

**AKŞEHİR FAY HATTI ÜZERİNDEKİ
KAYNAK SULARININ RADON
KONSANTRASYONLARI İLE DEPREM
İLİŞKİSİ**

Ayla SANDIKCIOĞLU

Doktora Tezi

Fizik Anabilim Dalı

Temmuz – 2011

Bu tez çalışması Anadolu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu Başkanlığı tarafından (Proje No: 091007) ve Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından (Proje No: 08. FENED. 17) desteklenmiştir.

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Ayla Sandıkciöğlu'nun "Akşehir Fay Hattı Üzerindeki Kaynak Sularının Radon Konsantrasyonları ile Deprem İlişkisi" başlıklı Fizik Anabilim Dalındaki, Doktora Tezi 06.06.2011 tarihinde, aşğıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

	Adı-Soyadı	İmza
Üye (Tez Danışmanı)	: Dr. OĞUZ ERTUĞRUL
Üye (İkinci Danışman)	: Doç. Dr. HÜSEYİN ALİ YALIM
Üye	: Prof. Dr. İSKENDER AKKURT
Üye	: Prof. Dr. HALİM MUTLU
Üye	: Doç. Dr. AHMET YILDIZ

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
..... tarih ve sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Enstitü Müdürü



ÖZET

Doktora Tezi

AKŞEHİR FAY HATTI ÜZERİNDEKİ KAYNAK SULARININ RADON KONSANTRASYONLARI İLE DEPREM İLİŞKİSİ

Ayla SANDIKCIOĞLU

**Anadolu Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı**

**Danışman: Dr. Oğuz ERTUĞRUL
İkinci Danışman: Doç.Dr. Hüseyin Ali YALIM
2011, 228 sayfa**

Radon gazı seviyesinde meydana gelen değişimler, depremin önceden tahminine yönelik çalışmalarda kullanılabilen ve radon konsantrasyonu bölgenin jeolojik yapısına bağlı olarak farklılıklar göstermektedir.

Bu çalışmada, Akşehir fay hattı üzerinde yer alan Afyonkarahisar'da, 15 farklı derin su kaynağından 54 hafta boyunca (17 Ağustos 2009–27 Eylül 2010) 27 kez numune alınarak radon konsantrasyonları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar radon konsantrasyonunun numune alım zamanına göre değişimi ve kaynaklardaki radon aktivitesi değişimlerinin kaynakların deprem merkezine olan uzaklığına bağlılığı araştırılmıştır.

Radon konsantrasyonunun numune alım zamanına göre değişimleri incelendiğinde, kaynakların hepsinde farklı tarihlerde de olsa deprem hareketi ile ilişkilendirilebilecek radon konsantrasyonları artışları tespit edilmiştir. Sultandağı'na yakın kaynaklarda bu ilişkinin daha belirgin olduğu görülmüştür. İnceleme periyodu içinde bölgede meydana gelen depremlerin 19'unda kaynakların radon aktivitesinin uzaklığa bağlı olarak doğrusal bir şekilde etkilendiği sonucuna varılmıştır. Doğrusal uyumluluk katsayısı 0,74–0,95 aralığında değişen değerlerde bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Radon-Deprem, Radon-Deprem Merkezi, Radon Aktivitesi, Akşehir Fay Hattı, Derin Su Kaynağı

ABSTRACT

PhD Dissertation

EARTHQUAKE RELATIONSHIP WITH RADON CONCENTRATIONS OF GROUNDWATER ON AKŞEHİR FAULT ZONE

Ayla SANDIKCIOĞLU

Anadolu University
Graduate School of Sciences
Physics Program

Supervisor: Dr. Oğuz ERTUĞRUL
Second Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Hüseyin Ali YALIM
2011, 228 pages

Changes in the level of radon gas can be used as a precursor in the studies of earthquake prediction, and radon concentration level shows differences depending on the geological structure of the area.

In this study, radon concentrations were investigated along Akşehir fault in Afyonkarahisar by taking samples from 15 different well waters 27 times during 54 weeks (17 August 2009–27 September 2010). According to the results obtained, the variation of radon concentration with respect to the sampling time and the changes in the activity of radon sources with respect to the epicentral distance between the seismic location and the sources were investigated.

According to the investigation of radon concentration changes with sampling time, it has been determined that there have been increases in radon concentrations in all sources related to seismic activity even though on different dates. It was seen that this relation was obvious in the sources near Sultandağı. 19 of all earthquakes occurred in the area affected radon activity linearly depending on the distance in sampling period. The linear correlation coefficients are changed from 0,74 to 0,95.

Keywords: Radon-Earthquake, Radon-Earthquake Center, Radon Activity, Akşehir Fault Line, Deep Spring



TEŞEKKÜR

Doktora tezimin danışmanlığını üstlenerek gerçekleşmesini sağlayan, çalışmanın yürütülebilmesi için her türlü maddi ve manevi desteğini benden esirgemeyen danışman hocam, Sayın Dr. Oğuz ERTUĞRUL'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamın planlanıp hazırlanması ve tüm aşaması boyunca değerli fikirleri ile araştırmamı yönlendiren, bana büyük bir çalışma azmi veren, uzun ve meşakkatli bir yol olan akademik kariyerimde de her zaman kendisini örnek aldığı danışman hocam Sayın Doç. Dr. Hüseyin Ali YALIM'a sonsuz teşekkür ve şükranlarımı sunarım.

Tez izleme komitemde bulunan, çalışmalarına görüş ve önerileri ile katkıda bulunan hocam Sayın Prof. Dr. İskender AKKURT'a en içten teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Tez çalışmamın Jeolojik araştırmalarına yön veren, gerekli kaynakların sağlanmasında yardımlarını esirgemeyen, özellikle Jeoloji çalışmalarına olan destek ve önerilerinden dolayı tez izleme komitemdeki hocam Sayın Doç. Dr. Ahmet YILDIZ'a teşekkürü bir borç bilirim.

Deneysel çalışmalarımı gerçekleştirdiğim radon detektörü cihazının alınmasını sağlayan proje desteğiyle Anadolu Üniversitesi Rektörlüğü ile Afyonkarahisar'ın ilçe ve köylerini kapsayan 54 hafta boyunca süren zorlu arazi çalışmalarında, bilimsel araştırmalar aracını bana tahsis eden ve proje desteğini sunan Afyon Kocatepe Üniversitesi Rektörlüğü'ne teşekkür ederim.

Arazilerdeki her numune alım aşamasında, beni güler yüzlü içtenliği ile karşılayan tüm ilçe ve köy halkı ile kuruluşlara; özellikle yardımsever Çay-Ali Kaleli Mahallesi, Kadıköy, Çayırpınar köy halkına, Şeker Fabrikası ve Alara Meyva Bahçesi çalışanlarına en içten teşekkürlerimi sunarım.

Doktora çalışmalarında bana karşı özverilerini, sabırlarını ve yardımlarını esirgemeyen, değerli aileme sonsuz sevgi ile teşekkür ederim.

Tüm öğrenim hayatım boyunca olduğu gibi Doktora tezimde de bana güvenen ve bir an olsun desteğini eksik etmeyen canım annem Nadide SANDIKCIOĞLU'na bu tezi ithaf ediyorum.

Ayla SANDIKCIOĞLU

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiii
SİMGELER ve KISALTMALAR.....	xvi

1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	5
2.1. Radyoaktivite.....	5
2.1.1. Doğal radyoaktivitenin keşfi	5
2.1.2. Radyoaktif bozunma türleri.....	7
2.1.3. Radyoaktif bozunma bağıntısı.....	13
2.1.4. Aktivlik	15
2.1.5. Bozunma sabiti.....	15
2.1.6. Yarı ömür	16
2.1.7. Ortalama ömür.....	17
2.1.8. Radyoaktif denge.....	18
2.1.9. Radyoaktivite birimi.....	19
2.2. Bazı Radyoaktif Elementler ve Özellikleri.....	19
2.2.1. Uranyum.....	20
2.2.2. Radyum	21
2.2.3. Radon	22
2.3. Radon-Deprem İlişkisi	31
2.3.1. Genel bilgiler.....	31
2.3.2. Radon-deprem ilişkisinin tarihçesi.....	33
2.3.3. Radon-deprem ilişkisinde öne sürülen modeller.....	37



2.3.4.	Radon-deprem ilişkisi üzerine yapılan çalışmalara örnekler.....	40
2.3.5.	Türkiye’de yapılan çalışmalara örnekler.....	50
2.3.6.	Radon-deprem merkezine uzaklık ile ilgili yapılan çalışmalara örnekler	56
2.4.	Radon Ölçüm Metotları.....	60
2.4.1.	Aktif ölçüm metodu	61
	a) İyonizasyon odası.....	61
	b) Sintilasyon hücresi	62
	c) Elektrostatik toplama yöntemi.....	63
	d) Filtre yöntemi	64
	e) Radon tuzağı (grap samples).....	65
	f) Sürekli radon gözlemi	65
2.4.2.	Pasif Yöntem.....	66
	a) Elektret iyon odaları	66
	b) Alfa iz detektörleri (Katıhal nükleer iz detektörleri).....	67
2.5.	Akşehir Fay Hattı ve Afyonkarahisar’ın Jeolojisi.....	67
2.5.1.	Bölgesel jeoloji.....	67
2.5.2.	İnceleme alanının jeolojisi	72
2.5.3.	Yapısal jeoloji	78
3.	MATERYAL VE METOT	83
3.1.	Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Radon Detektörü.....	83
3.1.1.	AlphaGUARD PQ2000 PRO radon detektör sistemi özellikleri.....	83
3.1.2.	AlphaGUARD detektörünün yapısı	86
3.1.3.	Genitron AlphaPUMP	89
3.1.4.	DataEXPERT programı.....	90
3.1.5.	AquaKIT.....	93
3.2.	İncelenen Su Kaynakları	93
3.3.	Numune Alımı	98
3.4.	AlphaGUARD PQ 2000PRO Radon Detektörü ve AquaKIT ile Sudaki Radon-222’i Hesaplama Metodu.....	99

3.5. Standart Hata	100
3.6. Kaynakların Deprem Merkezine Olan Uzaklıklarının Hesaplanması	101
4. DENEYSEL BULGULAR	103
4.1. Kaynakların 17 Ağustos 2009–27 Eylül 2010 Tarihleri Arasındaki Radon Seviyesi Değişimlerinin İncelenmesi.....	104
4.2. Kaynakların 17 Ağustos 2009–27 Eylül 2010 Tarihleri Arasındaki Radon Değişim Yüzdelerinin Deprem Merkezine Uzaklıklarına Göre İncelenmesi.....	133
5. SONUÇ VE TARTIŞMA	153
5.1. Radon Konsantrasyonlarının Numune Alım Zamanına Göre Değişim Bulguları.....	155
5.1.1. 1 nolu kaynak	155
5.1.2. 2 nolu kaynak	157
5.1.3. 3 nolu kaynak	159
5.1.4. 4 nolu kaynak	160
5.1.5. 5 nolu kaynak	165
5.1.6. 6 nolu kaynak	166
5.1.7. 7 nolu kaynak	167
5.1.8. 8 nolu kaynak	168
5.1.9. 9 nolu kaynak	169
5.1.10. 10 nolu kaynak	170
5.1.11. 11 nolu kaynak	172
5.1.12. 12 nolu kaynak	173
5.1.13. 13 nolu kaynak	175
5.1.14. 14 nolu kaynak	177
5.1.15. 15 nolu kaynak	178
5.2. Radon Konsantrasyon Değişim Yüzdesinin Deprem Merkezine Uzaklığı	188
KAYNAKLAR.....	196

Ek-1	Deprem Kayıtları (17.08.2009-27.09.2010 tarihleri arasında).....	211
Ek-2	İl Özel İdare (1 nolu Kaynak).....	214
Ek-3	Turkuaz Hayvan Çiftliği (2 nolu Kaynak).....	215
Ek-4	Şeker Fabrikası (3 nolu Kaynak).....	216
Ek-5	Heybeli Termal (4 nolu Kaynak).....	217
Ek-6	Maltepe Köyü (5 nolu Kaynak).....	218
Ek-7	Kadıköy (6 nolu Kaynak).....	219
Ek-8	Çay Belediyesi Bahçesi-600 m (7 nolu Kaynak).....	220
Ek-9	Çay Belediyesi Bahçesi-700 m (8 nolu Kaynak).....	221
Ek-10	Çay-Ören (9 nolu Kaynak).....	222
Ek-11	Çay-Ali Kaleli Mahallesi (10 nolu Kaynak).....	223
Ek-12	Çay Belediyesi Beton Santrali (11 nolu Kaynak).....	224
Ek-13	Çayırpınar Köyü (12 nolu Kaynak).....	225
Ek-14	Yakasenek-Oğuz Mahallesi (13 nolu Kaynak).....	226
Ek-15	Alara Meyva Bahçesi (14 nolu Kaynak).....	227
Ek-16	Sultandağı-Kirazlı Bahçe (15 nolu Kaynak).....	228

ŞEKİLLER DİZİNİ

2.1.	Alfa, beta ve gamanın giricilikleri (Davutoğlu 2008).....	6
2.2.	Alfa bozunumu.....	8
2.3.	α - parçacıklarının havadaki bulunma oranı (Barnes ve Taylor 1963).....	8
2.4.	^{238}U 'in Alfa bozunumu (Kaptan 2008).....	9
2.5.	β^- bozunumu.....	10
2.6.	Beta parçacıklarının enerji spektrumu.....	10
2.7.	β^+ bozunumu.....	11
2.8.	Gama bozunumu.....	13
2.9.	Farklı bozunma sabitinin bozunma eğrisine etkisi.....	16
2.10.	Radyoaktif denge (radonun radyumla dengeye gelmesi).....	18
2.11.	^{238}U 'in bozunma ürünleri şeması.....	21
2.12.	İnsanların maruz kaldığı radyoaktif dağılım ve radon oranı (NCRP Report,1987).....	23
2.13.	^{222}Rn ve ^{220}Rn 'nin bozunma zinciri (Çelebi 1995).....	24
2.14.	Radonun toprak içindeki dağılımı.....	27
2.15.	Toprağın radon geçirgenliği.....	28
2.16.	Sıcak ve mineralli su çıkışları.....	31
2.17.	Taşkent depreminde yeraltısuyu havzasında radon hareketi (Ulomov ve Mavashev 1971).....	34
2.18.	1966 Taşkent depremi öncesi kuyu sularında gözlenen radon konsantrasyonu değişimleri (Press, 1975).....	35
2.19.	1967 Taşkent depremi öncesi kuyu sularında gözlenen radon konsantrasyonu değişimleri (Press, 1975).....	35
2.20.	1976 Songan-Pinwu depremi öncesi kuyu sularında gözlenen radon konsantrasyonu değişimleri (Kapdan, 2009).....	36
2.21.	Olası deprem mekanizmasını açıklayan genişleme-difüzyon modeli (Press 1975).....	39
2.22.	Deprem öncesinde bazı fiziksel parametrelerdeki değişim (Bolt 1993).....	41

2.23.	1995 Kobe depremi öncesi kuyu sularında gözlenen radon konsantrasyon değişimleri (Igarashi ve ark. 1995)	42
2.24.	Depremın episentri uzaklığının relatif amplitüdle değişimi (Hauksson 1981)	57
2.25.	Radon konsantrasyonlarının faya olan uzaklığa göre değişimi (Font ve ark. 2008).....	59
2.26.	Lucas hücre (Hüryaşar 1997).....	63
2.27.	a. İnceleme alanının yer bulduru haritası b. İnceleme alanı ve yakın çevresindeki önemli deprem kaynaklarını (fay sistemleri, fay kuşakları ve faylar) ve burada oluşmuş yıkıcı depremleri gösteren yalınlaştırılmış harita (Koçyiğit ve Deveci 2007)	68
2.28.	Batı Anadolu'daki volkanik merkezlerin bölgesel dağılımı (Aydar 1998)	70
2.29.	Sultandağı masifi, Eğim atımlı normal faylar, alüvyon yelpazesi, 03.02.2002 depremleri ve yalınlaştırılmış jeoloji haritası (1/500.000 ölçekli Türkiye Jeoloji haritasından yalınlaştırılmış ve kısmen değiştirilmiştir); (Şengör ve ark. 1985).....	72
2.30.	İnceleme alanı ve civarında yer alan jeolojik kuşaklar (Ulutürk 2009).....	73
2.31.	İnceleme alanının jeoloji haritası (Tezcan ve ark. 2002)	74
2.32.	Sultandağları yöresinin genelleştirilmiş stratigrafi kesiti (Tezcan ve ark. 2002).....	76
2.33.	Afyon bölgesinin genelleştirilmiş stratigrafi kesiti (Tezcan ve ark. 2002)	77
2.34.	Afyonkarahisar'daki önemli volkanik oluşumlar ve graben yapılarını gösteren jeoloji haritası (Gürsoy ve ark. 2003).....	81
2.35.	Akşehir Fayı boyunca son yüzyılda (1900–2002) olmuş hasar yapıcı depremler (Demirtaş ve ark. 2002).....	82
3.1.	AlphaGUARD PQ2000 PRO radon detektör sistemi ve kullanım alanları	84
3.2.	AlphaGUARD PQ2000 PRO radon detektörü önden görünüşü	85
3.3.	AlphaGUARD ile toprakta radon ölçümü için kullanılan sistem	87

3.4.	AlphaGUARD ile yapı malzemelerindeki radon ölçümü	87
3.5.	AlphaGUARD cihazının önden görünüşü ve ebatları.....	88
3.6.	AlphaGUARD cihazının arkadan görünüşü ve ebatları.....	88
3.7.	AlphaPUMP şematik gösterimi.....	90
3.8.	AlphaGUARD PQ 2000PRO detektörü verilerinin DataEXPERT yazılım programı ile bilgisayar ekranında görüntülenmesi.....	91
3.9.	AlphaGUARD PQ 2000PRO detektörü verilerinin DataEXPERT yazılım programı ile bilgisayar ekranında görüntülenmesi.....	92
3.10.	AlphaGUARD PQ 2000PRO detektörü, AlphaPUMP ile AquaKIT ölçüm ekipmanları	93
3.11.	Uydu görüntüsü üzerinde Türkiye'deki önemli fayların görünümü	95
3.12.	Uydu görüntüsü üzerinde Afyonkarahisar ve çevresindeki önemli fay hatları	96
3.13.	İncelenen su kaynaklarının Akşehir fay hattına göre konumu.....	97
3.14.	Sayım şişesi (250 ml'lik cam şişe).....	99
3.15.	Kaynak konumunun deprem merkezine olan uzaklığının bulunuşu örneği	102
4.1.	1 nolu kaynağın 17 Ağustos 2009 – 27 Eylül 2010 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi.....	105
4.2.	2 nolu kaynağın 17 Ağustos 2009 – 27 Eylül 2010 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi.....	107
4.3.	3 nolu kaynağın 17 Ağustos 2009 – 27 Eylül 2010 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi.....	109
4.4.	4 nolu kaynağın 17 Ağustos 2009 – 27 Eylül 2010 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi.....	111
4.5.	5 nolu kaynağın 17 Ağustos 2009 – 27 Eylül 2010 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi.....	113
4.6.	6 nolu kaynağın 17 Ağustos 2009 – 27 Eylül 2010 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi.....	115

4.7.	7 nolu kaynağın 17 Ağustos 2009 – 27 Eylül 2010 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi.....	117
4.8.	8 nolu kaynağın 17 Ağustos 2009 – 27 Eylül 2010 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi.....	119
4.9.	9 nolu kaynağın 17 Ağustos 2009 – 27 Eylül 2010 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi.....	121
4.10.	10 nolu kaynağın 17 Ağustos 2009 – 27 Eylül 2010 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi.....	123
4.11.	11 nolu kaynağın 17 Ağustos 2009 – 27 Eylül 2010 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi.....	125
4.12.	12 nolu kaynağın 17 Ağustos 2009 – 27 Eylül 2010 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi.....	127
4.13.	13 nolu kaynağın 17 Ağustos 2009 – 27 Eylül 2010 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi.....	129
4.14.	14 nolu kaynağın 17 Ağustos 2009 – 27 Eylül 2010 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi.....	131
4.15.	15 nolu kaynağın 17 Ağustos 2009 – 27 Eylül 2010 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi.....	133
4.16.	15.09.2009 Sultandağı depreminin radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklık ilişkisi.....	134
4.17.	10.10.2009 Sultandağı depreminin radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklık ilişkisi.....	135
4.18.	25.12.2009 Çay depreminin radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklık ilişkisi.....	136
4.19.	25.02.2010 Çobanlar depreminin radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklık ilişkisi.....	137
4.20.	25.02.2010 Çobanlar depreminin radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklık ilişkisi.....	138
4.21.	07.03.2010 Şuhut depreminin radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklık ilişkisi.....	139
4.22.	30.03.2010 Çay depreminin radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklık ilişkisi.....	140

4.23.	01.04.2010 Sultandağı depreminin radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklık ilişkisi.....	141
4.24.	02.04.2010 Bolvadin depreminin radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklık ilişkisi.....	142
4.25.	23.05.2010 Sultandağı depreminin (I) radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklık ilişkisi.....	143
4.26.	23.05.2010 Sultandağı depreminin (II) radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklık ilişkisi.....	144
4.27.	03.06.2010 Sultandağı depreminin (I) radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklık ilişkisi.....	145
4.28.	03.06.2010 Sultandağı depreminin (II) radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklık ilişkisi.....	146
4.29.	03.06.2010 Sultandağı depreminin (III) radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklık ilişkisi.....	147
4.30.	08.08.2010 Sultandağı depreminin radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklık ilişkisi.....	148
4.31.	29.08.2010 Bolvadin depreminin radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklık ilişkisi.....	149
4.32.	21.09.2010 Afyonkarahisar depreminin radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklık ilişkisi.....	150
4.33.	24.09.2010 Afyonkarahisar depreminin radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklık ilişkisi.....	151
4.34.	27.07.2010 Şuhut depreminin radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklık ilişkisi.....	152
5.1.	25.02.2010 tarihli Çobanlar depreminin 4 nolu kaynağa ve diğer kaynaklara olan uzaklığı.....	164
5.2.	15 kaynağın konumu ve 17.08.2009–27.09.2010 tarihinde oluşan 61 deprem	182
5.3.	15 kaynak ve 27.08.2009–19.09.2009 tarihleri aralığında Sultandağı ve Bolvadin yakınlarında meydana gelen 7 deprem	186

ÇİZELGELER DİZİNİ

2.1.	Radyumun doğal izotopları	22
2.2.	Radonun ve ürünlerinin aktivite özellikleri (Özbal 1999)	25
3.1	Su numunelerin alındığı kaynakların numaralandırılması	94
3.2.	Su numunelerin alındığı kaynakların; enlem, boylam, rakım, derinlik, pH, elektriksel iletkenlik ve sıcaklık bilgileri.....	98
4.1.	1 nolu kaynağın 17 Ağustos 2009 – 27 Eylül 2010 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi.....	104
4.2.	2 nolu kaynağın 17 Ağustos 2009 – 27 Eylül 2010 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi.....	106
4.3.	3 nolu kaynağın 17 Ağustos 2009 – 27 Eylül 2010 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi.....	108
4.4.	4 nolu kaynağın 17 Ağustos 2009 – 27 Eylül 2010 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi.....	110
4.5.	5 nolu kaynağın 17 Ağustos 2009 – 27 Eylül 2010 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi.....	112
4.6.	6 nolu kaynağın 17 Ağustos 2009 – 27 Eylül 2010 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi.....	114
4.7.	7 nolu kaynağın 17 Ağustos 2009 – 27 Eylül 2010 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi.....	116
4.8.	8 nolu kaynağın 17 Ağustos 2009 – 27 Eylül 2010 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi.....	118
4.9.	9 nolu kaynağın 17 Ağustos 2009 – 27 Eylül 2010 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi.....	120
4.10.	10 nolu kaynağın 17 Ağustos 2009 – 27 Eylül 2010 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi.....	122
4.11.	11 nolu kaynağın 17 Ağustos 2009 – 27 Eylül 2010 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi.....	124
4.12.	12 nolu kaynağın 17 Ağustos 2009 – 27 Eylül 2010 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi.....	126

4.13.	13 nolu kaynağın 17 Ağustos 2009 – 27 Eylül 2010 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi.....	128
4.14.	14 nolu kaynağın 17 Ağustos 2009 – 27 Eylül 2010 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi.....	130
4.15.	15 nolu kaynağın 17 Ağustos 2009 – 27 Eylül 2010 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi.....	132
4.16.	15.09.2009 Sultandağı depremi, radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklıkları	134
4.17.	10.10.2009 Sultandağı depremi, radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklıkları	135
4.18.	25.12.2009 Çay depremi, radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklıkları.....	136
4.19.	25.02.2010 Çobanlar depremi-I, radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklıkları	137
4.20.	25.02.2010 Çobanlar depremi-II, radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklıkları	138
4.21.	07.03.2010 Şuhut depremi, radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklıkları	139
4.22.	30.03.2010 Çay depremi, radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklıkları.....	140
4.23.	01.04.2010 Sultandağı depremi, radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklıkları	141
4.24.	02.04.2010 Bolvadin depremi, radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklıkları	142
4.25.	23.05.2010 Sultandağı depremi-I, radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklıkları	143
4.26.	23.05.2010 Sultandağı depremi-II, radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklıkları	144
4.27.	03.06.2010 Sultandağı depremi-I, radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklıkları	145
4.28.	03.06.2010 Sultandağı depremi-II, radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklıkları	146

4.29.	03.06.2010 Sultandağı depremi-III, radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklıkları	147
4.30.	08.08.2010 Sultandağı depremi, radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklıkları	148
4.31.	29.08.2010 Bolvadin depremi, radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklıkları	149
4.32.	21.09.2010 Afyonkarahisar depremi, radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklıkları	150
4.33.	24.09.2010 Afyonkarahisar depremi, radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklıkları	151
4.34.	27.07.2010 Şuhut depremi, radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklıkları	152
5.1.	1 nolu kaynaktaki değişimler ve depremler	155
5.2.	2 nolu kaynaktaki değişimler ve depremler	157
5.3.	3 nolu kaynaktaki değişimler ve depremler	159
5.4.	4 nolu kaynaktaki değişimler ve depremler	161
5.5.	5 nolu kaynaktaki değişimler ve depremler	165
5.6.	6 nolu kaynaktaki değişimler ve depremler	166
5.7.	7 nolu kaynaktaki değişimler ve depremler	167
5.8.	8 nolu kaynaktaki değişimler ve depremler	168
5.9.	9 nolu kaynaktaki değişimler ve depremler	169
5.10.	10 nolu kaynaktaki değişimler ve depremler	170
5.11.	11 nolu kaynaktaki değişimler ve depremler	172
5.12.	12 nolu kaynaktaki değişimler ve depremler	173
5.13.	13 nolu kaynaktaki değişimler ve depremler	175
5.14.	14 nolu kaynaktaki değişimler ve depremler	177
5.15.	15 nolu kaynaktaki değişimler ve depremler	178
5.16.	17.08.2009–27.09.2010 tarihlerinde 15 kaynak içinde radon konsantrasyonlarında 3 kattan fazla artışın görüldüğü kaynaklar	180
5.17.	17.08.2009–14.09.2009 tarihlerinde tüm kaynakların değişimleri	184
5.18.	Radon (%) değişim yüzdesi ile deprem merkezi arasında uyum gösteren kaynaklar.....	188

SİMGELER ve KISALTMALAR

Simgeler

1 Bq	: Becquerel, 1 parçalanma s ⁻¹
1 Ci	: Curie, 3,7x10 ¹⁰ parçalanma s ⁻¹
c	: Işık hızı (3x10 ⁸ m/s)
⁰ C	: Santrigrat derece
km	: Kilometre
ml	: Mililitre
He ⁺⁺	: İki kere iyonlaşmış helyum atomu
α	: Alfa
β^+	: Beta-pozitif
β^-	: Beta-negatif
γ	: Gama
ν	: Nötrino
$\bar{\nu}$: Antinötrino
λ	: Bozunma sabiti
t _{1/2}	: Yarı ömür
τ	: Ortalama ömür
eV	: Elektron volt
MeV	: Mega elektron volt
M	: Magnitüd
CH ₄	: Metan
CO ₂	: Karbondioksit
ZnS	: Çinko Sülfür
²¹² Bi	: Bizmut
⁸⁷ Br	: Brom
⁴⁰ K	: Potasyum
⁸⁷ Kr	: Kripton
²³⁴ Pa	: Protaktinyum
²⁰⁶ Pb	: Kurşun
²¹² Po	: Polonyum

^{238}U	: Uranyum
^{232}Th	: Toryum
^{226}Ra	: Radyum
^{222}Rn	: Radon
^{220}Rn	: Toron
^{219}Rn	: Aktinon
^{208}Tl	: Talyum

Kısaltmalar

AAG	: Afyon-Akşehir Grabeni
AFZ	: Akşehir Fay Zonu
ASFS	: Akşehir-Simav Fay Sistemi
ÖDF	: Ölü Deniz Fayı
DAFS	: Doğu Anadolu Fay Sistemi
KAFS	: Kuzey Anadolu Fay Sistemi
KAIKV	: Kırka-Afyon-Isparta Alkali Volkanitleri
HFZ	: Hamidiye Fay Zonu
DSP	: Sayısal Sinyal İşletimi (Digital Signal Processing)
DSİ	: Devlet Su İşleri
DB	: Doğu Batı
GD	: Güney Doğu
KB	: Kuzey Batı
GPS	: Küresel Konumlandırma Sistemi (Global Positioning System)
LR-115	: Katı Hal Nükleer İz Kazıma Detektörü
NCRP	: National Council on Radiation Protection and Measurements
UNSCEAR	: United Nations Scientific Committee
SI	: International System of Unit (Uluslararası Birim Sistemi)

1. GİRİŞ

Dünyanın çeşitli yerlerinde çok ağır hasarlara, çok sayıda insanın ölmesine ve büyük maddi kayıplara sebep olan çok şiddetli depremler oluşabilmektedir. Depremlerin ne zaman, nerede ve kaç büyüklüğünde olacağını tespit eden cihaz ve doğal veriler şimdiye kadar tam ve net olarak belirlenememiştir. Fakat doğada ve canlılarda gözlenen ani değişimlerin depremi önceden haber verdiğine inanılmaktadır (Tributsch 1978; Kenagy ve Enright 1980; Wiltschko ve Wiltschko 1995; Ikeya ve ark. 2000; Kirschvink 2000; Karadeniz 2007). Doğal afetler içerisinde en çok zarar verici olan depremin önceden tahmin edilmesine yönelik çalışmalar 1950'li yıllarda başlamış, günümüzde daha da hızlanmıştır. Doğa ve canlılardaki bu değişimler yer kabuğunda, havada ve sularda belirgin bir şekilde gözlenmektedir. Bu doğa olaylarının yanında çeşitli bilimsel deneyler, gerçek verilere ve tahminlere dayanan istatistiksel yöntemler bilimsel araştırmalarda kullanılmaktadır. Depremlerin meydana geliş zamanlarının ve yerinin tahmin edilmesinde kullanılan önemli verilerden birisi de toprakta ve sulardaki radon aktivitesi değişimlerinin gözlemlenmesidir. Depremlerin önceden bilinmesi konusunda yapılan bilimsel çalışmaların geçmişi çok yenidir ve özellikle son yıllarda radon deprem ilişkisi üzerine olan veriler artmıştır. 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 hareketten önce yeraltı sularındaki radon konsantrasyonunun belirgin bir artış göstermesidir. Araştırmalar, depremden önce artmaya başlayan radon seviyesinin o bölgede meydana gelen bir deprem sonrasında normal seviyeye indiğini göstermektedir.

Radon gazının varlığı 19. yüzyıldan beri bilinmesine rağmen, depremin önceden belirlenebilmesi çalışmalarında izlenmesi nispeten yeni bir olaydır. 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). Yeryüzündeki ve yer kabuğu katmanlarındaki radon konsantrasyonundaki değişimlerin depremle bağlantısının incelenmesi, diğer çalışmalara veri sağlanması, deprem sonucu insanların uğradıkları maddi ve can kayıplarının en aza indirilmesinde yarar sağlayabilirliği açısından önem arz etmektedir. 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; Igarashi ve ark. 1995; King ve ark. 1996; Monnin ve Seidel 1997; Wattananikorn ve ark. 1998; Planinic ve ark. 2001; Zmazek ve ark. 2002; Belin ve ark. 2002; Moussa ve ark. 2003; Zmazek ve ark. 2003; Zmazek ve ark. 2005; Baykara ve ark. 2005; Crockett ve ark. 2006; Zmazek ve ark. 2006; İnceöz ve ark. 2006; Kuo ve ark. 2006; Baykara ve Doğru 2006; Ghosh ve ark. 2007; Ereeş ve ark. 2007; Amponsah ve ark. 2008; İnan ve ark. 2008; Choubey ve ark. 2009; Ghosh ve ark. 2009; Baykara ve ark. 2009a; Baykara ve ark. 2009b; Papastefanou 2010; Utkin ve Yurkov 2010; Pierres ve ark. 2010; Perrier ve Richon 2010; Yüce ve ark. 2010; Baykut ve ark. 2010).

Türkiye’de büyük depremleri üreten ve Kuzey Anadolu Fay Sistemi (KAFS) ile Doğu Anadolu Fay Sistemi (DAFS) olarak isimlendirilen iki önemli diri fay sistemi vardır. Türkiye büyük bir bölümü deprem kuşağı içinde yer alması nedeniyle tarihsel dönemlerden bu yana yoğun deprem aktivitesine sahne olmuştur. İç-Batı Anadolu bölgesinde yer alan Afyonkarahisar ilinin de tamamı 1. ve 2. dereceden deprem kuşağı içinde bulunmaktadır. En önemli diri fay Konya’nın Akşehir ilçesiyle Afyonkarahisar’ın Sultandağı ve Çay ilçeleri boyunca bölgeyi kateden eğim atımlı normal faydır. Bölgede çalışan değişik araştırmacılar tarafından “Akşehir fayı” olarak adlandırılan fayla ilişkili olarak çok sayıda deprem meydana gelmiştir.

Bölgede 1900’lü yıllarda büyüklüğü 4’ten fazla 40 deprem meydana gelmiş olup, bunlardan 6 tanesinin büyüklüğü 5’in üzerindedir. Afyonkarahisar 26 Eylül 1921 tarihinde 5,9 M; 21 Şubat 1946 tarihinde 5,7 M; 15 Aralık 2000

tarihinde 5,8 M; 3 Şubat 2002 tarihinde 6,2 M ve 5,8 M büyüklüğündeki hasar verici depremlerin meydana geldiği bir ildir. Bu depremler Akşehir fayının deprem üretme potansiyeline sahip aktif bir fay olduğunu göstermektedir (Koçyiğit ve ark. 2000; Taymaz ve Tan, 2002). Sultandağı bölgesinde 2000 ve 2002 yıllarında meydana gelen depremler farklı kurumlar ve araştırmacılar tarafından değişik amaçlarla araştırılmıştır (Demirtaş ve ark. 2002; Koçyiğit ve ark. 2002; Ulusay ve ark. 2002; Özden ve ark. 2002; Nurlu ve Kuterdem, 2002; Emre ve ark. 2003; Ulusay ve ark. 2004). Gerek morfotektonik ve gerekse sismik verilere göre, Akşehir fay zonunu oluşturan yapısal fay segmentlerinin birçoğu diri olup büyüklüğü 5 ve üzerinde deprem üretme potansiyeline sahiptir.

Türkiye’de de son yıllarda radon gazı ve deprem arasındaki ilişkilere yönelik çalışmalar hız kazanmıştır (Belin ve ark., 2002; Sandıkcıoğlu 2004; Baykara ve ark. 2005; Baykara ve Doğru 2006, Ereeş ve ark. 2007; Erkmen ve ark. 2007; Güloğlu 2007, Yalın ve ark. 2007; İnan ve ark. 2008; Külahcı ve ark. 2009; Şahin 2009; Yüce ve ark. 2010; Baykut ve ark. 2010). Bir depremden önce radon gazı konsantrasyonunda meydana gelebilecek değişiklikler ve bu değişikliklere mevsimsel şartların (hava sıcaklığı, basınç vb.), su özelliklerinin (pH, su sıcaklığı vb.) etkisi gibi çalışmalar mevcuttur. Fakat bugüne kadar radon gazında meydana gelen değişimlerin deprem merkezine uzaklıkla ilişkisini belirleme üzerine yapılmış bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu amaçla hem radon-deprem ilişkisini hem de radon değişimi-deprem merkezi arasındaki ilişkiyi belirleyebilmek için böyle bir çalışma yapılmasına karar verilmiştir.

Bu tez çalışmasında, Akşehir fay hattı üzerinde bulunan Afyonkarahisar ilinde, fay hattına yakın olan 15 kaynak belirlenmiş ve bu kaynaklardan 17 Ağustos 2009–27 Eylül 2010 tarihleri arasında 27 kez su numuneleri alınmıştır. Her bir kaynaktan 15 günlük periyotlar halinde 54 hafta boyunca su numunesi toplanmıştır. Laboratuvar ortamına getirilen numuneler içerdikleri radon konsantrasyonlarını belirlemek amacıyla incelenmiştir.

Tezin amacını iki madde şeklinde ele almak mümkündür. Birincisi Akşehir fay hattı yakınında yer alan yer altı su kaynaklarındaki radon konsantrasyonlarının ölçülmesi ve buradan hareketle bölgede oluşabilecek olası depremlerin önceden tahmin edilmesinde yardımcı olacak verilerin toplanmasıdır.

İkincisi ise daha önce Türkiye’de yapılmamış olan radon değişiminin deprem merkezine olan radyal uzaklığı ile ilişkisini belirlemek ve bu konuda var olan açığı gidermek; radon-deprem arasındaki ilişki kapsamında yapılan çalışmalarda kullanılmak üzere veri elde etmek ve bu bağlamda veriler toplayan diğer çalışmalara da ışık tutmaktır. Bu amaçla tez çalışmasında Akşehir fay hattı yakınlarında belirlenen on beş kaynaktan su örnekleri toplanmış ve radon konsantrasyonları ölçülmüştür.

Tezin ilk bölümünde çalışılan konu ile ilgili bir giriş yer almaktadır. Bir sonraki bölümde (2. Bölüm) radyoaktivite, bazı radyoaktif elementler (uranyum, radyum, radon) ve özellikleri; radon ve deprem arasındaki ilişki, bu ilişkiyi araştıran yurtdışı ve yurt içi literatür bilgisi; radon ölçüm metotları; çalışılan bölge olan Akşehir fay hattı ve Afyonkarahisar’ın jeolojisi hakkında genel bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölüm materyal ve metot bölümünde çalışmada kullanılan AlphaGUARD PQ2000 PRO Radon detektör sistemi tanıtılmaktadır. Dördüncü bölümde elde edilen deneysel bulgular, çizelgeler ve grafikler şeklinde verilmiştir. Son bölüm olan beşinci bölümde ise elde edilen sonuçlar her bir kaynağın radon konsantrasyonunun zamana göre değişimi ve tüm kaynakların radon değişim yüzdelerinin deprem merkezine olan radyal uzaklık ilişkileri açısından tartışılmıştır.

Bu tez çalışmasında kullanılan AlphaGUARD PQ2000 PRO Radon detektör sistemi, Anadolu Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Komisyonunca kabul edilen 091007 nolu proje kapsamında alınmıştır. Tezin su numunelerinin toplaması, laboratuvar ortamına getirilmesi ve arazi çalışması için Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Komisyonunca kabul edilen 08 FENED.17 nolu proje kapsamında, Bilimsel Araştırmalar aracı kaynaklardan örnekler almak için arazi çalışmalarında kullanılmıştır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Radyoaktivite

2.1.1. Doğal radyoaktivitenin keşfi

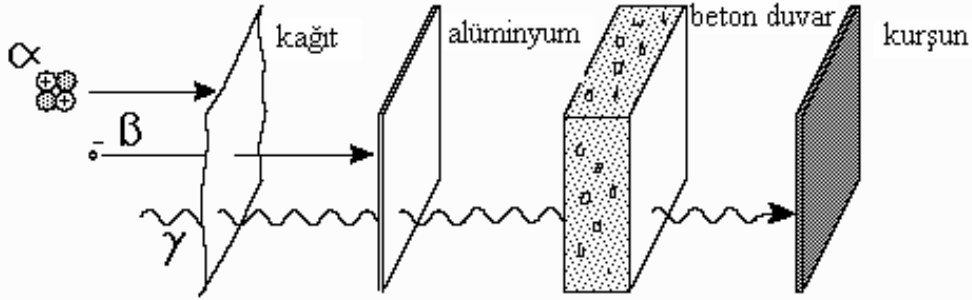
Radyoaktiflik, 24 Şubat 1896'da Henry Becquerel tarafından bulunmuştur. Uranyum tuzu tarafından yayınlanan ve fotoğraf filmine etki eden ışınlar **radyoaktif ışınlar** adı verilmiştir, uranyumun fiziksel ve kimyasal durumuna bağlı değildir. Radyoaktif ışına yapan maddelere **radyoaktif madde** ve elementlere **radyoaktif element**, maddenin bu özelliğine **radyoaktiflik**, radyoaktiflik ile ilgili olayları, metotları ve araçları bir arada inceleyen bilim dalına da **radyoaktivite** adı verilmiştir. 1934'de Curie ve Joliot önceleri kararlı olan elemeleri radyoaktif hale getirmenin mümkün olduğunu keşfetmişlerdir. Bu olaya da **yapay radyoaktivite** adı verilmiştir.

Radyoaktif olarak bilinen atomların çekirdekleri **kararsız** olduklarından parçalanır ve parçalanma sonucu yeni bir çekirdek meydana gelir. Atom çekirdeklerindeki bu değişiklikler sonucu **radyasyon** yayınlanır. Atomun uğradığı bu değişikliğe **bozunma** olayı adı verilir. Radyoaktif bozunma yapan çekirdeğe **ana çekirdek**, bozunma sonucu oluşan çekirdeğe ise **kız (ürün) çekirdek** denir. Ürün çekirdekler kararlı olabileceği gibi kararsız da olabilirler. Bu durumda ürün çekirdekler de bozularak yeni bir ürün oluştururlar. Sonuç olarak bir kararsız atom, kararlı atom haline gelinceye kadar bir seri dönüşüme uğrar. Böylece meydana gelen seriye **bozunma serisi** veya **bozunma zinciri** denir.

Becquerel'in keşfinden sonra Rutherford uranyumun yayınladığı ışınların iki çeşit olduğunu ileri sürdü. Alfa (α) ve beta (β) ışınları olarak adlandırdığı bu ışınların iyonlaştırma etkilerini ve madde içine giricilik yeteneklerini araştırdı. Alfa parçacıklarının 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 parçacıklarından başka, çok daha girici olan üçüncü tür bir ışın çeşidini keşfetti ve gama (γ) ışını 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.

Doğal radyoaktif maddelerin radyasyonları, giricilik ve iyonlaştırma özelliklerine bağlı olarak üçe ayrılırlar. α - parçacıklarının giricilik özelliği en az, ancak iyonlaştırma özellikleri en fazladır ve bir kağıt parçası tarafından bile durdurulabilirler. β - parçacıklarının giriciliği, α - parçacıklarınıninkinden daha fazla olduğu halde iyonlaştırma özellikleri daha azdır ve birkaç milimetre kalınlığındaki metal levhalardan bile geçebilirler. γ - ışınları ise bu radyasyonlar arasında en girici olan ama buna mukabil iyonlaştırma özelliği en düşük olan radyasyondur ve santimetrelerce kalınlıktaki metallere geçebilirler. Rutherford'un yaptığı çalışmalarda, α parçacıkları kuvvetli bir manyetik alan altında küçük sapmalar göstermiş ve pozitif yüklüymüş gibi davranmışlardır. γ ışınları ise çok kuvvetli elektrik ve manyetik alanlarda bile sapmamışlardır. α - ve β - parçacıkları ve γ - ışınlarının giricilikleri arasındaki farklılıklar şematik olarak Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Alfa, beta ve gamanın giricilikleri (Davutoğlu 2008)

2.1.2. 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. Aşağıda bazı radyoaktif bozunma modelleri verilmiştir, bunlar;

1. Alfa bozunması (α bozunması)
2. Beta bozunması (β bozunması)
 - ❖ Beta-pozitif bozunması (β^+ bozunması)
 - ❖ Beta-negatif bozunması (β^- bozunması)
 - ❖ Elektron yakalama olayı
3. Gama ışını yayınlanması (γ -ışınması/bozunması)

1. Alfa Bozunması (α Bozunması)

Alfa taneciklerinin varlığı 1899 yılında Rutherford tarafından tespit edilmiştir. Bu çalışmalarla alfa radyasyonunun helyum atomunun çekirdeğine eşit olduğu bulunmuştur. Alfa parçacıkları gerçekten hızlı hareket eden ve iki kere iyonlaşmış helyum atomlarıdır (He^{++}). 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. Bu bozunumda proton ve nötron sayıları ayrı ayrı korunur. Ayrıca toplam enerji de korunmalıdır. Alfa bozunumunun genel reaksiyon denklemi,

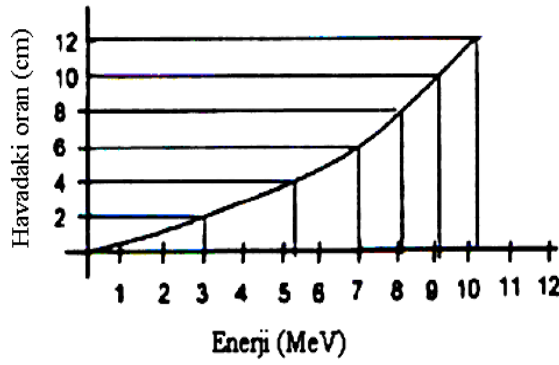


olarak ifade edilir ve bozunma şematik olarak Şekil 2.2'de gösterilmiştir.



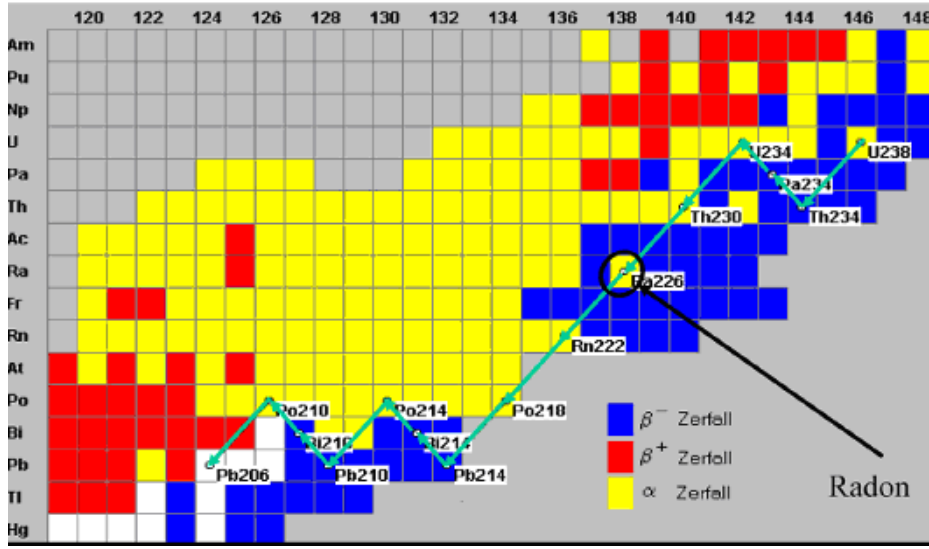
Şekil 2.2. Alfa bozunumu

Ebatlarının büyük olmasından dolayı, girişim güçleri çok küçük olup kağıt, ince metal foil veya birkaç santimetre kalınlığındaki hava ile durdurulabilirler. Alfa parçacıklarının enerjileri, yaklaşık olarak 4 MeV ile 9 MeV arasında ve buna bağlı olarak havada ilerleme miktarları 2,5 ile 8,5 cm'dir. Alfa parçacıklarının enerjileri ile havada ilerleme mesafeleri arasındaki ilişki Şekil 2.3'de görülmektedir. 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.



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

Alfa bozunumu, nötron sayısının proton sayısından çok fazla olduğu çekirdeklere meydana gelir. Radyum, uranyum, toryum ve plütonyum gibi ağır radyoaktif çekirdekler alfa parçacığı yayarak bozunur. ^{238}U elementinin alfa bozunumu zinciri Şekil 2.4'de verilmiştir.



Şekil 2.4. ^{238}U 'in Alfa bozunumu (Kaptan 2008)

2. Beta Bozunması (β Bozunması)

Beta bozunumunun üç farklı türü vardır. Bunlar β^- bozunması, β^+ bozunması ve elektron yakalama olayıdır.

❖ Beta-Negatif Bozunması (β^- Bozunması)

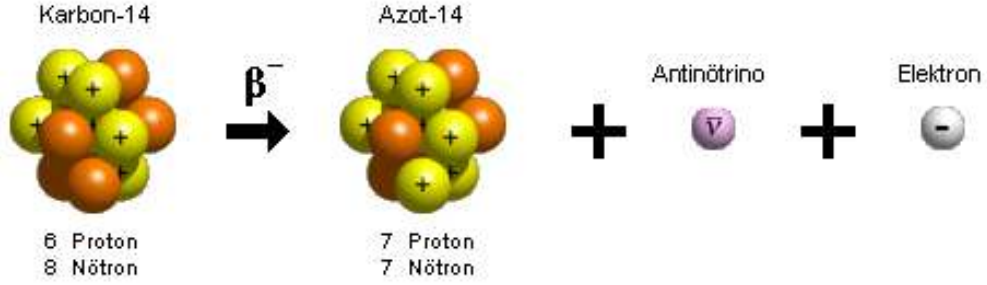
Atom çekirdeğindeki fazla nötronlardan birisi protona dönüşürken meydana gelirler; bu reaksiyon sonucunda açığa çıkan enerjinin yoğunlaşmasıyla negatif yüklü bir beta parçacığı oluşur. Bu parçacıklar elektronlarla aynıdır.



Bu şekilde beta bozunumu yapan radyonüklidin atom numarası bir artarak kendinden bir sonraki elementin izobar atomuna dönüşür. Bu bozunuma da kütle sayısı değişmediği için izobarik bozunma adı verilir. Reaksiyon denklemi

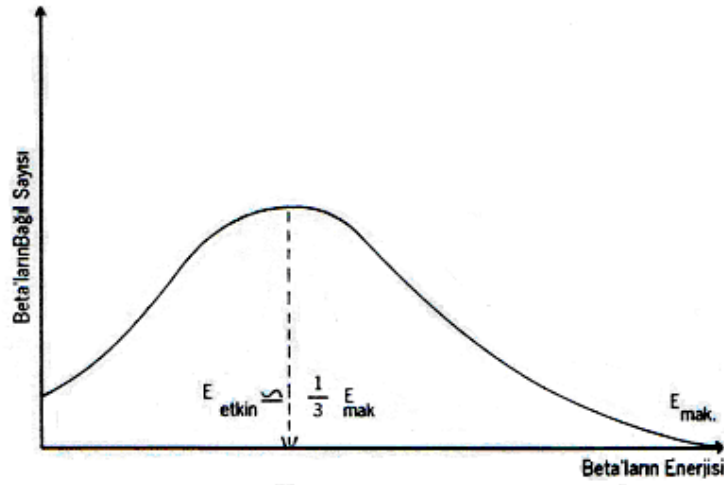


şeklindedir ve şematik olarak Şekil 2.5’de gösterilmiştir.



Şekil 2.5. β^- bozunumu

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 2.6).



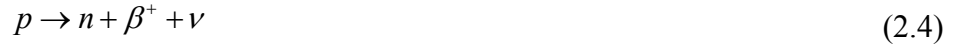
Şekil 2.6. Beta parçacıklarının enerji spektrumu

Beta parçacıklarının enerji spektrumunun sürekli olmasının sebebi çekirdekten β^- ile beraber yüksüz ve elektrona göre ihmal edilebilir kütleli antinötrino denen bir parçacığın salınıyor olmasıdır. Nötrinolar, çekirdeğin fazla enerjisinin bir kısmını taşır, yüksüz olduklarından madde ile etkileşmez ve

β^- 'lerin iyonlaştırma özelliğine etki etmezler. Özellikle açılal momentumun korunumu açısından önemlidirler.

❖ **Beta-Pozitif (Pozitron) Bozunması (β^+ Bozunması)**

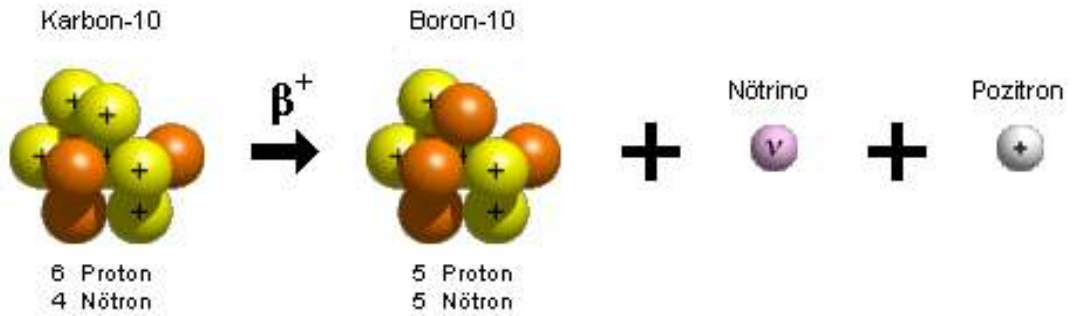
Bu olayda pozitron yayınlanır. Bu bozunma olayı β^- ile benzerlik gösterir. Elektrik yükleri hariç elektronlarla aynıdır. İsminden de anlaşılacağı gibi yükleri pozitifdir. Pozitron yayınlanmasında, çekirdekteki bir protonun nötrona dönüşmesiyle çekirdeğin pozitif yükü bir azaldığından elektronik yapının dengede kalması için elektron yörüngesindeki elektronların da bir azalması gerekir.



Pozitron yayımlayan radyonüklidin proton sayısı (atom numarası) bir eksilerek kendinden bir önceki elementin (izobar) atomuna dönüşür, fakat kütle sayısı değişmez. Genel reaksiyon gösterimi,



şeklindedir ve şematik olarak Şekil 2.7'de gösterilmiştir.



Şekil 2.7. β^+ bozunumu

Beta parçacıkları, alfa parçacıklarından daha az iyonlaşmaya sebep olurlar ve α parçacıklarından yüz kere daha gericidirler. 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 MeV 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. Bu bozunma sırasında da nötrino adı verilen yüksüz ve kütlesi ihmal edilebilir bir parçacık salınmakta ve antinötrininin işlevini gerçekleştirmektedir.

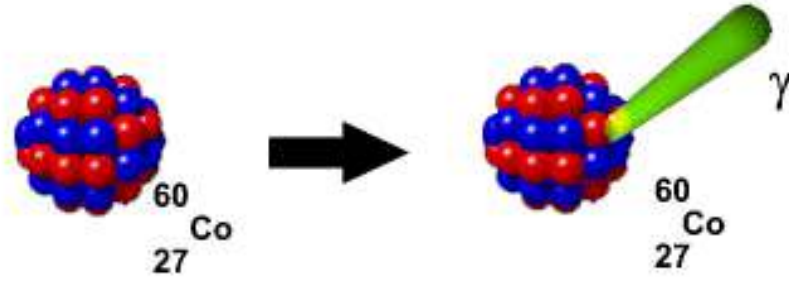
❖ *Elektron Yakalama Olayı*

Elektronla bir proton birleşerek nötron ve nötrino haline dönüşür. Bu bozunumda çekirdekten parçacık salınmaz ancak pozitron bozunmasında olduğu gibi proton sayısı bir eksilir, kütle numarası ise aynı kalır.



3. *Gama ışını yayınlanması (γ -ışınması/bozunması)*

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. Şematik olarak Şekil 2.8'de gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Gama bozunumu

γ ışınlarının enerjileri 0,1 MeV ile 3 MeV arasında değişir. Değişik olaylar sonucunda γ ışınları meydana gelebilir. Bu olaylar;

1. Radyoaktif bozunma,
2. Nükleer fisyon,
3. Çekirdeğe nötron girmesiyle oluşan yakalama reaksiyonlarıdır.

Gama ışınları çok yüksek enerjili elektromanyetik dalgalardır. 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 geçebilirler. Gama ışınlarını ancak kalın kurşun levhalar, 2–3 m’lik beton bloklar durdurabilir. Gama ışınları yüksüz olduklarından elektrik ve manyetik alanda sapmazlar.

2.1.3. Radyoaktif bozunma bağıntısı

Bir atomun çekirdeğinin bir alfa parçacığı, bir beta parçacığı, bir gama ışını veya başka herhangi bir parçacık yayınlanması olayına **radyoaktif bozunma** adı verilir.

Bozunmamış her bir çekirdeğin gelecek bir saniye içindeki bozunma olasılığı λ olmak üzere, bir dt zaman aralığında her bir çekirdeğin bozunma olasılığı λdt olur. Herhangi bir anda N sayıda bozunmamış çekirdek var ise, dt aralığında bozunacak olanların sayısı,

$$dN = -\lambda N dt \quad (2.7)$$

bağıntısı ile verilir. Denklemdaki eksi işareti zaman ilerledikçe dt zaman aralığında bozunacak olan çekirdek sayısının azalacağını gösterir. Denklem düzenlenirse,

$$\lambda = -\frac{dN}{N dt} \quad (2.8)$$

elde edilir ve bozunma olasılığı veya bozunma sabiti denir. Bozunma sabiti, her radyoaktif element için o elemente ait bir sabittir. Bir radyoaktif elementin birim zamanda bozunan atom sayısına o atomun aktivitesi veya bozunma hızı denir. Denklem (2.7),

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt$$

şeklinde yazılıp, integrali alınırsa:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2.9)$$

bağıntısı elde edilir. Denklem (2.9) ifadesi radyoaktif atomların sayısının eksponansiyel olarak azalacağını gösterir (Şekil 2.8).

Denklem (2.9) 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.

2.1.4. 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**, bir radyoaktif numunedeki bir saniyedeki parçalanma sayısı olarak tanımlanır.

$$\text{Aktiflik} = A = \lambda N = -\frac{dN}{dt} \quad (2.10)$$

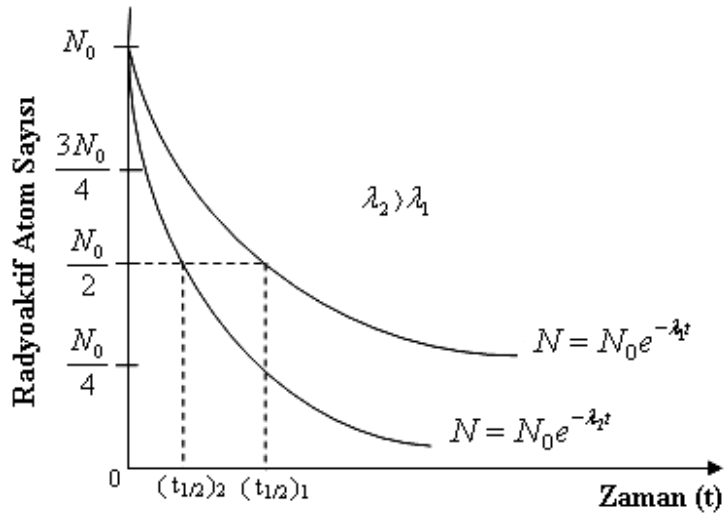
Bir numunenin aktifliğinin, mevcut radyoaktif atomların sayısına (N) ve bozunma sabitine (λ) bağlı olduğu görülür. N yerine (2.9) kullanılarak ve $A_0 = \lambda N_0$ ($t = 0$ anındaki aktiflik) kabul edilerek ,

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (2.11)$$

tanımlanabilir.

2.1.5. Bozunma sabiti

Bozunma sabiti, radyoaktif maddenin birim zamandaki parçalanma kesridir. Denklem (2.9) ve Şekil (2.9)'dan görüleceği gibi, bozunma sabiti büyük olan bir radyoaktif madde küçük olandan daha hızlı bir parçalanmaya uğrar.



Şekil 2.9. 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 2.9'dan 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 ya da yarılanma süresi kullanılır.

2.1.6. 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.

Bozunma sabiti ile yarı ömür arasındaki bağıntı; (2.9)'da t , geçen süre için $t_{1/2}$ ve N için de $N_0/2$ değeri konarak bulunur.

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

Denklem (2.9)'da 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. Bu durum,

$$N = \frac{N_0}{2^n} \quad (2.14)$$

olarak tanımlanır. Burada n gerçekleşen yarı ömür sayısıdır.

2.1.7. Ortalama ömür

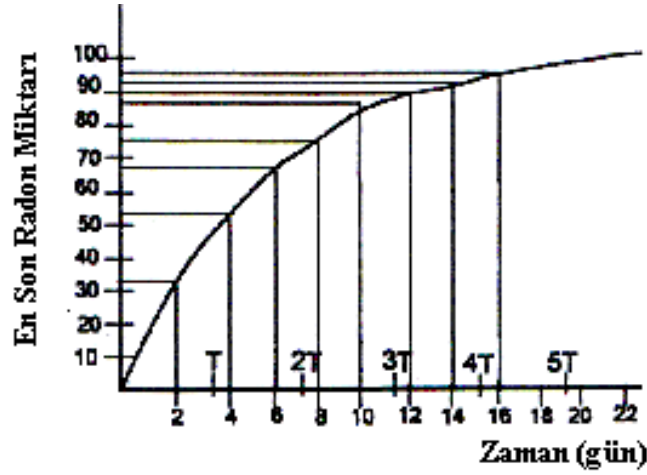
Bir radyoaktif elementi oluşturan atomlar arasında bazıları çok kısa, bazıları ise çok daha uzun ömürlüdür. Bu nedenle radyoaktif maddenin kalan kısmının hesaplanmasında bazen de ortalama ömür kullanılır. Ortalama ömür tanımı, radyoaktif atomların verilen bir süre kadar bozunmadan kaldığı ve sürenin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

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

bağıntısı ile verilir. Görüldüğü gibi ortalama ömür yarı ömürden büyüktür.

2.1.8. Radyoaktif denge

Bir radyoaktif elementten yeni bir radyoaktif ürün çıkar ise, bozunma olayı peşpeşe parçalanmalar şeklinde meydana gelebilir. Ana çekirdeğin oluşturduğu çekirdeğe kız, onun oluşturduğu çekirdeğe ise torun adı verilir. Birçok durumda bu peşpeşe bozunma ana maddenin ürüne ve ürünün de kararlı bir elemente bozunmasıyla sınırlıdır. Ürün çekirdeğin miktarı ana elementin miktarına eşit oluncaya kadar hızlı bir şekilde artar. Böylece bunlar dengededir denir ve bu denge ürün çekirdek taşınmaz hale gelinceye kadar korunur (Şekil 2.10).



Şekil 2.10. 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,

$$N_d = N_p \frac{\lambda_p}{\lambda_d - \lambda_p} (e^{-\lambda_p t} - e^{-\lambda_d t}) \quad (2.16)$$

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

2.1.9. Radyoaktivite birimi

Radyoaktivite konusu kapsamında aktivite, ışınlama (exposure) birimi, soğurulan doz, eşdeğer doz, etkin eşdeğer doz (etkin doz) birimleri mevcuttur; burada sadece aktivite birimi üzerinde durulmuştur.

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:

$$1\text{Bq} = 2,7 \times 10^{-11} \text{ Ci}$$
$$3,7 \times 10^{10} \text{ Bq} = 1 \text{ Ci}$$

Herhangi bir radyoaktif elementin belli bir miktarının aktivitesi spesifik aktivite olarak adlandırılır ve Bq/L, Bq/kg, Bq/m³ vb. gibi çeşitlilikte kullanılır.

2.2. Bazı Radyoaktif Elementler ve Özellikleri

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

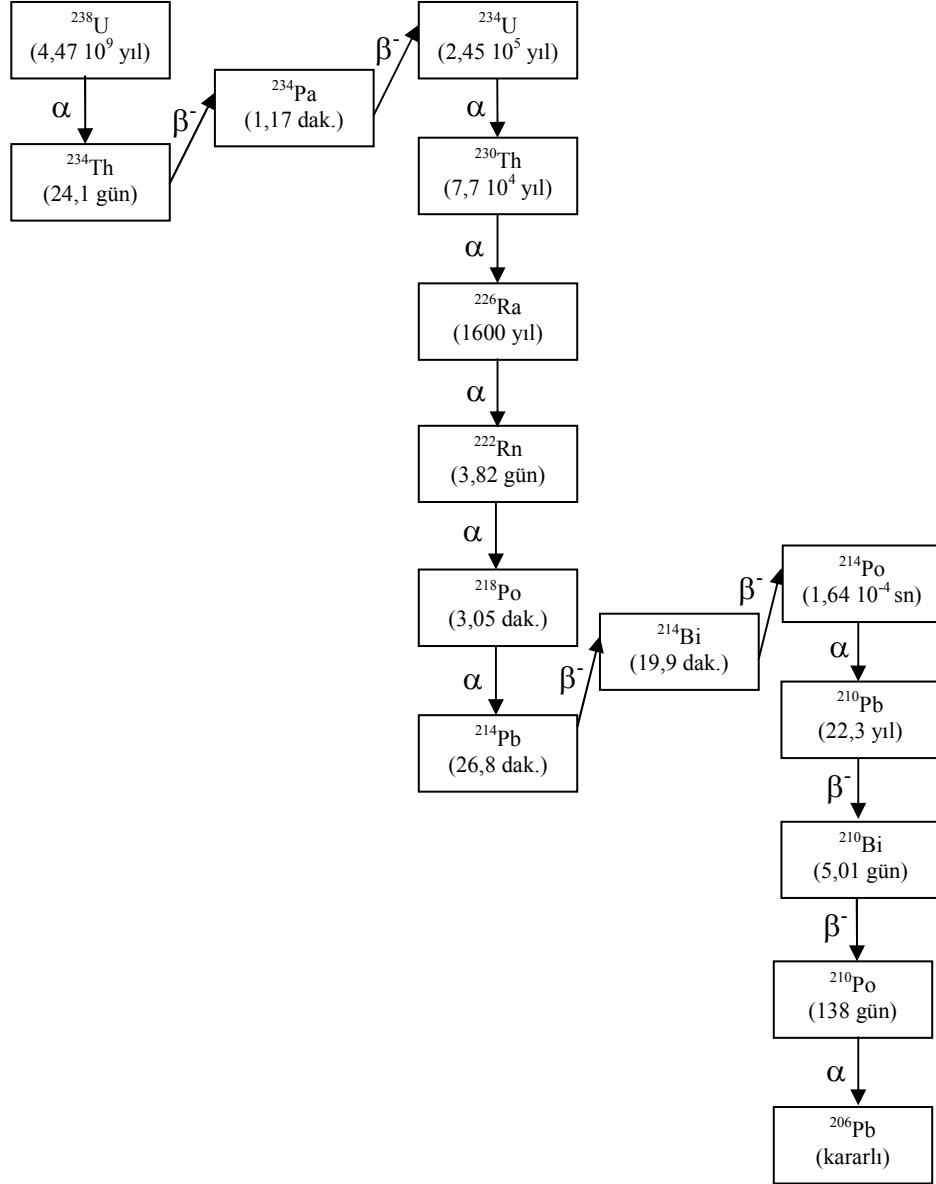
Yerkabuğu ve yer yüzeyi dünyanın oluşumundan sonra birçok tektonik fiziksel ve meteorolojik olaylara maruz kalmıştır. Bu nedenle uranyum ve toryum dünyanın üst kabuğunda kütle halinde ve yüksek yoğunlukta bulunmamaktadır.

Buna karşılık yer yüzeyinden 10 km derinliğe kadar yerkabuğunun her yerinde az ya da çok uranyum yoğunluğu vardır.

2.2.1. Uranyum

Uranyumun doğada kütle numaraları 230, 234, 235, 238 olmak üzere dört izotopu bulunur. Doğal elementlerin en ağırlı olan doğal uranyumun (^{238}U 'un) bulunma oranı % 99,28 olup genellikle ^{234}U ile dengededir. 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 uranyum, aktinyum ve toryum serileridir. Uranyum serisinin ana çekirdeği ^{238}U , aktinyum serisinin ^{235}U ve toryum serisinin ^{232}Th 'dir. Bu çekirdekler temsil ettiği serinin en uzun yarı ömürlü üyesidir. Uranyumun bozunma zinciri Şekil (2.11)'de gösterilmiştir.

Uranyum tüm kayalarda ve topraklarda bulunmaktadır. Uranyumun sulara taşınması ise onunla temas halinde olan toprak veya kayalardan gelmektedir.



Şekil 2.11. ^{238}U 'in bozunma ürünleri şeması

2.2.2. Radyum

^{238}U serisinde yer alan radyum, 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 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Radyumun doğal izotopları

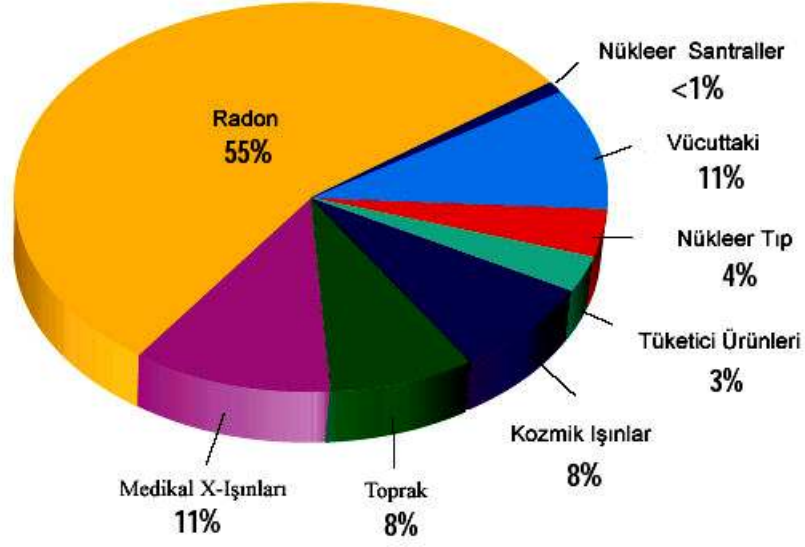
İzotop	Bozunma Serisi	Ana Element	Ürün Element	Yarı Ömür	Bozunma Türü
Ra-228	Th-232	Th-232	Ac-228	5,8 yıl	β, γ
Ra-226	U-238	Th-230	Rn-222	1620 yıl	α, γ
Ra-224	Th-232	Th-228	Rn-220	3,66 gün	α, γ
Ra-223	U-235	Th-227	Rn-219	11,4 gün	α, γ

Radyum bozunma sonucu, yarı ömrü 3,8 gün olan radyoaktif radon (^{222}Rn) gazına dönüşür. Radyum uzun yarı ömürlü olması nedeniyle ^{222}Rn oluşumunda bir üreteç görevi yapar. Radyum, yerkabuğunun 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).

2.2.3. Radon

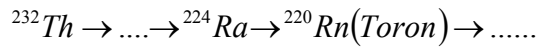
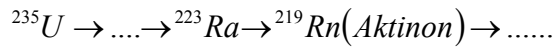
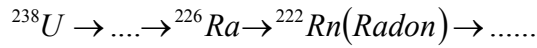
1898’de Fredrich Ernst Dorn tarafından bulunmuştur. İlk keşfedildiği yıllarda parlama anlamına gelen Latince nitens sözcüğünden türeyen niton ismiyle adlandırılmıştır. 1923 yılından bu yana element, radon ismiyle kullanılmaktadır. ^{226}Ra α -yayınlayarak ^{222}Rn ’ ye dönüşür. Radon 3,82 gün yarı ömrüyle, 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. Erime noktası -71°C , kaynama noktası ise $-61,8^\circ\text{C}$ ’dir.

