi

5.1.1. Aynı numune alım zamanı için kaynakların radon seviyelerinin incelenmesi.

4 Ağustos 2003 tarihinde alınan numunelerden elde edilen radon konsantrasyonlarının numunelerin alındığı kaynaklara göre değişimi Çizelge 5.1'de, bu değişimi ifade eden grafik ise Şekil 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1 : İncelenen kaynakların 4 Ağustos 2003 tarihi itibarıyla radon seviyeleri

04.08.2003	
Numunelerin Alındığı Kaynaklar	Radon (Bq/L)
1	0,197173
2	0,197917
3	0,287202
4	0,484375
5	0,282738
6	0,174851
7	0,305804
8	0,340402
9	0,344866
10	2,665551

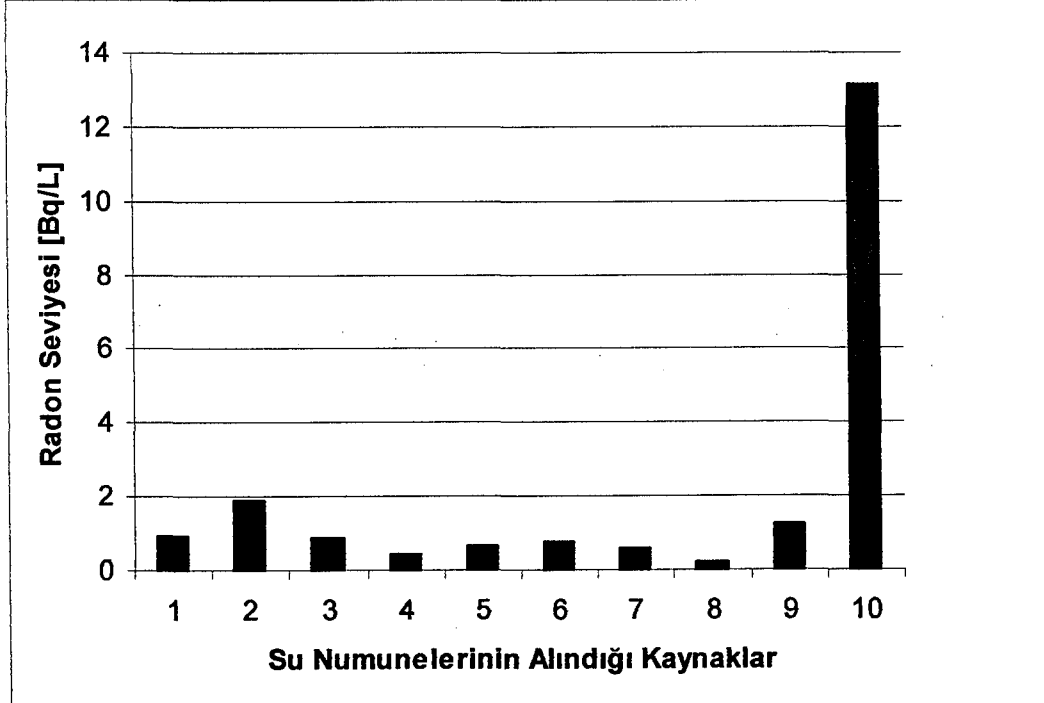


Şekil 5.1 : İncelenen kaynakların 4 Ağustos 2003 tarihi itibarıyla radon seviyeleri

14 Ağustos 2003 tarihinde alınan numunelerden elde edilen radon konsantrasyonlarının numunelerin alındığı kaynaklara göre değişimi Çizelge 5.2’de, bu değişimi ifade eden grafik ise Şekil 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2 : İncelenen kaynakların 14 Ağustos 2003 tarihi itibariyle radon seviyeleri

14.08.2003	
Numunelerin Alındığı Kaynaklar	Radon (Bq/L)
1	0,940104
2	1,881324
3	0,854539
4	0,425967
5	0,656622
6	0,764509
7	0,615699
8	0,219494
9	1,263765
10	13,1157

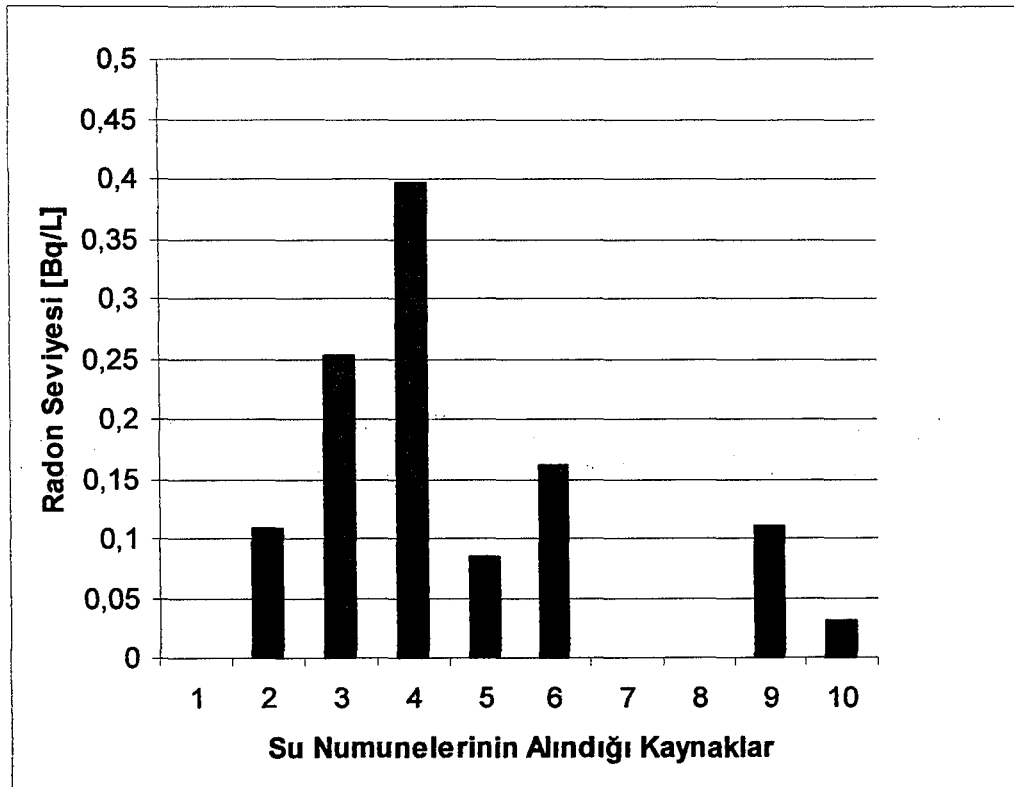


Şekil 5.2 : İncelenen kaynakların 14 Ağustos 2003 tarihi itibariyle radon seviyeleri

29 Ağustos 2003 tarihinde alınan numunelerden elde edilen radon konsantrasyonlarının numunelerin alındığı kaynaklara göre değişimi Çizelge 5.3’de, bu değişimi ifade eden grafik ise Şekil 5.3’de verilmiştir.

Çizelge 5.3 : İncelenen kaynakların 29 Ağustos 2003 tarihi itibariyle radon seviyeleri

29.08.2003	
Numunelerin Alındığı Kaynaklar	Radon (Bq/L)
1	-0,04278
2	0,107887
3	0,252976
4	0,396205
5	0,085565
6	0,16183
7	-0,08482
8	-0,0811
9	0,110491
10	0,030506

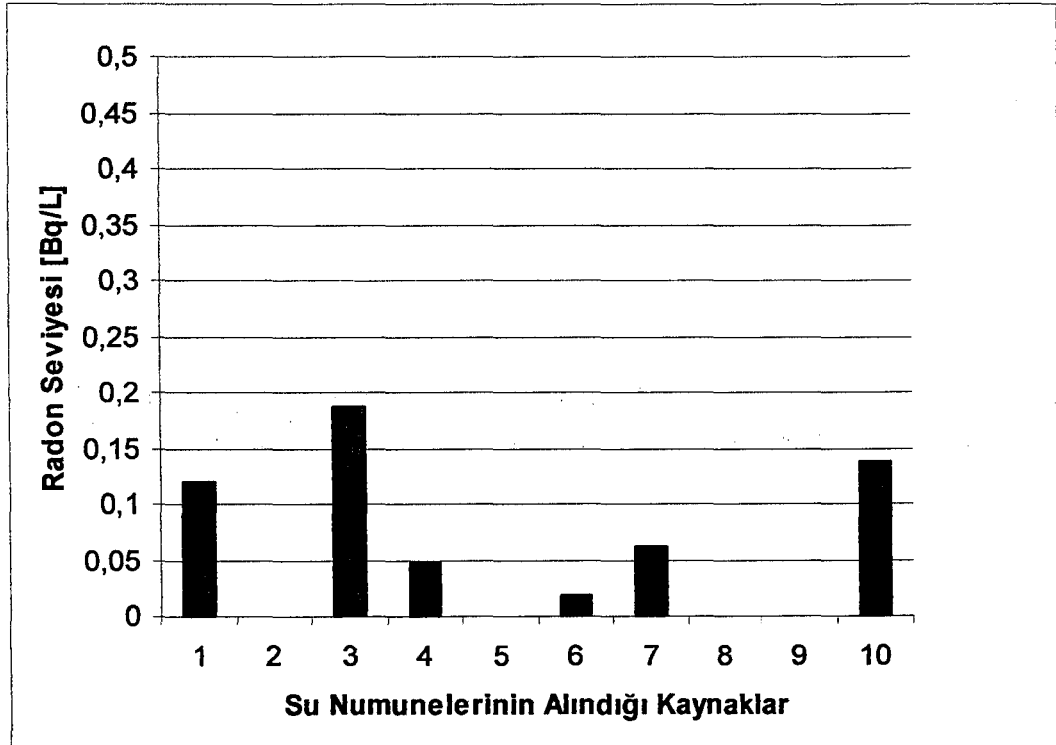


Şekil 5.3 : İncelenen kaynakların 29 Ağustos 2003 tarihi itibariyle radon seviyeleri

05 Eylül 2003 tarihinde alınan numunelerden elde edilen radon konsantrasyonlarının numunelerin alındığı kaynaklara göre değişimi Çizelge 5.4'de, bu değişimi ifade eden grafik ise Şekil 5.4'de verilmiştir.

Çizelge 5.4 : İncelenen kaynakların 5 Eylül 2003 tarihi itibarıyla radon seviyeleri

05.09.2003	
Numunelerin Alındığı Kaynaklar	Radon (Bq/L)
1	0,120908
2	-0,05022
3	0,187872
4	0,047247
5	0
6	0,017485
7	0,062128
8	-0,17857
9	-0,01767
10	0,137649

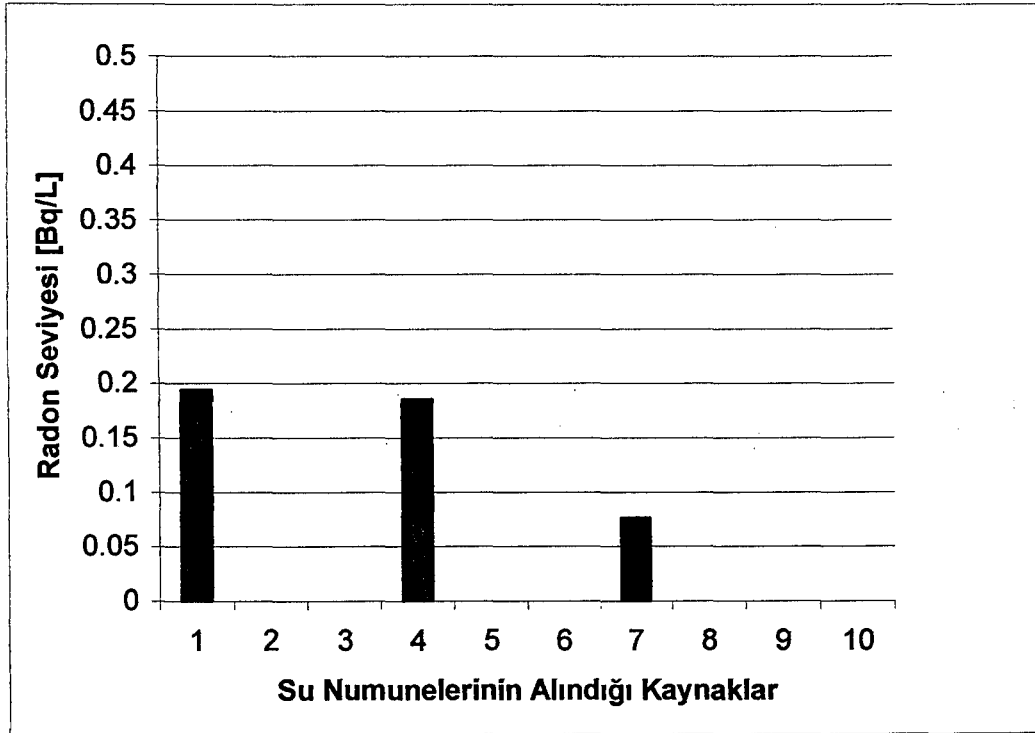


Şekil 5.4 : İncelenen kaynakların 5 Eylül 2003 tarihi itibarıyla radon seviyeleri

18 Eylül 2003 tarihinde alınan numunelerden elde edilen radon konsantrasyonlarının numunelerin alındığı kaynaklara göre değişimi Çizelge 5.5’de, bu değişimi ifade eden grafik ise Şekil 5.5’de verilmiştir.

