

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KUZEY ANADOLU VE DOĞU ANADOLU FAY HATLARININ
KESİŞİM BÖLGESİNDEKİ DOĞAL RADYOAKTİVİTE TAYİNİ**

Oktay BAYKARA

DOKTORA TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

ELAZIĞ, 2005

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KUZEY ANADOLU VE DOĞU ANADOLU FAY HATLARININ
KESİŞİM BÖLGESİNDEKİ DOĞAL RADYOAKTİVİTE TAYİNİ**

Oktay BAYKARA

DOKTORA TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

ELAZIĞ, 2005

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KUZAY ANADOLU VE DOĞU ANADOLU FAY HATLARININ
KESİŞİM BÖLGESİNDEKİ DOĞAL RADYOAKTİVİTE TAYİNİ**

Oktay BAYKARA

DOKTORA TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

Bu çalışma, Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi (FÜBAP)
tarafından desteklenmiştir (FÜBAP-Proje No: 893)

ELAZIĞ, 2005

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KUZEY ANADOLU VE DOĞU ANADOLU FAY HATLARININ KESİŞİM
BÖLGESİNDEKİ DOĞAL RADYOAKTİVİTE TAYİNİ

Oktay BAYKARA

Doktora Tezi
Fizik Anabilim Dalı

Bu tez, 03/10/2005 tarihinde aşağıda belirtilen jüri tarafından oy birliği ile başarılı olarak değerlendirilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Mahmut DOĞRU

Üye: Prof. Dr. Yusuf ATICI

Üye: Prof. Dr. Cihan ALKAN

Üye: Doç. Dr. İskender AKKURT

Üye: Yrd.Doç.Dr. Hulusi YAVUZ

M. Doğru
Y. Atıcı
C. Alkan
İ. Akkurt
H. Yavuz

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ...12/10/2005 tarih ve
2005/35-8 sayılı kararı ile onaylanmıştır.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması süresince çok değerli bilgileriyle bana daima yardımcı olan, engin tecrübelerinden istifade ettiğim ve her türlü desteğini hissettiğim danışmanım Prof.Dr. Mahmut Doğru'ya sonsuz teşekkür ve şükranlarımı sunarım.

Radon algılayıcıların hazırlanması, kalibrasyonu ve analizleri sırasında bana her türlü desteği veren ve yardımlarını esirgemeyen ÇNAEM Sağlık Fiziği Bölüm Başkanı Dr. Nilgün ÇELEBİ' ye, Teknisyen Güner KOPUZ'a ve Dr. Gürsel KARAHAN'a teşekkür ederim.

Çalıştığım bölgeyi jeolojik açıdan değerlendiren ve yorumlayan, bölgenin haritalandırılmasında bana yardımcı olan F.Ü. Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Öğretim Üyelerinden Doç.Dr. Ercan Aksoy ve Yrd. Doç.Dr. Murat İnceöz'e ayrı ayrı teşekkür ederim. Ayrıca, tez çalışmamda emeği geçen Dr. Fatih Külahcı ve Dr. Sefa Kazanç'a da teşekkür ederim.

Öğrenciliğim, akademik hayatım ve çalışmalarım boyunca, bana her tür maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen çok sevgili babama, kardeşime ve çalışmalarına onun ile başlayıp şu anda onsuz devam ettiğim çok sevgili anneme teşekkür, saygı ve sevgilerimi sunarım.

Doktora çalışmalarım süresince bana her türlü desteği sağlayan sevgili eşime ve manevi desteğinden dolayı yeni doğan kızıma sonsuz teşekkür ederim.

Oktay BAYKARA

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

İÇİNDEKİLER.....	I
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	III
TABLolar LİSTESİ.....	V
SİMGELER LİSTESİ.....	VI
ÖZET.....	VII
ABSTRACT	VIII
1. GİRİŞ.....	1
2. RADYASYON ve RADYASYON ALGILAMA YÖNTEMLERİ	3
2.1. Radyasyon ve Çeşitleri.....	3
2.1.1. Alfa Işınları	3
2.1.2. Beta Işınları	3
2.1.3. Gama ve X-Işınları	4
2.1.4. Nötronlar	4
2.2. Radyasyon Ölçüm Yöntemleri	4
2.2.1. İyonizasyon Detektörleri.....	4
2.2.2. Gaz Doldurulmuş Tüp Detektörler	5
2.2.3. Parıldamalı Detektörler	5
2.2.3.1. NaI(Tl) Parıldayıcıları.....	5
2.2.3.2. ZnS (Ag) Parıldayıcıları	5
2.2.3.3. Plastik Parıldayıcılar.....	6
2.3. Dağlamalı Alfa-Parçacık İz Detektörleri.....	6
2.3.1. Polimerlerde Yüklü Parçacık İzleri	6
2.3.2. Kazıma Süreci ve Metodolojisi	7
2.3.2.1. Kimyasal Kazıma	8
2.3.2.2. Elektrokimyasal Kazıma.....	9
2.3.3. İz Sayım Metodu ve İstatistiği.....	10
3. DOĞADAKİ RADYOAKTİF ÇEKİRDEKLER	12
3.1. Uzun Ömürlü Radyoçekirdekler ve Serileri	12
3.1.1. Uranyum Bozunma Zinciri	12
3.1.2. Toryum Bozunma Zinciri.....	13
3.2. Kozmik Işınlarla Üretilen Radyoçekirdekler	13
3.3. Su, Toprak ve Kayalardaki Radyoaktivite.....	13
3.4. Havadaki Radyoaktivite	15
3.5. Radyoçekirdeklerin Taşınımı	16
3.5.1. Atmosferde Taşınım	16
3.5.2. Sulardaki Radyoçekirdeklerin Hareketi	16
3.5.3. Topraktaki Radyoçekirdeklerin Hareketi.....	16
4. JEOLojİ ve RADON.....	18
4.1. Radon	18
4.2. Toprak ve Kayalardaki Uranyum, Radyum ve Radon	19
4.3. Radonun Oluşumu ve Yayılımı	21
4.3.1. Radonun Kaynağı	21

4.3.2. Radonun serbest kalma Mekanizması.....	22
4.3.3. Radonun Taşınma Mekanizması.....	25
4.3.4. Derinliklere Bağlı Olarak Radon Konsantrasyonları.....	27
4.3.5. Ana Kayadaki Fay ve Kırık Bölgelerinden Radon Yayılımı.....	28
4.3.6. Yeraltı Suyundaki Radon.....	29
5. MATERYAL VE METOT.....	31
5.1. Örnekleme Yapılması ve Radon Ölçüm İstasyonlarının Belirlenmesi.....	33
5.2. Örneklerin Sayıma Hazır Hale Getirilmesi.....	35
5.2.1. Su Örnekleri.....	35
5.2.2. Toprak Örnekleri.....	36
5.2.2.1. Toprak Örneklerinin Ağır Metal Analizleri.....	36
5.3. Kullanılan Sayım Sistemleri ve Algılayıcılar.....	36
5.3.1. 7286 Düşük Seviyeli Alfa Sayıcısı.....	37
5.3.2. Penceresiz Parıldayıcı Sayacı.....	37
5.3.3. BP4 Beta Probu Parıldayıcı Sayacı.....	37
5.3.4. Gama Hassas Parıldayıcı Sayacı.....	38
5.3.5. CR-39 Katı Hal İz Radon Algılayıcıları.....	38
5.4. Örneklerin Aktivite Konsantrasyonları.....	38
5.4.1. Sayma Hataları.....	38
5.4.2. Verim Düzeltmeleri.....	39
5.4.3. Örneklerin Aktivite Konsantrasyonlarının Hesaplanması.....	39
5.5. Toprakta Radon Ölçümleri.....	41
5.5.1. CR-39 Radon Algılayıcıların Kalibrasyonu.....	41
5.5.2. CR-39 Radon Algılayıcıların Analizleri.....	41
5.5.3. Radon Gazı Aktivite Yoğunluğunun Hesaplanması.....	42
6. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	43
6.1. Doğu Anadolu Fay Sisteminin Karlıova Kesimindeki Toprak ve Sulardaki Radyoaktivite Seviyeleri.....	43
6.1.1. Su ve Toprak Örneklerindeki Toplam Alfa ve Beta Radyoaktivitesi.....	43
6.1.1.1. Su Örneklerindeki Toplam Alfa ve Beta Radyoaktivitesi.....	43
6.1.1.2. Toprak Örneklerindeki Toplam Alfa ve Beta Radyoaktivitesi.....	45
6.1.2. Doğu Anadolu Fay Zonu'ndaki Toprak Örneklerinde ²³⁸ U, ²³² Th ve ⁴⁰ K Aktiviteleri.....	49
6.1.2.1. Doğu Anadolu Fay Sistemindeki Karasal Kaynaklı Dış Gama Radyasyon Doz Seviyeleri.....	52
6.1.3. Kuzey Anadolu Fay Zonu'ndaki Toprak Örneklerinde ²³⁸ U, ²³² Th ve ⁴⁰ K Aktiviteleri.....	53
6.1.3.1. Kuzey Anadolu Fay Sistemindeki Karasal Kaynaklı Dış Gama Radyasyon Doz Seviyeleri.....	56
6.2. DAFZ ve KAFZ'nundaki Toprak Örneklerinde Ağır Metal Miktarları.....	57
6.3. Fay Zonlarındaki Radon Konsantrasyonu.....	60
6.3.1. DAFZ ve KAFZ' undaki Toprak Havasındaki Radon Konsantrasyonu.....	60
7. SONUÇLARIN YORUMLANMASI.....	65
7.1. Doğu Anadolu Fay Zonu'ndaki Genel Radyoaktivite Seviyesi.....	65
7.2. Kuzey Anadolu Fay Zonu'ndaki Genel Radyoaktivite Seviyesi.....	71
KAYNAKLAR.....	78