Doğal kaynaklardan alınan dozun en önemli bileşeni, radon gazı ve onun kısa yarı ömürlü bozunma ürünleridir (Şekil 2.12). Radon gazından dolayı maruz kalınan yıllık doz yaklaşık $1,3 \text{ mSv}$ ’dir (IAEA 1996).



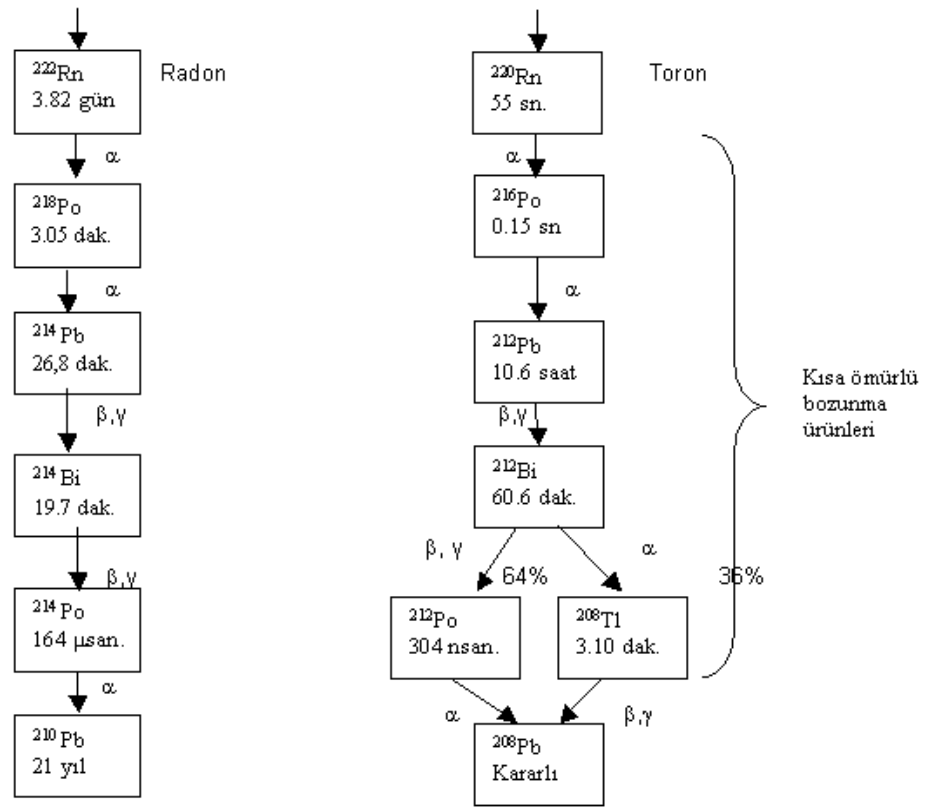
Şekil 2.12. İnsanların maruz kaldığı radyoaktif dağılım ve radon oranı (NCRP Report,1987)

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 şu şekildedir:



Radonun yarılanma ömrü 3,82 gün, toronun yarılanma ömrü 55 saniye ve aktinonun yarılanma ömrü 3,9 saniyedir. 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. Çok düşük seviyelerde olması sebebiyle aktinonun etkisi ihmal edilebilir düzeydedir.

^{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 2.13'de verilmiştir.



Şekil 2.13. ^{222}Rn ve ^{220}Rn 'nin bozunma zinciri (Çelebi 1995)

Radon ve ürünlerinin temel radyasyon enerjileri ve yarı ömürleri Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Radonun ve ürünlerinin aktivite özellikleri (Özbal 1999)

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	2,950
			0,73	0,352
			1,02	
			1,00	0,609
Bi-214	19,7 dak		1,51	1,120
			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.

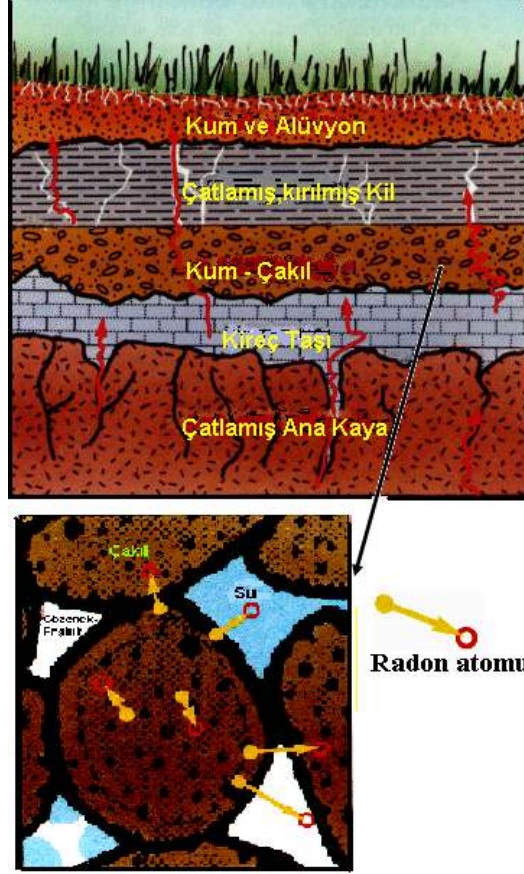
Başlıca Radon Kaynakları

Radon, kayadaki radyumdan ve topraktan, dışarıdaki havadan, yapı malzemelerinden, doğalgazdan ve sudan yayılır. Kayaçların ve toprağın içinden yukarı yükselerek bina temellerinin ya da boru sistemlerinin içinden dışarı sızabilir. Radon kaynakları arasında bina ve doğalgaz da yer almaktadır, fakat burada sadece toprak gazında ve suda radon kaynakları üzerinde durulacaktır.

Toprak Gazında Radon

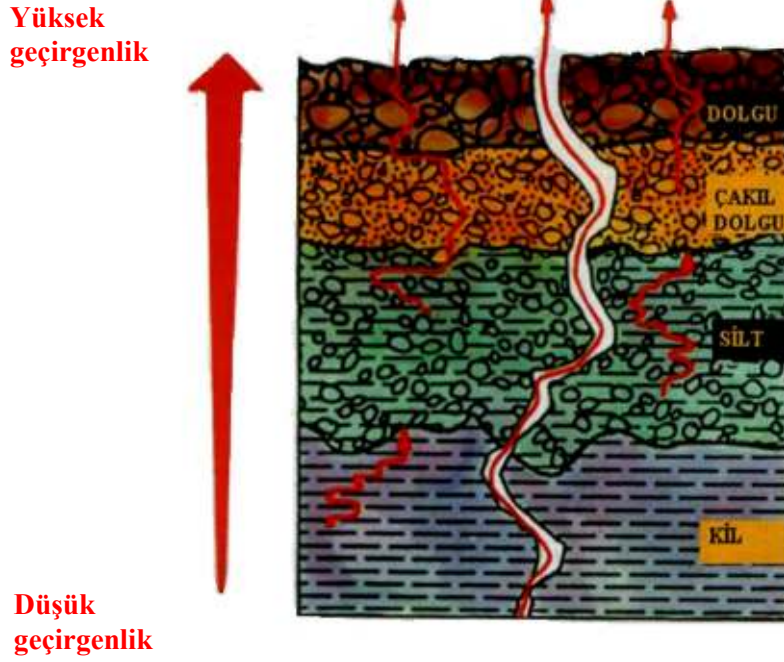
Yeraltı uranyum yataklarının keşfinde toprak gazı ve yer atmosferinde radon ölçümleri kullanılır. Radon ölçümlerinin bu araştırmaların en önemlilerinden bir tanesi olmasının nedeni, yer kabuğunun çeşitli derinliklerinde gömülü uranyum kaynaklarından yeryüzüne göç sonucu toprak gazında ve yer atmosferinde bir yoğunluk oluşmasıdır.

^{226}Ra 'nın bozunumu ile oluşan ^{222}Rn atomları toprak gazının olduğu 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. Ra-226 çekirdeği, iki nötron ve iki protondan oluşan alfa parçacığı yayınlamaya başlar. Alfa parçacığının dışarı atılmasıyla, yeni oluşan radon atomu ters doğrultuda geri tepir. Alfa parçacığının geri tepmesi radonun mineral taneleri arasından serbest kalmasına etki eden en önemli faktördür. Mineral tanesi içindeki radyum atomunun yeri ve radon atomunun geri tepme yönü yeni oluşan radon atomunun mineral taneleri arasındaki gözeneklerden geçişini sağlar. Eğer radyum atomu, büyük tanecik içerisinde derinlerde yer almışsa ve geri tepme yönü dikkate alınmıyorsa, radyum atomu radonun tanecik dışına çıkmasına izin vermeyecektir. Bu nedenle radon atomu mineral tanesi içinde gömülü olarak kalır. Radyum atomu tanecik yüzeyine yakın bir yerde olsa dahi, eğer geri tepme yönü taneciğin içine doğruysa, radonu mineralin daha da içine doğru itecektir. Bununla birlikte taneciğin yüzeyine yakın bazı radon atomlarının geri tepmesi taneciğin yüzeyine doğru yönelir. Bu olayın meydana gelmesiyle yeni oluşan radon atomu minerali terk eder ve tanecikler arasındaki gözeneklerden veya kaya içindeki kırıklardan geçerek atmosfere ulaşır (Günaydı 2004). 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). Radon atomunun mineral taneleri arasındaki gözeneklerden geçişi Şekil 2.14'de gösterilmiştir.



Şekil 2.14. Radonun toprak içindeki dağılımı

Radonun gaz olması onu, toprak içinde bulunan uranyum ve radyumdan daha fazla hareketli kılar. Hareketli bir gaz olması nedeniyle, toprak taneleri arasındaki gözeneklerden, kaya içindeki açıklıklardan, çatlak ve kırıklardan kaçarak toprak ve kayaları kolaylıkla terk edebilir. Gözenekler içinde serbest hareket edebilme yeteneğine sahip olması, uzun mesafeler boyunca hareket edebilmesini sağlar. Toprak içindeki radonun hızı, gözeneklerde yer alan su ile kontrol edilir. Toprağın nem içermesi, topraktaki gözeneklerin oranı, toprağın suyu ve havayı geçirme kabiliyetini belirler. Buna geçirgenlik adı verilir. Radon geçirgen toprak içerisinde (örneğin kumlu veya çakıllı toprak gibi), geçirgen olmayan toprağa göre (örneğin killi toprak gibi) daha hızlı hareket eder. Eğer toprak ve kayada herhangi bir kırık varsa o zaman hareketi daha da hızlı olacaktır (Günaydı 2004). Şekil 2.15’de radon atomlarının değişik toprak tiplerine göre radon geçirgenlik oranlarını göstermektedir.



Şekil 2.15. Toprağın radon geçirgenliği

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 kurumasına sebep olur ve toprağın gözenekleri artar. Bunun sonucu olarak radonun topraktan kaçıışı kolaylaşır. Topraktan havaya geçen radon, rüzgarların etkisi ile atmosfere karışır.

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.

Sularda Radon

Zengin uranyum içerikli topraktan çıkan yer altı suları ve derin jeolojik zonlardan yeryüzüne çıkan sular, yüksek miktarda radon ve radyum konsantrasyonuna sahiptir (Horvat ve ark. 2000). Termal bölgede bulunan ılıca ve kaplıca suları da bu gruba girer. 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 çalışmalarda radon ölçümleri genellikle memba ve kuyu sularında gerçekleştirilir. Çünkü bu suların kaynağı yeraltı akarsular sistemidir. Yeraltı sularının bir kısmı magmaya yakın yerlerden geçerken ısınarak yüksek bir sıcaklığa ulaşır. Yeraltındaki maden ve kayalıklar arasında süzülürken yüksek sıcaklığın etkisiyle iyi bir çözücü özelliği kazanır. Böylece sıcak sular, yeraltı ortamında dolaşırken daha çok miktarda radyumun çözünmesine sebep olurlar (Özbal 1999).

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.

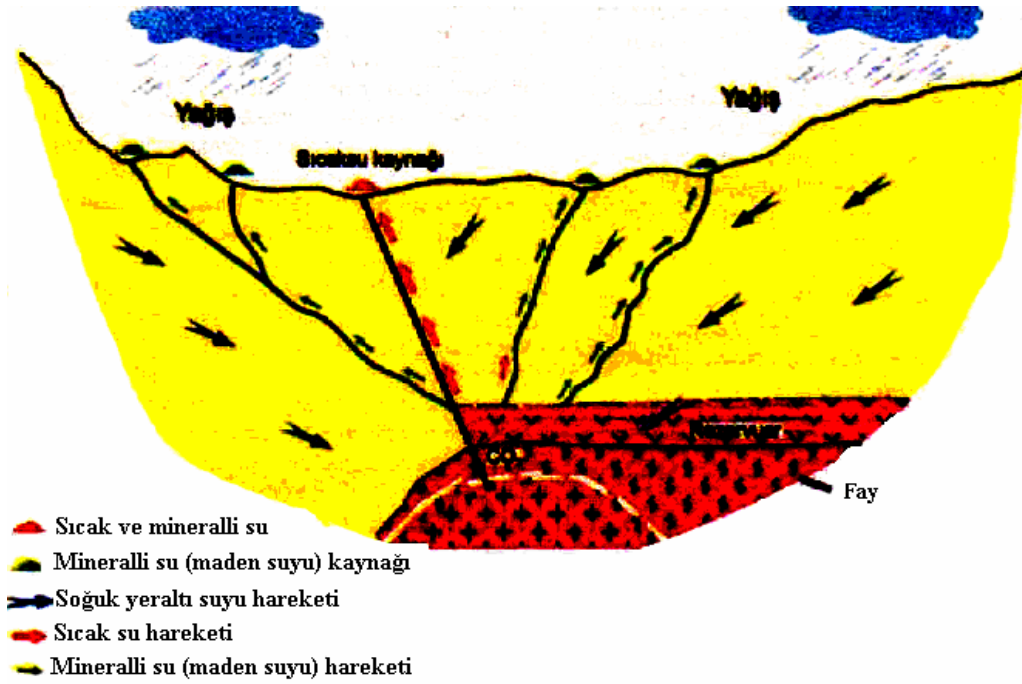
Radon suda çözünebilir. Radonun sudaki çözünürlüğü 0 °C'de 510 cm³/L, 25 °C'de 220 cm³/L ve 50 °C'de 130 cm³/L' dir (UNSCEAR 1993). Sudaki radonun ortaya çıkışı, topraktaki radyumun kimyasal konsantrasyonuyla ve radonun suyun içine yayılması ile kontrol edilir. Yeraltı sularındaki radon konsantrasyonu yüzeysel sulardan daha yüksektir. Yüzeysel sularında 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 su, kapalı ortam radon konsantrasyonuna katkıda bulunur. Çamaşır, bulaşık makinesi gibi suyun

püskürtülmesi veya çalkalanması büyük miktarda radonun salınmasına neden olur.

Termal sular ve Radon

Radon miktarının termal sular söz konusu olduğunda daha fazla olduğu gözlenmiştir. Bunun en önemli sebepleri termal suların sıcak olmaları, geçtikleri yerlerde daha fazla minerali, dolayısıyla uranyum tuzunu çözebilmeleri ve yerin daha derin noktalarından yeryüzüne çıkıyor olmalarıdır. Termal ve mineralli su membarları (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 taşır. Sıcak sularda daha fazla radyum çözülmesi radon yoğunluğunun artmasına neden olur. Böylelikle termal sular yeraltı ortamının jeofiziksel ve jeokimyasal yapı ve karakteristiklerini yeryüzeyine yansıtır (Şekil 2.16). Bunun yanı sıra yeraltında tuzaklanmış olan gazların yeryüzeyine çıkabilmesine de yardımcı olur (Özbal 1999).

Türkiye'de deprem kuşakları üzerinde sıcaklıkları 20 °C–101 °C arasında 1500 dolayında, kaynak çıkışı ve rezervuar sıcaklıkları 30 °C–242 °C arasında değişen 400 kuyudan sıcak ve mineralli su çıkışı mevcuttur (Şimşek 1997). 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 2.16. Sıcak ve mineralli su çıkışları

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.

2.3. Radon-Deprem İlişkisi

2.3.1. Genel bilgiler

Depremi olacağını önceden bilememek depremde mal ve can kaybının çok fazla olmasının en önemli nedenlerinden biridir. Çok sayıda insan kaybına neden olan en önemli doğal felaketlerden biri olan depremin, önceden sezilmesine yönelik çalışmalar hız kazanmıştır. Dünyada oluşan büyük depremlerden sonra deprem bölgesinde yapılan araştırmalarda, deprem oluşmadan önce doğada pek

çok normal dışı olay gözlemlendiği bilinmektedir. Bu gözlemler çeşitli deneylerle araştırılmıştır. Depremi 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). Rusya, Japonya ve Çin’de yapılan çalışmalar radon gazı ile sismik aktiviteler arasında doğrudan bir ilişki olduğunu ortaya koymuştur. Radonun iki izotopu olan toron (Rn^{220} ; $t_{1/2} = 55,3$ s; Th^{232} serisi) ve aktinon (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, uranyumun mevcut olduğu tüm kayalardan, topraktan gelmekte ve gaz olması nedeniyle bulunduğu ortamın boşluklarında ilerleyerek atmosfere kaçma eğilimi göstermektedir. Radon taşıyıcı gazlar (CO_2 , CH_4 , He) ve su tarafından yeraltındaki derin kuşaklardan yeryüzüne etkili bir şekilde taşınabilir (Malmqvist ve Kristiansson, 1982; Etiyopya ve Martinelli, 2002). Bu taşınma sismik olaylar tarafından etkilenir (Sadovsky ve ark. 1972). Yeraltı suyundaki radon konsantrasyonu sadece kimyasal formu değil aynı zamanda kayaların yapısal özelliğini de yansıtır (Yasuoka ve ark. 2006). Radon sızıntısının, aktif faylar üzerinde daha fazla olduğu, atmosferik koşullara ve sismik faaliyetlere bağlı değişiklikler gösterdiği bilinmektedir (Planinic ve ark. 2001; Moussa ve ark. 2003; Tansia ve ark. 2005; Walia ve ark. 2008; Amponsah ve ark. 2008). Yeraltı sularında ölçülen radon konsantrasyonunun, su sistemi içindeki kayaların sadece kimyasal değil yapısal özelliklerini de yansıtmaması beklenir. Yeraltı suyundaki radon konsantrasyonu su içindeki komşu kayalardaki uranyum konsantrasyonu ile ilgilidir. Radonun geri saçılma mesafesi (3×10^{-8} m) çok kısa olduğundan sadece kaya yüzeyinde oluşan radon atomları suya karışır. Kaya içindeki radon yüzeye kaçamaz (Çelebi, 1995).

Yerkabuğundan atmosfere yayınlanan radon miktarı genellikle küçüktür, ancak fay hatlarında, jeotermal kaynaklarda, uranyum depozitlerinde, volkanik hareketler sırasında ve depremlerin oluşumundan önce ölçülen radon miktarlarında anomaliler gözlenmektedir (King, 1978; Khan ve Qureshi, 1994). Yerkabuğunda meydana gelen gerilmeler nedeniyle oluşan genleşmeler sonucu, kayalardan yeraltı su sistemine radon geçişi artmaktadır. Bunun sonucu olarak,

sismik faaliyetin başlamasından önce çevredeki kuyu ve kaynak sularındaki radon konsantrasyonunda bir artış gözlenmektedir. Bu nedenle deprem araştırmalarına yönelik çalışmaların özellikle kuyu ve kaynak sularında yapılması çok daha doğru sonuçlar vermektedir.

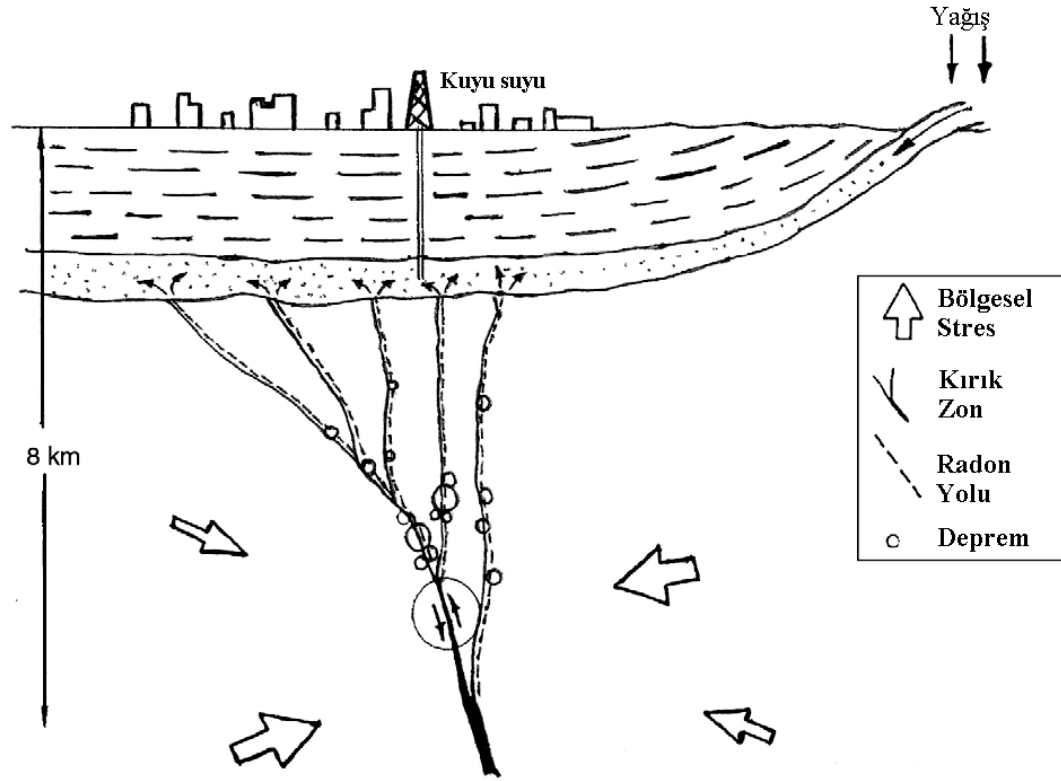
Japonya, Çin, Amerika Birleşik Devletleri ve Rusya gibi deprem riski büyük olan ülkelerde radon ve deprem arasındaki ilişkiye dayalı ciddi bilimsel çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmaların en önemli amacı, depremin habercisi olabilecek doğa olaylarını yakından izleyerek, toplanacak verilere dayanarak yakın bir zamanda olabilecek depremi haber verebilmek ve olabilecek can kayıplarını önleyebilmektir. Depremlerin önceden saptanması konusunda yapılan çalışmalarda iki temel öncü yöntem ortaya konmuştur. Birincisi depremlerin istatistiksel analizleri, ikincisi ise jeofiziksel öncüler olarak bilinir. Yeraltından radon konsantrasyonları değişimleri jeofiziksel öncüler arasında yer almaktadır (Asada 1982).

2.3.2. Radon-deprem ilişkisinin tarihçesi

Radon ve deprem arasındaki ilişkiye ait ilk çalışmalar Japon bilim adamı Okobe tarafından 1956'da yapılmıştır. 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. Suda kolaylıkla çözünen radon, asal bir gaz olduğundan bileşik yapmaz ve yer altı sularındaki konsantrasyonu, genel hidrolojik karakteristiklerden (suyun kompozisyonu, mineralizasyonu vb.) etkilenmez. Bu nedenle, radonun yeraltı sularındaki konsantrasyonlarındaki dalgalanmanın büyük ölçüde tektonik hareketlere bağlı olduğu öne sürülmektedir (Teng 1980; Virk ve Singh 1993).

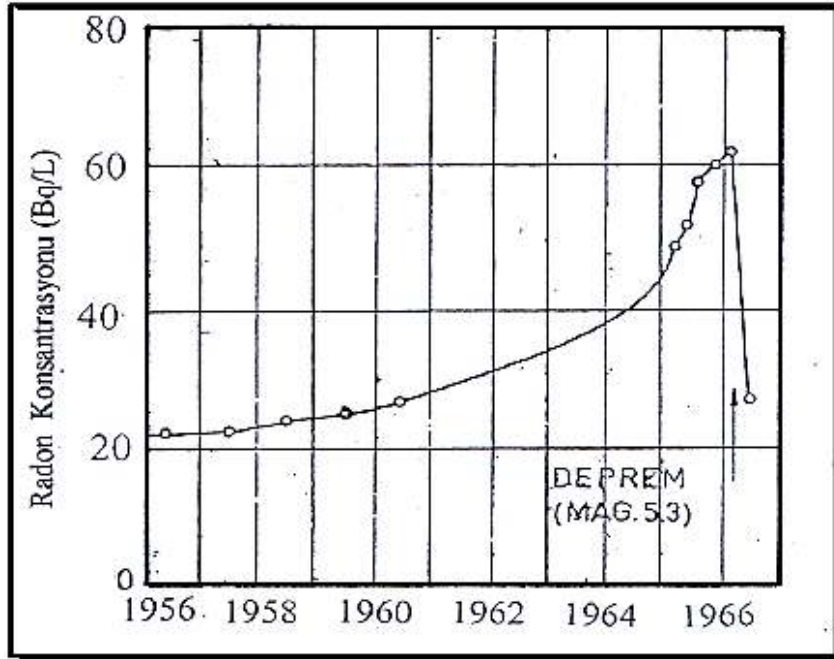
Rus bilim adamları (Semasko Scientific Institute) tarafından Taşkent artezyenlerinde uzun süreli radon ölçümleri yapılmıştır. 1967 ve 1971'de Ulomov ve Mavashev tarafından yapılan çalışmada 1966'daki Taşkent depreminden önce kuyu sularında radon konsantrasyonunda önemli değişimler gözlenmiştir. Böylece ilk kez derin kuyu sularında radon anomalilerinin deprem için faydalı bir izleyici

olduğu ortaya konulmuştur (Ulomov ve Mavashev 1971). şekil 2.17’de Taşkent depreminde yeraltısuyu havzasında radon hareketi gösterilmektedir.

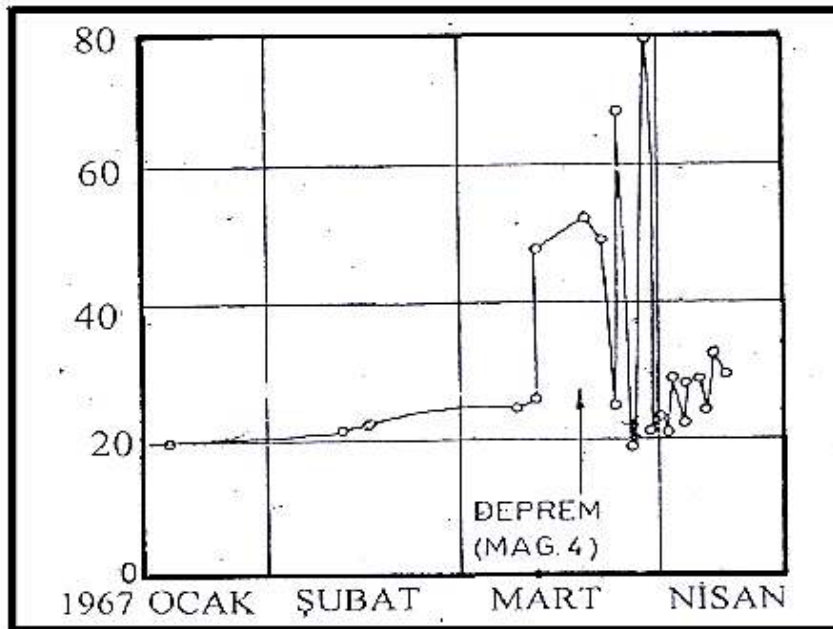


şekil 2.17. Taşkent depreminde yeraltısuyu havzasında radon hareketi (Ulomov ve Mavashev 1971)

1966 ve 1967 Taşkent depremi öncesi radon konsantrasyonundaki değişiklikler şekil 2.18 ve şekil 2.19’da verilmektedir (Press, 1975). şekil 2.18’de grldğu gibi, radon konsantrasyonu yıllarca kararlı bir şekilde artış göstermiş, deprem öncesi artış hızlanmış, 1966’da deprem esnasında aniden düşmüştür. Çin’de ve 1966 Taşkent depreminde yapılan yeraltı sularındaki radon değişim gözlemleri, Japonya’nın yeraltı sularında sürekli izleme sistemi geliştirmesine öncülük etmiştir.

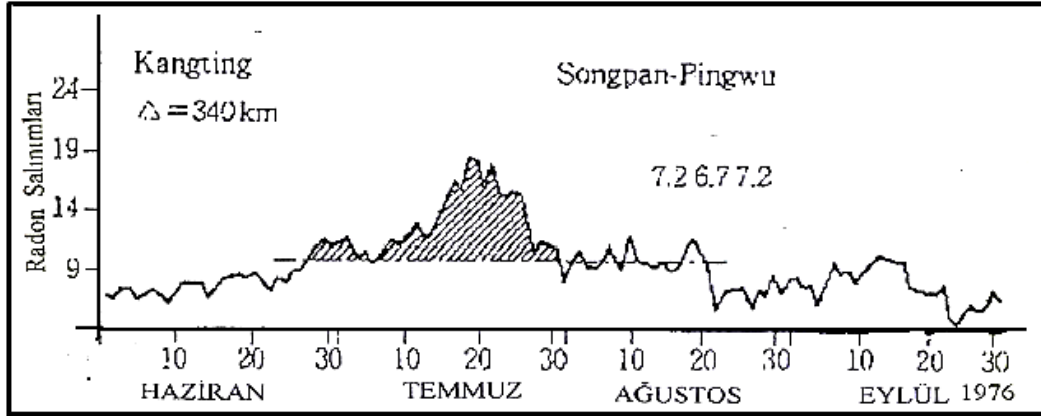


Şekil 2.18. 1966 Taşkent depremi öncesi kuyu sularında gözlenen radon konsantrasyonu değişimleri (Press, 1975)



Şekil 2.19. 1967 Taşkent depremi öncesi kuyu sularında gözlenen radon konsantrasyonu değişimleri (Press, 1975)

Benzer değişiklikler Çin depremi öncesinde de izlenmiştir. 1976 Songan-Pinwu depremleri öncesinde radon konsantrasyonları artmıştır. Songan-Pinwu depremi öncesi, kuyu sularında gözlenen radon konsantrasyon değişimleri Şekil 2.20’de görölmektedir. Radon konsantrasyonundaki artış depremden 2–3 yıl önce başlamış ve depremin başladığı ana kadar devam etmiştir (Asada 1982).



Şekil 2.20. 1976 Songan-Pinwu depremi öncesi kuyu sularında gözlenen radon konsantrasyonu değişimleri (Kapdan, 2009)

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).

1976 Çin ve 1966 Taşkent depremlerinde yapılan yeraltı sularındaki radon değişim gözlemleri sonucu, Japonya’da yer altı sularında sürekli izleme sistemi geliştirilmiştir. Tokyo Üniversitesi ve Japon Jeoloji Araştırma Birimi depremi önceden saptamak için bir ağ kurmuşlardır (Igarash ve ark. 1995). 1989 yılında geliştirilmiş bir radon izleme sistemi Japonya’da kullanılmaktadır. Yüksek enerji çözünürlüğü olan yarı iletken alfa parçacık detektörü (PIN fotodiyot) bir ağ ile bağlanmıştır. Sistem 60 kuyu içinde 17 m derinlikte radon değişimlerini kaydetmektedir (Igarash ve ark. 1995).

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.

2.3.3. Radon-deprem ilişkisinde öne sürülen modeller

Sismik hareketler öncesinde radon konsantrasyonundaki değişim mekanizmalarının anlaşılabilmesi için ortaya atılan üç model vardır. Bunlar, sıkışma modeli (King 1978; King ve ark. 1996), genişleme-difüzyon modeli (Press 1975) ve gerginlik-korozyon modelidir (Bichard 1980).

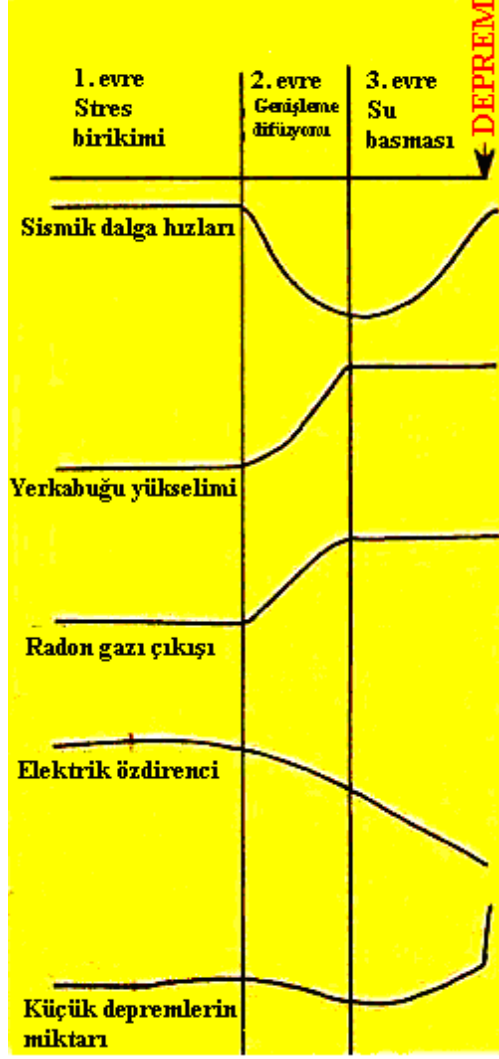
a) Sıkışma modeli

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 (Kulalı 2009).

b) Genişleme-difüzyon modeli

Öne sürülen modellerden biri olan genişleme-difüzyon (dilatancy-diffusion model) modeli, kayaların kırılmadan önce geçirdikleri önemli değişiklikleri göz önüne alır. Kaya mekaniği laboratuvarlarındaki deneylere dayanan bu modelde verilen diyagramlar ilk defa 1975 yılında Frank Press tarafından açıklanmıştır. Bu diyagram depremden önce kayalarda meydana gelen değişiklikleri ve kaya mekaniğine dayalı deprem tahminlerinin esasını teşkil eder. Genişleme modeline göre, bölgesel stres arttığında kaya kütlelerindeki genişleme, ya kırılma nedeniyle kayaların yüzey alanlarında ya da sıkışma yoluyla gözenekten atılan sıvının hızında bir artışa neden olur. Sonuçta her iki olayda radonun kapalı olduğu orijinal ortamından dışarıya transportunu artırır. Bu nedenle gözlenen radon anomalileri, genişleme hacmi içindeki mekanik kırığın gelişme hızıyla veya yeraltı suyunun akış hızının değişmesiyle ilişkili olacaktır. Değişken ön izleyici parametreler (sismik hızların oranı, yöresel manyetik alanın uzunluğundaki ve dünyanın elektriksel resistivitesindeki değişimler, ayrıca yer altı sularında ve yüzey altı radon içeriğinde gözlenen anomaliler) için olan zaman skalası genişleme modeli tarafından açıklanmaktadır (Press 1975). Genişleme modeli genel anlamda uzun süreli ön izleyicilerin uyum sağlayabileceği bir çatı hazırlamıştır (Yaprak ve ark. 2003).

Şekil 2.21 olası deprem mekanizmasını açıklayan genişleme-difüzyon modelini göstermektedir (Press 1975'den değiştirilerek alınmıştır). Şekil 2.21'deki eğriler haberci olaylar ile alakalı değişimlerdir. Bu diyagramda 1. evre olarak gösterilen, stres birikimi süreci birkaç ay, birkaç sene veya birkaç yüzyıl sürebilir. Bu sürecin son aşamalarında fayın kırılacağı alan civarındaki kayalarda bir genişleme başlar ve bu genişleme fayın etrafındaki kayalarda bazı fiziksel değişikliklere sebep olur. Bu değişiklikler radon gazı çıkış miktarında artış, fay etrafında yerkabuğu yükselimleri olması, sismik dalgaların hızlarının azalması, fayın kırılacağı alan civarındaki kayaların elektrik özdirencinin azalmaya başlaması ve küçük depremlerde azalma olarak özetlenebilir. Bu evreden sonra stres birikmesi devam ederse kaya modeldeki üçüncü evreye girecektir. Taşkent depremi ile örtüşen bu model, Haicheng'deki büyük deprem öncesi gözlenen kısa süreli radon anomalilerini tanımlayamamaktadır (Yaprak ve ark. 2003).



Şekil 2.21. Olası deprem mekanizmasını açıklayan genişleme-difüzyon modeli (Press 1975)

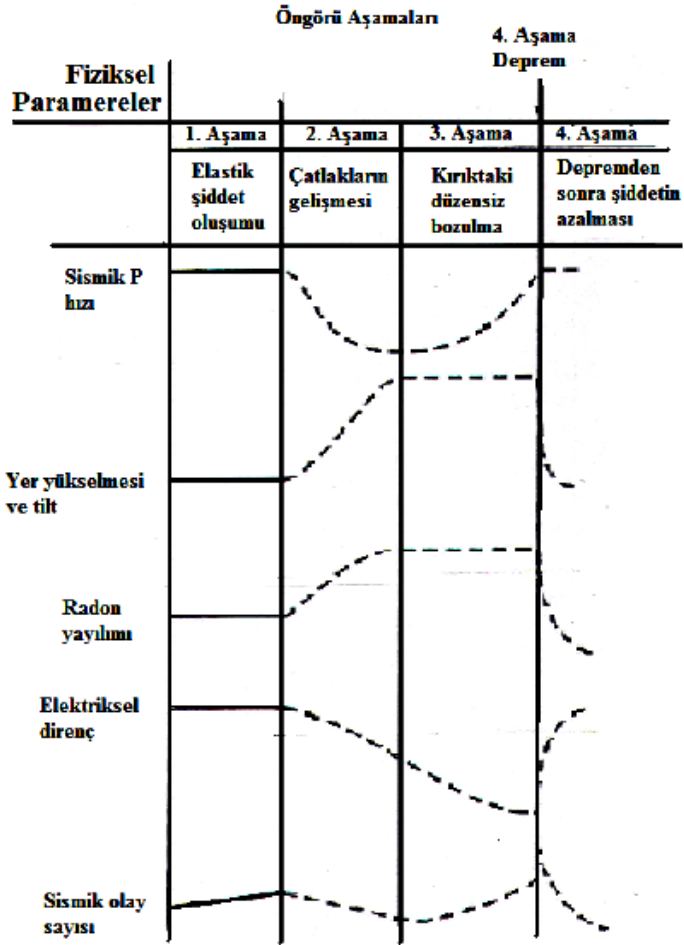
c) Gerginlik-korozyon modeli

Gerginlik korozyon modeline göre ise, yer altı sularıyla kaya matrisi doygunluğa ulaştığında, gerginliğe dayalı yavaş kırık büyümesiyle radon anomalileri oluşmaktadır. Bu modelde radon anomalilerinin oluşumunun gerilme hızına, kaya tipine, elastik çapa, deprem şekline, suyun doygunluk derecesine, sıcaklığa, gerginlik şiddetine ve hidrolik özelliklerine bağlı olduğunu öne sürülmektedir (Bichard, 1980).

2.3.4. Radon-deprem ilişkisi üzerine yapılan çalışmalara örnekler

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; Igarashi ve ark. 1995; King ve ark. 1996; Monnin ve Seidel 1997; Wattananikorn ve ark. 1998; Planinic ve ark. 2001; Zmazek ve ark. 2002; Belin ve ark. 2002; Moussa ve ark. 2003; Zmazek ve ark. 2003; Zmazek ve ark. 2005; Baykara ve ark. 2005, Crockett ve ark. 2006; Zmazek ve ark. 2006; İnceöz ve ark. 2006; Kuo ve ark. 2006; Baykara ve Doğru 2006; Ghosh ve ark. 2007; Ereeş ve ark. 2007; Amponsah ve ark. 2008; İnan ve ark. 2008; Choubey ve ark. 2009; Ghosh ve ark. 2009; Baykara ve ark. 2009a; Baykara ve ark. 2009b; Papastefonou 2010; Utkin ve Yurkov 2010; Pierres ve ark. 2010, Perrier ve Richon 2010; Yüce ve ark. 2010; Baykut ve ark. 2010).

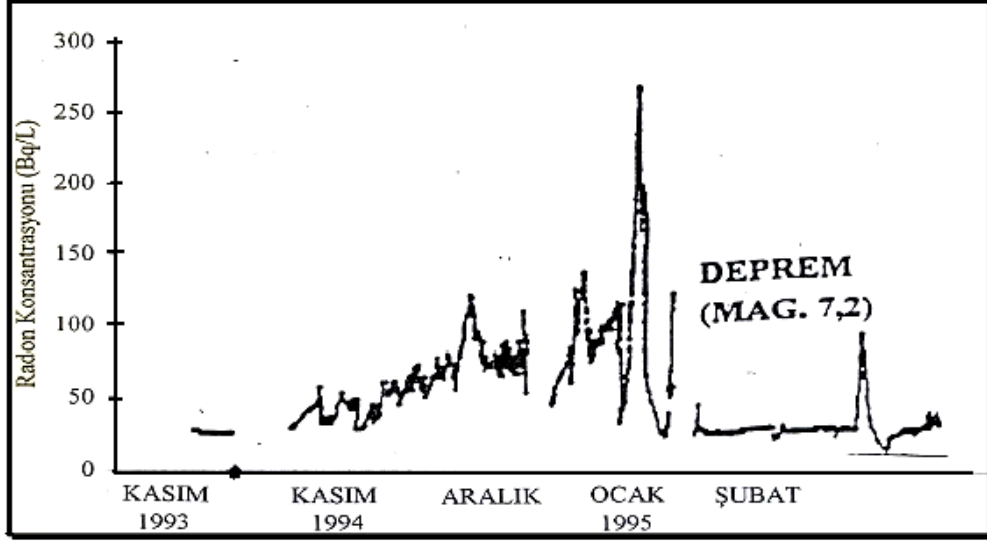
Bolt tarafından yapılan bir çalışmada, deprem ön kestirimi için bazı fiziksel parametrelerin üzerinde yoğunlaşmıştır. Bu parametrelerin başında radon yayılımı, elektriksel iletkenlik, sismik olay sayısı gelmektedir. Öncül olarak kabul edilen safhalar ile parametrelerin değişimi arasındaki ilişki Şekil 2.22’de verilmektedir (Bolt 1993). Bu parametrelerin temel alındığı deprem ön kestirimlerinde, önemli fiziksel parametre olarak radon gazı yayılımındaki değişim olduğu rapor edilmiştir. Şekil 2.22’de görüldüğü gibi deprem öncesinde özellikle radon yayılımında artma meydana gelmektedir. Bu artışlar sonucunda azalmanın başlangıcında, tepe noktasında ya da azalma olduğu sırada depremlerin meydana geldiği belirtilmiştir.



Şekil 2.22. Deprem öncesinde bazı fiziksel parametrelerdeki değişim (Bolt 1993)

Japonya’da yeraltı sularında yapılan ölçümlerde kuyu sularında radon konsantrasyon değişimleri gözlenmiştir (Igarashi ve ark. 1995). Igarashi ve arkadaşları radon konsantrasyonunun 17 Ocak 1995 Kobe depreminden birkaç ay önce artış gösterdiğini açıklamışlardır. Kobe depreminden önce radon konsantrasyonunda meydana gelen artış Şekil 2.23’de görülmektedir. Radon konsantrasyonunun Ekim 1994’ten Aralık 1994’ün sonuna kadar 4 kat arttığını gözlemlemişlerdir. 8 Ocak’ta depremden 9 gün önce radon konsantrasyonu değerinin, başlangıç değerinin 10 katına çıkarak bir pik yaptığını ve deprem sonrası ise başlangıç değerine indiğini vurgulamışlardır (Igarashi ve ark. 1995). Yasuokaa ve arkadaşları yürüttükleri bir çalışmada, 1995 yılında Kobe depreminden iki ay öncesinden başlayarak hava ve topraktaki ölçümler sonucunda

radon gazı miktarında önemli artışlar olduğunu açıklamışlardır (Yasuokaa ve ark. 2005).



Şekil 2.23. 1995 Kobe depremi öncesi kuyu sularında gözlenen radon konsantrasyon değişimleri (Igarashi ve ark. 1995)

Durrani yaptığı çalışmasında kırık tabakalardaki uranyum miktarının, çevreleyen kayalardaki konsantrasyonlardan yaklaşık olarak 3–20 kat arası değişen yüksek bir yoğunluğa sahip olduğunu belirtmiştir. Bu nedenle, radyum yönünden zengin mineral tabakalarının, ince çatlak ve kırıkların yüzeylerini oluşturduğunu ve buralardan yayılan radonun doğrudan çatlak içerisindeki suya girdiğini açıklamıştır. Özellikle uranyum mineral tanelerinin, buralardaki radon miktarının çevre kaya ve sulardaki konsantrasyonlarından birkaç kat daha yüksek olduğunu gözlemlemiştir. Bu nedenle, uranyum içeren tanelerdeki radonun su fazına difüz edeceğini belirtmiştir (Durrani 1997).

Radon konsantrasyonlarındaki değişim ve deprem arasındaki ilişkiyi vurgulayan önemli çalışmalardan biri de Wakita ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmadır. Wakita ve arkadaşları yaptıkları çalışma sonucu, radon anomalilerinin her zaman değil ama sık sık depremlerle birlikte oluştuğunu rapor etmişlerdir. Ayrıca radon konsantrasyonunun, sismik hareketler sırasında normal seviyeye göre anomali gösterebileceğini ve anomali süresinin çok kısa olabileceği gibi çok uzun

da (birkaç saatten birkaç yıla kadar) olabileceğini açıklamışlardır. Wakita ve arkadaşları sürekli radon monitörlerinden elde edilen bilgilerin sık sık günlük değişimler gösterdiğini, bu durumun ayın oluşturduğu med-cezir olaylarına ve sıcaklık değişimlerine bağlı olabileceğini belirtmişlerdir. Wakita ve arkadaşları yüzeye yakın alınan toprak gazı ve yeraltı su örneklerindeki radon konsantrasyonlarının, kısa süreli atmosferik değişimlerden ve yağıştan etkilendiğini gözlemlemişlerdir. Deprem öncesi ve sonrasında radon anomalisi gözlenebileceğini, radon anomalisinin boyutları ile depremin büyüklüğü arasında ilişki olabileceğini belirtmişlerdir. Radon gazında meydana gelen anomalileri, depremin tam yeri ile ilişkilendirmenin mümkün olamayacağını, çünkü depremin merkez üssünden çok uzaklarda da radon anomalisi saptanabileceğini açıklamışlardır. Yine aynı çalışmada bazı radon anomalileri Haicheng depreminde olduğu gibi depremin birkaç saat öncesinde gözlenebileceğinden, devamlı gözlem yapabilecek kapasitede iyi bir radon izleme programı ile radon gazının izlenmesi gerektiğini belirtmişlerdir (Wakita ve ark. 1998).

Segovia ve arkadaşları Meksika'nın Pasifik kıyısında, selüloz nitrat film içeren (LR 115 tip II) katı hal nükleer iz dedektörü metodunu kullanarak radon gazı ölçümü gerçekleştirmişlerdir. 13 farklı istasyonda uzun süreli radon konsantrasyonu ölçümleri yapmışlar, bölgedeki sismik ve volkanik hareketliliğe bağlı olarak yüksek değerler gözlemlemişlerdir. 1997 yılında bölgede meydana gelen $M > 6$ şiddetindeki depremlerden önce, birkaç istasyonda eşzamanlı olarak radon konsantrasyonunda artış meydana geldiğini belirtmişlerdir. Bu istasyonlarda ayrıca meydana gelen fırtına ve tayfunların radon çıkışını etkilediğini gözlemlemişlerdir. Ölçüm yapılan yerin jeolojik yapısı ile bağlantılı olarak, ölçülen radon konsantrasyon değerlerinin değişim gösterebildiğini saptamışlardır. Radon konsantrasyon değerlerini $0-35 \text{ kBq/m}^3$ değişim aralığında ölçmüşlerdir (Segovia ve ark. 1999).

Kuzey Hindistan'da yapılan başka bir çalışmada ise 1997 yılında meydana gelen 5,4 büyüklüğündeki deprem öncesi, yer altı su kaynaklarındaki radon gazı ölçümlerinde değişimler gözlenmiştir (Singh ve ark. 1999).

Mısır'da aktif faylar üzerinde yapılan bir çalışmada Mayıs-2001, Kasım-2001 ve Haziran-2002 olmak üzere toprak gazında ve sularda radon gazı

ölçümü yapılmıştır (Moussa ve ark. 2003). Çalışmada faya olan uzaklığa göre radon konsantrasyonlarındaki değişim gözlemlenmiştir. Toprak gazında yapılan ölçümde, radon konsantrasyonlarının fayın olduğu bölgede pik yaptığını belirtmişlerdir. Çalışmanın sonucunda fay haritalarının çıkarılmasında radon gazı ölçümlerinin kullanılabileceğini vurgulamışlardır.

Hindistan'da Virk ve Walia tarafından yapılan çalışmada ise He/Rn oranlarındaki artış incelenmiştir. Virk ve Walia, Chamoli depreminin merkez üssünden 393 km uzaktaki Palampur'da 24 Mart 1999 ve 27 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 pike ulaştığını gözlemlemişlerdir. Depremden önce gözlenen bu anomaliler sonucu Virk ve Walia, He/Rn oranındaki sürekli artışın deprem tahmininin güçlü bir belirticisi olabileceğini işaret etmişlerdir (Virk ve Walia 2001).

Planinic ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada ise toprak gazında radon ölçümleri yapılmış ve deprem ile ilişkisi incelenmiştir. 2 yıl boyunca süren çalışmada ölçümlerin yapıldığı bölgeye 70–320 km aralıklarda değişen uzaklıklarda 2,7–3,8 M büyüklüklerinde 6 deprem meydana geldiğini gözlemlemişlerdir. Yağmur, basınç, sıcaklık değişimlerinin de incelendiği çalışmada, topraktaki radon konsantrasyonu ile basınç arasında negatif bir korelasyon bulmuşlardır. Gözlem periyodu boyunca birkaç deprem kaydında, topraktaki radon anomalilerinin sarsıntılardan 1 ay önce not edildiğini ve topraktaki radon ölçümlerindeki anomalilerden depremin önceden kestiriminin mümkün olabileceğini belirtmişlerdir (Planinic ve ark. 2001).

Zmazek ve arkadaşları Slovenya'da yaptıkları benzer bir çalışmada, radon değişimlerini Nisan 1999 ve Ekim 1999 zaman diliminde periyodik olarak araştırmışlardır. Orlica fayı boyunca radon aktivitesi, sıcaklık ve barometrik basınç arasındaki ilişkileri depremlerle karşılaştırarak incelemişlerdir. Çalışmalarında bazı ölçüm noktaları için pozitif bir korelasyon gözlemlediklerini, bölgede daha uzun periyotlu ölçümlerin radon deprem ilişkisini araştırmak açısından önemli olacağını vurgulamışlardır (Zmazek ve ark. 2002).

Zmazek ve arkadaşlarının 2006 yılında İtalya-Slovenya sınırları içinde gerçekleştirdikleri bir çalışmada ise yine termal sularda radon gazı ölçümü yapılmıştır. Çalışmalarında radon gazı dışında, Cl^- , SO_4^{-2} iyonları, pH ölçümleri de yapılmış, meteorolojiden de sıcaklık, basınç, yağış değerleri alınmıştır. Zmazek ve arkadaşları bu çalışmalarında da radon anomalileri ve deprem arasında lineer bir ilişki olduğunu belirtmişlerdir (Zmazek ve ark. 2006).

İtalya'da kuzey Calabriya'da yapılan bir çalışmada ise radon anomalileri ile sismik ve tektonik aktiviteler arasındaki ilişkiler araştırılmıştır (Tansia ve ark. 2005). Fay hatları ile radon anomalileri arasında net bir ilişki olduğunu ortaya koymuşlardır.

Crockett ve arkadaşları 27 Haziran–19 Aralık 2002 tarihleri arasında İngiltere'de radon ölçümü yapmışlar ve deprem tahmininde radon anomalilerini kullanmışlardır. Çalışma süresi boyunca küçük şiddette depremler ve büyüklüğü 5 M olan Dudley depremi meydana gelmiştir. Crockett ve arkadaşları, ölçüm zamanlarına göre radon konsantrasyon grafiklerini çizmişler ve deprem ile radon anomalileri arasında pozitif bir korelasyon olduğunu saptamışlardır (Crockett ve ark. 2006).

Kuo ve arkadaşları tarafından Tayvan'da yapılan bir çalışmada, sularda radon gazı ölçümü yapılmış ve deprem ile ilişkisi incelenmiştir (Kuo ve ark. 2006). Tayvan'ın çeşitli bölgelerinde ve Chengkung bölgesinde yapılan çalışmada, 10 Aralık 2003 tarihinde meydana gelen 6,5 M büyüklüğündeki Chengkung depreminden önce sularda radon gazı konsantrasyonunda artışlar gözlemlenmişlerdir. Depremin merkezine 20 km uzaklıkta bulunan ölçüm noktasında, depremden 20 gün önce radon konsantrasyonu artışına işaret etmişlerdir.

Walia ve arkadaşları tarafından Hindistan'ta Dharamsala bölgesinde yapılan çalışmada, helyum ve radon gazı ölçümü yapılarak, bölgenin fay çizimi yapılmaya çalışılmıştır (Walia ve ark. 2008). Topraktaki helyum ve radon gazının yüksek seviyeleri ile fayın bir profili oluşturulmuştur. Sonuç olarak, topraktaki helyum ve radon gazının, morfolojik ve jeolojik gözlemlere bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Aynı zamanda radon konsantrasyonlarının değişimlerinin sadece

tektonik hareketlerden değil, aynı zamanda litolojideki (taşbilim) yapıdan da değişim gösterebileceğini belirtmişlerdir.

Hindistan'da Ekim–Kasım 2006'da Ghosh ve arkadaşları tarafından CR–39 katıhal iz detektörleri ile radon gazı ölçümü yapılmıştır. Radon gazının deprem ile ilişkisinin gözlenebilmesi ve değişimlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır (Ghosh ve ark. 2007). Kullanılan CR–39 detektörleri 70 cm derinliğe konulmuş ve detektörler toprakta 48 saat boyunca bırakılmıştır. Çalışma süresi 1 yıl olarak belirlenmiş ve bu sürede bölgenin ortalama yağış miktarı ve sıcaklık değerleri de takip edilmiştir. Hesaplanan radon konsantrasyonlarının zamana göre grafikleri çizilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Kasım 2005–Ekim 2006 tarihleri arasında, 1 yıllık periyot boyunca 1000 km'lik bir alanda büyüklüğü $M \geq 4$ olan depremlerin meydana geldiği görülmüştür. 20 Kasım 2005 tarihinde bir radon anomalisi gözlemlendiği ve 20 Kasım 2005'de 4,2 M büyüklüğünde bir depremin (depremin merkezine 154 km uzaklıkta) meydana geldiği belirtilmiştir. 18 Aralık 2005 tarihinde de radon anomalilerinin başladığı ve 27–29 Aralık 2005 tarihlerinde büyüklükleri 5,2 M ve 5,1 M olan depremlerin kaydedildiği açıklanmıştır (deprem merkezine uzaklığı 654 km–889 km). 30 Haziran 2006 tarihinde de radon anomalilerinin gözlemlendiği 17 Temmuz 2006 tarihinde 7,1 M büyüklüğünde bir depremin meydana geldiği belirtilmiştir (deprem merkezine uzaklık 1484 km). 14 Şubat depreminden 2 gün önce ve 11 Şubat depreminden 18 gün önce radon anomalilerinin görüldüğü açıklanmıştır. Çalışılan bölge alanında büyüklüğü 4'den büyük birçok deprem meydana gelmiş ve depremden 7–11 gün öncesinde radon anomalilerinin meydana geldiği rapor edilmiştir. Bu depremler ile radon anomalileri arasında lineer bir ilişki olduğu vurgulanmıştır. Ghosh ve arkadaşları sonuç olarak, depremin önceden tahmininde radon gazı konsantrasyonlarının izlenmesiyle bir model hazırlanmasında, yeni datalar sağlayan araştırmaların önemine değinmişler ve bu amaç doğrultusunda bu çalışmayı yaptıklarını belirtmişlerdir. Ayrıca Haziran–Temmuz 2006 arasında radon konsantrasyonlarının arttığı ve bu tarihler aralığında bölgeye düşen ortalama yağış miktarının da yükseldiği görülmüştür. Çalışmanın, deprem-radon konsantrasyonu modellemelerinde gerekli veritabanını zenginleştireceği ve bunun dışında da radon anomalilerinin mevsimsel değişimlere bağlı olduğu sonucunu

vermişlerdir. Yazın daha yüksek, kışın ise daha düşük radon konsantrasyonu ölçmüşlerdir.

Yunanistan'da Rickon ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, Corinth bölgesinde toprak gazında radon gazı ölçümü yapılmıştır (Rickon ve ark. 2007). Depremin önceden tahminine yönelik olarak, 1995 ve 2002 yılları arasında yapılan çalışmada, toprağa üç farklı şekilde problar yerleştirilmiş ve zamana göre topraktaki radon gazı konsantrasyon değişimleri grafikler ile sunulmuştur. Pek çok konumda, topraktaki radon konsantrasyonlarının background seviyesinden, bölgesel etkilerden (meteorolojik şartlar, toprak geçirgenliği vb.) bağımsız olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmada ölçüm yapacak olan problar üç farklı şekilde toprağa yerleştirilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonucunda topraktaki ortalama radon gazı konsantrasyonu 4–9,5 kBg /m³ değişen aralıklarda ölçülmüştür. Çalışma periyodu boyunca 1998 yılında üç çalışma noktasında güçlü anomaliler gözlenmiştir. Rickon ve arkadaşları bu durumun Helike fayının yüzeysel kısımlarındaki kaymalardan kaynaklanabileceğini önermişlerdir. Ölçüm problemlerinin çukur ve sondaj kuyularına yerleştirilmesi metotlarında beklenildiği gibi, bu noktalarda radon konsantrasyonlarının meteorolojik parametrelerden daha az etkilendiğini belirtmişlerdir. Sismik aktivitelere ilişkin olarak konsantrasyonlarda geçici anomaliler olabileceğini ve bunun içinde bölgede uzun süreli ölçümlerin yararlı olabileceğini önermişlerdir (Rickon ve ark. 2007).

Fu ve arkadaşları tarafından Tayvan'da yapılan bir çalışmada toprakta helyum, radon, nitrojen ve karbondioksit gazları ölçülmüştür (Fu ve ark. 2008). Güney Tayvan'daki Chaochou aktif deprem fay hattında toprak gazındaki radon ve helyum konsantrasyon değişimleri sistematik olarak National Pingtung Üniversitesi'nde yapılmıştır. 1 Mart 2005 ve 28 Şubat 2006 tarihleri arasında çalışma süresi olarak belirlemişler ve bu tarihler arasında bölgede meydana gelen deprem kayıtlarını listelemişlerdir. 1,2 x 2,3 km²'lik bir alan içerisinde 200–300 m aralıklarda toprakta sistematik olarak ölçüm yapmışlardır. Toprağın 100 cm derinliklerinde toprağın içine 130 cm boyunda, 3 cm çapında çelik prob yerleştirilerek, toplam 82 örnekte çalışılmıştır. Ölçümlerde her bir gaz için ayrı bir detektör kullanılmıştır. 1 Mart 2006 ve 31 Ağustos 2006 tarihleri arasında radon konsantrasyon değişimleri araştırılmıştır. Sonuç olarak, helyum ve karbondioksit

ölçüm sonuçlarında zayıf bir korelasyon görülürken, nitrojen ve helyum arasında iyi bir korelasyon bulunmuştur. Radon gazının, nitrojen ve karbondioksit ile iyi bir korelasyon vermediği hesaplanmıştır. Bunun nedeni olarak, ölçüm yapılan ortama farklı kaynaklardan da radon gazı gelebileceğini belirtmişlerdir. Çalışma süresi boyunca Haziran 2006'da radon konsantrasyonlarında bir artış gözlemlenmiştir. Fakat bu artışın mevsimsel değişiklikler nedeniyle mi, yoksa bölgedeki aktif hareketler nedeniyle mi olduğunun tam bir kesin kanısına varılamayacağını belirtmişlerdir. İşaretlenen anomaliler ve gözlemlenen maksimum piklerden, çalışma süresi boyunca meydana gelen depremlerin % 90'ında, depremlerden birkaç saat veya birkaç gün önce anomalilerin pik verdiğini gözlemlenmişler ve sonuçlarla ilişkilendirmişlerdir. Bu ilişki kurulurken eşzamanlı olmayan sonuçlardaki pikler ayrıştırılmıştır. Bölgenin fay hattı açısından hassas bir bölge olması nedeniyle, özellikle radon ve karbondioksit ölçümlerinin sürekli ve daha uzun bir sürede olması gerektiğini önermişlerdir.

Ghana'nın kuzey doğusunun iç kısımlarındaki fay sisteminde, Amponsah ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada radon konsantrasyonları araştırılmıştır (Amponsah ve ark. 2008). Bölgede sismik aktiviteler ile radon gazının mümkün bir korelasyonu üzerinde çalışılmıştır. Topraktaki radon ölçümleri için LR-115 plastik alfa iz detektörleri kullanılmıştır. Elde edilen radon konsantrasyon dataları ve deprem aktiviteleri arasında oldukça dikkat çekici bir korelasyon olduğunu belirtmişlerdir. Oldukça fazla fay içeren bölgede radon konsantrasyonu 115 kBq/m^3 'e kadar ölçülmüştür. Buna karşılık fay içermeyen bölgelerde radon konsantrasyonu 20 kBq/m^3 'den daha az ölçülmüştür. Bölgede 1,5 M büyüklüğündeki bir depremden önce topraktaki radon gazı background seviyesi 115.00 kBq/m^3 'e kadar artmıştır. Sonuç olarak, Ghana'da toprakta radon konsantrasyonları ölçümleri yapılmadığı için, topraktaki radon konsantrasyonları için uygun background değeri ve standart olmadığını belirtmişlerdir. Bu bakımdan bu çalışmadaki pek çok datanın, background değerleri açısından benzer çalışmalarda kullanılabileceğini vurgulamışlardır. Araştırma periyodu boyunca çalışılan bölgede 15 km boyunca büyüklüğü 1,1 M'den 2,8 M'e kadar değişen büyüklüklerde depremler meydana geldiğini belirtmişlerdir. Topraktaki radon konsantrasyonlarını maksimum $282,87 \text{ kBq/m}^3$

ve minimum $2,72 \text{ kBq/m}^3$ bulmuşlardır. Yüksek radon konsantrasyon değerinin nedeninin bölgenin faylı olmasının bir sonucu olabileceğini belirtmişlerdir. Topraktaki radon gazı ile sismik aktiviteler arasındaki korelasyonun kurulabilmesi için bölgede sürekli olarak ölçümü önermişlerdir.

Miklavcic ve arkadaşları tarafından (Osijek Üniversitesi Fizik Bölümü) deprem ön izleyicisi olarak radon anomalilerinin araştırılması adlı çalışmada, 4 yıllık bir periyot boyunca Osijek’de LR-115 nükleer iz detektörleri kullanılarak toprak gazındaki radon konsantrasyonları sürekli olarak ölçülmüştür (Miklavcic ve ark. 2008). Detektörler toprağın 0,5 m altına yerleştirilmiştir. 2 yıl süreyle Kasina’daki Barasol’de toprak gazındaki radon konsantrasyonları yarı iletken detektörler kullanılarak ölçülmüştür. Ayrıca zamansal radon değişimleri üzerine meteorolojik parametrelerin etkisi araştırılmıştır ve barometrik basınç, yağmur ve sıcaklığın etkisiyle radon konsantrasyonlarındaki değişim incelenmiştir. Bölgede kaydedilen sismik olayların % 46’sında Osijekte deprem öncesi radon konsantrasyonlarında anomaliler gözlenmiştir. Kasinada ise bu oran % 21 bulunmuştur. Osijekte 2003–2006 yılları arasında büyüklüğü $M \geq 2,6$ ve $R < 200$ (veya depremin merkezine olan uzaklığı 47–199 km) olan 39 depremin meydana geldiği kaydedilmiştir. Deprem öncesi radon anomalileri 19 sismik olayda gözlemlenmiştir (% 49). Nisan 2005 ve Haziran 2007 tarihleri arasında Barosal’de yapılan çalışmanın sonucunda ise büyüklüğü $M \geq 2,5$ ve $R < 200$ olacak şekilde 33 depremin 10’unda radon anomalileri görülmüştür. Her iki bölgede de büyüklüğü $M \geq 3$ ve $R < 200$ alınarak radon anomalilerinin depremden önce görülme oranı yüzde olarak hesaplandığında, Osijek için oran % 46 ve Barosal’da ise % 21 hesaplanmıştır.

Papastefanou Kuzey Yunanistan’ın Langadas bölgesinde, LR 115 tip II detektörleri ile radon gazı ölçümü gerçekleştirmiştir. Ayrıca bölgede meydana gelen meteorolojik değişimleri de gözlemiştir. Çalışmasında bölgede büyüklüğü 4 M ve üzerinde olan sismik olaylar öncesinde, radon gazının konsantrasyonların da keskin pik artışları olduğunu açıklamıştır (Papastefanou 2010).

Utkin ve Yurkov Kuzey Tien Shan’da yaptıkları çalışmalarında, depremden 90–100 gün önce radon değişimleri gözlediklerini açıklamışlardır

(Utkin ve Yurkov 2010). Tortul kayalarda ölçülen radon konsantrasyonunun büyük ölçüde sismik hareketlere bağlı olduğunu, yerel veya nispeten uzak depremler öncesinde gelen dalga yayılmasının radon değişimine neden olabileceğini belirtmişlerdir. Ayrıca gözlemledikleri radon aktivite konsantrasyonları değişiminin tektonik hareketlerin iyi bir izleyicisi olabileceğini rapor etmişlerdir.

2.3.5. Türkiye’de yapılan çalışmalara örnekler

Kuzey Anadolu, Doğu Anadolu ve Akşehir fay hatları üzerinde bulunan Türkiye’de depremin önceden belirlenmesine yönelik yapılmış çalışmalar mevcuttur.

Belin ve arkadaşları tarafından 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 örneklerini analiz ederek bazı elementlerin içeriklerindeki artış ve azalışları incelemişlerdir. 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.

Yaprak ve arkadaşları, Manisa ve Alaşehir’de depremin önceden tahminine yönelik çalışmalar yapmışlardır (Yaprak ve ark. 2003). Çalışmalarında, depremin önsezisi için toprak gazında radon konsantrasyonlarını, Gediz Graben sisteminde yer alan Alaşehir Bölgesindeki aktif faylarda sürekli olarak gözlemlenmişlerdir. İz kazıma tekniği kullanılarak toprak gazında radon ölçümü yaptıkları çalışmada, aktif tektonik alanları tanımlamada toprak gazı radon profillerini elde etmek için, bölgedeki fay hattı boyunca 42 radon ölçüm istasyonunu gözlem altına almışlardır. Bu istasyonlardan elde edilen iki haftalık entegre radon ölçümlerinin, Alaşehir fay sisteminde oluşan 3 M büyüklüğündeki depremle ilişkisi olabilecek değişimler gösterdiğini vurgulamışlardır. Deprem öncesinde ve sonrasında 3 istasyonda gözlenen radon anomalilerinin pik

yüksekliğinin yaklaşık ortalamanın 3 katı olduğunu saptamışlardır. Aynı çalışmalarında, yaz mevsiminde oluşan radon anomalilerinin meteorolojik koşullarla değişen sistematik bir ilişki göstermediğini belirtmişlerdir.

Baykara ve arkadaşlarının yaptıkları bir çalışmada, yeraltı suyundaki radon konsantrasyonunun esasen akiferdeki komşu kayalar ve topraktaki uranyum konsantrasyonuna bağlı olduğunu belirtmişlerdir (Baykara ve ark. 2005). Ayrıca radon konsantrasyonunun hidrotermal çözelti ve kayalardaki depreme bağlı stres ile orantılı olduğunu ve yüzey sularından genellikle daha yüksek olacağını açıklamışlardır.

Baykara ve Doğru 2006 yılında yayınladıkları çalışmalarında ise, yeraltı suyundaki yüksek radon konsantrasyonunun faylarla ilgili olduğunu belirtmişlerdir (Baykara ve Doğru 2006). Taşınmaları esnasında radon, metan, helyum vb. gibi gazların, kayalardan ve minerallerden çevredeki sıvılara örneğin yeraltı sularına, havaya ve son olarak atmosfere sızacağını açıklamışlardır.

Saç ve Camgöz, İzmir ve çevresinde yaptıkları bir çalışmada, gözlem yaptıkları aktif fay üzerinde ve bu faya yakın bazı yerlerde; radon konsantrasyonlarının sismik bir aktivite öncesi değişim gösterdiğini bulmuşlardır. Depremi önceden tahmin edilmesinde radon çıkışının izlenmesinin önemini belirtmişler ve sürekli radon ölçümlerinin yapılmasının gerekliliğini vurgulamışlardır (Saç ve Camgöz 2005).

Ereeş ve arkadaşları tarafından Denizli’de yapılan bir çalışmada, fay hattında termal sularda radon gazı ölçümü yapılmıştır (Ereeş ve ark. 2007). Sismik aktivitesi yüksek ve termal sulara sahip bir bölge olduğu için Denizli çalışma bölgesi olarak seçilmiş ve deprem ile radon konsantrasyonları arasındaki ilişkiyi incelemek amaçlanmıştır. Mayıs–Aralık 2000 tarihleri arasında yapılan ölçümlerde 0,67–25,90 kBg/m³ aralıklarında değişen radon konsantrasyonları gözlemlenmiştir. Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü’den alınan verilere göre, çalışma süresi boyunca 2 konumda radon konsantrasyonları artışı ile deprem arasında pozitif bir ilişki olduğu belirtilerek, bölgede daha uzun süreli radon konsantrasyon ölçümlerinin yararlı olacağı bildirilmiştir.

Kuzey ve Doğu Anadolu fay hattı boyunca yapılan bir çalışmada ise, aktif fay sisteminde toprak gazında radon ölçümleri yapılmıştır (İnceöz ve ark. 2006). Aktif fayda, 100–500 m aralıklarla ölçüm noktaları belirlenmiş, 5–10 m aralıklarla CR-39 detektörleri yerleştirilmiştir. Detektörler Temmuz 2004’de 3 hafta boyunca toprakta kalmış ve daha sonra analizler için toplanmıştır. Çalışma sonucunda her iki fay sisteminde de 4,3–9,8 kBg/m³ arasında değişen radon konsantrasyonları gözlemlenmiş, kuzey Anadolu fay sisteminde ölçülen radon konsantrasyonunun doğu Anadolu fay sistemindekinden daha büyük değerlerde olduğu belirtilmiştir. Faylarda radon konsantrasyonunun daha fazla olduğunu gözlemlemişlerdir.