Çizelge 5.5 : İncelenen kaynakların 18 Eylül 2003 tarihi itibarıyla radon seviyeleri

18.09.2003	
Numunelerin Alındığı Kaynaklar	Radon (Bq/L)
1	0,194196
2	numune yok
3	-0,00372
4	0,185082
5	-0,02976
6	-0,05208
7	0,076265
8	-0,04464
9	-0,17671
10	-0,10417

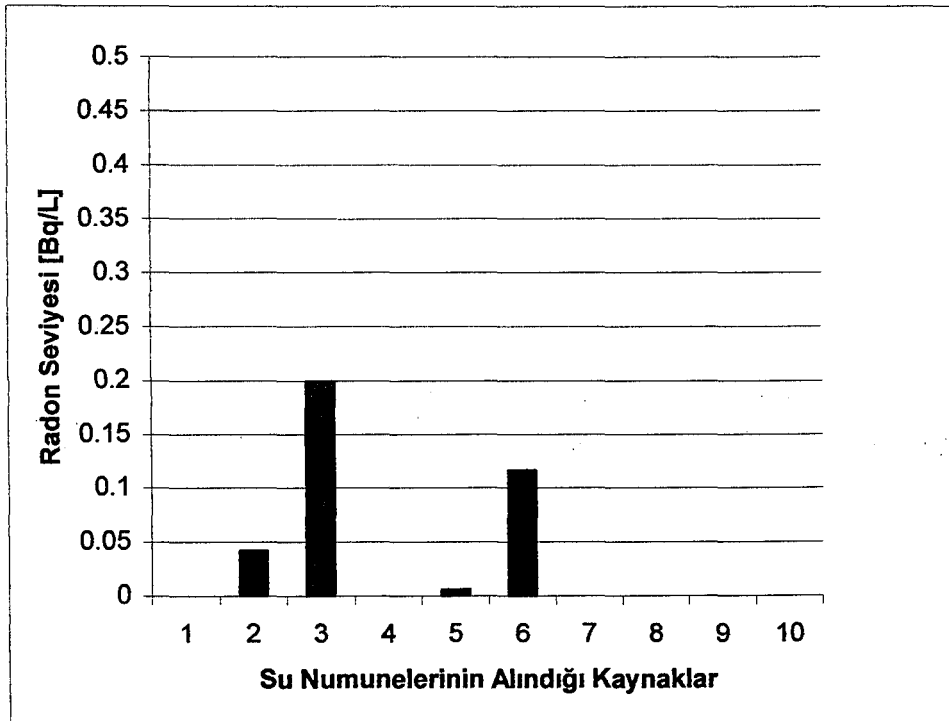


Şekil 5.5 : İncelenen kaynakların 18 Eylül 2003 tarihi itibarıyla radon seviyeleri

26 Eylül 2003 tarihinde alınan numunelerden elde edilen radon konsantrasyonlarının numunelerin alındığı kaynaklara göre değişimi Çizelge 5.6'da, bu değişimi ifade eden grafik ise Şekil 5.6'da verilmiştir.

Çizelge 5.6 : İncelenen kaynakların 26 Eylül 2003 tarihi itibarıyla radon seviyeleri

26.09.2003	
Numunelerin Alındığı Kaynaklar	Radon (Bq/L)
1	-0,19345
2	0,041667
3	0,199033
4	-0,00298
5	0,00558
6	0,116071
7	-0,16183
8	-0,03646
9	-0,10714
10	numune yok

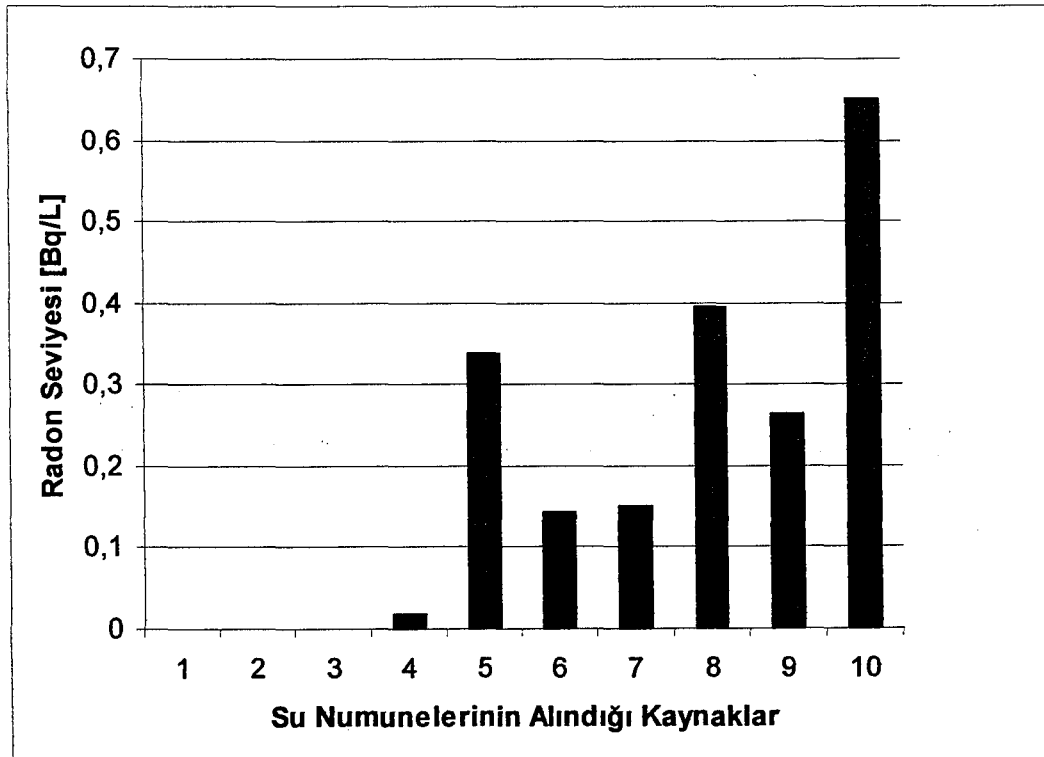


Şekil 5.6 : İncelenen kaynakların 26 Eylül 2003 tarihi itibarıyla radon seviyeleri

13 Ekim 2003 tarihinde alınan numunelerden elde edilen radon konsantrasyonlarının numunelerin alındığı kaynaklara göre değişimi Çizelge 5.7’de, bu değişimi ifade eden grafik ise Şekil 5.7’de verilmiştir.

Çizelge 5.7 : İncelenen kaynakların 13 Ekim 2003 tarihi itibariyle radon seviyeleri

13.10.2003	
Numunelerin Alındığı Kaynaklar	Radon (Bq/L)
1	-0,1432
2	-0,140625
3	-0,0904
4	0,01748
5	0,3384
6	0,143229
7	0,149553
8	0,393229
9	0,26302
10	0,65104

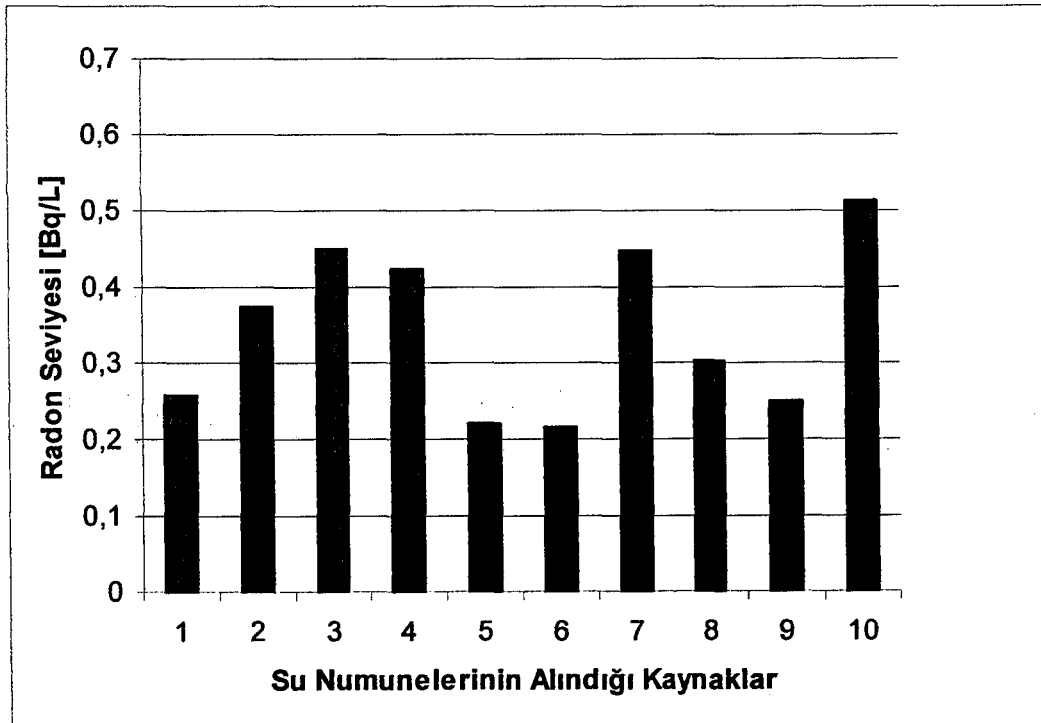


Şekil 5.7 : İncelenen kaynakların 13 Ekim 2003 tarihi itibariyle radon seviyeleri

22 Ekim 2003 tarihinde alınan numunelerden elde edilen radon konsantrasyonlarının numunelerin alındığı kaynaklara göre değişimi Çizelge 5.8’de, bu değişimi ifade eden grafik ise Şekil 5.8’de verilmiştir.

Çizelge 5.8 : İncelenen kaynakların 22 Ekim 2003 tarihi itibariyle radon seviyeleri

22.10.2003	
Numunelerin Alındığı Kaynaklar	Radon (Bq/L)
1	0,25669
2	0,374627
3	0,449032
4	0,424107
5	0,220238
6	0,214657
7	0,447172
8	0,302083
9	0,249255
10	0,512276

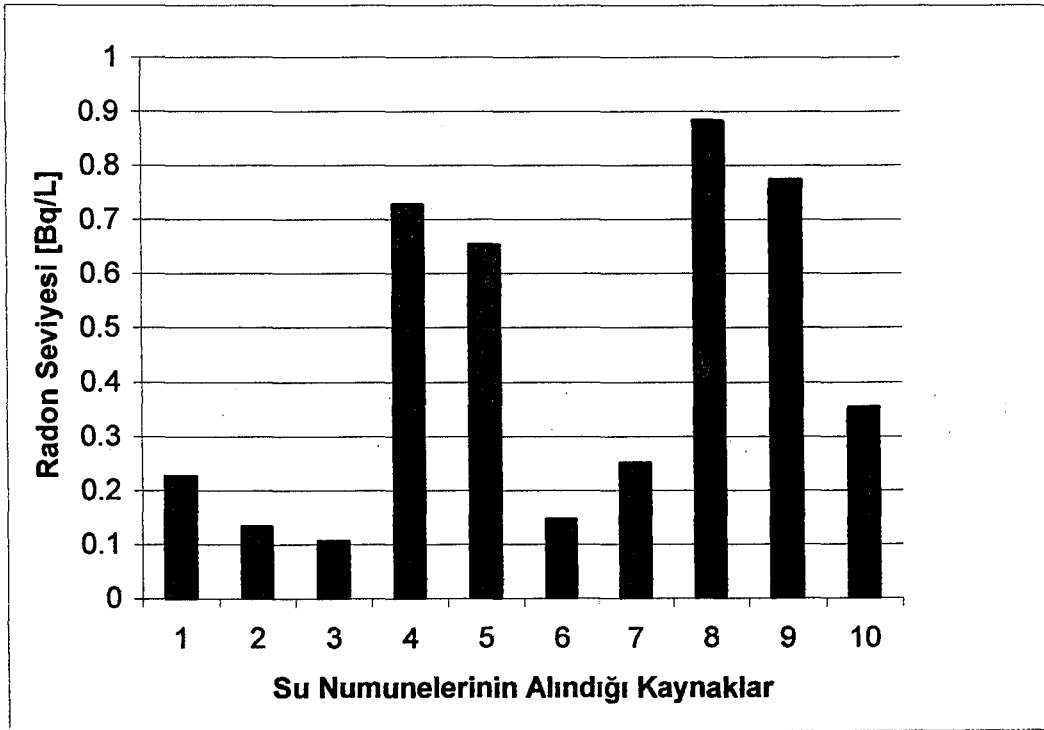


Şekil 5.8 : İncelenen kaynakların 22 Ekim 2003 tarihi itibariyle radon seviyeleri

17 Kasım 2003 tarihinde alınan numunelerden elde edilen radon konsantrasyonlarının numunelerin alındığı kaynaklara göre değişimi Çizelge 5.9'de, bu değişimi ifade eden grafik ise Şekil 5.9'de verilmiştir.