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Yüklü bir parçacığın bir polimer içerisinden geçerken neden olduğu zincir bölünmesinin şematik görünümü.....	8
Şekil 2.2: CR-39 detektöründeki alfa parçacık izleri.....	9
Şekil 2.3: CR-39'daki elektrokimyasal olarak kazınmış alfa parçacık iz lekeleri.....	9
Şekil 2.4: İzlerin hareketli raflara sahip bir mikroskop ile taranmasının sistematigi	11
Şekil 4.1: Radonun bozunma zinciri	19
Şekil 4.2: Toronun bozunma zinciri	19
Şekil 4.3: Granit magmanın yeryüzü kabuğuna yukarı yönlü bir zorlaması gösterilmiştir. Kubbeye benzer kısmın üst tarafı K, U ve Th elementleri bakımından zengindir ...	20
Şekil 4.4: Radon derişiminin yarı ömrüne bağlı olarak değişimi.....	22
Şekil 4.5: Farklı ortamlar a) su ve b) hava içerisinde radonun serbest kalma mekanizması	23
Şekil 4.6: Topraktaki nem miktarıyla değişen su ve havadaki radon konsantrasyonu.....	26
Şekil 4.7: Farklı derinliklerdeki radon konsantrasyonundaki değişimler	28
Şekil 5.1: Türkiye'nin tektonik haritası	31
Şekil 5.2: a) DAFS ve KAFS'nin kesişim bölgesi, b) Her iki fay sisteminde ayrı ayrı çalışılan Bölgeler.....	34
Şekil 6.1: Su örneklerinin toplam alfa ve beta radyoaktivite seviyeleri	45
Şekil 6.2: Doğu Anadolu Fay Zonu'ndaki toprak örneklerindeki toplam alfa ve beta radyoaktivite seviyeleri	48
Şekil 6.3: Kuzey Anadolu Fay Zonu'ndaki toprak örneklerindeki toplam alfa ve beta radyoaktivite seviyeleri	49
Şekil 6.4: DAFZ'undaki toprak örneklerindeki ^{238}U ve ^{232}Th konsantrasyon dağılımları	51
Şekil 6.5: DAFZ'undaki toprak örneklerindeki ^{40}K konsantrasyon dağılımları	51
Şekil 6.6: KAFZ'undaki toprak örneklerindeki ^{238}U ve ^{232}Th konsantrasyon dağılımları	55
Şekil 6.7: KAFZ'undaki toprak örneklerindeki ^{40}K konsantrasyon dağılımları	56
Şekil 6.8: DAF üzerindeki birinci profildeki radon konsantrasyonunun detektör numarasına göre değişimi	59
Şekil 6.9: DAF üzerindeki ikinci profildeki radon konsantrasyonunun detektör numarasına göre değişimi	59
Şekil 6.10: KAF üzerindeki birinci ve ikinci profillerdeki radon yoğunluğunun detektör numarasına göre değişimi	63
Şekil 7.1: DAFZ'ndaki toprak örneklerinin toplam alfa ile uranyum aktivitesi değişimi	65

Şekil 7.2: DAFZ’ndaki toprak örneklerinin toplam alfa ile toryum aktivitesi değişimi	66
Şekil 7.3: DAFZ’ nundaki toprak havasındaki radon ile uranyum dağılımı	68
Şekil 7.4: DAFZ’ nundaki istasyonlarda toprak havasındaki radon ile çevresel doz oranı değişimi.....	68
Şekil 7.5:DAFS üzerinde ölçülen ve hesaplanan çevresel doz değişimleri	70
Şekil 7.6: Kuzey Anadolu Fay Zonu’ndaki toprak örneklerinin toplam alfa ile uranyum aktivitesi değişimi	72
Şekil 7.7: Kuzey Anadolu Fay Zonu’ndaki toprak örneklerinin toplam alfa ile toryum aktivitesi değişimi	72
Şekil 7.8: KAFZ’ nundaki toprak havasındaki radon ile uranyum dağılımı	73
Şekil 7.9: KAFZ’ nundaki istasyonlarda toprak havasındaki radon ile çevresel doz oranı değişimi.....	74
Şekil 7.10: Hesaplanan ve ölçülen çevresel gama doz dağılımları	75



TABLolar LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 4.1: Farklı ortamlarda radon izotoplarının ortalama difüzyon uzaklıkları	24
Tablo 6.1: Su örneklerinde toplam alfa ve beta radyoaktivite seviyeleri.....	44
Tablo 6.2: Doğu Anadolu Fay Zonu'ndaki toprak örneklerindeki toplam alfa ve beta radyoaktivite seviyeleri	47
Tablo 6.3: Kuzey Anadolu Fay Zonu'ndaki toprak örneklerindeki toplam alfa ve beta radyoaktivite seviyeleri	48
Tablo 6.4: DAFZ'nundaki toprak örneklerinde birincil radyoçekirdek konsantrasyonları	50
Tablo 6.5: DAFS'deki karasal gama doz seviyeleri	53
Tablo 6.6: KAFZ'nundan alınan toprak örneklerindeki doğal izotop konsantrasyonları.....	54
Tablo 6.7: DAFS'deki karasal gama doz seviyeleri	57
Tablo 6.8: DAFZ'deki toprak örneklerindeki ağır metal miktarları.....	58
Tablo 6.9: KAFZ'deki toprak örneklerindeki ağır metal miktarları.....	59
Tablo 6.10: DAFS'indeki toprak örneklerindeki ağır metal miktarı ve radyoaktivite arasındaki ilişki.....	60
Tablo 6.11: KAFS'indeki toprak örneklerindeki ağır metal miktarı ve radyoaktivite arasındaki ilişki.....	60
Tablo 6.12: DAFZ'daki birinci ve ikinci profillerin radon konsantrasyonları.....	61
Tablo 6.13: KAFZ'daki birinci ve ikinci profildeki radon konsantrasyonları.....	62

SİMGELER LİSTESİ

D_T : Radonun difüzyon uzaklığı

E_s : Standart sapma

E : Sayma hızlarının toplama ve çıkarılması hallerinde toplam veya farkının hatası

VDF: Verim düzeltme faktörü

cpm: dakikadaki sayım sayısı

A_U : Aktivite

KF: Kalibrasyon faktörü

RY: Radon yoğunluğu

NIS: Net iz sayısı

DRMS: Algılayıcının radona maruz kaldığı süre



ÖZET

Doktora Tezi

KUZEY ANADOLU VE DOĞU ANADOLU FAY HATLARININ KESİŞİM BÖLGESİNDEKİ DOĞAL RADYOAKTİVİTE TAYİNİ

Oktay BAYKARA

Fırat Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

2005, Sayfa:82

Bu çalışmada, Türkiye'deki iki büyük ana fay hattı olan Kuzey Anadolu Fay Sistemi ile Doğu Anadolu Fay Sisteminin kesişim bölgesi olan Bingöl-Karlıova ve çevresinin doğal radyoaktivite seviyesi belirlenmiştir. Bu amaçla; Bingöl-Karlıova ve çevresinden su ve toprak örnekleri alınmış, sayıma hazır hale getirildikten sonra uygun sayım sistemleri ile radyoaktivite seviyeleri tespit edilmiştir. Toprak örneklerindeki ağır metal (Fe, Pb, Cu, K, Mn, Cr ve Zn) miktarları belirlenmiştir. Karasal kaynaklı gama radyasyon doz oranı ölçümlerinin yanı sıra, CR-39 pasif algılayıcılar kullanılarak her iki fay zonunun kesişim yerlerindeki belirli bölgelerde fay çizgileri üzerindeki toprakta radon gazı ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen veriler ile çalışılan bölgenin genel bir radyoaktivite seviyesi belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Doğal Radyoaktivite, Radon, CR-39, KAFS, DAFS.

ABSTRACT

PhD Thesis

THE DETERMINATION OF NATURAL RADIOACTIVITY IN THE INTERSECT ZONE OF THE NORTH ANATOLIAN FAULT AND EAST ANATOLIAN FAULT

Oktay BAYKARA

Firat University

Graduate School of Natural and Applied Science

Physics Department

2005, Page: 82

In this study, the natural radioactivity of the two major intersect fault systems (zone of the North and East Anatolian Faults in Bingöl-Karlıova and its vicinity) of Turkey was determined. For this purpose, the samples of water and soil were collected from the studied area and they were prepared to determine their radioactivity levels by using the suitable detection systems. The heavy metal (Fe, Pb, Cu, K, Mn, Cr ve Zn) concentrations from soil samples have also been obtained. Furthermore, terrestrial gamma radiation dose rates of the studied area have been measured and radon concentration of soil air in some fault lines in the intersect zone of the North and East Anatolian Fault were measured by using CR-39 passive nuclear track detectors.

Keywords: Natural radioactivity, Radon, CR-39, NAFZ, EAFZ.

1. GİRİŞ

Yeryüzünde var olan doğal radyoaktivite, dünyanın oluşumundan itibaren üzerinde yaşadığı bütün canlıları etkilemektedir. Doğal radyoaktifliğin neden olduğu doğal radyasyon, uzaydan gelen kozmik ışınlar, kaya, toprak, su ve hava içerisindeki doğal olarak oluşmuş (NORM) radyoçekerdeklerin bozunmaları sonucu yayılan ışınlardan oluşmaktadır.

Doğal olarak oluşmuş radyoaktif çekirdekler (NORM), dünyamızın hemen hemen her bölümünde bulunurlar. Dünyamız ve onu kaplayan atmosfer farklı, doğal olarak oluşmuş radyoaktif maddelere sahiptir. İnsanlık tarihinde, radyasyonun ve radyoaktivitenin bilinmesi oldukça yeni bir olaydır. Radyoaktivitenin keşfi X-ışınlarını keşfedilmesiyle başlamıştır. Alman Fizikçi W.C. Röntgen 8 Kasım 1895 yılında kendi adını verdiği X-ışınlarını keşfetmesiyle, insanoğlu radyasyon ve radyoaktiviteyle kavram olarak tanışmaya başlamıştır.

Hidrojen gibi basit çekirdeklerin dışındaki diğer çekirdekler nötron ve protondan oluşur. Hafif çekirdekler, genellikle "kararlı durumda" adlandırılır, nötronun protona oranı 1'dir ve durgun durumdan uzaklaşması veya periyodik tablonun sonundaki elementlerin davranışına yaklaşması bu oranı artırır. Bu oranın artması, o çekirdeği bir aşamaya getirir ki artık bu durumda kararlı değildir. En ağır kararlı çekirdek $^{209}_{83}Bi$ 'dir. Daha ağır çekirdekler sahip oldukları fazla enerjiyi dağıttıklarından dolayı durgun değildirler. Kararlı olmayan çekirdekler radyoçekerdek olarak adlandırılır ve radyasyon yayarak fazla enerjilerini atarlar. Bu işlem radyoaktivite veya radyoaktif bozunma olarak adlandırılır [1]. Radyoçekerdeklerin doğada bulunabilmeleri üç başlık altında toplanabilir;

- a) Çok uzun yarı ömürlü doğal olarak oluşmuş çekirdekler, yeryüzünün (dünya) oluşumundan beri vardır ve bunların ürün çekirdekleri kısa yarı ömürlüdür.
- b) Doğal olarak oluşmuş çekirdekler jeolojik zaman diliminde kısa yarı ömre sahiptir, fakat kozmik ışın radyasyonu ile sürekli olarak üretilir.
- c) İnsanlar ve kazalardan dolayı çevreye yayılan radyoçekerdekler.

Şu anda değişik elementlerin 2500 den fazla radyoçekerdeği bilinmektedir. Bunlardan yaklaşık 80'i doğada bulunur, geri kalanı birçok farklı tipteki nükleer reaksiyonların doğrudan ürünü olarak yapay yolla üretilir. Dünyanın başlangıcından beri var olan çekirdeklerin dünya yüzeyindeki ortalama konsantrasyonları oldukça düşüktür, fakat bölgeden bölgeye önemli farklılıklar olabilir.

Uzun ömürlü doğal olarak oluşmuş radyoçekerdekler, alfa ve beta radyasyonu yayarak bozunurlar ve içlerinde özellikle, ^{238}U , ^{235}U ve ^{232}Th radyoçekerdekleri önemli bir yere sahiptir. Toprak ve kayalarda bulunan uranyum ve toryumun bozunmaları sonucunda, radyoaktif olan ^{222}Rn (radon) ve ^{220}Rn (toron) oluşur. Radyoaktif olan bu gazlar yer kabuğundan atmosfere

yayırlar ve bozunarak ürün çekirdek formunda, bizmut (^{214}Bi), polonyum (^{218}Po) ve kurşun (^{214}Pb) gibi ürünleri meydana getirirler. Her iki radyo-gaz da bozunana kadar havada asılı kalırlar veya yağmurda depolanırlar ve yeryüzüne girerler.