Çeşme bölgesindeki aktif fay hatlarının tespit edilerek olası depremlerin önceden tahmin edilmesine yönelik yapılan bir çalışmada, termal sularda ve topraktaki radon gazı hareketi ile sismolojik veriler karşılaştırılmıştır (Güloğlu 2007). Bu parametrelerdeki anomalilerin, eğer varsa, depremlerle olası ilişkileri belirlenmiştir. Aktif fay hatlarında toprak gazı radon konsantrasyonlarını, kollektör ve iz kazıma detektörleri olmak üzere iki farklı yöntem ile ölçmüşlerdir. Arazideki ölçüm sonucu elde edilen veriler (radon, kimyasal analizler) ile Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü’den alınan sismik veriler karşılaştırılarak aralarındaki ilişkileri incelemişlerdir. İzmir’de yürüttükleri çalışmalarında deprem ve radon gazı arasında pozitif bir ilişki olduğunu güçlendirecek verileri elde etmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda deprem öncesi zamanlarda termal kaynaklardan alınan su örneklerinde ve toprak gazı radon konsantrasyonlarında dikkate değer değişimler gözlemlediklerini açıklamışlardır. Çalışma periyodu boyunca meydana gelen 5 deprem öncesinde, radon konsantrasyon değerlerinin pik yaptığını gözlemlemişlerdir. Radon gazı artışlarındaki maksimum değişimlerin deprem izleyicisi olmaları bakımından deprem öncesinde meydana geldiğini belirtmişlerdir (Güloğlu 2007).

Erkmen ve arkadaşları, Adıyaman Gölbaşı Balkar beldesinin güneybatısında Karaçemçe deresinde KB–GD doğrultulu bir hat boyunca toprakta radon gazı ölçümü yapmışlardır. Bu çalışmayı diğer çalışmalardan ayıran özelliği, fay kırıklarının tespit edilmesinde radon gazı ölçümünün kullanılması amacıyla yapılmış bir çalışma olmasıdır. “Doğu Anadolu Fayı’nın Gölbaşı-Türkoğlu

arasında kalan kesiminin tektonik özellikleri ve Paleosismolojisi” adlı çalışmalarında radon gazı ölçümü ile faydaki kırık izlerinin hassas bir şekilde belirlenebileceğini vurgulamışlardır. Çalışmada, arazide morfolojik belirti vermeyen ancak son 10000 yıllık dönemde hareket etmiş kırık izlerinin tespit edilmesinin, hendek çalışmaları için zaman ve ekonomik açıdan çok önemli olduğu belirtilmiştir. Hendeklerin bu izlerin üzerinde isabetli bir şekilde açılmasının, uzun yıllar deprem üretmemiş ve tortul depolanmanın fazla olduğu gömülü yerlerde oldukça zor olduğu açıklanmıştır. Radon gazı konsantrasyon değerlerini 0–36 kBq/m³ değişim aralığında elde etmişler, fayın geçtiği hat boyunca ve yakınında yapılan ölçümlerde radon değerinde yükselme görmüşlerdir. Muhtemel fay hattından uzaklaştıkça ise radon konsantrasyon değerlerinde çok net bir düşme gözlemlenmiştir. Bu yöntemle arazide yaptıkları gözlemsel çalışmalarında aktif kırığın geçtiği yerin kabaca belirlenmesinden sonra, Markus–10 toprak gazı radon ölçüm cihazı ile birkaç metrelik aralıklarla alınan ölçümler ile kırık izinin yerini hassas bir şekilde saptadıklarını açıklamışlardır. Bu amaçla uygulanan toprakta radon gazı ölçümü yönteminin oldukça pratik ve anında sonuç vermesi açısından, bu yöntemle hendek yeri seçimi yapılabileceğini açıklamışlardır. Ayrıca bu yöntemin sonuçlarının muhtemel fay hattı hakkında bilgi vermesi, arazide herhangi bir kazı işlemi yapılmadan zamandan ve ekonomiden kazanım sağlanması açısından önemli olduğunu vurgulamışlardır (Erkmen ve ark. 2007).

Doğru ve arkadaşları tarafından halen devam etmekte olan bir projede, normal şartlar altında kuyu sularındaki radon konsantrasyonunun çok fazla değişmeyeceği belirtilmiştir. Radon konsantrasyonunun mevsimsel olarak $\pm\%10$ 'luk bir değişim gösterdiği, radon konsantrasyonlarının ilkbaharda maksimuma, sonbaharda ise minimuma ulaştığı gözlemlenmiştir. Hareketli bir gaz olan radonun kayalar içinde oluşan mikro çatlaklardan hareket edebileceğine değinilmiştir. Deprem öncesindeki küçük deformasyonlara bağlı olarak kayalarda oluşan mikro çatlaklar, kaya içindeki radonun kaya yüzeyine ulaşmasına ve suya karışmasına neden olacağından, sudaki radon konsantrasyonunda bir artış görüleceği açıklanmıştır. Oluşan çatlaklar nedeniyle radon konsantrasyonunda da artışlar olacağı, mikro çatlakların oluşumunun tamamlandığı evrede radon

artışının da duracağı, radon konsantrasyonunun artık değişmeyeceği vurgulanmıştır (Şahin 2009).

Külahcı ve arkadaşları tarafından radon izleme yöntemiyle depremin önceden tahmini için yapay sinir ağı modellenmesi üzerinde çalışılmıştır (Külahcı ve ark. 2009). Radon ve deprem arasındaki ilişkiyi lineer izleme çalışmalarının dışında, oluşan depremler boyunca sekiz farklı parametrede nonlineer değişiklikler için yapay sinir ağı modellenmesi yapılmıştır. Doğu Anadolu fayında depremin önceden belirlenmesi için 3 tabakada Levenbers-Marguardt modeli kullanılmıştır. Deneysel ölçümlerde Markus 10-Gammadata üretimli silikon yüzey bariyer detektörleri kullanılmıştır. Laboratuarda online bağlantı ile topraktaki radon, barometrik basınç ve hava sıcaklığı ölçümleri yapmışlardır. Sonuç olarak diğer kompleks matematiksel işlemlerine alternatif olarak ANN (artificial neural networks-yapay sinir ağları) modellenmesi olabileceğini vurgulamışlardır. ANN modellenmesinin başarılı bir modelleme olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca istasyon sayısı arttıkça, ölçümlerdeki hatanın azaldığını göstermişlerdir.

Doğu Anadolu Fay Sistemi'nin Sivrice fay zonunda yapılan çalışmada, radon değişimi ve doğal radyoaktivite ölçümleri yapılmıştır (Şahin 2009). Fay zonu boyunca sürekli radon gazı çıkışının bazı atmosferik parametrelerin (sıcaklık, basınç ve nem) değişimine bağlı olup olmadığını ve sürekli radon gazı çıkışındaki değişimin deprem ön habercisi olup olmayacağını amaçlamışlardır. Çalışma alanı üzerine dört radon izleme istasyonu kurmuşlardır. Bu istasyonlardan sürekli radon gazı çıkışlarını kaydetmişler ve su örneklerinin radon yayılımlarını incelemişlerdir. Elde ettikleri verileri ile bölgenin sürekli radon değişimini gözlemlemişlerdir ve doğal radyoaktivite seviyesini belirlemişlerdir. Sonuçlarında, fay zonu boyunca sürekli radon gazı değişiminin atmosferik şartların etkisinden arındırılmasıyla, deprem ön kestirimde önemli bir parametre olarak kullanılabileceğini açıklamışlardır (Şahin 2009).

İnan ve arkadaşları radon gazı anomalileri ile sismik aktiviteler arasındaki ilişkiyi belirlemek için; toprakta 3 yıl boyunca sürekli radon gazı ölçümü yapmışlardır (İnan ve ark. 2008). Çalışma bölgesi olarak 17 Ağustos 1999 tarihinde yıkıcı bir depremin (7,4 M) meydana geldiği Marmara bölgesini

seçmişlerdir. Sonuçları sismik aktivite ışığında değerlendirmişlerdir. Soğuk ve sıcak kaynak sularının fiziksel ve kimyasal özelliklerine de ölçmüşler, topraktaki radon gazının zamansal ve konumsal değişimlerini araştırmışlardır. Bölgede büyüklüğü 4 M'den fazla olan depremler ile radon anomalileri arasında pozitif bir korelasyon bulmuşlardır. Radon gazı hareketinin, sismik aktivitenin olmadığı dönemlerde ve genellikle istasyonun konumlandırıldığı bölgenin zemin özelliklerini de bağlı olarak “rastgele yürüyüş” (random walk) modeli öngörüsü altında Rayleigh dağılımı gösterdiğini belirtmişlerdir. Fakat bazı verilerin Rayleigh dağılımından saptığını gözlemişlerdir. İnan ve arkadaşları, sismik aktivite öncesi ve sırasında (ve de kısmen sonrasında) Rayleigh dağılımının, radon gaz kaynaklarının ve (veya) gaz hareket yollarının etki ve değişimine bağlı olarak, normal dağılım gösterme eğilimine girdiğini belirtmişlerdir. Bununla birlikte, kaynak sularının fiziksel ve kimyasal özelliklerinde sistematik ve tutarlı anomalilerin, gözlem periyodu boyunca meydana gelen depremler için tespit edilmediğini açıklamışlardır. Ayrıca atmosferik koşulların ikinci bir rol oynayacağını ve sürekli radon gazı gözlemlerinde yer seçiminin çok önemli olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda, Marmara bölgesinde 3 yıl süresince gözlenen topraktaki radon gazı anomalileri ile sismik aktiviteler arasında iyi bir ilişki bulduklarını vurgulamışlardır (İnan ve ark. 2008).

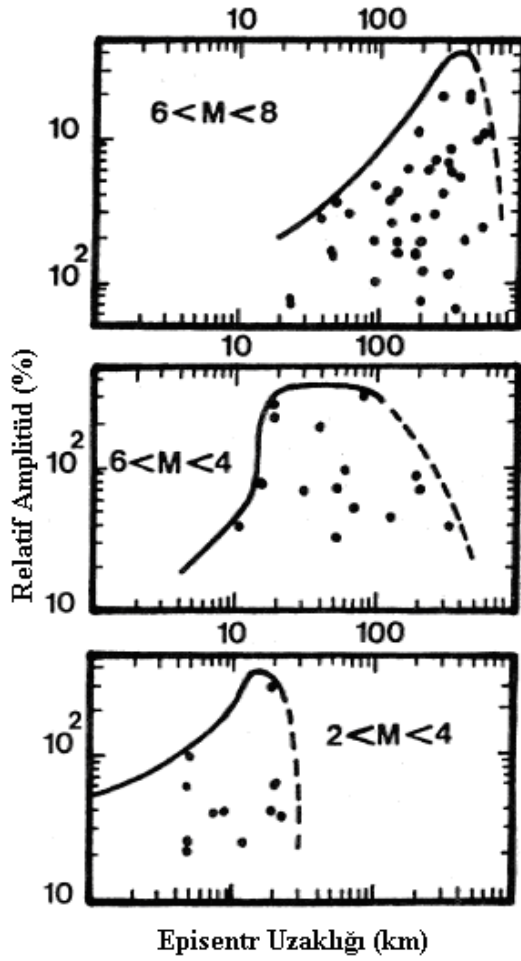
Yüce ve arkadaşları depremlerin jeokimyasal ve hidrojeolojik etkilerini araştırmak amacıyla; yıkıcı deprem üretme potansiyeline sahip Kuzey Anadolu Fayı'na yakın ve sismik olarak aktif olan Eskişehir ili ve çevresinde çalışmışlardır (Yüce ve ark. 2010). Araştırmalarında yaklaşık 1 yıl içinde 5 istasyonda radon ve CO₂ gazı konsantrasyonları, redoks potansiyeli, elektriksel iletkenlik, pH, su seviyesi, su sıcaklığı ve iklim parametrelerini sürekli olarak ölçmüşlerdir. İstasyonlardan elde edilen verilerinde bir depremden birkaç gün öncesinde, yer altı sularının radon gazı konsantrasyonu ve jeokimyasal parametrelerinde anomaliler gözlediklerini belirtmişlerdir. Ayrıca su seviyesindeki değişikliklerin, bölgedeki sismik tahminler için iyi bir göstere olabileceğini açıklamışlardır.

Baykut ve arkadaşları Marmara bölgesinde Balıkesir, Gönen ve Armutlu'da radon gazı anomalileri ile sismik aktiviteler arasındaki ilişkiyi belirlemek için, özellikle yaz mevsiminde toprakta sürekli radon gazı ölçümleri

yapmışlardır (Baykut ve ark. 2010). Topraktaki radon konsantrasyonları ile sismik aktiviteler arasındaki ilişkinin daha iyi analiz edilebilmesi için atmosferik parametrelerdeki günlük değişimler (sıcaklık, basınç, yağış), mevsimsel değişimler ve toprak sıcaklığındaki değişimler gibi çeşitli parametrelerin elenmesinin gerekliliğini belirtmişlerdir. Baykut ve arkadaşları ham verilerden günlük salınımların belirlenebilmesi ve kaldırılabilmesi için bir algoritma kullanılmasını önermişlerdir. Günlük periyodik değişimlerin etkisinin kaldırılması ve topraktaki radon konsantrasyonu ile sismik faaliyetler arasındaki ilişkinin daha iyi anlaşılabilmesi için, ampirik mod ayrıştırma yöntemine dayalı (EMD) algoritmanın kullanılabileceğini açıklamışlardır.

2.3.6. Radon-deprem merkezine uzaklık ile ilgili yapılan çalışmalara örnekler

Bu konuda yapılan çalışmaların en önemlilerinden biri Hauksson ve Goddard 1981'de yaptığı çalışmadır (Hauksson ve Goddard 1981). Hauksson ve Goddard yaptıkları çalışmada, radon ile su moleküllerinin ilişkide olabilmesi için tektonik hareketlerin varlığının gerekliliğini vurgulamışlardır. Çalışmada dünya ölçeğinde depremin büyüklüğü (magnitudü), radyal uzaklığı ve radon emisyonu frekansı arasında anlamlı ilişkilerin var olduğunu göstermişlerdir (Şekil 2.24).



Şekil 2.24. Depremin episentr uzaklığının relatif amplitüdle değişimi (Hauksson 1981)

Bunlardan biri radon anomalisi maksimum amplitüdü ile merkezci uzaklık arasındaki ilişkidir. Daha büyük şiddetteki depremlerin, daha büyük radon anomalisi oluşturacaklarını ve büyük depremlerden önce gözlenen radon anomalilerin deprem odağına yüzlerce kilometre mesafelerde bile ortaya çıkabileceğini belirtmişlerdir. İkinci ilişki radon anomalisinin başlangıcından deprem oluşumuna kadar olan zaman aralığının magnitüdle artması, fakat deprem fonksiyonu olarak azalmasıdır. Bu bulgusu ile magnitüd arttıkça genişleyen hazırlık zonunu açıklamışlardır. Ayrıca radon gazının deprem hazırlık zonunun sınırlarının belirlenmesi için kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Deprem episantırından uzak radon anomalilerinin istatistiksel yoğunluğunu inceleyen Hauksson, radon emisyonunun değişen bir deformasyonun sonucu olduğuna ve

stres korozyonu modunun radon gazı çıkışındaki artışı açıklayabilecek, olası bir mekanizma olabileceği sonucuna varmıştır (Hauksson 1981).

Kuşçu ve arkadaşları fay izini saptamaya yarayan "kısa süreli ölçüm yöntemi" ve fay aktivitesini değerlendirmekte kullanılan "uzun süreli ölçüm yöntemi" üzerine araştırma yapmışlardır. Kısa süreli ölçümlerden alfa izi ölçümlerinin sadece deprem üreten aktif fayların izlenmesinde değil, aynı zamanda aktif olmayan fayların izlenmesinde de yararlı olduğunu belirtmişlerdir. Hatta aktif olmayan fayların da bir miktar radon oluşturduğu sonucunu elde etmişlerdir. Uygulamada birkaç metrelik aralıklarla varlığından şüphe edilen fayın doğrultusuna dik ve onu kesen bir hat boyunca ölçüm alınması gerektiğini açıklamışlardır (Kuşçu ve ark. 1992).

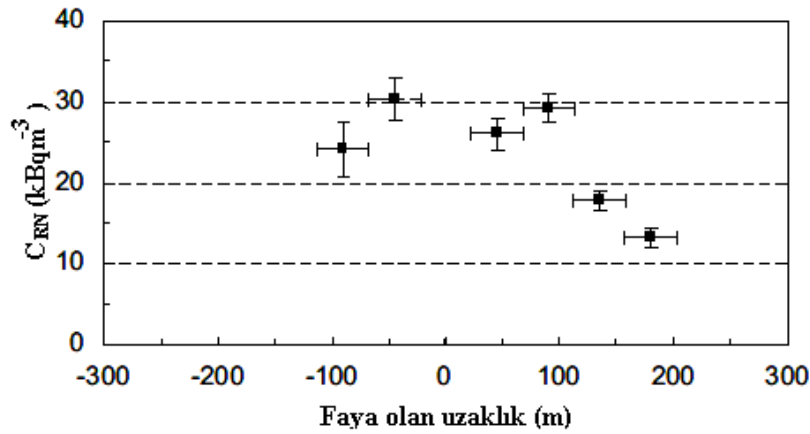
Mısır'da aktif faylar üzerinde Genitron marka AlphaGUARD PQ 2000 cihazı kullanılarak yapılan bir çalışmada, Mayıs-2001, Kasım-2001 ve Haziran-2002 olmak üzere toprak gazında ve sulara radon gazı ölçümü yapılmıştır (Moussa ve ark. 2003). Çalışmada faya olan uzaklığa göre, radon konsantrasyonlarındaki değişim gözlemlenmiştir. Toprak gazında yapılan ölçümde radon konsantrasyonlarının fayın olduğu bölgede pik yaptığını belirtmişlerdir. Çalışmanın sonucunda, radon gazının aktif fay zonlarını işaret edebileceğini ve fay haritalarının çıkarılmasında radon gazı ölçümlerinin kullanılabilirliğini vurgulamışlardır.

Planinic ve arkadaşlarının LR-115 nükleer iz detektörleri ile Osijek, Valpovo ve Zagreb bölgelerinde yaptıkları bir çalışmada, deprem büyüklüğü, deprem mesafesi ve öncü saat arasında incelemeler yapmışlar ve ilgili sabitleri belirlemişlerdir (Planinic ve ark. 2004). Çalışmalarında, radon izleme metoduyla depremin episenter uzaklığının bulunabileceğini açıklamışlardır.

Ramola ve arkadaşları tarafından Garhwal Himalaya'da radon gazı ölçümleri yapılmıştır (Ramola ve ark. 2008). Deneysel çalışmalarında radon emanometresi olarak adlandırılan bir sintilasyon sayıcısı ve analog sismograf kullanmışlardır. İzleme istasyonundan depremin merkezine 16-250 km uzaklıkta, 2 M-6 M aralığında değişen çeşitli sismik aktiviteler meydana gelmiştir. Ayrıca meteorolojik parametreler ile radon anomalileri arasında istatistiksel olarak önemli bulgular elde etmişlerdir. Meteorolojik parametreler-radon

konsantrasyonlarını ve sismik aktiviteler–topraktaki radon konsantrasyonlarını araştırmışlardır. Radon değerlerinin aynı büyüklükteki depremler için farklı anomaliler gösterdiğini bulmuşlardır. Sonuç olarak, farklı sismik aktiviteler, merkeze olan uzaklık ve radon anomalilerinin değerlerini karşılaştırmışlar ve radon anomalilerinin aynı zamanda bölgesel şartlara da (kaya tipi, basınç, faydaki gerilim mekanizması gibi) bağlı olduğunu belirtmişlerdir.

İspanya'nın La Garrotxa volkanik bölgesinin yakınında bulunan Amer fayında, Font ve arkadaşları tarafından radon gazı ölçümü yapılmıştır. Amer'in yakınındaki Amer fayında 6 Nisan 2005–14 Ağustos 2006 tarihleri aralığında, beş dikey hat seçerek 27 noktada ölçüm yapmışlardır. Radon konsantrasyon sonuçlarını, hala aktif olduğu varsayılan fayı destekleyecek şekilde bulmuşlardır. Faydan olan uzaklığa göre radon konsantrasyon grafiği çizdirmişlerdir. Font ve arkadaşlarının çalışmalarına ait olan bu grafik Şekil 2.25'de gösterilmektedir. Ortalama sonuçları olarak topraktaki radon konsantrasyonları değerlerinde faya olan uzaklığın etkisinin olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca sonuçlarda, topraktaki radon seviyesi üzerinde mevsimsel etkilerin de önemli olduğunu belirtmişlerdir. Yazın alınan radon konsantrasyon sonuçlarının kışın alınan radon konsantrasyon sonuçlarından 14 kez daha yüksek olduğunu göstermişlerdir (Font ve ark. 2008).



Şekil 2.25. Radon konsantrasyonlarının faya olan uzaklığa göre değişimi (Font ve ark. 2008)

Elmaghraby ve Lotfy, deprem zamanı, büyüklüğü ve konumunun radon konsantrasyon davranışlarına etkisini incelemek için bir çalışma yapmışlardır (Elmaghraby ve Lotfy 2009). Depremin büyüklüğü, zamanı ve merkez üssü arasında üç korelasyon sunmuşlardır. Radon konsantrasyonlarının depremin merkezine olan uzaklıkla doğrusal ilişkide olduğunu açıklamışlardır. Radon değişimlerinin genellikle meteorolojiye, bölgenin jeolojik özelliklerine, deprem merkezinden uzaklığa bağlı olduğunu belirtmişlerdir.

2.4. Radon Ölçüm Metotları

Radon renksiz, tatsız, kokusuz radyoaktif bir gaz olduğu için insan duyu organları ile tespit edilip anlaşılamaz. Günümüzde pek çok radon ölçüm tekniği geliştirilmiştir. Radon ve ürünlerinin çeşitli ortamlardaki konsantrasyonlarının ölçülmesinde ortamın özellikleri, ölçülecek ürünün yarı-ömrü, yayınladığı radyasyon türü ve enerjileri de dikkate alınarak farklı yöntemler kullanılır. Bu ölçüm teknikleri değişik şekilde sınıflandırılabilir. Radon gazı yoğunluğu ölçümü ve radon ürünleri ölçümü olarak iki ana başlık altında toplanabilirler. Yöntem ve teknikleri farklı olmasına rağmen, istenen amaç açısından aynıdır. Amaç ortamdaki radon gazı konsantrasyonunu ölçmektir.

Radon ve ürünlerinin atmosferik, toprak gazında ve sularındaki konsantrasyonlarının ölçülmesinde kullanılan sistemlerin tümü radon ve ürünlerinin yaydığı alfa ve gama radyasyonunu saymak için kullanılan detektörlerle yapılır. Radon ve ürünlerinin ölçüm yöntemleri enerjileri 5,5 MeV ile 7,7 MeV arasında değiştiğinden (^{222}Rn 5,5 MeV; ^{218}Po 6,0 MeV; ^{214}Po 7,7 MeV) ve enerjileri diğer radyasyon enerjilerinden daha yüksek olduğundan, alfa sayımları yapılır. Çünkü yüksek enerjili radyoaktivitenin sayımını almak daha kolaydır (Şahin 1988).

Radon ve bozunum ürünlerini ölçmek için iki temel yöntem geliştirilmiştir:

1. Aktif ölçüm yöntemi: Kısa süreli radon ölçümleri yapılır.
2. Pasif ölçüm yöntemi: Uzun süreli radon ölçümleri yapılır.

Radon araştırmalarında kısa süreli ölçümler için basit yöntemler kullanılırken, uzun süreli ölçümler için daha kompleks ve ayrıntılı araçlar kullanılır (Cothorn ve Smith 1987). Aktif radon ölçüm tekniğinde anlık radon ölçümleri yapılmaktadır. Bu teknikte amaç kısa sürede ölçüm almaktır. En sık kullanılan, aktif ve pasif radon ölçüm teknikleri aşağıda verilmiştir.

Aktif radon ölçüm teknikleri:

1. İyon odaları
2. Alfa iz detektörleri
3. Sintilasyon hücresi
4. Elektrostatik toplayıcılar
5. Filtre yöntemi
6. Radon tuzağı (grap samples)
7. Sürekli monitörler

Pasif ölçüm tekniğinde ise, nükleer iz detektörleri kullanılarak uzun süreli radon ölçümleri yapılır. Nükleer iz detektörleri ile radon gazı ölçümü çeşitli plastik maddelerden yapılmış film tabakaları kullanılarak gerçekleştirilir. Bu plastik plakalar üzerine çarpan alfa parçacıklarının gözle görülmeyen bir iz bırakması ve bu izin kimyasal iz kazıma yöntemi ile büyütülerek mikroskopta sayılması esasına dayanır. En yaygın kullanılan plastik maddeler selüloz asetat, polikarbonat ve alil diglikol karbonattır (Korhonen ve ark. 2000; Wasiolek ve James 2000).

Pasif radon ölçüm teknikleri:

1. Elektret iyon detektörü
2. Alfa iz detektörleri (Katı hal nükleer iz dedektörleri) (Çile 2004).

2.4.1. Aktif ölçüm metodu

a) İyonizasyon odası

Bir elektrometre ve veri kaydedicisine bağılı iyonizasyon odası paslanmaz çelikten silindir şeklinde yapılmaktadır. Silindiri merkezleyecek uzaklıkta yani silindirin tam ortasına gelecek şekilde silindirden yapılmış bir elektrot yerleştirilir. Havadaki radon yoğunluğunu ölçmek için hava numunesi detektöre yollanır ve

örneklene hava, iyonizasyon odasına geçirilip odanın duvarları ile elektrot arasında bir potansiyel farkı uygulanır. Silindirin dış çevresi ile merkezde bulunan elektrod arasına uygulanan potansiyel fark ile oluşan akım ölçülür.

Radonun bozunum ürünleri elektrostatik olarak yok edilir ve böylece detektöre girmesi engellenir. Radon, iyonizasyon odasının hacmi içerisinde bozunur ve iyonlar oluşturur. Bunlar elektrik sinyallerine dönüştürülür. Bu sinyaller sayılır, yüklenir, çok duyarlı elektrometre ile ölçülür ve data kaydedici tarafından görüntülenir (Kapdan 2009; Davutoğlu 2008).

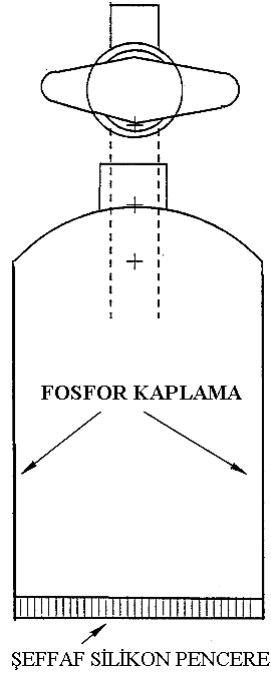
b) Sintilasyon hücresi

Sintilasyon hücreleri plastik, cam ve paslanmaz metallere yapılmıştır. Silindirik şeklindeki bu hücrelerin bir ucu düz ve açık, diğer ucu yarım küre olarak metal veya camdan yapılmıştır. İç yüzeyleri ZnS ile kaplı yaklaşık hacmi 0,09–2 litrelik hücrelerdir. Bu silindirik hücrenin açık olan ucu kuvarz pencere ile kapatılmış ve yapıştırıcı ile sıvanmıştır. Kuvarz pencereye optik kontak ile düz yüzeyli bir fotoçoğaltıcı (fotomultiplakatör) tüp bağlanmıştır. Sistem bir metal kabuktan itibaren 90 cm³'lük hücre, kuvarz pencere, tranport için mikro durdurucular içerir (Hüryaşar 1997).

Radon ölçümlerinde lucas hücresi kullanılacaksa, gaz veya havanın filtre edilerek hücreye alınması gerekir. Hücreye alımdan önce, filtre girişine kadar bütün sisteme vakum uygulanır. Sonrasında sistemin giriş vanası açılarak gaz veya hava bir küçük pompa ile filtreden geçirilir ve lucas hücresine aktarılır. Böylece havadaki ve gazdaki bütün radon ürünleri filtrede tutularak, sistemden hücreye radyoaktif madde olarak sadece radon gazının girmesi sağlanır. Lucas hücrede radon bozunarak dört saat içinde ürünleri ile dengeye ulaşır. Radon ve ürünlerinin yayınladıkları alfa radyasyonu hücrenin duvarlarına çarparak fotonlar oluşturur. Radon ve radon ürünlerinden yayımlanan alfa parçacıklarının etkileşmesi sonucu oluşan ışık fotonlarının sayılması için, sintilasyon hücresinin saydam pencereli ucu fotoçoğaltıcı tüp ile birleştirilir (Hüryaşar 1997). Metal kabuğun içi ZnS(Ag) ile kaplanmış ışık sızdırmaz bir kap içinde, sintilasyon hücresi ve fotoçoğaltıcı tüp bulunmaktadır. Bu olayda çıkan fotonlar fotoçoğaltıcı tüpe geçer ve böylece özel elektronik sistemle sayım yapılır (Farzad 1993). Radonun izotopları olan Rn²²⁰ ve hatta Rn²¹⁹,un yayınladıkları alfa parçacıkları da

dedeksiyona karışabilir. Ancak bunların doğadaki yoğunlukları çok küçük olduğundan dikkate alınmazlar.

Bu hücreler radon konsantrasyonunu belirlemek için idealdir. Sintilasyon hücrelerindeki sayımlarda hata oranlarının azaltılması için hem hücrenin hem de fotoçoğaltıcı tüpün ayrı ayrı kalibrasyonunun yapılması gerekmektedir. Bugün kullanılan hücrelerin ilki Lucas tarafından, 1987 yılında sintilasyon hücresi olarak hem arazide hem de laboratuvar şartlarında kullanılabilen bir sistem olarak geliştirilmiştir (Hüryaşar 1997). Oldukça basit ve duyarlı bir cihaz olduğu için en fazla kullanılan metotlardandır. Şekil 2.26'da verilen klasik tipteki Lucas hücrelerinin hacimleri 100–300 ml'dir.



Şekil 2.26. Lucas hücre (Hüryaşar 1997)

c) Elektrostatik toplama yöntemi

Elektrostatik toplama yönteminde pozitif yüklü radon ürünleri, bir odacık içinde uygun voltaj altında hızlandırılırlar. Yüzey engelli alfa detektörü üzerine toplanır ve spektroskopik olarak ürün aktiviteleri ölçülür. Benzer bir yöntem kollektör yöntemidir.

Kollektör yöntemi, bir kap içerisinde örneklenen toprak gazındaki radonun bozunumuyla oluşan radon ürünlerinin kollektör ve kap arasında uygulanan potansiyel yardımıyla kollektör yüzeyinde toplanmasıdır. Toplanan bu ürünlerin alfa aktivitesi sayılır (Davutoğlu 2008).

d) Filtre yöntemi

Bu yöntem, tek filtre yöntemi ve çift filtre yöntemi olarak ikiye ayrılır. Tek filtre yöntemi havadaki radon ürünleri yoğunluğunu ölçen bir yöntemdir. Çift filtre yöntemi ise havadaki radon ve ürünlerini ayırarak radon bozunma oranını ölçer. Tek filtre yönteminde havadaki radon ve ürünleri arasında radyoaktif dengenin olduğu kabul edilerek ölçümler alınır. Çift filtre yönteminde ise havadaki radon ve ürünleri arasında radyoaktif dengeye bağlı olmaksızın ölçümler alınır (Davutoğlu 2008).

Tek filtre yöntemi

Sulardan veya toprak gazından çıkartılan havadaki gaz balon veya belirli bir tanka konulur. Sonrasında radon ve ürünlerinin dengeye gelmesi beklenir. Radon ürünleri filtre edilerek filtrede tutulur. Filtrenin alfa ve beta aktivitesi ölçülerek radon yoğunluğu belirlenir. Örnekleme süresinin düzenlenmesi için bozunma denklemleri kullanılır (Hüryaşar 1997).

Çift filtre yöntemi

Çift filtre metodu, radonun soygaz olmasından yararlanılarak radon ve ürünlerini birbirinden ayırma prensibine dayanır (Şahin 1988). Havadaki radon ölçümleri için, radon ve ürünlerini ayırarak radonun bozunma oranı ölçülür. Bu sistemde hava pompasıyla silindirden geçirilir, silindir girişinde bir filtre ile radon ürünleri ve aeroseller filtrede tutulur. Birinci filtreden radon gazı ayrışma odasına geçer, diğer radon ürünleri birinci filtre üzerinde kalır. Filtreden radon gazı silindire geçirilir. Bu havanın silindir içinden geçiş süresinde radonun bir bölümü Po-218'e bozunur. İkinci filtreye ulaşıncaya kadar geçen süre zarfında oluşan radon ürünleri ikinci filtrede (çıkış filtresi) tutulur. Geçiş süresi 1-6 dakikadır. Aynı zamanda filtrede toplanan taneciklerin sintilasyon sayıcı ile alfa aktivitesi sayılır. Havanın silindir içinden geçişi sırasında radon bozunma ürünü olan Po-218'in küçük bir oranı silindir duvarlarında difüz olabilir. Bu olay genellikle kayıptır ve verimi etkiler (Hüryaşar 1997).

e) Radon tuzağı (grap samples)

Radon tuzaklama metodunda genellikle iki yöntem kullanılır (Yaprak 1988). Birinci yöntemde, radonun donma sıcaklığının azot ve oksijenin donma sıcaklığından yüksek oluşundan yararlanır. Böylece hava içindeki radon, yeteri kadar düşük bir sıcaklıktaki bir ortamda dondurularak tuzaklanır. Tuzaklanan radon, daha sonra tuzaklama tüpünün sıcaklığının oda sıcaklığına yükseltilmesi ile buharlaşarak lucas hücresine geçer. Radonun bozunum ürünleriyle radyoaktif dengeye gelebilmesi için yaklaşık dört saat beklenir. Bu sürenin sonunda sintilasyon hücresi sayım için fotoçoğaltıcı tüpün ağzına yerleştirilir. Radon ve radon bozunum ürünlerinin yayınladıkları alfa parçacıklarının sintilasyon hücresinin duvarlarındaki ZnS ile etkileşimi sonucu oluşan pulslar (elektrik sinyalleri) sayılır ve gerekli hesaplamalar yapılarak radon konsantrasyonu belirlenir.

İkinci yöntemde ise ölçülecek örnek düşük sıcaklığa (-80 °C) düşürülür. Düşük sıcaklıklarda radonun yüksek absorpsiyon özelliğinden faydalanılır. Tuzaklama tüpü içerisindeki sarı metal yüzeylerde radonun absorplanması sağlanır. Sonrasında oda sıcaklığına yükselmesi ile radon lucas hücresine geçer ve hücrenin alfa sayımları yapılır (Şahin 1988; Yaprak 1988).

f) Sürekli radon gözlemi

Radon ölçümleri için kullanılan üç çeşit sürekli radon monitörü vardır. Bunlar; alfa sintilasyon, iyonizasyon odası ve katı hal dedeksiyonudur (Çile 2004).

Alfa sintilasyon sürekli radon monitörleri

Bir alfa sintilasyon hücresi ile foto çoğaltıcı tüp sayım sistemine bağlı zamanlama devresi ve kontrol sisteminden meydana gelir. Pasif difüzyon yoluyla ya da aktif difüzyon yoluyla hava numuneleri alınır. Belirli bir zaman aralığı için alınan sayımlar hafızaya kaydedilir ve bir sonraki zaman aralığı için yeni sayım alınır. Bu şekilde devam eder. Kısa dönem alınan bu sonuçlar zamanla radon konsantrasyonunun değişimini yansıtır (Çile 2004).

İyonizasyon odaları sürekli radon monitörleri

Bir elektrometre ve veri kaydedicisine bağlı iyonizasyon odasından meydana gelir. Pasif difüzyon ya da aktif difüzyonla alınan hava numunesi

detektöre yollanır. Radonun bozunum ürünleri elektrostatik olarak yok edilir ve böylece detektöre girmesi engellenir. Radon, iyonizasyon odasının hacmi içerisinde bozunur ve iyonlar oluşturur. Bunlar elektrik sinyallerine dönüştürülür. Bu sinyaller sayılır, yüklenir, elektrometre ve data kaydedici tarafından görüntülenir (Çile 2004).

Katı hal sürekli radon monitörleri

Difüzyon örnekleme esasına dayanır. Alfa bozunumunda hassas bir katı hal silikon detektörü kullanılır. Sürekli alınan verilerin yazıcıyla çıkışı alınır ve böylece radon konsantrasyonu görüntülenmiş olur. Diğer sürekli ölçüm monitörlerine göre daha az duyarlı olmalarına rağmen, kullanımı kolay ve nispeten ucuz olmaları nedeniyle tercih edilebilmektedirler.

Sürekli radon monitörlerinin, radon konsantrasyonunun gerçek zamanlı değişimini göstermesi ve çoğu çeşidinin taşınabilir olması avantajlarıdır. Sürekli radon monitörlerinin pahalı ve bazı modellerinin büyük ve ağır olması bu monitörlerin dezavantajlarıdır. İyonizasyon odası sürekli monitörünün bazı durumlarda neme karşı hassas olması ve monitörlerin düzenli kalibrasyon gerektirmesi de dezavantajlarındandır.

2.4.2. Pasif Yöntem

a) Elektret iyon odaları

Elektret, kalıcı elektriksel yük gösterebilen bir dielektrik malzemedir. Çelik bir kap içerisine elektret malzemesi (teflon gibi) yerleştirilir. Bu güçlü bir elektrostatik alan oluşturur. Kabin tabanındaki küçük bir giriş radon gazının içeri girmesini sağlar. Radon ve radonun bozunum ürünleri bozunduğu zaman alfa, beta ve gama ışınları yayınlar. Bu yüksek enerjili parçacıklar hava içerisinde ilerlerken havadaki oksijen, azot gibi atomlarla çarpışırlar ve kap içerisinde iyonlar üretirler. Bu iyonlar elektret tarafından oluşturulmuş olan elektrik alan tarafından çekilerek toplanır ve elektretin toplam yükü değişir (Kapdan 2009). Bu değişimden yararlanarak radon konsantrasyonu bulunur.

b) Alfa iz detektörleri (Kathal nükleer iz detektörleri)

Bu detektörler alfa radyasyonu yayımlayan radyonüklidlerin havadaki yoğunluklarını ölçmek için radon ölçümlerinde kullanılmaktadır. Radon ve radonun bozunum ürünleri genelde alfa aktifdirler. Radon ve radonun bozunum ürünlerinin yayınladıkları bu alfa parçacıkları tespit edilerek (sayılarak) radon konsantrasyonu bulunabilir. Çünkü yayınlanan alfa parçacıklarıyla radon konsantrasyonu arasında doğrudan bir orantı vardır. Bu amaçla radonun yayınladığı enerji aralığındaki özellikle alfa parçacıklarına hassas olan plastik filmler kullanılır (Kapdan 2009).

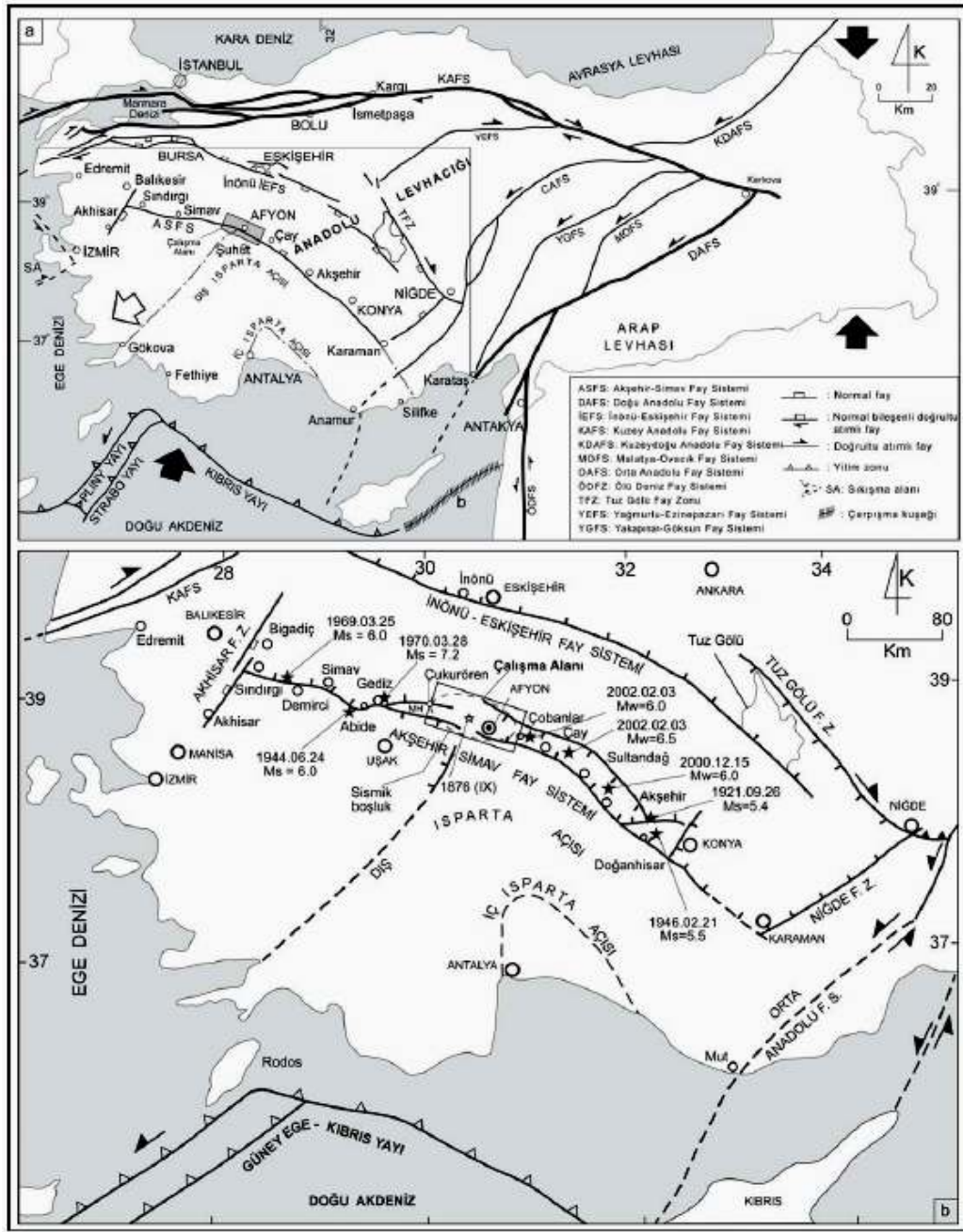
Alfa iz kazıma filmleri genel olarak dielektrik veya organik maddelerden yapılır. Atmosferde bulunan radon ve ürünlerinin yayınladığı alfa radyasyonu, bu filmlerin yüzeyinde izler bırakır. Bu izler kimyasal işlemlerle optik mikroskoplarda görülebilecek düzeye ve büyüklüğe getirilir. Alfa parçacıklarının bu filmler üzerinde bıraktıkları izler, daha sonra kimyasal iz kazıma yöntemiyle açığa çıkartılarak mikroskop yardımıyla sayılır. Film üzerindeki iz sayısı, ortamdaki alfa yayınlayıcı radyonüklidlerin sayısı ile doğru orantılıdır.

Radonun bozunum ürünleri alfa parçacığı dışında beta ve gama ışınları da yayınlırlar. Fakat bu filmler büyük ölçüde beta ve gama ışınlarına hassas değildirler. Beta ve gama ışınları bu filmler üzerinde iz bırakmazlar (Kapdan 2009).

2.5. Akşehir Fay Hattı ve Afyonkarahisar'ın Jeolojisi

2.5.1. Bölgesel jeoloji

İnceleme alanı, Güneybatı Türkiye'de genişlemeli Neotektonik bölgede yer almakta olup, bu bölgeyi karakterize eden Neotektonik yapılardan biri olan Akşehir-Simav fay sisteminin (ASFS) orta kesimini oluşturur (Koçyiğit ve Deveci 2005) (Şekil 2.27). Ayrıca Batı Anadolu Graben sistemi ile Orta Anadolu Ova rejimi arasındaki geçiş bölgesinde bulunan inceleme alanı (Şengör ve ark. 1985), tektonik açıdan Anadolu'da Anatolidler içinde yer alır ve Anatolidlerin güneyinde Toridlerin sınırındadır (Ketin 1966).

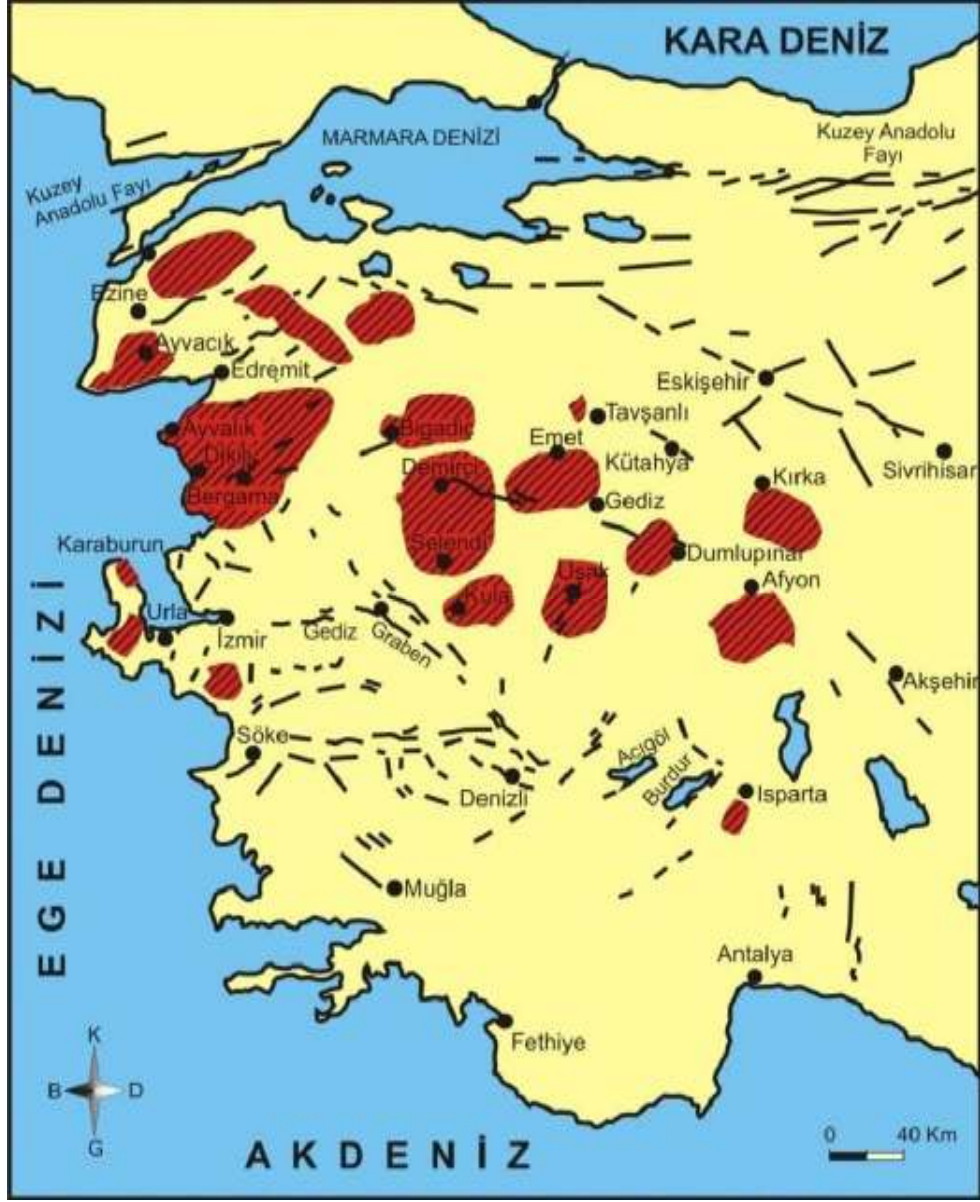


Şekil 2.27. a. İnceleme alanının yer bulduru haritası b. İnceleme alanı ve yakın çevresindeki önemli deprem kaynaklarını (fay sistemleri, fay kuşakları ve faylar) ve burada oluşmuş yıkıcı depremleri gösteren yalınlaştırılmış harita (Koçyiğit ve Deveci 2007)

Eosenden Orta Miyosene kadar olan zaman boyunca, Arap plakasının Anadolu Plakasına çarpması sonucunda Anadolu'nun önemli tektonik birlikleri oluşmuştur (Gürsoy ve ark. 2003). Bozkurt ve ark. (2000) tarafından önerilen modele göre, Afyonkarahisar Tetisin önemli tektonik birliklerinden Afyon

zonunda yer almaktadır (Bozkurt ve ark. 2000). Türkiye ve çevresinin günümüzdeki jeolojik şeklini almasını sağlayan, Neotektonik yapılardan olan ve kıta içi transform plaka sınırlarını oluşturan Kuzey Anadolu Fayı (KAF) ve Ölü Deniz Fay (ÖDF) sistemleri boyunca Anadolu plakası Geç Pliyosen süresince BGB yönüne doğru hareket etmiştir. Ayrıca Orta Anadolu fayı, Tuz Gölü fayı, İnönü-Eskişehir ve Akşehir yanal atımlı fayları, transform plaka sınırlarını oluşturan ana fayları değişik açılarla keserek ve Anadolu plakasını küçük bloklara ayırmıştır (Koçyiğit ve ark. 1999). Afyonkarahisar'ın da için de yer aldığı Batı Anadolu'da Geç Miyosen-Pliyosenden itibaren D-B yönü boyunca doğrultu atımlı faylarla birlikte düşük açılı, listrik normal faylarla belirginleşen, yoğun yükselme, kıtasal genişleme ve litosferik incelme olayları gözlenmiş ve buna bağlı olarak blok faylanma meydana gelmiştir (Koçyiğit 1984).

Arap-Plakası ile Anadolu levhasının, birbirleriyle çarpışması ve Arap-Afrika levhasının Anadolu levhasının altına dalması sonucu Afyonkarahisar ve çevresinde kıta içi volkanizma gelişmiş, söz konusu volkanizma ürünleri bölgede Akdeniz kıvrım kuşağını takip etmiştir (Keller 1983) (Şekil 2.28). Afyonkarahisar ve çevresinde alkalin karakter gösteren volkanizma ürünleri İncehisar-Bayat-Kırka ve Afyonkarahisar-Şuhut-Sandıklı arasında kalan alanlar olmak üzere başlıca 2 bölgede yoğunlaşmaktadır. Savaşçın ve ark. (1995), Savaşçın ve Oyman (1998), KG uzanımlı Kırka-Afyon-Isparta Alkali Volkanitleri (KAIIV)'ni, Batı ve Orta Anadolu'daki en genç Alpin magmatizmanın (Miyosen-Kuvaterner) 3 ayrı yaşıt volkanik topluluklarından birisi olarak göz önünde bulundurmıştır. Batı Anadolu'nun K-G sıkışmasını takip eden evrede meydana gelen D-B doğrultulardaki faylanmalara bağlı olarak volkanik kayalar yüzeye ulaşmışlardır (Çevikbaş ve ark. 1988); Besang ve arkadaşları Afyonkarahisar volkanitlerinin yaşını 8–14 milyon yıl olarak vermişlerdir (Besang ve ark. 1977). Sıcak su kaynak ve kaplıcaları yönünden oldukça zengin olan bölgede; Paleozoyik yaşlı kuvarsit, kalkşist, kristalize kireçtaşı ve kalkşistler ile Neojen konglomera, kumtaşı, kireçtaşı kaya birimleri ve yöredeki tüm fay zonları rezervuar kaya niteliğindedir (Erişen ve ark. 1996).



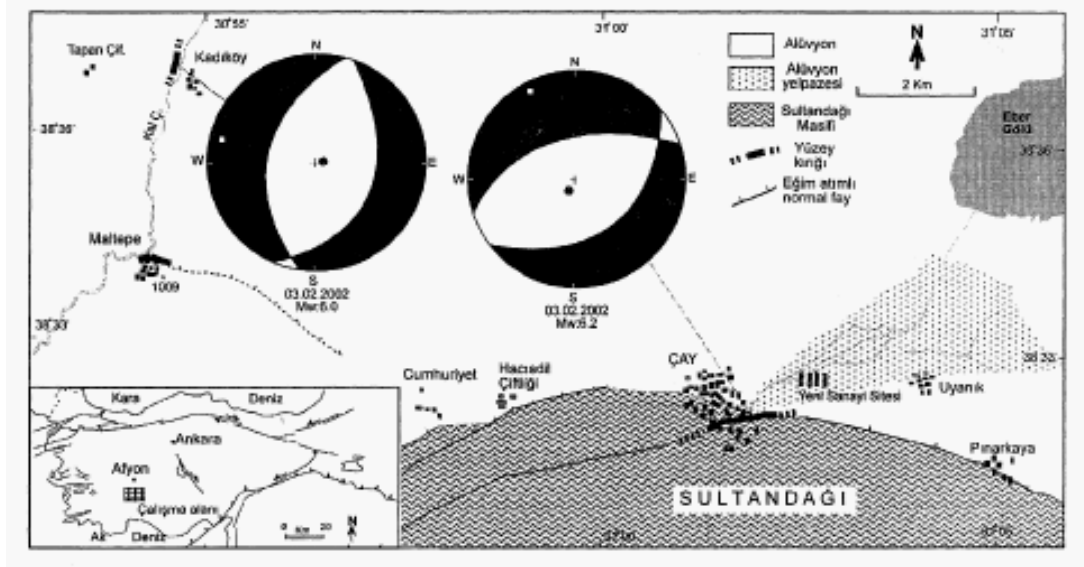
Şekil 2.28. Batı Anadolu'daki volkanik merkezlerin bölgesel dağılımı (Aydar 1998)

Bölgeye Orta-Batı Anadolu'nun tektoniği açısından bakıldığında, Sultandağları'nın kuzey ve doğu sınırının günümüzde bir verrev atımlı normal fay karakterinde olduğu ifade edilmektedir (Koçyiğit ve ark. 2000). Araştırmacılar, verrev atımlı Akşehir ve Karagöztepe fay zonlarının bölgedeki son açılma rejimini temsil ettiğini ve Pliyosen'den günümüze kadar da bu rejimin devam ettiğini ortaya koymuşlardır (Boray ve ark. 1985; Şaroğlu ve ark. 1987; Barka ve ark. 1995; Koçyiğit ve ark. 2000; Demirtaş ve ark. 2002). Benzer şekilde bölgedeki en genç jeolojik yapıyı, Sultandağı fay sistemi (Sultandağı ve Üçkuyu fayları

arasında) içerisinde gelişmiş bir yarı graben olarak yorumlamaktadırlar. Bu fay, yaklaşık 65 km uzunluğunda olup genel doğrultusu K 65°D dur.

Boray ve arkadaşları ile Barka ve arkadaşları tarafından, Isparta büklümünü kuzey doğudan sınırlayan fayın şekillenmesinde önemli rol oynayan Sultandağ fayının, neotektonik dönemin başlangıcında geliştiği ve bu dönemde sağ yönlü, doğrultu atımlı fay olarak hareket ettiği belirtilmiş ve bu fayın bindirme bileşenli olduğu ileri sürülmüştür (Boray ve ark. 1985; Barka ve ark. 1995). Koçyiğit ve arkadaşlarına göre Akşehir fayı olarak da tanımlanan fayın kuzey bloğu düşmüş, düşen blok üzerinde Akşehir ve Eber gölleri meydana gelmiştir (Koçyiğit ve ark. 2002). Koçyiğit, Afyon–Akşehir havzasını güney-güneybatıdan sınırlayan fayı, Akşehir fayı olarak adlandırmış ve normal fay olarak göstermiştir (Koçyiğit 1984). Koçyiğit ve arkadaşları ise, Sultandağ fayının aktif olmayan bindirme fayı olduğunu, Akşehir fayının ise bu bindirmeyi de kesen oblik atımlı normal aktif fay olduğunu belirtmişlerdir (Koçyiğit ve ark. 2000). 15 Aralık 2000 tarihinde meydana gelen Akşehir depremi ve 3 Şubat 2002 Çay depremine ait fay düzlemi çözümleri de faylanmanın normal fay üzerinde geliştiğini göstermektedir (Taymaz ve Tan 2002). Sultandağ yükselimini Akşehir–Afyon çöküntüsünden ayıran fay, Şaroğlu ve arkadaşları tarafından hazırlanan Türkiye diri fay haritasında “Sultandağ fayı” olarak adlandırılmıştır (Şaroğlu ve ark. 1987). Boray ve arkadaşları ile Barka ve arkadaşları, Isparta Büklümü’nü kuzeydoğudan sınırlayan bu fayın bindirme bileşenli olduğunu ileri sürmüşlerdir (Boray ve ark. 1985; Barka ve ark. 1995).

Aralık 2000 ve Şubat 2002 tarihlerinde Akşehir fayı üzerinde 5,9 ve 6,2 büyüklüklerinde iki deprem meydana gelmiştir. Bölgede 1900’lü yıllarda büyüklüğü 4’ten büyük 40 deprem meydana gelmiş olup, bunlardan 6 tanesinin büyüklüğü 5’in üzerindedir. Sultandağ bölgesinde 2000 ve 2002 yıllarında meydana gelen depremler, farklı kurumlar ve araştırmacılar tarafından değişik amaçlarla araştırılmıştır (Demirtaş ve ark. 2002; Koçyiğit ve ark. 2002; Ulusay ve ark. 2002; Ulusay ve ark. 2004; Özden ve ark. 2002; Nurlu ve Kuterdem 2002; Emre ve ark. 2003). 3 Şubat 2002 depreminde meydana gelen yüzey kırıklarının tarihçesinin araştırılması, Akşehir fayının aktivitesini ve bölgenin depremselliğini anlamak açısından önemlidir (Şekil 2.29).



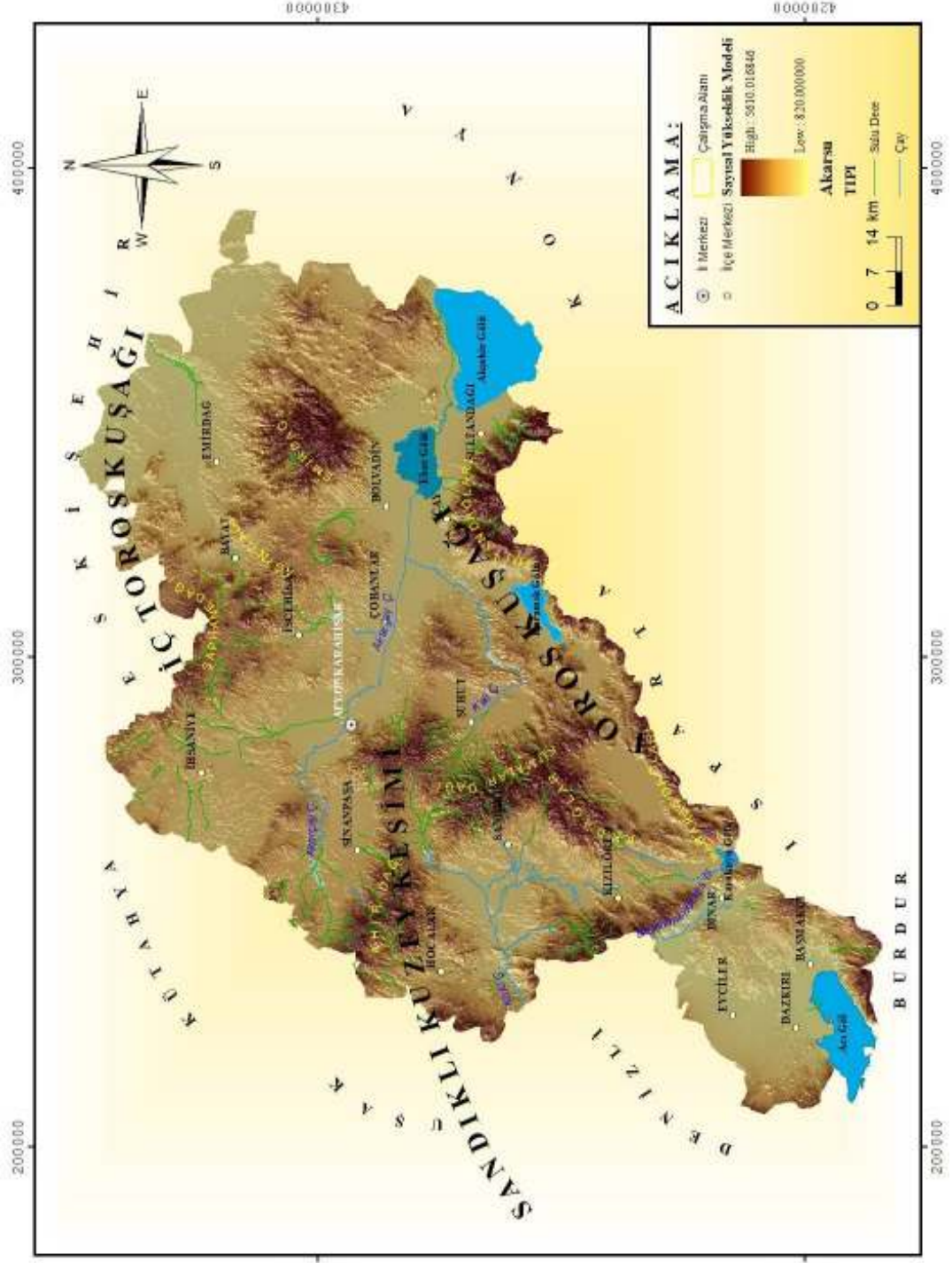
Şekil 2.29. Sultandağı masifi, Eğim atımlı normal faylar, alüvyon yelpazesi, 03.02.2002 depremleri ve yalınlaştırılmış jeoloji haritası (1/500.000 ölçekli Türkiye Jeoloji haritasından yalınlaştırılmış ve kısmen değiştirilmiştir); (Şengör ve ark. 1985)

2.5.2. İnceleme alanının jeolojisi

Akarçay Havzası olarak da bilinen inceleme alanında, Paleozoyikten Kuvaterner'e kadar olan değişik jeolojik dönemlerde oluşmuş kayaç toplulukları bulunmaktadır. Metin ve ark. (1987), Erkan ve ark. (1996), Yalçinkaya ve ark. (1986), Demirkol ve ark. (1977), Kibici ve ark. (2001), inceleme alanının içinde bulunduğu Afyonkarahisar ve çevresini jeolojik açıdan üç ana birliğe ayırmışlardır. Bunlar; **(i)** Sultandağları Kesimi (Toros Kuşağı), **(ii)** Afyon'un Kuzey Kesimi (İç Toros Kuşağı) ve **(iii)** Sandıklı'nın Kuzey Kesimi'dir (Şekil 2.30). İnceleme alanında Toros ve İç Toros Kuşağı'na ait kayaçlar gözlenmektedir. İnceleme alanında gözlenen birimlerin litolojik özellikleri aşağıda özetlenmiştir (Şekil 2.31).

Paleozoyik yaşlı metamorfik kayaçlar, havzanın kuzeybatısında ve güneydoğusunda yüzeylenmektedir. Kuzeybatıda Afyon Ovası'nın kuzeyinde yüzeylenen metamorfik kayaçlar güneye inildikçe derinlere dalmaktadır.

Havzanın güneybatısında metamorfik kayaçlar ise Sultandağları'nda yüksek bir topografya sunmaktadır.



Şekil 2.30. İnceleme alanı ve civarında yer alan jeolojik kuşaklar (Ulutürk 2009)

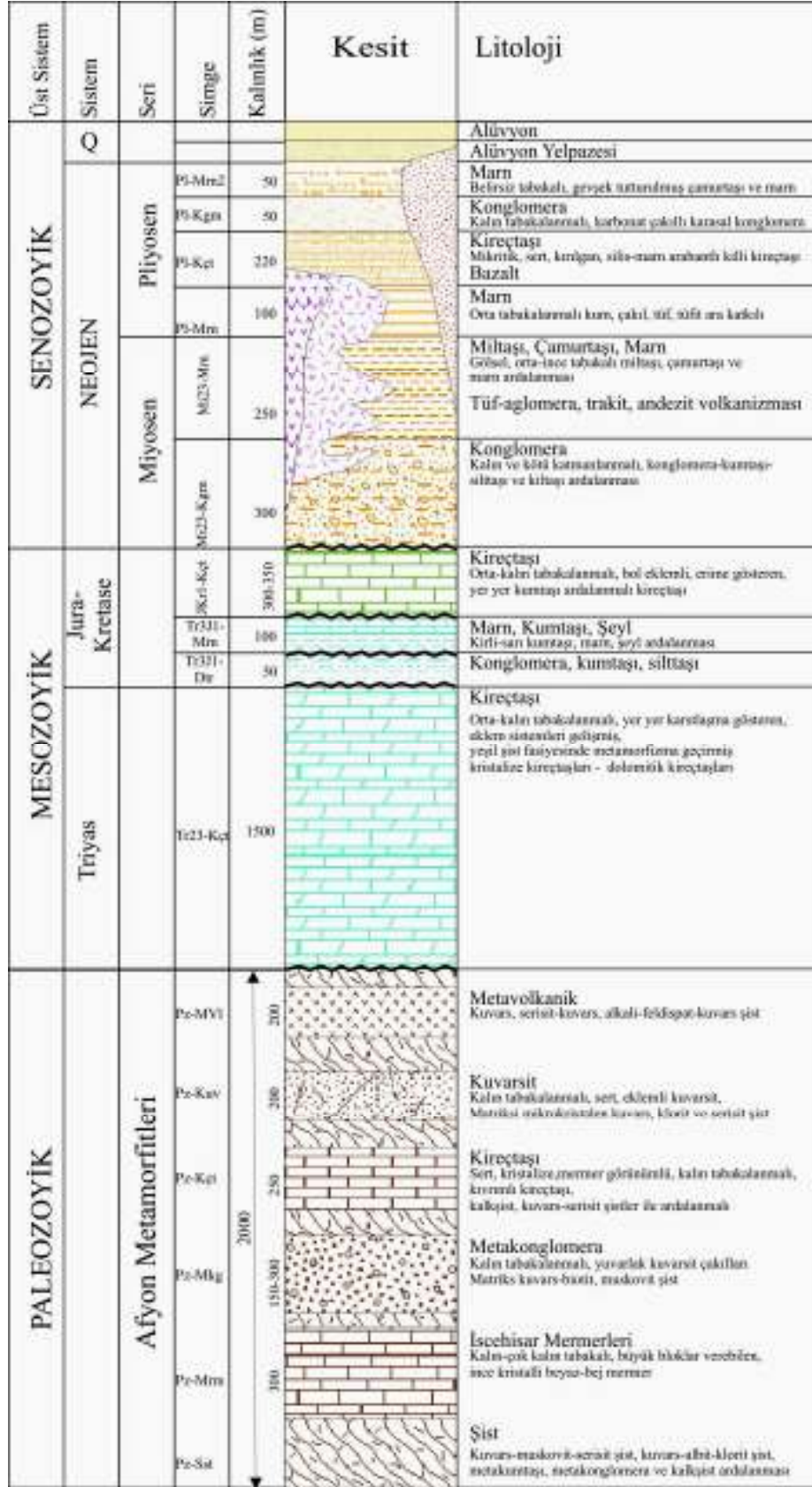
Paleozoyik dönemi Toros ve hem de İç Toros Kuşağı'nda farklı kayaçlarla temsil edilmektedir. Kristalize kireçtaşları Toros Kuşağı'nda Paleozoyik döneminin en önemli birimidir. Kalın tabakalanmalı, sert, eklemli kuvarsit ile yeşil şist fasiyesinde metamorfizma geçirmiş olan şistler ise Toros Kuşağının diğer önemli litolojileridir (Şekil 2.32). İç Toros Kuşağı ise Paleozoyik döneminde “Afyon Metamorfitleri” diye adlandırılan ve yeşil şist fasiyesinde oluşmuş metamorfik kayaçlarla temsil edilmektedir (Şekil 2.33).

Mesozoyik kayaç toplulukları da Toros ve İç Toros Kuşağı'nda farklılıklar göstermektedir. Sultandağları'nda ve Şuhut Ovası'nın güneyinde yüzeylenen Toros Kuşağı Triyas'dan Üst Kretase'ye kadar çoğunlukla karbonatlı formasyonlardan oluşmaktadır. Toroslarda görülen ileri derecede karstlaşma havza içerisinde izlenmemekte, sadece Sultandağları'nın yüksek kesimleri ile güney yamaçlarında izlenmektedir (Şekil 2.32). İç Toros Kuşağı ise havzanın kuzey sınırlarını oluşturan kırıntılı ve karbonatlı kayaç topluluklarından oluşmaktadır (Şekil 2.33). Bu karbonatlarda yüksek kesimlerde özellikle İlbudak Dağları'nda belirgin karstlaşma izlenmektedir. İç Toros Kuşağı'nda Triyas ve Jura yaşlı karbonatlar izlenirken Kretase bulunmamaktadır.

Senozoyik yaşlı oluşuklar Paleosen, Miyosen ve Pliyosen yaşlı birimlere ayrılmıştır. Mesozoyik sonunda yükselen havzanın aşınım alanlarını oluşturması ve aşınmanın kuzeyden güneye doğru gerçekleşmesi nedeniyle, Toroslar'da genel olarak gözlenen Eosen yaşlı filiş karakterinde oluşuklara Akarçay Havzası'nda rastlanmamıştır. Senozoyik genel olarak Neojen ile temsil edilmekte, Neojen çökelleri inceleme alanının tamamında, Paleozoyik ve Mesozoyik kayaçlar üzerinde uyumsuz olarak görülmektedir.

Üst Sistem	Sistem	Seri	Simgesi	Kalınlık (m)	Kesit	Litoloji	
SENOZOYİK	Q					Alüvyon	
						Alüvyon Yelpazesi	
	NEOJEN	Pliyosen	Pi-Mn2	50		Marn	Belirsiz tabakalı, gevrek tutarlılığı çamurtaşı ve marn
			Pi-Kgm	50		Konglomera	Kalınlı tabakalı, karbonat çakıllı karasal konglomera
			Pi-Kg	220		Kireçtaşı	Mikritik, sert, kırık, silis-marm arabaşı kelli kireçtaşı
			Pi-Mm	100		Marn	Orta tabakalı, kırı, çakıl, silt, silt arı kırı
	Miyosen	Mi23-Mm	250		Miltaş, Çamurtaşı, Marn	Görsel, orta-ince tabakalı miltaş, çamurtaşı ve marn aralananı	
		Mi23-Kgm	300		Konglomera	Kalınlı ve kırı kararlaananı, konglomera-kireçtaşı-silttaşı ve kilitaşı aralananı	
	MESOZOYİK	Kretase	K7-K8	350		Kireçtaşı	Orta-kalınlı tabakalı, bol oklenli, crine göbeleri, yer yer kireçtaşı aralananı kireçtaşı
Jura		J3-K7	300		Kireçtaşı		
Triyas		T3-Tri-Sar	250		Şist		
PALEOZOYİK	Permiyen	P3-P5-K7	310-450		Kireçtaşı	Orta-kalınlı tabakalı, yer yer kararlaşma gödemi, oklen sistemleri gelişmiş, yeşil şist fasiyesinde metamorfizma geçirmiş kristalle kireçtaşları - dokematik kireçtaşları	
	Karbonifer	C-K7	300		Kireçtaşı	Koyun, acımsı-koyun, alkali-feldspat-koyun şist	
	Devoniyen	D23-Kar	200		Şist		
Ordovisiyen	O12-Sar	1500		Kuvarsit	Kalınlı tabakalı, sert, oklenli kuvarsit,		
Kambriyen	Ka23-K7	250		Şist	Metastilttaşı, silttaşı-metagroak, kırı-koyun-rika şistlerden oluşur. Yeşil-şist fasiyesinde metamorfizma geçirmiştir. Kıvrımlı ve kırıklı bir yapıya sahiptir.		
					Kireçtaşı	Kırı tabakalı, 1eri derece kararlaşmış kristalle kireçtaşları	

Şekil 2.32. Sultandağları yöresinin genelleştirilmiş stratigrafi kesiti (Tezcan ve ark. 2002)



Şekil 2.33. Afyon bölgesinin genelleştirilmiş stratigrafi kesiti (Tezcan ve ark. 2002)

Neojen yaşlı birimler genellikle paleocoğrafyaya uygun bir biçimde gölssel çökeller olarak ortaya çıkmış, epirojenik hareketler ile kısmi yükselmeye uğramışlardır. Neojen sedimantasyonu 1200 m kotlarında durmuş, bu yükseltinin üzerinde gözlenen Neojen birimleri epirojenik hareketler ile yerleşmişlerdir. Paleocoğrafyaya bağlı olarak bu birimler yer yer 600 m kalınlığa kadar ulaşmaktadır. DSİ tarafından yapılan sondajlarda gözlenen Neojen çökelleri genellikle aşağıdan yukarıya doğru şu şekilde izlenmektedir;

- Çakıllı-kumlu, kırmızı renkli flüviyal çökeller
- Kil-kum-çakıl, tuf arakatlı gölssel marn ve kireçtaşı
- Çakıllı-kumlu flüviyal çökeller
- Kil-kum-çakıl, tuf arakatlı gölssel marn ve kireçtaşı

Volkanik kayaçlar çoğunlukla Neojen volkanizmasının bir eseri olarak havzanın batısında gözlenmektedir. Şuhut Ovası'nın güneyinde Balçıkhisar yöresinde ise Mesozoyik denizaltı volkanizmasına ait yastık lavlar bulunmaktadır. Çoğunlukla en altta tuf ile başlayan volkanik faaliyet en son bazalt yerleşimi ile son bulmuştur. Üst Miyosen sonundan başlayarak tüm Pliyosen boyunca devam eden volkanik faaliyetlerin etkisinde kalmıştır. Bu volkanik faaliyetlerin ürünü olarak dasitik tüfler, aglomeralar, andezitler, trakitler, trakiandezitler ve bazaltlar bölgede çok geniş alanlar kapladıkları gibi, çok büyük ve yüksek dağlar oluşturmuşlardır. Gerek bu dağlardan aşınan ve taşınan, gerekse volkanlardan çıkan gereçler, havzadaki göllerde devam eden sedimantasyona karışmışlardır. Bölgedeki volkanik kayaçların stratigrafik konumu, altta tüfler, tüflerin üzerinde de aglomeralar ve en üstte andezit, trakit ve bazalt şeklindedir.