Çizelge 5.9 : İncelenen kaynakların 17 Kasım 2003 tarihi itibarıyla radon seviyeleri

17.11.2003	
Numunelerin Alındığı Kaynaklar	Radon (Bq/L)
1	0,225818
2	0,132812
3	0,106026
4	0,729166
5	0,653645
6	0,145833
7	0,251116
8	0,883556
9	0,773809
10	0,354166

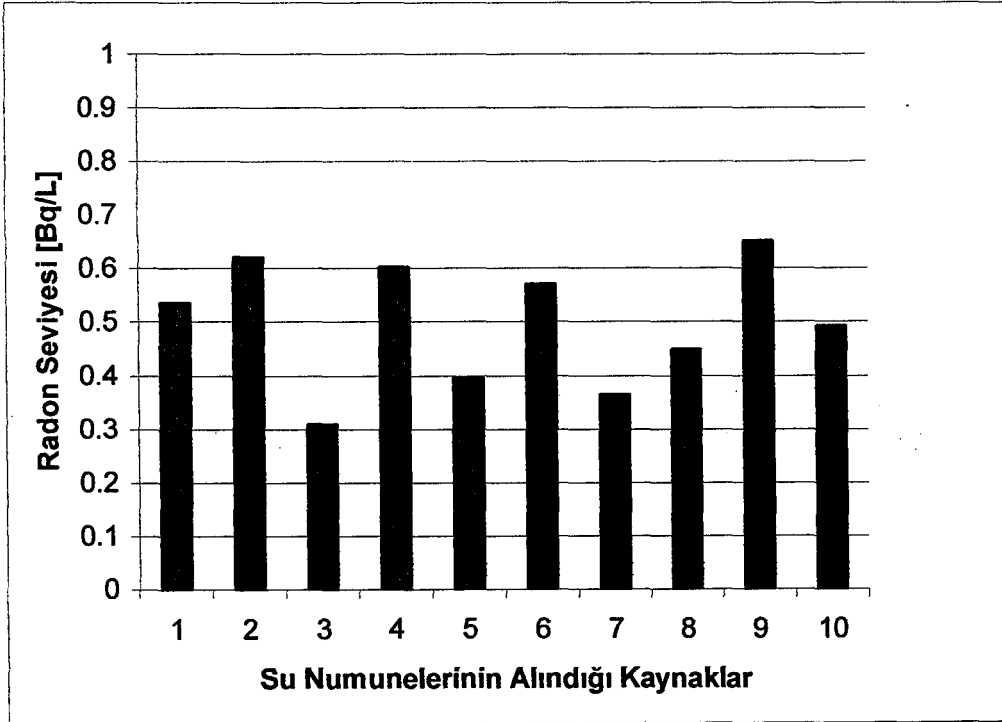


Şekil 5.9 : İncelenen kaynakların 17 Kasım 2003 tarihi itibarıyla radon seviyeleri

25 Şubat 2004 tarihinde alınan numunelerden elde edilen radon konsantrasyonlarının numunelerin alındığı kaynaklara göre değişimi Çizelge 5.10'de, bu değişimi ifade eden grafik ise Şekil 5.10'de verilmiştir.

Çizelge 5.10 : İncelenen kaynakların 25 Şubat 2004 tarihi itibarıyla radon seviyeleri

25.02.2004	
Numunelerin Alındığı Kaynaklar	Radon (Bq/L)
1	0,535714
2	0,62128
3	0,309524
4	0,602679
5	0,396205
6	0,56994
7	0,364583
8	0,449033
9	0,651042
10	0,491815



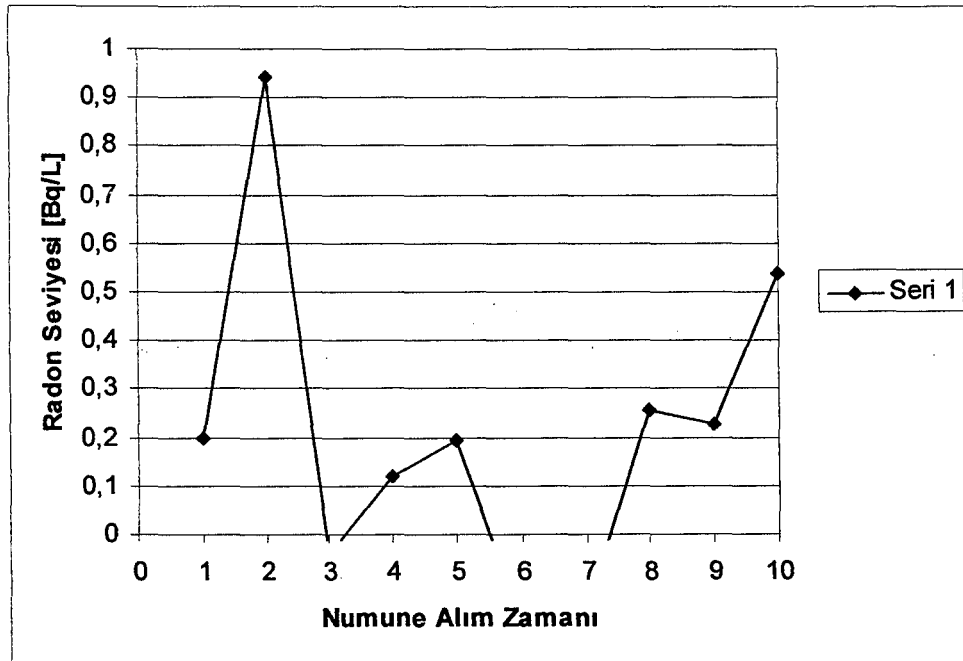
Şekil 5.10 : İncelenen kaynakların 25 Şubat 2004 tarihi itibarıyla radon seviyeleri

5.1.2. Kaynakların 4 Ağustos 2003-25 Şubat 2004 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimlerinin incelenmesi.

4 Ağustos 2003-25 Şubat 2004 tarihleri arasında alınan 1 nolu kaynağın radon konsantrasyonlarının numune alım zamanına göre değişimi Çizelge 5.11’de, bu değişimi ifade eden grafik ise Şekil 5.11’de verilmiştir.

Çizelge 5.11 : 1 Nolu kaynağın 4 Ağustos 2003-25 Şubat 2004 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi

1 Nolu Kaynak	
Numunelerin Alındığı Tarihler	Radon (Bq/L)
1 (4 Ağustos 2003)	0,197173
2 (14 Ağustos 2003)	0,940104
3 (29 Ağustos 2003)	-0,04278
4 (5 Eylül 2003)	0,120908
5 (18 Eylül 2003)	0,194196
6 (26 Eylül 2003)	-0,19345
7 (13 Ekim 2003)	-0,1432
8 (22 Ekim 2003)	0,25669
9 (17 Kasım 2003)	0,225818
10 (25 Şubat 2004)	0,535714

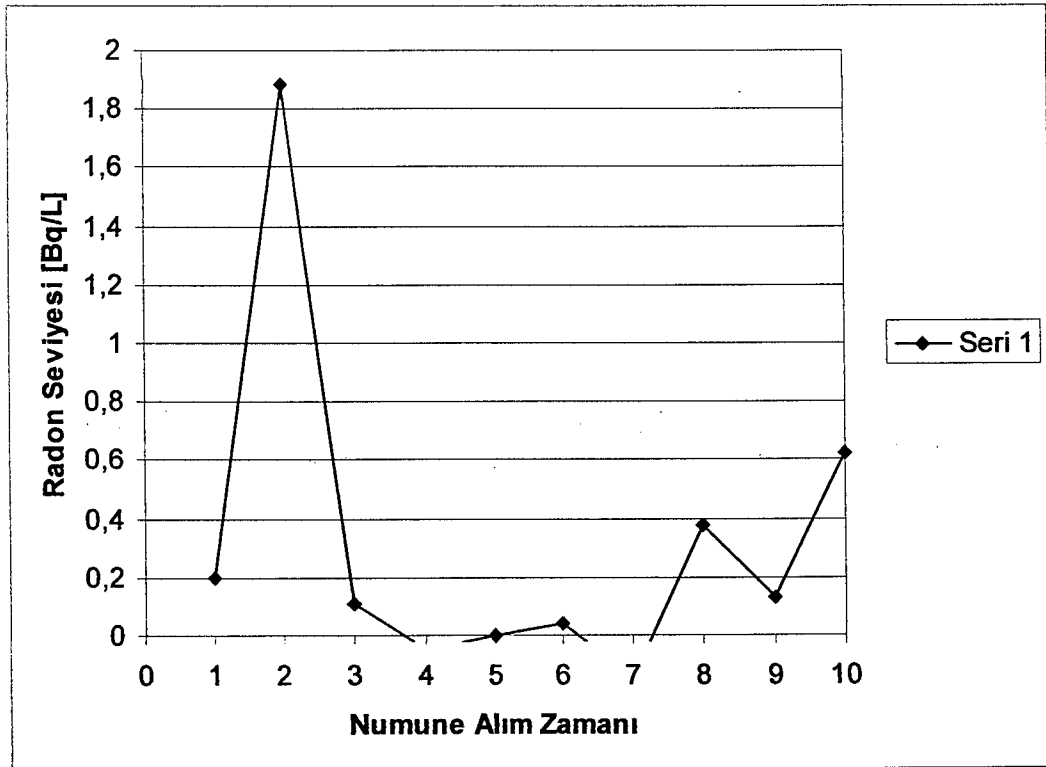


Şekil 5.11 : 1 Nolu kaynağın 4 Ağustos 2003-25 Şubat 2004 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi

4 Ağustos 2003-25 Şubat 2004 tarihleri arasında alınan 2 nolu kaynağın radon konsantrasyonlarının numune alım zamanına göre değişimi Çizelge 5.12’de, bu değişimi ifade eden grafik ise Şekil 5.12’de verilmiştir.