Çevresel radyoaktiviteye katkı sağlayan doğal radyoçekirdeklerin (^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K) doğadaki derişimleri toprak ve kaya türlerine göre değişiklik gösterebilmektedir. Toprak ve kayalardaki doğal radyoaktivite, çevresel gamma doz oranına en büyük katkıyı yapar. Örnek olarak, volkanik kayalardaki doğal radyoaktivite tortul kayalardakine oranla daha yüksektir. Tortul ve fosfat türü kayalarda da radyoaktivite seviyesi oldukça yüksektir [2, 3].

FÜBAP-893 numaralı proje ile desteklenen bu çalışmada; Doğu ve Kuzey Anadolu Fay sistemlerinin kesişim bölgesi olan Bingöl-Karlıova ve çevresindeki toprak ve su örneklerinin radyoaktivite yoğunluğunu, topraktaki doğal radyoaktivitenin radyolojik tehlike açısından değerlendirmek için radyum eşlenek aktivitesini, havada tutulan dozu, yıllık etkin doz oranını ve dış tehlike indeksini, havadaki çevresel gama dozunu ve fay hatlarındaki radon miktarları belirlenerek, çalışılan bölgenin doğal radyoaktivite ve çevresel toplam gama doz seviyesinin tespit edilmesi amaçlanmıştır. Bunun yanı sıra, bölgenin toprak örtüsündeki bazı ağır metal (Fe, Pb, Cu, K, Mn, Cr ve Zn) analizleri de yapılmıştır.

Bu amaç çerçevesinde, bölgenin doğal çevresel radyoaktivitesi, yeraltı ve yerüstü sularından ve fay zonlarındaki topraklardan örnekler alınarak uygun metot ve algılama sistemleri kullanılarak belirlenmiştir. Ayrıca, fay zonlarındaki toprak havasındaki radon yoğunluğunun yanı sıra çevresel gama toplam doz hızları uygun algılama sistemleri kullanılarak belirlenmiştir.

2. RADYASYON ve RADYASYON ALGILAMA YÖNTEMLERİ

2.1. Radyasyon ve Çeşitleri

Radyasyon veya yayılan enerji, uzay içerisinde hareket eden parçacık veya dalga formunda bir enerjidir. Görünen ışık, sıcaklık, radyo dalgaları, alfa ve beta parçacıkları ve gama ışınları radyasyona birer örnek olarak verilebilir. İnsanlar güneş ışığından gelen sıcaklığı hissettikleri zaman, güneş tarafından yayınlanan enerjiyi (radyasyonu) gerçekten soğurmuş olurlar. Elektromanyetik radyasyon, elektromanyetik dalga formunda yayınlanan bir radyasyondur. Bu tür radyasyona örnek olarak; gama ışınları, nötronlar, morötesi ışık ve radyo dalgaları verilebilir. Parçacık radyasyonu, parçacık formunda olan radyasyondur ve alfa ve beta parçacıkları bu gruba örnek olarak verilebilir. Radyasyon bir madde içerisinde geçerken meydana getirdiği değişikliğe bağlı olarak, iyonize eden (maddenin atomundan elektron koparan) ve iyonize etmeyen (maddenin atomundan elektron koparamayan) şeklinde de karakterize edilebilir [1].

2.1.1. Alfa Işınları

Alfa parçacıkları, çekirdek tarafından yayınlanan iki proton ve iki nötrondan oluşan pozitif yüklü helyum çekirdeğidir. Atom numarası büyük olan izotoplar genellikle alfa çekirdeği yayarak bozunurlar. Doğal olarak bulunan radyoaktif maddelerden yayınlanan alfa parçacıklarının ortalama enerjileri 5 MeV civarındadır ve havada yaklaşık 3,5 cm, dokuda (veya ince kağıt) yaklaşık 44 μm civarında yol alır. Bunun nedeni, büyük elektrik yüküne sahip olmaları ve madde içinden geçerken fazla miktarda iyonlaşma meydana getirmelerinden dolayı enerjilerini çok çabuk kaybetmeleridir.

Bu parçacıkların çevresel etkileri önemsizdir, ancak canlılar için iç yayıcı olarak oldukça önemlidirler, özellikle solunum sisteminden geçerken, kemik yüzeylerinde ve kırmızı kemik iliğinde büyük tahribatlara neden olurlar. Bu parçacıkların enerjileri çok kısa yollar boyunca birikirler ve hassas bölge yüzeylerinde sınırlandırılmış yüksek dozlara neden olurlar. Bu nedenle, radyasyondan korunma açısından özellikle, su, toprak ve havada alfa radyoaktivitesinin sürekli izlenmesi önem arz etmektedir.

2.1.2 Beta Işınları

Çekirdekteki nötronun protona veya protonun nötrona dönüşmesi sırasında ortama yayılan enerjinin elektron olarak formlaşım ortama yayılmasıdır. Beta parçacıkları pozitif ve

negatif yüklü olabilirler. Çekirdek içerisindeki nötron fazlalığından dolayı yayınlanan elektron negatif yüklü olur ve β^- ile ifade edilir. Eğer beta yayınılanması çekirdekteki proton fazlalığından ileri geliyorsa yayınlanan parçacıklar pozitif yüklü olur ve pozitron adı verilerek β^+ ile gösterilir. Beta parçacıklarının ortalama enerjileri 1 MeV civarındadır, havada 3 m ve dokuda yaklaşık 3 mm erişim mesafelerine sahiptirler. Çevresel etki bakımından dış ışınlamada, havadaki erişim mesafelerinden dolayı, önemli bir radyasyon tehlikesi oluşturabilirler. Ancak, alfa parçacıkları gibi iç ışınlamada da önemli hasara neden olabilirler.

2.1.3. Gama ve X-Işınması

Elektromanyetik radyasyon foton olarak adlandırılan enerji paketleri şeklinde yayılır. Bunlara en basit örnek ışık ve radyo dalgaları verilebilir, fakat bunlar enerji bakımından elektromanyetik spektrumun farklı bölgelerinde bulunurlar. X-ışınlarının kaynağı çekirdeği saran orbital elektron alanları iken, gama ışınlarının kaynağı çekirdektir. Bir çekirdek alfa ve beta parçacığı yayınladıktan sonra genellikle kararlı hale geçemez ve çekirdek fazla enerjisini gama ışını olarak yayınlar.

Çevresel etki açısından, gama ve X-ışınları önemli bir iç ve dış ışınlama kaynaklarıdır ve gama yayıcılar ışınlanan ilk organda depo edilirler. Gama ve X-ışını yayıcı kaynakların zırhlaması çevresel etkiyi azaltır. Örneğin; bir ^{60}Co kaynağından yayınlanan gama ışınlarının %95'i 6 cm'lik bir kurşun levha, 10 cm'lik demir bir levha ve 33 cm'lik bir beton blok tarafından tutulur.

2.1.4. Nötronlar

Kütleleri protonun kütlesine eşit fakat yüksüzdür. Nötronlar normal radyoaktif bozunma neticesinde oluşmazlar ve çekirdekten nötron yayılımı sadece bölünme olayı sonucunda olur. Bu olay, ağır bir çekirdeğin nötron bombardımanı neticesinde ikiye bölünmesi ve bu arada birden fazla nötron ile birlikte büyük bir enerjinin çıkmasıdır. Nötronlar yüksüz olmalarından dolayı, madde içerisine kolayca nüfuz edebilirler ve atomun elektron yapısından geçebilirler.

2.2. Radyasyon Ölçüm Yöntemleri

2.2.1. İyonizasyon Detektörleri

İyonizasyon detektörleri, radyasyon algılanması için geliştirilen ilk elektriksel cihazlardır. Bu cihazlar, radyasyonun gaz içinden geçerken üretilen elektron ve deşiklerin

toplanması temeline dayanır. Bu grupta geliştirilen üç basit detektör tipi; iyonizasyon odası, orantılı sayıcı ve Geiger Müeller sayıcısıdır. Bu detektörlerin belirli kullanım alanlarından başka, modern nükleer alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, günümüz laboratuvarlarında radyasyon monitörü olarak da kullanılmaktadır. Bu cihazlar nispeten ucuz olup kullanılmaları basit ve bakımları kolaydır.

2.2.2. Gaz Doldurulmuş Tüp Detektörler

Bu detektörlerde elektronların ve iyonların hareketliliklerinin yüksek olmasından dolayı, radyasyon etkisiyle dolaylı oluşan iyonizasyonun toplanabilmesi için belirli bir gaz ortamı kullanılır. Geniş kullanımı olan bu eski radyasyon detektörleri, yüklü bir parçacığın gaz içerisinde yol alırken meydana getirdiği etkileşimlere dayanmaktadır [4, 5].

2.2.3. Parıldamalı Detektörler

Radyasyon enerjisini önce ışık fotonlarına ve daha sonra fotoçoğaltıcı tüp yardımıyla elektrik pulslarına dönüştüren detektörlere *Parıldamalı Detektörler* adı verilir. Bu detektörlerde gelen radyasyonla atomları kolaylıkla uyarılan katı veya sıvı bir malzeme kullanılır. Bu uyarılmış atomlar temel durumlarına geri döndüğünde görünür ışık yayınlarlar. Parıldayıcı madde olarak kullanılan yaygın malzemeler, sodyum iyodür [NaI(Tl)] ve ZnS kristalleri ve belirli bazı plastiklerdir [6].

2.2.3.1. NaI(Tl) Parıldayıcıları

NaI detektöründe bulunan iyodun atom numarasının yüksek olmasından dolayı, gama ışınlarını algılanmasında yüksek verim elde edilmesini sağlamaktadır. Genellikle, Talyumun çok küçük bir miktarının kristale ilave edilmesiyle aktive edilir. Oluşan bu yeni yapı NaI(Tl) kristali olarak adlandırılır. Bu algılayıcıların en iyi çözünürlüğü 3cmx3cm boyutlarında bir kristal kullanılarak, ¹³⁷Cs radyoaktif kaynağından yayınlanan 662 keV'lik gama ışınları için %7,5 ile %8,5 arasından değişir.

2.2.3.2. ZnS (Ag) Parıldayıcıları

Gümüş ile aktive edilmiş çinko sülfat eski inorganik parıldayıcılardandır. Bu algılayıcılar NaI ile karşılaştırıldığında çok yüksek bir parıldama verimine sahiptirler. Bunun yanında bu tip parıldayıcılar bir polikristal tozu gibi kullanılırlar. Kalınlıkları 25 mg/cm²'den

büyük olduğu zaman kendi kendilerine parıldama meydana getirme ihtimalleri yüksek olduğundan yaygın kullanılmazlar [7].