2.5.3. Yapısal jeoloji

Bölgede, birbirinden farklı tektonik yapıya sahip iki kesim mevcuttur. Daha önceden de söz edildiği gibi bunlardan biri Toros Kuşağı, diğeri ise bunun kuzeyinde yer alan İç Toros Kuşağı'dır. Bu iki kesimin Neojen'den önceki durumlarına bakıldığında farklı yapısal özellikler gözlenmektedir. Gözlenen

çizgisel ve düzlemsel yapı elemanları, bu kayaç birimlerinde farklı yapıların gelişmiş olduğunu göstermektedir.

a) Tabakalanma ve yapraklanma:

İç Toros Kuşağı'nı oluşturan Mesozoyik kayaçları genel olarak çok kalın-kalın-orta ve belirgin tabakalanmalıdır. Bölgesel metamorfizma ve tektonik sonucu genellikle tabakalanmaya paralel şistozite izlenmektedir. Şistozite kazanmış tabakaların içinde kıvrımlar gelişmiştir. Kuzey kesimi oluşturan formasyonların şistozite ve tabakalarının genel doğrultuları, Çobanlar kuzeyinde KD-GB, Hamidiye yöresinde K-G, Seydiler doğusunda KB-GD doğrultuludur. Bu konumu ise Afyon Metamorfileri Çobanlar ve Hamidiye köyü dolaylarından başlayarak K45°D, K-G, B şeklinde bir yay oluşturmaktadır. Bu yayın doğu kolu Sultandağları uzantısı tarafından kesilmektedir.

b) Kıvrımlar:

Gerek Toros Kuşağı kesiminde, gerekse kuzeyindeki İç Toros Kuşağı kesiminde kıvrım eksenleri de yukarıda bahsedilen tabaka doğrultuları ile aynıdır. Ancak, bölgenin tektonize oluşu ve tersiyer oluşukları ile örtülü bulunuşu kıvrım oluşuklarını örttüğünden, kayda değer önemli kıvrım yapıları saptanamamıştır.

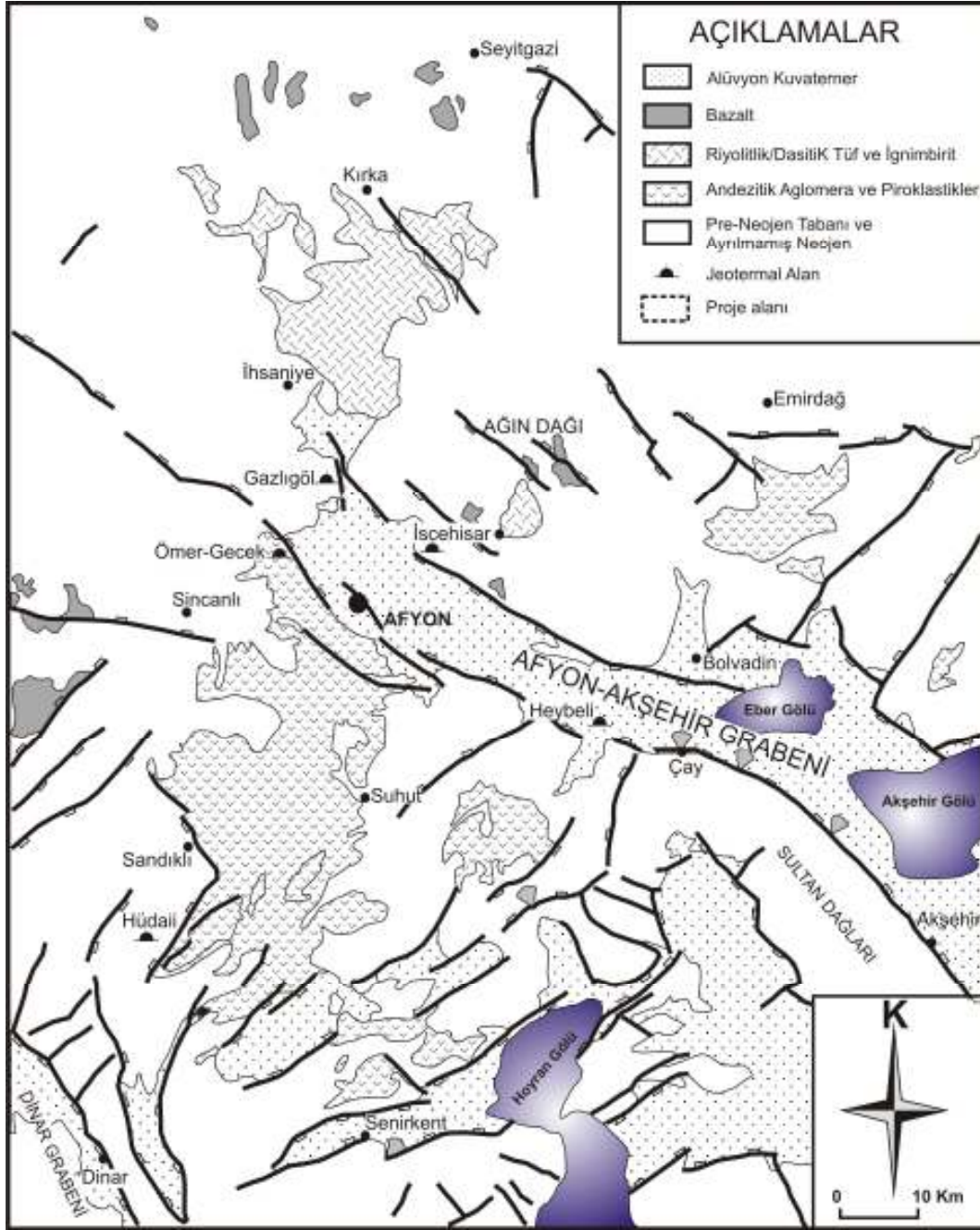
c) Faylar:

Güneybatı Türkiye'nin genişlemeli Neotektonik rejiminin etkisi altında kalan inceleme alanındaki en önemli tektonik yapı, Afyon–Akşehir Grabeni (AAG) ve bu grabenin kenar faylarıdır. Bölgenin tektonik yapısı son olarak Koçyiğit ve Deveci (2005) tarafından incelenmiş ve Afyon–Akşehir Grabeni'nin kenar fayları, Akşehir Fay Zonu (AFZ), Hamidiye Fay Zonu (HFZ), Yarımcı Fay Zonu, Fethibey Fay Zonu ve Demirçevre Fay Zonu olarak adlandırılmıştır (Şekil 2.34). Söz konusu kenar faylarından inceleme alanı içerisinde yer alan Akşehir Fay Zonu ve Hamidiye Fay Zonunun özellikleri aşağıda verilmiştir.

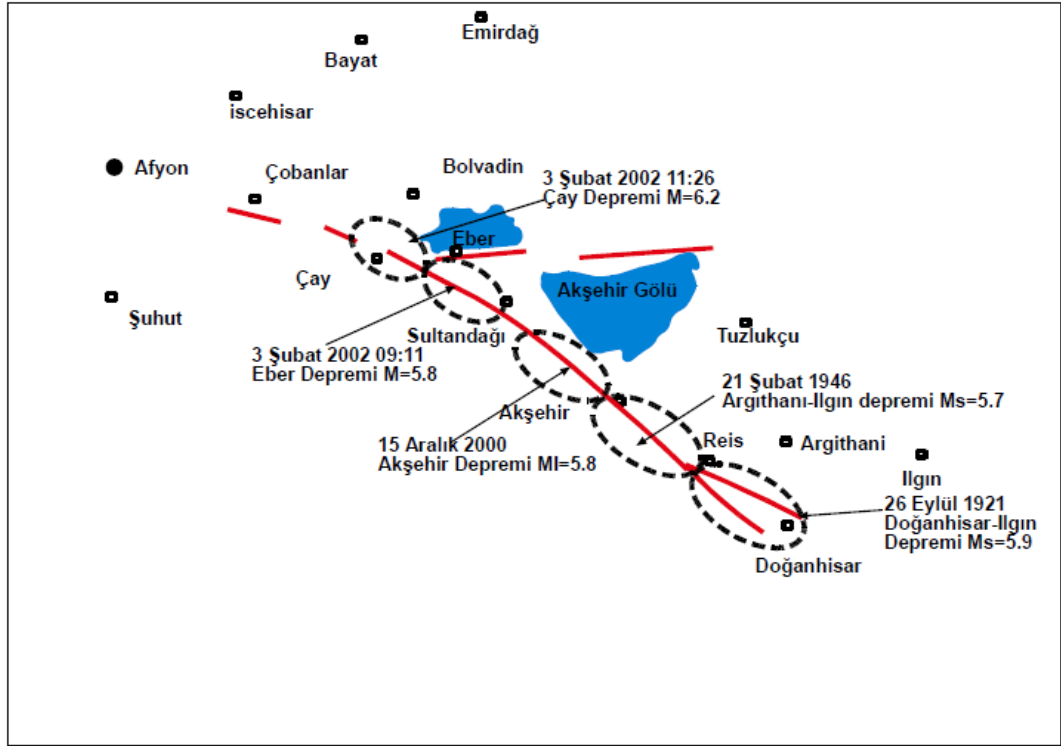
❖ **Akşehir Fay Zonu (AFZ):**

İlk olarak Koçyiğit ve ark. (2000) tarafından adlandırılan ve özellikleri incelenen fay zonu verev atımlı normal bir faylanma kuşağıdır. AAG'nin güney kenarını sınırlayıp denetler. AFZ'nun batı kesimi yaklaşık ve toplam olarak 2-12 km genişlikte, 54 km uzunlukta ve genel olarak BKB gidişli olup, uzunlukları 0,9-28 km arasında değişen, 0,2-4 km aralıklı, birbirine paralel-yarı paralel uzanan, D-B- ve BKB- gidişli çok sayıda yapısal fay segmentinden oluşur ve kuzeye graben içine doğru bakan basamak türü faylanma biçimi oluşturur. AFZ'nu oluşturan tüm fay segmentleri boyunca birikmiş olan düşey atım miktarı yaklaşık 0,9 km dolayındadır. Gerek morfotektonik ve gerekse sismik verilere göre, AFZ'nu oluşturan yapısal fay segmentlerinin birçoğu diri olup büyüklüğü 5 ve üzerinde deprem üretme potansiyeline sahiptir. Koçyiğit ve Deveci (2005) tarafından yapılan çalışmada, AFZ'nun fay segmentlerini Cumhuriyet, Maltepe, Yeni Işıklar, Kalecik, Karahisar, Halımoru, Belkaracaören, Eski Işıklar ve Değirmendere faylarının oluşturduğu belirtilmiştir.

Fayın doğuda yer alan Doğanhisar–Reis arasında kalan parçası, 26 Eylül 1921 tarihinde 5,9 M büyüklüğünde bir depremle, Reis–Akşehir arasında kalan parçası 21 Şubat 1946 tarihinde 5,7 M büyüklüğünde bir depremle, Akşehir–Sultandağı arasında kalan parçası 15 Aralık 2000 tarihinde 5,8 M büyüklüğünde bir depremle ve Sultandağı–Çay arasında kalan parçası ise 3 Şubat 2002 tarihinde 6,2 M ve 5,8 M büyüklüğünde Eber–Sultandağı ve Çay depremleri ile yırtılmıştır (Demirtaş 2002) (Şekil 2.35).



Şekil 2.34. Afyonkarahisar'daki önemli volkanik oluşumlar ve graben yapılarını gösteren jeoloji haritası (Gürsoy ve ark. 2003)



Şekil 2.35. Akşehir Fayı boyunca son yüzyılda (1900–2002) olmuş hasar yapıcı depremler (Demirtaş ve ark. 2002)

❖ **Hamidiye Fay Zonu (HFZ):**

Bu zon inceleme alanında AAG'nin kuzey kenarını (Çobanlar–Bolvadin arasındaki kesimini) sınırlayıp denetleyen verrev atımlı normal fay kuşağıdır. Hamidiye fay zonu, Çobanlar ilçesi yakın doğusundaki Hamidiye beldesi ve çevresini yüzeyler ve bu alan içerisinde bir taraftan KKD-gidişli Kurucaova ve Devederesi fay zonlarıyla, diğer taraftan ise KB-gidişli Yarımca fay zonuyla kesişerek önemli miktarda gerilim enerjisinin biriktiği bir kavşak oluşturur. Koçyiğit ve Deveci (2005)'e göre Hamidiye fay zonu 3,5 km genişlikte, toplam 14 km uzunlukta olup, birbirine paralel, sık aralıklı (0,5-1,2 km), uzunlukları 1,2-14 km arasında değişen ve güneye graben içine doğru eğimli çok sayıda fay segmentinden oluşur. Bunlar içerisinde en uzununu ve en etkin olanı Duru fayıdır.

3. MATERYAL VE METOT

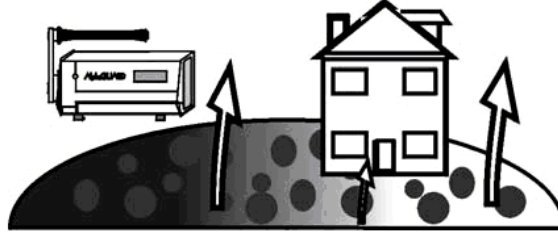
3.1. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Radon Detektörü

Deneysel çalışmalar Genitron marka AlphaGUARD PQ2000 PRO Radon Detektör Sisteminde gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde AlphaGUARD PQ2000 PRO Radon Detektör Sisteminin kullanıldığı alanlar, yapısı, çalışma prensipleri, kullandığı bilgisayar yazılımı gibi sistem özellikleri tanıtılmıştır. Bu bölümdeki AlphaGUARD PQ2000 PRO Radon Detektör Sistemi bilgileri, cihazın ve ekipmanlarının kullanım kılavuzlarından derlenmiştir (Saphymo 1998, 2001; Genitron 2008).

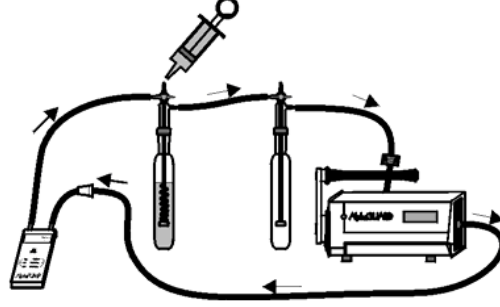
3.1.1. AlphaGUARD PQ2000 PRO radon detektör sistemi özellikleri

AlphaGUARD PQ2000 PRO radon detektör sistemi havada, suda, toprak gazında ve yapı malzemelerinde radon yoğunluğu (Bq/m^3) ve eş zamanlı olarak sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$), atmosfer basıncı (mbar) ve nem oranı (% rH) gibi üç farklı iklimsel parametreyi de ölçebilmektedir. Silindirik atma (puls) iyonlaşma çemberine sahip olan detektörün hacmi 0,56 litredir. AlphaGUARD, $2-2 \times 10^6$ Bq/m^3 aralığında ölçüm yapabilmektedir ve hassasiyeti 20 Bq/m^3 'te 1 CPM (counts per minute = dakikadaki sayım) ya da 100 Bq/m^3 'te 4,5 CPM olarak verilmektedir. DSP (Digital Signal Processing) teknolojisine sahip olan AlphaGUARD, çapraz ilgileşim (cross-correlation) algoritması kullanarak meydana gelen gürültüden radon sinyalini ayırt edebilmektedir. Yapılan ölçümler DataEXPERT yazılımıyla analiz edilebilmektedir. Yerinde ölçümler yapılmasında kullanılan AlphaGUARD cihazında bulunan iyon odası (alfa spektroskopi puls sayımı) vasıtası ile ortamın o anki radon değeri ile birlikte hava sıcaklığı, hava basıncı ve havanın nemi gibi diğer parametreler de ölçülmektedir. Cihaz bilgisayara bağlanarak veri depolanabilir ve değerlendirilebilir. Sudan, topraktan ve yapı malzemelerinden gelen radon, AlphaGUARD cihazı ile birlikte Şekil 3.1'de gösterilen ekipman ve düzenekler kullanılarak ölçülür.

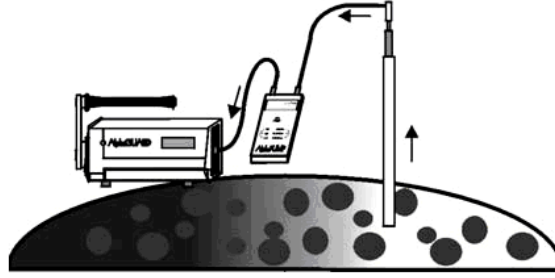
Havada Radon



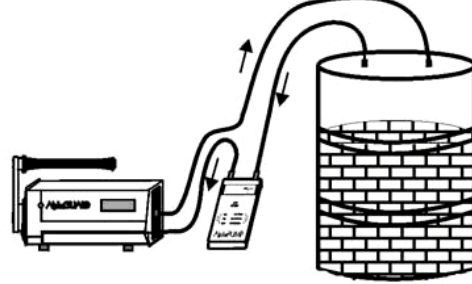
Suda Radon, aqua kit kullanılarak



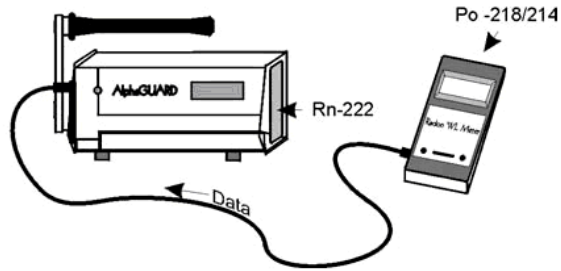
Toprakta Radon, prob kullanılarak



Bina yapı malzemelerinde Radon



Radon ve radon ürünleri



Şekil 3.1. AlphaGUARD PQ2000 PRO radon detektör sistemi ve kullanım alanları

Radon ölçümlerinde kullanılan AlphaGUARD PQ 2000PRO temel olarak radon (^{222}Rn), toron (^{220}Rn) ve radon yan ürünlerine ait radyasyon yoğunlukları ile gama (γ) doz oranı ölçmekte kullanılan taşınabilir bir radyasyon detektörüdür. AlphaGUARD radon detektörü gelişmiş bir atma (puls) iyonlaşma çemberi veya alfa (α) spektroskopisi yöntemi kullanmaktadır. Yüksek radon ölçüm hassasiyetine sahiptir ve yoğunluk gradiyentleri ile küçük yoğunluk dalgalanmalarını algılayabilecek derecede hassas elektronik yapıya sahiptir. Uzun süreli ölçümler yapabilmektedir ve ölçümler esnasında doğrudan bir güç kaynağına bağlanabildiği gibi, yüksek kapasiteli pilleri sayesinde seçilen ölçüm moduna göre 6 aya kadar ölçüm yapabilmektedir. Bunların yanı sıra AlphaGUARD olumsuz sayılabilecek koşullarda, mesela yüksek nem, yüksek sıcaklık, yüksek titreşim gibi, bakım gerektirmeden ölçüm yapabilmektedir. Şekil 3.2’de AlphaGUARD detektörü görülmektedir.



Şekil 3.2. AlphaGUARD PQ2000 PRO radon detektörü önden görünüşü

AlphaGUARD radon detektörü ölçüm ünitesine birleşik olan bir emme pompası yardımı ile havayı detektör iyonlaşma odasına çeker. Emme sonucunda iyonlaşma odasına giren Radon-222 ve Radon-220 izotopları bozunarak oda içerisinde iyonizasyona sebep olur ve elektrik sinyalleri meydana getirirler. Bu sürekli emme esnasında radon yan ürünleri plaka şeklindeki bir filtre tarafından tutulur. Filtre plakası üzerinde biriken radon bozunum ürünlerinin alfa aktivitesi

ise, filtre plakasının diğer yüzüne yerleştirilmiş hassas bir sayısal işlemcili modül olan, alfa duyarlı TN-WL 02 mikroçip modülü vasıtasıyla ölçülür. Yapılan tüm ölçümlerden elde edilen elektrik sinyalleri, AlphaGUARD PQ 2000PRO'nun Counter-Module sayıcı birimine TTL sinyali olarak gönderilir ve detektörün kalibrasyon bilgileri de kullanılarak yazılım tarafından okunabilir veriler haline dönüştürülür.

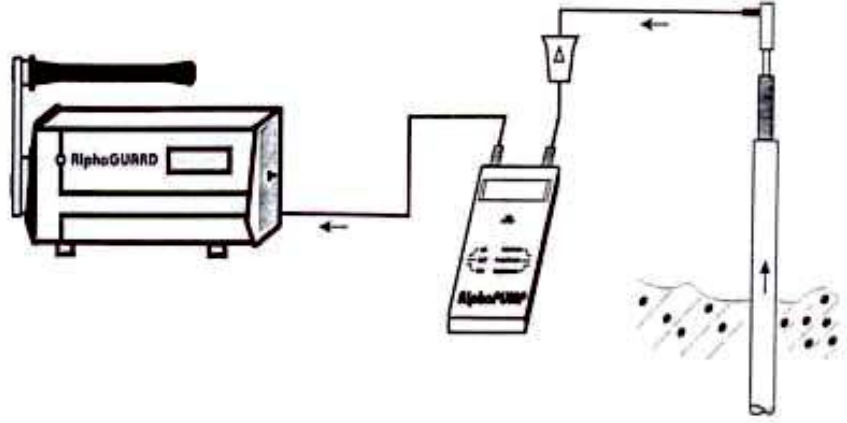
Alınan verilerin grafiksel olarak işlenmesi, geliştirilmesi, arşivlenmesi ve sanal ortamda sunulması için AlphaGUARD için geliştirilmiş çeşitli yazılım paketleri kullanılır. Bunlar AlphaVIEW, AlphaEXPERT ve en son geliştirilmiş olan DataEXPERT yazılımlarıdır. İlk iki yazılım türü sadece DOS ortamında çalışmaktadır ve AlphaGUARD detektörü ile bir RS232 port ile haberleşmektedirler. Bu çalışmada en son geliştirilmiş olan DataEXPERT yazılımı kullanılmıştır.

AlphaGUARD'ın atmosferde veya havada yapacağı ölçümler için ayrıca bir aparat kullanmak gerekmemektedir. Ancak suda, toprakta ve yapı malzemelerinde radon ve yan ürünlerinin yoğunluklarının tayin edilebilmesi için bazı aparatlar kullanılması gerekmektedir. Suda yapılacak ölçümler için AquaKIT, toprakta yapılacak ölçümler için Soil Gas Probe (toprak gaz sondası) kullanılmaktadır (Şekil 3.3). Ayrıca AlphaGUARD ile gerek sudaki, gerek topraktaki ve gerekse yapı malzemelerindeki ölçümlerin yanı sıra kalibrasyon işlemlerinde de kullanılması gerekli olan AlphaPUMP, cihaz iyonizasyon odasına hava pompalayan bir diğer aparatır (Şekil 3.3 ve Şekil 3.4).

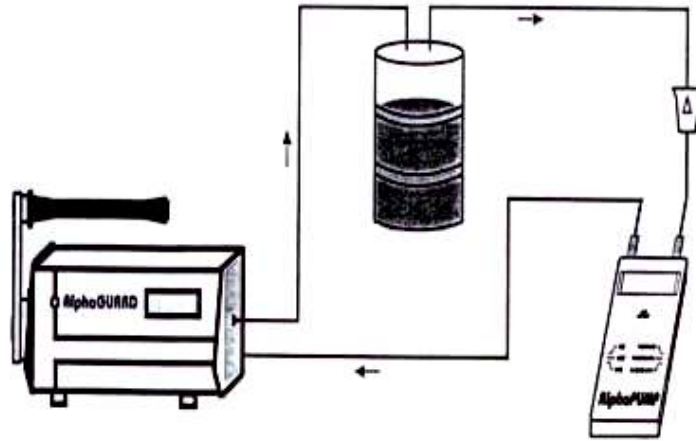
3.1.2. AlphaGUARD detektörünün yapısı

AlphaGUARD PQ 2000PRO radon detektörünün yapısı iki temel kısma ayrılarak incelenebilir:

1. Detektörün dış yapısı, ebatları ve dışarıdan görülen bazı özellikleri,
2. Detektörün iç yapısı, ölçüm ve veri işleme birimleri.



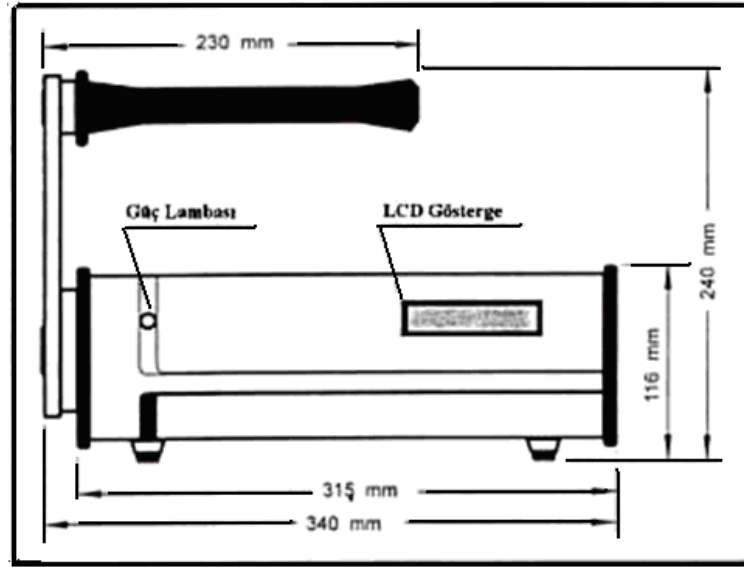
Şekil 3.3. AlphaGUARD ile toprakta radon ölçümü için kullanılan sistem



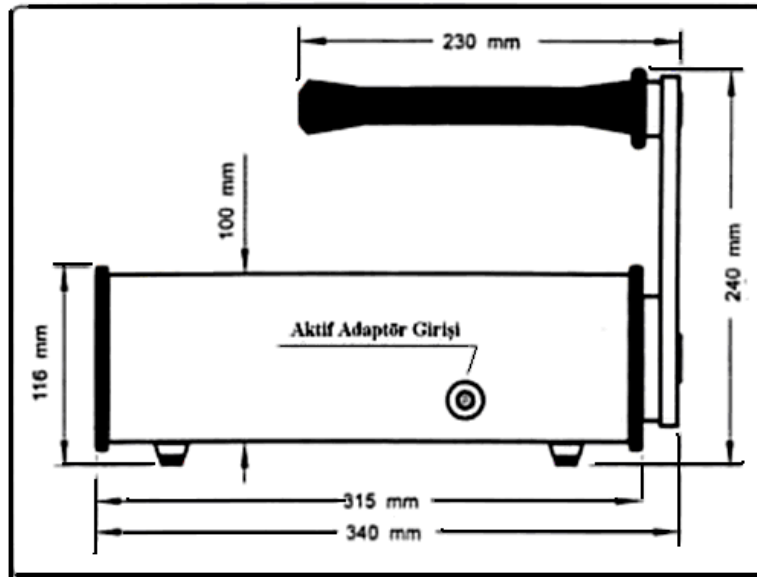
Şekil 3.4. AlphaGUARD ile yapı malzemelerindeki radon ölçümü

Detektörün dış yapısı

AlphaGUARD PQ 2000PRO radon detektörünün ölçüm yapmasını sağlayan ölçüm ve elektronik aksam bileşenleri dayanıklı bir alüminyum dış gövde içine yerleştirilmiştir. Aşağıdaki şekillerde AlphaGUARD cihazının önden (Şekil 3.5) ve arkadan (Şekil 3.6) görünüşleri ile bazı ebatları verilmiştir.



Şekil 3.5. AlphaGUARD cihazının önden görünüşü ve ebatları



Şekil 3.6. AlphaGUARD cihazının arkadan görünüşü ve ebatları

Cihazın arka kısmındaki vida yuvası plastik bir kapakla kapatılmıştır. AlphaGUARD PQ 2000PRO'da bu kapağın arkasında bulunan yuva, cihazın iyonizasyon odasıyla buraya bağlanan etkin hava pompası arasındaki bağlantıyı sağlar. Yani buradan detektör içerisine hava girişi sağlanmaktadır. Bu da AlphaPUMP ile yapılır. Alt kısımda alüminyum gövdenin yerle temasını kesen

plastik ayaklar ve havalandırma kanalları bulunmaktadır. İç kısımda bulunan bir fan sayesinde, özellikle uzun süreli kullanımlarda cihazın soğutulmasını sağlamak için sıcak hava buralardan dışarıya atılmaktadır.

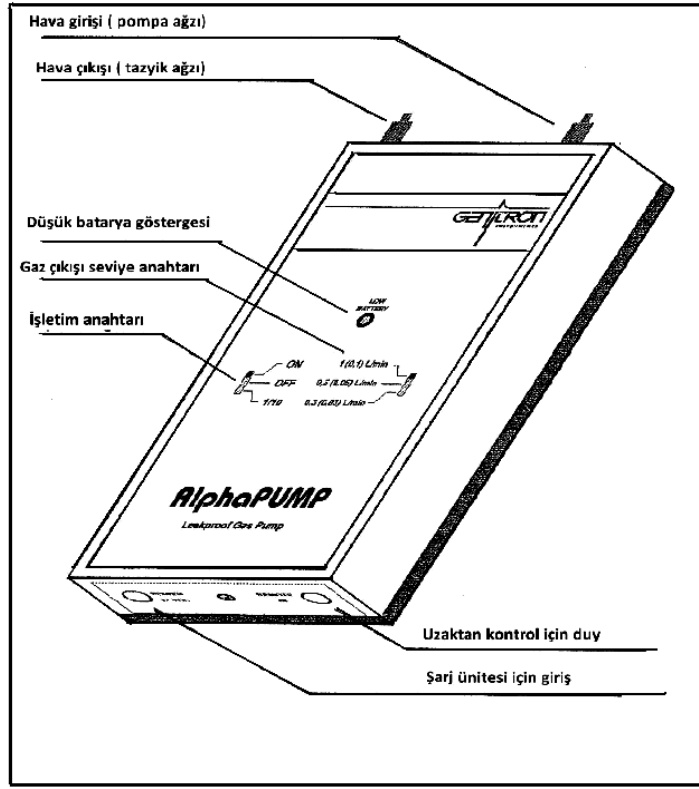
Radon giriş penceresinin filtre yüzeyi ile koruyucu grid arasında teknik açıdan gerekli ve tüm yönlere açık olan bir hava aralığı bulunmaktadır. Bu demektir ki koruyucu gridi herhangi bir şeyle kaplamak, radon gazı girişi penceresini gaz sızdırmaz hale getirmez, yani iyonizasyon odasına yine radon gazı girişi sağlanır.

Detektörün iç yapısı

AlphaGUARD PQ 2000PRO radon detektörünün asıl önemli kısmı iç yapısıdır. Cihazın alüminyum korumasının altında ölçüm yapılmasını sağlayan detektör (atma iyonizasyon çemberi) ve detektörden gelen sinyalleri işleyip sayısal veri haline getiren sinyal işleme birimi DSP (Digital Signal Processing- Sayısal Sinyal İşleme) bulunmaktadır.

3.1.3. Genitron AlphaPUMP

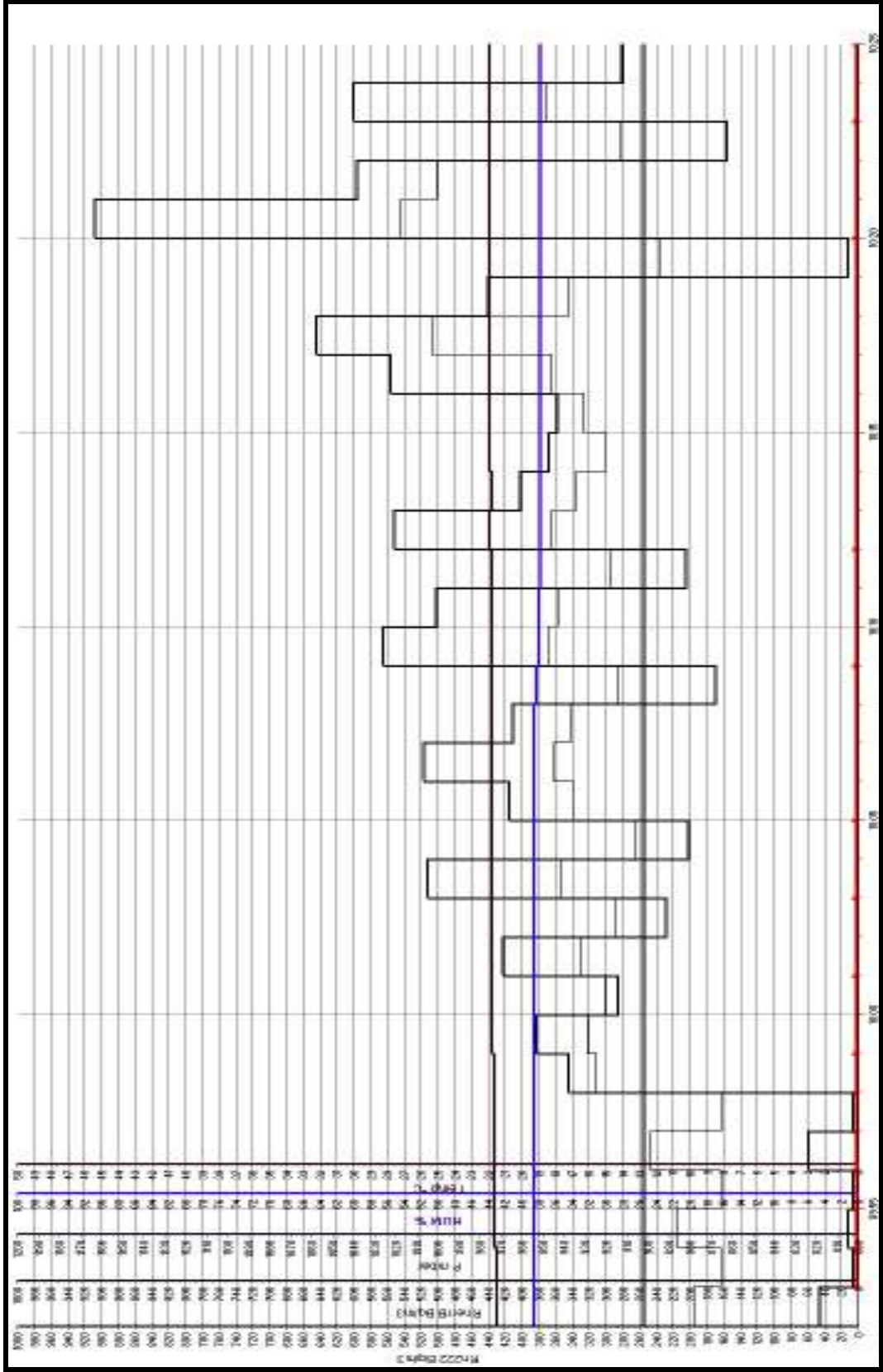
Bu pompa AlphaGUARD'a gönderilmek istenilen gaz miktarını ayarlamaktadır. Açık, kapalı ve 1/10 modlarını içeren anahtar, 1/10 modunda ise onda bir performansla, yani zaman biriminin onda birini açık, onda dokuzunu kapalı olarak kullanmaktadır. İkinci anahtar pompalanacak gaz miktarını dakikada 1; 0,5 ve 0,3 litre olarak ayarlamaktadır. Alpha PUMP şematik olarak Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. AlphaPUMP şematik gösterimi

3.1.4. DataEXPERT programı

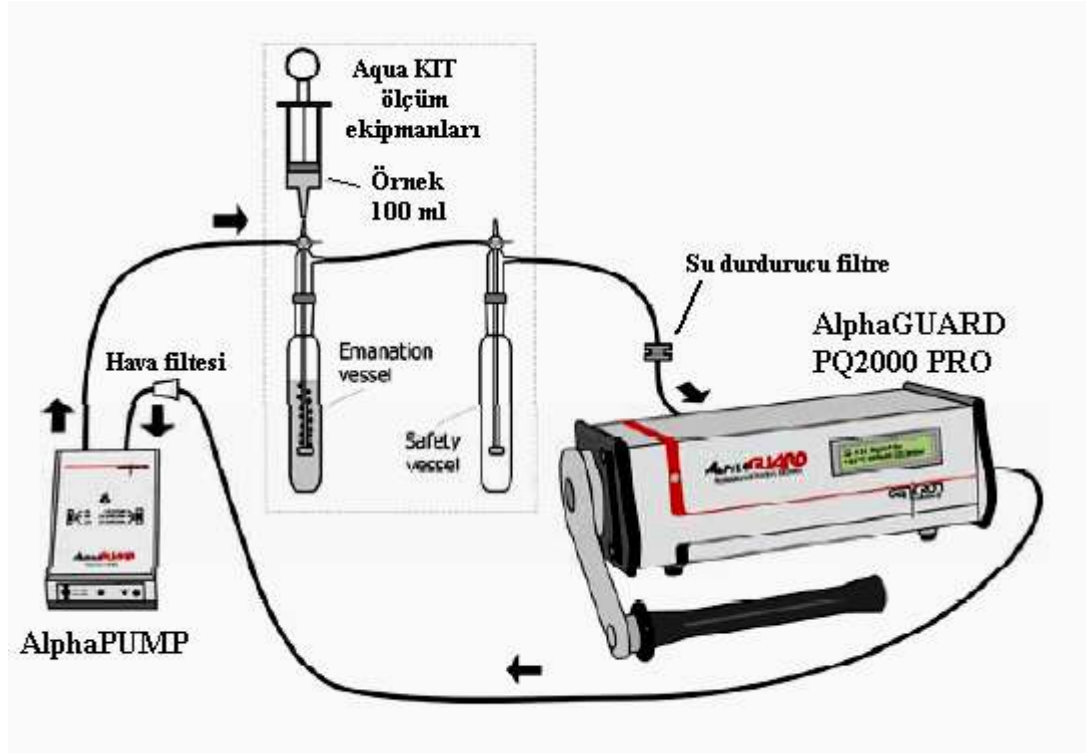
Alınan verilerin grafiksel olarak işlenmesi, geliştirilmesi, arşivlenmesi ve sanal ortamda sunulması için AlphaGUARD için geliştirilmiş çeşitli yazılım paketleri kullanılır. Bunlar AlphaVIEW, AlphaEXPERT ve en son geliştirilmiş olan DataEXPERT yazılımlarıdır. Bu çalışmada AlphaGUARD PQ 2000PRO detektörü ile yapılan deneysel çalışmaların, bilgisayar ortamına aktarılmasında DataEXPERT yazılım programı kullanılmıştır. DataEXPERT programı ile AlphaGUARD'ın ölçtüğü radon konsantrasyonu verilerinin bilgisayar ekranında görüntülenmesi örnekleri Şekil 3.8 ve Şekil 3.9'da verilmiştir. Şekil 3.8'de radon konsantrasyonu ölçümleri, Şekil 3.9'da ise radon konsantrasyonları ve hatası, basınç, nem ve sıcaklık gibi grafiklerin DataEXPERT yazılım programında görüntülenmesi örnekleri verilmiştir.



Şekil 3.9. AlphaGUARD PQ 2000PRO detektörü verilerinin DataExpert yazılım programı ile bilgisayar ekranında görüntülenmesi

3.1.5. AquaKIT

AlphaGUARD PQ 2000PRO detektörünün ekipmanlarından AquaKIT, sudaki radon konsantrasyonunu ölçmek için kullanılır. AquaKIT, sıvı örneklerindeki radon konsantrasyonunu doğrudan ölçen bir dizi cam bileşenlerden oluşur. AquaKIT ölçüm ekipmanları Şekil 3.10'de gösterilmiştir.



Şekil 3.10. AlphaGUARD PQ 2000PRO detektörü, AlphaPUMP ile AquaKIT ölçüm ekipmanları

3.2. İncelenen Su Kaynakları

Su örnekleri, Akşehir fay hattı üzerinde bulunan derin su kuyularından alınmıştır. Türkiye'deki fay hatlarını gösteren uydu görüntüsü Şekil 3.11'de verilmiştir. Bu haritadaki mavi çizgiler fayları göstermektedir. Afyonkarahisar'ı ve bölgedeki fayları detaylı bir şekilde gösteren uydu görüntüsü Şekil 3.12'de yer almaktadır.

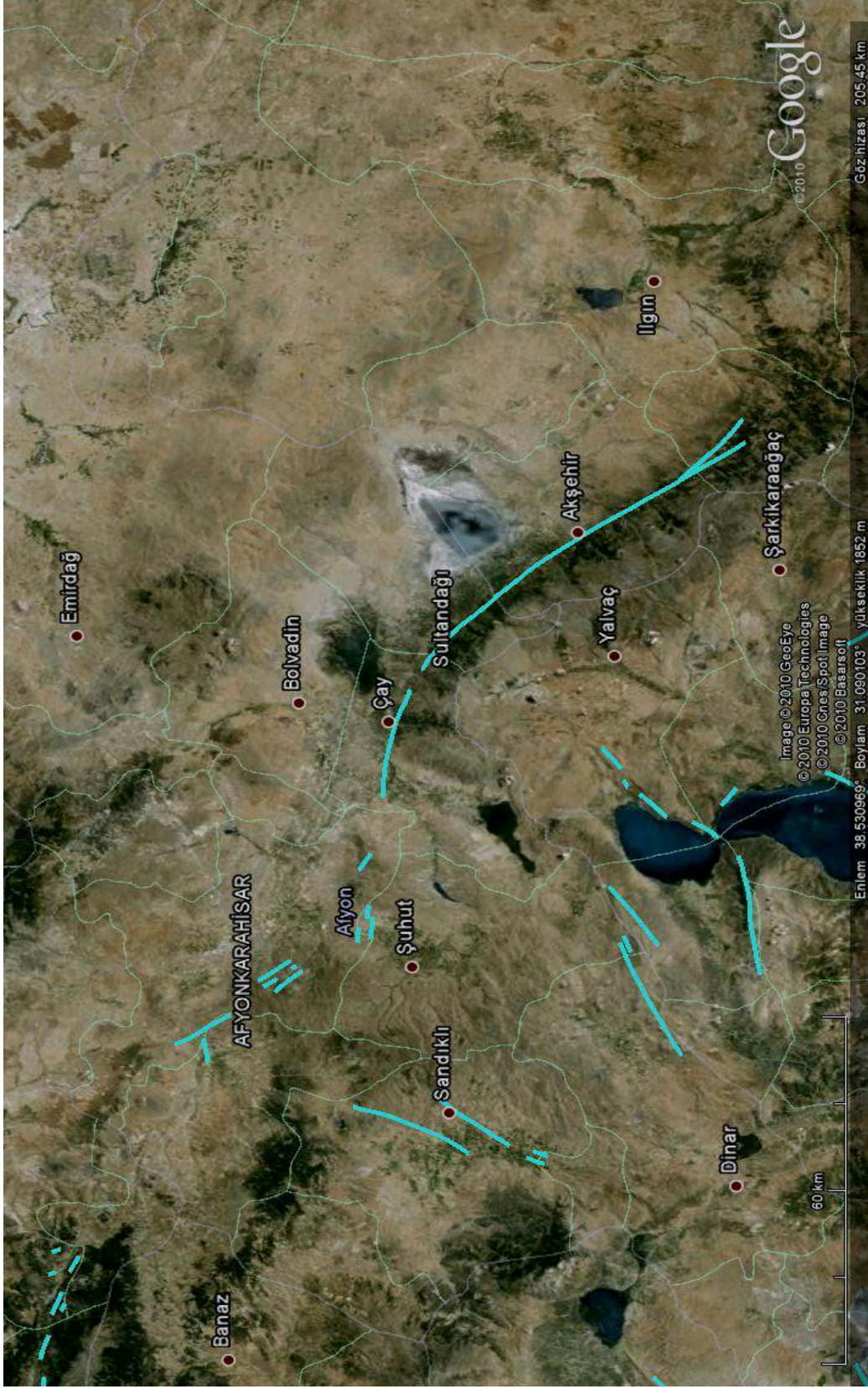
Çalışmada, Şekil 3.13'te gösterilen ve açıklamaları Çizelge 3.1'de verilen 15 kaynak belirlenmiş ve 17 Ağustos 2009 ile 27 Eylül 2010 tarihleri arasında (54 hafta), iki haftalık periyotlarla 27 kez su örneği alınmış ve radon konsantrasyonu belirlenmiştir.

Çizelge 3.1 Su numunelerin alındığı kaynakların numaralandırılması

Numunelerin alındığı kaynaklara verilen numaralar	Kaynakların buldukları bölgeler
1	İl Özel İdare
2	Turkuaz Hayvan Çiftliği
3	Şeker Fabrikası
4	Heybeli Termal
5	Maltepe Köyü
6	Kadıköy
7	Çay Belediyesi Bahçesi-600 m
8	Çay Belediyesi Bahçesi-700 m
9	Çay-Ören
10	Çay-Ali Kaleli Mahallesi
11	Çay Belediyesi Beton Santrali
12	Çayırpınar Köyü
13	Yakasenek-Oğuz Mahallesi
14	Alara Meyva Bahçesi
15	Sultandağı-Kirazlı Bahçe



Şekil 3.11. Uydu görüntüsü üzerinde Türkiye'deki önemli fayların görünümü



Şekil 3.12. Uydu görüntüsü üzerinde Afyonkarahisar ve çevresindeki önemli fay hatları



Şekil 3.13. İncelenen su kaynaklarının Akşehir fay hattına göre konumu

Sulardaki radon konsantrasyonları belirlenecek olan kaynaklar, aktif faylar üzerinde veya yakınında, derin su kaynağı bulunabilecek noktalar kapsamında belirlenmiştir. Belirlenen noktaların GPS ile enlem ve boylam bilgileri ve rakım değerleri ölçülmüştür. Ayrıca su kaynaklarının pH, elektriksel iletkenlik ve sıcaklık bilgileri bir kez ölçülmüştür. On beş kaynağa ait enlem, boylam, derinlik, pH, elektriksel iletkenlik ve sıcaklık bilgileri Çizelge 3.2’de verilmektedir. Kaynaklara ait uydu görüntüleri ekler bölümünde verilmiştir.

Çizelge 3.2. Su numunelerin alındığı kaynakların; enlem, boylam, rakım, derinlik, pH, elektriksel iletkenlik ve sıcaklık bilgileri

Kuyuların enlem, boylam, rakım, derinlik, pH, elektriksel iletkenlik ve sıcaklık bilgileri							
Kaynaklar	Enlem	Boylam	Rakım (m)	Derinlik (m)	pH	Elektriksel İletkenlik (EC) μ S/cm	Su Sıcaklığı $^{\circ}$ C
1	38.7110 $^{\circ}$	30.6055 $^{\circ}$	1008	117	7,44	654	19,5
2	38.7141 $^{\circ}$	30.6258 $^{\circ}$	1008	100	6,65	1540	21
3	38.6759 $^{\circ}$	30.7372 $^{\circ}$	1000	45	7,11	1074	14,9
4	38.6458 $^{\circ}$	30.8342 $^{\circ}$	1001	280	6,91	3,77	43
5	38.6070 $^{\circ}$	30.9098 $^{\circ}$	1005	---	7,33	1032	20
6	38.6373 $^{\circ}$	30.9185 $^{\circ}$	988	50	7,9	2010	15,3
7	38.6402 $^{\circ}$	30.8687 $^{\circ}$	976	600	7,08	1534	27,1
8	38.6412 $^{\circ}$	30.8686 $^{\circ}$	982	700	7,55	2,26	20
9	38.6020 $^{\circ}$	30.9386 $^{\circ}$	998	85	8,7	342	16,8
10	38.5979 $^{\circ}$	30.9882 $^{\circ}$	988	120	8,23	424	15,3
11	38.5971	31.0415 $^{\circ}$	1023	160	8,15	704	12
12	38.5900 $^{\circ}$	31.0951 $^{\circ}$	996	100	7,65	722	16,2
13	38.6093 $^{\circ}$	31.1623 $^{\circ}$	983	80	8,3	357	14
14	38.5799 $^{\circ}$	31.2251 $^{\circ}$	991	200	8,1	422	15,3
15	38.5012 $^{\circ}$	31.2680 $^{\circ}$	1015	10	7,95	500	18,8

3.3. Numune Alımı

Kaynaklardan numune alımı için Interlab firmasından temin edilen ISOLAB marka Boro 3.3 model 250 ml’lik cam şişeler kullanılmıştır (Şekil 3.14). Bu cam şişeler, kapak kısmında dışarıya gaz çıkışını engelleyen aparatı bulunan

sızdırmaz kapaklı cam şişelerdir. Her bir kaynaktan örnek alınımına geçmeden önce su, temiz su elde edilinceye kadar yaklaşık 5 dk. akıtılmıştır. Temiz su elde edildikten sonra şişeler ağzına kadar boşluk kalmayacak şekilde doldurulmuş ve radon gazı kaçışını önlemek için şişelerin kapağı su akışı altında sıkıca kapatılmıştır. Kaynaklardan alınan su örnekleri sayımları yapılmak üzere, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fizik Bölümü Nükleer Fizik Araştırma Laboratuvarı'na getirilmiştir. Burada numuneler, AlphaGUARD PQ2000 PRO radon detektör sisteminde analiz edilmiştir. Su numuneleri 54 hafta boyunca, aynı metotla toplanmış ve incelemeye tabi tutulmuştur. AlphaGUARD PQ2000 PRO radon detektör sistemi ile alınan verilerin ilgili formüllerde hesaplamaları gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.14. Sayım şişesi (250 ml'lik cam şişe)

3.4. AlphaGUARD PQ 2000PRO Radon Detektörü ve AquaKIT ile Sudaki Radon-222'i Hesaplama Metodu

Kaynaklardan alınarak laboratuara getirilen su örnekleri, AlphaGUARD PQ 2000Pro radon detektöründe sayım işlemine alınmıştır. Her bir kaynaktan alınarak laboratuara getirilen 250 ml'lik su örneklerinden 100 ml şırıngaya alınmış ve AquaKIT aparatının ölçüm prosedüründe deneyler gerçekleştirilmiştir. AlphaGUARD cihazının ölçüm sonuçları DataEXPERT yazılımı ile bilgisayara

aktarılmıştır. Program yardımıyla kaynağın sudaki ^{222}Rn konsantrasyonu görüntülenmiştir. Alınan ham ölçümler cihazın AquaKIT ekipmanında yer alan aşağıdaki formülde yerine konularak hesaplamalar yapılmıştır:

$$c_{su} = \frac{c_{hava} \times \left(\frac{V_{Sistem} - V_{örnek}}{V_{örnek}} + k \right) - c_0}{1000} \quad (3.1)$$

C_{su} : Su örneğindeki radon konsantrasyonu [Bq/L],

C_{hava} : AquaKIT ekipmanları ile ölçümden sonra elde edilen ve DataEXPERT yazılımında görüntülenen radon konsantrasyonu [Bq/m^3],

c_0 : Numunelendirmeden önceki radon konsantrasyonu [$c_0 = 0 \text{ Bq}/\text{m}^3$],

V_{sistem} : AlphaPUMP'ın kullandığı hacim [$V_{sistem} = 1102 \text{ ml}$],

$V_{örnek}$: Su örneğinin hacmi [$V_{örnek} = 100 \text{ ml}$],

k : Radon dağılım katsayısı [$k = 0,26$].

Denklem (3.1) sonuç olarak aşağıdaki formüle indirgenebilir:

$$c_{su} [\text{Bq} / \text{L}] = \frac{c_{hava} [\text{Bq} / \text{m}^3] \times 10,28}{1000} \quad (3.2)$$

3.5. Standart Hata

Hesaplanan ortalama değerlerin standart hata hesabını bulmak amacıyla standart sapma hesaplamaları (3.3) kullanılarak yapılmıştır:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_i^N (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}} \quad (3.3)$$

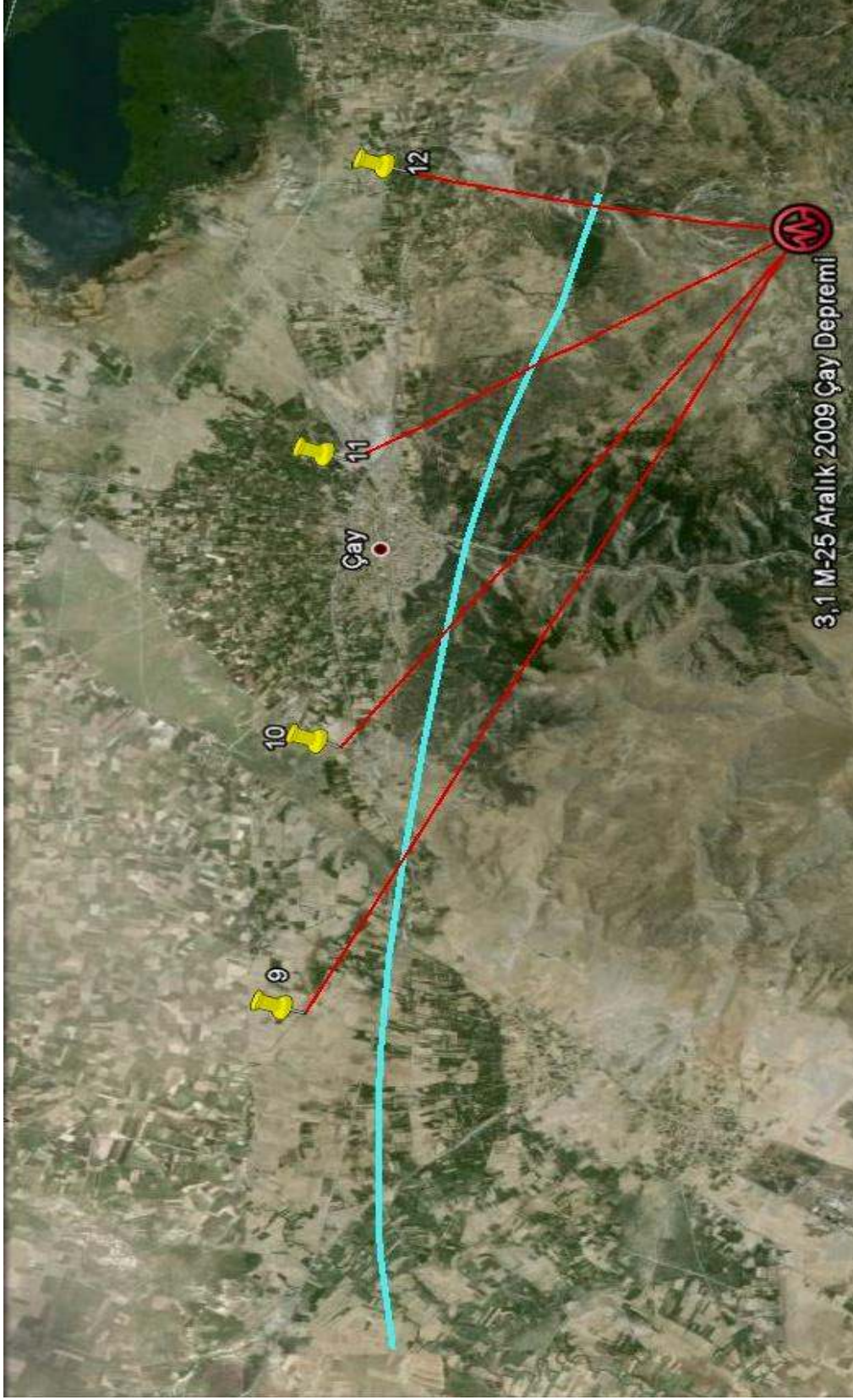
Standart sapma hesaplandıktan sonra, ortalama değerlerin standart hata hesabı,

$$S.H = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad (3.4)$$

denklemleri kullanılarak yapılmıştır.

3.6. Kaynakların Deprem Merkezine Olan Uzaklıklarının Hesaplanması

Deneysel bulguların yorumlanması iki madde halinde yapılmıştır. Bu maddelerden ikincisi olan, kaynaktaki yüzde radon değişiminin depremin merkezine olan uzaklığına göre grafiklerinin çizilerek yorumlanabilmesi için, her bir kaynağın deprem merkezine olan uzaklıklarının bulunması gerekmektedir. Bunun için çalışma periyodu olan 17 Ağustos 2009 ve 27 Eylül 2010 tarihleri aralığında meydana gelen deprem kayıtları, Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü'nden elde edilmiştir. Deprem kayıtları incelendiğinde, Afyonkarahisar iline ait birçok deprem meydana gelmiş olup, çalışma bölgesine yakın olan depremler alınmış ve bazı ilçelere ait depremler elenmiştir. Bu eleme sonucunda çalışma bölgesine ait 2,4 M ile 3,9 M aralığında değişen 61 deprem kaydı dikkate alınmıştır. Her bir deprem, enlem ve boylam bilgileri ile Google Earth programında işaretlenmiştir. Numunelerin alındığı 15 kaynağın konum bilgileri de GPS cihazı ile ölçülmüştür. Ölçülen bu enlem ve boylam bilgileri de Google Earth programında işaretlenmiştir. Hem su kaynaklarının hem de bölgede meydana gelen tüm depremlerin konumları program yardımıyla harita üzerinde belirlenmiştir. Böylece konumu belli olan iki nokta arasındaki uzaklıklar km olarak hesaplanmıştır. Kaynak ile deprem merkezi arasındaki uzaklığın bulunuşunun bir örneği Şekil 3.15'de gösterilmiştir. 61 deprem konumunun 15 kaynağa olan uzaklıkları harita üzerinde tek tek bulunmuş, programdaki cetvel yardımıyla uzaklıklar km olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.15. Kaynak konumunun deprem merkezine olan uzaklığının bulunuşu örneği

4. DENEYSEL BULGULAR

AlphaGUARD PQ 2000PRO radon detektörü ve AquaKIT ile ölçülen su numunelerinin sayım oranı (C) değerleri DataEXPERT yazılım programında görüntülenmiştir. Programdan elde edilen değerler (3.2) bağıntısı kullanılarak sudaki radon konsantrasyonları Bq/L cinsinden hesaplanmıştır. Elde edilen radon konsantrasyonları numunelerin alındığı tarihlere göre her bir kaynak için ayrı ayrı Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.15 aralığında verilmiştir. Standart hata hesaplamalarının yapılabilmesi için, öncelikle standart sapma hesaplamaları (3.3) bağıntısı kullanılarak yapılmıştır ve sonra standart hatalar (3.4) kullanılarak bulunmuştur. Verilerin değerlendirilmesi, iki alt bölümde yapılmıştır. Bunlardan ilki radon konsantrasyonu seviyelerinin numunelerin alındığı tarihlere göre değişimlerinin incelenmesidir. Bu değişimlere ait grafikler Şekil 4.1 ve Şekil 4.15 aralığında verilmiştir.

İkinci bölümde ise kaynakların deprem merkezine olan radyal uzaklığına karşılık radon değişim yüzdesi grafikleri çizdirilmiştir. Bu grafiklerin çizdirilebilmesi için her bir kaynağın, ard arda gelen numune alım tarihleri aralığında radon değişim yüzdesi hesaplanmıştır. Her bir kaynağın enlem ve boylam bilgileri GPS cihazı ile ölçülmüştür ve Google Earth programı kullanılarak harita üzerinde işaretlenmiştir (Şekil 3.13). Çalışma periyodu boyunca bölgede meydana gelen deprem kayıtları, Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü'nden düzenli olarak temin edilmiştir. Bu kayıtlarda yer alan depremlere ait enlem ve boylam bilgileri, Afyon Kocatepe Üniversitesi Harita Mühendisliği'nden alınan, Türkiye'ye ait fay bilgilerini içeren eklentinin Google Earth programında çalıştırılması ile harita üzerinde konumlandırılmıştır. Enlem ve boylam bilgileri ile harita üzerinde yeri işaretlenen depremler kodlandırılmıştır. Konumu belli olan kaynaklar ile meydana gelen depremlerin koordinatları kullanılarak, harita üzerinde her bir kaynağın deprem merkez üssüne olan uzaklığı km olarak hesaplanmıştır. Kaynakların deprem merkezine olan uzaklıklarına karşılık radon değişim yüzdesi grafikleri çizdirilmiştir. Elde edilen deneysel bulgulardan, her bir kaynağın inceleme

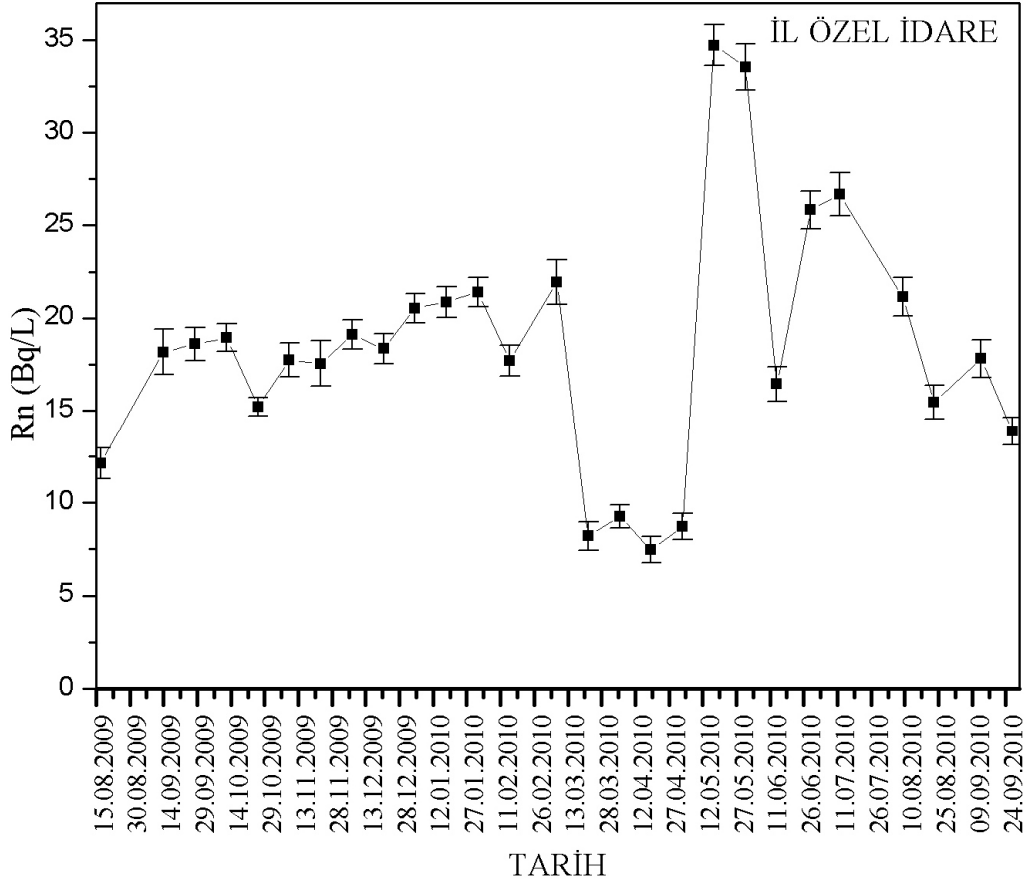
periyodu içindeki ortalama radon konsantrasyonu ve standart hataları hesaplanarak sonuçlar Çizelge 4.16 ve Çizelge 4.34’de verilmiştir.

4.1. Kaynakların 17 Ağustos 2009–27 Eylül 2010 Tarihleri Arasındaki Radon Seviyesi Değişimlerinin İncelenmesi

1 nolu kaynağa ait çalışma döneminde elde edilen radon konsantrasyonu ve standart hata değerleri, ölçüm tarihlerine göre Çizelge 4.1’de verilmiş ve bu değerler kullanılarak elde edilen grafik Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Çalışma döneminde ilgili kaynağın radon konsantrasyonu değerleri 7,47 ile 34,73 Bq/L arasında elde edilmiştir.

Çizelge 4.1. 1 nolu kaynağın 17 Ağustos 2009 – 27 Eylül 2010 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi

Numune Alım Tarihi	Radon Konsantrasyonu (Bq/L)	Standart Hata (Bq/L)
17.08.2009	12,13	0,83
14.09.2009	18,17	1,23
28.09.2009	18,60	0,89
12.10.2009	18,93	0,75
26.10.2009	15,20	0,49
09.11.2009	17,73	0,91
23.11.2009	17,55	1,23
07.12.2009	19,12	0,80
21.12.2009	18,35	0,80
04.01.2010	20,54	0,79
18.01.2010	20,86	0,82
01.02.2010	21,40	0,79
15.02.2010	17,70	0,82
08.03.2010	21,93	1,21
22.03.2010	8,21	0,78
05.04.2010	9,27	0,63
19.04.2010	7,47	0,71
03.05.2010	8,73	0,70
17.05.2010	34,73	1,11
31.05.2010	33,54	1,26
14.06.2010	16,43	0,93
29.06.2010	25,83	1,01
12.07.2010	26,67	1,16
09.08.2010	21,15	1,05
23.08.2010	15,45	0,93
13.09.2010	17,81	1,01
27.09.2010	13,87	0,74

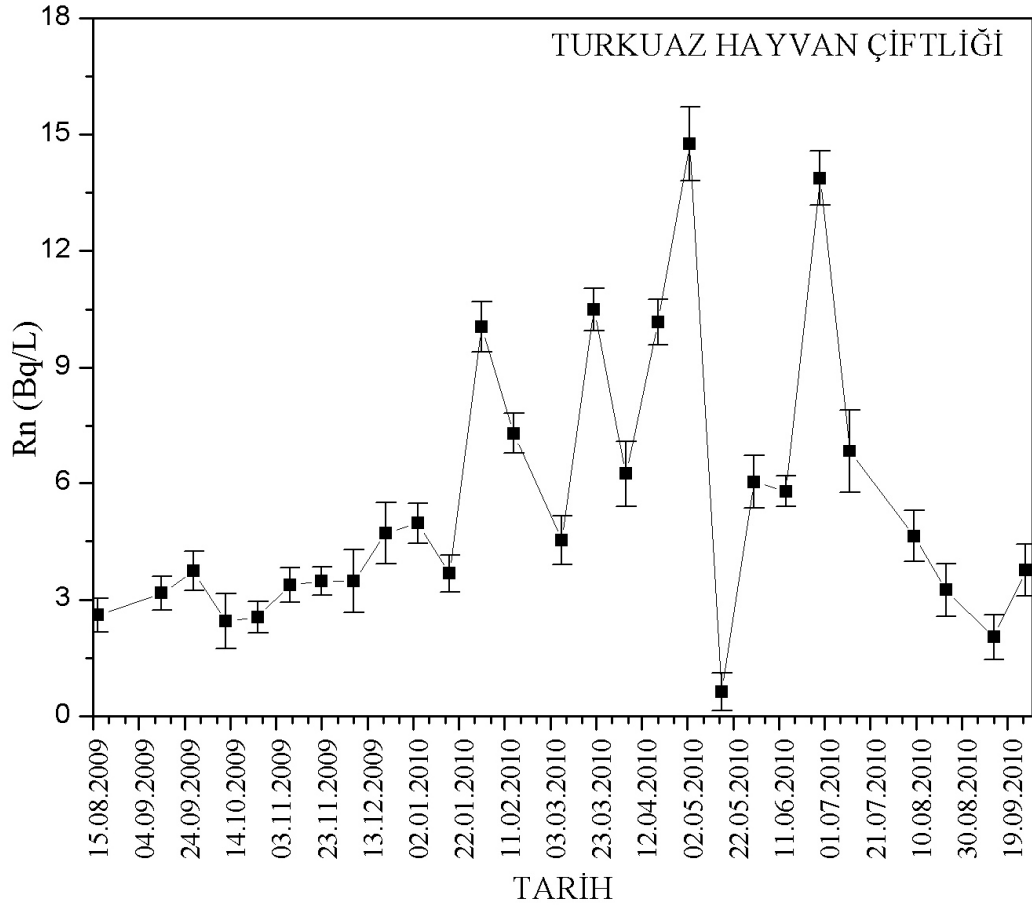


Şekil 4.1. 1 nolu kaynağın 17 Ağustos 2009 – 27 Eylül 2010 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi

Araştırma döneminde 2 nolu kaynağa ait elde edilen radon konsantrasyonu ve standart hata değerleri ölçüm tarihlerine göre Çizelge 4.2’de verilmiştir. Şekil 4.2’de bu değerler kullanılarak elde edilen grafik gösterilmiştir. Araştırma döneminde ilgili kaynağın radon konsantrasyonu değerleri 0,63 ile 14,76 Bq/L arasında elde edilmiştir.