Çizelge 5.12 : 2 Nolu kaynağın 4 Ağustos 2003-25 Şubat 2004 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi

2 Nolu Kaynak	
Numunelerin Alındığı Tarihler	Radon (Bq/L)
1 (4 Ağustos 2003)	0,197917
2 (14 Ağustos 2003)	1,881324
3 (29 Ağustos 2003)	0,107887
4 (5 Eylül 2003)	-0,05022
5 (18 Eylül 2003)	0
6 (26 Eylül 2003)	0,041667
7 (13 Ekim 2003)	-0,14063
8 (22 Ekim 2003)	0,374627
9 (17 Kasım 2003)	0,132812
10 (25 Şubat 2004)	0,62128

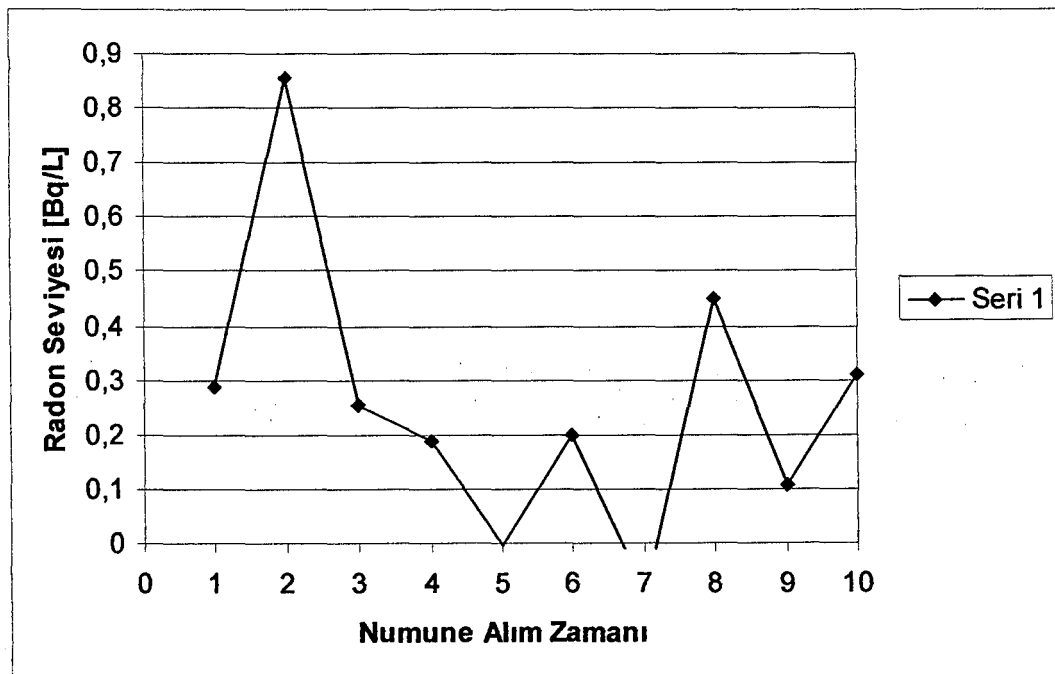


Şekil 5.12 : 2 Nolu kaynağın 4 Ağustos 2003-25 Şubat 2004 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi

4 Ağustos 2003-25 Şubat 2004 tarihleri arasında alınan 3 nolu kaynağın radon konsantrasyonlarının numune alım zamanına göre değişimi Çizelge 5.13’de, bu değişimi ifade eden grafik ise Şekil 5.13’de verilmiştir.

Çizelge 5.13 : 3 Nolu kaynağın Ağustos 2003-25 Şubat 2004 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi

3 Nolu Kaynak	
Numunelerin Alındığı Tarihler	Radon (Bq/L)
1 (4 Ağustos 2003)	0,287202
2 (14 Ağustos 2003)	0,854539
3 (29 Ağustos 2003)	0,252976
4 (5 Eylül 2003)	0,187872
5 (18 Eylül 2003)	-0,00372
6 (26 Eylül 2003)	0,199033
7 (13 Ekim 2003)	-0,0904
8 (22 Ekim 2003)	0,449032
9 (17 Kasım 2003)	0,106026
10 (25 Şubat 2004)	0,309524

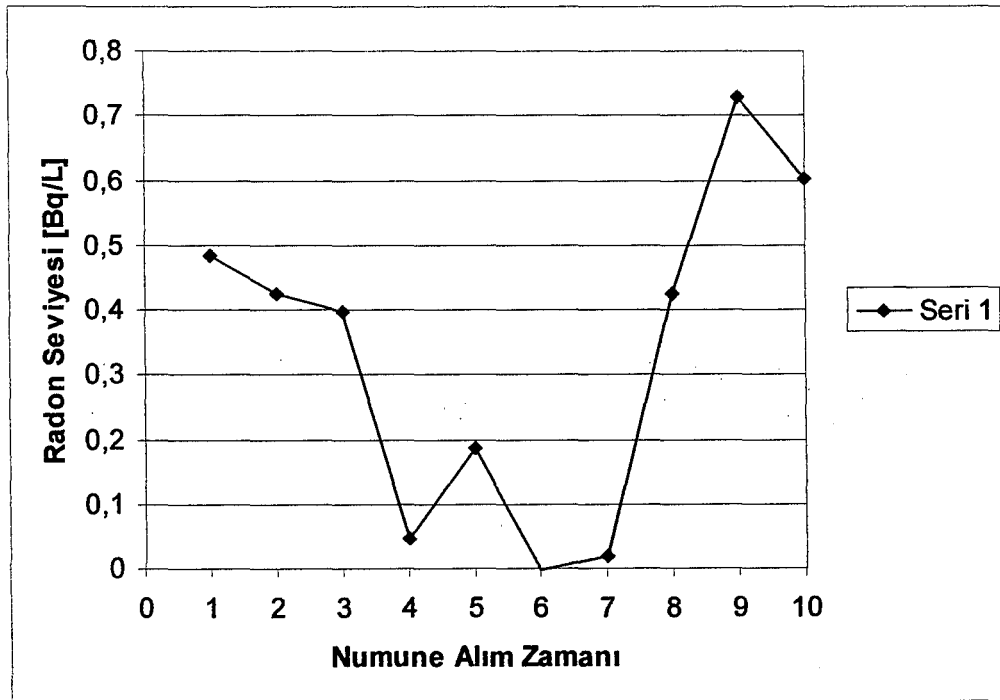


Şekil 5.13 : 3 Nolu kaynağın Ağustos 2003-25 Şubat 2004 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi

4 Ağustos 2003-25 Şubat 2004 tarihleri arasında alınan 4 nolu kaynağın radon konsantrasyonlarının numune alım zamanına göre değişimi Çizelge 5.14'de, bu değişimi ifade eden grafik ise Şekil 5.14'de verilmiştir.

Çizelge 5.14 : 4 Nolu kaynağın 4 Ağustos 2003-25 Şubat 2004 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi

4 Nolu Kaynak	
Numunelerin Alındığı Tarihler	Radon (Bq/L)
1 (4 Ağustos 2003)	0,484375
2 (14 Ağustos 2003)	0,425967
3 (29 Ağustos 2003)	0,396205
4 (5 Eylül 2003)	0,047247
5 (18 Eylül 2003)	0,185082
6 (26 Eylül 2003)	-0,00298
7 (13 Ekim 2003)	0,01748
8 (22 Ekim 2003)	0,424107
9 (17 Kasım 2003)	0,729166
10 (25 Şubat 2004)	0,602679

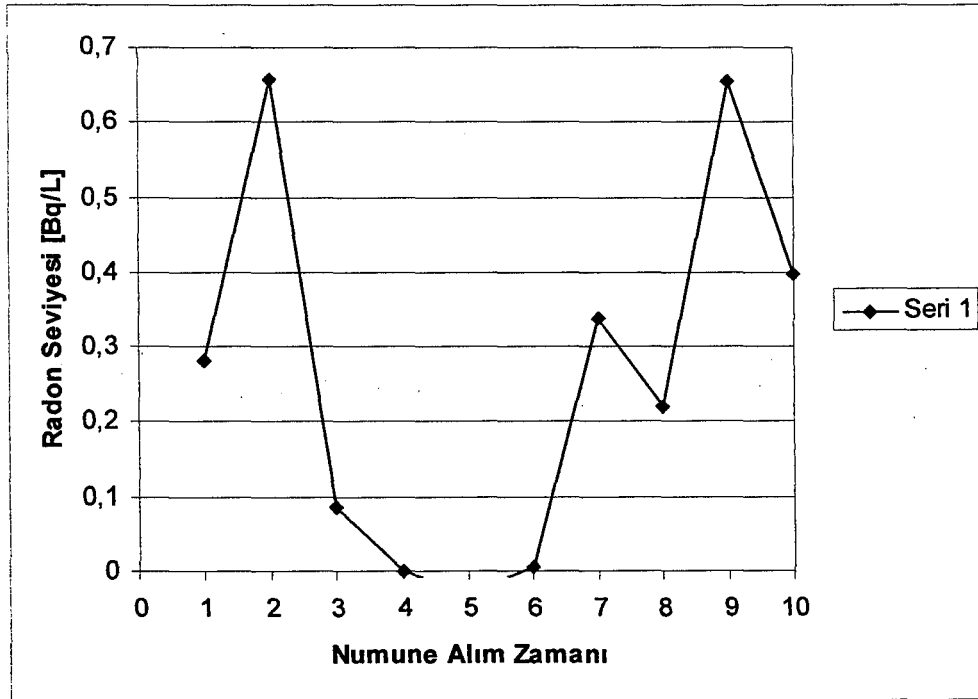


Şekil 5.14 : 4 Nolu kaynağın 4 Ağustos 2003-25 Şubat 2004 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi

4 Ağustos 2003-25 Şubat 2004 tarihleri arasında alınan 5 nolu kaynağın radon konsantrasyonlarının numune alım zamanına göre değişimi Çizelge 5.15’de, bu değişimi ifade eden grafik ise Şekil 5.15’de verilmiştir.

Çizelge 5.15 : 5 nolu kaynağın 4 Ağustos 2003-25 Şubat 2004 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi

5 Nolu Kaynak	
Numunelerin Alındığı Tarihler	Radon (Bq/L)
1 (4 Ağustos 2003)	0,282738
2 (14 Ağustos 2003)	0,656622
3 (29 Ağustos 2003)	0,085565
4 (5 Eylül 2003)	0
5 (18 Eylül 2003)	-0,02976
6 (26 Eylül 2003)	0,00558
7 (13 Ekim 2003)	0,3384
8 (22 Ekim 2003)	0,220238
9 (17 Kasım 2003)	0,653645
10 (25 Şubat 2004)	0,396205

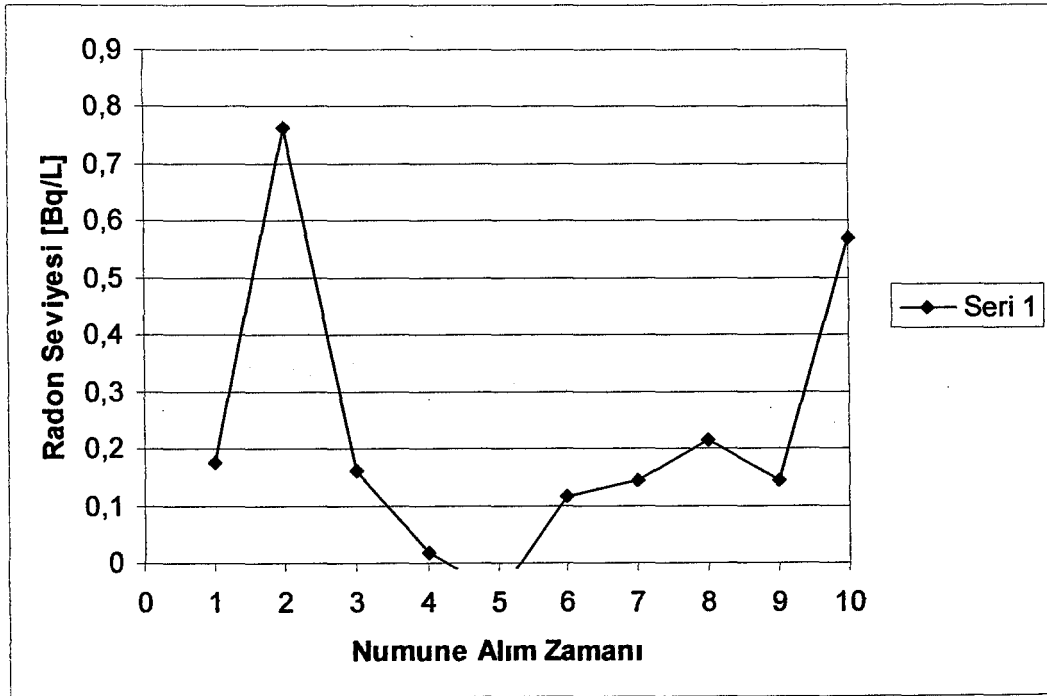


Şekil 5.15 : 5 nolu kaynağın 4 Ağustos 2003-25 Şubat 2004 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi

4 Ağustos 2003-25 Şubat 2004 tarihleri arasında alınan 6 nolu kaynağın radon konsantrasyonlarının numune alım zamanına göre değişimi Çizelge 5.16'de, bu değişimi ifade eden grafik ise Şekil 5.16'de verilmiştir.