2.2.3.3. Plastik Parıldayıcılar

Bir organik parıldayıcı bir çözücüde çözünürse, bir katı çözeltinin eşdeğeri elde edilmiş olur. Örneğin; styrene monomerden oluşmuş bir çözücüde organik bir parıldayıcının çözülmesi verilebilir. Bu madde daha sonra katı bir plastik şeklini alır. Bu tip parıldayıcıların üretimi ve şekillendirilmesi kolaydır. Bu nedenle, plastik parıldayıcılar organik parıldayıcılar içerisinde en kullanışlı olanlardır. Plastik parıldayıcılar genellikle nötron ve yüklü parçacık algılamalarında kullanılırlar.

2.3. Dağlamalı Alfa-Parçacık İz Detektörleri

Günümüzde, hem evlerde hem de arazide en yaygın radon ölçüm metotları arasında plastik iz detektörlerinin kullanıldığı yöntemler gelmektedir. Bunun nedenini bu detektörlerin oldukça küçük boyutlarda (1cm x1cm ve ~ 100-500 µm kalınlığında), kullanımı kolay (herhangi bir elektroniğe ihtiyaç yok), çok pahalı olmayan ve okunması ve bu süreçteki işlemlerin oldukça basit (basit kimyasal işlem ve basit bir optik mikroskop) olması olarak açıklamak mümkündür.

İz kazıma temeline dayanan plastik detektörler “pasif algılayıcılar” olarak adlandırılmaktadır. Bu tür detektörlerin bazı algılama durumlarında kullanışlı olmasına karşın, bunlardan alınan ölçümlerin gerçek zamanlı olmamaları bir dezavantajdır. Diğer bir eksiklik ise, el ile bir mikroskop altında, kazınmış izlerin sayımının oldukça sıkıcı olması ve bu sayımların uzun zamanda yapılmasıdır.

Alfa parçacıkları, radon gazı ve bunun katı formunda olan “ürünleri” tarafından yayımlanır ve bunlar plastik detektörler tarafından kaydedilir. Verilen bir zaman üzerinden kaydedilen alfa parçacıklarının sayılmasıyla ki bu durumda radon ve diğer ürünleri arasında doğal dengenin var olduğu kabul edilir - bazı ölçümler veya varsayılan *denge faktörünün (ürün aktivitenin ana aktiviteye oranı)* değeri kullanılır, kapalı bir sistem içerisinde radon yoğunlaşması (Bq/m^3) hesaplanır [8].

2.3.1. Polimerilerde Yüklü Parçacık İzleri

Polimerik plastikler, jeoloji (bölünme izleri ile zamanlama, meteorlarda eski kozmik ışın izleri) veya yüksek sıcak ortamlar (nükleer reaktör merkezinde) gibi diğer başka alanlarda da nükleer iz detektörleri olarak geniş bir kullanım alanına sahiptirler. Böylece, radon

çalışmalarında, nükleer fizikte, hızlandırıcı tabanlı araştırmalarda, nötron izlemede ve uzay araştırmaları gibi alanlarda kullanılırlar. Bunlar basitçe, küçük alana sahip olmalarından dolayı iyi bir geometriye ve uzun devirlerde ölçüm yeteneklerine sahiptirler.

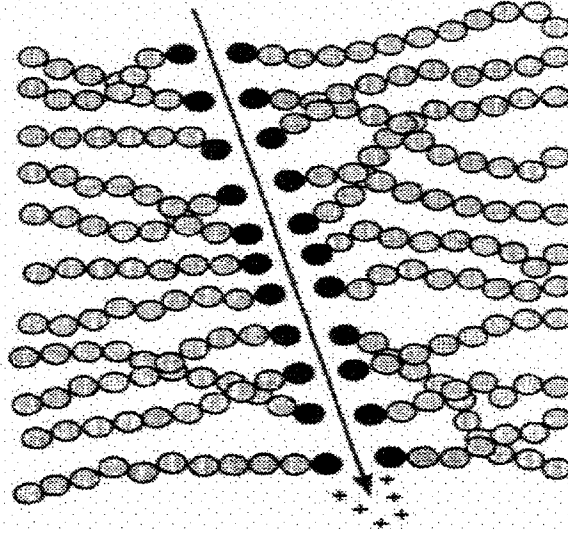
Yukarıda anlatılan durumlara göre, plastikler bilinen bütün nükleer iz detektörlerinin en hassasıdır. Bu algılama yeteneği CR-39 (allil diglycol karbonat polimeri veya diğer bir ifadeyle poli-dietilen glycol-bis) tipi iz detektörleri ve birçok selüloz nitrat algılayıcılar için de geçerlidir. Bütün selüloz nitratlar alfa parçacıklarını kaydedebilirler (dağlama şartlarına bağlı olarak belirli enerji aralığı içerisinde). Bununla birlikte, bazı plastikler [Lexan, Makrofol gibi polikarbonatlar ve selüloz nitrat (LR 115)] bazı özel tekniklerin uygulanmasıyla (morötesi ışığa maruz bırakılmaları, kazıyıcı çözeltilinin içerisine etil alkol ilave edilmesi veya enerji azaltıcı tabakaların kullanılması) alfa parçacıklarını kaydedebilirler. Yukarıda ifade edilen duruma göre, bilinen polimerlerden hiç biri beta parçacığını kaydedemezler [8].

CR-39 olarak adlandırılan plastikler, hızlı nötronlara da tepkileri vardır. Polimerin kendi bileşenleri (H, C ve O) ile (n, α) reaksiyonundan gelen izlerde olduğu gibi (n, p) geri saçılma izlerini de kaydedebilir. Bu tür izler bazen iç izler olarak adlandırılır (detektör içerisinde yüklü parçacıklar meydana gelir) ve dış kaynaklardan gelen izler ise dış izler olarak adlandırılır.

Yüklü bir parçacık bir plastik detektör içerisinden geçerken, polimerik zincirin bazılarının kopmasına neden olur (Şekil 2.1). Bu işlem aynı zamanda serbest radikaller gibi reaktif türleri meydana getirir. Plastikler kullanıldıktan sonra uygun bir dağlayıcı kimyasal (NaOH veya KOH gibi sıvı çözücüler gibi alkali hidroksitler, bazen de bunlara alkol ilave edilir) ile kazınır ve sonuç olarak detektör üzerinde oluşan boşluklar 10^2 - 10^3 kat büyütülmüş olur. Kazınmış izler, genişletme süresince, belirli özelliklere sahip (10x-40x büyötmeye sahip) optik mikroskop altında görünür duruma dönüştürülür. Hasarın miktarı, kazınmış izin büyüklüğü ve dağlanılma özelliğinden dolayı, yüklü parçacığın izlediği yoldan çok, lineer enerji transferinin miktarına bağlıdır. Ortamdaki parçacığın kaybettiği toplam enerji miktarı, uygulanan dağlama şartlarına bağlı olarak detektördeki kazınmış boşluğun büyüklüğünün belirlenmesinde önemli bir rol oynar [8, 9].

2.3.2. Kazıma Süreci ve Metodolojisi

Kazıma metodu, yaygın olarak kullanılan a) kimyasal kazıma ve b) elektrokimyasal kazıma işleminden sonra el ile veya otomatik/yarı-otomatik bir optik mikroskop yardımıyla izlerin sayılması işlemidir.

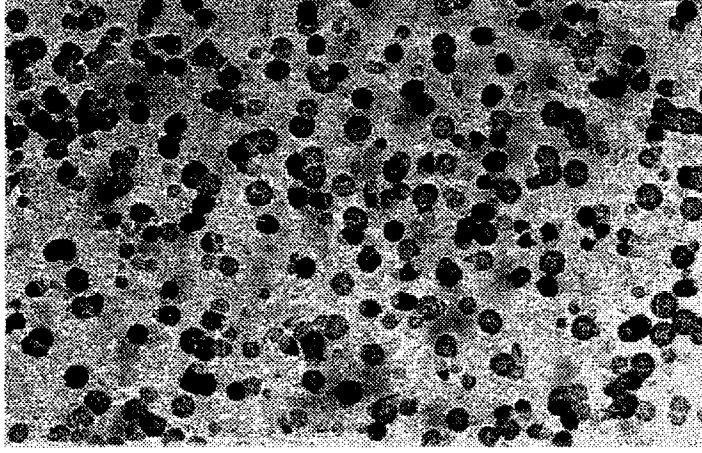


Şekil 2.1: Yüklü bir parçacığın bir polimer içerisinde geçerken neden olduğu zincir bölünmesinin şematik görünümü [8].

2.3.2.1 Kimyasal Kazıma

Bu işlem katihal iz detektörlerinin (SSTND) okunması için yapılması gereken temel bir işlemdir. Kimyasal kazıma, genellikle 40–70 °C sıcaklık aralığındaki bir banyoda gerçekleştirilir ve en yaygın kazıyıcı materyal olarak molaritesi 2 ile 6 M arasında değişen NaOH veya KOH sıvı eriyik kullanılır. Genellikle kazıma süresi 2 ile 6 saat arasında değişir. Kazıyıcı eriyiğin molaritesinin ve/veya kazıma süresinin ve/veya kazıma sıcaklığının artması kazımanın detektör üzerindeki çukurun büyüklüğünü artırır. Bazı belirli uygulamalarda, belirli oranda etil alkol eriyiğe eklenebilir, burada alkol, bazı plastiklerin kaydetme hassasiyetini arttırmada yardımcı olur. Plastik detektörler genellikle bir sicim veya bir ip yardımıyla askıda kalacak şekilde tutturulurlar. Ayrıca, uygun detektörler çerçeveler içerisinde dikey olarak tutturulabilir ve aralarında sabit uzaklıklarla özel engeller konur. Bunun da önemli bir nedeni, kazıyıcı maddelerin akması için odaların olması ve bu akıntılardan etkilenmemeleri içindir.

Detektörler kazıyıcı cam bardakların içerisindeki eriyiğe daldırılır ve sabit sıcaklığa sahip su banyosunun içerisine bırakılır. Kazıma işleminin sonunda, detektörler saf su ile iyice yıkanır. Kurutulduktan sonra, detektörler optik mikroskop altında sayıma hazır hale gelir. Kazınmış iz yarıçapları genellikle birkaç μm civarındadır, fakat kazıma işleminden sonra 50 μm veya daha büyük bir değere çıkabilir. Şekil 2.2’de kimyasal kazıma sonucunda CR-39 detektörü üzerindeki alfa parçacığının bıraktığı izler gösterilmiştir [10].

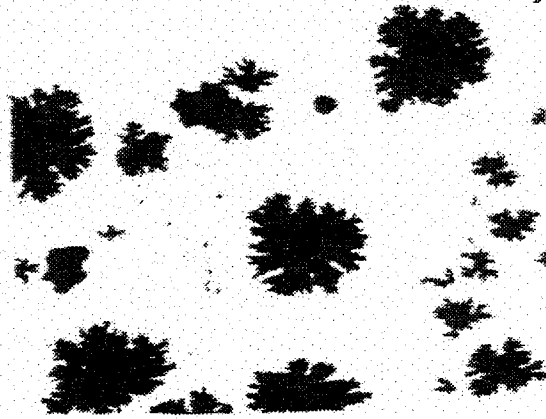


Şekil 2.2: CR-39 detektöründeki alfa parçacık izleri [10].