Çizelge 4.2. 2 nolu kaynağın 17 Ağustos 2009 – 27 Eylül 2010 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi

Numune Alım Tarihi	Ortalama Radon Konsantrasyonu (Bq/L)	Standart Hata (Bq/L)
17.08.2009	2,60	0,44
14.09.2009	3,16	0,43
28.09.2009	3,73	0,50
12.10.2009	2,44	0,71
26.10.2009	2,55	0,40
09.11.2009	3,37	0,44
23.11.2009	3,48	0,36
07.12.2009	3,48	0,81
21.12.2009	4,70	0,79
04.01.2010	4,96	0,51
18.01.2010	3,67	0,47
01.02.2010	10,04	0,65
15.02.2010	7,30	0,53
08.03.2010	4,52	0,63
22.03.2010	10,49	0,54
05.04.2010	6,25	0,84
19.04.2010	10,18	0,59
03.05.2010	14,76	0,96
17.05.2010	0,63	0,48
31.05.2010	6,03	0,68
14.06.2010	5,79	0,39
29.06.2010	13,87	0,70
12.07.2010	6,82	1,07
09.08.2010	4,64	0,66
23.08.2010	3,24	0,67
13.09.2010	2,04	0,58
27.09.2010	3,76	0,67

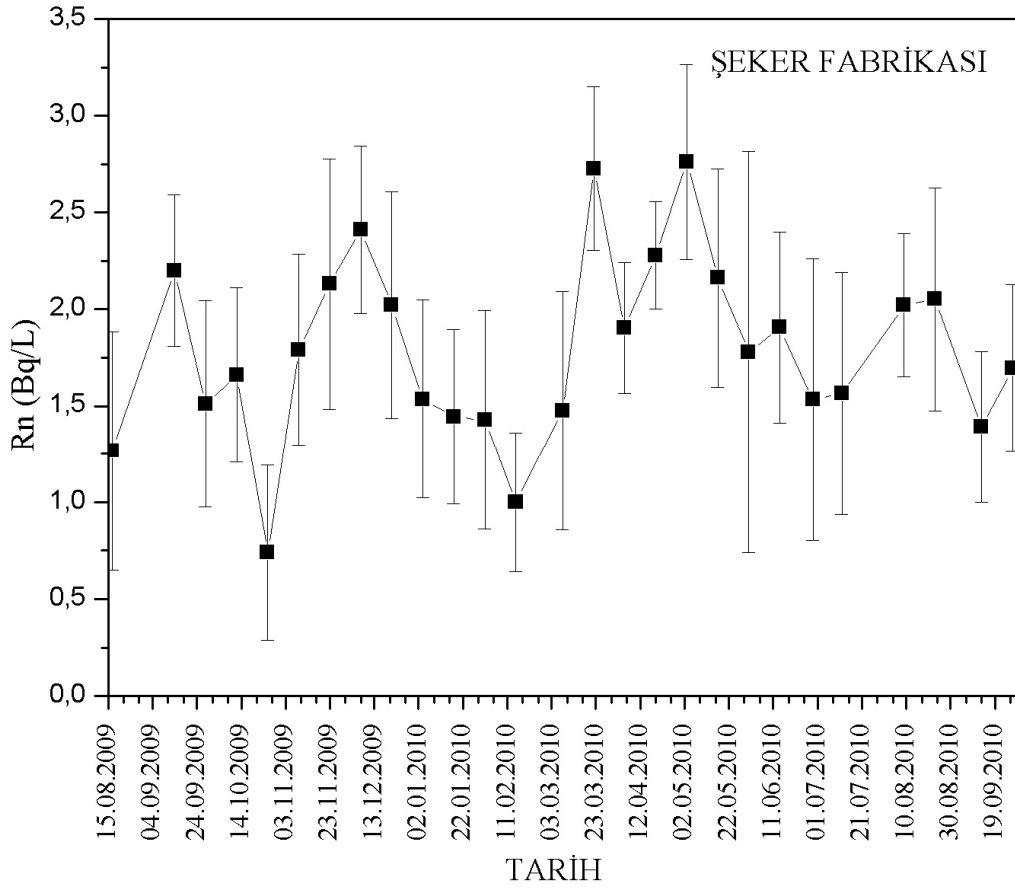


Şekil 4.2. 2 nolu kaynağın 17 Ağustos 2009 – 27 Eylül 2010 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi

3 nolu kaynağa ait, çalışma döneminde elde edilen radon konsantrasyonu ve standart hata değerleri ölçüm tarihlerine göre Çizelge 4.3’de verilmiştir. 3 nolu kaynağın çalışma döneminde elde edilen radon konsantrasyonu değerleri 0,74 ile 2,76 Bq/L arasındadır. Ölçüm tarihlerine göre radon konsantrasyonu değerleri kullanılarak elde edilen grafik Şekil 4.3’de gösterilmiştir. Şekil 4.3’teki hata çubuklarının büyük olmasının nedeni ilgili kaynakta ölçülen radon konsantrasyon değerlerinin çok düşük olmasıdır.

Çizelge 4.3. 3 nolu kaynağın 17 Ağustos 2009 – 27 Eylül 2010 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi

Numune Alım Tarihi	Ortalama Radon Konsantrasyonu (Bq/L)	Standart Hata (Bq/L)
17.08.2009	1,27	0,62
14.09.2009	2,20	0,39
28.09.2009	1,51	0,53
12.10.2009	1,66	0,45
26.10.2009	0,74	0,45
09.11.2009	1,79	0,49
23.11.2009	2,13	0,65
07.12.2009	2,41	0,43
21.12.2009	2,02	0,59
04.01.2010	1,54	0,51
18.01.2010	1,44	0,45
01.02.2010	1,43	0,57
15.02.2010	1,00	0,36
08.03.2010	1,48	0,62
22.03.2010	2,73	0,42
05.04.2010	1,90	0,34
19.04.2010	2,28	0,28
03.05.2010	2,76	0,50
17.05.2010	2,16	0,57
31.05.2010	1,78	1,04
14.06.2010	1,91	0,49
29.06.2010	1,53	0,73
12.07.2010	1,56	0,63
09.08.2010	2,02	0,37
23.08.2010	2,05	0,58
13.09.2010	1,39	0,39
27.09.2010	1,69	0,43

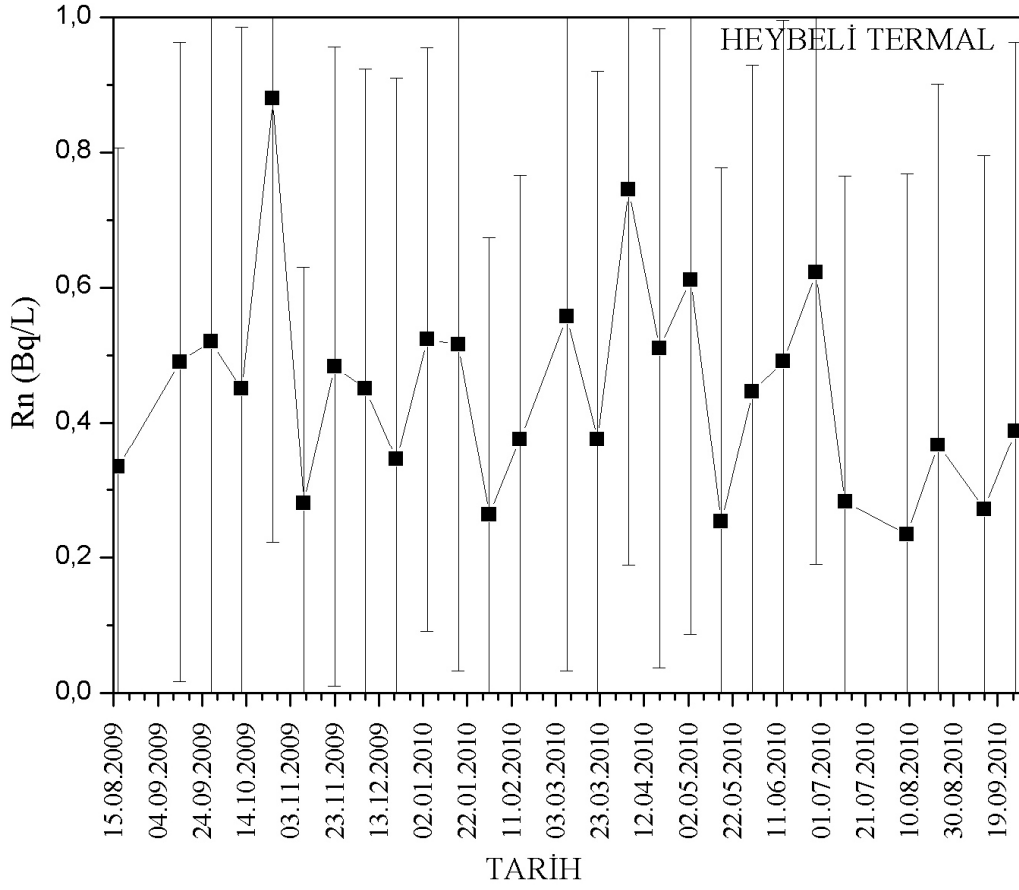


Şekil 4.3. 3 nolu kaynağın 17 Ağustos 2009 – 27 Eylül 2010 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi

Araştırma döneminde 4 nolu kaynağa ait elde edilen radon konsantrasyonu ve standart hata değerleri, ölçüm tarihlerine göre Çizelge 4.4’de verilmiştir. Bu değerler kullanılarak elde edilen grafik Şekil 4.4’de gösterilmiştir. 4 nolu kaynağın araştırma dönemindeki radon konsantrasyonu değerleri 0,23 ile 0,88 Bq/L arasında elde edilmiştir. Şekil 4.4’teki hata çubuklarının büyük olmasının nedeni ilgili kaynakta ölçülen radon konsantrasyon değerlerinin çok düşük olmasıdır.

Çizelge 4.4. 4 nolu kaynağın 17 Ağustos 2009 – 27 Eylül 2010 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi

Numune Alım Tarihi	Ortalama Radon Konsantrasyonu (Bq/L)	Standart Hata (Bq/L)
17.08.2009	0,33	0,47
14.09.2009	0,49	0,47
28.09.2009	0,52	0,58
12.10.2009	0,45	0,53
26.10.2009	0,88	0,66
09.11.2009	0,28	0,35
23.11.2009	0,48	0,47
07.12.2009	0,45	0,47
21.12.2009	0,34	0,57
04.01.2010	0,52	0,43
18.01.2010	0,52	0,48
01.02.2010	0,26	0,41
15.02.2010	0,38	0,39
08.03.2010	0,56	0,52
22.03.2010	0,37	0,54
05.04.2010	0,74	0,56
19.04.2010	0,51	0,47
03.05.2010	0,61	0,52
17.05.2010	0,25	0,52
31.05.2010	0,45	0,48
14.06.2010	0,49	0,50
29.06.2010	0,62	0,43
12.07.2010	0,28	0,48
09.08.2010	0,23	0,53
23.08.2010	0,37	0,53
13.09.2010	0,27	0,52
27.09.2010	0,39	0,58

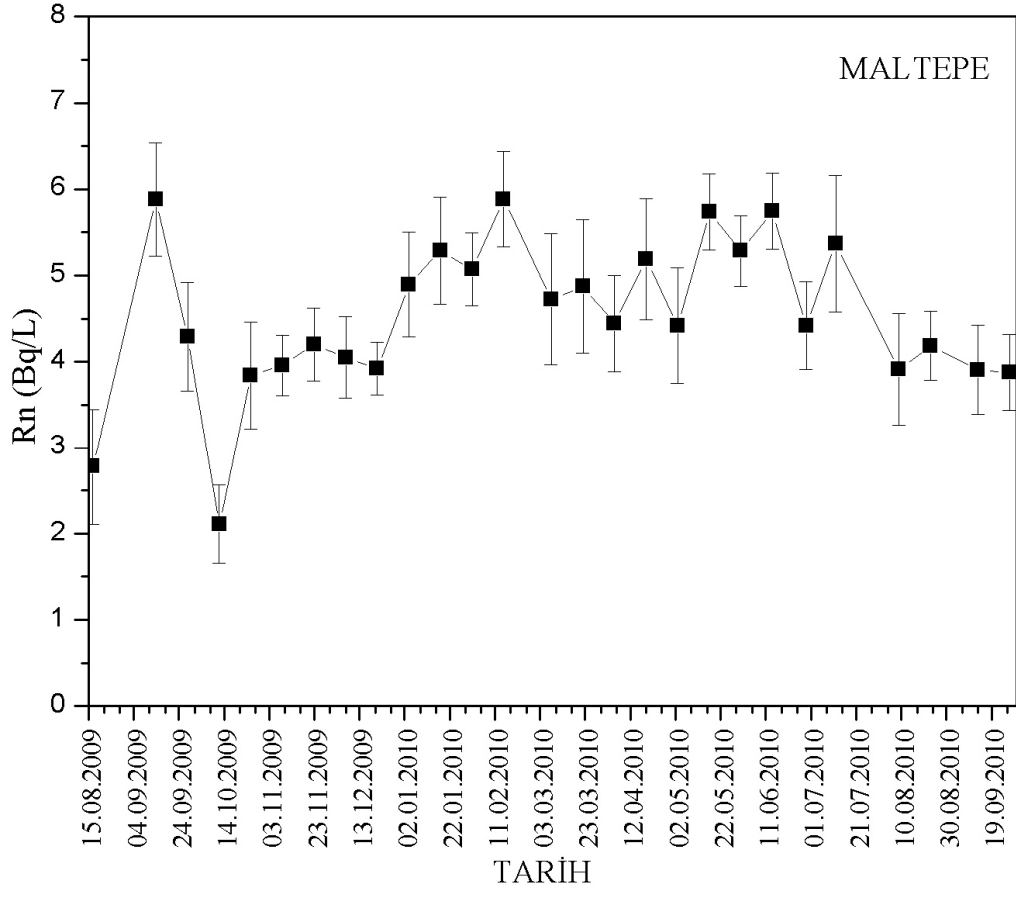


Şekil 4.4. 4 nolu kaynağın 17 Ağustos 2009 – 27 Eylül 2010 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi

5 nolu kaynağa ait, çalışma döneminde elde edilen radon konsantrasyonu ve standart hata değerleri, ölçüm tarihlerine göre Çizelge 4.5’de verilmiş ve bu değerler kullanılarak elde edilen grafik Şekil 4.5’de gösterilmiştir. İlgili kaynağın çalışma dönemine ait radon konsantrasyonu değerleri 2,11 ile 5,88 Bq/L arasında elde edilmiştir.

Çizelge 4.5. 5 nolu kaynağın 17 Ağustos 2009 – 27 Eylül 2010 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi

Numune Alım Tarihi	Ortalama Radon Konsantrasyonu (Bq/L)	Standart Hata (Bq/L)
17.08.2009	2,78	0,67
14.09.2009	5,88	0,66
28.09.2009	4,29	0,63
12.10.2009	2,11	0,45
26.10.2009	3,84	0,62
09.11.2009	3,96	0,35
23.11.2009	4,20	0,42
07.12.2009	4,05	0,47
21.12.2009	3,92	0,31
04.01.2010	4,90	0,61
18.01.2010	5,29	0,62
01.02.2010	5,07	0,42
15.02.2010	5,88	0,56
08.03.2010	4,72	0,76
22.03.2010	4,87	0,77
05.04.2010	4,44	0,56
19.04.2010	5,19	0,70
03.05.2010	4,42	0,67
17.05.2010	5,73	0,44
31.05.2010	5,28	0,41
14.06.2010	5,75	0,44
29.06.2010	4,42	0,50
12.07.2010	5,37	0,79
09.08.2010	3,92	0,65
23.08.2010	4,19	0,40
13.09.2010	3,91	0,51
27.09.2010	3,88	0,44

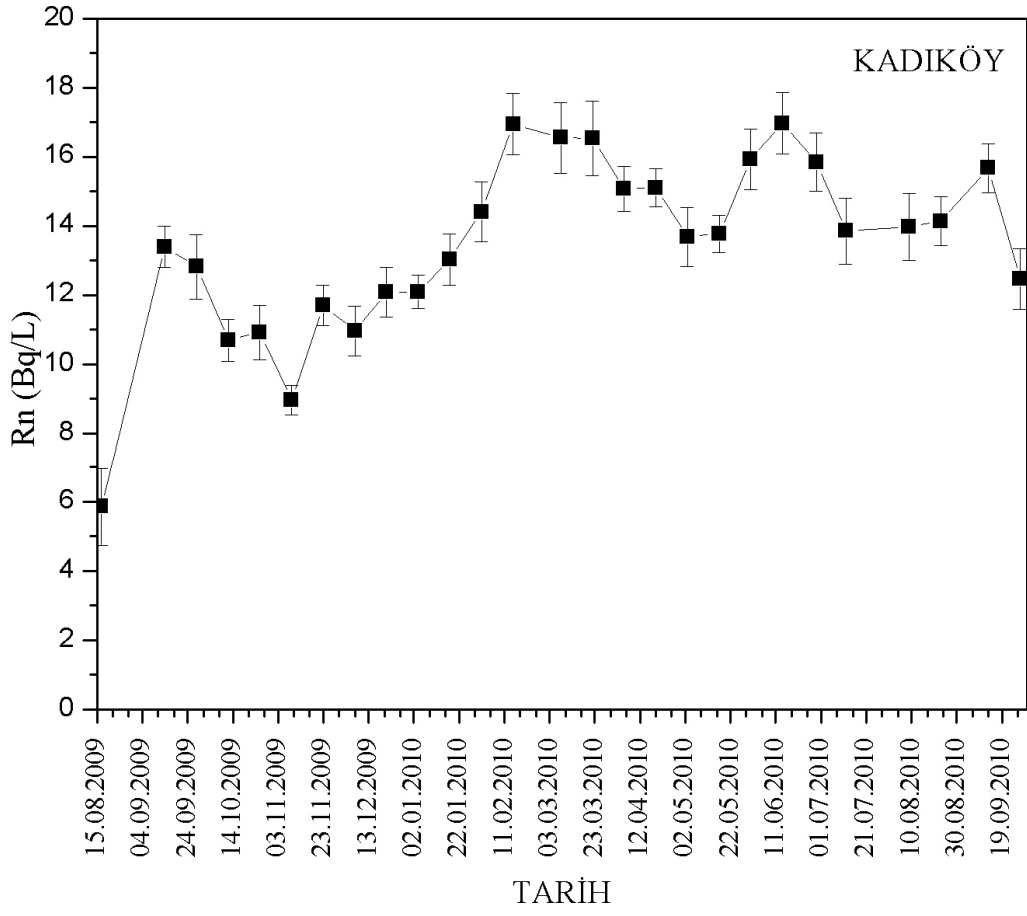


Şekil 4.5. 5 nolu kaynağın 17 Ağustos 2009 – 27 Eylül 2010 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi

Araştırma döneminde 6 nolu kaynağa ait radon konsantrasyonu ve standart hata değerleri Çizelge 4.6’da ölçüm tarihlerine göre verilmiştir. Kaynağa ait radon konsantrasyonu değerlerinin ölçüm tarihlerine göre değişimini veren grafik Şekil 4.6’da gösterilmiştir. İlgili kaynağın radon konsantrasyonu değerleri 5,85 ile 16,97 Bq/L arasında elde edilmiştir.

Çizelge 4.6. 6 nolu kaynağın 17 Ağustos 2009 – 27 Eylül 2010 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi

Numune Alım Tarihi	Ortalama Radon Konsantrasyonu (Bq/L)	Standart Hata (Bq/L)
17.08.2009	5,85	1,11
14.09.2009	13,39	0,60
28.09.2009	12,82	0,94
12.10.2009	10,70	0,61
26.10.2009	10,92	0,78
09.11.2009	8,96	0,43
23.11.2009	11,70	0,58
07.12.2009	10,97	0,72
21.12.2009	12,09	0,72
04.01.2010	12,09	0,48
18.01.2010	13,02	0,74
01.02.2010	14,41	0,87
15.02.2010	16,94	0,88
08.03.2010	16,55	1,02
22.03.2010	16,53	1,08
05.04.2010	15,08	0,65
19.04.2010	15,10	0,56
03.05.2010	13,68	0,85
17.05.2010	13,77	0,53
31.05.2010	15,93	0,88
14.06.2010	16,97	0,89
29.06.2010	15,84	0,84
12.07.2010	13,86	0,96
09.08.2010	13,97	0,96
23.08.2010	14,13	0,71
13.09.2010	15,67	0,71
27.09.2010	12,47	0,87

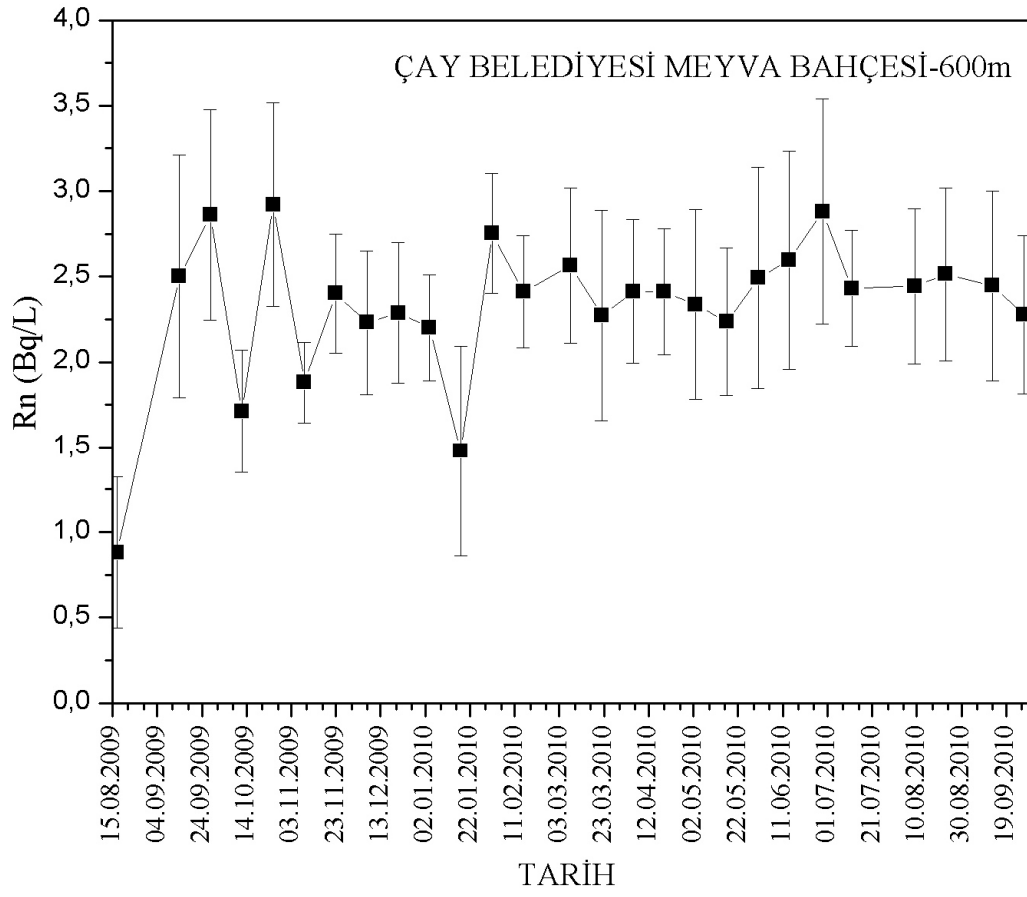


Şekil 4.6. 6 nolu kaynağın 17 Ağustos 2009 – 27 Eylül 2010 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi

7 nolu kaynağa ait elde edilen radon konsantrasyonu ve standart hata değerleri, ölçüm tarihlerine göre Çizelge 4.7’de verilmiştir. 7 nolu kaynağın radon konsantrasyonu değerleri 0,88 ile 2,92 Bq/L arasında elde edilmiştir. Çalışma dönemini kapsayan bu değerler kullanılarak elde edilen grafik Şekil 4.7’de gösterilmektedir. Şekil 4.7’teki hata çubuklarının büyük olmasının nedeni ilgili kaynakta ölçülen radon konsantrasyon değerlerinin çok düşük olmasıdır.

Çizelge 4.7. 7 nolu kaynağın 17 Ağustos 2009 – 27 Eylül 2010 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi

Numune Alın Tarihi	Ortalama Radon Konsantrasyonu (Bq/L)	Standart Hata (Bq/L)
17.08.2009	0,88	0,44
14.09.2009	2,50	0,71
28.09.2009	2,86	0,62
12.10.2009	1,71	0,36
26.10.2009	2,92	0,60
09.11.2009	1,88	0,24
23.11.2009	2,40	0,35
07.12.2009	2,23	0,42
21.12.2009	2,29	0,41
04.01.2010	2,20	0,31
18.01.2010	1,48	0,62
01.02.2010	2,75	0,35
15.02.2010	2,41	0,33
08.03.2010	2,56	0,45
22.03.2010	2,27	0,62
05.04.2010	2,41	0,42
19.04.2010	2,41	0,37
03.05.2010	2,34	0,56
17.05.2010	2,24	0,43
31.05.2010	2,49	0,65
14.06.2010	2,60	0,64
29.06.2010	2,88	0,66
12.07.2010	2,43	0,34
09.08.2010	2,44	0,45
23.08.2010	2,51	0,50
13.09.2010	2,45	0,56
27.09.2010	2,28	0,46

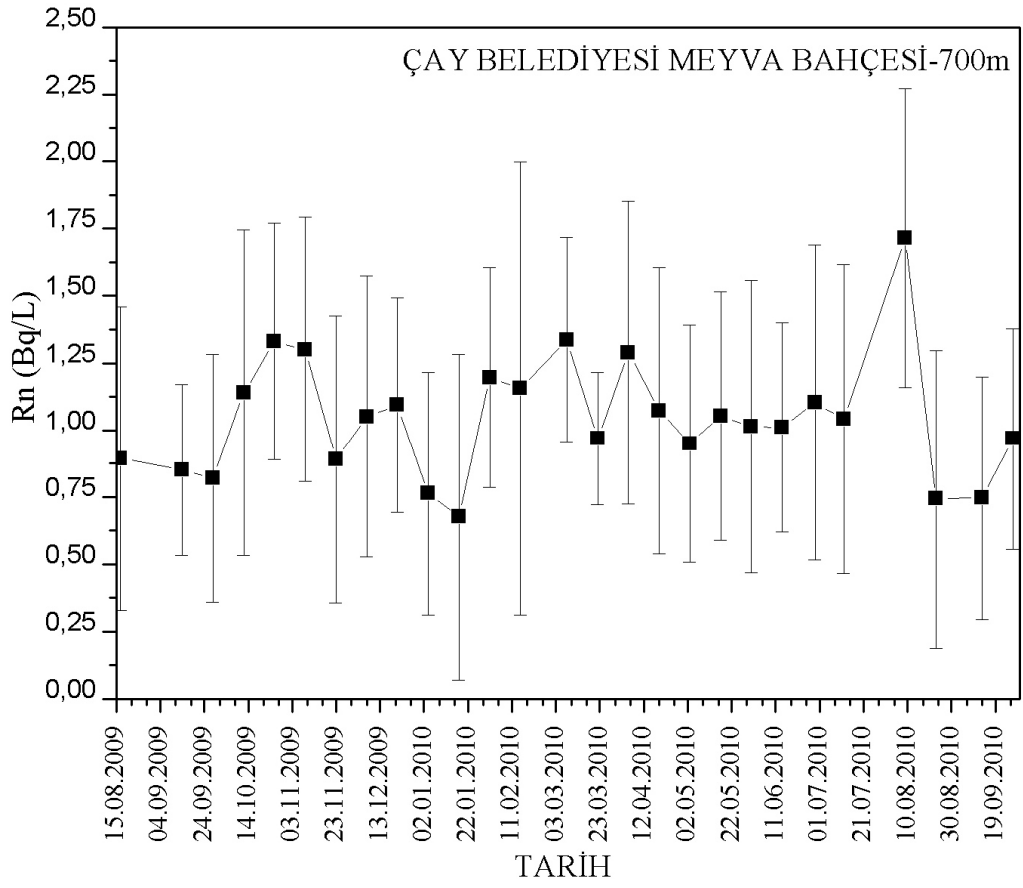


Şekil 4.7. 7 nolu kaynağın 17 Ağustos 2009 – 27 Eylül 2010 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi

Çalışma döneminde 8 nolu kaynağa ait elde edilen radon konsantrasyonu ve standart hata değerleri, ölçüm tarihlerine göre Çizelge 4.8’de verilmiştir. İlgili kaynağın radon konsantrasyonu değerleri 0,68 ile 1,71 Bq/L arasında elde edilmiştir. Ölçüm tarihlerine göre radon konsantrasyonu değerleri kullanılarak elde edilen grafik Şekil 4.8’de gösterilmiştir. Şekil 4.8’teki hata çubuklarının büyük olmasının nedeni ilgili kaynakta ölçülen radon konsantrasyon değerlerinin çok düşük olmasıdır.

Çizelge 4.8. 8 nolu kaynağın 17 Ağustos 2009 – 27 Eylül 2010 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi

Numune Alın Tarihi	Ortalama Radon Konsantrasyonu (Bq/L)	Standart Hata (Bq/L)
17.08.2009	0,89	0,57
14.09.2009	0,85	0,32
28.09.2009	0,82	0,46
12.10.2009	1,14	0,61
26.10.2009	1,33	0,44
09.11.2009	1,30	0,49
23.11.2009	0,89	0,53
07.12.2009	1,05	0,52
21.12.2009	1,09	0,40
04.01.2010	0,76	0,45
18.01.2010	0,68	0,61
01.02.2010	1,20	0,41
15.02.2010	1,15	0,84
08.03.2010	1,34	0,38
22.03.2010	0,97	0,25
05.04.2010	1,29	0,57
19.04.2010	1,07	0,53
03.05.2010	0,95	0,44
17.05.2010	1,05	0,46
31.05.2010	1,01	0,54
14.06.2010	1,01	0,39
29.06.2010	1,10	0,59
12.07.2010	1,04	0,58
09.08.2010	1,71	0,56
23.08.2010	0,74	0,56
13.09.2010	0,75	0,45
27.09.2010	0,97	0,41

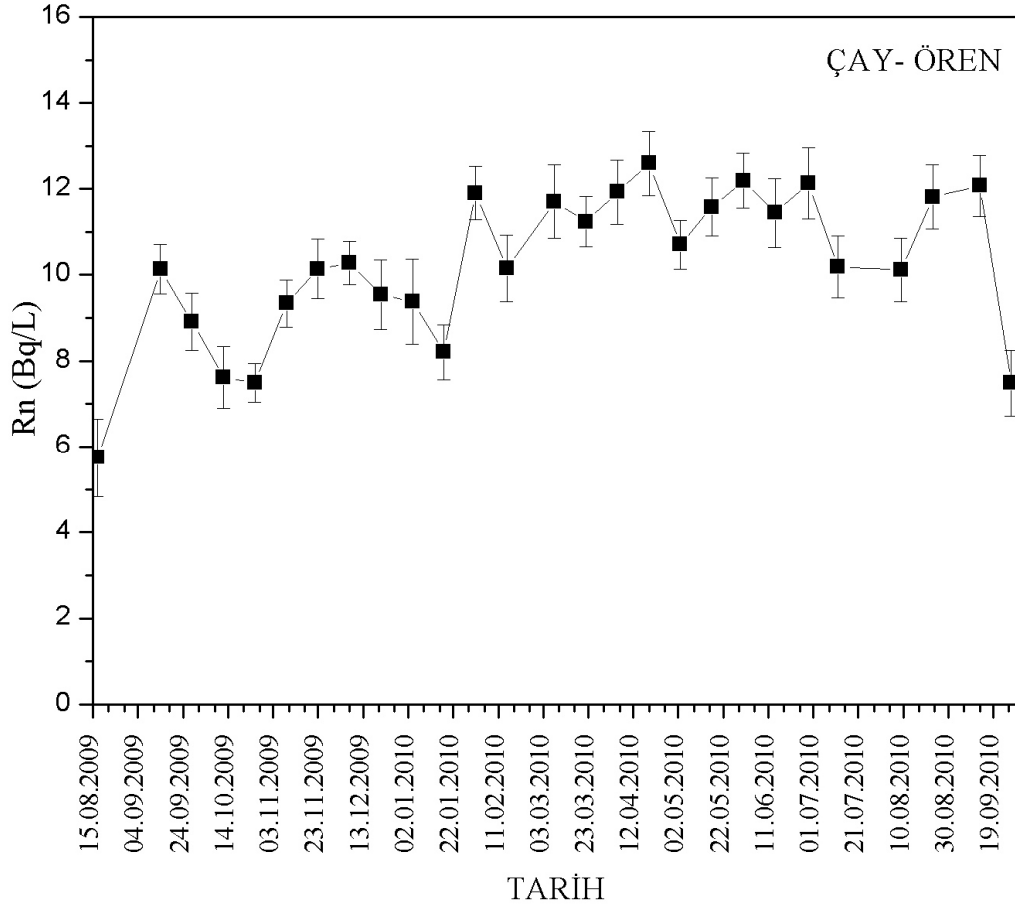


Şekil 4.8. 8 nolu kaynağın 17 Ağustos 2009 – 27 Eylül 2010 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi

9 nolu kaynağa ait, araştırma döneminde elde edilen radon konsantrasyonu ve standart hata değerleri ölçüm tarihlerine göre Çizelge 4.9'da verilmiş ve bu değerler kullanılarak elde edilen grafik Şekil 4.9'da gösterilmiştir. Araştırma döneminde 9 nolu kaynağın radon konsantrasyonu değerleri 5,74 ile 12,59 Bq/L arasında elde edilmiştir.

Çizelge 4.9. 9 nolu kaynağın 17 Ağustos 2009 – 27 Eylül 2010 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi

Numune Alın Tarihi	Ortalama Radon Konsantrasyonu (Bq/L)	Standart Hata (Bq/L)
17.08.2009	5,74	0,91
14.09.2009	10,13	0,58
28.09.2009	8,91	0,67
12.10.2009	7,62	0,72
26.10.2009	7,49	0,45
09.11.2009	9,34	0,54
23.11.2009	10,14	0,69
07.12.2009	10,28	0,50
21.12.2009	9,54	0,80
04.01.2010	9,38	0,99
18.01.2010	8,21	0,64
01.02.2010	11,90	0,62
15.02.2010	10,15	0,77
08.03.2010	11,71	0,85
22.03.2010	11,24	0,59
05.04.2010	11,92	0,74
19.04.2010	12,59	0,74
03.05.2010	10,70	0,57
17.05.2010	11,58	0,67
31.05.2010	12,19	0,64
14.06.2010	11,44	0,80
29.06.2010	12,13	0,83
12.07.2010	10,18	0,72
09.08.2010	10,12	0,74
23.08.2010	11,81	0,75
13.09.2010	12,07	0,71
27.09.2010	7,49	0,76

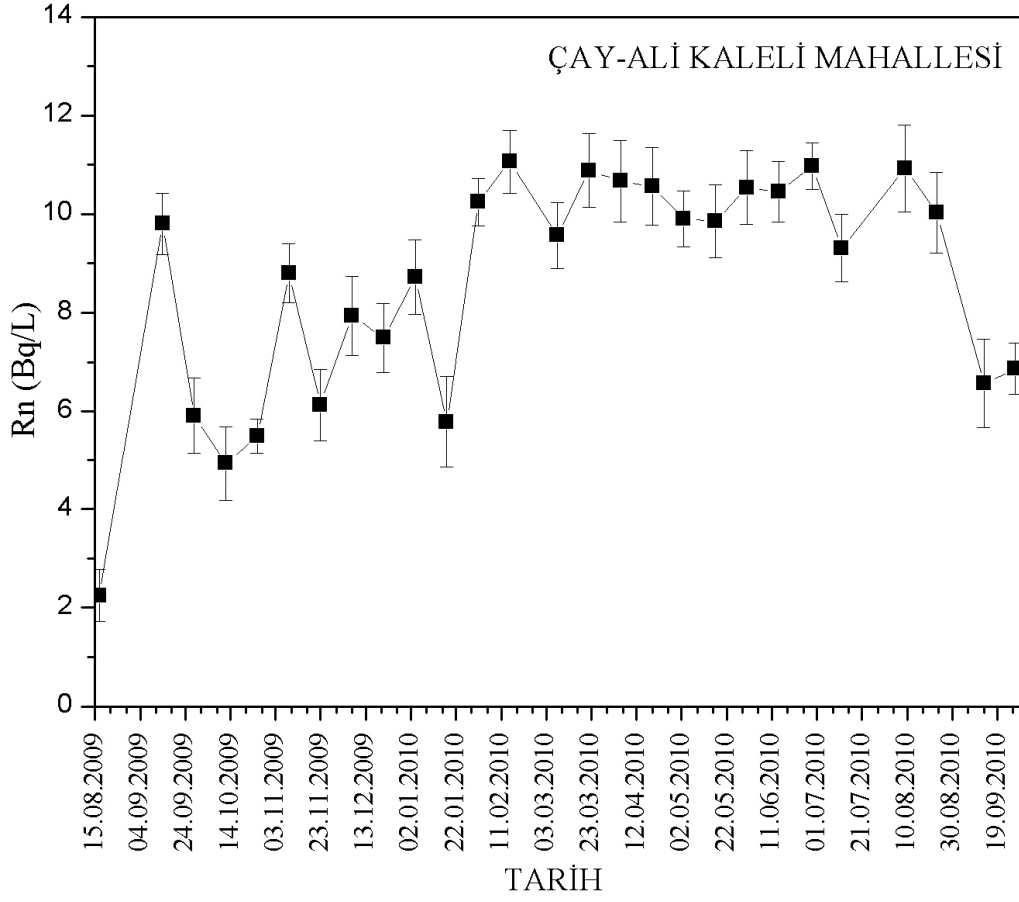


Şekil 4.9. 9 nolu kaynağın 17 Ağustos 2009 – 27 Eylül 2010 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi

Çalışma döneminde 10 nolu kaynağa ait elde edilen radon konsantrasyonu ve standart hata değerleri ölçüm tarihlerine göre Çizelge 4.10'da verilmiştir. Radon konsantrasyonu değerleri kullanılarak elde edilen grafik Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Ölçüm tarihlerinde ilgili kaynağın radon konsantrasyonu değerleri 2,25 ile 11,06 Bq/L arasında elde edilmiştir.

Çizelge 4.10. 10 nolu kaynağın 17 Ağustos 2009 – 27 Eylül 2010 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi

Numune Alın Tarihi	Ortalama Radon Konsantrasyonu (Bq/L)	Standart Hata (Bq/L)
17.08.2009	2,25	0,52
14.09.2009	9,80	0,63
28.09.2009	5,91	0,76
12.10.2009	4,93	0,75
26.10.2009	5,50	0,35
09.11.2009	8,80	0,60
23.11.2009	6,13	0,72
07.12.2009	7,94	0,80
21.12.2009	7,49	0,70
04.01.2010	8,72	0,75
18.01.2010	5,78	0,93
01.02.2010	10,24	0,48
15.02.2010	11,06	0,64
08.03.2010	9,57	0,67
22.03.2010	10,88	0,75
05.04.2010	10,67	0,82
19.04.2010	10,56	0,79
03.05.2010	9,90	0,57
17.05.2010	9,85	0,74
31.05.2010	10,54	0,75
14.06.2010	10,46	0,62
29.06.2010	10,97	0,47
12.07.2010	9,31	0,69
09.08.2010	10,93	0,88
23.08.2010	10,03	0,81
13.09.2010	6,56	0,89
27.09.2010	6,87	0,52

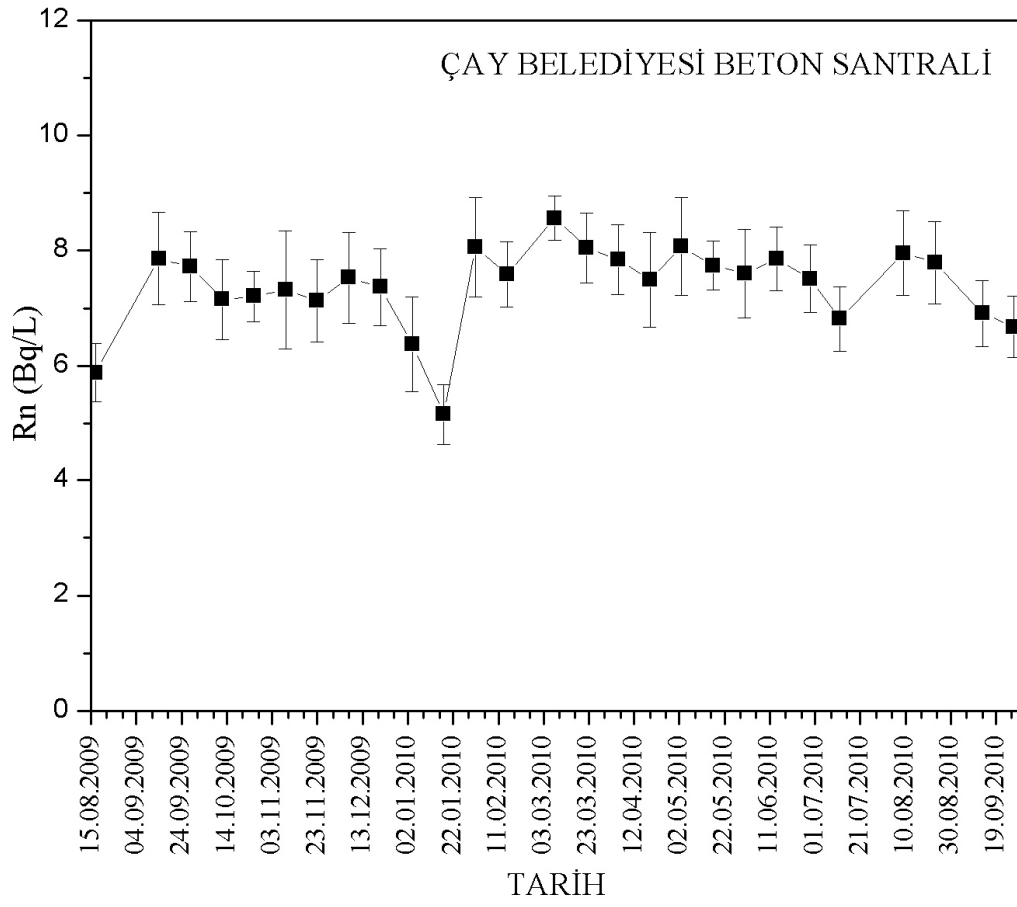


Şekil 4.10. 10 nolu kaynağın 17 Ağustos 2009 – 27 Eylül 2010 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi

11 nolu kaynak için elde edilen radon konsantrasyonu ve standart hata değerleri, ölçüm tarihlerine göre Çizelge 4.11’de verilmiş ve bu değerler kullanılarak elde edilen grafik Şekil 4.11’de gösterilmiştir. Araştırma döneminde ilgili kaynağın radon konsantrasyonu değerleri 5,15 ile 8,56 Bq/L arasında elde edilmiştir.

Çizelge 4.11. 11 nolu kaynağın 17 Ağustos 2009 – 27 Eylül 2010 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi

Numune Alım Tarihi	Ortalama Radon Konsantrasyonu (Bq/L)	Standart Hata (Bq/L)
17.08.2009	5,88	0,50
14.09.2009	7,86	0,80
28.09.2009	7,72	0,61
12.10.2009	7,15	0,69
26.10.2009	7,21	0,44
09.11.2009	7,32	1,03
23.11.2009	7,13	0,72
07.12.2009	7,53	0,79
21.12.2009	7,37	0,67
04.01.2010	6,38	0,82
18.01.2010	5,15	0,52
01.02.2010	8,06	0,86
15.02.2010	7,59	0,57
08.03.2010	8,56	0,38
22.03.2010	8,05	0,61
05.04.2010	7,84	0,61
19.04.2010	7,49	0,82
03.05.2010	8,07	0,85
17.05.2010	7,74	0,42
31.05.2010	7,60	0,77
14.06.2010	7,86	0,56
29.06.2010	7,51	0,59
12.07.2010	6,81	0,56
09.08.2010	7,96	0,74
23.08.2010	7,79	0,71
13.09.2010	6,91	0,58
27.09.2010	6,67	0,53

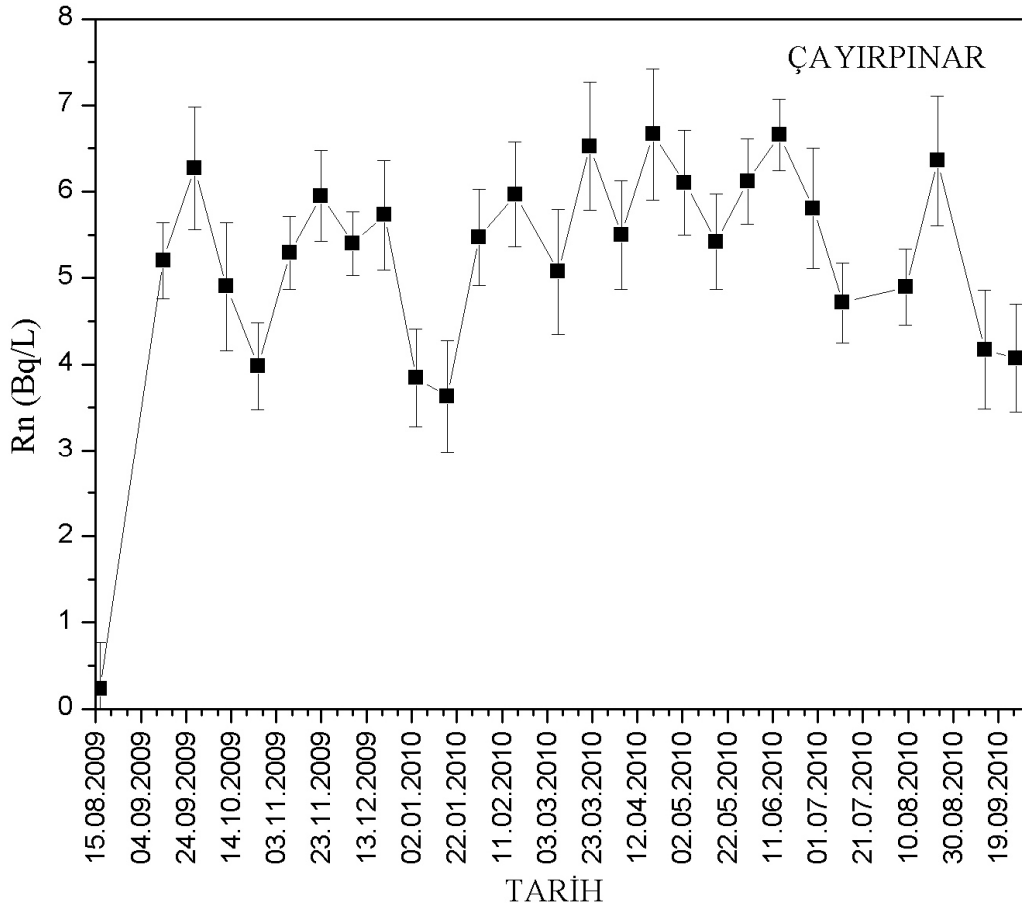


Şekil 4.11. 11 nolu kaynağın 17 Ağustos 2009 – 27 Eylül 2010 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi

Araştırma döneminde 12 nolu kaynağa ait elde edilen radon konsantrasyonu ve standart hata değerleri ölçüm tarihlerine göre Çizelge 4.12’de verilmiştir. Kaynağın ölçüm tarihlerine göre radon konsantrasyonu değerleri kullanılarak elde edilen grafik Şekil 4.12’de gösterilmiştir. Çalışma döneminde ilgili kaynağın radon konsantrasyonu değerleri 0,23 ile 6,66 Bq/L arasında elde edilmiştir.

Çizelge 4.12. 12 nolu kaynağın 17 Ağustos 2009 – 27 Eylül 2010 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi

Numune Alın Tarihi	Ortalama Radon Konsantrasyonu (Bq/L)	Standart Hata (Bq/L)
17.08.2009	0,23	0,54
14.09.2009	5,20	0,44
28.09.2009	6,27	0,71
12.10.2009	4,90	0,74
26.10.2009	3,98	0,50
09.11.2009	5,29	0,42
23.11.2009	5,95	0,52
07.12.2009	5,40	0,37
21.12.2009	5,73	0,64
04.01.2010	3,84	0,57
18.01.2010	3,63	0,65
01.02.2010	5,47	0,56
15.02.2010	5,97	0,61
08.03.2010	5,07	0,72
22.03.2010	6,53	0,74
05.04.2010	5,50	0,63
19.04.2010	6,66	0,76
03.05.2010	6,10	0,61
17.05.2010	5,42	0,56
31.05.2010	6,12	0,49
14.06.2010	6,66	0,41
29.06.2010	5,81	0,70
12.07.2010	4,71	0,46
09.08.2010	4,89	0,44
23.08.2010	6,36	0,75
13.09.2010	4,17	0,69
27.09.2010	4,07	0,63

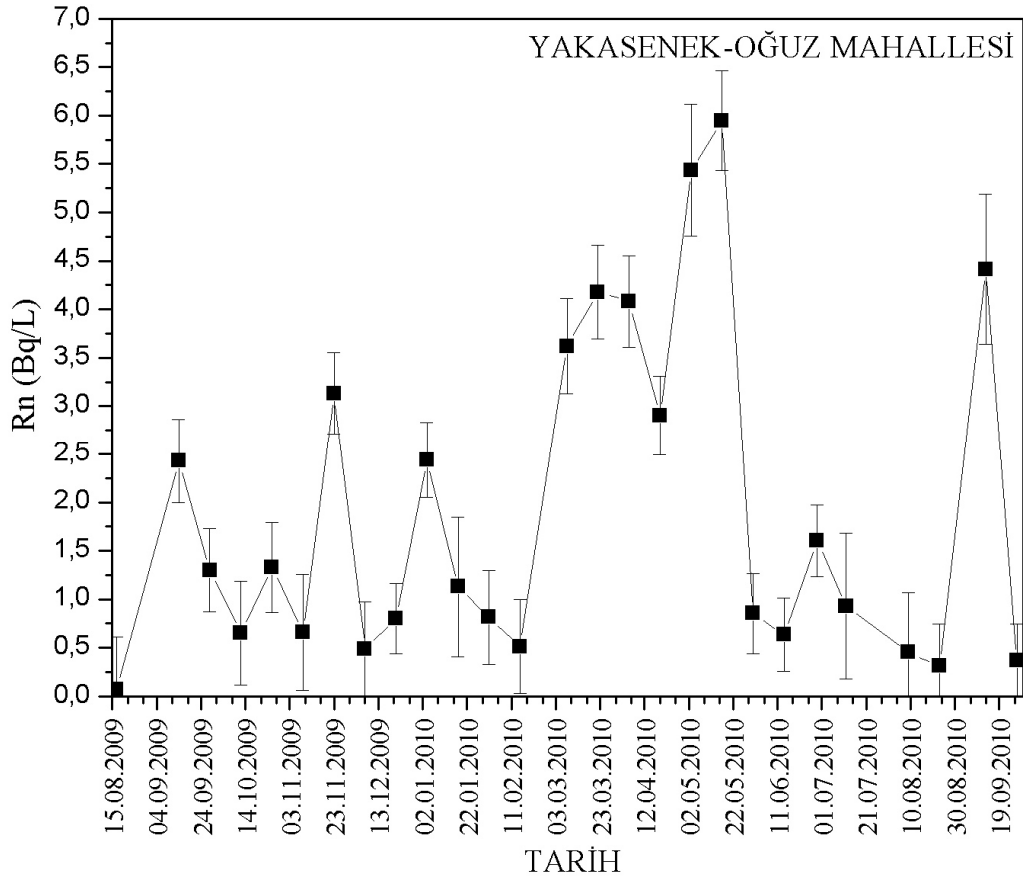


Şekil 4.12. 12 nolu kaynağın 17 Ağustos 2009 – 27 Eylül 2010 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi

13 nolu kaynağa ait, çalışma döneminde elde edilen radon konsantrasyonu ve standart hata değerleri ölçüm tarihlerine göre Çizelge 4.13’de verilmiş ve bu değerler kullanılarak elde edilen grafik Şekil 4.13’de gösterilmiştir. Çalışma döneminde ilgili kaynağın radon konsantrasyonu değerleri 0,07 ile 5,95 Bq/L arasında elde edilmiştir.

Çizelge 4.13. 13 nolu kaynağın 17 Ağustos 2009 – 27 Eylül 2010 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi

Numune Alın Tarihi	Ortalama Radon Konsantrasyonu (Bq/L)	Standart Hata (Bq/L)
17.08.2009	0,07	0,54
14.09.2009	2,43	0,43
28.09.2009	1,30	0,43
12.10.2009	0,65	0,53
26.10.2009	1,33	0,46
09.11.2009	0,66	0,60
23.11.2009	3,13	0,42
07.12.2009	0,49	0,48
21.12.2009	0,80	0,36
04.01.2010	2,44	0,39
18.01.2010	1,13	0,72
01.02.2010	0,81	0,48
15.02.2010	0,51	0,48
08.03.2010	3,62	0,49
22.03.2010	4,18	0,48
05.04.2010	4,08	0,47
19.04.2010	2,90	0,41
03.05.2010	5,44	0,68
17.05.2010	5,95	0,51
31.05.2010	0,85	0,41
14.06.2010	0,64	0,38
29.06.2010	1,60	0,37
12.07.2010	0,93	0,75
09.08.2010	0,45	0,62
23.08.2010	0,31	0,43
13.09.2010	4,41	0,77
27.09.2010	0,37	0,38

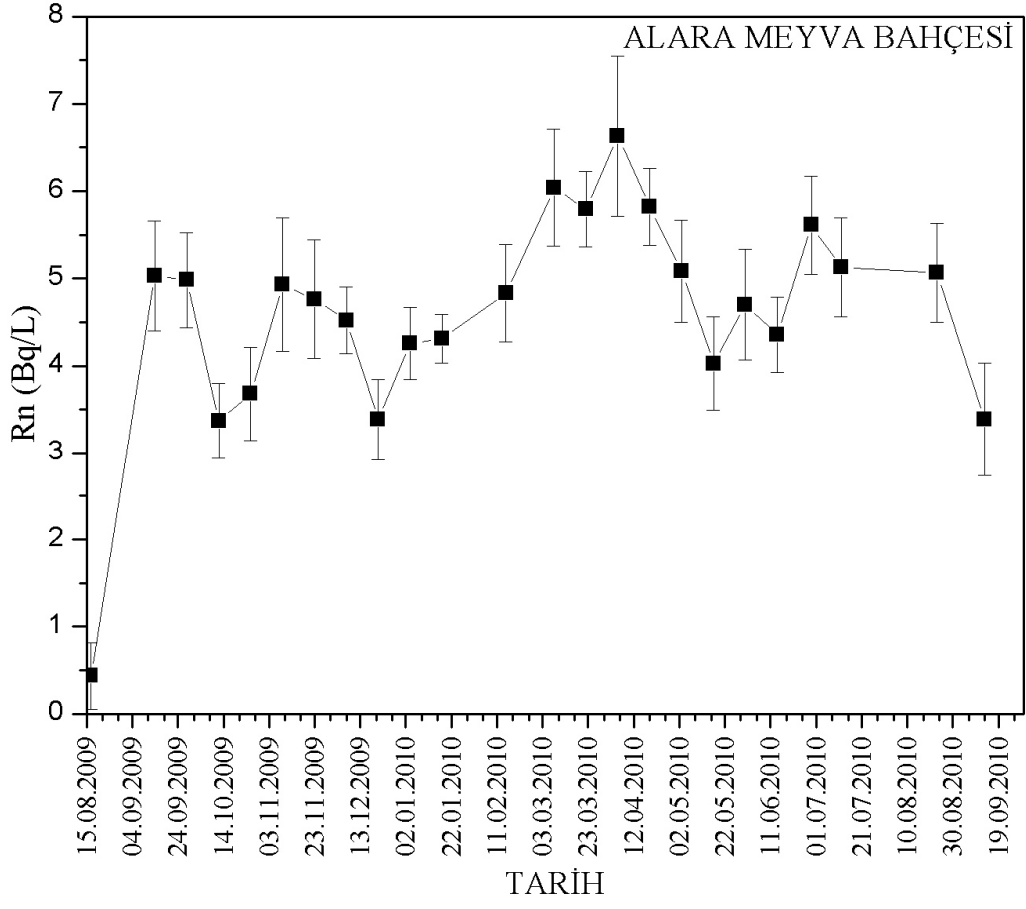


Şekil 4.13. 13 nolu kaynağın 17 Ağustos 2009 – 27 Eylül 2010 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi

Araştırma döneminde 14 nolu kaynağın elde edilen radon konsantrasyonu ve standart hata değerleri ölçüm tarihlerine göre Çizelge 4.14’de verilmiştir. Bu kaynağın radon konsantrasyonu değerleri 0,44 ile 6,63 Bq/L arasında elde edilmiştir. Araştırma döneminde ölçüm tarihlerine göre radon konsantrasyonu değerleri kullanılarak elde edilen grafik Şekil 4.14’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.14. 14 nolu kaynağın 17 Ağustos 2009 – 27 Eylül 2010 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi

Numune Alım Tarihi	Ortalama Radon Konsantrasyonu (Bq/L)	Standart Hata (Bq/L)
17.08.2009	0,44	0,38
14.09.2009	5,03	0,63
28.09.2009	4,98	0,54
12.10.2009	3,37	0,43
26.10.2009	3,68	0,53
09.11.2009	4,93	0,76
23.11.2009	4,76	0,68
07.12.2009	4,52	0,38
21.12.2009	3,38	0,46
04.01.2010	4,26	0,41
18.01.2010	4,31	0,28
15.02.2010	4,83	0,56
08.03.2010	6,04	0,67
22.03.2010	5,79	0,43
05.04.2010	6,63	0,91
19.04.2010	5,82	0,44
03.05.2010	5,09	0,59
17.05.2010	4,03	0,53
31.05.2010	4,70	0,64
14.06.2010	4,36	0,43
29.06.2010	5,61	0,57
12.07.2010	5,13	0,57
23.08.2010	5,06	0,57
13.09.2010	3,39	0,65

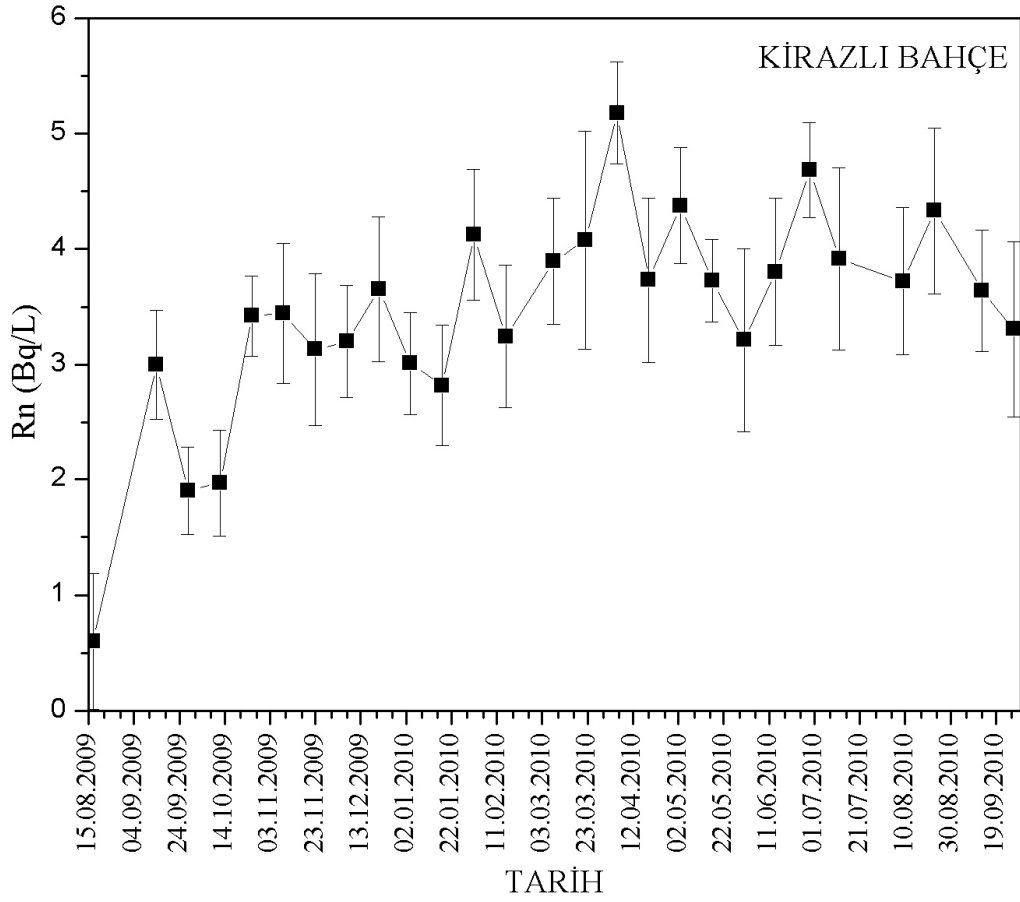


Şekil 4.14. 14 nolu kaynağın 17 Ağustos 2009 – 27 Eylül 2010 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi

15 nolu kaynağa ait, çalışma döneminde elde edilen radon konsantrasyonu ve standart hata değerleri ölçüm tarihlerine göre Çizelge 4.15’de verilmiştir. Bu değerler kullanılarak elde edilen grafik Şekil 4.15’de gösterilmiştir. 15 nolu kaynağın radon konsantrasyonu değerleri 0,6 ile 5,18 Bq/L arasında elde edilmiştir.

Çizelge 4.15. 15 nolu kaynağın 17 Ağustos 2009 – 27 Eylül 2010 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi

Numune Alım Tarihi	Ortalama Radon Konsantrasyonu (Bq/L)	Standart Hata (Bq/L)
17.08.2009	0,60	0,59
14.09.2009	3,00	0,47
28.09.2009	1,90	0,38
12.10.2009	1,97	0,46
26.10.2009	3,42	0,35
09.11.2009	3,44	0,61
23.11.2009	3,13	0,66
07.12.2009	3,20	0,48
21.12.2009	3,65	0,63
04.01.2010	3,01	0,44
18.01.2010	2,82	0,52
01.02.2010	4,12	0,57
15.02.2010	3,24	0,62
08.03.2010	3,90	0,54
22.03.2010	4,08	0,95
05.04.2010	5,18	0,44
19.04.2010	3,73	0,71
03.05.2010	4,38	0,50
17.05.2010	3,73	0,36
31.05.2010	3,21	0,79
14.06.2010	3,80	0,64
29.06.2010	4,68	0,41
12.07.2010	3,92	0,79
09.08.2010	3,72	0,64
23.08.2010	4,33	0,72
13.09.2010	3,64	0,52
27.09.2010	3,31	0,76



Şekil 4.15. 15 nolu kaynağın 17 Ağustos 2009 – 27 Eylül 2010 tarihleri arasındaki radon seviyesi değişimi

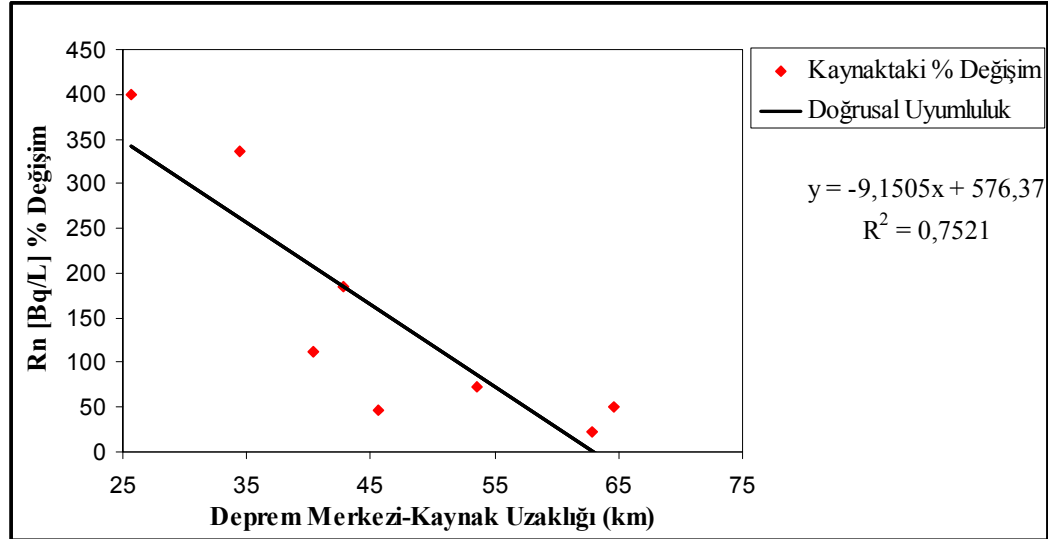
4.2. Kaynakların 17 Ağustos 2009–27 Eylül 2010 Tarihleri Arasındaki Radon Değişim Yüzdelerinin Deprem Merkezine Uzaklıklarına Göre İncelenmesi

Kaynakların ardışık iki numune alım tarihleri arasındaki radon konsantrasyonlarının bağıl değişimlerinin, sismik hareketlerle ilişkisini incelemek amacıyla ilgili dönemde meydana gelen depremin kaynaklara olan merkezci uzaklıkları ile bağıl radon konsantrasyonu değişimleri grafik olarak çizilmiştir. Deprem hareketinin lineer etkisinin olduğu grafiğe eklenen doğrusal eğilim çizgisi aracılığı ile elde edilen R^2 değerinden anlaşılmıştır.

15.09.2009 tarihinde Sultandağı'nda meydana gelen 2,7 M büyüklüğündeki depremin lineer etkisinin gözlemlendiği kaynaklar, depremin kaynaklara olan merkezci uzaklıkları ve ardışık olarak ölçülmüş kaynaklara ait radon konsantrasyonu değerleri ve bağlı değişimler Çizelge 4.16 ve bu değerler kullanılarak elde edilen grafik Şekil 4.16'da verilmiştir. Bu deprem için doğrusal uyumluluk değeri; R^2 0,75 olarak elde edilmiştir.

Çizelge 4.16. 15.09.2009 Sultandağı depremi, radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklıkları

15.09.2009 Sultandağı Depremi (2,7 M)					
Kaynak No	Kaynak Adı	Kaynaklara Uzaklık	Rn (Bq/L)	17.08.2009	14.09.2009
		(km)	% değişim	Rn (Bq/L)	Rn (Bq/L)
15	Kirazlı Bahçe	25,71	400,00	0,60	3,00
10	Ali Kaleli Mahallesi	34,42	335,56	2,25	9,80
5	Maltepe	40,40	111,80	2,78	5,88
7	Çay Belediye Bahçesi-600m	42,85	184,10	0,88	2,5
4	Heybeli Termal	45,65	47,15	0,33	0,49
3	Şeker Fabrikası	53,51	73,64	1,27	2,20
2	Turkuaz Hayvan Çiftliği	62,92	21,88	2,60	3,16
1	İl Özel İdare	64,69	49,76	12,13	18,17

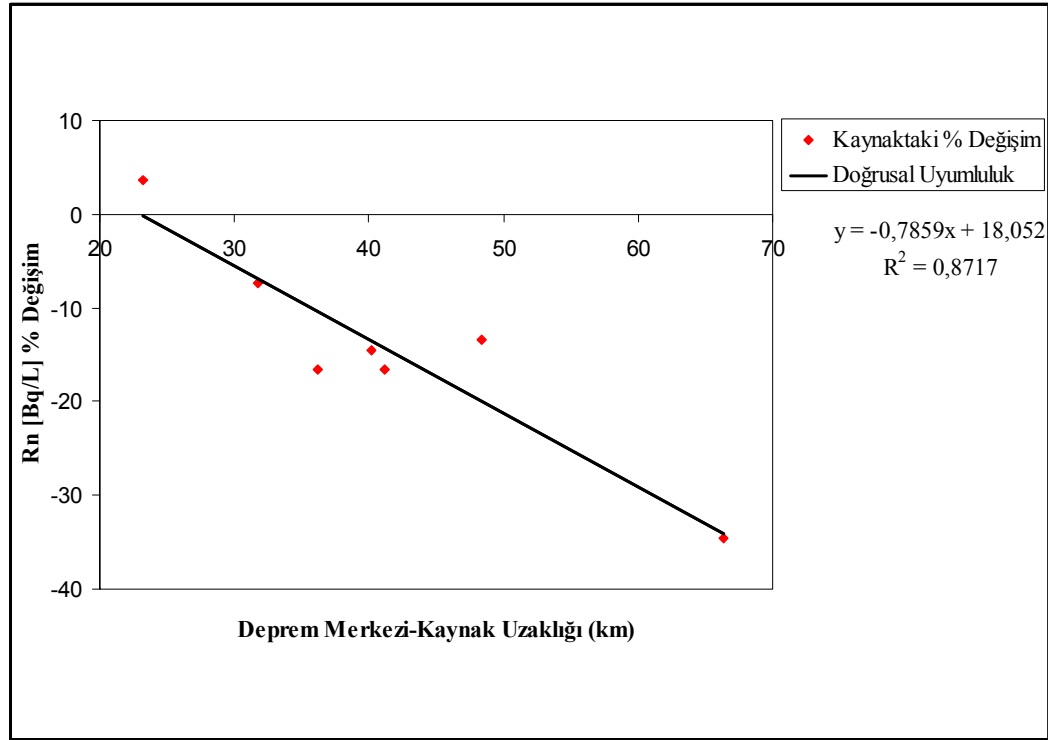


Şekil 4.16. 15.09.2009 Sultandağı depreminin radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklık ilişkisi

10.10.2009 tarihinde Sultandağı'nda meydana gelen 3,2 M büyüklüğündeki depremin lineer etkisinin gözlemlendiği kaynaklar, depremin kaynaklara olan merkezci uzaklıkları ve ardışık olarak ölçülmüş kaynaklara ait radon konsantrasyonu değerleri ve bağıl değişimleri Çizelge 4.17'de verilmiştir. İlgili tarihteki depreme ait bu değerler kullanılarak elde edilen grafik Şekil 4.17'de verilmiştir. Bu deprem için doğrusal uyumluluk değeri; R^2 0,87 olarak elde edilmiştir.

Çizelge 4.17 . 10.10.2009 Sultandağı depremi, radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklıkları

10.10.2009 Sultandağı Depremi (3,2 M)					
Kaynak No	Kaynak Adı	Kaynaklara Uzaklık	Rn (Bq/L)	28.09.2009	12.10.2009
		(km)	% değişim	Rn (Bq/L)	Rn (Bq/L)
15	Kirazlı Bahçe	23,19	3,68	1,90	1,97
11	Çay Belediyesi Beton Santrali	31,77	-7,38	7,72	7,15
10	Ali Kaleli Mahallesi	36,17	-16,58	5,91	4,93
9	Çay-Ören	40,22	-14,48	8,91	7,62
6	Kadıköy	41,20	-16,54	12,82	10,70
4	Heybeli Termal	48,36	-13,46	0,52	0,45
2	Turkuaz Hayvan Çiftliği	66,29	-34,58	3,73	2,44

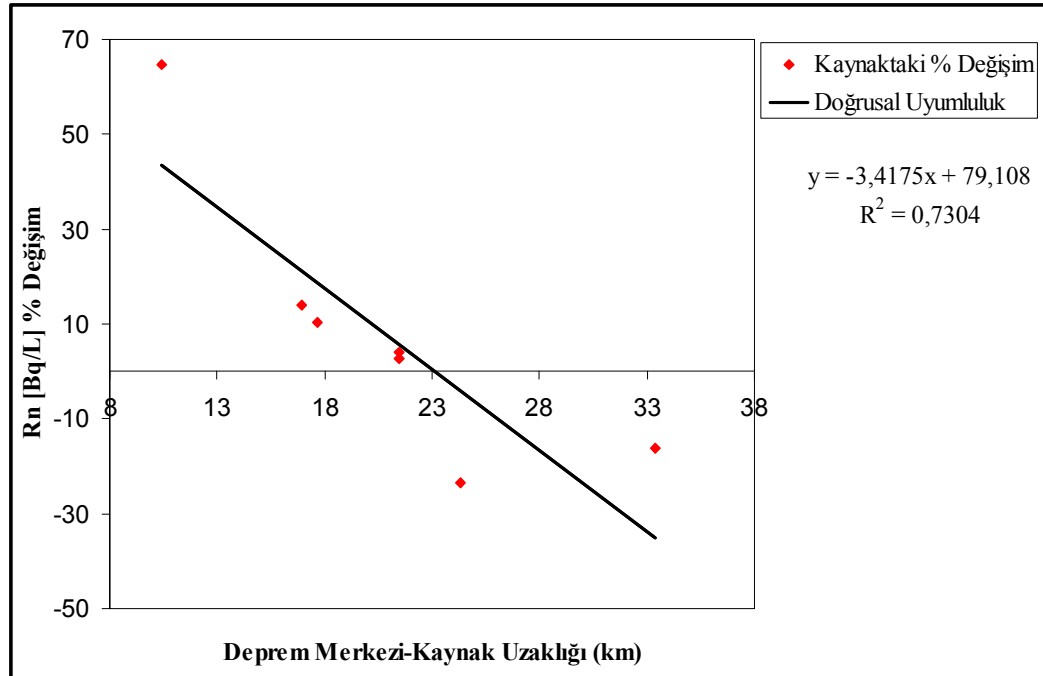


Şekil 4.17. 10.10.2009 Sultandağı depreminin radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklık ilişkisi

25.12.2009 tarihinde Çay'da meydana gelen 3,1 M büyüklüğündeki depremin lineer etkisinin gözlemlendiği kaynaklar, depremin kaynaklara olan merkezci uzaklıkları ve ardışık olarak ölçülmüş kaynaklara ait radon konsantrasyonu değerleri ve bağıl değişimleri Çizelge 4.18'de verilmiştir. Şekil 4.18 bu değerler kullanılarak elde edilen grafiği göstermektedir. 25.12.2009 Çay depremi için doğrusal uyumluluk değeri; R^2 0,73 olarak elde edilmiştir.