Çizelge 5.16 : 6 nolu kaynağın 4 Ağustos 2003-25 Şubat 2004 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi

6 Nolu Kaynak	
Numunelerin Alındığı Tarihler	Radon (Bq/L)
1 (4 Ağustos 2003)	0,174851
2 (14 Ağustos 2003)	0,764509
3 (29 Ağustos 2003)	0,16183
4 (5 Eylül 2003)	0,017485
5 (18 Eylül 2003)	-0,05208
6 (26 Eylül 2003)	0,116071
7 (13 Ekim 2003)	0,143229
8 (22 Ekim 2003)	0,214657
9 (17 Kasım 2003)	0,145833
10 (25 Şubat 2004)	0,56994

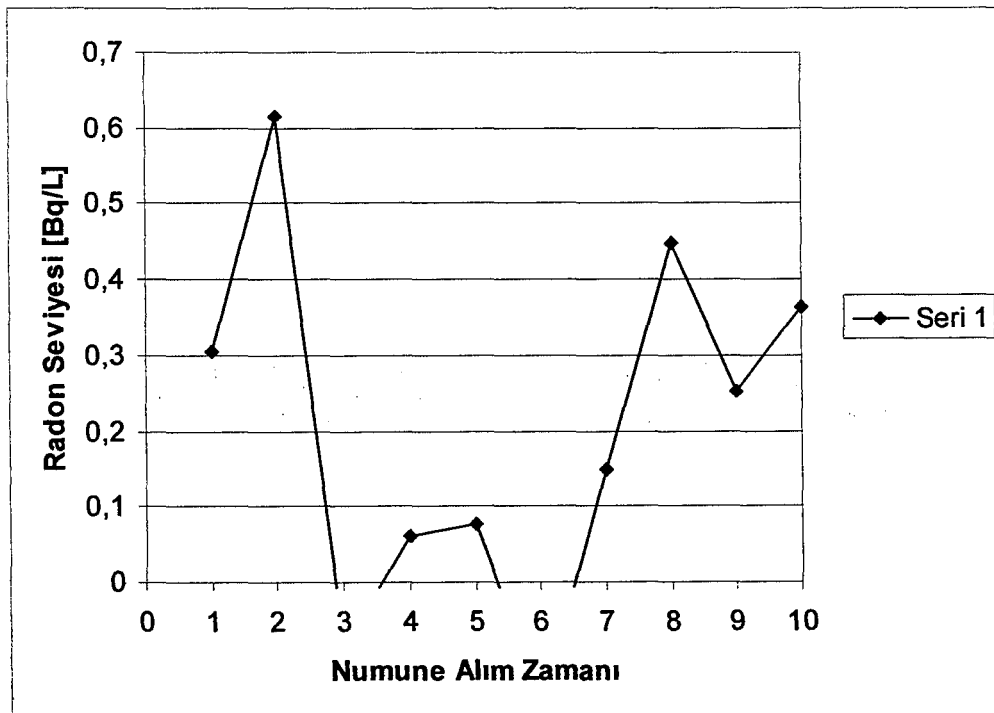


Şekil 5.16 : 6 nolu kaynağın 4 Ağustos 2003-25 Şubat 2004 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi

4 Ağustos 2003-25 Şubat 2004 tarihleri arasında alınan 7 nolu kaynağın radon konsantrasyonlarının numune alım zamanına göre değişimi Çizelge 5.17’de, bu değişimi ifade eden grafik ise Şekil 5.17’de verilmiştir.

Çizelge 5.17 : 7 nolu kaynağın 4 Ağustos 2003-25 Şubat 2004 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi

7 Nolu Kaynak	
Numunelerin Alındığı Tarihler	Radon (Bq/L)
1 (4 Ağustos 2003)	0,305804
2 (14 Ağustos 2003)	0,615699
3 (29 Ağustos 2003)	-0,08482
4 (5 Eylül 2003)	0,062128
5 (18 Eylül 2003)	0,076265
6 (26 Eylül 2003)	-0,16183
7 (13 Ekim 2003)	0,149553
8 (22 Ekim 2003)	0,447172
9 (17 Kasım 2003)	0,251116
10 (25 Şubat 2004)	0,364583

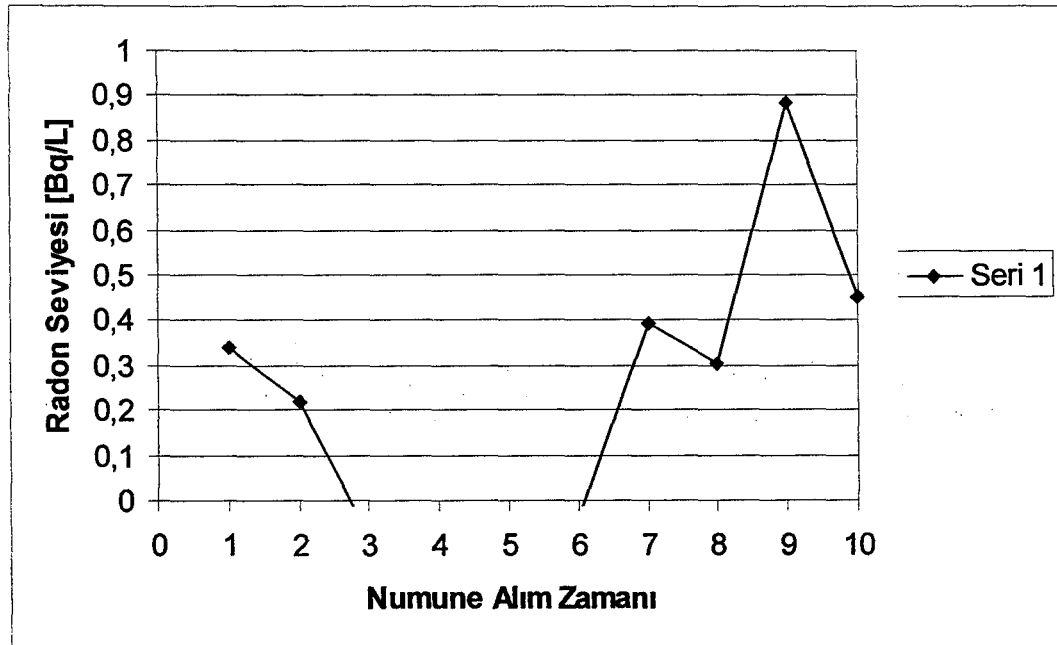


Şekil 5.17 : 7 nolu kaynağın 4 Ağustos 2003-25 Şubat 2004 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi

4 Ağustos 2003-25 Şubat 2004 tarihleri arasında alınan 8 nolu kaynağın radon konsantrasyonlarının numune alım zamanına göre değişimi Çizelge 5.18’de, bu değişimi ifade eden grafik ise Şekil 5.18’de verilmiştir.

Çizelge 5.18 : 8 nolu kaynağın 4 Ağustos 2003-25 Şubat 2004 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi

8 Nolu Kaynak	
Numunelerin Alındığı Tarihler	Radon (Bq/L)
1 (4 Ağustos 2003)	0,340402
2 (14 Ağustos 2003)	0,219494
3 (29 Ağustos 2003)	-0,0811
4 (5 Eylül 2003)	-0,17857
5 (18 Eylül 2003)	-0,04464
6 (26 Eylül 2003)	-0,03646
7 (13 Ekim 2003)	0,393229
8 (22 Ekim 2003)	0,302083
9 (17 Kasım 2003)	0,883556
10 (25 Şubat 2004)	0,449033

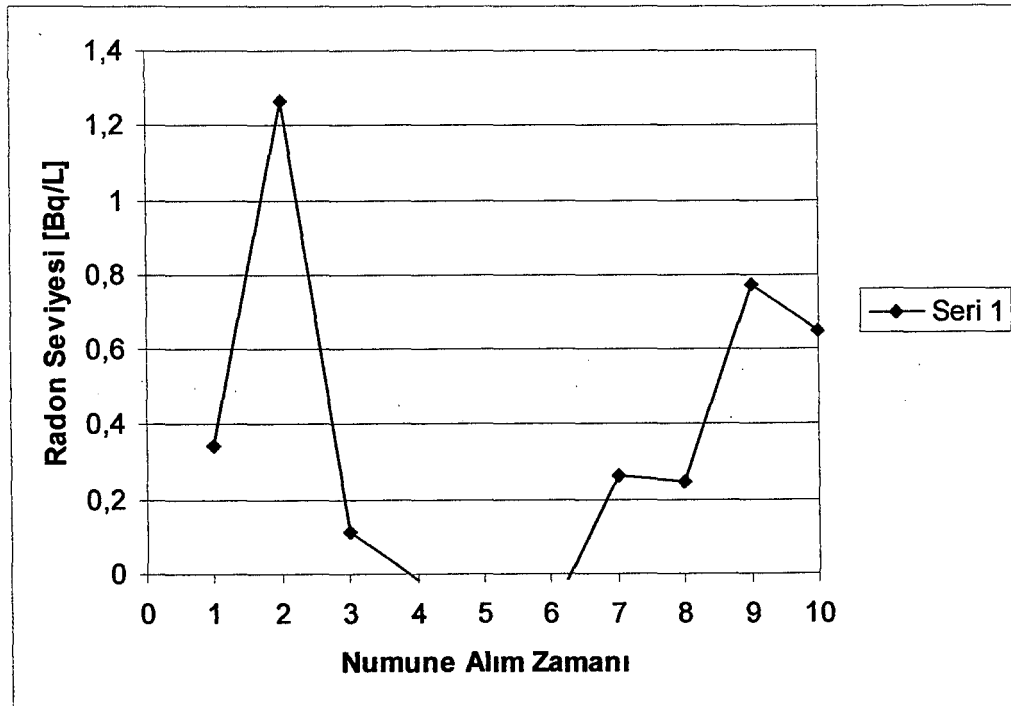


Şekil 5.18 : 8 nolu kaynağın 4 Ağustos 2003-25 Şubat 2004 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi

4 Ağustos 2003-25 Şubat 2004 tarihleri arasında alınan 9 nolu kaynağın radon konsantrasyonlarının numune alım zamanına göre değişimi Çizelge 5.19'de, bu değişimi ifade eden grafik ise Şekil 5.19'de verilmiştir.

Çizelge 5.19 : 9 nolu kaynağın 4 Ağustos 2003-25 Şubat 2004 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi

9 Nolu Kaynak	
Numunelerin Alındığı Tarihler	Radon (Bq/L)
1 (4 Ağustos 2003)	0,344866
2 (14 Ağustos 2003)	1,263765
3 (29 Ağustos 2003)	0,110491
4 (5 Eylül 2003)	-0,01767
5 (18 Eylül 2003)	-0,17671
6 (26 Eylül 2003)	-0,10714
7 (13 Ekim 2003)	0,26302
8 (22 Ekim 2003)	0,249255
9 (17 Kasım 2003)	0,773809
10 (25 Şubat 2004)	0,651042

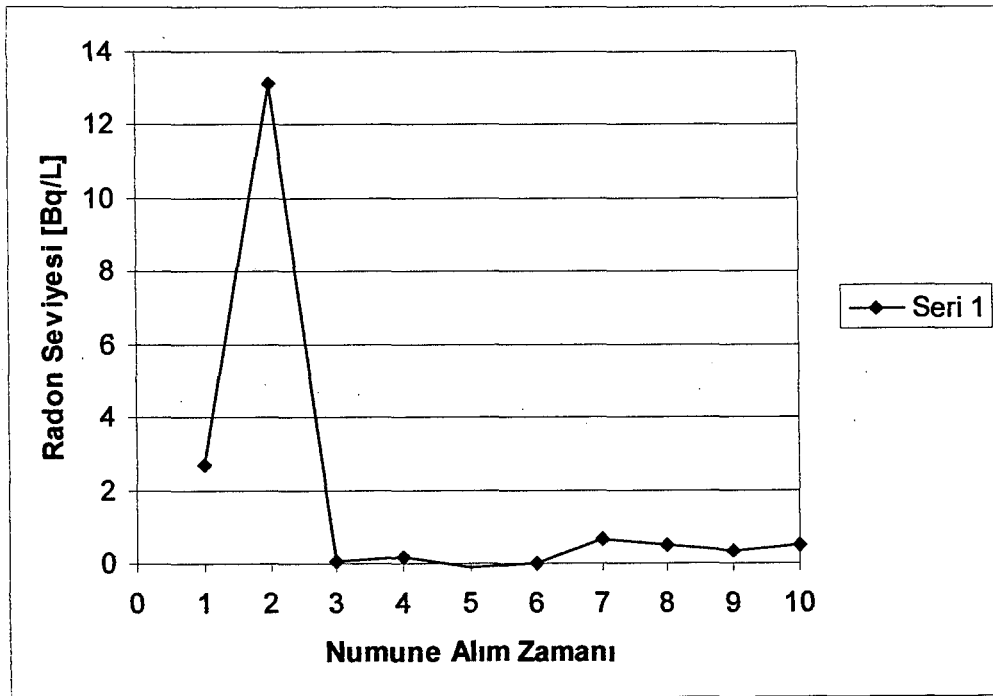


Şekil 5.19 : 9 nolu kaynağın 4 Ağustos 2003-25 Şubat 2004 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi

4 Ağustos 2003-25 Şubat 2004 tarihleri arasında alınan 10 nolu kaynağın radon konsantrasyonlarının numune alım zamanına göre değişimi Çizelge 5.20’de, bu değişimi ifade eden grafik ise Şekil 5.20’de verilmiştir.