2.3.2.2. Elektrokimyasal Kazıma

Elektro-kimyasal kazımanın amacı, detektör üzerindeki çukurları 100 kat daha büyütme, böylelikle düşük büyütme (mikrofilm okuyucu, slayt yansıtıcı veya düşük büyütme mikroskop (10x)) aygıtla rahatlıkla sayılabilir. Elektro-kimyasal kazıma sonucundaki izler çıplak gözle de kolaylıkla görülebilir (Şekil 2.3).

Bu işlemdeki basit mekanizma, plastik detektöre boylu boyunca yüksek bir elektrik alan uygulanması sonucu elektrotların bölmeler veya iki parça arasında bir engel olarak hareket etmesine (her bir bölme elektronik kazıma odası diyagramı için elektrik alanın bir kutbunu içerir) dayanır. 200 μm kalınlığındaki bir plastik detektör için 50 kVcm^{-1} 'lik bir elektrik alanı vermesi için sadece 1000V uygulanması yeterlidir.



Şekil 2.3: CR-39'daki Elektrokimyasal olarak kazınmış alfa parçacık iz lekeleri [8].

2.3.3. İz Sayım Metodu ve İstatistiği

Burada bir optik mikroskop kullanılarak izlerin el ile (veya oküler) sayılması üzerinde durulacaktır. İzlerin otomatik olarak sayılması da benzer olarak yapılmaktadır, fakat bu tür sistemler taban katkısını, üst üste binmiş izler ve iz tanıma için kistaslar oluşturur.

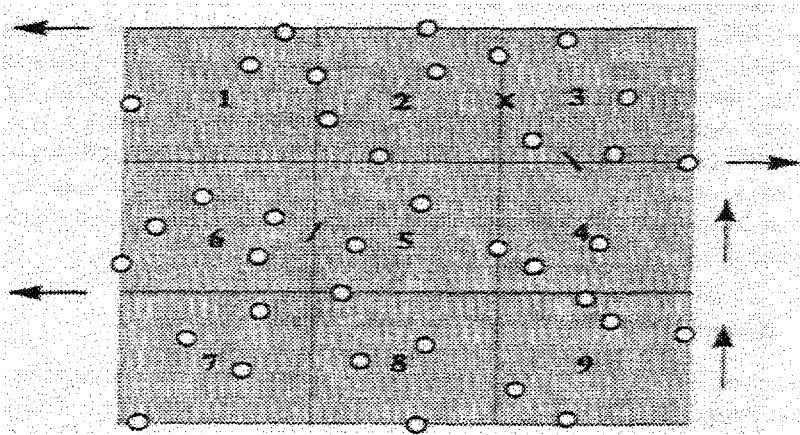
Radon çalışmalarında, ana gereksinim genellikle istatistiksel olarak güvenli değerlerin verilmesi için detektör üzerindeki kazınmış izlerin sayılmasıdır. Burada sadece ilgili değerlere ihtiyaç duyulur ve iz yoğunluğu nadiren çok yüksektir ve izlerin üst üste binme problemi vardır. Kazınmış çukurların büyüklüğü ve şekli değişkendir; kazınmış çukurların çoğunluğu eliptik olmasına karşın ki bu da yüzeysel dalma açısında (detektörün yüzeyine göre izin açısı, θ_k kazımanın kritik açısından düşük) detektör yüzeyine gelen alfa parçacıklarından kaynaklanır, dik olarak gelen alfa parçacıkları dairesel şekilde çukur formları oluşturur. Aynı zamanda, alfa parçacığı havada herhangi bir noktada 0 ile 4 cm aralığında yayılım yapabilir, nihai kazınmış çukurun büyüklüğü, kimyasal kazıma şartlarına bağlı olarak, yaklaşık 0 (veya $\approx 3 \mu\text{m}$, bu değer kullanışlı bir optik mikroskop için çözünürlük limitidir) ile birkaç μm yarıçap arasında değişecektir. Genellikle, izleri iyi görebilmek için uygun en düşük boyut limit seçilir ve daha sonra sürekli olarak daha düşük boyutlu kazınmış çukurlar ihmal edilir. Aynı zamanda, gerçek kazınmış çukur ile temel etki ve kullanım sırasında meydana gelebilecek kazınmış çukurların ayırt edilmesi gereklidir. Bu etkiler detektör tabakasının üzerinde genelde vardır ve kazımayla büyür. Herhangi bir dış etki çeşidinden, çizik (yarık, kazı) veya inci dizimi gibi görünen etkiler kolaylıkla göz ardı edilebilir. Gerçek izin kazınmış olduğu çukurlar (kimyasal kazımada) mikroskobun alt ve üstünde ince odağının yavaşça hareket ettirilmesiyle ve kazınmış çukur koninin altından yansıyan parlak bir ışığa bakılmasıyla rahatlıkla tanınabilir. Kimyasal olarak kazınmış gerçek bir çukur iyi tanımlanmış geometrik bir şekle (detektör yüzeyinde dairesel veya eliptik açılmış bir ağız şeklinde) sahip olması da gereklidir. Elektrokimyasal kazımada, izler fotoğraf emülsiyonu üzerine üretilen şekiller formunda, dik kaya uçları şeklinde ve şekiller küçük karanfil yaprağı şeklinde görünür (Şekil 2.3).

Detektör üzerinde sürekli temel seviye gerçek iz çukurları vardır ve bu izler plastik üzerinde herhangi bir radyoaktif safsızlıktan veya detektör üzerine düşen hızlı nötron/kozmetik ışınlardan veya detektörün üretimi sırasında deneysel ölçüm amaçlı radona maruz kaldıklarından, çevrede var olan radon tarafından ışınlanmasından kaynaklanırlar. Bu sebepten dolayı plastik tabakalar veya yalnız detektörün kullanılması gerekir. Detektörler ince, kazınabilir ve yüzeyleri üzerinde koruyucu ince bir tabakaya sahiptirler. Bu detektörleri kullanana kadar yaşlanmanın istenmeyen etkilerinin minimuma indirmek ve gereksiz oksijen ve

ışık etkilerinin önlemek için iyi paketlenmiş detektör tabakalarını bir buzdolabında depolanması tavsiye edilir.

İyi bir istatistik alabilmek için yeterince büyük bir alana sahip detektör üzerindeki temel seviye izlerinin (pozlanmamış fakat kazınmış detektör) sayılmasına da ihtiyaç vardır. Temel seviye iz yoğunluğu genelde 10-40 iz cm^{-2} arasında değişmektedir. Eğer gerçek (veya toplam) iz yoğunluğu 1000 iz cm^{-2} ise, o zaman temel seviye izlerinin ihmal edilebilir bir katkı yapar, bu durumda temel seviye izlerde $\sim\%16$ 'lık bir hata ve toplam izlerde $\sim\%3$ 'lük bir hata ve toplam hata yaklaşık olarak $\%3,5$ olur [8]. Eğer gerçek iz yoğunluğu temel seviye iz yoğunluğu ile karşılaştırılması mümkün ise, o zaman iyi bir istatistik sağlayabilmek için geniş bir bölge üzerinde temel seviye izlerinin tamamen sayılması gerekmektedir.

Kazıma işleminden sonra, hareketli durumdaki bir araştırma mikroskobu deneysel gözlemler için kullanılabilir. Örneğin, doğrusal hareketli bir raf, pozlanan bölge üzerinde X-ekseni boyunca hareket ettirilebilir. Daha sonra görüntünün bütün ardışık alanları hiç önemsenmeden (fov's) sayılır ve her bir görüntüdeki düşük veya yüksek iz yoğunlukları hesaplanır. Bir görüntüdeki izler sayıldıktan sonra, raf sola doğru hareket ettirilir (Şekil 2.4). İlk sıranın sonunda, raf Y-ekseni boyunca hareket ettirilir ve daha sonra raf soldan sağa doğru X-ekseni boyunca hareket ettirilir. Böylece bir görüntünün kenarlarındaki gerçek izler sayılmış olur ve ihmal edilir. Örneğin, görüntünün alt yatay sınırına ve sol dikey sınırına değmiş veya yayılmış herhangi bir iz daima sayılabilir olmasına rağmen diğer iki sınırda daima ihmal edilir. Bu sonuncu izler, daha sonra sırasıyla dikey ve yatay olarak bulunan bitişik görüntülerde sayılırlar.



Şekil 2.4: İzlerin hareketli raflara sahip bir mikroskop ile taranmasının sistematigi [8].

3. DOĞADAKİ RADYOAKTİF ÇEKİRDEKLER

3.1. Uzun Ömürlü Radyoçekirdekler ve Serileri

Doğal olarak oluşmuş ağır radyoçekirdekler dört radyoaktif seri veya radyoçekirdeklerin bozunma zinciri ile karakterize edilebilir. Her bir seri, kütle numarasının dört ile bölünebilirliği ile belirlenir ve,

$$A = 4n + m \quad 3.1$$

şeklinde ifade edilir. Burada A kütle numarası, n kütle içerisinde bölünebilen en büyük tam sayı ve m ise kalandır. Bu sonuçla, 4n, 4n+1, 4n+2 ve 4n+3 olmak üzere dört doğal bozunma serisi vardır. Ağır çekirdeklerin radyoaktif bozunumlarında alfa parçacığı yayılımı baskındır. Bu serilerden üçü doğada bulunur ve karasal kökenli doğal olarak oluşmuş radyoçekirdeklerin (NORM) büyük bir çoğunluğunu oluşturur. Bu serilerden ikisi, uranyum veya toryum izotopu ile başlar, yarı ömürleri yeryüzünün yaşı kadardır ve kurşunun kararlı bir izotopu ile bozunma son bulur [1]. Bir diğer uzun ömürlü çekirdek olan ve radyoaktif potasyumun (^{40}K) %0,0117'sini oluşturan karasal merkezli potasyumdur [11].

3.1.1. Uranyum Bozunma Zinciri

Uranyum, 4n+2 (uranyum) ve 4n+1 (aktinyum) serilerinin ikisinde de var olan önemli ve doğal olarak oluşmuş radyoaktif çekirdektir. ^{238}U 'in bozunma zinciri onbir ayrı bozunum adımından oluşur ve kararlı kurşun ile sonlanır. Bozunma, karakteristik enerjilerde γ -fotonu, α ve β - parçacıklarının yayılımı ile son bulur. Yayılımlar bir veya çoklu enerjilerde olabilir.

Uranyumun üç izotopu doğada bulunur; ^{238}U , 4n+2 serisinin ilk elementidir ve %99,27'lik bollukla bulunmaktadır. ^{235}U , %0,72'lik bir bollukla 4n+3 bozunma serisinin bir üyesidir ve ^{234}U sadece %0,0057'lik bir bollukla 4n+2 bozunma serisinin bir üyesidir. Uranyum bozunma zincirindeki çekirdeklerin birçoğu kısa yarı ömre sahiptir ve sadece beş tanesinin (^{238}U , ^{234}U , ^{230}Th , ^{226}Ra ve ^{210}Pb) yarı ömrü bir yılın üzerindedir. Zincirdeki çekirdeklerin büyük bir kısmı alfa ve beta parçacığı yayarak bozunurlar ve bu bozunmalara yüksek veya düşük gama fotonları eşlik eder. Zincirdeki toplam gama yayılımının %95'i zincirin alt serilerinde meydana gelir. Çok küçük bir dağılım (%5) ^{214}Pb tarafından ve geri kalan %90'lık bir kısım da ^{214}Bi tarafından yapılır. Her iki radyoçekirdekten yayınlanan gamaların enerjileri 0,2 ile 2,5 MeV arasındadır ve gericiliği çok yüksektir [2, 3].