Çizelge 4.18. 25.12.2009 Çay depremi, radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklıkları

25.12.2009 Çay Depremi (3,1 M)					
Kaynak No	Kaynak Adı	Kaynaklara Uzaklık	Rn (Bq/L)	07.12.2009	21.12.2009
		(km)	% değişim	Rn (Bq/L)	Rn (Bq/L)
13	Oğuz Mahallesi	10,43	64,55	0,49	0,80
15	Kirazlı Bahçe	16,96	14,13	3,20	3,65
6	Kadıköy	17,65	10,17	10,97	12,09
7	Çay Belediye Bahçesi-600m	21,43	2,56	2,23	2,29
8	Çay Belediye Bahçesi-700m	21,49	4,10	1,05	1,09
4	Heybeli Termal	24,34	-23,42	0,45	0,34
3	Şeker Fabrikası	33,37	-16,14	2,41	2,02

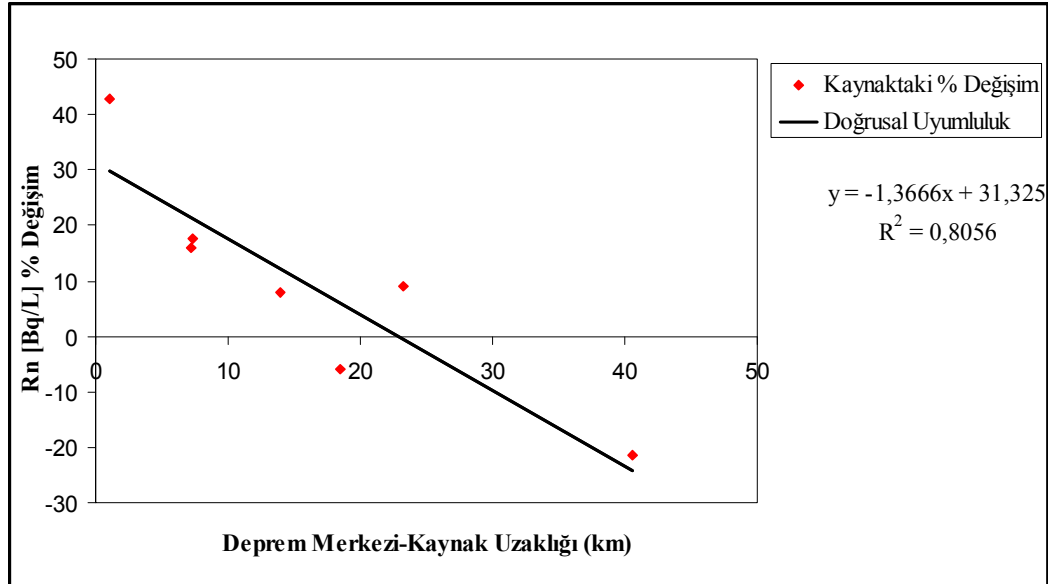


Şekil 4.18. 25.12.2009 Çay depreminin radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklık ilişkisi

Çobanlar'da 25.02.2010 tarihinde meydana gelen 2,5 M büyüklüğündeki depremin lineer etkisinin gözlemlendiği kaynaklar, depremin kaynaklara olan merkezci uzaklıkları ve ardışık olarak ölçülmüş kaynaklara ait radon konsantrasyonu değerleri ve bağıl değişimleri Çizelge 4.19'da verilmiştir. Bu deprem için doğrusal uyumluluk değeri; R^2 0,81 olarak elde edilmiştir. Bu değerler kullanılarak elde edilen grafik Şekil 4.19'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.19. 25.02.2010 Çobanlar depremi-I, radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklıkları

25.02.2010 Çobanlar Depremi (2,5 M)					
Kaynak No	Kaynak Adı	Kaynaklara Uzaklık	Rn (Bq/L)	01.02.2010	15.02.2010
		(km)	% değişim	Rn (Bq/L)	Rn (Bq/L)
4	Heybeli Termal	1,10	42,83	0,26	0,38
5	Maltepe	7,26	16,08	5,07	5,88
6	Kadıköy	7,27	17,59	14,41	16,94
10	Ali Kaleli Mahallesi	13,98	8,01	10,24	11,06
11	Çay Belediyesi Beton Santrali	18,48	-5,81	8,06	7,59
12	Çayırpınar	23,2	9,11	5,47	5,97
15	Kirazlı Bahçe	40,55	-21,37	4,12	3,24

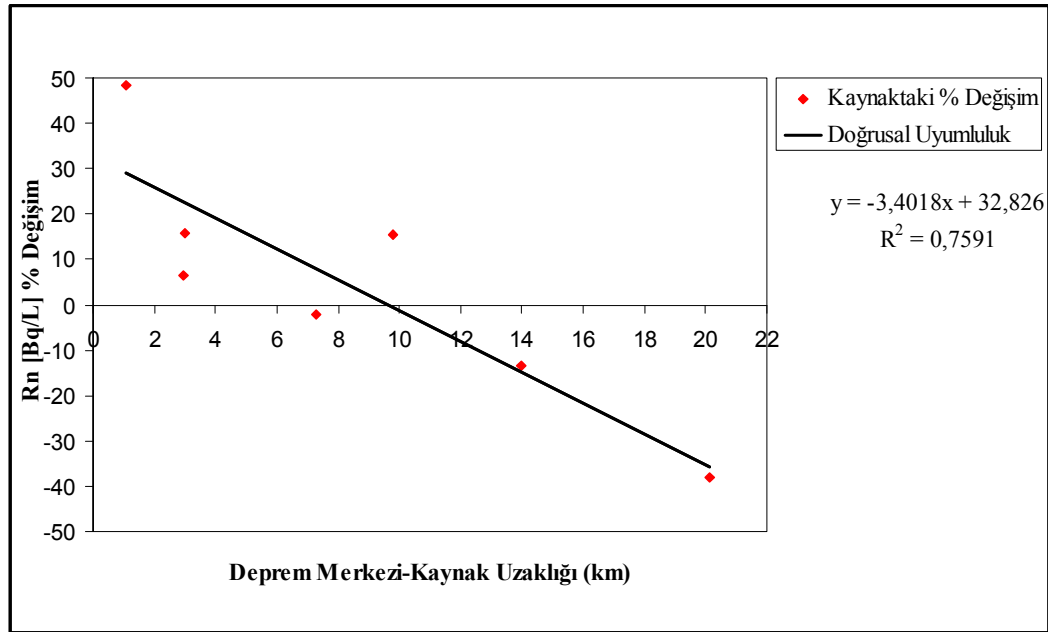


Şekil 4.19. 25.02.2010 Çobanlar depreminin radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklık ilişkisi

Çizelge 4.20’de 25.02.2010 tarihinde yine Çobanlar’da meydana gelen 2,5 M büyüklüğündeki depremin lineer etkisinin gözlemlendiği kaynaklar, depremin kaynaklara olan merkezci uzaklıkları ve ardışık olarak ölçülmüş kaynaklara ait radon konsantrasyonu değerleri ve bağıl değişimleri verilmiştir. Bu değerler kullanılarak elde edilen grafik Şekil 4.20’de gösterilmiştir. Bu deprem için doğrusal uyumluluk değeri; R^2 0,76 olarak elde edilmiştir.

Çizelge 4.20. 25.02.2010 Çobanlar depremi-II, radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklıkları

25.02.2010 Çobanlar Depremi (2,5 M)					
Kaynak No	Kaynak Adı	Kaynaklara Uzaklık	Rn (Bq/L)	15.02.2010	08.03.2010
		(km)	% değişim	Rn (Bq/L)	Rn (Bq/L)
4	Heybeli Termal	1,10	48,20	0,38	0,56
7	Çay Belediye Bahçesi-600m	2,97	6,32	2,41	2,56
8	Çay Belediye Bahçesi-700m	2,98	15,77	1,15	1,34
6	Kadıköy	7,27	-2,31	16,94	16,55
9	Çay-Ören	9,77	15,29	10,15	11,71
10	Ali Kaleli Mahallesi	13,98	-13,50	11,06	9,57
2	Turkuaz Hayvan Çiftliği	20,14	-38,00	7,30	4,52

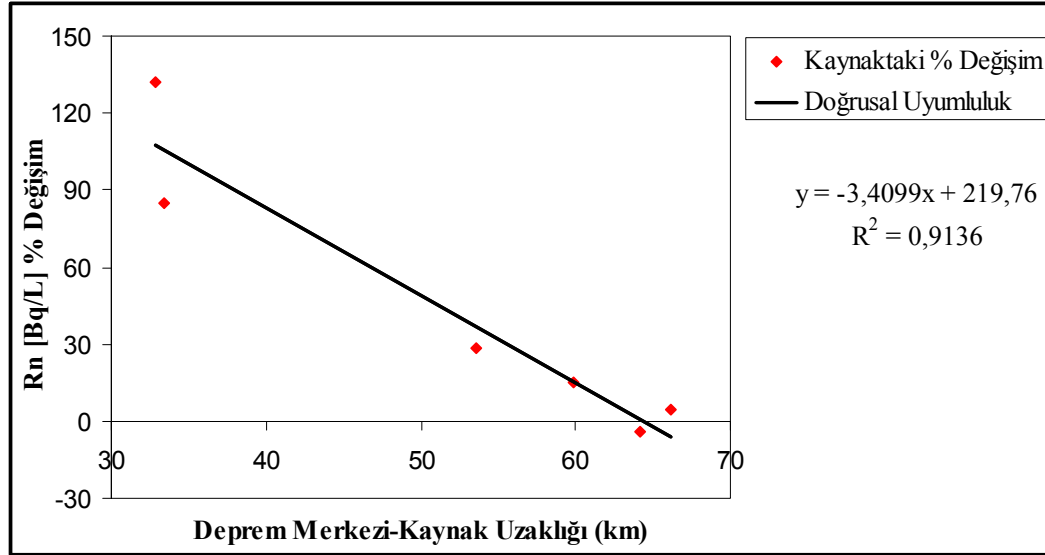


Şekil 4.20. 25.02.2010 Çobanlar depreminin radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklık ilişkisi

Şuhut'da 07.03.2010 tarihinde meydana gelen 3 M büyüklüğündeki depremin, lineer etkisinin gözlemlendiği kaynaklar, depremin kaynaklara olan merkezci uzaklıkları, ardışık olarak ölçülmüş kaynaklara ait radon konsantrasyonu değerleri ve bağıl değişimleri Çizelge 4.21'de gösterilmiştir. 07.03.2010 tarihindeki bu deprem için doğrusal uyumluluk değeri; R^2 0,91 olarak elde edilmiştir. Bu değerler kullanılarak elde edilen grafik Şekil 4.21'de verilmiştir.

Çizelge 4.21. 07.03.2010 Şuhut depremi, radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklıkları

07.03.2010 Şuhut Depremi (3,0 M)					
Kaynak No	Kaynak Adı	Kaynaklara Uzaklık	Rn (Bq/L)	08.03.2010	22.03.2010
		(km)	% değişim	Rn (Bq/L)	Rn (Bq/L)
2	Turkuaz Hayvan Çiftliği	32,87	131,88	4,52	10,49
3	Şeker Fabrikası	33,40	84,80	1,48	2,73
12	Çayırpınar	53,62	28,71	5,07	6,53
13	Oğuz Mahallesi	59,84	15,43	3,62	4,18
14	Alara Meyva Bahçesi	64,12	-4,11	6,04	5,79
15	Kirazlı Bahçe	66,19	4,62	3,90	4,08

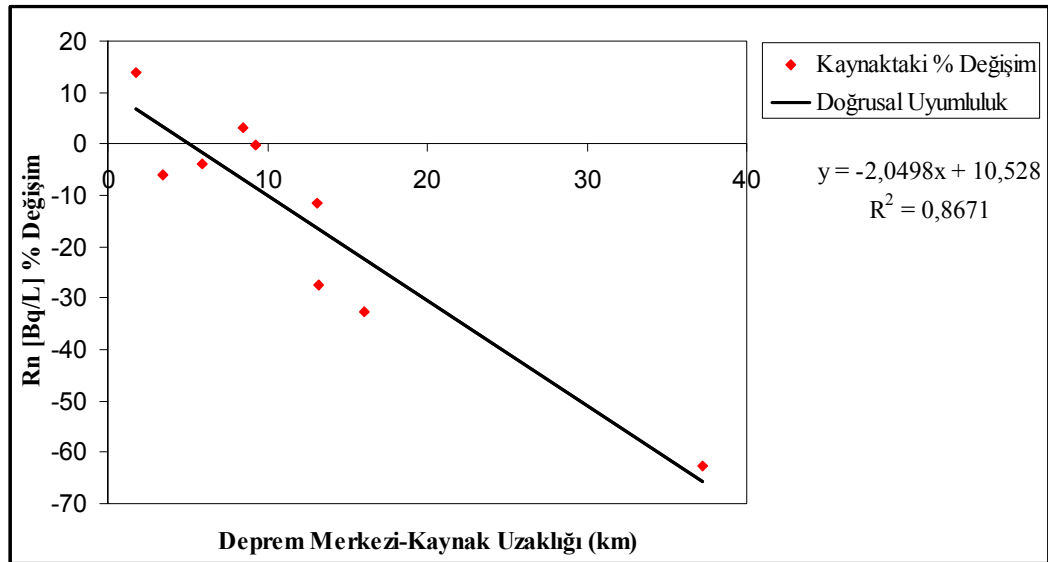


Şekil 4.21. 07.03.2010 Şuhut depreminin radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklık ilişkisi

Çizelge 4.22’de 30.03.2010 tarihinde Çay’da meydana gelen 2,8 M büyüklüğündeki depremin lineer etkisinin gözlemlendiği kaynaklar, depremin kaynaklara olan merkezci uzaklıkları, ardışık olarak ölçülmüş kaynaklara ait radon konsantrasyonu değerleri ve bağıl değişimleri verilmiştir. Şekil 4.22’de bu değerler kullanılarak elde edilen grafik gösterilmiştir. Çay’daki bu deprem için doğrusal uyumluluk değeri; R^2 0,87 olarak elde edilmiştir.

Çizelge 4.22. 30.03.2010 Çay depremi, radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklıkları

30.03.2010 Çay Depremi (2,8 M)					
Kaynak No	Kaynak Adı	Kaynaklara Uzaklık	Rn (Bq/L)	08.03.2010	22.03.2010
		(km)	% Değişim	Rn (Bq/L)	Rn (Bq/L)
10	Ali Kaleli Mahallesi	1,76	13,76	9,57	10,88
11	Çay Belediyesi Beton Santrali	3,42	-6,01	8,56	8,05
9	Çay-Ören	5,9	-4,01	11,71	11,24
5	Maltepe	8,46	3,18	4,72	4,87
6	Kadıköy	9,23	-0,13	16,55	16,53
7	Çay Belediye Bahçesi-600m	13,12	-11,39	2,56	2,27
8	Çay Belediye Bahçesi-700m	13,18	-27,58	1,34	0,97
4	Heybeli Termal	16,1	-32,70	0,56	0,37
1	İl Özel İdare	37,23	-62,57	21,93	8,21

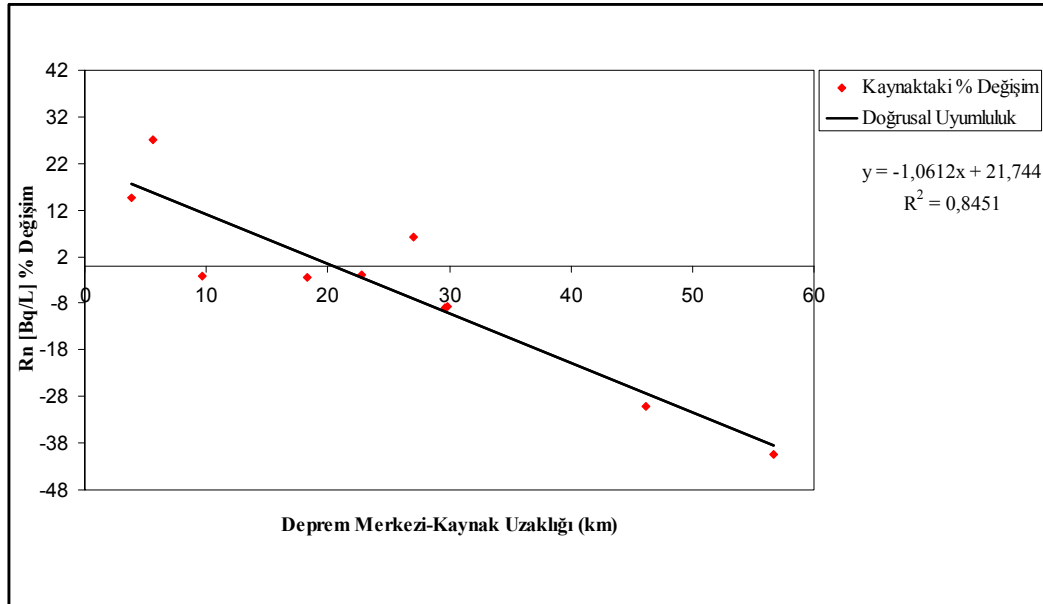


Şekil 4.22. 30.03.2010 Çay depreminin radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklık ilişkisi

01.04.2010 tarihinde Sultandağı'nda meydana gelen 3 M büyüklüğündeki depremin lineer etkisinin gözlemlendiği kaynaklar, depremin kaynaklara olan merkezci uzaklıkları ve ardışık olarak ölçülmüş kaynaklara ait radon konsantrasyonu değerleri ve bağlı değişimleri Çizelge 4.23'de verilmiştir. Bu deprem için doğrusal uyumluluk değeri; R^2 0,85 olarak elde edilmiştir. İlgili değerler kullanılarak elde edilen grafik Şekil 4.23'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.23. 01.04.2010 Sultandağı depremi, radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklıkları

01.04.2010 Sultandağı Depremi (3,0 M)					
Kaynak No	Kaynak Adı	Kaynaklara Uzaklık	Rn (Bq/L)	22.03.2010	05.04.2010
		(km)	% Değişim	Rn (Bq/L)	Rn (Bq/L)
14	Alara Meyva Bahçesi	3,83	14,49	5,79	6,63
15	Kirazlı Bahçe	5,66	27,04	4,08	5,18
13	Oğuz Mahallesi	9,71	-2,29	4,18	4,08
11	Çay Belediyesi Beton Santrali	18,28	-2,58	8,05	7,84
10	Ali Kaleli Mahallesi	22,78	-2,00	10,88	10,67
9	Çay-Ören	27,08	6,12	11,24	11,92
5	Maltepe	29,64	-8,84	4,87	4,44
6	Kadıköy	29,84	-8,77	16,53	15,08
3	Şeker Fabrikası	46,15	-30,18	2,73	1,90
2	Turkuaz Hayvan Çiftliği	56,67	-40,46	10,49	6,25

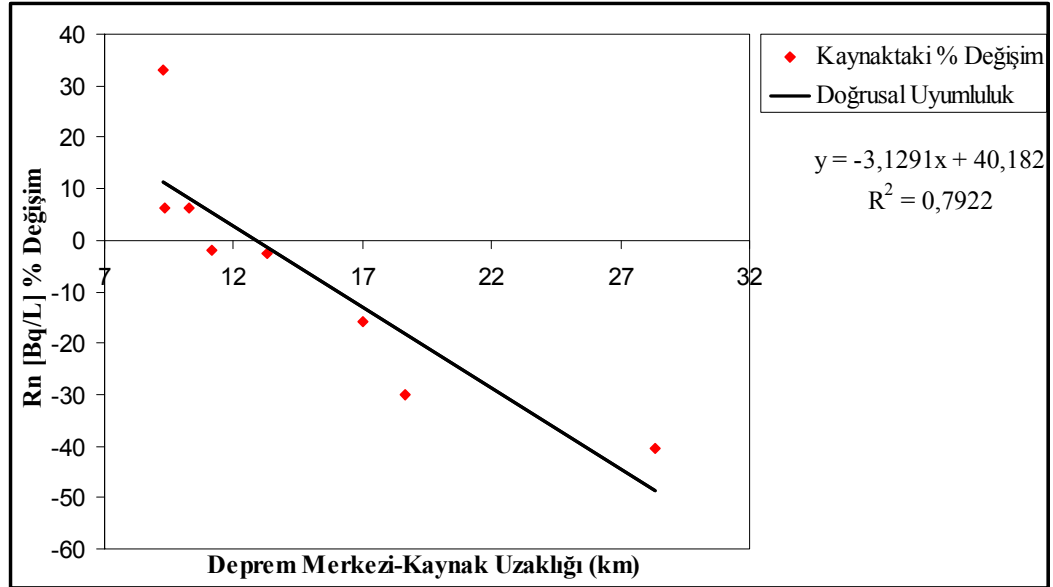


Şekil 4.23. 01.04.2010 Sultandağı depreminin radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklık ilişkisi

02.04.2010 tarihinde Bolvadin’de meydana gelen 2,6 M büyüklüğündeki depremin lineer etkisinin gözlemlendiği kaynaklar, depremin kaynaklara olan merkezci uzaklıkları ve ardışık olarak ölçülmüş kaynaklara ait radon konsantrasyonu değerleri ve bağlı değişimleri Çizelge 4.24 verilmiştir. Bu deprem için doğrusal uyumluluk değeri; R^2 0,79 olarak elde edilmiştir. Bu deprem için elde edilen grafik Şekil 4.24’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.24. 02.04.2010 Bolvadin depremi, radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklıkları

02.04.2010 Bolvadin Depremi (2,6 M)					
Kaynak No	Kaynak Adı	Kaynaklara Uzaklık	Rn (Bq/L)	22.03.2010	05.04.2010
		(km)	% değişim	Rn (Bq/L)	Rn (Bq/L)
8	Çay Belediye Bahçesi-700m	9,25	33,04	0,97	1,29
7	Çay Belediye Bahçesi-600m	9,31	6,19	2,27	2,41
9	Çay-Ören	10,25	6,12	11,24	11,92
10	Ali Kaleli Mahallesi	11,13	-2,00	10,88	10,67
11	Çay Belediyesi Beton Santrali	13,32	-2,58	8,05	7,84
12	Çayırpınar	17,03	-15,75	6,53	5,50
3	Şeker Fabrikası	18,68	-30,18	2,73	1,90
2	Turkuaz Hayvan Çiftliği	28,34	-40,46	10,49	6,25

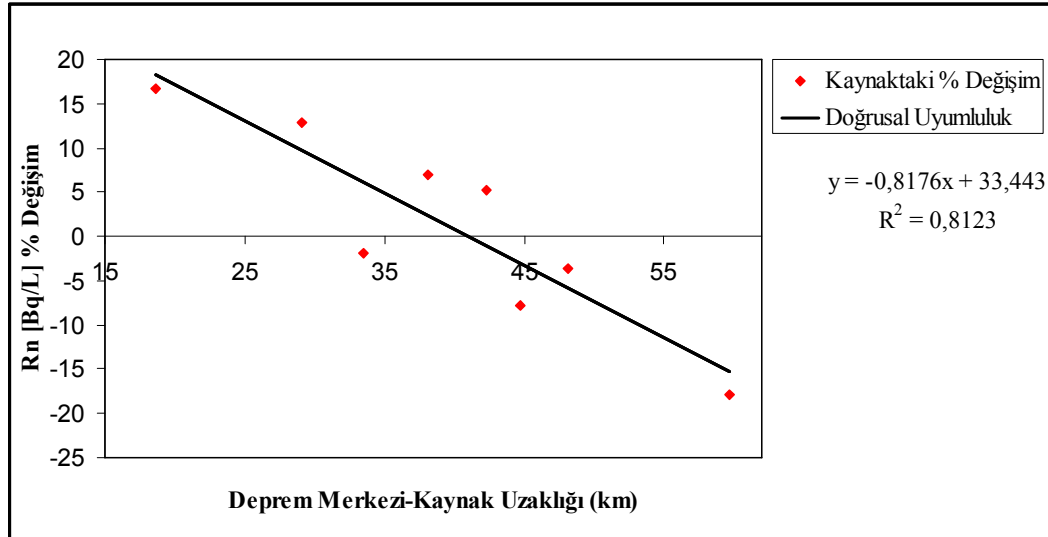


Şekil 4.24. 02.04.2010 Bolvadin depreminin radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklık ilişkisi

Sultandağı'nda 23.05.2010 tarihinde meydana gelen 2,7 M büyüklüğündeki depremin lineer etkisinin gözlemlendiği kaynaklar, depremin kaynaklara olan merkezci uzaklıkları ve ardışık olarak ölçülmüş kaynaklara ait radon konsantrasyonu değerleri ve bağlı değişimleri Çizelge 4.25 ve bu değerler kullanılarak elde edilen grafik Şekil 4.25'de verilmiştir. Sultandağı'nda meydana gelen bu deprem için doğrusal uyumluluk değeri; R^2 0,81 olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.25. 23.05.2010 Sultandağı depremi-I, radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklıkları

23.05.2010 Sultandağı Depremi (2,7 M)					
Kaynak No	Kaynak Adı	Kaynaklara Uzaklık	Rn (Bq/L)	17.05.2010	31.05.2010
		(km)	% değişim	Rn (Bq/L)	Rn (Bq/L)
14	Alara Meyva Bahçesi	18,58	16,79	4,03	4,70
12	Çayırpınar	29,09	12,88	5,42	6,12
11	Çay Belediyesi Beton Santrali	33,53	-1,81	7,74	7,60
10	Ali Kaleli Mahallesi	38,11	6,93	9,85	10,54
9	Çay-Ören	42,33	5,24	11,58	12,19
5	Maltepe	44,76	-7,87	5,73	5,28
8	Çay Belediye Bahçesi-700m	48,15	-3,71	1,05	1,01
3	Şeker Fabrikası	59,66	-17,82	2,16	1,78

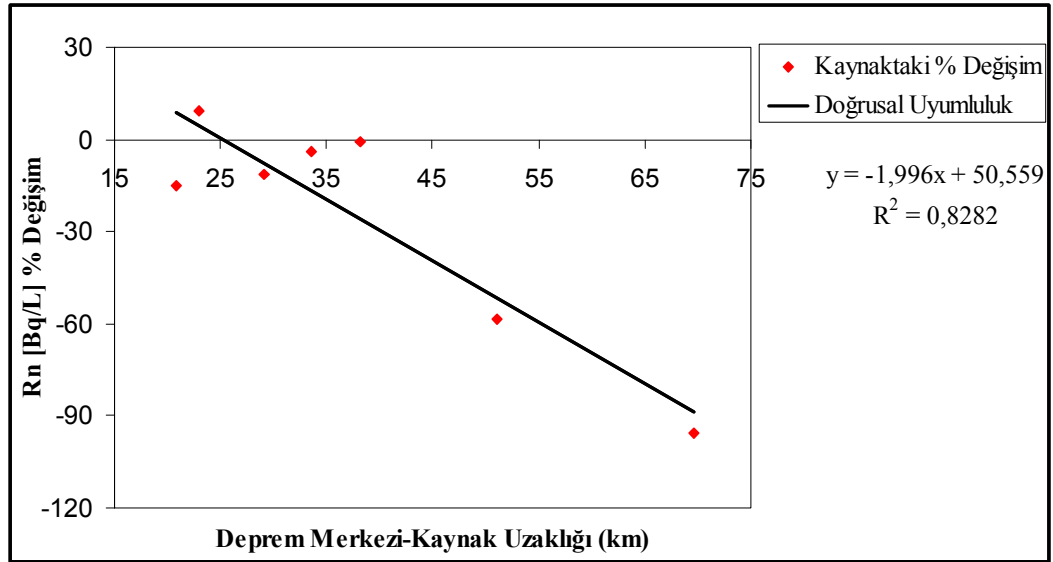


Şekil 4.25. 23.05.2010 Sultandağı depreminin (I) radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklık ilişkisi

23.05.2010 tarihinde Sultandağı'nda meydana gelen 2,7 M büyüklüğündeki ikinci bir depremin, lineer etkisinin gözlemlendiği kaynaklar, depremin kaynaklara olan merkezci uzaklıkları ve ardışık olarak ölçülmüş kaynaklara ait radon konsantrasyonu değerleri ve bağıl değişimleri Çizelge 4.26 verilmiştir. Bulunan veriler kullanılarak elde edilen grafik Şekil 4.26'da gösterilmiştir. Bu deprem için doğrusal uyumluluk değeri; R^2 0,83 olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.26. 23.05.2010 Sultandağı depremi-II, radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklıkları

23.05.2010 Sultandağı Depremi (2,7 M)					
Kaynak No	Kaynak Adı	Kaynaklara Uzaklık	Rn (Bq/L)	03.05.2010	17.05.2010
		(km)	% değişim	Rn (Bq/L)	Rn (Bq/L)
15	Kirazlı Bahçe	20,79	-14,85	4,38	3,73
13	Oğuz Mahallesi	22,94	9,42	5,44	5,95
12	Çayırpınar	29,09	-11,18	6,10	5,42
11	Çay Belediyesi Beton Santrali	33,53	-4,09	8,07	7,74
10	Ali Kaleli Mahallesi	38,11	-0,52	9,90	9,85
4	Heybeli Termal	51,13	-58,59	0,61	0,25
2	Turkuaz Hayvan Çiftliği	69,66	-95,72	14,76	0,63

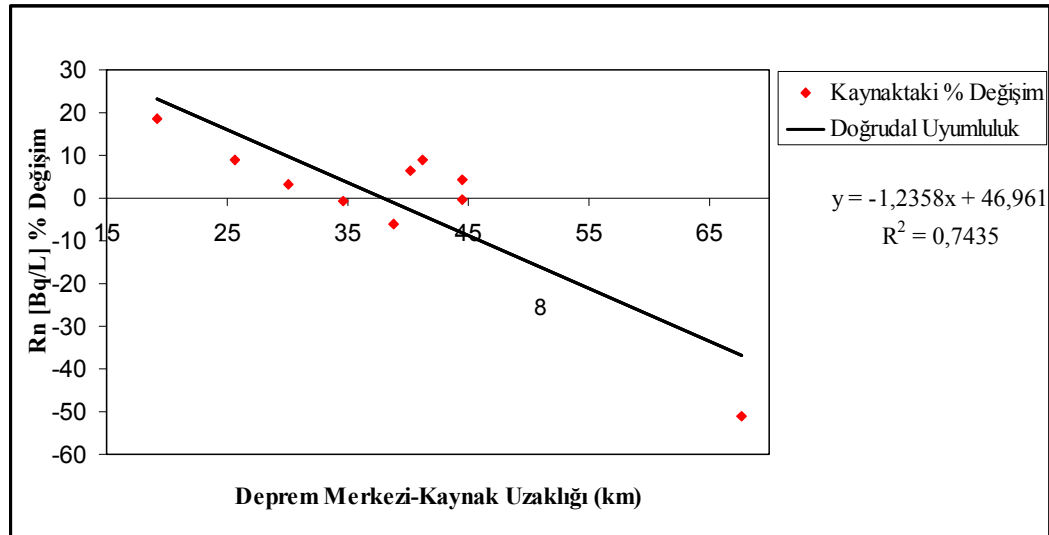


Şekil 4.26. 23.05.2010 Sultandağı depreminin (II) radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklık ilişkisi

Sultandağı'nda 03.06.2010 tarihinde meydana gelen 2,7 M büyüklüğündeki depremin lineer etkisinin gözlemlendiği kaynaklar, depremin kaynaklara olan merkezci uzaklıkları ve ardışık olarak ölçülmüş kaynaklara ait radon konsantrasyonu değerleri ve bağlı değişimleri Çizelge 4.27'de verilmiştir. Bu deprem için doğrusal uyumluluk değeri; R^2 0,74 olarak elde edilmiştir. Şekil 4.27'de bu deprem için elde edilen grafik gösterilmiştir.

Çizelge 4.27. 03.06.2010 Sultandağı depremi-I, radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklıkları

03.06.2010 Sultandağı Depremi (2,7 M)					
Kaynak No	Kaynak Adı	Kaynaklara Uzaklık	Rn (Bq/L)	31.05.2010	14.06.2010
		(km)	% değişim	Rn (Bq/L)	Rn (Bq/L)
15	Kirazlı Bahçe	19,20	18,40	3,21	3,80
12	Çayırpınar	25,70	8,80	6,12	6,66
11	Çay Belediyesi Beton Santrali	30,07	3,38	7,60	7,86
10	Ali Kaleli Mahallesi	34,61	-0,77	10,54	10,46
9	Çay-Ören	38,80	-6,09	12,19	11,44
6	Kadıköy	40,20	6,54	15,93	16,97
5	Maltepe	41,21	8,76	5,28	5,75
7	Çay Belediye Bahçesi-600m	44,52	4,24	2,49	2,60
8	Çay Belediye Bahçesi-700m	44,52	-0,30	1,0130	1,0100
1	İl Özel İdare	67,69	-51,01	33,54	16,43

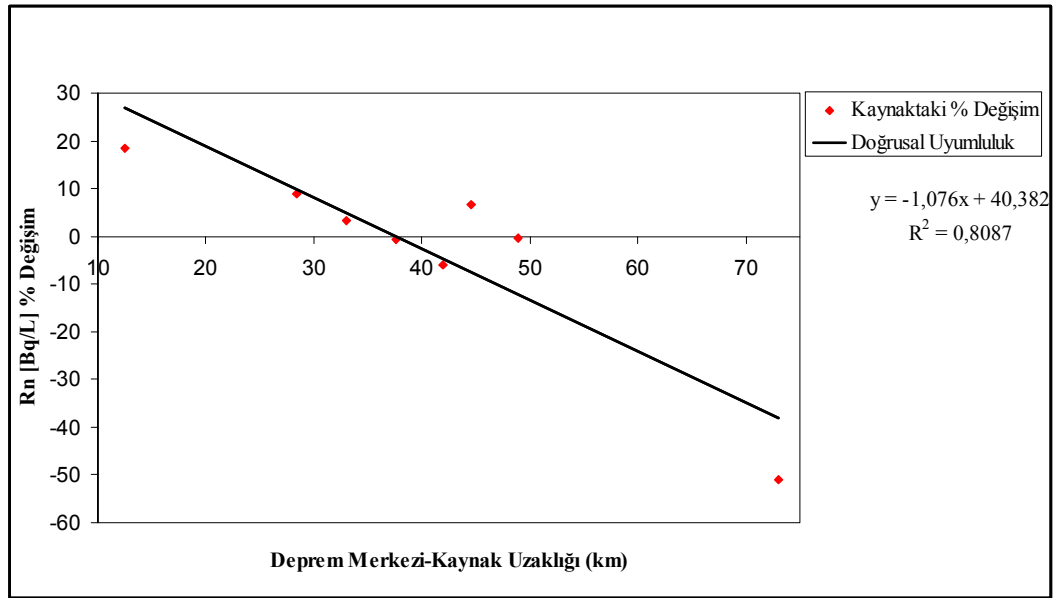


Şekil 4.27. 03.06.2010 Sultandağı depreminin (I) radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklık ilişkisi

Çizelge 4.28 Sultandağı'nda 03.06.2010 tarihinde meydana gelen 2,9 M büyüklüğündeki depremin lineer etkisinin gözlemlendiği kaynakları, depremin kaynaklara olan merkezci uzaklıklarını, ardışık olarak ölçülmüş kaynaklara ait radon konsantrasyonu değerlerini ve bağıl değişimleri göstermektedir. Bu değerler kullanılarak elde edilen grafik Şekil 4.28'de verilmiştir. Bu deprem için doğrusal uyumluluk değeri; R^2 0,81 olarak elde edilmiştir.

Çizelge 4.28. 03.06.2010 Sultandağı depremi-II, radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklıkları

03.06.2010 Sultandağı Depremi (2,9 M)					
Kaynak No	Kaynak Adı	Kaynaklara Uzaklık	Rn (Bq/L)	31.05.2010	14.06.2010
		(km)	% değişim	Rn (Bq/L)	Rn (Bq/L)
15	Kirazlı Bahçe	12,53	18,40	3,21	3,80
12	Çayırpınar	28,34	8,80	6,12	6,66
11	Çay Belediyesi Beton Santrali	33,05	3,38	7,60	7,86
10	Ali Kaleli Mahallesi	37,59	-0,77	10,54	10,46
9	Çay-Ören	41,90	-6,09	12,19	11,44
6	Kadıköy	44,56	6,54	15,93	16,97
8	Çay Belediye Bahçesi-700m	48,85	-0,30	1,013	1,010
1	İl Özel İdare	72,96	-51,01	33,54	16,43

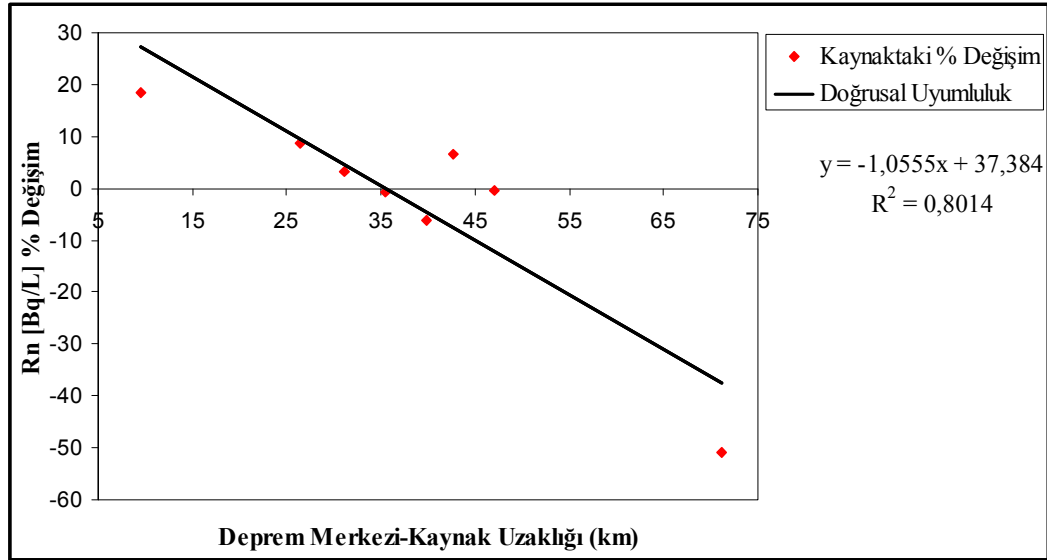


Şekil 4.28. 03.06.2010 Sultandağı depreminin (II) radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklık ilişkisi

Sultandağı'nda 03.06.2010 tarihinde meydana gelen 3 M büyüklüğündeki depremin lineer etkisinin gözlemlendiği kaynaklar, depremin kaynaklara olan merkezci uzaklıkları ve ardışık olarak ölçülmüş kaynaklara ait radon konsantrasyonu değerleri ve bağlı değişimleri Çizelge 4.29'da verilmiştir. Şekil 4.29'da bu deprem için elde edilen grafik gösterilmiştir. Bu deprem için doğrusal uyumluluk değeri; R^2 0,80 olarak elde edilmiştir.

Çizelge 4.29. 03.06.2010 Sultandağı depremi-III, radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklıkları

03.06.2010 Sultandağı Depremi (3,0 M)					
Kaynak No	Kaynak Adı	Kaynaklara Uzaklık	Rn (Bq/L)	31.05.2010	14.06.2010
		(km)	% değişim	Rn (Bq/L)	Rn (Bq/L)
15	Kirazlı Bahçe	9,51	18,40	3,21	3,80
12	Çayırpınar	26,50	8,80	6,12	6,66
11	Çay Belediyesi Beton Santrali	31,14	3,38	7,60	7,86
10	Ali Kaleli Mahallesi	35,56	-0,77	10,54	10,46
9	Çay-Ören	39,82	-6,09	12,19	11,44
6	Kadıköy	42,72	6,54	15,93	16,97
8	Çay Belediye Bahçesi-700m	46,95	-0,30	1,013	1,010
1	İl Özel İdare	71,09	-51,01	33,54	16,43

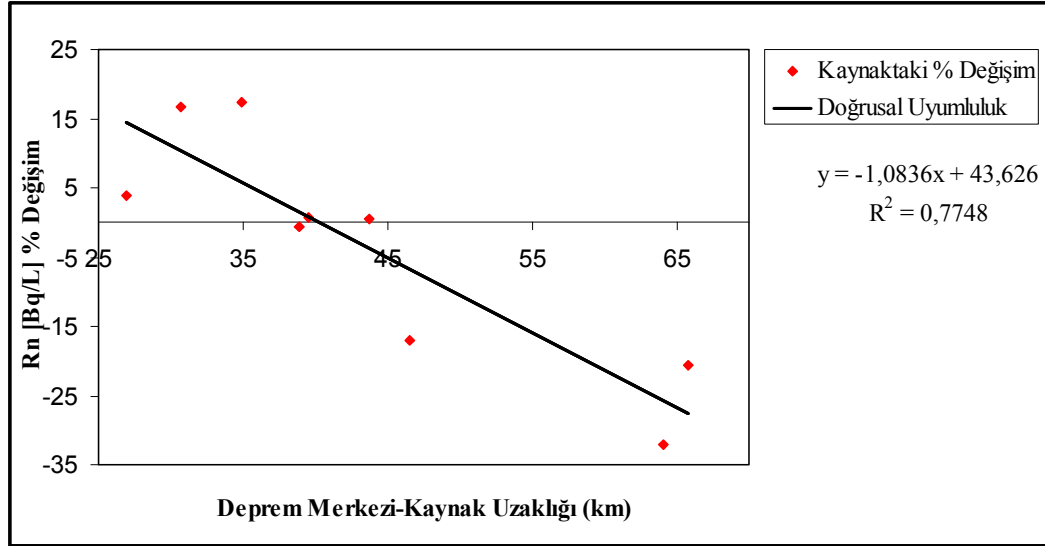


Şekil 4.29. 03.06.2010 Sultandağı depreminin (III) radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklık ilişkisi

08.08.2010 tarihinde Sultandağı'nda meydana gelen 2,8 M büyüklüğündeki depremin lineer etkisinin gözlemlendiği kaynaklar, depremin kaynaklara olan merkezci uzaklıkları ve ardışık olarak ölçülmüş kaynaklara ait radon konsantrasyonu değerleri ve bağlı değişimleri Çizelge 4.30 ve bu değerler kullanılarak elde edilen grafik Şekil 4.30'da verilmiştir. Bu deprem için doğrusal uyumluluk değeri; R^2 0,77 olarak elde edilmiştir.

Çizelge 4.30. 08.08.2010 Sultandağı depremi, radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklıkları

08.08.2010 Sultandağı Depremi (2,8 M)					
Kaynak No	Kaynak Adı	Kaynaklara Uzaklık	Rn (Bq/L)	12.07.2009	09.08.2010
		(km)	% değişim	Rn (Bq/L)	Rn (Bq/L)
12	Çayırpınar	26,93	3,86	4,71	4,89
11	Çay Belediyesi Beton Santrali	30,71	16,79	6,81	7,96
10	Ali Kaleli Mahallesi	34,95	17,36	9,31	10,93
9	Çay-Ören	38,85	-0,59	10,18	10,12
6	Kadıköy	39,50	0,82	13,86	13,97
7	Çay Belediye Bahçesi-600m	43,68	0,49	2,43	2,44
4	Heybeli Termal	46,52	-17,02	0,28	0,23
2	Turkuaz Hayvan Çiftliği	64,03	-32,05	6,82	4,64
1	İl Özel İdare	65,79	-20,67	26,67	21,15

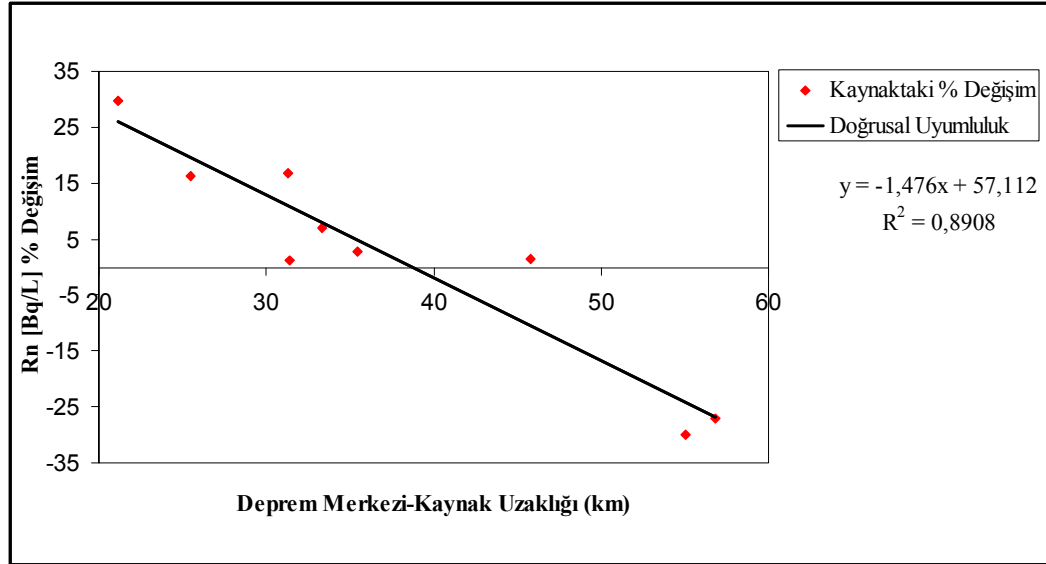


Şekil 4.30. 08.08.2010 Sultandağı depreminin radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklık ilişkisi

Bolvadin’de 29.08.2010 tarihinde meydana gelen 3,3 M büyüklüğündeki depremin, lineer etkisinin gözlemlendiği kaynaklar, depremin kaynaklara olan merkezci uzaklıkları ve ardışık olarak ölçülmüş kaynaklara ait radon konsantrasyonu değerleri ve bağıl değişimleri Çizelge 4.31’de verilmiştir. Bu değerler kullanılarak elde edilen grafik Şekil 4.31’de gösterilmiştir. Bu deprem için doğrusal uyumluluk değeri; R^2 0,89 olarak elde edilmiştir.

Çizelge 4.31. 29.08.2010 Bolvadin depremi, radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklıkları

29.08.2010 Bolvadin Depremi (3,3 M)					
Kaynak No	Kaynak Adı	Kaynaklara Uzaklık	Rn (Bq/L)	09.08.2010	23.08.2010
		(km)	% değişim	Rn (Bq/L)	Rn (Bq/L)
12	Çayırpınar	21,15	29,83	4,89	6,36
15	Kirazlı Bahçe	25,44	16,32	3,72	4,33
9	Çay-Ören	31,33	16,69	10,12	11,81
6	Kadıköy	31,40	1,15	13,97	14,13
5	Maltepe	33,35	6,89	3,92	4,19
7	Çay Belediye Bahçesi-600m	35,42	2,85	2,44	2,51
3	Şeker Fabrikası	45,80	1,57	2,02	2,05
2	Turkuaz Hayvan Çiftliği	55,09	-30,06	4,64	3,24
1	İl Özel İdare	56,86	-26,95	21,15	15,45

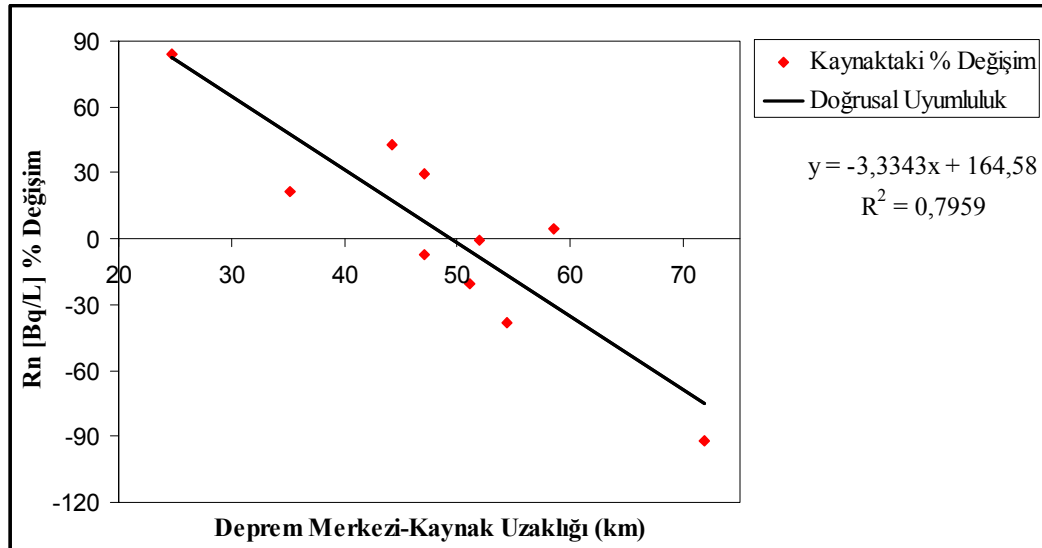


Şekil 4.31. 29.08.2010 Bolvadin depreminin radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklık ilişkisi

21.09.2010 tarihinde Afyonkarahisar'da meydana gelen 2,6 M büyüklüğündeki depremin lineer etkisinin gözlemlendiği kaynaklar, depremin kaynaklara olan merkezci uzaklıkları ve ardışık olarak ölçülmüş kaynaklara ait radon konsantrasyonu değerleri ve bağlı değişimleri Çizelge 4.32 ve bu değerler kullanılarak elde edilen grafik Şekil 4.32'de verilmiştir. Bu deprem için doğrusal uyumluluk değeri R^2 0,80 olarak elde edilmiştir.

Çizelge 4.32. 21.09.2010 Afyonkarahisar depremi, radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklıkları

21.09.2010 Afyonkarahisar Depremi (2,6 M)					
Kaynak No	Kaynak Adı	Kaynaklara Uzaklık	Rn (Bq/L)	13.09.2010	27.09.2010
		(km)	% değişim	Rn (Bq/L)	Rn (Bq/L)
2	Turkuaz Hayvan Çiftliği	24,66	84,40	2,04	3,76
3	Şeker Fabrikası	35,15	21,83	1,39	1,69
4	Heybeli Termal	44,15	42,80	0,27	0,39
8	Çay Belediye Bahçesi-700m	47,03	29,42	0,75	0,97
7	Çay Belediye Bahçesi-600m	47,09	-6,95	2,45	2,28
6	Kadıköy	51,13	-20,42	15,67	12,47
5	Maltepe	51,98	-0,84	3,91	3,88
9	Çay-Ören	54,44	-37,94	12,07	7,49
10	Ali Kaleli Mahallesi	58,49	4,60	6,56	6,87
13	Oğuz Mahallesi	71,91	-91,64	4,41	0,37

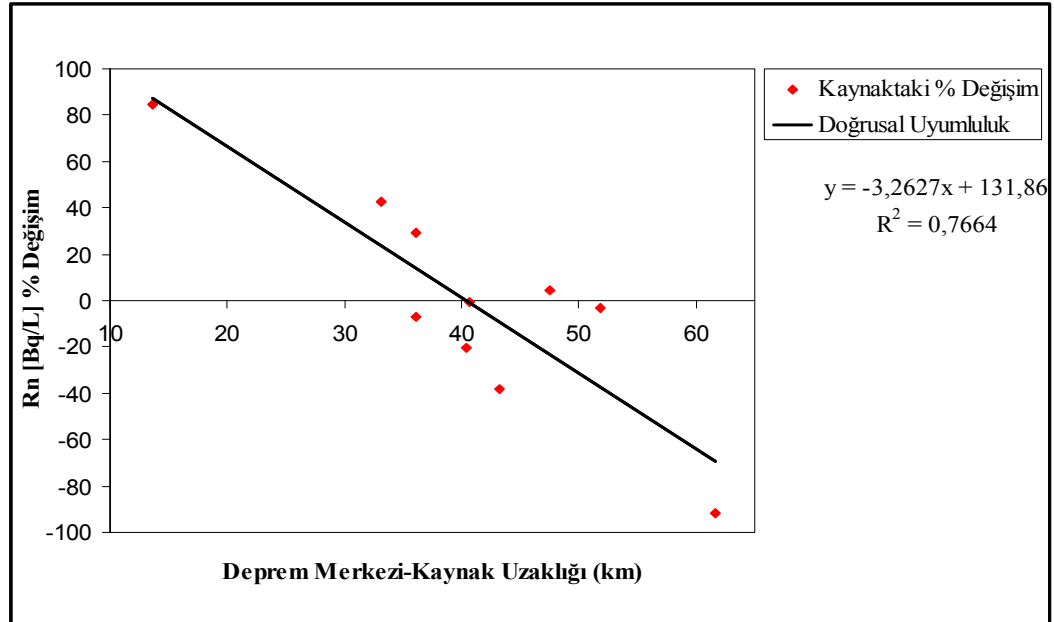


Şekil 4.32. 21.09.2010 Afyonkarahisar depreminin radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklık ilişkisi

24.09.2010 tarihinde Afyonkarahisar’da meydana gelen 3,1 M büyüklüğündeki depremin lineer etkisinin gözlemlendiği kaynaklar, depremin kaynaklara olan merkezci uzaklıkları, ardışık olarak ölçülmüş kaynaklara ait radon konsantrasyonu değerleri ve bağıl değişimleri Çizelge 4.33’de gösterilmiştir. Doğrusal uyumluluk değeri; R^2 0,77 olarak elde edilmiştir. Bu değerler kullanılarak elde edilen grafik Şekil 4.33’de verilmiştir.

Çizelge 4.33. 24.09.2010 Afyonkarahisar depremi, radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklıkları

24.09.2010 Afyonkarahisar Depremi (3,1 M)					
Kaynak No	Kaynak Adı	Kaynaklara Uzaklık	Rn (Bq/L)	13.09.2010	27.09.2010
		(km)	% değişim	Rn (Bq/L)	Rn (Bq/L)
2	Turkuaz Hayvan Çiftliği	13,58	84,40	2,04	3,76
4	Heybeli Termal	33,07	42,80	0,27	0,39
8	Çay Belediye Bahçesi-700m	36,07	29,42	0,75	0,97
7	Çay Belediye Bahçesi-600m	36,11	-6,95	2,45	2,28
6	Kadıköy	40,34	-20,42	15,67	12,47
5	Maltepe	40,72	-0,84	3,91	3,88
9	Çay-Ören	43,25	-37,94	12,07	7,49
10	Ali Kaleli Mahallesi	47,46	4,60	6,56	6,87
11	Çay Belediyesi Beton Santrali	51,88	-3,38	6,91	6,67
13	Oğuz Mahallesi	61,64	-91,64	4,41	0,37

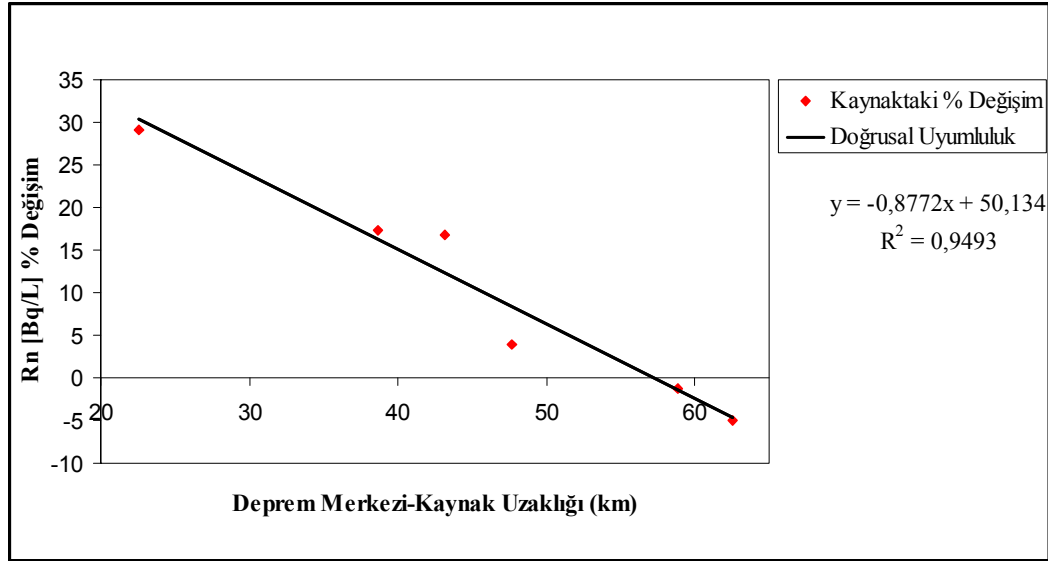


Şekil 4.33. 24.09.2010 Afyonkarahisar depreminin radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklık ilişkisi

Çizelge 4.34 Şuhut'da 27.07.2010 tarihinde meydana gelen 3,3 M büyüklüğündeki depremin lineer etkisinin gözlemlendiği kaynakları, depremin kaynaklara olan merkezci uzaklıklarını, ardışık olarak ölçülmüş kaynaklara ait radon konsantrasyonu değerlerini ve bağlı değişimlerini göstermektedir. Bu değerler kullanılarak elde edilen grafik Şekil 4.34'de verilmiştir. Bu deprem için doğrusal uyumluluk değeri; R^2 0,95 olarak elde edilmiştir.

Çizelge 4.34. 27.07.2010 Şuhut depremi, radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklıkları

27.07.2010 Şuhut Depremi (3,3 M)					
Kaynak No	Kaynak Adı	Kaynaklara Uzaklık	Rn (Bq/L)	12.07.2010	09.08.2010
		(km)	% değişim	Rn (Bq/L)	Rn (Bq/L)
3	Şeker Fabrikası	22,54	29,10	1,56	2,02
10	Ali Kaleli Mahallesi	38,65	17,36	9,31	10,93
11	Çay Belediyesi Beton Santrali	43,21	16,79	6,81	7,96
12	Çayırpınar	47,72	3,86	4,71	4,89
14	Alara Meyva Bahçesi	58,85	-1,29	5,13	5,06
15	Kirazlı Bahçe	62,51	-4,92	3,92	3,72



Şekil 4.34. 27.07.2010 Şuhut depreminin radon (%) değişimi-deprem merkezine uzaklık ilişkisi

5. SONUÇ VE TARTIŞMA

Yerkürenin en dış bölümünü oluşturan yer kabuğu ve litosferin hareketli özelliğinin bir sonucu olarak gelişen aktif tektonik deformasyonlar, deprem gibi engellenmesi mümkün olmayan doğal afetlere neden olmaktadır. Günümüzde depremler insan hayatına verdiği zarar nedeniyle diğerlerinden daha korkulan bir afet türü haline gelmiştir. Deprem, aktif sismik bölgelerde kilometrelerce derinliklerde meydana gelen karmaşık bir olaydır. Dünyanın birçok bölgesinde görülen yer kabuğu hareketleri birçok araştırmacıyı depremin önceden tahmin etme metodlarını ortaya çıkarmaya ve geliştirmeye yönlendirmiştir. Günümüze kadar yapılan bilimsel çalışmalarda depremin önceden tahminine yönelik olarak; sıcak ve soğuk su seviyesi değişimleri, jeotermal alanlarda yapılan sıcaklık değişimi ölçümleri, GPS ile yapılan hassas yer değiştirme ölçümleri, hayvanların davranışlarındaki değişimlerin izlenmesi vb. çalışmalar yapılmıştır ve yapılmaya da devam edilmektedir. Sularda ve toprakta radon gazı ölçümü de bu çalışmalarından biridir. 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). Bu çalışmaların hepsinden çıkan ortak sonuç; bir sismik hareketten 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. Yeryüzündeki ve yer kabuğu katmanlarında radon konsantrasyonundaki anomalilerin ve değişimlerin depremle bağlantısının incelenmesi, diğer çalışmalara veri sağlaması, deprem sonucu insanların uğradıkları maddi zarar ve can kayıplarının en aza indirilmesinde yarar sağlayabilirliği açısından önem arz etmektedir. Yapılan çok sayıda çalışmada 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; Igarashi ve ark. 1995; King ve ark. 1996; Monnin ve Seidel 1997; Wattananikorn ve ark. 1998; Planinic ve ark. 2001; Zmazek ve ark. 2002; Belin ve ark. 2002; Moussa ve ark. 2003; Zmazek ve ark. 2003; Zmazek ve ark. 2005; Baykara ve ark. 2005; Crockett ve ark. 2006; Zmazek ve ark. 2006; İnceöz ve ark. 2006; Kuo ve ark. 2006; Baykara ve Doğru 2006; Ghosh ve ark. 2007; Ereeş ve ark. 2007; Amponsah ve ark. 2008; İnan ve ark. 2008; Choubey ve ark. 2009; Ghosh ve ark. 2009; Baykara ve ark. 2009a; Baykara ve ark. 2009b; Papastefanou 2010; Utkin ve Yurkov 2010; Pierres ve ark. 2010; Perrier ve Richon 2010; Yüce ve ark. 2010; Baykut ve ark. 2010).

Bu tez çalışmasında, Akşehir fay hattı üzerinde bulunan 15 kaynak belirlenmiş ve bu kaynaklardan 17 Ağustos 2009–27 Eylül 2010 tarihleri arasında 27 kez su numuneleri alınmıştır. Her bir kaynaktan 15 günlük periyotlar halinde 54 hafta boyunca su numunesi toplanmıştır. Laboratuvar ortamına getirilen numuneler, içerdikleri radon konsantrasyonlarını belirlemek amacıyla incelenmiştir.

Yapılan analizlerden elde edilen sonuçlar iki farklı açıdan tartışılmıştır. Birincisinde, numune alım tarihi itibarıyla kaynakların ihtiva ettikleri radon konsantrasyonu seviyeleri hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar ile ilgili olarak grafikler çizilmiştir. Şekil 4.1 ile Şekil 4.15 arasında yer alan grafikler, her bir kaynaktan yapılan inceleme süresince gözlenen radon konsantrasyonunun numune alım zamanına göre değişimini göstermektedir. Bu sonuçlar 54 hafta boyunca bölgede kaydedilen depremlerle karşılaştırılmış ve radon-deprem ilişkisi açısından değerlendirilmiştir.

İkincisinde ise radon değişimlerinin deprem merkezine olan uzaklığını incelemek amacıyla, konumu belli olan kaynaklar ile deprem merkezleri arasındaki uzaklıklar bulunmuştur. Kaynakların, meydana gelen deprem tarihlerini kapsayan zamanlardaki radon konsantrasyonunun yüzde değişimleri hesaplanmıştır. Radon (%) değişim değerleri-kaynakların deprem merkezine olan uzaklık grafikleri çizilmiştir. Şekil 4.16 ile Şekil 4.34 arasında yer alan grafikler radon-deprem merkezine uzaklık ilişkisi açısından değerlendirilmiştir.

5.1. Radon Konsantrasyonlarının Numune Alım Zamanına Göre Değişim Bulguları

5.1.1. 1 nolu kaynak

1 nolu kaynak için ardışık ölçümler arasındaki bağıl değişimler, ölçüm tarihlerine yakın tarihlerde bölgede meydana gelen depremler, depremlerin büyüklükleri ve deprem merkezlerinin kaynağa olan radyal uzaklıkları Çizelge 5.1’de görülmektedir.

Çizelge 5.1. 1 nolu kaynaktaki değişimler ve depremler

Önceki Ölçüm		Sonraki Ölçüm		Değişim	Deprem			
Tarih	Aktivite [Bq/L]	Tarih	Aktivite [Bq/L]	%	Tarih	Büyüklik [M]	Merkez Üssü	Radyal Uzaklık [Km]
17.08.2009	12,13	14.09.2009	18,17	50	15.09.2009	3,9	Sultandağı	59,65
					15.09.2009	2,7	Sultandağı	64,69
					16.09.2009	2,9	Sultandağı	61,46
					16.09.2009	2,9	Sultandağı	62,55
					16.09.2009	2,9	Sultandağı	62,78
					19.09.2009	3	Bolvadin	54,33
19.04.2010	7,47	03.05.2010	8,73	17	07.05.2010	2,7	Çobanlar	19,38
17.05.2010	34,73	31.05.2010	33,54	-3	23.05.2010	2,7	Sultandağı	71,37
31.05.2010	33,54	14.06.2010	16,43	-51	03.06.2010	2,7	Sultandağı	67,7
					03.06.2010	2,9	Sultandağı	72,96
					03.06.2010	2,7	Sultandağı	71,1
					03.06.2010	3	Sultandağı	51,6
					14.06.2010	2,6	Bolvadin	54,17

1 nolu kaynaktaki 17.08.2009 ve 14.09.2009 tarihlerindeki iki ardışık ölçüm sonuçları görece olarak değerlendirildiğinde bu aralıkta kaynağın radon konsantrasyonu % 50 artış göstermiştir. 14.09.2009 tarihinden sonraki beş gün içinde bölgede büyüklükleri 2,7 M ile 3,9 M arasında değişen, beş tanesinin merkez üssü Sultandağı ve bir tanesi de Bolvadin olmak üzere toplam altı adet deprem kaydedilmiştir. Bu durum sismik hareketlerden önce kaynakların radon konsantrasyonlarının artacağına dair bulgularla uyum içindedir (Igarashi ve ark. 1995; Yasuokaa ve ark. 2005; Zmazek ve ark. 2002; Zmazek ve ark. 2006; Kuo ve ark. 2006; Papastefanou 2010; Yaprak ve ark. 2003; Ereeş ve ark. 2007).

Yine benzer durum 19.04.2010 ve 03.05.2010 tarihlerindeki ölçümlerde de gözlenmiştir. Bu dönemde kaynaktaki görelî değişim % 17 olarak gerçekleşmiş ve 07.05.2010 tarihinde merkez üssü Çobanlar olan 2,7 M büyüklüğünde deprem kaydedilmiştir.

Diğer yandan literatürde sismik hareketlerden sonra radon konsantrasyonunda azalma olacağı belirtilmektedir (Igarashi ve ark. 1995). Yapılan bu çalışmada bu varsayıma uygun bulgulara da ulaşılmıştır. Aynı kaynakta 17.05.2010 ve 31.05.2010 tarihlerinde yapılan ölçümler sonucu görelî değişim % 3 olarak hesaplanmış ve bir azalma olduğu tespit edilmiştir. Bu azalmanın nedeninin de 23.05.2010 tarihinde meydana gelen 2,7 M büyüklüğündeki deprem olduğu söylenebilir.

Bu durum 31.05.2010 ve 14.06.2010 tarihlerindeki ölçümlerde daha bariz bir şekilde gözlenmiştir. Bu tarihlerde görelî değişim % 51'lik azalma olarak tespit edilmiştir. İki tarih aralığında olacak şekilde Çizelge 5.1'de görülen ve büyüklükleri 2,7 M ile 3 M arasında değişen beş adet deprem kaydı olduğu görülmüştür.

5.1.2. 2 nolu kaynak

2 nolu kaynak için ardışık ölçümler arasındaki bağıl değişimler, ölçüm tarihlerine yakın tarihlerde bölgede meydana gelen depremler, depremlerin büyüklükleri ve deprem merkezlerinin kaynağa olan radyal uzaklıkları Çizelge 5.2’de görülmektedir.

Çizelge 5.2. 2 nolu kaynaktaki değişimler ve depremler

Önceki Ölçüm		Sonraki Ölçüm		Değişim	Deprem			
Tarih	Aktivite [Bq/L]	Tarih	Aktivite [Bq/L]	%	Tarih	Büyükük [M]	Merkez Üssü	Radyal Uzaklık [Km]
17.08.2009	2,6	14.09.2009	3,16	21,9	15.09.2009	3,9	Sultandağı	57,89
					15.09.2009	2,7	Sultandağı	62,92
					16.09.2009	2,9	Sultandağı	59,7
					16.09.2009	2,9	Sultandağı	60,86
					16.09.2009	2,9	Sultandağı	61,04
					19.09.2009	3	Bolvadin	52,6
07.12.2009	3,48	21.12.2009	4,7	35,2	13.12.2009	2,9	Bolvadin	59,03
					21.12.2009	3,6	Bolvadin	50,96
					21.12.2009	2,9	Bolvadin	51,82
					23.12.2009	3,2	Bolvadin	56,97
					25.12.2009	3,1	Çay	43,92
					26.12.2009	2,8	Bolvadin	54,51
18.01.2010	3,67	01.02.2010	10,04	173	25.01.2010	2,9	Şuhut	9,47
					02.02.2010	2,7	Çobanlar	13,17
					02.02.2010	2,7	Bolvadin	52,23
08.03.2010	4,52	22.03.2010	10,49	132	07.03.2010	3	Şuhut	32,87
					07.03.2010	2,6	Şuhut	28,79
					30.03.2010	2,8	Çay	35,73
05.04.2010	6,25	19.04.2010	10,18	63	04.04.2010	3,3	Çobanlar	23,28
17.05.2010	0,63	31.05.2010	6,03	854	23.05.2010	2,7	Sultandağı	69,66
14.06.2010	5,79	29.06.2010	13,87	140	14.06.2010	2,6	Bolvadin	49,88

2 nolu kaynaktaki değişimleri ve depremleri gösteren Çizelge 5.2 incelendiğinde, 17.08.2009 ve 14.09.2009 tarihlerinde kaynağın radon konsantrasyonu % 21,90 artış göstermiştir. 14.09.2009 tarihinden sonraki beş günde içinde büyüklükleri 2,7 M ile 3,9 M arasında değişen altı adet deprem meydana gelmiştir. Büyüklüğü 3 M olan depremin merkez üssü Bolvadin, diğer beş tanesinin merkez üssü ise Sultandağı’dır. 2 nolu kaynak, 17.08.2009 ve

14.09.2009 tarihlerindeki iki ardışık ölçüm zamanı için 1 nolu kaynak ile benzer bir davranış göstererek, sismik hareketlerden önce kaynakların radon konsantrasyonları artmıştır.