Çizelge 5.20 : 10 nolu kaynağın 4 Ağustos 2003-25 Şubat 2004 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi

10 Nolu Kaynak	
Numunelerin Alındığı Tarihler	Radon (Bq/L)
1 (4 Ağustos 2003)	2,665551
2 (14 Ağustos 2003)	13,1157
3 (29 Ağustos 2003)	0,030506
4 (5 Eylül 2003)	0,137649
5 (18 Eylül 2003)	-0,10417
6 (26 Eylül 2003)	0
7 (13 Ekim 2003)	0,65104
8 (22 Ekim 2003)	0,512276
9 (17 Kasım 2003)	0,354166
10 (25 Şubat 2004)	0,491815



Şekil 5.20 : 10 nolu kaynağın 4 Ağustos 2003-25 Şubat 2004 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi

6. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, Akşehir fay hattı üzerinde bulunan Afyon ilinde, fay hattına yakın olan 10 kaynak belirlenmiş ve bu kaynaklardan 4 Ağustos 2003-25 Şubat 2004 tarihleri arasında 10 farklı tarihte alınan su numuneleri Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi (ÇNAEM) laboratuvarlarında içerdikleri radon konsantrasyonlarını belirlemek amacıyla incelenmiştir. Çalışmada incelenen kaynakların yerlerini gösteren harita Şekil 4.1’de verilmiştir.

Yapılan analizlerden elde edilen sonuçlardan, numune alım tarihi itibariyle kaynakların ihtiva ettikleri radon konsantrasyonu seviyeleri hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar ile ilgili olarak iki tür grafik çizilmiştir.

Şekil 5.1 ile Şekil 5.10 arasında yer alan grafikler numune alım zamanındaki incelenen kaynakların radon seviyelerini göstermektedir ve bu sonuçlar radon-sağlık ilişkisi açısından değerlendirilmiştir.

Şekil 5.11 ile Şekil 5.20 arasında yer alan grafikler her bir kaynaktan yapılan inceleme süresince gözlenen radon konsantrasyonu değişimini göstermektedir. Bu sonuçlar yedi ay boyunca bölgede kaydedilen depremlerle karşılaştırılmış ve radon-deprem ilişkisi açısından değerlendirilmiştir.

6.1. Radon-Sağlık

4 Ağustos 2003-25 Şubat 2004 tarihleri arasında 10 kaynaktan elde edilen radon konsantrasyonu verileri ile çizilen Şekil 5.1-5.10 grafikleri incelendiğinde 14 Ağustos 2003 tarihindeki 10 nolu kaynak için tespit edilen değer dışında kalan bütün değerlerin USEPA’nın (United States Environmental Protection Agency) (1991) içme suyu radon konsantrasyonları için öngördüğü 11 Bq/L olan üst sınır değerinin altında olduğu görülmektedir.

10 nolu kaynaktan 14 Ağustos 2003 tarihinde alınan su örneğinden elde edilen 13,12 Bq/L değeri USEPA (1991) tarafından öngörülen 11 Bq/L üst sınır değerini aşmıştır. Bu değer dışında kalan diğer değerler açısından elde edilen sonuçlar USEPA (1991) tarafından ortaya konulan radon konsantrasyonu üst limitini aşmadığından, bu kaynaklardan kullanılan içme sularının sağlık açısından radon riski teşkil etmediği söylenebilir. Ancak 14 Ağustos 2003 tarihinde 10 nolu kaynak için elde edilen sonuç, bu kaynağın konumu itibariyle halka açık piknik

alanında bulunmasından dolayı önem kazanmaktadır. Bu kaynak aynı zamanda piknik alanında görevli olan personel tarafından sürekli olarak kullanıldığından periyodik incelemelere tabi tutulması gerekmektedir.

Konuyla ilgili olarak literatür incelendiğinde, radon konsantrasyonlarının jeolojik yapı, iklim koşulları, sismik hareketler gibi değişik faktörlerden kaynaklanan geçici değişimler göstereceği belirtilmektedir (Hightower ve Watson 1995). Bu çalışmada incelenen 10 nolu kaynakta da benzer bir geçici değişim gözlenmiştir. Çünkü aynı kaynaktan alınan farklı zamanlardaki numunelerin sonuçlarına bakıldığında, bu kaynak için elde edilen değerler her numune alım zamanı için diğer kaynaklardan elde edilen değerlerden daha yüksek olmakla birlikte USEPA (1991) tarafından belirtilen üst sınırı 14 Ağustos 2003 tarihi hariç aşmamaktadır.

Yapılan benzer çalışmalardan elde edilen sonuçların incelenen süre içerisindeki ortalamalarının verilmesi yaygın olarak rastlanan bir durumdur. Bu nedenle incelenen kaynakların 4 Ağustos 2003-25 Şubat 2004 tarihleri arasındaki radon konsantrasyonu ortalamaları hesaplanarak elde edilen değerler Çizelge 6.1’de verilmiştir.

Çizelge 6.1 : Kaynakların 04.08.2003 ve 25.02.2004 tarihleri arasındaki radon konsantrasyonlarının ortalaması

Kaynaklar	04.08.2003 - 25.02.2004 tarihleri arasındaki Radon ortalamaları (Bq/L)
1	0,209
2	0,351
3	0,255
4	0,331
5	0,261
6	0,225
7	0,202
8	0,225
9	0,335
10	1,984

Ortalama değerlere bakıldığında incelenen kaynaklar için elde edilen sonuçların öngörülen 11 Bq/L üst sınırını aşmadığı görülmektedir. Kaynaklar arasında ortalama radon konsantrasyonu en yüksek olan kaynak 10 nolu kaynaktır. Bunun nedeni Şekil 4.1 ve Şekil 4.3'te verilen haritalar dikkate alınarak, 10 nolu kaynağın haritada kutucuk ile gösterilen aktif faylara en yakın kaynak olması gösterilebilir (Danali ve ark. 1993; Teng 1980; Virk ve Singh 1993).

Diğer yandan yapılan bu çalışmadan elde edilen sonuçlar son yıllarda yapılmış benzer çalışmalarla kıyaslandığında ortak bulgular gözlenmektedir. Örneğin Amrani ve arkadaşları (1999) tarafından Cezayir'de yapılan çalışma sonucunda yeraltı sularındaki radon konsantrasyonlarının 0,5 Bq/L ile 19,37 Bq/L arasında değiştiği tespit edilmiştir. D'Alessandro ve Vita (2003) Mt. Etna volkanik bölgesindeki yeraltı sularında radon konsantrasyonlarını ölçmüşler ve 1,8 Bq/L ile 52,7 Bq/L arasında değişen değerler elde etmişlerdir. Yine bu çalışmada incelenen kaynakların % 40'ında radon konsantrasyonu seviyelerinin USEPA (1991) tarafından öngörülen 11 Bq/L üst sınır değerini aştığını tespit edilmiştir.

Saç ve Kumru tarafından "İzmir İli İçme ve Kullanım Sularında ²²⁶Ra ve ²²²Rn Konsantrasyonlarının Belirlenmesi" adlı çalışmada su numuneleri İzmir ilinin içme ve kullanım suyu ihtiyacının karşılandığı sondaj kuyularından alınmıştır (Saç ve Kumru 2003). Çalışmanın sonucunda, İzmir ilinin içme ve kullanım suyu ihtiyacının karşılandığı sondaj kuyularından alınan su örneklerindeki radon konsantrasyonlarının en yüksek 6 Bq/L (155,7 pCi/l) ve ortalama radon konsantrasyonunun 2 Bq/L (50 pCi/l) olduğu saptanmıştır.

Simones ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada 20 değişik kuyu suyu 1987 Aralık ayından 1988 Şubat ayına kadarlık sürede aylık olarak incelenmiştir (Simones ve ark. 1988). Kısa süredeki bu incelemede 3 aylık periyotta radon konsantrasyonunda hiçbir değişim olmadığı istatistiksel olarak gösterilmiştir. Bu deneysel çalışmayla yeraltı sularında radon etkisiyle kısa süreli değişiminin olmayabileceği öngörülmüştür. Bununla beraber elde edilen verilerin istatistiksel olarak uzun periyotlu ölçümler için kullanılabileceği belirtilmiştir. Afyon için yapılan çalışma 7 aylık sürede tamamlanmıştır. Daha uzun sürede

yapılabilecek bir çalışmada radon konsantrasyonlarının daha fazla değişim gösterebileceği söylenebilir.

6.2. Radon-Deprem

Doğal afetler içerisinde en çok zarar verici olan depremin önceden tahmin edilmesine yönelik çalışmalar 1950'li yıllarda başlamış, günümüzde daha da hızlanmıştır. Son yıllara gelinliğinde dünya coğrafyasının birçok yerinde yeraltı sularında ve toprak gazındaki radon değişimlerine dayanarak olası depremlerin tahmin edilebilmesi için çok sayıda benzer çalışma yapılmaktadır. Bu çalışmaların hepsinden çıkan ortak sonuç; bir sismik harekettten yaklaşık 1 ay veya daha önce yeraltı sularındaki radon konsantrasyonunun belirgin bir artış göstermesidir. Depremden önce artmaya başlayan radon seviyesinin o bölgede meydana gelen bir deprem sonrasında normal seviyeye indiği gözlenmiştir. Bu amaçla; King (1978), Reimer (1980), King (1980), Fleischer ve Mogro-Campero (1980), Shapiro ve ark. (1980), Smith ve ark. (1980), Bichard ve Libby (1980), Tanner (1980), Teng (1980), Virk ve Singh (1993), Khan ve Qureshi (1994), King ve ark. (1996), Monnin ve Seidel (1997), Wattananikorn ve ark. (1998), Planinic ve ark. (2001), Zmazek ve ark. (2002), Belin ve ark. (2002) grupları tarafından yapılmış çalışmalar mevcuttur.

Literatürde bahsedilen çalışmalara benzer bir çalışma Afyon'da ilk defa bu tez kapsamında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada sismik aktiviteler ve radon konsantrasyonları arasındaki ilişkiyi gözlemleyebilmek için Afyon ilinin üzerinde bulunduğu Akşehir fay hattına yakın noktalardan seçilen 10 kaynaktan 4 Ağustos 2003 ile 25 Şubat 2004 tarihleri arasında farklı zamanlarda 10 defa numune alınmıştır. Bu kaynaklardaki radon seviyesi belirlenerek elde edilen sonuçlar ile numune alım tarihleri döneminde incelenen fay hattında meydana gelen deprem aktiviteleri arasında bir ilişki kurulmaya çalışılmıştır.

Bu amaçla her bir kaynak için alınan numunelerden elde edilen radon konsantrasyonları ile numune alım tarihleri arasında Şekil 5.11-Şekil 5.20 grafikleri çizilmiştir. Bu grafiklerden de görüleceği gibi 1,2,3,5,6,7,9 ve 10 nolu kaynaklardan elde edilen bulgular arasında belirgin bir benzerlik vardır. Adı geçen kaynakların hepsinde artış oranları 5 ile 13 kat arasında değişmekle birlikte hepsinin 14 Ağustos 2003 tarihinde belirgin bir maksimum radon konsantrasyonu

seviyesine ulaştığı görülmektedir. Bu tarihe yakın zamanlarda Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü'nün deprem kayıtları incelendiğinde Akşehir fay hattında meydana gelen 3 deprem olduğu görülmektedir. Bunlar 17 Ağustos 2003 tarihinde Gediz-Kütahya merkezli 2,8 büyüklüğünde, 26 Ağustos 2003 tarihinde Şuhut-Afyon merkezli 3,5 büyüklüğünde ve 29 Ağustos 2003 tarihinde Akşehir-Konya merkezli 3,4 büyüklüğündeki depremlerdir. Bunların numune alınan kaynaklara yakınlık sırası Şuhut-Afyon, Akşehir-Konya ve Gediz-Kütahya şeklindedir. Kaydedilen bu depremlerin büyüklükleri dikkate alındığında incelenen kaynaklara en yakın olan Şuhut-Afyon merkezli 3,5 büyüklüğündeki depremden önce adı geçen kaynaklarda ortaya çıkan radon konsantrasyonu artışının bu depremi işaret etme olasılığı daha büyüktür. Çünkü Yaprak ve arkadaşları (2003) tarafından Gediz Graben sisteminde yer alan Alaşehir bölgesindeki aktif faylarda yapılan çalışma sonucunda Alaşehir fay sisteminde oluşan 3M büyüklüğündeki depremlerden önce ve sonra bazı istasyonlarda gözlenen radon anomalilerinin pik yüksekliğinin yaklaşık ortalamanın 3 katı olduğu saptanmıştır. Burada 14 Ağustos 2003 tarihi için elde edilen artış oranları 3 kattan daha fazladır.