3.1.2. Toryum Bozunma Zinciri

Toryum genel olarak düşük derişimlerde altın maden cevherlerinde bulunur ve buralardaki varlığı birçok altın madenindeki havada toron ürünlerinin yoğunlaşmalarının algılanmasıyla belirlenir. Toryum bazı bölgelerde, altın bulunan kayalıkların üzerindeki siyah mineral toprak tabakasında yüksek miktarlarda bulunur. Toryum dokuz radyoaktif çekirdekten sonra kararlı ^{208}Pb izotopuna bozunur. ^{232}Th 'nin dışındaki ürün çekirdeklerinin hepsinin yarı ömürleri yedi yıldan azdır. Bu zincirde ilk olarak alfa yayımlayarak bozulan yedi çekirdek vardır. Bunların arasında en önemli, uzun ömürlü alfa yayıcıları ^{232}Th ve ^{228}Th 'dur. Toryum zincirindeki alfa yayıcılarının birçoğu zayıf alfa yayıcılarıdır veya alfa parçacığı ile birlikte düşük seviyede gama yayılımına sahiptirler. Burada ^{212}Bi istisnadır ve önemli miktarda beta ve gama yayar. Yayınlanan bu beta ve gama radyasyonu ^{238}U bozunma zincirinden daha yüksek ve daha geniş bir aralığa sahip olmakla birlikte enerjileri 3,95 ile 8,78 MeV arasındadır.

3.2. Kozmik Işınlarla Üretilen Radyoçekirdekler

NORM'un ikinci kısmını oluşturan radyoizotoplar, kozmik ışınların havayla etkileşmesi sonucunda üretilir. Birincil ve ikincil kozmik ışınların enerji spektrasından, radyoaktif izotopların üretilme oranları ve nükleer reaksiyon etkileşme tesir kesit bilgisi tahmin edilebilir. Uzaysal (dış uzaydan kaynaklanan) radyoaktivitenin birçoğu, kozmik ışınlar tarafından atmosferde atomların bombardıman edilmesiyle üretilir [1].

Uzaysal ışınlar genel olarak, birincil ve ikincil kozmik ışınlar olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Bunlardan, birincil kozmik ışınlar en önemli kısmını oluşturur ve karasal olmayan (dış uzay) orijinli enerji yüklü parçacıklardır, ikincisi ise; yeryüzünün atmosferinde birincil kozmik ışınların atomlar ile çarpışmalarından üretilir. Birincil parçacıkların atmosferin üst tabakalarında bazı atomlar ile bu kaçınılmaz çarpışmadan sonra üretilen nükleer döküntüler, atmosferin alt tabakalarındaki atomlar ile peş peşe etkileşmeye maruz kalırlar. Bu tür çarpışmalarda π -mezonlar üretilir ve bunlar muon ve gamalara bozulurlar. Muonlar bozulmadan önce deniz seviyesine doğru hareket ederler. Diğer taraftan, gama ışınları elektron-pozitron çiftlerini üretir [2].

3.3. Su, Toprak ve Kayalardaki Radyoaktivite

Volkanik ve metamorfik kayalar yüksek sıcaklık ve basınç altında kristalleşmiş kayalardır. Uranyum ve toryum birbirleriyle uyuşmayan elementlerdir, bu nedenle birlikte birçok mineral yapılarında büyük miktarda bulunamazlar. Bunun sonucu olarak ilk oluşan

yüksek sıcaklık-basınç mineralleri dışındaki alkali kayalarda birikme eğilimindedirler. Uranyum ve toryumun bu şartlar altındaki davranışları aynı olduğundan, volkanik kayalardaki oranları genelde 4/3'tür. Her iki elementin bolluğu silika miktarıyla artma eğilimindedir, bu nedenle granitler yüksek uranyum ve toryum içermelerine rağmen, silika yönünden fakir kayalar 0,1 ppm veya daha düşük uranyum içerirler. Uranyum, toryum ve bunların ürünleri, radyoaktif potasyum ile birlikte kristalimsi kayalardaki büyük ısı üreticidirler [12]. Kayaların içerdiği ortalama uranyum miktarı yaklaşık olarak 2,7 ppm veya 33 Bq/kg'dır. Özellikle fosfat içerikli kayalar yüksek miktarlarda uranyum içermektedirler (10-100 ppm). Toryumda uranyuma benzer olarak yaygın bir şekilde kayalarda bulunmaktadır. Konsantrasyon alkali materyallerden çok asidik materyallerde daha yüksektir. Karasal kabuk ve topraktaki toryum yoğunlaşması, uranyum yoğunlaşmasından yaklaşık dört kat daha yüksektir ve 9-10 ppm civarındadır. Bununla birlikte, toryum uranyumdan daha düşük bir özel aktiviteye sahiptir ve iki elementin radyoaktivite yoğunlaşması hemen hemen aynıdır. Toryumun yoğunlaşması özellikle monazit türü minerallerde oldukça yüksektir (%10). Hem toryum hem de uranyum bozunma zincirinde var olan ve doğal olarak oluşmuş radyoçekerdeklerin (NORM) en önemli kaynağını oluşturan diğer bir radyoizotop ta radyumdur. Toprak ve kayalardaki ortalama aktivite yoğunlaşması uranyum ve toryumun aktivitesine eşittir. Toprak ve kayalardaki ²²⁶Ra ve ²²⁸Ra'un aktivitesi yaklaşık olarak 10 mBq/g dir. Uranyum gibi radyum da çözülebilir ve toprakta kolaylıkla sızabilir ve bitkiler ve hayvanlar tarafından bileşik şeklinde alınabilir [1, 2, 11].

Sıradan topraklar üzerindeki dış gama dozu oranın çoğunluğu, topraktaki birincil radyoçekerdeklerden kaynaklanmaktadır. Topraktaki gama dozunu oluşturan ana çekirdekler ve oranları; ⁴⁰K (%35), ²³²Th (%50) ve ²³⁸U (%15)'dir. Toprak üzerindeki baskın gama dozu dağılımı, toprağın 30 cm derinliğindeki radyoaktif materyalden kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte, uranyum ve toryum konsantrasyonu dünyanın bazı yerlerinde özellikle petrol bölgelerindeki değerleri daha yüksektir. Değişikliklere etki eden iki önemli faktör vardır, bunlar; radyoçekerdek yoğunlaşması ve zırlama (yalıtma)'dır [13].

Doz miktarı, toprak ve kayalardaki radyoçekerdek kompozisyonuna ve bölgenin jeolojik yapısına göre değişiklik göstermektedir. Genellikle volkanik kayalarda doz seviyesi yüksektir ve bu da, asidik kayalarda var olan yüksek silika (çakmaktaşı, kuvars kumu) miktarı ile ilişkilendirilir. Genellikle tortul (sedimenter) kayalar, volkanik kayalardan daha düşük radyoaktif materyal derişimine sahiptirler. Topraktaki radyoaktivite kayalardan kaynaklanır, üstelik buralardaki radyoaktivite, yeraltı sularından çökeltme ile diğer materyaller ile seyreltilmeyle, tutulmayla/çözünmeyle ve aşınmayla artabilir veya azalabilir [14, 15, 16].

Genelde uranyum konsantrasyonu toprak organik madde içeriği ile ilişkilendirilir. Ayrıca farklı toryum birikimi, yüksek organik içerikli materyalin altındaki tabakada toplanmaktadır. Toprağın organik madde içeriği üç değerlikli toryum ile doğru orantılıdır ki bu da topraktaki toryum hareketliliğini artırır. Bütün bunların yanı sıra, radyumun daha düzensiz dağıldığı söylenebilir. Bununla beraber alüvyon türü topraklarda toryumun birikme eğilimi daha yüksektir ve yoğunlaşması daha düzenlidir ve bu da organik karmaşıklıklara göre yüksek hareketliliğe sahip olduğunu gösterir.

Dış radyasyon ışınlaması, bütün topraklarda düşük seviyede var olan karasal radyoçekerdeklerden ve kozmik ışınlardan meydana gelmektedir. Dış kozmik radyasyondan havadaki emilmiş doz yaklaşık 30 nGy/saat iken, karasal temel radyasyondan yani topraktan kaynaklanan doz kaya ve toprak türüne göre değişmektedir. Bu nedenle, doğal çevresel radyasyon temelde jeolojik ve coğrafik şartlara bağlıdır [17, 18].

En önemli doğal radyoaktif çekirdekler arasında ^{40}K (potasyum) önemli bir yere sahiptir. Potasyum, kireçtaşlarında yaklaşık %0,1 ve bazı granitlerde %4'ten fazla bir konsantrasyon ile yerküre yüzeyinde bulunmaktadır. Kayalardaki potasyum aktivitesi ortalama 0,62 Bq/g (17 pCi/g) dir ve bazalt türü kayalardaki yoğunlaşması bu değer yarısı civarındadır. Bazı granitlerde, özellikle kalsiyum yönünden fakir olanlarda ve Syenites'lerdeki yoğunlaşma 1,85 Bq/g (50 pCi/g)'ı civarındadır. Topraktaki potasyum birikimi, tarımsal aktivitelerle oldukça büyük değişimler gösterebilmektedir. Deniz suyundaki potasyum yoğunlaşması ortalama 11 Bq/l civarındadır.

Uranyum konsantrasyonu genel olarak ppm veya Bq/kg ile tanımlanan özel aktivite cinsinden ifade edilir. Bu birimler ^{238}U için dönüşüm faktörleriyle ilişkilidir. Bazı kayaç ve granitlerde ortalama uranyum konsantrasyonu yaklaşık olarak 59,2 Bq/kg (4,8 ppm)'lik bir değere sahiptir. Bunun yanı sıra basalt türü kayaçlar uranyum içeriği yönünden fakirdirler ve yaklaşık olarak 11,1 Bq/kg'lık bir yoğunlaşmaya sahiptirler. Yeryüzündeki kayaçlar için ortalama değer 37 Bq/kg civarındadır. Toprakta ise bu değer ortalama olarak 25,9 Bq/kg civarındadır [19]. Ayrıca fosfat maden cevherleri uranyumun zengin doğal kaynaklarıdır [20].