07.12.2009 ve 21.12.2009 tarihlerindeki ölçümlerde kaynaktaki radon konsantrasyonu görece değişimi % 35,2 olarak gerçekleşmiş ve bu tarih aralığında olan 13.12.2009 tarihinde merkez üssü Bolvadin olan 2,9 M büyüklüğünde bir deprem meydana gelmiştir. 21.12.2009 tarihinde ölçüm günüyle aynı günde 3,6 M ve 2,9 M büyüklüklerinde, merkez üssü Bolvadin olan iki deprem meydana gelmiştir. Bu tarihten iki gün sonra 23.12.2009 tarihinde merkez üssü Bolvadin olan 3,2 M; 25.12.2009 tarihinde merkez üssü Çay olan 3,1 M ve 26.12.2009 tarihinde ise merkez üssü Bolvadin olan 2,8 M büyüklüğünde depremler kaydedilmiştir. 18.01.2010 ve 01.02.2010 tarihlerinde iki ardışık ölçüm sonuçları görece olarak değerlendirildiğinde, bu aralıkta kaynağın radon konsantrasyonu % 173 artış göstermiştir. 25.01.2010 tarihinde merkez üssü Şuhut olan 2,9 M büyüklüğünde bir deprem; 01.02.2010 ölçüm tarihinin ertesi günü 02.02.2010 tarihinde merkez üssü Çobanlar ve Bolvadin olan büyüklükleri 2,7 M iki deprem kaydedilmiştir. Yine benzer durum 08.03.2010 ve 22.03.2010 tarihlerindeki ölçümlerde de gözlenmiştir. Bu dönemde kaynaktaki görece değişim % 132 olarak gerçekleşmiş ve 07.03.2010 tarihinde merkez üssü Şuhut, büyüklükleri 2,6 M ve 3 M olan iki deprem meydana gelmiştir. 30.03.2010 tarihinde merkez üssü Çay olan 2,8 M büyüklüğünde bir deprem kaydedilmiştir. 05.04.2010 ve 19.04.2010 tarihlerindeki radon konsantrasyonları ölçümlerinin görece olarak değerlendirilmesi sonucu yüzde değişim % 63 olarak bulunmuştur. 04.04.2010 tarihinde merkez üssü Çobanlar olan 3,3 M büyüklüğünde bir deprem meydana gelmiştir.

2 nolu kaynak en yüksek radon konsantrasyonu değişimini 17.05.2010 ve 31.05.2010 tarihlerindeki ardışık ölçümlerde göstermiştir. Bu tarihlerde kaynaktaki radon konsantrasyonu görece olarak değerlendirildiğinde % 854 artış göstermiştir. Bu tarihler aralığında 23.05.2010 tarihinde merkez üssü Sultandağı olan 2,7 M büyüklüğünde bir deprem meydana gelmiştir. 14.06.2010 ve 29.06.2010 tarihlerindeki ölçümlerde ise radon konsantrasyonu ölçüm sonuçlarındaki yüzde değişim % 140 bulunmuştur. Ölçümün alındığı gün olan

14.06.2010 tarihinde büyüklüğü 2,6 M ve merkez üssü Bolvadin olan bir deprem meydana gelmiştir. Tüm bu durumlar sismik hareketlerden önce, kaynakların radon konsantrasyonlarının artacağına dair bulgularla uyum içindedir (Igarashi ve ark. 1995; Yasuokaa ve ark. 2005; Zmazek ve ark. 2002; Zmazek ve ark. 2006; Kuo ve ark. 2006; Papastefanou 2010; Yaprak ve ark. 2003; Ereeş ve ark. 2007).

5.1.3. 3 nolu kaynak

3 nolu kaynak için ardışık ölçümler arasındaki bağıl değişimler, ölçüm tarihlerine yakın tarihlerde bölgede meydana gelen depremler, depremlerin büyüklükleri ve deprem merkezlerinin kaynağa olan radyal uzaklıkları Çizelge 5.3'de görülmektedir.

Çizelge 5.3. 3 nolu kaynaktaki değişimler ve depremler

Önceki Ölçüm		Sonraki Ölçüm		Değişim	Deprem			
Tarih	Aktivite [Bq/L]	Tarih	Aktivite [Bq/L]		Tarih	Büyükük [M]	Merkez Üssü	Radyal Uzaklık [Km]
17.08.2009	1,27	14.09.2009	2,2	73,64	15.09.2009	3,9	Sultandağı	48,3
					15.09.2009	2,7	Sultandağı	53,51
					16.09.2009	2,9	Sultandağı	50,21
					16.09.2009	2,9	Sultandağı	50,76
					16.09.2009	2,9	Sultandağı	51,26
					19.09.2009	3	Bolvadin	42,74
26.10.2009	0,74	09.11.2009	1,8	142	26.10.2009	2,6	Bolvadin	50,53
15.02.2010	1	08.03.2010	1,48	47,6	26.10.2009	2,6	Bolvadin	50,53
					25.02.2010	2,5	Çobanlar	9,59
					07.03.2010	3	Şuhut	33,4
					07.03.2010	2,6	Şuhut	27,56
08.03.2010	1,48	22.03.2010	2,73	84,8	07.03.2010	3	Şuhut	33,4
					07.03.2010	2,6	Şuhut	27,56
					30.03.2010	2,8	Çay	25,17

3 nolu kaynakta 17.08.2009 ve 14.09.2009 tarihlerinde iki ardışık ölçüm sonuçları görece olarak değerlendirildiğinde, bu aralıkta radon konsantrasyonu % 73,64'lük bir artış göstermiştir. 14.09.2009 tarihinden sonraki beş gün içinde bölgede büyüklükleri 2,7 M ile 3,9 M arasında değişen altı adet deprem kaydedilmiştir. Bu depremlerden büyüklüğü 3 M olan depremin merkez üssü

Bolvadin'dir. Diğer beş adet depremin merkez üssü ise Sultandağı'dır. Çizelge 5.3 incelendiğinde, kaynağın ardışık ölçüm tarihi olan 26.10.2009 ve 09.11.2009 tarihlerinde % 142'lik bir artış gösterdiği bulunmuştur. 26.10.2009 ölçüm tarihinde 2,6 M büyüklüğünde, merkez üssü Bolvadin olan bir deprem meydana gelmiştir. Benzer şekilde 15.02.2010 ve 08.03.2010 tarihlerindeki ölçümlerde kaynaktaki görelî değişim % 47,6 olarak gerçekleşmiştir. 26.10.2009 tarihinde merkez üssü Bolvadin olan 2,6 M; 25.02.2010 tarihinde merkez üssü Çobanlar olan 2,5 M; 07.03.2010 tarihinde merkez üssü Şuhut olan 2,6 M ve 3 M büyüklüklerinde depremler deprem meydana gelmiştir. 08.03.2010 ve 22.03.2010 tarihlerindeki iki ardışık ölçüm sonuçları görelî olarak değerlendirildiğinde, bu aralıkta kaynağın radon konsantrasyonu % 84,8 artış göstermiştir. Merkez üssü Şuhut olan 07.03.2010 tarihli 2,6 M ve 3 M büyüklüğünde iki deprem; 30.03.2010 tarihinde ise merkez üssü Çay olan 2,8 M büyüklüğünde bir deprem kaydı olduğu görülmüştür. Bu durum 1 ve 2 nolu kaynakta da görülen sismik hareketlerden önce kaynakların radon konsantrasyonlarının artacağına dair bulgularla uyum içindedir (Igarashi ve ark. 1995; Yasuokaa ve ark. 2005; Zmazek ve ark. 2002; Zmazek ve ark. 2006; Kuo ve ark. 2006; Papastefanou 2010; Yaprak ve ark. 2003; Ereeş ve ark. 2007).

5.1.4. 4 nolu kaynak

4 nolu kaynak için ardışık ölçümler arasındaki bağıl değişimler, ölçüm tarihlerine yakın tarihlerde bölgede meydana gelen depremler, depremlerin büyüklükleri ve deprem merkezlerinin kaynağa olan radyal uzaklıkları Çizelge 5.4'de görülmektedir.

Çizelge 5.4. 4 nolu kaynaktaki değişimler ve depremler

Önceki Ölçüm		Sonraki Ölçüm		Değişim	Deprem			
Tarih	Aktivite [Bq/L]	Tarih	Aktivite [Bq/L]	%	Tarih	Büyüklik [M]	Merkez Üssü	Radyal Uzaklık [Km]
17.08.2009	0,33	14.09.2009	0,5	47,15	15.09.2009	3,9	Sultandağı	40,29
					15.09.2009	2,7	Sultandağı	45,65
					16.09.2009	2,9	Sultandağı	42,29
					16.09.2009	2,9	Sultandağı	42,16
					16.09.2009	2,9	Sultandağı	37,19
					19.09.2009	3	Bolvadin	34,46
12.10.2009	0,45	26.10.2009	0,88	95,55	26.10.2009	2,6	Bolvadin	43,15
09.11.2009	0,28	23.11.2009	0,48	72,5	27.11.2009	2,8	Sultandağı	48,32
					29.11.2009	2,9	Sultandağı	42,32
					30.11.2009	3,6	Sultandağı	45,4
					30.11.2009	2,6	Sultandağı	42,89
21.12.2009	0,34	04.01.2010	0,523	51,8	21.12.2009	3,6	Bolvadin	33,01
					21.12.2009	2,9	Bolvadin	34,21
					23.12.2009	3,2	Bolvadin	40,17
					25.12.2009	3,1	Çay	24,34
					26.12.2009	2,8	Bolvadin	36,91
01.02.2010	0,26	15.02.2010	0,38	42,8	02.02.2010	2,7	Çobanlar	9,9
					02.02.2010	2,7	Bolvadin	34,91
15.02.2010	0,38	08.03.2010	0,56	48,2	25.02.2010	2,5	Çobanlar	1,1
					26.02.2010	2,6	Çobanlar	11,71
					07.03.2010	3	Şuhut	36,68
					07.03.2010	2,6	Şuhut	29,93
22.03.2010	0,37	05.04.2010	0,74	98,7	01.04.2010	3	Sultandağı	37,1
					02.04.2010	2,6	Bolvadin	11,46
					04.04.2010	3,3	Çobanlar	6,08
17.05.2010	0,25	31.15.2010	0,45	76,3	23.05.2010	2,7	Sultandağı	51,13
09.08.2010	0,23	23.08.2010	0,37	56,5	08.08.2010	2,8	Bolvadin	38,71
					08.08.2010	2,8	Sultandağı	46,52
					29.08.2010	3,3	Bolvadin	38,14
13.09.2010	0,27	27.09.2010	0,39	42,8	14.09.2010	2,9	Çay	26,84
					16.09.2010	2,6	Bolvadin	33,96
					21.09.2010	2,6	Afyonkarahisar	44,15
					24.09.2010	3,1	Afyonkarahisar	33,07

Çizelge 5.4 incelendiğinde 4 nolu kaynaktaki, 17.08.2009 ve 14.09.2009 tarihlerinde radon konsantrasyonu % 47,15 artış göstermiştir. 15.09.2009 tarihinde 3,9 M ve 2,7 M büyüklüğünde iki deprem; 16.09.2009 tarihinde 2,9 M

büyükliğinde üç deprem meydana gelmiştir. Toplam beş depremin de merkez üssü Sultandağı'dır. 19.09.2009 tarihinde ise büyüklüğü 3 M, merkez üssü Bolvadin olan bir deprem kaydedilmiştir. 12.10.2009 ve 26.10.2009 tarihlerindeki ölçümlerde kaynaktaki radon konsantrasyonu görelî değişimi % 95,55 olarak gerçekleşmiş ve 26.10.2009 tarihindeki ölçümle aynı günde merkez üssü Bolvadin olan 2,6 M büyüklüğünde bir deprem meydana gelmiştir. 09.11.2009 ve 23.11.2009 tarihlerindeki ölçümlerde kaynaktaki radon konsantrasyonu görelî değişimi % 72,5 olarak bulunmuştur. 27.11.2009 ve 30.11.2009 tarih ve aralıklarında büyüklükleri 2,6 M ve 3,6 M arasında değişen dört deprem kaydedilmiştir. Bu dört depremin de merkez üssü Sultandağı'dır. Yine benzer durum 21.12.2009 ve 04.01.2010 tarihlerindeki ölçümlerde de gözlenmiştir. Bu dönemde kaynaktaki görelî değişim % 51,8 olarak gerçekleşmiş ve ölçüm günü olan 21.12.2009 tarihinde merkez üssü Bolvadin'de, büyüklüğü 2,9 M ve 3,6 M olan iki deprem meydana gelmiştir. Bu depremlerden iki gün sonra 23.12.2009 tarihinde merkez üssü Bolvadin olan 3,2 M; 25.12.2009 tarihinde merkez üssü Çay olan 3,1 M ve 26.12.2009 tarihinde de merkez üssü Bolvadin olan 2,8 M büyüklüğünde depremler meydana gelmiştir.

4 nolu kaynakta 01.02.2010 ve 15.02.2010 tarihlerinde radon konsantrasyonunda % 42,8'lik bir yüzde değişim gözlenmiştir. 02.02.2010 tarihinde büyüklükleri 2,7 M merkez üssü Bolvadin ve Çobanlar olan iki deprem kaydedilmiştir. 15.02.2010 ve 08.03.2010 tarihlerindeki ölçümlerde kaynaktaki görelî değişim % 48,2 olarak gerçekleşmiştir. Merkez üssü Çobanlar olan 25.02.2010 tarihinde 2,5 M ve 26.02.2010 tarihinde 2,6 M; 07.03.2010 tarihinde merkez üssü Şuhut olan 3 M ve 2,6 M büyüklüklerinde depremler meydana gelmiştir. Bu kaynağın 22.03.2010 ve 05.04.2010 tarihlerindeki iki ardışık ölçüm sonuçları görelî olarak değerlendirildiğinde, bu aralıkta kaynağın radon konsantrasyonu % 98,7 artış göstermiştir. Deprem kayıtları incelendiğinde, 01.04.2010 tarihinde merkez üssü Sultandağı olan 3 M, 02.04.2010 tarihinde merkez üssü Bolvadin olan 2,6 M ve 04.04.2010 tarihinde merkez üssü Çobanlar olan 3,3 M büyüklüğünde depremler meydana gelmiştir.

En fazla değişim gösteren kaynaklardan biri olan 4 nolu kaynak 17.05.2010 ve 31.05.2010 tarihlerinde de % 76,3 artış göstermiş ve 23.05.2010

tarihinde merkez üssü Sultandağı olan 2,7 M büyüklüğünde bir deprem kaydedilmiştir. Kaynak radon konsantrasyonu artış yönündeki değişimine, 09.08.2010 ve 23.08.2010 tarihlerin de de devam etmiş ve % 56,5 artış göstermiştir. Çizelge 5.4 incelendiğinde, 08.08.2010 tarihinde merkez üssü Bolvadin ve Sultandağı olan 2,8 M büyüklüğünde iki deprem meydana gelmiştir. 29.08.2010 tarihinde ise merkez üssü Bolvadin olan 3,3 M büyüklüğünde bir deprem kaydedilmiştir. 13.09.2010 ve 27.09.2010 tarihlerindeki iki ardışık ölçüm sonuçları görelî olarak değerlendirildiğinde, kaynağın radon konsantrasyonunda % 42,8 artış bulunmuştur. 14.09.2010 tarihinde merkez üssü Çay olan 2,9 M; 16.09.2010 tarihinde merkez üssü Bolvadin olan 2,6 M; 21.09.2010 tarihinde merkez üssü Afyonkarahisar olan 2,6 M ve 24.09.2010 tarihinde merkez üssü Afyonkarahisar olan 3,1 M büyüklüğünde depremler meydana gelmiştir.

Tüm bu durumlar sismik hareketlerden önce kaynakların radon konsantrasyonlarının artacağına dair bulgularla uyum içindedir (Igarashi ve ark. 1995; Yasuokaa ve ark. 2005; Zmazek ve ark. 2002; Zmazek ve ark. 2006; Kuo ve ark. 2006; Papastefanou 2010; Yaprak ve ark. 2003; Ereeş ve ark. 2007).

4 nolu kaynakta yaklaşık 40 gün gözlenen radon konsantrasyon artışı sonucunda, özellikle Çobanlar ilçesinde görülen depremler dikkat çekici sonuçlardır; onbeş kaynaktan Çobanlar ilçesine en yakın kaynak 4 nolu kaynaktır. Ayrıca Çobanlar depremi bu kaynağa sadece 1,07 km uzakta oluşmuştur. 26.02.2010 tarihinde meydana gelen Çobanlar depreminin merkezinin kaynağa olan uzaklığı ise 12,09 km'dir. Diğer on beş kaynaktan çok daha fazla Çobanlar'a yakın olan bu kaynakta, Çobanlar ilçesinde meydana gelen depremler öncesi bir artış gözlenmesi oldukça anlamlı bir sonuçtur. Şekil 5.1'de 25.02.2010 tarihinde oluşan depremin, 4 nolu kaynağa ve diğer kaynaklara olan uzaklığı gösterilmektedir. 25.02.2010 tarihli bu depremin 4 nolu kaynağa olan uzaklığı sadece 1,10 km'dir.



Şekil 5.1. 25.02.2010 tarihli Çobanlar depreminin 4 nolu kaynağa ve diğer kaynaklara olan uzaklığı

5.1.5. 5 nolu kaynak

5 nolu kaynak için ardışık ölçümler arasındaki bağıl değişimler, ölçüm tarihlerine yakın tarihlerde bölgede meydana gelen depremler, depremlerin büyüklükleri ve deprem merkezlerinin kaynağa olan radyal uzaklıkları Çizelge 5.5’de görülmektedir.

Çizelge 5.5. 5 nolu kaynaktaki değişimler ve depremler

Önceki Ölçüm		Sonraki Ölçüm		Değişim	Deprem			
Tarih	Aktivite [Bq/L]	Tarih	Aktivite [Bq/L]	%	Tarih	Büyüklik [M]	Merkez Üssü	Radyal Uzaklık [Km]
17.08.2009	2,78	14.09.2009	5,9	111,8	15.09.2009	3,9	Sultandağı	34,89
					15.09.2009	2,7	Sultandağı	40,4
					16.09.2009	2,9	Sultandağı	37,01
					16.09.2009	2,9	Sultandağı	35,74
					16.09.2009	2,9	Sultandağı	37,19
					19.09.2009	3	Bolvadin	28,73
12.10.2009	2,1	26.10.2009	3,8	82	26.10.2009	2,6	Bolvadin	38,62

5 nolu kaynaktaki değişimleri ve depremleri gösteren bu çizelge incelendiğinde, 17.08.2009 ve 14.09.2009 tarihlerinde kaynağın radon konsantrasyonu % 111,8 artış göstermiştir. 15.09.2009 tarihinde 3,9 M ve 2,7 M büyüklüğünde iki deprem; 16.09.2009 tarihinde 2,9 M büyüklüğünde üç deprem meydana gelmiş olup, bu depremlerin merkez üssü Sultandağı’dır. 19.09.2009 tarihinde ise büyüklüğü 3 M, merkez üssü Bolvadin olan bir deprem kaydedilmiştir. Bu kaynakta 12.10.2009 ve 26.10.2009 tarihlerindeki iki ardışık ölçüm zamanı için % 82’lik bir değişim bulunmuştur. 26.10.2009 tarihindeki ölçüm gününde, merkez üssü Bolvadin olan 2,6 M büyüklüğünde bir deprem kaydedilmiştir. 5 nolu kaynakta meydana gelen radon konsantrasyonu değişimleri, sismik hareketlerden önce kaynakların radon konsantrasyonlarının artacağına dair bulgularla uyum içindedir (Igarashi ve ark. 1995; Yasuokaa ve ark. 2005; Zmazek ve ark. 2002; Zmazek ve ark. 2006; Kuo ve ark. 2006; Papastefanou 2010; Yaprak ve ark. 2003; Ereeş ve ark. 2007).

5.1.6. 6 nolu kaynak

6 nolu kaynak için ardışık ölçümler arasındaki bağıl değişimler, ölçüm tarihlerine yakın tarihlerde bölgede meydana gelen depremler, depremlerin büyüklükleri ve deprem merkezlerinin kaynağa olan radyal uzaklıkları Çizelge 5.6'da görülmektedir.

Çizelge 5.6. 6 nolu kaynaktaki değişimler ve depremler

Önceki Ölçüm		Sonraki Ölçüm		Değişim	Deprem			
Tarih	Aktivite [Bq/L]	Tarih	Aktivite [Bq/L]	%	Tarih	Büyükük [M]	Merkez Üssü	Radyal Uzaklık [Km]
17.08.2009	5,85	14.09.2009	13,4	128,9	15.09.2009	3,9	Sultandağı	33,27
					15.09.2009	2,7	Sultandağı	38,71
					16.09.2009	2,9	Sultandağı	35,33
					16.09.2009	2,9	Sultandağı	34,83
					16.09.2009	2,9	Sultandağı	35,84
					19.09.2009	3	Bolvadin	27,3

Radon konsantrasyonu değişimlerini ve depremleri gösteren Çizelge 5.6 da görüldüğü gibi, bu kaynakta 17.08.2009 ve 14.09.2009 tarihlerinde radon konsantrasyonu % 128,9 artış göstermiştir. 14.09.2009 tarihinden sonraki beş gün içinde bölgede büyüklükleri 2,7 M ile 3,9 M arasında değişen, beş tanesinin merkez üssü Sultandağı ve bir tanesi de Bolvadin olmak üzere toplam altı adet deprem kaydedilmiştir. Bu kaynak da literatürdeki sismik hareketlerden önce kaynakların radon konsantrasyonlarının artacağına dair bulgularla uyum içindedir (Igarashi ve ark. 1995; Yasuokaa ve ark. 2005; Zmazek ve ark. 2002; Zmazek ve ark. 2006; Kuo ve ark. 2006; Papastefanou 2010; Yaprak ve ark. 2003; Ereeş ve ark. 2007).

5.1.7. 7 nolu kaynak

7 nolu kaynak için ardışık ölçümler arasındaki bağıl değişimler, ölçüm tarihlerine yakın tarihlerde bölgede meydana gelen depremler, depremlerin büyüklükleri ve deprem merkezlerinin kaynağa olan radyal uzaklıkları Çizelge 5.7’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.7. 7 nolu kaynaktaki değişimler ve depremler

Önceki Ölçüm		Sonraki Ölçüm		Değişim	Deprem			
Tarih	Aktivite [Bq/L]	Tarih	Aktivite [Bq/L]	%	Tarih	Büyükük [M]	Merkez Üssü	Radyal Uzaklık [Km]
17.08.2009	0,88	14.09.2009	2,5	184,1	15.09.2009	3,9	Sultandağı	37,45
					15.09.2009	2,7	Sultandağı	42,85
					16.09.2009	2,9	Sultandağı	39,48
					16.09.2009	2,9	Sultandağı	39,16
					16.09.2009	2,9	Sultandağı	40,1
					19.09.2009	3	Bolvadin	31,55
12.10.2009	1,71	26.10.2009	2,9	70,76	26.10.2009	2,6	Bolvadin	40,5
18.01.2010	1,48	01.02.2010	2,75	86,4	25.01.2010	2,9	Şuhut	23,31
					02.02.2010	2,7	Çobanlar	12,16
					02.02.2010	2,7	Bolvadin	32,14

7 nolu kaynakta 17.08.2009 ve 14.09.2009 tarihlerinde kaynağın radon konsantrasyonu % 184,1 artış göstermiştir. Merkez üssü Sultandağı’nda 15.09.2009 tarihinde 3,9 M ve 2,7 M büyüklüğünde iki deprem; 16.09.2009 tarihinde 2,9 M büyüklüğünde üç deprem meydana gelmiştir. 19.09.2009 tarihinde ise büyüklüğü 3 M, merkez üssü Bolvadin olan bir deprem kaydedilmiştir. 12.10.2009 ve 26.10.2009 tarihlerindeki ölçümlerde kaynaktaki radon konsantrasyonu görece değişimi % 70,76 olarak gerçekleşmiş ve 26.10.2009 tarihinde merkez üssü Bolvadin olan 2,6 M büyüklüğünde bir deprem meydana gelmiştir. Benzer şekilde 18.01.2010 ve 01.02.2010 tarihlerindeki radon konsantrasyonlarının ölçümleri görece olarak değerlendirildiğinde, yüzde değişim % 86,4 olarak bulunmuştur. 25.01.2010 tarihinde merkez üssü Şuhut olan 2,9 M büyüklüğünde bir deprem; 02.02.2010 tarihinde büyüklükleri 2,7 M merkez üssü Bolvadin ve Çobanlar olan iki deprem kaydedilmiştir. Tüm bu durumlar sismik hareketlerden önce kaynakların radon konsantrasyonlarının artacağına dair

bulgularla uyum içindedir (Igarashi ve ark. 1995; Yasuokaa ve ark. 2005; Zmazek ve ark. 2002; Zmazek ve ark. 2006; Kuo ve ark. 2006; Papastefanou 2010; Yaprak ve ark. 2003; Ereeş ve ark. 2007).

5.1.8. 8 nolu kaynak

8 nolu kaynak için ardışık ölçümler arasındaki bağıl değişimler, ölçüm tarihlerine yakın tarihlerde bölgede meydana gelen depremler, depremlerin büyüklükleri ve deprem merkezlerinin kaynağa olan radyal uzaklıkları Çizelge 5.8'de görülmektedir.

Çizelge 5.8. 8 nolu kaynaktaki değişimler ve depremler

Önceki Ölçüm		Sonraki Ölçüm		Değişim	Deprem			
Tarih	Aktivite [Bq/L]	Tarih	Aktivite [Bq/L]	%	Tarih	Büyüklik [M]	Merkez Üssü	Radyal Uzaklık [Km]
18.01.2010	0,68	01.02.2010	1,2	76,54	25.01.2010	2,9	Şuhut	23,3
					02.02.2010	2,7	Çobanlar	12,06
					02.02.2010	2,7	Bolvadin	32,12
12.07.2010	1,04	09.08.2010	1,71	64,7	13.07.2010	2,8	Sultandağı	30,11
					17.07.2010	3,1	Çobanlar	1,23
					20.07.2010	2,9	Sultandağı	28,64
					20.07.2010	3	Sultandağı	42,97
					25.07.2010	2,8	Bolvadin	38,68
					25.07.2010	3,1	Sultandağı	37,5
					26.07.2010	2,9	Sultandağı	39,96
					08.08.2010	2,8	Bolvadin	36,08
					08.08.2010	2,8	Sultandağı	43,67

18.01.2010 ve 01.02.2010 tarihlerinde iki ardışık ölçüm sonuçları görelî olarak değerlendirildiğinde, bu aralıkta kaynağın radon konsantrasyonu % 76,54 artış göstermiştir. 25.01.2010 tarihinde merkez üssü Şuhut olan 2,9 M büyüklüğünde bir deprem; 02.02.2010 tarihinde büyüklükleri 2,7 M merkez üssü Bolvadin ve Çobanlar olan iki deprem kaydedilmiştir. 12.07.2010 ve 09.08.2010 tarihlerinde radon konsantrasyonu % 64,7 artış göstermiştir. Çizelge 5.8'den de görüldüğü gibi, bu kaynaktaki 13.07.2010 tarihinde merkez üssü Sultandağı olan 2,8 M; 17.07.2010 tarihinde merkez üssü Çobanlar olan 3,1 M; 20.07.2010 tarihinde

merkez üssü Sultandağı olan 2,9 M ve 3 M; 25.07.2010 tarihinde merkez üssü Bolvadin olan 2,8 M ve merkez üssü Sultandağı olan 3,1 M; 26.07.2010 tarihinde merkez üssü Sultandağı olan 2,9 M; 08.08.2010 tarihinde merkez üssü Bolvadin ve Sultandağı olan 2,8 M büyüklüğünde depremler meydana gelmiştir. 8 nolu kaynak da diğer yedi kaynaktaki gözlenen sismik hareketlerden önce kaynakların radon konsantrasyonlarının artacağına dair bulgularla uyum içindedir (Igarashi ve ark. 1995; Yasuokaa ve ark. 2005; Zmazek ve ark. 2002; Zmazek ve ark. 2006; Kuo ve ark. 2006; Papastefanou 2010; Yaprak ve ark. 2003; Ereeş ve ark. 2007).

5.1.9. 9 nolu kaynak

9 nolu kaynak için ardışık ölçümler arasındaki bağılı değişimler, ölçüm tarihlerine yakın tarihlerde bölgede meydana gelen depremler, depremlerin büyüklükleri ve deprem merkezlerinin kaynağa olan radyal uzaklıkları Çizelge 5.9'da görülmektedir.

Çizelge 5.9. 9 nolu kaynaktaki değişimler ve depremler

Önceki Ölçüm		Sonraki Ölçüm		Değişim	Deprem			
Tarih	Aktivite [Bq/L]	Tarih	Aktivite [Bq/L]		%	Tarih	Büyükük [M]	Merkez Üssü
17.08.2009	5,74	14.09.2009	10,13	76,5	15.09.2009	3,9	Sultandağı	32,7
					15.09.2009	2,7	Sultandağı	38,23
					16.09.2009	2,9	Sultandağı	34,83
					16.09.2009	2,9	Sultandağı	33,31
					16.09.2009	2,9	Sultandağı	34,89
					19.09.2009	3	Bolvadin	26,48
18.01.2010	8,21	01.02.2010	11,9	45,04	25.01.2010	2,9	Şuhut	29,55
					02.02.2010	2,7	Çobanlar	19,42
					02.02.2010	2,7	Bolvadin	27,88

9 nolu kaynaktaki 17.08.2009 ve 14.09.2009 tarihlerindeki iki ardışık ölçüm sonuçları görel olarak değerlendirildiğinde, bu aralıkta kaynağın radon konsantrasyonu % 76,5 artış göstermiştir. 15.09.2009 tarihinde 3,9 M ve 2,7 M büyüklüğünde iki deprem; 16.09.2009 tarihinde 2,9 M büyüklüğünde üç deprem meydana gelmiş olup, bu depremlerin merkez üssü Sultandağı'dır. 19.09.2009

tarihinde ise büyüklüğü 3 M, merkez üssü Bolvadin olan bir deprem kaydedilmiştir. 18.01.2010 ve 01.02.2010 tarihlerinde iki ardışık ölçüm sonuçları görel olarak değerlendirildiğinde, bu aralıkta kaynağın radon konsantrasyonu % 45,04 artış göstermiştir. 25.01.2010 tarihinde merkez üssü Şuhut olan 2,9 M büyüklüğünde bir deprem; 02.02.2010 tarihinde büyüklükleri 2,7 M merkez üssü Bolvadin ve Çobanlar olan iki deprem kaydedilmiştir. 9 nolu kaynak da literatürdeki sismik hareketlerden önce kaynakların radon konsantrasyonlarının artacağına dair bulgularla uyum içindedir (Igarashi ve ark. 1995; Yasuokaa ve ark. 2005; Zmazek ve ark. 2002; Zmazek ve ark. 2006; Kuo ve ark. 2006; Papastefanou 2010; Yaprak ve ark. 2003; Ereeş ve ark. 2007).

5.1.10. 10 nolu kaynak

10 nolu kaynak için ardışık ölçümler arasındaki bağıl değişimler, ölçüm tarihlerine yakın tarihlerde bölgede meydana gelen depremler, depremlerin büyüklükleri ve deprem merkezlerinin kaynağa olan radyal uzaklıkları Çizelge 5.10'da görülmektedir.

Çizelge 5.10. 10 nolu kaynaktaki değişimler ve depremler

Önceki Ölçüm		Sonraki Ölçüm		Değişim	Deprem			
Tarih	Aktivite [Bq/L]	Tarih	Aktivite [Bq/L]	%	Tarih	Büyükük [M]	Merkez Üssü	Radyal Uzaklık [Km]
17.08.2009	2,25	14.09.2009	9,8	335,6	15.09.2009	3,9	Sultandağı	28,87
					15.09.2009	2,7	Sultandağı	34,42
					16.09.2009	2,9	Sultandağı	31,04
					16.09.2009	2,9	Sultandağı	29,1
					16.09.2009	2,9	Sultandağı	30,87
					19.09.2009	3	Bolvadin	22,58
26.10.2009	5,5	09.11.2009	8,8	60,12	26.10.2009	2,6	Bolvadin	33,18
18.01.2010	5,78	01.02.2010	10,24	77,12	25.01.2010	2,9	Şuhut	33,88
					02.02.2010	2,7	Çobanlar	23,01
					02.02.2010	2,7	Bolvadin	24,31

17.08.2009 ve 14.09.2009 tarihlerinde 10 nolu kaynağın radon konsantrasyonu % 335,6 artış göstermiştir. Merkez üssü Sultandağı'nda 15.09.2009 tarihinde 3,9 M ve 2,7 M büyüklüğünde iki deprem; 16.09.2009

tarihinde 2,9 M büyüklüğünde üç deprem meydana gelmiştir. 19.09.2009 tarihinde ise merkez üssü Bolvadin, büyüklüğü 3 M olan bir deprem kaydedilmiştir. Benzer şekilde 26.10.2009 ve 09.11.2009 tarihlerindeki radon konsantrasyonlarının ölçümleri görelî olarak değerlendirildiğinde, yüzde değişim % 60,12 olarak bulunmuştur. Ölçüm günü olan 26.10.2009 tarihinde, merkez üssü Bolvadin olan 2,6 M büyüklüğünde bir deprem meydana gelmiştir. 18.01.2010 ve 01.02.2010 tarihlerindeki sonuçlar değerlendirildiğinde, bu aralıkta kaynağın radon konsantrasyonu % 77,12 artış göstermiştir. Merkez üssü Şuhut'da 25.01.2010 tarihinde 2,9 M büyüklüğünde bir deprem; merkez üssü Bolvadin ve Çobanlar'da ise 02.02.2010 tarihinde büyüklükleri 2,7 M olan iki deprem kaydedilmiştir. Bu durum sismik hareketlerden önce kaynakların radon konsantrasyonlarının artacağına dair bulgularla uyum içindedir (Igarashi ve ark. 1995; Yasuokaa ve ark. 2005; Zmazek ve ark. 2002; Zmazek ve ark. 2006; Kuo ve ark. 2006; Papastefanou 2010; Yaprak ve ark. 2003; Ereeş ve ark. 2007).

5.1.11. 11 nolu kaynak

11 nolu kaynak için ardışık ölçümler arasındaki bağıl değişimler, ölçüm tarihlerine yakın tarihlerde bölgede meydana gelen depremler, depremlerin büyüklükleri ve deprem merkezlerinin kaynağa olan radyal uzaklıkları Çizelge 5.11’de görülmektedir.

Çizelge 5.11. 11 nolu kaynaktaki değişimler ve depremler

Önceki Ölçüm		Sonraki Ölçüm		Değişim	Deprem			
Tarih	Aktivite [Bq/L]	Tarih	Aktivite [Bq/L]	%	Tarih	Büyüklik [M]	Merkez Üssü	Radyal Uzaklık [Km]
17.08.2009	5,88	14.09.2009	7,86	33,67	27.08.2009	2,9	Sultandağı	16,78
					15.09.2009	3,9	Sultandağı	24,74
					15.09.2009	2,7	Sultandağı	30,28
					16.09.2009	2,9	Sultandağı	26,94
					16.09.2009	2,9	Sultandağı	24,54
					16.09.2009	2,9	Sultandağı	26,52
					19.09.2009	3	Bolvadin	18,4
18.01.2010	5,15	01.02.2010	8,06	56,36	25.01.2010	2,9	Şuhut	38,51
					02.02.2010	2,7	Çobanlar	26,9
					02.02.2010	2,7	Bolvadin	20,55

11 nolu kaynakta 17.08.2009 ve 14.09.2009 tarihlerindeki iki ardışık radon konsantrasyonu ölçüm sonuçları görece olarak değerlendirildiğinde, bu aralıkta kaynağın radon konsantrasyonu % 33,67 artış göstermiştir. Merkez üssü Sultandağı’nda 27.08.2009 tarihinde 2,9 M büyüklüğünde bir deprem; 15.09.2009 tarihinde 3,9 M ve 2,7 M büyüklüğünde iki deprem; 16.09.2009 tarihinde 2,9 M büyüklüğünde üç deprem meydana gelmiştir. 19.09.2009 tarihinde ise merkez üssü Bolvadin, büyüklüğü 3 M olan bir deprem kaydedilmiştir. 18.01.2010 ve 01.02.2010 tarihlerindeki sonuçlar görece olarak değerlendirildiğinde, bu aralıkta kaynağın radon konsantrasyonu % 56,36 artış göstermiştir. 25.01.2010 tarihinde merkez üssü Şuhut olan 2,9 M büyüklüğünde bir deprem; 02.02.2010 tarihinde büyüklükleri 2,7 M merkez üssü Bolvadin ve Çobanlar olan iki deprem kaydedilmiştir. Tüm bu durumlar sismik hareketlerden önce kaynakların radon konsantrasyonlarının artacağına dair bulgularla uyum içindedir (Igarashi ve ark.

1995; Yasuokaa ve ark. 2005; Zmazek ve ark. 2002; Zmazek ve ark. 2006; Kuo ve ark. 2006; Papastefanou 2010; Yaprak ve ark. 2003; Ereeş ve ark. 2007).

5.1.12. 12 nolu kaynak

12 nolu kaynak için ardışık ölçümler arasındaki bağıl değişimler, ölçüm tarihlerine yakın tarihlerde bölgede meydana gelen depremler, depremlerin büyüklükleri ve deprem merkezlerinin kaynağa olan radyal uzaklıkları Çizelge 5.12'de görülmektedir.

Çizelge 5.12. 12 nolu kaynaktaki değişimler ve depremler

Önceki Ölçüm		Sonraki Ölçüm		Değişim	Deprem			
Tarih	Aktivite [Bq/L]	Tarih	Aktivite [Bq/L]	%	Tarih	Büyükük [M]	Merkez Üssü	Radyal Uzaklık [Km]
17.08.2009	0,23	14.09.2009	5,2	2200,88	27.08.2009	2,9	Sultandağı	12,82
					15.09.2009	3,9	Sultandağı	21,21
					15.09.2009	2,7	Sultandağı	26,68
					16.09.2009	2,9	Sultandağı	23,42
					16.09.2009	2,9	Sultandağı	20,16
					16.09.2009	2,9	Sultandağı	22,55
26.10.2009	3,98	09.11.2009	5,29	32,9	26.10.2009	2,6	Bolvadin	26,48
18.01.2010	3,63	01.02.2010	5,47	50,76	25.01.2010	2,9	Şuhut	43,23
					02.02.2010	2,7	Çobanlar	31,35
					02.02.2010	2,7	Bolvadin	17,73
09.08.2010	4,89	23.08.2010	6,36	29,83	08.08.2010	2,8	Bolvadin	23,28
					08.08.2010	2,8	Sultandağı	26,93
					29.08.2010	3,3	Bolvadin	21,15

12 nolu kaynakta 17.08.2009 ve 14.09.2009 tarihlerindeki iki ardışık ölçüm sonuçları görelî olarak değerlendirildiğinde, bu aralıkta kaynağın radon konsantrasyonu % 2200,88 artış göstermiştir. 27.08.2009 tarihinde 2,9 M büyüklüğünde bir deprem; 15.09.2009 tarihinde 3,9 M ve 2,7 M büyüklüğünde iki deprem; 16.09.2009 tarihinde 2,9 M büyüklüğünde üç deprem meydana gelmiştir. Bu altı depremin de merkez üssü Sultandağı'dır. 19.09.2009 tarihinde ise merkez üssü Bolvadin, büyüklüğü 3 M olan bir deprem kaydedilmiştir. Benzer şekilde 26.10.2009 ve 09.11.2009 tarihlerindeki radon konsantrasyonlarının ölçümleri

görelî olarak değerlendirildiğinde, yüzde değişim % 32,9 olarak bulunmuştur. Merkez üssü Bolvadin’de 26.10.2009 tarihinde 2,6 M büyüklüğünde bir deprem meydana gelmiştir.

18.01.2010 ve 01.02.2010 tarihlerindeki sonuçlar değerlendirildiğinde, bu aralıkta kaynağın radon konsantrasyonu % 50,76 artış göstermiştir. Merkez üssü Şuhut’da 25.01.2010 tarihinde 2,9 M büyüklüğünde bir deprem; merkez üssü Bolvadin ve Çobanlar’da ise 02.02.2010 tarihinde büyüklükleri 2,7 M olan iki deprem kaydedilmiştir. 09.08.2010 ve 23.08.2010 tarihli ardışık ölçüm sonuçları incelendiğinde, yüzde değişim % 29,83 olarak hesaplanmıştır. 08.08.2010 tarihinde 2,8 M büyüklüğünde, merkez üssü Bolvadin ve Sultandağı olan iki deprem kaydedilmiştir. 29.08.2010 tarihinde ise merkez üssü Bolvadin olan 3,3 M büyüklüğünde bir deprem meydana gelmiştir. Bu kaynak da literatürdeki sismik hareketlerden önce kaynakların radon konsantrasyonlarının artacağına dair bulgularla uyum içindedir (Igarashi ve ark. 1995; Yasuokaa ve ark. 2005; Zmazek ve ark. 2002; Zmazek ve ark. 2006; Kuo ve ark. 2006; Papastefanou 2010; Yaprak ve ark. 2003; Ereeş ve ark. 2007).

5.1.13. 13 nolu kaynak

13 nolu kaynak için ardışık ölçümler arasındaki bağıl değişimler, ölçüm tarihlerine yakın tarihlerde bölgede meydana gelen depremler, depremlerin büyüklükleri ve deprem merkezlerinin kaynağa olan radyal uzaklıkları Çizelge 5.13'de görülmektedir.

Çizelge 5.13. 13 nolu kaynaktaki değişimler ve depremler

Önceki Ölçüm		Sonraki Ölçüm		Değişim	Deprem			
Tarih	Aktivite [Bq/L]	Tarih	Aktivite [Bq/L]		%	Tarih	Büyükklük [M]	Merkez Üssü
17.08.2009	0,07	14.09.2009	2,43	3318	27.08.2009	2,9	Sultandağı	6,74
					15.09.2009	3,9	Sultandağı	15,33
					15.09.2009	2,7	Sultandağı	20,68
					16.09.2009	2,9	Sultandağı	17,52
					16.09.2009	2,9	Sultandağı	13,97
					16.09.2009	2,9	Sultandağı	16,38
					19.09.2009	3	Bolvadin	9,22
12.10.2009	0,65	26.10.2009	1,33	104,6	26.10.2009	2,6	Bolvadin	21,02
09.11.2009	0,66	23.11.2009	3,13	374,2	27.11.2009	2,8	Sultandağı	22,33
					29.11.2009	2,9	Sultandağı	15,77
					30.11.2009	3,6	Sultandağı	18,71
					30.11.2009	2,6	Sultandağı	14,49
07.12.2009	0,49	21.12.2009	0,8	64,55	13.12.2009	2,9	Bolvadin	18,41
					21.12.2009	3,6	Bolvadin	9,21
					21.12.2009	2,9	Bolvadin	11,22
					23.12.2009	3,2	Bolvadin	17,7
					25.12.2009	3,1	Çay	10,43
					26.12.2009	2,8	Bolvadin	12,87
21.12.2009	0,8	04.01.2010	2,44	203,7	21.12.2009	3,6	Bolvadin	9,21
					21.12.2009	2,9	Bolvadin	11,22
					23.12.2009	3,2	Bolvadin	17,7
					25.12.2009	3,1	Çay	10,43
					26.12.2009	2,8	Bolvadin	12,87
15.02.2010	0,51	08.03.2010	3,62	607,35	25.02.2010	2,5	Çobanlar	28,63
					26.02.2010	2,6	Çobanlar	37,37
					07.03.2010	3	Şuhut	59,84
					07.03.2010	2,6	Şuhut	52,67
19.04.2010	2,9	03.05.2010	5,44	87,35	07.05.2010	2,7	Çobanlar	30,92
23.08.2010	0,31	13.09.2010	4,41	1322	29.08.2010	3,3	Bolvadin	15,88
					14.09.2010	2,9	Çay	5,45
					16.09.2010	2,6	Bolvadin	11,04

13 nolu kaynakta 17.08.2009 ve 14.09.2009 tarihlerindeki iki ardışık radon konsantrasyonu ölçüm sonuçları görelî olarak değerlendirildiğinde, bu aralıkta kaynağın radon konsantrasyonu % 3318 artış göstermiştir. Bu tarih aralığında, tüm kaynaklar içinde radon konsantrasyonunun yüzde olarak en büyük artışı bu kaynakta gerçekleşmiştir. Merkez üssü Sultandağı'nda 27.08.2009 tarihinde 2,9 M büyüklüğünde bir deprem; 15.09.2009 tarihinde 3,9 M ve 2,7 M büyüklüğünde iki deprem; 16.09.2009 tarihinde 2,9 M büyüklüğünde üç deprem kaydedilmiştir. 19.09.2009 tarihinde merkez üssü Bolvadin'de büyüklüğü 3 M olan bir deprem meydana gelmiştir. 12.10.2009 ve 26.10.2009 tarihlerindeki ölçümlerde kaynaktaki radon konsantrasyonu görelî değişimi % 104,6 olarak gerçekleşmiştir. 26.10.2009 tarihinde merkez üssü Bolvadin olan 2,6 M büyüklüğünde bir deprem kaydedilmiştir. 09.11.2009 ve 23.11.2009 tarihlerindeki ölçümlerde kaynaktaki radon konsantrasyonu görelî değişimi % 374,2 olarak bulunmuştur. 27.11.2009 tarihinde 2,8 M; 29.11.2009 tarihinde 2,9 M; 30.11.2009 tarihinde 2,6 M ve 3,6 M büyüklüklerinde olmak üzere dört deprem meydana gelmiştir. Bu dört depremin de merkez üssü Sultandağı'dır. 07.12.2009 ve 21.12.2009 tarihlerindeki ölçümlerde kaynaktaki radon konsantrasyonu görelî değişimi % 64,55 olarak gerçekleşmiştir. 13.12.2009 tarihinde merkez üssü Bolvadin'de 2,9 M büyüklüğünde, 21.12.2009 tarihinde merkez üssü yine Bolvadin'de büyüklüğü 2,9 M ve 3,6 M olan iki deprem meydana gelmiştir. 23.12.2009 tarihinde merkez üssü Bolvadin olan 3,2 M; 25.12.2009 tarihinde merkez üssü Çay olan 3,1 M ve 26.12.2009 tarihinde de merkez üssü Bolvadin olan 2,8 M büyüklüğünde depremler meydana gelmiştir. Yine benzer durum 21.12.2009 ve 04.01.2010 tarihlerindeki ölçümlerde de gözlenmiştir. Bu dönemde kaynaktaki görelî değişim % 203,7 olarak gerçekleşmiş ve ölçüm günü olan 21.12.2009 tarihinde merkez üssü Bolvadin, büyüklüğü 2,9 M ve 3,6 M olan iki deprem meydana gelmiştir. Bu depremlerden iki gün sonra 23.12.2009 tarihinde merkez üssü Bolvadin olan 3,2 M; 25.12.2009 tarihinde merkez üssü Çay olan 3,1 M ve 26.12.2009 tarihinde de merkez üssü Bolvadin olan 2,8 M büyüklüğünde üç deprem meydana gelmiştir.

En fazla ardışık ölçüm zamanı değişimi gösteren kaynak olan 13 nolu kaynakta, 15.02.2010 ve 08.03.2010 tarihlerindeki radon konsantrasyonu görelî

değişimi % 607,35'dir. Merkez üssü Çobanlar olan 25.02.2010 tarihinde 2,5 M ve 26.02.2010 tarihinde 2,6 M; 07.03.2010 tarihinde merkez üssü Şuhut olan 3 M ve 2,6 M büyüklüklerinde depremler meydana gelmiştir. 19.04.2010 ve 03.05.2010 tarihleri için de benzer durum gerçekleşmiş ve yüzde değişim % 87,35 olarak bulunmuştur. 07.05.2010 tarihinde merkez üssü Çobanlar olan 2,7 M büyüklüğünde bir deprem meydana gelmiştir. 13 nolu kaynakta, 23.08.2010 ve 13.09.2010 tarihlerindeki radon konsantrasyonu sonuçları incelendiğinde % 1322'lik bir artış gözlenmiştir. Çizelge 5.13'den de görüldüğü gibi, 29.08.2010 tarihinde merkez üssü Bolvadin olan 3,3 M; 14.09.2010 tarihinde merkez üssü Çay olan 2,9 M ve 16.09.2010 tarihinde merkez üssü Bolvadin olan 2,6 M büyüklüğünde üç deprem kaydedilmiştir. Tüm bu durumlar sismik hareketlerden önce kaynakların radon konsantrasyonlarının artacağına dair bulgularla uyum içindedir (Igarashi ve ark. 1995; Yasuokaa ve ark. 2005; Zmazek ve ark. 2002; Zmazek ve ark. 2006; Kuo ve ark. 2006; Papastefanou 2010; Yaprak ve ark. 2003; Ereeş ve ark. 2007).

5.1.14. 14 nolu kaynak

14 nolu kaynak için ardışık ölçümler arasındaki bağıl değişimler, ölçüm tarihlerine yakın tarihlerde bölgede meydana gelen depremler, depremlerin büyüklükleri ve deprem merkezlerinin kaynağa olan radyal uzaklıkları Çizelge 5.14'de görülmektedir.

Çizelge 5.14. 14 nolu kaynaktaki değişimler ve depremler

Önceki Ölçüm		Sonraki Ölçüm		Değişim	Deprem			
Tarih	Aktivite [Bq/L]	Tarih	Aktivite [Bq/L]	%	Tarih	Büyükük [M]	Merkez Üssü	Radyal Uzaklık [Km]
17.08.2009	0,44	14.09.2009	5,03	1056,3	15.09.2009	3,9	Sultandağı	14,84
					15.09.2009	2,7	Sultandağı	19,32
					16.09.2009	2,9	Sultandağı	16,72
					16.09.2009	2,9	Sultandağı	10,33
					16.09.2009	2,9	Sultandağı	14,29
					19.09.2009	3	Bolvadin	10,44
26.10.2009	3,68	09.11.2009	4,93	33,97	26.10.2009	2,6	Bolvadin	21,26

14 nolu kaynakta 17.08.2009 ve 14.09.2009 tarihlerindeki iki ardışık ölçüm sonuçlarında, radon konsantrasyonu % 1056,3'lük artış göstermiştir. 14.09.2009 tarihinden sonraki beş gün içinde bölgede büyüklükleri 2,7 M ile 3,9 M arasında değişen, beş tanesinin merkez üssü Sultandağı ve bir tanesi de Bolvadin olmak üzere toplam altı adet deprem kaydedilmiştir. 26.10.2009 ve 09.11.2009 tarihlerindeki radon konsantrasyonlarının ölçümleri görel olarak değerlendirildiğinde, yüzde değişim % 33,97 olarak bulunmuştur. 26.10.2009 tarihinde merkez üssü Bolvadin olan 2,6 M büyüklüğünde bir deprem meydana gelmiştir. Bu kaynak da literatürdeki sismik hareketlerden önce kaynakların radon konsantrasyonlarının artacağına dair bulgularla uyum içindedir (Igarashi ve ark. 1995; Yasuokaa ve ark. 2005; Zmazek ve ark. 2002; Zmazek ve ark. 2006; Kuo ve ark. 2006; Papastefanou 2010; Yaprak ve ark. 2003; Ereeş ve ark. 2007).

5.1.15. 15 nolu kaynak

15 nolu kaynak için ardışık ölçümler arasındaki bağıl değişimler, ölçüm tarihlerine yakın tarihlerde bölgede meydana gelen depremler, depremlerin büyüklükleri ve deprem merkezlerinin kaynağa olan radyal uzaklıkları Çizelge 5.15'de görülmektedir.

Çizelge 5.15. 15 nolu kaynaktaki değişimler ve depremler

Önceki Ölçüm		Sonraki Ölçüm		Değişim	Deprem			
Tarih	Aktivite [Bq/L]	Tarih	Aktivite [Bq/L]		%	Tarih	Büyüklük [M]	Merkez Üssü
17.08.2009	0,6	14.09.2009	3	400	15.09.2009	3,9	Sultandağı	22,48
					15.09.2009	2,7	Sultandağı	25,71
					16.09.2009	2,9	Sultandağı	23,94
					16.09.2009	2,9	Sultandağı	15,71
					16.09.2009	2,9	Sultandağı	20,6
					19.09.2009	3	Bolvadin	19,46
12.10.2009	1,97	26.10.2009	3,42	73,6	26.10.2009	2,6	Bolvadin	28,93

15 nolu kaynakta 17.08.2009 ve 14.09.2009 tarihlerindeki iki ardışık radon konsantrasyonu ölçüm sonuçları görel olarak değerlendirildiğinde, bu

aralıkta kaynağın radon konsantrasyonunda % 400 artış bulunmuştur. Merkez üssü Sultandağı'nda 15.09.2009 tarihinde 3,9 M ve 2,7 M büyüklüğünde iki deprem; 16.09.2009 tarihinde 2,9 M büyüklüğünde üç deprem meydana gelmiştir. Merkez üssü Bolvadin'de 19.09.2009 tarihinde büyüklüğü 3 M olan bir deprem kaydedilmiştir. 12.10.2009 ve 26.10.2009 tarihlerindeki ölçümlerde görelî değişim % 73,60 olarak gerçekleşmiş ve 26.10.2009 tarihinde merkez üssü Bolvadin olan 2,6 M büyüklüğünde bir deprem meydana gelmiştir. 15 nolu kaynak da literatürdeki sismik hareketlerden önce kaynakların radon konsantrasyonlarının artacağına dair bulgularla uyum içindedir (Igarashi ve ark. 1995; Yasuokaa ve ark. 2005; Zmazek ve ark. 2002; Zmazek ve ark. 2006; Kuo ve ark. 2006; Papastefanou 2010; Yaprak ve ark. 2003; Ereeş ve ark. 2007).

On beş kaynaktan elde edilen su numunelerinin radon konsantrasyon değişimlerinin çizelge ve şekilleri incelendiğinde (Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.15 ile Şekil 4.1 ve Şekil 4.15), depremlerin çoğunun radon çıkışındaki artmayı izleyen azalma sürecinde meydana geldiği görülmüştür.

Elde edilen bulgulara göre, bu tez çalışmasında bir depremden önce radon konsantrasyonlarında artışlar gözlenmiştir. Yapılan çalışmalarda radon artışlarındaki maksimum değişimlerin deprem izleyicisi olmaları bakımından deprem öncesinde meydana geldiği belirtilmiştir (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; Igarashi ve ark. 1995; King ve ark. 1996; Monnin ve Seidel 1997; Wattananikorn ve ark. 1998; Planinic ve ark. 2001; Zmazek ve ark. 2002; Belin ve ark. 2002; Moussa ve ark. 2003; Zmazek ve ark. 2003; Zmazek ve ark. 2005; Baykara ve ark. 2005; Crockett ve ark. 2006; Zmazek ve ark. 2006; İnceöz ve ark. 2006; Kuo ve ark. 2006; Baykara ve Doğru 2006; Ghosh ve ark. 2007; Ereeş ve ark. 2007; Amponsah ve ark. 2008; İnan ve ark. 2008; Choubey ve ark. 2009; Ghosh ve ark. 2009; Baykara ve ark. 2009a; Baykara ve ark. 2009b; Papastefanou 2010; Utkin ve Yurkov 2010; Pierres ve ark. 2010; Perrier ve Richon 2010; Yüce ve ark. 2010; Baykut ve ark. 2010). Söz konusu bu durumu, daha önce ayrıntıları tek tek verilen kaynakların bir deprem öncesindeki radon konsantrasyon davranışlarından da anlaşılacağı gibi, bu tez çalışmasında da

gözlemek mümkündür. İncelenen kaynakların hepsinde farklı tarihlerde de olsa deprem hareketi ile ilişkilendirilebilecek radon konsantrasyonları artışları tespit edilmiştir. Literatürde bahsedilen herhangi bir kaynaktaki radon konsantrasyonu artışının kaynağa yakın meydana gelen bir deprem sonrasında azalma göstermesi, bu tez çalışmasında incelenen kaynaklarda da tespit edilmiştir.

Yaprak ve arkadaşları (2003) tarafından Gediz Graben sisteminde yer alan Alaşehir bölgesindeki aktif faylarda yapılan çalışma sonucunda, Alaşehir fay sisteminde oluşan 3 M büyüklüğündeki depremlerden önce ve sonra bazı istasyonlarda gözlenen radon anomalilerinin pik yüksekliğinin yaklaşık ortalamanın 3 katı olduğu saptanmıştır. Yaklaşık 14 ay süren bu çalışmada da onbeş kaynaktaki daha önce bahsedilen çeşitli oranlarda kat artışları gözlenmiştir. Bu çalışmalardan 3 katın üzerinde olan artışlar Çizelge 5.16’da gösterilmektedir.

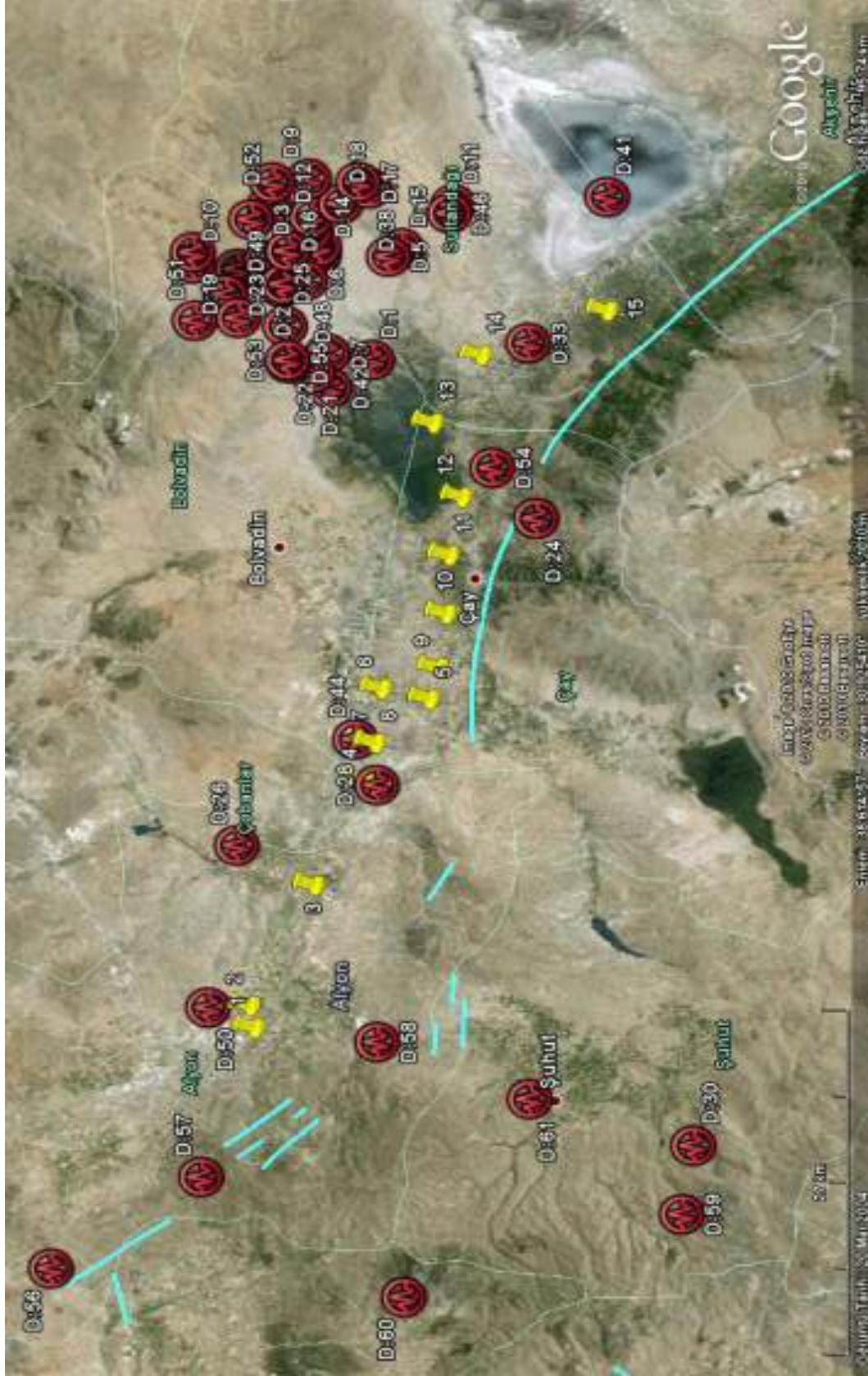
Çizelge 5.16. 17.08.2009–27.09.2010 tarihlerinde 15 kaynak içinde radon konsantrasyonlarında 3 kattan fazla artışın görüldüğü kaynaklar

Kaynak No	Tarih	Oran
1	03.05.2010–17.05.2010	3,98
2	17.05.2010–31.05.2010	9,54
10	17.08.2009–14.09.2009	4,36
12	17.08.2009–14.09.2009	23
13	17.08.2009–14.09.2009	34,17
13	09.11.2009–23.11.2009	4,74
13	21.12.2009–04.01.2010	3,04
13	15.02.2010–08.03.2010	8
13	23.08.2010–13.02.2010	14,22
14	17.08.2009–14.09.2009	11,56
15	17.08.2009–14.09.2009	5

Bu çizelgeden de anlaşılacağı üzere, bir deprem öncesinde en yüksek artışı 17.08.2009–14.09.2009 tarihlerindeki numune alımlarında 13 nolu kaynak göstermiştir. 13 nolu kaynağın 17.08.2009 tarihinde alınan su numunesinin radon konsantrasyon değeri, 14.09.2009 tarihinde 34,17 katına çıkarak bir pik yapmıştır (Şekil 4.13). Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü’nün deprem kayıtları incelendiğinde; 27.08.2009 tarihinde Sultandağı ilçesinde 2,9 M; 15.09.2009 tarihinde yine Sultandağı ilçesinde 3,9 M ve yine

15.09.2009 tarihinde 2,7 M; 16.09.2010 tarihinde Sultandağı ilçesinde saat 02:06'da 2,9 M; 10: 57'de 2,9 M ve 10:58'de de 2,9 M; 19.09.2009 tarihinde ise Bolvadin ilçesinde 3 M büyüklüğünde depremler meydana gelmiştir. Bu depremler öncesi 13 nolu kaynakta görülen bu 34,17 katlık pik, çok dikkat çekici bir sonuçtur. 13 nolu kaynakta 14.09.2009 tarihinde radon konsantrasyonundaki bu ani artıştan sonra, Sultandağı'nda 27.08.2009 tarihinden başlayarak 19.09.2009 tarihine kadar bir dizi deprem meydana gelmiştir. Bu depremler içerisinde, özellikle 15.09.2009 tarihinde meydana gelen 3,9 M büyüklüğündeki Sultandağı depremi, en önemli depremdir. 54 haftalık çalışma periyodu boyunca en yüksek deprem kaydı olan bu deprem öncesinde, özellikle 13 nolu kaynakta görülen 34,17 kat artışı şu açıdan da ayrı bir anlamlıdır. Şekil 5.2'de görüldüğü gibi, bu kaynak bu depreme onbeş kaynak içerisinde en yakın olan kaynaktır. 13 nolu kaynaktaki bu artış 3,9 M büyüklüğündeki depremler dışındaki diğer 6 depremi de işaret edebilir.

Tüm kaynakların 54 hafta boyunca radon konsantrasyon davranışları incelendiğinde, en dalgalı değişimleri 13 nolu kaynak göstermiştir. Bir deprem öncesinde su numunesinin radon konsantrasyonlarındaki artışı, en fazla 13 nolu kaynakta izlenmiştir. 13 nolu kaynak tüm kaynaklar içerisinde, bir depremi ön izleyici olarak en fazla işaret eden kaynaktır. Ayrıca bir depremden önce radon konsantrasyon artışlarının kaç kat olduğu ilişkisi açısından değerlendirmek gerekirse; 13 nolu kaynak 3 kat üzerindeki artışı birden fazla depremde en fazla gösteren kaynak olmuştur. 13 nolu kaynak genel olarak çalışma periyodu boyunca meydana gelen depremlere en fazla yakın olan kaynaktır. Meydana gelen tüm depremler Google Earth programında, Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü'den alınan deprem kayıtlarında olan enlem ve boylam bilgilerine göre harita üzerinde Şekil 5.2'de görüldüğü gibi işaretlenmiştir.



Şekil 5.2. 15 kaynağın konumu ve 17.08.2009–27.09.2010 tarihinde oluşan 61 deprem

Kırmızı renkte kodlandırılan depremlere ve sarı renkte numaralandırılan kaynaklara ait Şekil 5.2 incelendiğinde; 13 nolu kaynağın genel olarak, oluşan tüm depremlere diğer kaynaklardan daha yakın olduğu gözlenmiştir. Şekil 5.2’de kırmızı renkteki “D” kodları çalışma süresi boyunca meydana gelen depremleri göstermektedir. Örneğin D:15, Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü’den alınan ve EK-1’de ayrıntıları verilen deprem kayıtlarında 15. sıradaki depremi kodlamaktadır. Bu bakımdan 13 nolu kaynakta görülen radon konsantrasyonlarındaki ani artış beklenen bir sonuçtur. Ayrıca bu sonuç; Moussa ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada, bir deprem öncesinde deprem merkezine yakın noktalardaki radon konsantrasyon değerlerindeki artışın daha fazla bekleneceği sonucu ile de uyumlu bir sonuçtur (Moussa ve ark. 2003).

Tüm bu sonuçlar incelendiğinde, bir depremden önce radon gazı konsantrasyonlarındaki artış en fazla 17.08.2009–14.09.2009 tarihlerindeki ölçüm sonuçlarında gözlenmiştir. Çalışma periyodu boyunca 27 kez numune alınmıştır, fakat 17.08.2009 tarihindeki numune alımından sonra 14.09.2009 tarihinde alınan numunelerin sonuçları ve diğer numune alım tarihleri incelendiğinde, radon konsantrasyonlarındaki artışın en fazla 17.08.2009–14.09.2009 çalışma zamanında olduğu görülmüştür. 54 hafta ve 27 kez numune alım zamanı içerisinde, Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü’nün deprem kayıtları incelendiğinde, en fazla değişimin 17.08.2009–14.09.2009 tarihlerinde olması çok anlamlıdır. Çünkü 54 haftalık çalışma periyodu içerisinde, en büyük deprem 15.09.2009 tarihinde Sultandağı’nda meydana gelen 3,9 M büyüklüğündeki depremdir. Bu yüzden 54 hafta süre içerisinde en fazla radon konsantrasyonları artışının 17.08.2009–14.09.2009 tarihlerinde elde edilmesi dikkat çekici bir sonuçtur. 17.08.2009 tarihinde alınan numunelerin radon konsantrasyon değerleri, 14.09.2009 tarihinde 8 nolu kaynak hariç diğer tüm kaynaklarda artış göstermiştir. Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü’nün deprem kayıtları incelendiğinde; 27.08.2009 tarihinde Sultandağı ilçesinde 2,9 M; 15.09.2009 tarihinde yine Sultandağı ilçesinde 3,9 M ve aynı gün 2,7 M; 16.09.2009 tarihinde Sultandağı ilçesinde saat 02:06’da 2,9 M, 10:57’de ve 10:58’de 2,9 M; 19.09.2009 tarihinde ise Bolvadin ilçesinde 3 M büyüklüğünde depremler meydana gelmiştir.

Sultandağı'nda 15.09.2009 tarihinde 2, 16.09.2009 tarihinde de 3 adet deprem meydana gelmiştir. Akşehir fay hattında bulunan Sultandağı ve Bolvadin ilçelerinde meydana gelen bu 7 deprem öncesinde tüm kaynaklardaki radon konsantrasyonu artışları anlamlı sonuçlardır. 17.08.2009 ve 14.09.2009 tarih aralığında en küçük değişim 2 nolu kaynakta gözlenmiştir. En büyük değişim ise 13 nolu kaynakta gözlenmiştir. Kaynakların bu tarih aralıklarındaki değişimleri Çizelge 5.17'de verilmiştir.

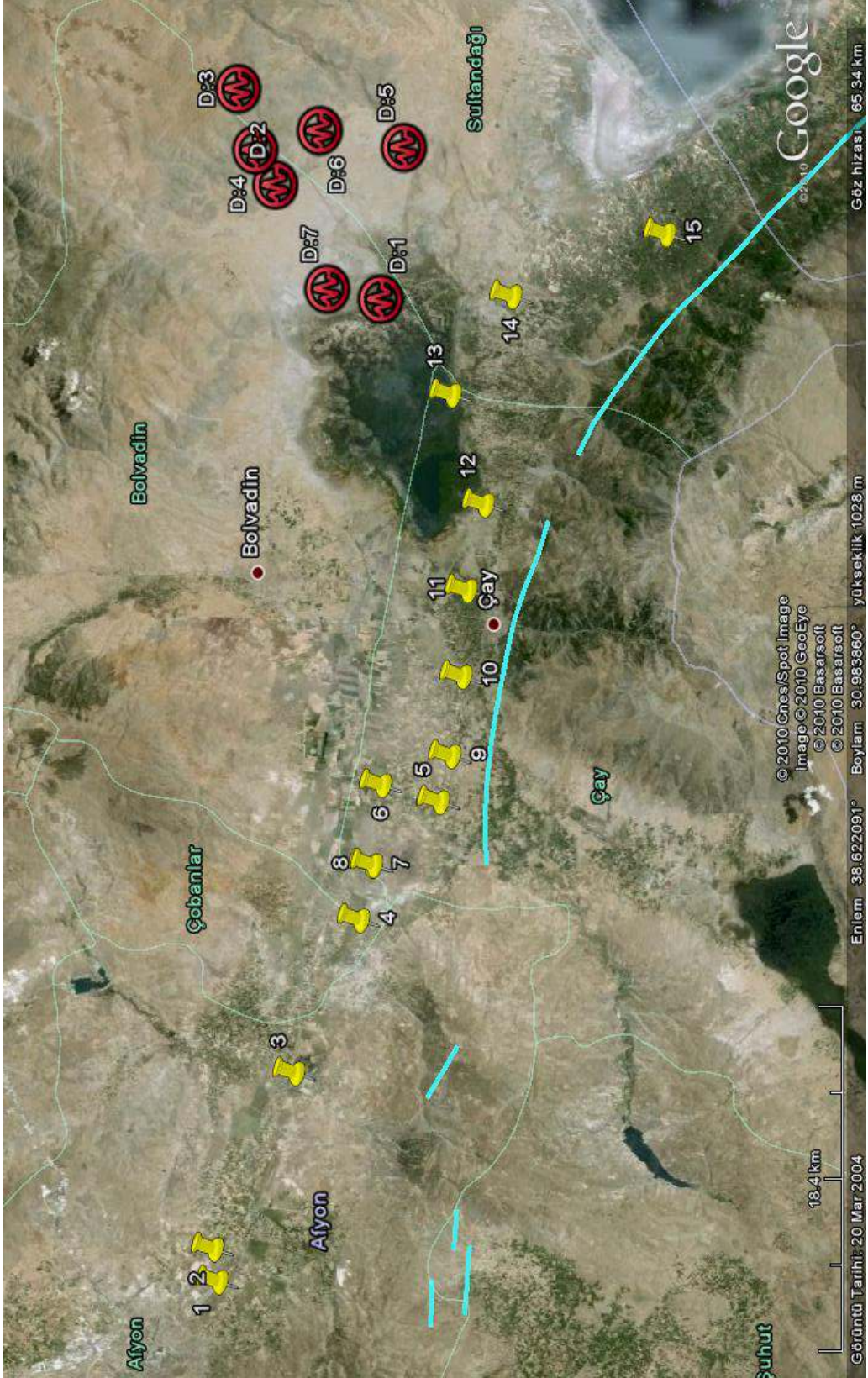
Çizelge 5.17. 17.08.2009–14.09.2009 tarihlerinde tüm kaynakların değişimleri

17.08.2009–14.09.2009 Tarihlerinde Kaynakların Değişimleri		
Kaynak No	(%) Değişim	Oran
1	50	1,5
2	21,90	1,22
3	73,64	1,74
4	47,15	1,47
5	111,8	2,12
6	128,9	2,29
7	184,1	2,84
9	76,5	1,76
10	335,6	4,36
11	33,67	1,34
12	2200,88	23
13	3318	34,17
14	1056,3	11,56
15	400	5

Bu çizelgeden de görüldüğü gibi, 17.08.2009 tarihindeki radon konsantrasyon değerleri, 14.09.2009 tarihinde Sultandağı ilçesine yaklaştıkça daha yüksek oranda artış göstermiş ve radon konsantrasyonu değişimleri de daha fazla olmuştur. Diğer dikkat çekici bir sonuç ise, 17.08.2009–14.09.2009 tarihlerindeki radon konsantrasyonlarındaki artışın 13 nolu kaynaktan sonra en fazla 14 nolu kaynakta gözlenmiş olmasıdır. 14 nolu kaynağın 17.08.2009 tarihindeki radon konsantrasyon değeri, 14.09.2009 tarihinde 11,56 katına çıkarak pik yapmıştır (Şekil 4.14). 15 kaynak ile 27.08.2009–19.09.2009 tarihleri ve aralığında Sultandağı ve Bolvadin yakınlarında meydana gelen 7 deprem Şekil 5.3'de gösterilmiştir. Şekil 5.3 incelendiğinde bu kaynak 13 nolu kaynaktan sonra

depremlere en yakın kaynaktır. Bu sonuç; Moussa ve arkadaşlarının Mısır'da yaptıkları ve bir deprem öncesinde deprem merkezine yakın noktalardaki radon konsantrasyonu değerlerindeki artışın daha fazla bekleneceği sonucu ile uyumlu bir sonuçtur (Moussa ve ark. 2003)

27.08.2009–19.09.2009 tarihleri ve aralığında Sultandağı ve Bolvadin yakınlarında meydana gelen 7 deprem öncesinde, 14 kaynaktan en fazla artış 13 nolu kaynaktan meydana gelmiştir. Şekil 5.3'de görüldüğü gibi 13 nolu kaynak, bu depremlerin konumlarına en yakın kaynaktır. 13 nolu derin su kaynağında, en fazla radon gazı artışı görülmesi dikkate değer bir sonuçtur. Şekil 5.3'de depremler 1'den başlanarak enlem ve boylam bilgilerinin Google Earth programında işaretlenmesiyle kodlanmıştır.