Literatürde bahsedilen herhangi bir kaynaktaki radon konsantrasyonu artışının kaynağa yakın meydana gelen bir deprem sonrasında azalma göstermesi bizim incelediğimiz bu kaynaklarda da gözlenmiştir. Aynı kaynaklardaki radon konsantrasyonu küçük değişiklikler göstermekle birlikte Şubat 2004 içinde tekrar artmaya başlamıştır ve 25 Şubat 2004 tarihinde alınan numunelerde yaklaşık olarak ortalamanın 5 katı artış meydana gelmiştir. 14 Ağustos 2003'te alınan numunelerin ortaya koyduğu radon-deprem ilişkisi yine 25 Şubat 2004 tarihinde alınan numunelerde de gözlenmektedir. Şubat-Mart 2004 arasında Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü'nün deprem kayıtları incelendiğinde çalışılan fay hattında birbirlerine yakın büyüklükte çok sayıda deprem kaydına rastlanmaktadır. Bu dönemlerde meydana gelen depremlerin listesi Çizelge 6.2'de verilmiştir.

Çizelge 6.2 : Çalışma dönemi boyunca Afyon ve yakınlarında meydana gelen depremler (Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü)

24.02.2004	07:09:11	2,7	EMİRDAĞ (AFYON)
05.03.2004	14:34:15	2,9	BOLVADİN (AFYON)
08.03.2004	22:23:58	2,5	AKSEHİR (KONYA)
08.03.2004	11:52:43	2,7	GEDİZ (KÜTAHYA)
10.03.2004	18:52:10	2,6	ÇAY (AFYON)
10.03.2004	07:46:03	2,8	AFYON (I.M.)
12.03.2004	02:39:43	2,6	BOLVADİN (AFYON)
15.03.2004	04:56:47	3,3	AFYON (I.M.)
16.03.2004	16:59:55	2,9	SULTANDAĞI (AFYON)
20.03.2004	18:31:32	2,9	ÇAY (AFYON)
21.03.2004	22:49:33	2,7	EMİRDAĞ (AFYON)
23.03.2004	06:52:12	3,4	ÇAY (AFYON)
25.03.2004	16:58:40	2,7	GEDİZ (KÜTAHYA)
27.03.2004	03:09:54	2,7	AFYON (I.M.)
27.03.2004	18:45:28	3,0	EMİRDAĞ (AFYON)
28.03.2004	01:20:50	2,9	EMİRDAĞ (AFYON)

Bu dönem içinde incelenen 4 ve 8 nolu kaynaklarda 14 Ağustos 2003 tarihinde alınan numunelerde diğer kaynaklar için yukarıda ortaya konulan ilişki gözlenememekle birlikte Şubat 2004'te alınan numune de radon konsantrasyonunun yaklaşık olarak ortalamasının 5 katına kadar arttığı gözlenmiştir. Böylece incelenen kaynakların hepsinde farklı tarihlerde de olsa deprem hareketi ile ilişkilendirilebilecek radon konsantrasyonları artışları tespit edilmiştir.

Diğer yandan yapılan bu çalışmadan elde edilen sonuçlar son yıllarda yapılmış benzer çalışmalarla kıyaslandığında radon-sağlık ilişkisinde olduğu gibi ortak bulgular gözlenmektedir. Örneğin Hindistan'da Virk ve Walia tarafından yapılan çalışmada He/Rn oranlarındaki artış incelenmiştir. Virk ve Walia,

Chamoli depreminin merkez üssünden 393 km uzaktaki Palampur'da 27 Mart 1999 ve 24 Mart 1999 tarihlerinde yeraltı suları ve toprak gazındaki radon konsantrasyonlarında değişimler kaydetmişlerdir. Virk ve Walia, Chamoli depreminin meydana geldiği 29 Mart 1999 tarihinden 19 gün önce 10 Mart 1999'da radon değişimlerinde bazı yüksek ve düşük dalgalanmalar başladığını ve 27 Mart 1999 tarihinde maksimum pikine ulaştığını gözlemlemişlerdir. Depremden önce gözlenen bu anomaliler sonucu Virk ve Walia, He/Rn oranındaki sürekli artışın deprem tahmininin güçlü bir belirticisi olabileceğini işaret etmişlerdir. Afyon için yapılan çalışmada ise depremden önce benzer değişimler gözlenmiştir.

Zmazek ve arkadaşlarının Slovenya'da yaptıkları benzer bir çalışmada, termal sularda radon değişimlerini periyodik zaman diliminde incelemişler ve depremden 1 ay önce radon konsantrasyonlarında artış gözlemlemişlerdir (Zmazek ve ark. 2002). Zmazek ve arkadaşları gözlemleri esnasında meydana gelen bir depremden sonra radon konsantrasyonlarının tekrar artmadan önce azalış gösterdiğini de bulmuşlardır. Afyon için yapılan çalışmada bu bağlamda Zmazek ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmaların sonuçları ile uyum göstermektedir.

Belin ve arkadaşları tarafından Türkiye, Adapazarı-Kuzuluktaki termal suların kimyasal ve radyoaktif değişikliklerinin incelenmesi çalışması yapılmıştır. Çalışmada Kuzuluk'taki termal su sağlayan 2 kuyudan örnekler alınmıştır. Deprem öncesi ve sonrasında alınan su örnekleri analiz edilerek bazı elementlerin içeriklerindeki artış ve azalışlar gözlenmiştir. Çalışma sonucunda uranyum konsantrasyonlarında dikkat çekici bir şekilde artış meydana geldiği tespit edilmiştir. Belin ve arkadaşları çalışmaları sonucunda sismik bölgelerdeki yeraltı sularında kimyasal içeriklerindeki değişmelerin depremle ilişkili sonuç olabileceğini vurgulamışlardır. Radonun, uranyumun bozunum zincirinde yer aldığı ve uranyum konsantrasyonlarındaki bir artışın onun doğal bozunum ürünü olan radon konsantrasyonlarında da bir artışa yol açacağı kaçınılmazdır. Bu bakımdan Afyon'da yapılan bu çalışma, Belin ve arkadaşları tarafından yapılan çalışma ile uyumludur.

Son olarak, yapılan çalışma öncesi belirlenen kaynaklardan periyodik olarak numune alınması ve analizlerinin Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi'nde (ÇNAEM) düzenli olarak incelenmesi amaçlanmıştır. Ancak numune alınan kaynaklarının şehir merkezine olan uzaklığı ve bu bölgelere ulaşım güçlüğünün olması nedeniyle numune alımında Devlet Su İşleri (DSİ) ile ortak çalışılmıştır. Dolayısıyla numuneler ancak DSİ görevlileri tarafından kaynakların bulunduğu bölgelerde bir çalışma yapılıyorsa, bu çalışma günlerine denk getirilerek alınabilmiştir. Aynı zamanda DSİ çalışmalarının çoğunun yaz mevsiminde gerçekleşebiliyor olması nedeniyle kışın hava şartlarından dolayı bölgelerdeki çalışmaların çoğu yavaşlatılmış bazıları kısmen durdurulmuştur. Numunelerin alınması 04 Ağustos 2003 ile 25 Şubat 2004 tarihleri arasında kapsadığı için çalışmanın büyük bir kısmı sonbahar ve kış mevsiminde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, çalışma öncesi yapılan ön araştırmalarda sulardaki radon konsantrasyonları ölçümünün Türkiye'de sadece İstanbul ilinde bulunan Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi'nde (ÇNAEM) yapılabileceğine rastlanmıştır. Çalışmalar Afyon ilinde veya yakın bir ilde bulunan araştırma laboratuvarında gerçekleştirilebiliyor olsaydı ulaşım güçlüğünün numune alım düzenine etkisi azaltılabilirdi. Tüm bu nedenler nedeniyle çalışmada planlanan periyodik numune alımı ve analizi sağlanamamıştır. Su numuneleri ancak Çizelge 5.11-5.20'de belirtilen tarihlerde alınabilmiştir. Gelecekte Afyon'da kuyu sularında radon konsantrasyonları ölçümlerinin periyodik olarak yapılabileceği bir çalışma düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- AKERBLOM, G.V., WILSON, V., *Radon gas-A radiation hazard from radioactive bedrock and building materials*, Bull. Ins. Assoc. Engin. Geology 23, 51, (1981).
- AMRANI, D., CHEROUATI, D.E., ve CHERCHALI, M.E.H., *Groundwater radon measurements in Algeria*, Journal of Environmental Radioactivity, 51, 173-180 (2000).
- ARICI, K., *Adıyaman ilinde Radon Gazı Konsantrasyonları Ölçümü*, Yüksek Lisans Tezi, K.S.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş, Türkiye, (1996).
- ARYA, A.P., *Çekirdek Fiziğinin Easaları*, Aktif yayıncılık, Erzurum, Türkiye (1999).
- BARNES, D.E. ve TAYLOR, D., *Radiation Hazards and Protection*, Second edeucation, A Newnes tecnical survey, (1963).
- BAYINDIRLIK ve İSKAN BAKANLIĞI AFET İŞLERİ GENEL MÜDÜRLÜĞÜ DEPREM ARAŞTIRMA DAİRESİ,
<http://www.deprem.gov.tr/linkhart.htm>
- BAYKARA, O., DOĞRU, M., CANBAZOĞLU, C., ve KÜLAHCI, F., *Doğu Anadolu Bölgesinde Bazı Diri Fay Hatlarındaki Yeraltı Sularının Doğal Radyoaktivite Seviyelerinin Belirlenmesi*, Türk Fizik Derneği 21. Fizik Kongresi Özetler Kitabı, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, (2002).
- BELİN, B., YALÇIN, T., SUNER, F., BOZKURTOĞLU, E., GELİR, A., ve GÜVEN H., “ *Earthquake-related chemical and radioactivity changes of Thermal Water in Kuzuluk-Adapazarı, Turkey*” Journal of Environmental Radioactivity, 63, 239-249 (2002).
- BERKEM, A.R., *Çekirdek Kimyası*, İstanbul Üniversitesi Yayınları, İstanbul, Türkiye (1974).
- BICHARD, G.F., ve LIBBY, W.F., *Soil Radon Concentration Changes Preceeding and Following Four Magnitude 4.2-4.7 Earthquakes on the San Jacinto Fault in Southern California*, J. Geophys., 85, 6, 3100-3106, (1980).
- BRUNO, R.C., *Int. Symp. On Indoor Air Pollution, Health, and energy Conservation*, Sources of indoor radon in houses, Amherst, MA, (1983).