Yeraltı suları radyoaktif çekirdeklerin birikmesinde ve dağılımda önemli bir rol oynamaktadır. Örneğin, uranyum 10^{-3} ppb ile 100 ppm arasında geniş bir konsantrasyonda ölçülmesine rağmen, toryum izotopları genellikle çok düşük miktarlarda bulunmaktadır. Yeraltı sularında radyumun genellikle tutulmasından dolayı çok uzak bölgelere göç edemez [21, 22]

3.4. Havadaki Radyoaktivite

Atmosferik radyoçekerdek derişimi özel bir dağılıma sahiptir enlem ve yüksekliğe bağlı olarak değişiklik gösterir. Uzaysal radyoçekerdeklerin üretimi trofosferden ziyade strosferde

daha fazladır, çünkü bu bölgedeki kozmik ışınlar çok daha yoğundur. Serpinti radyoaktif çekirdekler kuzey yarı kürenin orta yüksekliğinde daha fazladır, çünkü birçok atmosferik nükleer denemeler bu bölgede yapılmıştır. Havadaki radyoaktivitenin büyük bir kısmı radon, toron ve bunların bozunma ürünlerinden kaynaklanmaktadır.

3.5. Radyoçekirdeklerin Taşınımı

Düşük seviyeli radyoaktivitenin taşınımının değerlendirilmesi üç ayrı başlık altında incelenebilir.

- a) Atmosferde taşınımı ve bunun yeryüzüne etkisi,
- b) Tatlı su kaynaklarında ve deniz ekosisteminde taşınımı, sedimentlerde toplanması ve denizsel hayvanlara geçmesi,
- c) Yiyecek zincirinde topraktan taşınım, bu taşınımında bitkiler önemli rol oynamaktadır.

3.5.1. Atmosferde Taşınım

Havanın birçok katmanında ve yeryüzünün birçok yerlerindeki radyoçekirdek konsantrasyonu mevsimlik ve uzun süreli değişimler göstermektedir. Termik enerji santralleri düşük seviyeli radyoçekirdekleri atmosfere yayan bir kaynak olarak örnek verilebilir. Fakat bu yayılımın, topraktaki doğal aktivite üzerine doğrudan bir etkisi yoktur. Değişik faktörlere bağlı olarak atmosferdeki radyoçekirdek hareketiyle ilgili birçok bilgi, Chernobyl reaktör kazasından sonra yapılan çalışmalarla elde edilmiştir.

3.5.2. Sulardaki Radyoçekirdeklerin Hareketi

Deniz sularını da kapsayan yeraltı suları ve yerüstü sularındaki radyoçekirdeklerin hareketlerinin belirlenmesi, yalnızca suda değil aynı zamanda bitki örtüsünde ve sedimentlerin analizi ile de belirlenir. Bu düşük aktivitelerin ölçülmesinde, üç ana unsurun çözülmesi katkı sağlayacaktır. Bunlardan birincisi; sulardaki radyoçekirdeklerin dağılımı ve belirli şartlar altındaki davranışlarındaki farklılıklardır. İkinci unsur, suda yaşayan biyolojik objelere sudan radyoçekirdeklerin geçmesi ve üçüncüsü ve en önemli bilgilerin alındığı unsur ise sedimentlerdeki düşük seviyeli radyoçekirdeklerin ölçülmesidir.

3.5.3. Topraktaki Radyoçekirdeklerin Hareketi

Atmosferden yeryüzüne inen radyoçekirdekler yeryüzü toprağında birikir ve bunlardan önemli bir kısmı toprağın üst tabakalarına hareket ederler. Aynı zamanda, radyoçekirdeklerin

hareketi üç yol ile gerçekleşir; a) atmosfer içerisinde asılı (resuspension) kalma, b) toprak içerisinde göç etmesi, c) bitkilerin kökleri tarafından alınması. Topraktaki çekirdeklerin hareketinde en önemli etken bitkilerdir.

Organik madde içeriği, pH, kil miktarı, kil mineral tipi, toprak nem miktarı, kalsiyum, potasyum ve amonyum miktarı gibi toprak etki faktörlerinin yanı sıra, bitkinin büyüme ve gelişme faktörü, yetiştirme yeri değişebilirliği gibi bitki parametreleri gibi faktörler radyoçekirdeğin bitkilere geçişine etki etmektedir. Toprak organik madde içeriği özellikle iki çekirdeğin transferine büyük etki etmektedir. Bu etki, organik madde içeriğinin artmasıyla Sr transferi azalırken Cs transferi artmaktadır. Toprak pH 3,9-8,4 arasında olması selyumun transferine etki etmez, fakat pH değerinin 4,5 ile 7,4 arasında artması durumunda stronsiyumun transferi 1,7 kat azalır [23, 24].

Karasal radyoçekirdekler yeryüzünde değişik miktarlarda dağılmışlardır. Yerel jeoloji, yağış miktarı, drenaj şekli gibi faktörlerin karasal radyoaktiviteye çok büyük etkisi vardır [13]. Uranyumun iz parçacıkları birçok doğal kayada bulunur. Granit gibi asidik magmatik kayalar, sedimenter ve basalt gibi temel magmatik kayalardan daha fazla radyoaktif element içerirler. Uranyum fosfat, kömür ve petrolü şistler gibi bazı materyallerde daha fazla bulunurlar [25].

Topraktaki doğal radyoaktivitenin ölçülmesi, doğal temel seviye aktivite değişim miktarının belirlenmesi için oldukça önemlidir. Buradan da herhangi bir radyoaktif kirliliğin olup olmadığını rahatlıkla belirlenebilir ve bulaşmanın izlenmesi çevresel koruma yönünden oldukça önemlidir. Doğal radyoaktivite çalışmaları, sadece onların radyoloji etkilerinin belirlenmesi değil, aynı zamanda çevrede mükemmel birer biyokimyasal ve jeokimyasal izleyiciler olduklarından önemlidir. Doğadaki uranyum serisi radyoçekirdekler üzerine çok fazla çalışılmasının nedeni, yüksek biyolojik hareketliliğe sahip olmalarından kaynaklanmaktadır. Yerkabuğunda var olan uranyum ve ürünleri, sulara, bitkilere ve buradan da yiyeceklere ve daha sonra insanlara geçebilmektedirler. Yüksek miktarda uranyumun alınması canlılar (insanlar) için zararlı etkilere yol açabilir. Sulardan alınan uranyum yaklaşık %85 iken, yiyeceklerde alınan uranyum %15'ler civarındadır. Vücut ağırlığının 0,1 mg/kg'nın çözülmüş doğal uranyum ile ışınlanması durumunda geçici bir kimyasal hasara yol açabilir [26].

4. JEOLojİ ve RADON

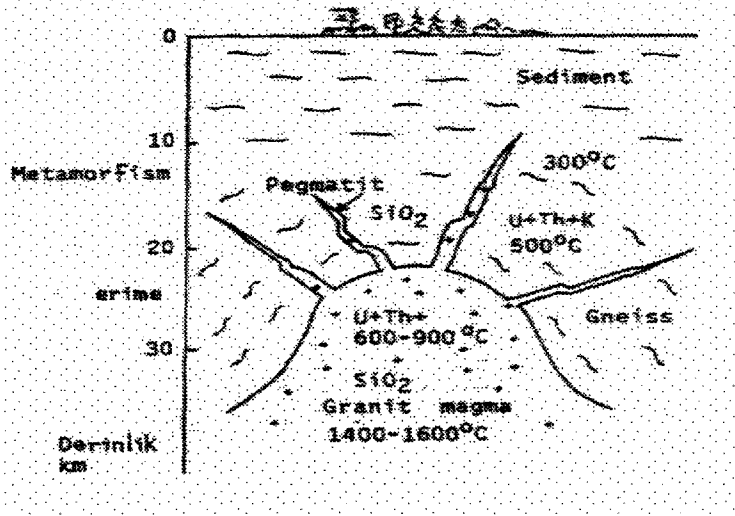
4.1. Radon

Radon renksiz, kokusuz ve tatsız bir radyoaktif asal bir gazdır ve ^{219}Rn , ^{222}Rn ve ^{220}Rn gibi doğal olarak oluşan üç izotopu vardır. Deniz seviyesindeki atmosferde genel olarak radyoaktivite ^{220}Rn , ^{222}Rn ve bunların ürünlerinden kaynaklanmaktadır. Radonun 220 izotopu toron olarak adlandırılır ve toryum serisinin bir üyesidir. ^{222}Rn ise radyumdan gelir ve uranyum serisinin bir izotopudur. Aktinon (^{219}Rn) ^{235}U serisinin izotopudur. Radon yeryüzünden atmosfere geçer. ^{220}Rn ve ^{222}Rn izotoplarını havadaki konsantrasyonu oldukça değişkendir ve topraktaki radyum ve toryum miktarına bağlıdır. Toprak üstündeki atmosferik konsantrasyon oldukça yüksektir, çünkü toprak uranyum ve toryum yönünden oldukça zengindir. Havadaki radon derişimi aşağıdaki birçok faktör ile yakından ilgidir. Bunlardan en önemlileri arasında; yeryüzü üzerindeki farklılıklar (asfalt vb, binalar ve bitki örtüsü), yerin yüksekliği ve rakımı, toprak gözenekliliği ve tane büyüklüğü, sıcaklık, atmosferik basınç, toprak nemi, yağış ve kar örtüsü, atmosferik şartlar ve mevsimsel farklılıklardır.

Atmosferik radon yoğunlaşmasındaki mevsimlik, günlük ve değişik özel jeolojik bölgeye bağlı olarak belirgin değişimler olabilmektedir [27]. Yeryüzü yoğunlaşma seviyesinin sonbahar ayı boyunca ve kışın ilk yarısında yüksek ve ilkbahar boyunca da düşük olduğu genel olarak kabul edilmektedir. Yeryüzünden atmosfere yayılan radon miktarının yaklaşık olarak yıllık 9×10^{19} Bq olduğu tahmin edilmektedir [1].

Radon hareketli, kimyasal olarak eylemsiz bir radyoaktif elementtir. Atom numarasının 86 olması, onu asal bir element yapar ve bu nedenle normal sıcaklıklarda hem atomik olarak hareketli hem de kimyasal olarak reaktif olmayan bir radyoaktif elementtir. Doğal olarak üretilen her üç izotopu alfa parçacığı yayar. Bu parçacıkların hepsi katı hal iz detektörleriyle kolaylıkla algılanabilirler.

Radonun üç doğal izotopundan ^{222}Rn , ^{220}Rn ve ^{219}Rn 'un yarı ömürleri sırasıyla; 3,82 gün, 55,6 saniye ve 3,96 saniyesidir. Radonun ve toronun bozunma zinciri Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Her bir bozunma zincirindeki radon izotopu radyum izotopundan yayılan bir alfa yayılımı ile sonuçlanır ve bundan dolayı radon üretimi yeryüzünde varolan radyum miktarı ile orantılıdır. Üç radon izotopunun bağıl etkileri bunların ortalama ve bağıl miktarlarıyla artmaktadır. ^{219}Rn en kısa yarı ömürlü radon izotopudur ve her zaman ^{222}Rn 'dan daha düşük miktarlarda üretilir ve $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ oranı 0,00719 olduğundan bu radyoizotop genelde ihmal edilir. Th/U oranı yüksek olduğundan ^{222}Rn oranla ^{220}Rn üretimi daha fazladır [8]



Şekil 4.3: Granit magmanın yeryüzü kabuğuna yukarı yönlü bir zorlaması gösterilmiştir. Kubbeye benzer kısmın üst tarafı K, U ve Th elementleri bakımından zengindir [8].