Şekil 5.3. 15 kaynak ve 27.08.2009–19.09.2009 tarihleri aralığında Sultandağı ve Bolvadin yakınlarında meydana gelen 7 deprem

12.10.2009–26.10.2009 tarihlerinde alınan numunelerin radon konsantrasyon değerlerinde 4, 5, 7, 13 ve 15 nolu kaynaklarda artış görülmüştür. 26.10.2009–09.11.2009 tarihlerinde alınan numunelerde ise 3, 10, 12 ve 14 nolu kaynaklarda artış gözlenmiştir. 18.01.2010–01.02.2010 tarihlerindeki numune alımları sonucu ölçümlerinde 7, 8, 9, 10, 11 ve 12 nolu kaynakların radon konsantrasyon değerlerinde artma gözlenmiştir. Bu kaynaklar, bu tarihlerde benzer davranış göstermişlerdir. Bu kaynakların birbirine yakın kaynaklar olması bakımından benzer davranış göstermesi anlamlı bir sonuç olabilir.

Elde edilen bulgularda Sultandağı'nda meydana gelen depremlerle, bu ilçeye diğer kaynaklara göre daha uzak mesafede olan 1, 2, 3 ve 4 nolu kaynaklardaki radon konsantrasyonu değişimlerinin de ilgili olduğu düşünülmektedir. Çünkü en uzak mesafede olan 1 nolu kaynağın bile Sultandağı ilçesine olan uzaklığı yaklaşık 55 km'dir. Literatürde bir depremin merkez üssünden çok uzaklarda da radon anomalisinin oluştuğunu gösteren çalışmalar mevcuttur. Ghosh ve arkadaşları radon gazının deprem ile ilişkisinin gözlenebilmesi ve değişimlerinin belirlenebilmesi amacıyla Mısır'da 1 yıl süren bir çalışma yapmışlardır (Ghosh ve ark. 2007). Çalışmalarında 4,2 M büyüklüğündeki bir depremin merkezine 156 km uzakta bulunan ölçüm noktalarında, radon konsantrasyonlarında artış belirlediklerini açıklamışlardır. 54 hafta süren bu tez çalışmasında; en büyük deprem olan 3,9 M büyüklüğündeki Sultandağı depremi öncesi, 15 kaynaktan bu depreme en yakın olan 13 nolu kaynaktır ve depremin meydana geldiği konuma uzaklığı sadece 15,33 km'dir. Depremden önce 13 nolu kaynağın 17.08.2009 tarihindeki radon konsantrasyonu, 14.09.2009 tarihinde 34,17 katına çıkmıştır. Deprem öncesi meydana gelen bu artış dikkat çekici bir sonuç olup, Ghosh ve arkadaşlarının çalışmasını desteklemektedir.

Tüm sonuçlar incelendiğinde; derin su kaynaklarında radon gazı değişimlerinin meydana geldiği zamanlarda, genel olarak depremlerin de meydana geldiği görülmektedir. Sonuç olarak, sürekli radon gazı değişiminin deprem ön kestiriminde önemli bir parametre olarak kullanılabileceği görülmüştür.

5.2. Radon Konsantrasyon Değişim Yüzdesinin Deprem Merkezine Uzaklığı

17.08.2009 ve 27.09.2010 tarihlerinde 54 hafta süren çalışma periyodu boyunca alınan su numunelerine ait radon konsantrasyonlarındaki değişimin, bu tarihler aralığında meydana gelen depremlerin merkezleri arasındaki uzaklıkla ilişkisini belirleyebilmek için; her bir kaynaktaki radon değişim yüzdesi hesaplanmıştır. Daha öncede bahsedildiği gibi; Google Earth programında, kaynakların-deprem merkezine olan radyal uzaklıkları hesaplanmıştır (Şekil 3.15).

Çizelge 4.16 ve Çizelge 4.34 ile Şekil 4.16 ve Şekil 4.34 incelendiğinde; radon değişim yüzdesi ile deprem merkezi radyal uzaklığı arasında uyumlu sonuçlar bulunmuştur. Çizelge 5.18’de verildiği gibi meydana gelen 19 depremde doğrusal uyumluluk 0,74–0,95 aralığında değişen değerlerde bulunmuştur.

Çizelge 5.18. Radon (%) değişim yüzdesi ile deprem merkezi arasında uyum gösteren kaynaklar

Depremler	Büyüklik (M)	Uyumlu Kaynak Sayısı	R ²
15.09.2009 Sultandağı	2,7	8	0,75
10.10.2009 Sultandağı	3,2	7	0,87
25.12.2009 Çay	3,1	7	0,73
25.02.2010 Çobanlar	2,5	7	0,81
25.02.2010 Çobanlar	2,5	7	0,76
07.03.2010 Şuhut	3	6	0,91
30.03.2010 Çay	2,8	9	0,87
01.04.2010 Sultandağı	3	10	0,85
02.04.2010 Bolvadin	2,6	8	0,79
23.05.2010 Sultandağı	2,7	8	0,81
23.05.2010 Şultandağı	2,7	7	0,83
03.06.2010 Sultandağı	2,7	10	0,74
03.06.2010 Sultandağı	2,9	8	0,81
03.06.2010 Sultandağı	3	8	0,80
08.08.2010 Sultandağı	2,8	9	0,77
29.08.2010 Bolvadin	3,3	9	0,89
21.09.2010 Afyonkarahisar	2,6	10	0,80
24.09.2010 Afyonkarahisar	3,1	10	0,77
27.07.2010 Şuhut	3,3	6	0,95

Çizelge 4.16 ve Şekil 4.16 incelendiğinde; 15.09.2009 tarihinde Sultandağı’nda meydana gelen 2,7 M büyüklüğündeki depremde, 8 kaynağın 15.09.2009 tarihinde meydana gelen depremin merkezinden uzaklaştıkça radon konsantrasyon yüzde değişiminin azaldığı gözlenmiştir. 1, 2, 3, 4, 5 ve 7 nolu

kaynaklar birbirleriyle paralel hareket etmişlerdir. Şekil 3.13’de görüldüğü gibi bu kaynaklar genelde birbiri ardınca gelen kaynaklardır. Bu nedenle böyle bir benzerlik göstermeleri anlamlı bir sonuçtur.

10.10.2009 tarihinde Sultandağı’nda meydana gelen 3,2 M büyüklüğündeki depremin, kaynaklara olan uzaklıklara göre radon yüzde değişimleri incelendiğinde (Çizelge 4.17 ve Şekil 4.17) doğrusal uyumluluk değeri 0,87 bulunmuştur. Su numunelerinin radon konsantrasyon % değişimleri, kaynakların deprem merkezine olan uzaklıkları arttıkça azalmıştır. Bu depremde bahsedilen ilişki 7 kaynakta gözlenmiştir.

3,1 M büyüklüğünde 25.12.2009 tarihinde Çay ilçesinde meydana gelen depremin merkezi ve kaynaklara olan uzaklıkları incelendiğinde; 7 noktada doğrusal uyumluluk gözlenmiştir. 3, 4, 6, 7, 8 nolu kaynaklar arasında, Çizelge 4.18’de benzer bir ilişki bulunmuştur. Benzer ilişkiler, 25.02.2010 Çobanlar depreminde de gözlenmiştir. 7 kaynakta radon değişim yüzdesi ile depremin merkezine olan uzaklıklar arasında doğrusal uyumluluk değeri 0,81 bulunmuştur. Çizelge 4.20 ve Şekil 4.20’de gösterildiği gibi 25.02.2010 Çobanlar depreminin (2,5 M), 15.02.2010 ve 08.03.2010 tarihlerindeki numune alım zamanlarına göre incelenmesinde, lineer uyumluluk 0,76 bulunmuştur. Uyum gösteren toplam 7 kaynaktan 4, 6, 7, 8, 9 ve 10 nolu kaynaklar birbirlerine yakın kaynaklardır. 07.03.2010 Şuhut depreminde (3,0 M), 6 kaynakta benzer davranış gözlenmiş ve doğrusal uyumluluk 0,91 bulunmuştur. Burada 12, 13, 14, 15 birbiri ardınca gelen kaynaklardır (Çizelge 4.21 ve Şekil 4.21). 30.03.2010 Çay depreminin (2,8 M) doğrusal uyumluluğu 0,87 olarak bulunmuştur (Çizelge 4.22 ve Şekil 4.22). Bu depremin merkezinin kaynaklara olan uzaklıkları ve radon değişim yüzdeleri arasında 9 kaynakta uyum gözlenmiştir. 9 kaynaktan 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 ve 11 nolu kaynaklar birbirlerine yakın kaynaklardır. 01.04.2010 Sultandağı depreminin (3,0 M) merkezinin kaynaklara olan uzaklık incelemesinde; 10 kaynakta, deprem merkezine olan uzaklık arttıkça radon değişim yüzdesinin azaldığı gözlenmiştir (Çizelge 4.23 ve Şekil 4.23). Bu kaynaklardan 2, 3, 5 ve 6 nolu kaynaklar birbirlerine yakın kaynaklardır. Aynı şekilde 9, 10, 11, 13, 14 ve 15 nolu kaynaklar da birbirlerine yakın kaynaklardır. Benzer bir ilişki 02.04.2010 Bolvadin depreminin (2,6 M) merkezinin kaynaklara olan uzaklık ve radon

değişim yüzdesinin incelenmesinde de gözlenmiştir (Çizelge 4.24 ve Şekil 4.24). Doğrusal uyumluluk 0,79 bulunmuştur. Bu deprem de 7, 8, 9, 10, 11 ve 12 nolu kaynaklar birbiri ardınca gelen kaynaklardır. 23.05.2010 Sultandağı depreminin (2,7 M) merkezinin kaynaklara olan uzaklık-radon değişim yüzdesi incelendiğinde, doğrusal uyumluluk 0,81 bulunmuştur (Çizelge 4.25 ve Şekil 4.25). Aynı tarihte ve aynı büyüklükte yine Sultandağı'nda meydana gelen 2,7 M büyüklüğündeki depremin incelenmesinde ise doğrusal uyumluluk 0,83 olarak bulunmuştur (Çizelge 4.26 ve Şekil 4.26). Çizelge 4.27 ve Şekil 4.27 incelendiğinde, 03.06.2010 Sultandağı depreminde (2,7 M) ise doğrudal uyumluluk 0,74 bulunmuştur. Bu depremde de 10 kaynakta uyum gözlenmiş bunlardan 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 ve 12 nolu kaynaklar, birbirlerinden sonra gelen kaynaklardır. 03.06.2010 tarihinde Sultandağı'nda meydana gelen 2,9 M büyüklüğündeki depreme ait, radon yüzde değişiminin deprem merkezine olan uzaklığını gösteren Çizelge 4.28 ve Şekil 4.28 incelendiğinde, doğrusal uyumluluk katsayısı R^2 0,81 olarak bulunmuştur. Bu depremde de birbirine yakın kaynaklarda benzer ilişkiler gözlenmiştir. Çizelge 4.29 ve Şekil 4.29 incelendiğinde 03.06.2010 Sultandağı depreminin (3 M) doğrusal uyumluluk katsayısı R^2 0,80 bulunmuştur. Bu depremde 6, 8, 9, 10, 11 ve 12 nolu kaynaklar birbirlerine yakın kaynaklardır. 08.08.2010 tarihindeki Sultandağı (2,8 M) depreminde, radon yüzde değişiminin deprem merkezine uzaklığı ilişkisini gösteren Çizelge 4.30 ve Şekil 4.30 incelendiğinde doğrusal uyumluluk katsayısı 0,77 olarak bulunmuştur. Burada 9, 10, 11 ve 12 nolu kaynaklar birbiri ardınca gelen kaynaklardır. Çizelge 4.31 ve Şekil 4.31'de ise Bolvadin'de 29.08.2010 tarihinde meydana gelen 3,3 M büyüklüğündeki depreme ait, radon yüzde değişimi ve deprem merkezine uzaklık ilişkisi verilmiştir. Bolvadin depreminin (3,3 M) doğrusal uyumluluk değeri R^2 0,89 olarak hesaplanmıştır. Benzer şekilde 21.09.2010 tarihinde meydana gelen Afyonkarahisar depreminde (2,6 M), doğrusal uyumluluk katsayısı 0,80 olarak bulunmuştur (Çizelge 4.32 ve Şekil 4.32). Bu tarihte doğrusal uyumluluğa katılan 10 kaynakta 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 ve 10 nolu kaynaklar birbirlerine yakın ve art arda gelen kaynaklardır. Benzer ilişkiler Çizelge 4.33 ve Şekil 4.33 incelendiğinde de görülebilir. 24.09.2010 tarihinde Afyonkarahisar'da meydana gelen 3,1 M büyüklüğündeki depremin

doğrusal uyumluluk katsayısı 0,77 olarak elde edilmiştir. Bu depremde 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 ve 11 nolu kaynaklar birbiri ardınca gelen kaynaklardır. Merkez üssü Şuhut olan 27.07.2010 tarihinde meydana gelen 3,3 M büyüklüğündeki depremin doğrusal uyumluluk katsayısı 0,95 bulunmuştur (Çizelge 4.34 ve Şekil 4.34).

Tüm bu depremlerin merkezlerinin kaynaklara olan uzaklıklarının, radon yüzde değişimlerine ait veriler incelendiğinde; deprem merkezinden uzaklaştıkça, radon değişiminin azaldığı gözlenmiştir. Sonuçlar, literatürde Moussa ve arkadaşlarının Mısır’da yaptıkları, faya olan uzaklığa göre radon konsantrasyonlarındaki değişim araştırması sonuçlarıyla uyumludur (Moussa ve ark. 2003). Bu tez çalışmasında da kullanılan Genitron marka AlphaGUARD PQ 2000 radon detektörü ile çalışan Moussa ve arkadaşları, ölçümlerini Mayıs–2001, Kasım–2001 ve Haziran–2002 gibi 3 farklı mevsimde kısa sürelerle yapmışlardır. Sonuçta, radon gazının fayın olduğu bölgede pik yaptığını, faya uzak bölgelerde ise daha düşük radon konsantrasyonu gözlemlediklerini açıklamışlardır. Radon gazının aktif fay zonlarını işaret edebileceğini ve fay haritalarının çıkarılmasında radon gazı ölçümlerinin kullanılabileceğini vurgulamışlardır.

Sonuçlar, Font ve arkadaşlarının İspanya’da Amer’in yakınlarındaki Amer fayında 6 Nisan 2005–14 Ağustos 2006 tarihleri aralığında yaptıkları çalışmanın sonuçlarıyla da uyumludur (Font ve ark. 2008). Font ve arkadaşları faydan olan uzaklığa göre, radon konsantrasyonu grafiği çizdirmişlerdir. Zamana karşılık radon konsantrasyonlarındaki değişim grafikte verilmiştir. Ortalama sonuçlarda, radon konsantrasyonları değerlerinde faya olan uzaklığın etkisinin olduğunu göstermişlerdir.

Erkmen ve arkadaşları “Doğu Anadolu Fayı’nın Gölbaşı-Türkoğlu arasında kalan kesiminin tektonik özellikleri ve Paleosismolojisi” adlı çalışmalarında, fayın geçtiği hat boyunca ve yakınında yapılan ölçümlerde radon değerinde yükselme görmüşlerdir (Erkmen ve ark. 2007). Jeoloji mühendisliğine ait olan çalışma, radon gazı ölçümü ile faydaki kırık izlerinin hassas bir şekilde belirlenebileceğinin vurgulanması açısından önemli bir çalışmadır. Muhtemel fay hattından uzaklaştıkça, radon konsantrasyonu değerlerinde çok net bir düşme gözlemlemişlerdir. Bu tez çalışmasında, 19 depremde radon konsantrasyon değişiminin deprem merkezine olan radyal uzaklığıyla doğrusal uyumluluk

gösterdiği bulunmuştur. Gerek gözlenen doğrusal uyumluluk gerekse bazı kaynakların bu doğrusal uyumluluğa katılmaması sonucu, Erkmen ve arkadaşlarının çalışmalarıyla açıklanabilir. Şöyle ki, Erkmen ve arkadaşları çalışmalarında, radon gazı ölçüm cihazı ile birkaç metrelik aralıklarla alınan ölçümlerle kırık izinin yerini hassas bir şekilde saptadıklarını belirtmişlerdir. Bu sonuç; bu tez çalışmasında, radon (%) değişiminin-deprem merkezine olan radyal uzaklıkla ilişkisinde hiçbir değişiklik göstermeyen kaynakların durumunu açıklayabilir. Çünkü bir kaynağın yakınlarında herhangi bir kırık bulunmaması veya fayın uzantılarıyla ilişkisi olmaması durumunda; deprem öncesinde de bir değişim beklenemeyebilir. Ayrıca bu tez çalışmasında, deprem merkezine yakın olan kaynaklarda daha fazla radon konsantrasyonu artışı gözlenmesi de Erkmen ve arkadaşlarının çalışmalarıyla uyumludur.

Çalışma süresince aynı günde meydana gelen depremler de gözlenmiştir. Bu depremlerin merkezleri ve kaynaklar arasında ilişkileri gösteren Çizelge 4.27, Çizelge 4.28, Çizelge 4.29 ile bu çizelgelere ait şekiller incelendiğinde; aynı gün meydana gelen farklı şiddetteki depremlerin aynı kaynaktaki doğrusal uyumluluğa katıldığı gözlenmiştir. Radon konsantrasyonu (%) değişiminin deprem merkezine radyal uzaklığı ilişkisi incelendiğinde; bir kaynağın bir deprem öncesinde radon konsantrasyon yüzde değişiminin, deprem merkezine uzaklığı ile ilgili gösterdiği uyumluluğu başka bir depremde göstermediği bulgular da olmuştur. Ayrıca, on beş kaynaktan bazılarının radon değişim yüzdesinin deprem merkezine uzaklıkla ilişkisi doğrusal bir uyumluluk gösterirken, başka kaynakların böyle bir ilişki göstermediği durumlar gözlenmiştir. Yine birbiri ardınca gelen kaynaklardan çoğu, radon değişim yüzdesinin deprem merkezine uzaklığında doğrusal uyumluluk gösterirken, bu kaynaklara yakın olmasına rağmen ilişkinin dışında kalabilen kaynaklar olmuştur. Örneğin 29.08.2010 Bolvadin depreminde (3,3 M), kaynaklardaki radon konsantrasyonu yüzde değişiminin deprem merkezine uzaklığını gösteren Şekil 4.31 incelendiğinde, 4 nolu kaynağın birbirine yakın kaynaklardaki (1, 2, 3, 5, 6 ve 7 nolu kaynaklar) doğrusal uyumluluğun dışında kaldığı gözlenmiştir. Bu durumun çalışma bölgesinin jeolojik oluşumu ve yapısı, özellikle fay hattı yakınlarında seçilen kaynakların alındığı su numuneleri ile toprağın fiziksel ve kimyasal özellikleri, meteorolojik şartlar gibi nedenlere bağlı

olabileceği düşünülmektedir (Zmazek ve ark. 2000; Zmazek ve ark. 2003; Fujiyoshi ve ark. 2005; Zmazek ve ark. 2005). Yer altı sularının kimyasal özelliklerindeki değişimlerin deprem ile ilişkisinin olduğunu belirten çalışmalar mevcuttur. Belin ve arkadaşlarının çalışmaları sonucunda; sismik bölgelerdeki yeraltı sularının kimyasal içeriklerindeki değişimlerin, depremle ilişkili bir sonuç olabileceği vurgulanmıştır (Belin ve ark. 2002).

Depremler meydana gelirken; büyük kayaç bloklarının değişik yönlerde hareket etmesi sonucu toprak altında biriken radon gazı çıkışında artış ya da azalış olur. Bu tez çalışmasında da 54 hafta boyunca elde edilen veriler ile sularda radon gazı konsantrasyon artışları ve değişimleri görülmüştür. Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü'nün deprem kayıtları incelendiğinde, çalışma periyodu boyunca birçok deprem meydana gelmiş; fakat Afyonkarahisar il sınırları içinde olsa dahi çalışma alanına uzak olan ilçelerin deprem kayıtları dikkate alınmamıştır. Literatürde radon konsantrasyonlarındaki değişimlerin, 1 M ile 2 M arasında küçük şiddetteki depremlerden önce de ilişkili olduğu belirtilmiş olsa da, bu tez çalışmasında 2 M'den küçük depremler dikkate alınmamıştır (Hauksson ve Goddard 1981). Bu şekilde belirlenen toplam 61 adet depremden, 19'nun büyüklüğü 3 M ve 3 M'den fazla olan depremlerdir. 3 M'den büyük olan bu 19 deprem öncesinde de kaynaklarda radon gazı konsantrasyonu artışları daha önce detaylı anlatıldığı gibi gözlenmiştir. Fakat radon konsantrasyonlarındaki artışların, 2 M ve 3 M arasındaki küçük şiddetli de olsa meydana gelen depremlerle de paralel olduğu gözlenmiştir.

Genel olarak kaynakların çoğunun radon konsantrasyonu yüzde değişiminin deprem merkezine uzaklıkla doğrusal bir uyumluluk göstermesine rağmen; bazı kaynakların bu uyumluluğu göstermemesi, radon konsantrasyonu değişimini etkileyen faktörler olabileceğini düşündürmektedir. Bu durum, bölgenin birçok kırık fay ve uzantısını içeriyor olmasından kaynaklanabilir. Bölgede, çeşitli araştırmacılar tarafından jeolojik araştırmalar yapılmıştır. 3 Şubat 2002 tarihinde meydana gelen 6,0 M büyüklüğündeki Çay depreminden sonra, fayda yeni kırıklar olduğu rapor edilmiştir (Demirtaş ve ark. 2002). Çalışma bölgesi aktif faylar içermektedir ve büyük bir deprem oluşturabilecek kapasiteye sahiptir. Aktif fay zonları boyunca, yer kabuğundaki deformasyonlar ve buna

bağlı olarak yer kabuğunu oluşturan kayalarındaki ikincil kırık ve çatlaklar artmakta, bu artış radon çıkışını hızlandırmaktadır (Şahin 2009). Bölgedeki fayda, mevcut kırık ve çatlaklar ile birlikte yeni oluşmuş kırıklar, radon konsantrasyon değişimini etkilemiş olabilir.

Bu tez çalışması sonucunda; radon konsantrasyon yüzde değişiminin bir depremin merkezine uzaklıkla ilişkili olduğunu gösteren veriler bulunmuştur. Fakat çalışılan 15 kaynağın tamamında, bir depremden önce aynı ilişkinin görülmesi beklenemez. Doğru'nun bir proje çalışmasında belirttiği gibi, depremlerin kısa aralık ve uzun aralıkla oluşumu da radon gazındaki değişimleri etkileyebilmektedir (Şahin 2009). Doğru, çalışmasında depremlerin kısa aralıklarla meydana geldiği dönemlerdeki radon gazı çıkışındaki artışın, daha uzun aralıklı depremlere göre daha az olacağını belirtmiştir. Ayrıca deprem öncesinde; bölgedeki kayalarda meydana gelen kırılma ve çatlamların fayın hareketiyle denetleneceğini açıklamıştır (Şahin 2009). Bu tez çalışmasında, radon gazının değişiminin bölgedeki kayaların yapısından da etkilendiği düşünülmektedir. Bir bölgedeki radon konsantrasyonu, kayaç türü (litoloji), yapısal elemanlar (özellikle de faylar) ve o bölgedeki uranyum mineralizasyonlarının varlığıyla yakından ilişkilidir (Şahin 2009). Utkin ve Yurkov, Kuzey Tien Shan'da yaptıkları çalışmalarında; tortul kayalarda ölçülen radon konsantrasyonunun büyük ölçüde sismik hareketlere bağlı olduğunu, yerel veya nispeten uzak depremler öncesinde gelen dalga yayılmasının, radon değişimine neden olabileceğini belirtmişlerdir. (Utkin ve Yurkov 2010). Ayrıca sularadaki radon gazı, toprağın yapısında bulunan doğal radyoaktif maddelerden etkilenecektir. ^{238}U doğal radyoaktif çekirdeğinin kütle aktivite konsantrasyonunun, toprak ve kaya tiplerine göre değişmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir (Beck 1982, Karahan 1997).

Derin su kaynaklarındaki radon gazı konsantrasyon değişimleri ile depremlerin meydana gelmesi arasında bir ilişki olduğu söz konusudur. Ancak, her su kaynağının mutlaka bu belirtiyi göstereceği beklenemez. Ayrıca, bir deprem öncesinde veya sonrasında da radon anomolisi gözlemlenebileceğinden, radon anomolisi ile depremin büyüklüğü ve yerini kesin ilişkilendirebilmek mümkün olamamaktadır. (King 1980; King ve ark. 1996; Fleischer ve Mogro-Campero,

1980; Shapiro ve ark. 1980). Yapılan bazı çalışmalarda, başka parametrelerin de (sıcaklık, nem, basınç, vb.) radon gazı çıkışı üzerinde etkisinin olduğu belirtilmiştir (Zmazek ve ark. 2005; Zmazek ve ark. 2003; Fujiyoshi ve ark. 2005; Zmazek ve ark. 2000). Bazı çalışmalarda da radon gazının meteorolojik parametrelerden etkilenmediği sonucu çıkarılmıştır (Yaprak ve ark. 2003). Radon gazının diğer parametrelerle ilişkisini araştıran çalışmalar günümüzde halen devam etmektedir.

On beş kaynağın radon konsantrasyonlarının numune alım zamanına göre değişim bulguları ile Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü'den alınan deprem kayıtları incelendiğinde, Çobanlar ve Bolvadin ilçelerinde meydana gelen depremler öncesi, özellikle 4 nolu kaynağın radon konsantrasyonlarında dikkate değer değişim bulguları elde edilmiştir. Sultandağı'nda meydana gelen depremler için ise, özellikle 13 ve 14 nolu kaynaklar benzer ilişkiyi göstermiş ve meydana gelen depremler öncesinde, radon konsantrasyonlarında önemli değişimler gözlenmiştir. Çobanlar ve Bolvadin ilçeleri ile çevresi için 4 nolu kaynağın, Sultandağı ilçesi ve çevresi için ise 13 ve 14 nolu kaynakların, iyi bir önizleyici olarak değerlendirilmesi önerilebilir.

Radon gazının izlenmesi, bir depremin yeri ve zamanının tahmininde tek başına yeterli olmayabilir. Fakat deprem tahmini ile ilgili yürütülen çalışmalara; çok önemli katkılar sağlayabilecek, dikkate alınması gereken bir parametre olduğu sonucu, yapılan bu çalışmadan da açıkça görülmektedir. Bu tez çalışmasında, bir depremden önce radon konsantrasyonlardaki artışı gösteren bulgular elde edilmiştir. Ayrıca literatürdeki çalışmalar gibi bu tez çalışmasında görülmüştür ki; radon ölçümü yapılan kaynağın deprem merkezine olan uzaklığı önemlidir. Elde edilen sonuçlar, bölgede sürekli ölçüm yaparak veri aktarabilecek radon ölçüm istasyonlarının kurulmasının yararlı olacağını göstermektedir. Ayrıca hem derin su kaynaklarında, hem de toprak gazında, radon konsantrasyonlarındaki değişimlerin izlenmesi ile birlikte; toprağın ve suyun fiziksel ve kimyasal özelliklerinin de takip edilmesi, bu parametrelerin daha iyi anlaşılabilmesi açısından yararlı olacaktır. Bu bakımdan, Akşehir fay hattında ve Afyonkarahisar ilinde belirli aralıklarla veya sürekli kurulacak radon ölçüm istasyonlarının yararlı olacağına inanılmaktadır.

KAYNAKLAR

- Amponsah, P., Banoeng-Yakubo, B., Andam, A., Asiedu, D. (2008), "Soil radon concentration along fault systems in parts of south eastern Ghana," *Journal of African Earth Sciences*, **51**, 39-48.
- Asada T. (1982), "Earthquake prediction techniques and their application in Japan," *University of Tokyo Press* (Ed: Asada, T.), Tokyo.
- Aydar, E. (1998), "Early Miocene to Quaternary evolution of volcanism and the basin formation in western Anatolia: a review," *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **85**, 69-82.
- Barka, A., Reilinger, R., Şaroğlu, F. ve Şengör, A. M. C. (1995), "The Isparta Angle: Its importance in the neotectonics of the Eastern Mediterranean Region", *International Earth Sciences Colloquium on the Aegean Region, Proceedings*, **1**, 3-17.
- Barnes, D. E. ve Taylor, D. (1963), "Radiation Hazards and Protection, Second education," *A Newnes technical survey*.
- Baykara, O., Doğru, M., İnceöz, M., Aksoy, E. (2005), "Measurements of radon emanation from soil samples intriple-junction of North and East Anatolian active faults systems in Turkey", *Radiation Measurements*, **39**, 209-212.
- Baykara, O., Doğru, M. (2006), "Measurements of radon and uranium concentration in water and soil samples from East Anatolian Active Fault Systems (Turkey)", *Radiation Measurements*," **41**, 362-367.
- Baykara, O., İnceöz, M., Doğru, M., Aksoy, E., Kùlahcı, F. (2009a), "Soil radon monitoring and anomalies in East Anatolian Fault System (Turkey)", *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, **279**, 159–164.
- Baykara, O., İnceöz, M., Kùlahcı, F., Doğru, M., Aksoy, E. (2009b), "Assessment of 222Rn concentration and terrestrial gamma radiation dose rates in the seismically active area", *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, **278**, 59-63.
- Baykut, S., Akgùl T., İnan, S., Seyis, C. (2010), "Observation and removal of daily quasi-periodic components in soil radon data," *Radiation Measurements*, **45**, 872-879.

- Beck, H. L. (1982), "The Physics of Environmental Gamma Radiation Fields," *The Natural Radiation Environment II. USERDA Conf.* **720805-P2**, 101-104.
- Belin, B., Yalçın, T., Süner, F., Bozkurtoğlu, E., Gelir, A., Güven H. (2002), "Earthquake-related chemical and radioactivity changes of Thermal Water in Kuzuluk-Adapazarı,Turkey," *Journal of Environmental Radioactivity*, **63**, 239-249.
- Besang, C., Eckhardt, F. J., Harre, W., Freuzer, H. ve Muller, P. (1977), "Radiometrische Altersbestimmungen aus dem Jungtentiär der Türkei," *Geol J.*, **25**, 139-167.
- Bichard, G.F. ve Libby, W.F. (1980), "Soil Radon Concentration Changes Preceding and Following Four Magnitude 4,2-4,7 Earthquakes on the San Jacinto Fault in Southern California," *J. Geophys. Res.*, **85**, 3100-3106.
- Bolt, B.A. (1993), "Earthquake and Geological Discovery," *W.H. Freeman and Company*, New York, A.B.D, 182-191.
- Boray, A., Şaroğlu, F. ve Emre, O. (1985), "Isparta büklümünün kuzey kesiminde Doğu-Batı daralma için bazı veriler", *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, **23**, 9-20.
- BOUN, Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, 2010.
<http://www.koeri.boun.edu.tr//sismo/default.htm>
- Bozkurt, E., Winchester, J. A. ve Piper, J. D. (2000), "Tectonics and magmatism in Turkey and the surrounding area," *Geological Society Special Publication*, **173**, 325-352.
- Choubey, V. M., Kumar, N., Arora, B.R. (2009), "Precursory signatures in the radon and geohydrological borehole data for M4.9 Kharsali earthquake of Garhwal Himalaya," *Science of the Total Environment*, **407**, 5877–5883.
- Crockett, R. G. M., Gillmore, G. K, Phillips, P. S., Denman, A. R., Groves-Kirkby, C. J. (2006), "Radon anomalies preceding earthquakes which occurred in the UK, in summer and autumn 2002," *Science of the Total Environment*, **364**, 138-148.
- Cothorn, C. R. ve Smith, J. E. (1987), "Environmental Radon," *Plenum Press*, New York, A.B.D.

- Çelebi, N. (1995), *Çevresel Örneklerde Uranyum, Radyum ve Radon Ölçüm Tekniklerinin Geliştirilmesi*, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Çevikbaş, A., Ercan, T. ve Metin, S. (1988), “Geology and Regional Distribution of Neogene Volcanics between Afyon Şuhut”, *Jour. Pure and Appl. Sei., METU*, **21**, 479-499.
- Çile, S. (2004), *Soma ve tavşanlı yeraltı linyit maden ocaklarında radon gazı konsantrasyon seviyelerinin belirlenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- Davutoğlu, H. (2008), *Radon gazını ölçme metotları*, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.
- Demirkol, C., Sipahi, H., İpek, S., Barka, A. ve Sönmez, Ş. (1977), *Sultandağı Dolayının Stratigrafisi ve Jeolojik Evrimi*. M.T.A Derleme No: 6305, Ankara.
- Demirtaş, R., İravul, Y. ve Yaman, M. (2002), “3 Şubat 2002 Eber ve Çay depremleri ön raporu,” *Jeoloji Mühendisliği Haber Bülteni*, **1-2**, 58-63.
- Durrani, S. A. ve Ilic, R. (1997), “Radon Measurements by Etched Track Detectors: Applications in Radiation Protection,” *Earth Sciences and the Environment*, World Scientific, Singapore, 387.
- Elmaghraby, E. K. ve Lotfy, Y. A. (2009), “Differentiation between earthquake radon anomalies and those arising from nuclear activities,” *Applied Radiation and Isotopes*, **67**, 208–211.
- Emre, Ö., Duman, T. Y., Doğan, A., Özalp, S., Tokay, F. ve Kuşçu, İ. (2003), *03 Şubat 2002 Sultandağı Depremi ön değerlendirme raporu*, M.T.A., Ankara.
- Ereeş, F. S., Aytaç, S., Saç, M. M., Yener, G., Şalk, M. (2007), “Radon concentrations in thermal waters related to seismic events along faults in the Denizli Basin, Western Turkey”, *Radiation Measurements*, **42**, 80-86.
- Erişen, E. L., Akkuş, L., Uygur, K. ve Koçak, A. (1996), *Türkiye Jeotermal Envanteri*, M.T.A. Raporu, No: 480, Ankara.

- Erkan, Y., Bayhan, H., Tollluoğlu, Ü., Aydar, E., (1996), *Afyon Yöresi Metamorfik ve Volkanik kayaçlarının Petrografik ve Jeokimyasal İncelenmesi*. TÜBİTAK Proje Raporu, YBAG-0044/DPT Projesi Raporu, Ankara.
- Erkmen, C., Kuterdem, N. K., Öz Saraç, V., Tekin, B. M., Eravcı, B., Yaman, M., Aktan, T., Albayrak, H., Tepeğür, E. (2007), “Doğu Anadolu Fayı’nın Gölbaşı-Türkoğlu Arasında Kalan Kesiminin Tektonik Özellikleri ve Paleosismolojisi,” *Esen ARPAT Doğu Anadolu Fay Zonu Sempozyumu*, Diyarbakır, 24-27.
- Etiopie, G. ve Martinelli G. (2002), “Migration of carrier and trace gases in the Geosphere: an overview,” *Physics of The Earth and Planetary Interiors*, **129**, 185-204.
- Farzad, S. (1993), *Bina içi ve bina dışı radon konsantrasyonlarının aylara göre değişiminin deneysel olarak incelenmesi*, Ege Üniversitesi, Nükleer Bilimler Enstitüsü, İzmir.
- Fleischer, R.L. ve Mogro-Campero, A. (1980), “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 ve Lowder W.M.), Rep. CONF-780422, U.S. Dept. Of Energy, Washington, D.C., **1**, 57-71.
- Font, L., Baixeras, C., Moreno, V., Bach, J. (2008), “Soil radon levels across the Amer fault”, *Radiation Measurements*, **43**, 319–323.
- Fu, C. C., Yang, T. F., Du, J., Walia, V., Chen, Y. G., Liu, T. K., Chen, C. H. (2008), “Variations of helium and radon concentrations in soil gases from an active fault zone in southern Taiwan,” *Radiation Measurements*, **43**, 348-352.
- Fujiyoshi, R., Kinoshita, M., Sawamura, S. (2005), “Variation of ²²²Rn activity concentration in soil gas at a site in Sapporo, Japan,” *Environmental Geochemistry and Health*, **27**, 539–47.
- Genitron Instruments, *AquaKIT User Manual*, Heerstrasse 149 D-60488 Frankfurt, Germany, 2008.

- Ghosh, D., Deb, A., Sengupta, R., Patra, K.K., Bera, S. (2007), “Pronounced soil-radon anomaly-Precursor of recent earthquakes in India, Radiation Measurements,” **42**, 466-471.
- Ghosh, D., Deb, A., Sengupta, R. (2009), “Anomalous radon emission as precursor of earthquake,” *Journal of Applied Geophysics*, **69**, 67–81.
- Güloğlu, A. (2007), *Çeşme bölgesi aktif fay hatlarındaki kaplıcalarda radon anomalileri ile sismik aktiviteler arasındaki ilişkilerin incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Günaydı, T. (2004), *İzmir-Dikili jeotermal sahalarına yakın yerleşim alanlarında radon konsantrasyonlarının belirlenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Gürsoy, H., Piper, J. D. A. ve Tatar, O. (2003), “Neotectonic deformation in the western sector of tectonic escape in Anatolia: palaeomagnetic study of the Afyon region, central Turkey,” *Tectonophysics*, **374**, 57-79.
- Hauksson, E. (1981), “Radon content of groundwater as an earthquake precursor: evaluation of worldwide data and physical basis,” *J. Geophys. Res.*, **86**, 9397–9410.
- Hauksson, E., Goddard, J. (1981), “Radon Earthquake Precursor Studies in Iceland,” *Journal of Geophysical Research*, **86**, 7037–7054.
- Hüryaşar, A. (1997), *Kapalı bina içi atmosferinin radon ürünlerinden arıtılması için filtrasyon sistemi geliştirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Horvat, A., Bohus, L. O., Urbani, F., Marx, G., Piroth, A., Greaves, E. D. (2000), “Radon concentrations in hot spring waters in northern Venezuela,” *Journal of environmental radioactivity*, **47**, 127-133.
- Igarashi, G., Saeki, S., Takahata, N., Sumikawa, K., Tasaka, S., Sasaki, Y., Takahashi, M., Sano, Y. (1995), “Ground-water radon anomaly before the Kobe earthquake in Japan,” *Science*, **269**, 60-61.
- Ikeya, M., Yamanaka, C., Matsuda, T., Sasaoka, H., Ochiai, H., Huang, Q., Ohtani, N., Ohta, M., Ohno, Y., Nakagawa, T. (2000), “Electromagnetic pulses generated by compression rocks and animal behavior,” *Episodes*, **23**, 262–265.

- International Atomic Energy Agency, "Radiation Safety", IAEA Division of Public Information, 96-00725, IAEA/PI/A47E, 1996.
- İnan, S., Akgül, T., Seyis, C., Saatçılar, R., Baykut, S., Ergintav, S., Baş, M. (2008), "Geochemical monitoring in the Marmara region (NW Turkey): A search for precursors of seismic activity," *Journal of Geophysical Research*, **113**, B03401, doi:10.1029/2007JB005206.
- İnceöz, M., Baykara, O., Aksoy, E., Doğru, M. (2006), "Measurements of soil gas radon in active fault systems: A case study along the North and East anatolian fault systems in Turkey," *Radiation Measurements*, **41**, 349-353.
- Kapdan, E. (2009), *Adapazarı merkezi kış dönemi radon ölçüm ve analizleri*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- Kaptan, Y., *Alfa bozunumu*, 2008.
http://yunus.hacettepe.edu.tr/~kaptan/dersler/443/not/alfa_bozunumu.pdf
- Karadeniz, A. (2007), "Deprem ve anormal hayvan davranışları," *Atatürk Üniversitesi Vet. Bil. Derg.*, **2 (3)**, 99-102.
- Karahan, G. (1997), *İstanbul'un Çevresel Doğal Radyoaktivitesinin Tayini ve Doğal Radyasyonların Yıllık Etkin Doz Eşdeğeri*, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Nükleer Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- Keller, J. (1983), "Potassic Lavas in the Orogenic Volcanism of the Mediterranean Area", *Journa of Volcanology and Geothermal Research*, **18**, 321-335.
- Kenagy, G. J. ve Enright, J. T. (1980), "Animal behavior as a predictor of earthquakes? An analysis of rodent activity rhythms," *Zeitschrift für Tierpsychologie*, **52 (3)**, 269-284.
- Ketin, I. (1966), "Anadolu'nun Tektonik Birlikleri," *M.T.A Dergisi*, **53**, Ankara.
- Khan, H. A. ve Qureshi, A. A. (1994), "Solid State Nuclear Track Detection: A Useful Geological / Geophysical Tool," *Nucl. Geophys.*, **8**, 1-37.
- Kibici, Y., Yıldız, A., Bağcı, M. (2001), "Afyon kuzeyinin jeolojisi, ve mermer potansiyelinin araştırılması," *Türkiye III. Mermer Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, Afyonkarahisar, 73-84.
- King, C.Y. (1978), "Radon Emanation on San Andreas Fault," *Nature Vol.*, **271**, 516-519.

- King, C.Y. (1980), "Episodic Radon Changes in Subsurface Soil Gas Along Active Faults and Possible Relation to Earthquakes," *J. Geophys. Res.*, **85**, 3065-3078.
- King, C.Y., King, B.S., Evans, W.C. (1996), "Spatial radon anomalies on active faults in California," *Applied Geochemistry*, **11**, 497-510.
- Kirschvink, J. L. (2000), "Earthquake prediction by animals: Evolution and sensory perception." *Bull. Seism. Soc. Am.*, **90**, 312-323.
- Koçyiğit, A. (1984), "Güneybatı Türkiye ve yakın dolayında levha içi yeni tektonik gelişim (A new intracontinental tectonic regime in southwest Turkey and its close vicinity)," *Bulletin of the Geological Society of Turkey*, **27**, 1-16.
- Koçyiğit, A., Yusufoglu, H. ve Bozkurt, E. (1999), "Evidence from the Gediz graben for episodic two stage extension in western Turkey," *J. Geol. Soc.*, **156**, 605-616.
- Koçyiğit A., Ünay, E. ve Saraç, G. (2000), "Episodic graben formation and extensional neotectonic regime in west Central Anatolia and the Isparta Angle: a key study in the Akşehir-Afyon graben, Turkey," *Geological Society*, London, Special Publication, **173**, 405-421.
- Koçyiğit, A., Bozkurt, E., Kaymakçı, N., Şaroğlu, F., *Şubat 2002 Çay (Afyon) Depremi'nin kaynağı ve ağır hasarın nedenleri*. Akşehir Fay Zonu Orta Doğu Teknik Üniversitesi Tektonik Araştırma Birimi Jeolojik Ön Raporu, 2002.
<http://www.metu.edu.tr/~akoc/Afyon.pdf>
- Koçyiğit, A. ve Deveci, Ş. (2005), "Akşehir-Simav fay sistemi: güneybatı Türkiye'de neotektonik rejimin başlama yaşı ve depremsellik [Akşehir-Simav fault system: initiation age of the neotectonic regime and seismicity in the southwestern Turkey]," *Deprem Sempozyumu özetler kitabı*, Kocaeli, 26.
- Koçyiğit, A. ve Deveci, Ş. (2007), *Çukurören- Çobanlar (Afyon) arasındaki deprem kaynaklarının (Aktif fayların) belirlenmesi*. TÜBİTAK, Proje No: 106Y209, Ankara.

- Korhonen, P., Kokotti, H. ve Kalliokoski, P. (2000), “Behaviour of radon progenies and particle levels during room depressurisation,” *Atmospheric Environment*, **34**, 2373-2378.
- Kulalı, F., *Topraktaki radon konsantrasyonu ölçümü ve deprem ilişkisinin araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2009.
- Kuo, T., Fan, K., Kuochen, H., Han, Y., Chu, H., Lee, Y. (2006), “Anomalous decrease in groundwater radon before the Taiwan M6.8 Chengkung earthquake, *Journal of Environmental Radioactivity*,” **88**, 101-106.
- Kuşçu, İ., Barka, A. A., Kato, H., Katoh, K. (1992), “Kuzey Anadolu Fayı Zonundaki Bazı Faylarda Radon Gazı (Alpha İzi) Ölçümleri,” *Jeoloji Mühendisliği*, **40**, 33-40.
- Külahcı, F., İnceöz, M., Doğru, M., Aksoy, E., Baykara, O. (2009), “Artificial neural network model for earthquake prediction with radon monitoring,” *Applied Radiation and Isotopes*, **67**, 212–219.
- Malmqvist, L. ve Kristiansson, K. (1982), “Microflow of geogas-a possible formation mechanism for deep-sea nodules,” *Marine Geology*, **48**, 167–169.
- Metin, S., Genç, Ş. ve Bulut, V. (1987), *Afyon ve dolayının jeolojisi*. M.T.A derleme, No:8103, Ankara.
- Miklavcic, I., Radolic, V., Vukovic, B., Poje, M., Varga, M., Stanic, D., Planinic, J. (2008), “Radon anomaly in soil gas as an earthquake precursor,” *Applied Radiation and Isotopes*, **66**, 1459–1466.
- Morawska, L. (1989), “Investigations of a specific area of a material on the basis of ²²²Rn emanation coefficient measurements,” *Health Phys.*, **57**, 23-27.
- Monnin, M. ve Seidel, J.L. (1997), “Physical Model Related to Radon emission in Connection with Dynamic Manifestations in the Upper Terrestrial Crust: A Review,” *Radiation Measurement*, **28**, 703-712.
- Moussa, M. M., El Arabi, A-G, M. (2003), “Soil radon survey for tracing active fault: a case study along Qena-Safaga Road, Eastern Desert, Egypt,” *Radiation Measurements*, **37**, 211-216.

- NCRP, National Council On Radiation Protection and Measurements. (1987), *Exposure of The Population in The United States and Canada From Natural Background Radiation*, Report No: 94.
- Nurlu, M. ve Kuterdem, K. (2002), *3 Şubat 2002 Çay(Afyon) Depremi*. Afet İşleri Genel Müdürlüğü Deprem Araştırma Dairesi, Rapor No: 4083.1, Ankara.
- Özbal, Ö. (1999), *İzmir-Balçova'da Termal Su Kullanılan Binalarda Radon Konsantrasyonu ve Sudaki Radonla Korelasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Özden, S., Kavak, K. Ş., Koçbulut, F., Över, S., ve Temiz, H. (2002), “3 Şubat 2002 Çay (Afyon) depremleri,” *55. Türkiye Jeoloji Kurultayı Bildiri Özetleri*, Ankara, 218-219.
- Papastefanou, C. (2010), “Variation of radon flux along active fault zones in association with earthquake occurrence,” *Radiation Measurements*, **45**, 943-951.
- Perrier, F. ve Richon, P. (2010), “Spatiotemporal variation of radon and carbon dioxide concentrations in an underground quarry: coupled processes of natural ventilation, barometric pumping and internal mixing,” *Journal of Environmental Radioactivity*, **101**, 279–296.
- Pfister, M., Rybach, L. ve Şimşek, Ş. (1998), “Geothermal Reconnaissance of the Marmara Sea Region (NW-Turkey); Surface Heat Flow Density in an Area of Active Continental Extension,” *Tectonophysics*, **291**, 77-89, The Netherlands.
- Pierres, K. M., Gal, F., Brach, M., Guignat, S. (2010), “Radon, helium and CO₂ measurements in soils overlying a former exploited oilfield, Pechelbronn district, Bas-Rhin, France,” *Journal of Environmental Radioactivity*, **101**, 835-846.
- Planinic, J., Radolic, V., Lazanin, Z. (2001), “Temporal Variation of Radon in Soil Related to Earthquakes,” *Appl. Radiat. Isot.*, **55**, 267-272.
- Planinic, J., Radolic, V., Vukovic, B. (2004), “Radon as an earthquake precursor,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, **530**, 568–574.
- Press, F. (1975), “Earthquake prediction,” *Scientific American*, **232**, 14–23.

- Ramola, R. C., Prasad, Y., Prasad, G., Kumar, S., Choubey, V. M. (2008), "Soil-gas radon as seismotectonic indicator in Garhwal Himalaya," *Applied Radiation and Isotopes*, **66**, 1523-1530.
- Reimer, G.M. (1980), "Use of Soil-Gas Helium Concentrations for Earthquake Prediction: Limitations Imposed by Diurnal Variation," *J. Geophys. Res.*, **85**, 3107-3114.
- Rickon, P., Bernard, P., Labeled, V., Sabroux, J. C., Beneito, A., Lucius, D., Abbad, S., Robe, M. C. (2007), "Results of monitoring ^{222}Rn in soil gas of the Gulf of Corinth region, Greece," *Radiation Measurements*, **42**, 87-93.
- Saç, M. M. ve Camgöz, B. (2005), "İzmir'de sismik aktiviteler ile radon konsantrasyonları arasındaki korelasyonun incelenmesi," *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, **7**, 47-54.
- Sadovsky, M. A., Nersesov, I. L., Nigmatullaev, S. K., Latynina, L. A., Lukk, A. A., Semenov, A. N., Simbireva, I. G. ve Ulomov, V. I. (1972), "The Processes Preceding Strong Earthquakes in Some Regions of Middle Asia," *Tectonophysics*, **14**, 295-307.
- Sandıkçıoğlu, A. (2004), *Afyon deprem fay hattı üzerinde bulunan kaplıca ve kuyu sularındaki radon değişiminin ölçümü*, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Saphymo GmbH, *AlphaGUARD User Manual Portable Radon Monitor*, Heerstrasse 149 D-60488 Frankfurt, Germany, 1998.
- Saphymo GmbH, *AlphaPUMP Technical Description*, Heerstrasse 149 D-60488 Frankfurt, Germany, 2001.
- Savaşçın, M. Y., Francalanci, L., Innocenti, F., Manetti, P., Birsoy, R. ve Dağ, N. (1995), "Miocene-Pliocene Potassic Ultrapotassic Volcanism of the Afyon-Isparta Region (Central-Western Anatolia, Turkey): Petrogenesis and Geodynamic implications," *IIESCA Proceedings*, **2**, 487-502.
- Savaşçın, M. Y. ve Oyman, T. (1998), "Tectono-Magmatic Evolution Of Alkaline Volcanics at The Kırka-Afyon-Isparta Structural Trend, SW Turkey," *Turkish Journal of Earth Sciences*, **7/3**, 201-214.

- Segovia, N., Mena, M., Pena, P., Tamez, E., Seidel, J. L., Monnin, M., Valdes, C. (1999), "Soil Radon Time Series: Surveys In Seismic and Volcanic Areas," *Radiation Measurements*, **31**, 307-312.
- Shapiro, M.H., Melvin, J.D., Copping, N.A., Tombrello, T. A. ve Whitcomb, J.H. (1980), "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. ve Lowder W.M.), Rep. CONF-780422, U.S. Dept. of Energy, Washington, D.C., **1**, 137-153.
- Singh, M., Kumar, M., Jain, R. K., Chatrath, R. P. (1999), "Radon in ground water related to seismic events," *Radiation Measurements*, **30**, 465-469.
- Smith, A. R., Wollenberg, H. A. ve Mosier, D. F. (1980), "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. ve Lowder W.M.), Rep. CONF-780422, U.S. Dept. Of Energy, Washington, D.C., **1**, 154-174, 41-42.
- Surbeck, H. (1991), "The Search for Radon Sources," *Second Workshop on Radon Monitoring in Radioprotection Environmental and/or Earth Sciences*, SMR/598-3, ICTP, Italy.
- Şahin, A. A. (1988), *Atmosferden ve toprak gazından çift filtre yöntemi ile radon gazı ölçümü*, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Nükleer Bilimler Enstitüsü, İzmir.
- Şahin, S. (2009), *Sivrice fay zonundaki radon değişimi ve doğal radyoaktivite*, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Şaroğlu, F., Boray, A. ve Emre, O. (1987), *Active faults of Turkey*, M.T.A. Raporu, No: 8643, 394, Ankara.
- Şengör, A. M. C., Görür, N. ve Şaroğlu, F. (1985), "Strike-slip faulting and related basin formation in zones of tectonic escape: Turkey as a case study, Strike-Slip Deformation Basin Formation and sedimentation," *Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Spec. Publ.*, **37**, 227-264.

- Şimşek, Ş. (1997), “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, 111-124, Switzerland.
- Tanner, A. B. (1980), “Radon migration in the ground. A supplementary review,” *In The Natural Radiation Environment III. Symposium Proceedings*, Houston, TX, 23-28 April (Ed: Gesell F.F and Lowder W.M.), Rep. Conf-780422, U.S. Dept. Of Energy, Washington, D.C. **1**, 5-56.
- Tansia, C., Tallaricob, A., Iovinea, G., Folino Galloa, M., Falconeb, G. (2005), “Interpretation of radon anomalies in seismotectonic and tectonic gravitational settings: the south–eastern Crati Graben (Northern Calabria, Italy),” *Tectonophysics*, **396**, 181-193.
- Taymaz, T. ve Tan, O. (2002), “Göller Bölgesi’nin deprenselliği: Sultandağı Depremi,” *Tübitak Bilim ve Teknik*, **412**, 54-55.
- Teng, T.L. (1980), “Some Recent Studies on Groundwater Radon Content as an Earthquake,” *J. Geophys. Res.*, **85**, 3089-3099.
- Tezcan, L., Meriç, B. T., Doğdu, N., Atilla, A. O, Kurttaş, T., (2002), *Akarçay Havzası Hidrojeolojisi ve Yeraltı suyu Akım Modeli*. Hacettepe Üniversitesi-Uluslar arası Karst Su Kaynakları Uygulama ve Araştırma Merkezi (UKAM)-Devlet Su İşleri (D.S.İ) Genel Müdürlüğü Final Raporu, 325, Ankara.
- Tributsch, H. (1978), “Do aerosol anomalies precede earthquake?,” *Nature*, **276**, 606-608.
- Ulomov, V.I., Mavashev, B.Z. (1971), “Forerunners of the Taşkentearthquake,” *Izv. Akad. Nauk Uzb. SSR*, 188-200.
- Ulusay, R., Kasapoğlu, K., Dirik, K. ve Gökçeoğlu, C. (2002), *3 Şubat 2002 Sultandağı (Afyon) Depremi Saha İnceleme Raporu*, Hacettepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, No: 44, Ankara.
- Ulusay, R., Tuncay, E., Sönmez, H. ve Gökçeoğlu, C. (2004), “An attenuation relationship based on Turkish strong motion data and iso-acceleration map of Turkey,” *Engineering Geology*, **74**, 265-291.

- Ulutürk, Y. (2009), *Ömer-Gecek (Afyonkarahisar) dolayının jeolojisi ve suların kökensel yorumu*, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- UNSCEAR, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. (1988), *Sources, Effects, and Risks of Ionizing Radiation*, United Nations sales publication No: E. 88. IX.7, New York.
- UNSCEAR, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. (1993), *Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation, Report to the General Assembly*, United Nations, New York.
- Utkin, V. I. ve Yurkov, A. K. (2010), "Radon as a tracer of tectonic movements," *Russian Geology and Geophysics*, **51**, 220–227.
- Virk, H.S. ve Singh, B. (1993), "Radon Anomalies in Soil-gas and Groundwater as Earthquake Precursor Phenomena," *Tectonophysics*, **227**, 215-224.
- Virk, H. S. ve Walia, V. (2001), "Helium/radon precursory signals of Chamoli Earthquake, India," *Radiation Measurements*, **34**, 379–384.
- Wakita, H. (1996), "Chemical Challenge to Earthquake Prediction," *Proceedings Natural Academic Science*, **93**, 3781-3786.
- Walia, V., Mahajan, S., Kumar, A., Singh, S., Bajwa, B. S., Dhar, S., Yang, T. F. (2008), "Fault delineation study using soil–gas method in the Dharamsala area, NW Himalayas, India," *Radiation Measurements*, **43**, 337-342.
- Wakita, H., Nakamura, Y. ve Sano, Y. (1998), "Short-term and intermediate-term geochemical precursors," *Pure Appl. Geophys.*, **126**, 267-278.
- Wasiolek, P. T. ve James, A. C. (2000), "Unattached fraction measuring technique and radon lung dose," *Journal of Environmental Radioactivity*, **51**, 137-151.
- Wattananikorn, K., Kanaree, M. ve Wiboolsake, S. (1998), "Soil Gas Radon as an Earthquake Precursor: Some Considerations on Data Improvement," *Radiation Measurements*, **29**, No.6, 593-598.
- Wiltschko, R. ve Wiltschko, W. (1995), "Magnetic orientation in animals," *Zoophysiology*, Springer, Berlin, **33**, 297.
- Yalçınkaya, S., Ergin, A., Taner, K., Afşar, Ö.P., Dalkılıç, H., Özgönül, E. (1986), *Batı Toroslar'ın jeoloji raporu*. M.T.A. Raporu, No: 7898, Ankara.

- Yalim, H. A., Sandıkcıoğlu, A., Ünal, R. ve Orhun, Ö. (2007), “Measurements of radon concentrations in well waters near the Akşehir fault zone in Afyonkarahisar,” *Radiation Measurements*, **42**, 505-508.
- Yaprak, G. (1988), *Uranyum keşfi için katı hal iz kazıma dedektörleri ile toprak gazı radon ölçümü ve fiziksel parametrelerin incelenmesi*, Ege Üniversitesi, Nükleer Bilimler Enstitüsü, İzmir.
- Yaprak, G., Candan, O., Gür, F., Batmaz, İ., Camgöz, B. (2003), “Aktif Gediz Grabeninde Yer alan Alaşehir/Manisa Yöresinde Tektonik Aktiviteye Dayalı Radon Anomalilerinin İncelenmesi,” *VIII. Ulusal Nükleer Bilimler ve Teknolojileri Kongresi*, Erciyes Üniversitesi, Kayseri.
- Yasuoka, Y., Ishii, T., Tokonami, S., Ishikawa, T., Narazaki, Y. ve Shinogi, M. (2005), “Radon Anomaly Related to the 1995 Kobe Earthquake in Japan,” *International Congress Series*, **1276**, 426-427.
- Yasuoka, Y., Igarashi, G., Ishikawa, T., Tokonami, S. ve Shinogi, M. (2006), “Evidence of Precursor Phenomena in the Kobe Earthquake Obtained From Atmospheric Radon Concentration,” *Applied Geochemistry*, **21**, 1064-1072.
- Yüce, G., Uğurluoğlu, D.Y., Adar, N., Yalçın, T., Yaltrak, C., Streil, T., Oeser, V. (2010), “Monitoring of earthquake precursors by multi-parameter stations in Eskişehir region (Turkey),” *Applied Geochemistry*, **25**, 572-579.
- Zmazek, B., Vaupotic, J., Zivcic, M., Premru, U., Kobal, I. (2000), “Radon Monitoring for Earthquake Prediction in Slovenia,” *Fizika B (Zagreb)*, **3**, 111-118.
- Zmazek, B., Zivcic, M., Vaupotic, J., Bidovec, M., Poljak, M., Kobal, I. (2002), “Soil Radon Monitoring in the Krsko Basin, Slovenia,” *Appl. Radiat. Isot.*, **56**, 649-657.
- Zmazek, B., Todorovski, L., Dzeroski, S., Vaupotic, J., Kobal, I. (2003), “Application of Decision Trees to the Analysis of Soil Radon Data for Earthquake Prediction,” *Applied Radiation and Isotopes*, **58**, 697-706.
- Zmazek, B., Zivcic, M., Todorovski, L., Dzeroski, S., Vaupotic, J., Kobal, I. (2005), “Radon in Soil Gas: How to Identify Anomalies Caused by Earthquakes,” *Applied Geochemistry*, **20**, 1106-1119.

Zmazek, B., Todorovski, L., Zivcic, M., Dzeroski, S, Vaupotic, J., Kobal, I. (2006), "Radon in a thermal spring: Identification of anomalies related to seismic activity," *Applied Radiation and Isotopes*, **64**, 725-734.

Ek-1 Deprem Kayıtları (17.08.2009–27.09.2010 tarihleri arasında)

Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü

	Tarih	Saat	Enlem	Boylam	M (Büyüklik)	Derinlik	Yer
1	27.08.2009	22:02:06	38,646	31,224	2,9	5	SULTANDAĞI [Kuzey 13.24 km]
2	15.09.2009	09:54:10	38,703	31,292	3,9	5,4	SULTANDAĞI [Kuzey Doğu 20.52 km]
3	15.09.2009	10:02:34	38,724	31,35	2,7	7,2	SULTANDAĞI [Kuzey Doğu 24.57 km]
4	16.09.2009	02:06:20	38,714	31,313	2,9	5	SULTANDAĞI [Kuzey Doğu 22.24 km]
5	16.09.2009	10:57:53	38,637	31,319	2,9	5,4	SULTANDAĞI [Kuzey Doğu 14.86 km]
6	16.09.2009	10:57:54	38,681	31,327	2,9	12,2	SULTANDAĞI [Kuzey Doğu 19.35 km]
7	19.09.2009	13:32:00	38,674	31,229	3	6,1	BOLVADİN [Güney Doğu 16.35 km]
8	30.09.2009	10:10:56	38,704	31,289	3,1	5	SULTANDAĞI [Kuzey Doğu 20.53 km]
9	10.10.2009	23:11:18	38,688	31,388	3,2	5,3	SULTANDAĞI [Kuzey Doğu 22.98 km]
10	26.10.2009	14:33:16	38,76	31,309	2,6	5,3	BOLVADİN [Kuzey Doğu 23.77 km]
11	06.11.2009	10:18:00	38,597	31,368	1,9	16,8	SULTANDAĞI [Kuzey Doğu 14.89 km]
12	27.11.2009	06:10:54	38,711	31,384	2,8	8,4	SULTANDAĞI [Kuzey Doğu 24.85 km]
13	29.11.2009	17:23:59	38,681	31,319	2,9	13,3	SULTANDAĞI [Kuzey Doğu 19.15 km]
14	30.11.2009	23:48:41	38,686	31,354	3,6	5,4	SULTANDAĞI [Kuzey Doğu 21.12 km]
15	30.11.2009	23:50:37	38,629	31,327	2,6	15,4	SULTANDAĞI [Kuzey Doğu 14.52 km]
16	01.12.2009	01:02:07	38,687	31,341	2,8	5,2	SULTANDAĞI [Kuzey Doğu 20.57 km]
17	02.12.2009	08:16:24	38,657	31,386	2,9	5	SULTANDAĞI [Kuzey Doğu 20.28 km]
18	03.12.2009	14:12:54	38,668	31,366	2,7	7,3	SULTANDAĞI [Kuzey Doğu 20.05 km]
19	06.12.2009	08:43:51	38,76	31,319	2,4	5,4	BOLVADİN [Kuzey Doğu 24.53 km]
20	13.12.2009	01:54:35	38,732	31,305	2,9	5	BOLVADİN [Doğu 22.77 km]
21	21.12.2009	21:09:01	38,683	31,211	3,6	5	BOLVADİN [Doğu 14.58 km]
22	21.12.2009	21:18:02	38,699	31,222	2,9	5,4	BOLVADİN [Doğu 15.36 km]
23	23.12.2009	14:01:56	38,739	31,281	3,2	16,6	BOLVADİN [Kuzey Doğu 20.85 km]

Ek-1 Deprem Kayıtları devamı

Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü

	Tarih	Saat	Enlem	Boylam	M (Büyüklik)	Derinlik	Yer
24	25.12.2009	13:11:22	38,541	31,08	3,1	2,5	ÇAY [Güney Doğu 6.99 km]
25	26.12.2009	15:36:28	38,701	31,253	2,8	7,5	BOLVADİN [Doğu 18.05 km]
26	02.02.2010	18:28:41	38,723	30,777	2,7	11,3	ÇOBANLAR [Kuzey 2.64 km]
27	02.02.2010	20:30:38	38,712	31,227	2,7	5	BOLVADİN [Doğu 15.83 km]
28	25.02.2010	21:46:24	38,636	30,835	2,5	14,9	ÇOBANLAR [Güney Doğu 8.55 km]
29	26.02.2010	21:02:13	38,736	30,764	2,6	8,9	ÇOBANLAR [Kuzey Doğu 4.23 km]
30	07.03.2010	01:57:42	38,431	30,514	3	2,1	ŞUHUT [Güney 10.39 km]
31	07.03.2010	02:38:49	38,456	30,59	2,6	7,9	ŞUHUT [Kuzey Doğu 8.99 km]
32	30.03.2010	12:57:10	38,588	31,004	2,8	8,1	ÇAY [Batı 1.77 km]
33	01.04.2010	20:55:35	38,548	31,242	3	4,5	SULTANDAĞI (AFYON) [Kuzey Doğu 2.85 km]
34	02.04.2010	14:03:17	38,694	30,951	2,6	9,3	BOLVADİN [Batı 8.23 km]
35	04.04.2010	02:54:23	38,679	30,89	3,3	5	ÇOBANLAR [Kuzey Doğu 9.78 km]
36	07.05.2010	12:20:41	38,7053	30,8285	2,7	8	ÇOBANLAR [Doğu 4.22 km]
37	23.05.2010	20:01:33	38,6443	31,4223	2,7	6	SULTANDAĞI [Kuzey Doğu 21.77 km]
38	03.06.2010	06:28:00	38,6502	31,3805	2,7	14,8	SULTANDAĞI [Kuzey Doğu 19.43 km]
39	03.06.2010	06:55:43	38,5228	31,4092	2,9	16,3	SULTANDAĞI [Doğu 16.33 km]
40	03.06.2010	07:01:11	38,445	31,3198	2,7	12,3	SULTANDAĞI [South East 12.52 km]
41	03.06.2010	12:06:48	38,5003	31,3772	3	5	SULTANDAĞI [Kuzey Doğu 13.87 km]
42	14.06.2010	00:36:18	38,6722	31,1973	2,6	5,4	BOLVADİN [Kuzey Doğu 13.73 km]
43	13.07.2010	09:37:10	38,5802	31,2058	2,8	4,8	SULTANDAĞI [Kuzey Doğu 6.04 km]
44	17.07.2010	07:22:37	38,6505	30,8765	3,1	9,6	ÇOBANLAR [Kuzey Doğu 9.99 km]
45	20.07.2010	07:52:45	38,5700	31,1850	2,9	13,70	SULTANDAĞI [Kuzey Doğu 5.72 km]
46	20.07.2010	08:01:16	38,5992	31,3597	3	5,00	SULTANDAĞI [Kuzey Doğu 14,43 km]

Ek-1 Deprem Kayıtları devamı

Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü							
Tarih	Saat	Enlem	Boylam	M (Büyüklik)	Derinlik	Yer	
47	25.07.2010	00:36:56	38,7275	31,2998	2,8	7,50	BOLVADİN [Doğu 22,28 km]
48	25.07.2010	22:37:59	38,6890	31,2957	3,1	5,20	SULTANDAĞI [Kuzey Doğu 20,05 km]
49	26.07.2010	00:46:25	38,7005	31,3220	2,9	5,40	SULTANDAĞI [Kuzey Doğu 21,15 km]
50	04.08.2010	00:04:25	38,7380	30,6280	2,6	6,5	AFYON [Doğu 7,97 km]
51	08.08.2010	05:34:05	38,7577	31,2563	2,8	19,90	BOLVADİN [Kuzey Doğu 19,28 km]
52	08.08.2010	05:34:07	38,7123	31,3628	2,8	4,70	SULTANDAĞI [Kuzey Doğu 23,96 km]
53	29.08.2010	00:35:19	38,7305	31,2597	3,3	5,00	BOLVADİN [Doğu 18,87 km]
54	14.09.2010	07:35:41	38,5687	31,1270	2,9	5,00	ÇAY [Kuzey Doğu 9,11 km]
55	16.09.2010	14:47:46	38,6983	31,2192	2,6	29,30	BOLVADİN [Doğu 15,16 km]
56	21.09.2010	11:20:30	38,8317	30,3847	2,6	13,40	AFYON [Kuzey Doğu 16,09 km]
57	24.09.2010	09:41:02	38,7390	30,4728	3,1	5,00	AFYON [Kuzey Doğu 5,69 km]
58	25.01.2010	19:45:20	38,631	30,601	2,9	14,3	SUHUT [Kuzey Doğu 13,31 km]
59	06.03.2010	05:42:18	38,437	30,452	3	5	ŞUHUT [Güney Doğu 11,98 km]
60	08.03.2010	16:09:37	38,609	30,369	2,6	8,3	ŞUHUT [Kuzey Doğu 17,16 km]
61	27.07.2010	02:13:34	38,5342	30,5517	3,3	5,00	ŞUHUT [Kuzey Doğu 1,96 km]

Ek-2 İl Özel İdare (1 nolu kaynak)



Ek-3 Turkuaz Hayvan Çiftliği (2 nolu kaynak)



Ek-4 Şeker Fabrikası (3 nolu kaynak)



Ek-5 Heybeli Termal (4 nolu kaynak)



Ek-6 Maltepe Köyü (5 nolu kaynak)



Ek-7 Kadıköy (6 nolu kaynak)



Ek-8 ay Belediyesi Bahçesi-600m (7 nolu kaynak)



Ek-9 ay Belediyesi Bahçesi-700m (8 nolu kaynak)



Ek-10 ay-Ören (9 nolu kaynak)



Ek-11 ay-Ali Kaleli Mahallesi (10 nolu kaynak)



Ek-12 ay Belediyesi Beton Santrali (11 nolu kaynak)



Ek-13 ayırpınar Köyü (12 nolu kaynak)



Ek-14 Yakasenek-Oğuz Mahallesi (13 nolu kaynak)



Ek-15 Alara Meyva Bahçesi (14 nolu kaynak)



Ek-16 Sultandağı-Kirazlı Bahçe (15 nolu kaynak)