- BOĞAZIÇI ÜNİVERSİTESİ KANDİLLİ RASATHANESİ ve DEPREM ARAŞTIRMA ENSTİTÜSÜ, <http://www.koeri.boun.edu.tr//sismo/default.htm>
- CANBAZOĞLU, C., *Elazığ ve Çevresindeki İçme ve Kullanım Sularında Radyoaktivite Seviyelerinin Tayini*, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, Türkiye, (1998).
- ÇELEBİ, G., *Tıp ve Diş Hekimliği Öğrencileri için Biyofizik*, Çağlayan Kitapevi, Cilt 1., İstanbul, Türkiye, (1989).
- ÇELEBİ, N., *Çevresel Örneklerde Uranyum, Radyum ve Radon Ölçüm Tekniklerinin Geliştirilmesi*, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye (1995).
- DANALI-COTSAKI, S., MARGOMENOU-LEONIDOPOULOU, G., ²²²Rn in Greek spa waters (correlation with rainfall seismic activities), *Health Physics*, 64, 605-612, (1993).
- D'ALESSANDRO, W. ve VITA, F., *Groundwater radon measurements in the Mt. Etna area*, *Journal of Environmental Radioactivity*, 65, 187-201 (2003).
- DUENAS, C., FERNANDEZ, M.C., GONZALES, J.A., CARRETERO, J. ve PEREZ, M., *Ra-226 and Ra-224 in Waters in Spain*, *Toxicological and Environmental Chemistry*, 39, 71-79 (1993).
- FARAI, I.P. ve SANNI, A.O., ²²²Rn in groundwater in Nigeria (a survey), *Health Physics*, 62, 96-98, (1992).
- FLEISCHER, R.L. ve MOGRO-CAMPERO, A., *Techniques and Principles for Mapping of Integrated Radon Emanation Within the Earth*, *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. Dept. Of Energy, Washington, D.C.1, p. 57-71, (1980).
- GESELL, T.F., PRICHARD, H.M., ve HESS, C.T., *Proceedings of the Specialist Meeting on the Assessment of Radon and Daughter Exposure and Related Biological Effects*, 220-238, RD Pres, (1982).
- GOSINK, T.A., BASKARAN, M., ve HOLLEMAN, D.F., *Radon in the Human Body from Drinking Water*, *Health Physics*, 59, 919-920, (1990).
- IREZ, G., *Çekirdek Kimyası*, Muğla Üniversitesi basımevi, Muğla, Türkiye, (2002).

GÜLTEKİN, Y., ÇAM, S., ve EREEŞ, F.S., *Manisa İli Binaıçı Radon Konsantrasyonu Tayinleri*, VIII. Ulusal Nükleer Bilimler ve Teknolojileri Kongresi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, Türkiye,

http://www.taek.gov.tr/kongreler/nbtk2003/tam_metin/222.doc, (2003).

HIGHTOWER, J.H. and Watson, J.E., *²²²Rn in water; a study of two sample collection methods, effects of mailing samples and temporal variation of concentrations in North Carolina ground water*, Health Physics, **69**, 219-226, (1995).

KHAN, H.A., *Radon: A Friend Or Foe?*, Nuclear Tracks And Radiation Measurements, **19**, Nos 1-4, 353-362, Great Britain, (1991).

KHAN, H. A. ve QURESHİ, A.A., *Solid State Nuclear Track Detection: A Useful Geological / Geophysical Tool*, Nucl. Geophys., **8**, 1-37 (1994).

KING, C.Y., *Radon Emanation on San Andreas Fault*, Nature Vol. 271, 516-519, (1978).

KING, C.Y., *Episodic Radon Changes in Subsurface Soil Gas Along Active Faults and Possible Relation to Earthquakes*, J. Geophys. Res., **85**, 3065-3078 (1980).

KING, C.Y., KING, B.S., ve EVANS, W.C., *Spatial radon anomalies on active faults in California*, Applied Geochemistry, **11**, 497-510 (1996).

KOBAL, I., KRISTIAN, J., SKOFLJANEC, M., JERANCIC, S., ve ANCIK, M., *Radioactivity of Springs and Surface Waters in the Region of the Uranium Ore Deposit at Zirovski VRH*, Journal of Radioanalytical Chemistry, **44**, 307-315 (1978).

KOBAL, I., KRISTIAN, J., ANCIK, M., JERANCIC, S., ve SKOFLJANEC, M., *Radioactivity of Thermal and Mineral Springs in Slovenia*, Health Physics, **37**, 239-242 (1979).

KOZLOWSKA, B., HETMAN, A., ZIPPER, W., *Determination of ²²²Rn in natural water samples from health resorts in the Sudety mountains by the liquid scintillation technique*, Applied Radiation and Isotopes, **51**, 475-480 (1999).

LEHMANN, R., CZARWINSKI, R., *Radon Exposure In Buildings*, Kerntechnik, **58** No:5, 304-310, München, (1993).

- MCGREGOR, R.G., GOURGON, L.A., *Radon and Radon Daughters in Homes Utilizing Deep Well Water Supplies, Halifax Country, Nova Scotia*, J. Environ.Sci. Health A15: 25-35, (1980).
- MORAWSKA, L., *Two Ways of Determining the ^{222}Rn Emanation Coefficient*, Health Physics, **57**, 481-483 (1989).
- MONNIN, M. and Seidel, J.L., *Physical Model Related to Radon emission in Connection with Dynamic Manifestations in the Upper Terrestrial Crust: A Review*, Radiation Measurement, **28**, 703-712 (1997).
- OLGUIN, M.T., SEGOVIA, N., TAMEZ, E., ALCANTARA, M. and BULBULIAN, S., *Radon Concentration Levels in groundwater from Toluca, Mexico*, The Science of the Total Environment, **130**, 43-50 (1993).
- ÖZBAL, Ö., *İzmir-Balçova'da Termal Su Kullanılan Binalarda Radon Konsantrasyonu ve Sudaki Radonla Korelasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, Türkiye (1999).
- PAULUS, L.R., Gesell, T.F., Brey, R.R., *An evaluation of ^{222}Rn Concentrations in Idaho Groundwater*, Health Physics, **74**, 237-241 (1998).
- PFISTER, M., RYBACH, L. and ŞİMŞEK, Ş., *Geothermal Reconnaissance of the Marmara Sea Region (NW-Turkey); Surface Heat Flow Density in an Area of Active Continental Extension*, Tectonophysics, **291**, p.77-89, The Netherlands, (1998).
- PLANINIC, J., RADOLIC, V., LAZANIN, Z., *Temporal Variation of Radon in Soil Related to Earthquakes*, Appl. Radiat. Isot., **55**, 267-272 (2001).
- PORSTENDORFER, J., Wicke, A., *Methods for Continuous Registration of Radon, Thoron and Their Decay Products Indoors and Outdoors*, Natural Radiation Environment III, Technical Information Center U.S Department of Energy, (1980).
- PORSTENDORFER, J. ve WICKE, A., *Methods for a Continuous Registration of Radon, Thoron, and Their Decay Products Indoors and Outdoors*, Natural Radiation Environment III, Technical Information Center U.S. Department of Energy, (1980).

RAWAT, A., JOJO, P.J., KHAN, A.J., TYAGI, R.K., ve PRASAD, R., *Radon Exhalation Rate In Building Materials*, Nuclear Tracks And Radiation Measurements, **19**, 391-394 (1991).

REIMER, G.M., *Use of Soil-Gas Helium Concentrations for Earthquake Prediction: Limitations Imposed by Diurnal Variation*, J. Geophys. Res., **85**, 3107-3114 (1980).

SABOL, J., WENG, P.S., ve MAO, C.H., *Monitoring of Rn-222 in Taiwanese Hot Spring SPA Waters Using a Modified Electret Ion Chamber Method*, Health Physics, **68**, 100-104 (1995).

SAÇ, M.M. ve KUMRU, M.N., *İzmir İli İçme ve Kullanım Sularında ²²²Rn ve ²²⁶Ra Konsantrasyonlarının Belirlenmesi*, VIII. Ulusal Nükleer Bilimler ve Teknolojileri Kongresi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, Türkiye, http://www.taek.gov.tr/kongreler/nbtk2003/tam_metin/187.doc, (2003).

SALONEN, L., *Natural Radionuclides in Ground Water in Finland*, Presented at the Fourth International Symposium on the Natural Radiation Environment, Lisbon, Portugal, (1987).

SEXTRO, R.G., *Understanding The Origin of radon Indoor Building A Predictive Capability*, Atmospheric Environment, **21**, No.2, p.431-438, (1987).

SHAPIRO, M.H., MELVIN, J.D., COPPING, N.A., TOMBRELLO, T. A. ve WHITCOMB, J.H., *Automated Radon-Thoron Monitoring for Earthquake Prediction Research*, 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. Dept. of Energy, Washington, D.C.1, s. 137-153, (1980).

SMITH, A. R., WOLLENBERG, H. A. ve MOSIER, D. F., *Roles of Radon-222 and Other Natural Radionuclides in Earthquake Prediction*, 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. Dept. Of Energy, Washington, D.C.1, s. 154-174, s. 41-42, (1980).

SIMONES G.C., ve diğerleri., *Northeast Georgia Temporal and spatial Variations in the Radon Content of Ground Water*, Georgia Enstitute of Technology Environmental Resources Centre Report, Atlanta, No:3 p. 88, (1988).

SURBECK, H., *The Search for Radon Sources*, Second Workshop on Radon Monitoring in Radioprotection Environmental and/or Earth Sciences, SMR/ 598-3, ICTP, Italy, (1991).

ŞİMŞEK, Ş., *Geothermal Potential of Northwestern Turkey, Active Tectonics of Northwestern Anatolia*, The Marmara Poly-Project, Vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zurich. ISBN 3-7281-2425-7, p 111-124, Switzerland, (1997).

ŞEKER, Ş.S. ve ÇEREZCİ, O., *Çevremizdeki Radyasyon ve Korunma Yöntemleri*, Boğaziçi Matbaası, I. Basım, Sayı 607, (1997).

TANNER, A.B., *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. Dept. Of Energy, Washington, D.C. 1, p. 5-56, (1980).

TENG, T.L., *Some Recent Studies on Groundwater Radon Content as an Earthquake*, J. Geophys. Res., **85**, No. B6, 3089-3099, (1980).

TÜRKİYE ATOM ENERJİSİ KURUMU (TAEK), YÜCEL, B., ve ARIKAN, İ.H., *Binalarda Radon ve Sağlık Etkileri*, <http://www.taek.gov.tr/taek>

TÜRKİYE ATOM ENERJİSİ KURUMU (TAEK), YÜCEL, B., ve ARIKAN, İ.H., *Doğal Radyasyon Kaynakları ve Radon*, <http://www.taek.gov.tr/taek>

ULOMOV, V.I., MAVASHEV, B.Z., *Forerunners of the Tashkent earthquake*, Izv. Akad. Nauk Uzb. SSR, 188-200, (1971).

UNSCEAR, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation *Sources, Effects, and Risks of Ionizing Radiation*, United Nations sales publication No. E. 88. IX.7, New York, (1988).

USEPA, *National primary Drinking Water Regulations for Radionuclides*, Washington DC, U.S: Government printing Office, EPA/570/9-91/700, (1991).

VIRK, H.S. ve SINGH, B., *Radon Anomalies in Soil-gas and Groundwater as Earthquake Precursor Phenomena*, Tectonophysics, 227, s. 215-224, (1993).

WAKİTA, H., *Chemical Challenge to Earthquake Prediction*, Proceedings Natural Academic Science, **93**, 3781-3786 (1996).

WATTANANIKORN, K., KANAREE, M. ve WIBOOLSAKE, S., *Soil Gas Radon as an Earthquake Precursor: Some Considerations on Data Improvement, Radiation Measurements*, **29**, No.6, 593-598 (1998).

YAPRAK, G., CANDAN, O., GÜR, F., BATMAZ, İ., ve CAMGÖZ, B., *Aktif Gediz Grabeninde Yer alan Alaşehir/Manisa Yöresinde Tektonik Aktiviteye Dayalı Radon Anomalilerinin İncelenmesi* VIII. Ulusal Nükleer Bilimler ve Teknolojileri Kongresi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, Türkiye,

http://www.taek.gov.tr/kongreler/nbtk2003/tam_metin/202.doc, (2003).

YARAMIŞ, B., *Nükleer Fizik*, İstanbul Teknik Üniversitesi yayınları, İstanbul, Türkiye, (1985).

YÜLEK, G.G., *Radyasyon Fiziği (İyonlayıcı ve İyonlayıcı Olmayan) ve Radyasyondan Korunma*, Sek Yayınları, Ankara, Türkiye (1992).

YU, K.N., GUAN, Z.J., STOKES, M.J. ve YOUNG, E.C.M., “ *A Preliminary Study on the Radon Concentrations in Water in Hong Kong and the Associated Health Effects*” *Appl. Radiat. Isot.*, 45,7, 809-810 (1994).

ZMAZEK, B., ZIVCIC, M., VAUPOTIC, J., BIDOVEC, M., POLJAK, M., KOBAL, I., *Soil Radon Monitoring in the Krsko Basin, Slovenia*, *Appl. Radiat. Isot.*, 56, 649-657 (2002).

EK



Ek-1 : Afyon ilinin genel deprem fay haritası (Bayındırlık ve İskan Bakanlığı)