Çökeltme sık sık indirgeyen çevrede meydana gelir. Bu tür çevrelere örnek olarak, kalsiyum, magnezyum, demir, çatlak yönünden zengin kayalar ve aşınma sonucunda oluşan ürünler verilebilir. Ana kayanın aşınması, su ve erozyonuna maruz kalmasıyla uranyum taşıyan ağır mineraller ve toryum çoğu kez ayrılır. Bunlar demir, zirkon ve titanyum ile birlikte birikebilirler.

Toryum su ortamında kolaylıkla çözünmez. Nehir ve dere sularında çok küçük miktarda birikirler ve buradan da doğrudan denizlere ulaşırlar. Kil ve killi yaprak taşları diğer sedimentler kayalardan daha yüksek bir uranyum ve radyum yoğunluğuna sahiptirler. Nispeten yüksek uranyum konsantrasyonuna sahip sedimentler kayalara örnek olarak bazı siyah killi yaprak taşları ve fosfat birikintili sedimentler verilebilir. Toprak, ana kayadan kopmuş ürünlerden meydana gelmiştir. Toprağın üst kısmı, az veya çok organik materyaller ile karışmış olabilir. Toprağın oluşmasında birkaç farklı yol vardır:

- Ana kaya kimyasal veya mekanik aşınma ile karşı karşıyadır (sıcaklık, akan sular ve rüzgar). Toprak, kimyasal ve sıcaklık etkisiyle ana kayanın doğrudan yüzeyinin aşındırılmasıyla oluşan kalıntılardır. Örnek olarak, lateritik (kırmızı killi) toprak verilebilir.
- Ana kaya aşağıya doğru bir kırılmaya maruz kalır. Till toprak altında uzanan ana kayanın doğrudan bir ürünü olarak bu yolla oluşmuştur.
- Volkanlardan yayılan volkanik patlama ürünleri kül tabakalarını ve taşları oluşturur.

- d) Deniz ve tatlı su hacimlerinin ürünlerinin çökmesi ile oluşabilir ve bu çökme kimyasal ve biyolojik olabilir. Bu tür topraklara örnek olarak, kireç çamurları, turba ve silisli toprak verilebilir.
- e) Gevşek toprak sular, rüzgarlar tarafından harekete geçirilir, ayrıştırılır ve tekrar biriktirilir. Su hareketi ve ayrıştırmasıyla oluşan topraklara örnek olarak, kil, kum ve çakılların nehir birikintileri verilebilir. Tekrar biriken topraklara örnek ise, deniz kıyıları boyunca varolan kum birikintileri verilebilir. Rüzgar ile taşınan toprak birikintilerine örnek olarak ise gevşek ve kumlu toprak verilebilir.

Toprak oluşum süreci boyunca ana kayadaki uranyum ve radyum derişiminde değişimler olmaktadır. Üstelik uranyum ve radyum farklı kimyasal özelliklere sahiptir ve kimyasal sızmalardan dolayı farklı miktarlarda bulunmalarını etkilemektedir. Bu nedenle uranyum ve radyum genellikle birbirinden ayrışırlar.

4.3. Radonun Oluşumu ve Yayılımı

4.3.1. Radonun Kaynağı

Radon izotopları mineraller içerisinde radyumun bozulmasıyla üretilir ve bu izotopta ^{238}U , ^{235}U veya ^{232}Th ile başlayan bozunma zincirlerinin doğal bir üyesidir. Radonun en temel kaynağı, bu radyoaktif çekirdekleri bünyesinde bulunduran, toprak, yeraltı suyu ve bina yapım malzemeleridir [1].

Radonun herhangi bir ölçüm noktasındaki konsantrasyonu şu üç ana faktörün bir fonksiyonudur.

- kaynak materyaldeki radon kaynağının dağılımı ve miktarı,
- biyosfere götüren taşıma mekanizmasının verimi,
- yarı ömrü.

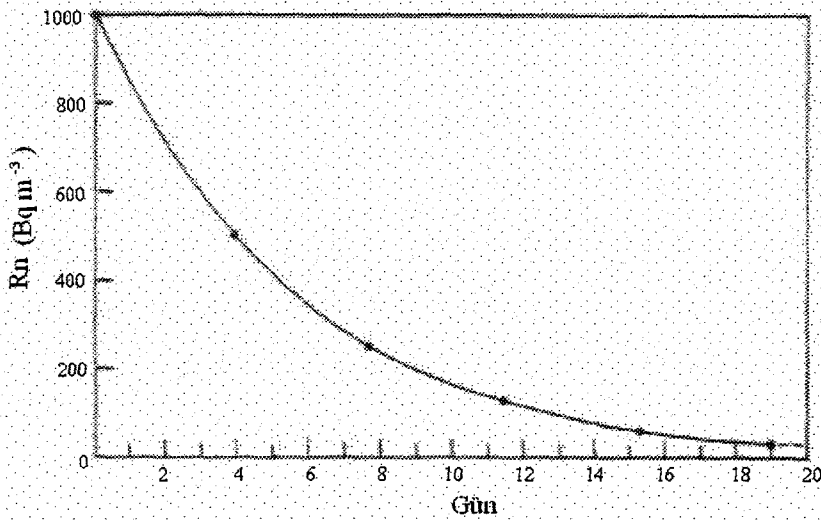
Radon, ^{238}U bozunma zincirinin kısa yarı ömürlü ve ^{226}Ra 'nın neslinin bir üyesidir ve konsantrasyonu kaynak materyaldeki ^{238}U ve ^{226}Ra 'un miktarının bir fonksiyonudur. Bununla birlikte, su veya topraktaki radon ile radyum veya uranyum arasında sıkı bir ilişki yoktur. Gerçekte, sadece iki uç durum için mükemmel bir ilişki vardır. Bunlar; eğer kaynak maddenin (kaya veya sediment) radyum içeriği çok düşük veya çok yüksek ise, bu durumda bitişik su veya toprak gazında radon muhtemelen çok düşük veya çok yüksek olabilir. Bununla birlikte, radyum miktarı çok yüksek veya çok küçük değil ise, bitişik ortamdaki radon miktarı genişçe bir oranda değişiklik gösterebilir. Diğer faktörlerin de radon derişimi üzerindeki etkisi oldukça baskındır. Öyle ki, herhangi bir ortamdaki radon konsantrasyonunu tahmin edebilmek için, katı matris içerisinde radonun çevre ortamına taşınım işleminin anlaşılması oldukça önemlidir. Radon

derişiminin kontrolündeki üçüncü önemli faktör ise radonun yarı ömrüdür. Şekil 4.4'de asıl kaynağından ayrılan radonun bozunma eğrisi gösterilmiştir, bu durum desteklenmemiş aktivite hali olarak bilinmektedir. Radon aktivitesi üstel olarak azalır, böylelikle beş yarı ömür veya yaklaşık 20 günde başlangıç aktivitesinin %1'i kadar aktiviteye sahip olmaktadır. Difüzyon ile normal şartla altında radonun topraktaki taşınımı, radonun kısa yarı ömründen dolayı bir kaç metre ile sınırlıdır. Toronun ise 55 saniyelik yarı ömründen dolayı çok daha kısa erişim uzaklığına sahiptir [28].

4.3.2. Radonun serbest kalma mekanizması

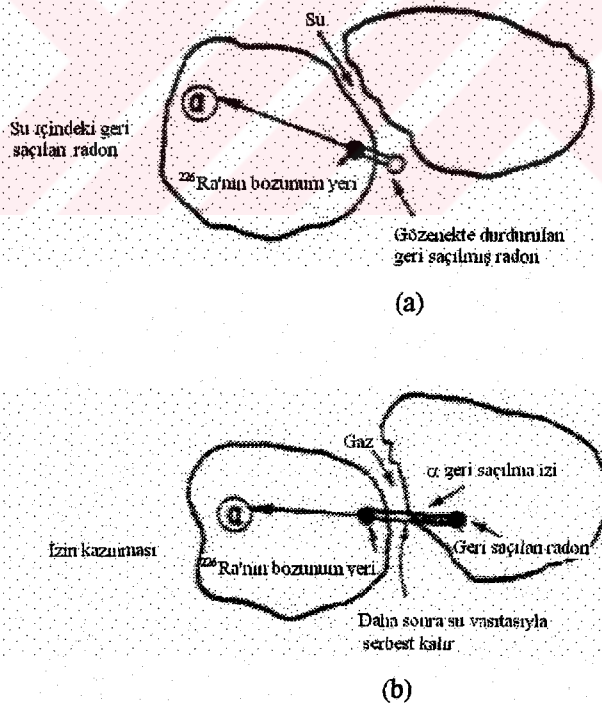
Radon, radyoaktif bozunma serisinin bir bölümü olduğundan, katıdan gözenek uzayına geçmesi geri saçılma olarak bilinir ve bu tek işlemdir. Alfa yayılımı ile radyoçekirdeğin bozumunu süresince, alfa parçacığı çekirdekten dışarı fırlar, bu durum bir silahtan bir merminin çıkmasına benzetilebilir ve tipik kimyasal bağ enerjisinin 10^4 - 10^5 katı bir enerjiye sahiptir. Geri saçılan atom mineral tanenin yapısı içerisine hareket edebilir ve bu atom 20 ile 70 nm gibi bir erişim uzaklığına sahiptir. Alfa geri saçılımı, kimyasal bağı kırabilir olmasından dolayı oldukça önemlidir, fiziksel olarak katı içerisinde geri saçılan atom farklı pozisyonlarda hareket eder ve kimyasal yapıda hasara sebep olabilir [29].

Radon ve toronun mineral örgüsünden veya molekül içerisinde oluşması ve buradan nasıl yayıldığı üzerine farklı teoriler vardır. ^{226}Ra izotopu bozulduğu zaman bir radon atomu ve bir alfa parçacığı oluşur ve bu oluşumdan sonra radon, bozulan radyum atomundan dışarı çıkar. Radyumun bozunmasından üretilen radon mineralden asla kaçamaz. Genellikle bozunana kadar



Şekil 4.4: Radon derişiminin yarı ömrüne bağılı olarak değişimi [28].

birkaç gün kristal örgünün içerisinde sıkışıp kalır. Alfa parçacığı dışarı çıktığı zaman bir geri saçılma etkisi oluşur. Bu olayda, radyum atomunun var olduğu yerde, molekül veya mineral örgüsünden radon atomunun dışarı çıkmasıdır. Normal yoğunluğa sahip bir mineral tanesi içerisindeki radon atomu rahatlıkla hareket edebilir. Radon atomunun bu çok hareketliliği, radonun mineral tanesinden yayılmasına imkan verebilmektedir. Radon atomu, çok hareketliliğin bir sonucu olarak taneden dışarı çıkabilmektedir, bu durum yüzeye yakın olmasını sağlar ve neticede dışarı doğru çıkma işlemi içinde denemeleri arttırmaktadır. Bu yol ile radon atomu mineral tanelerindeki çok ince çatlaklardan dışarı çıkabilmektedir ve bu süreç Şekil 4.5'de gösterilmektedir. Radonun küçük bir kısmı, radon oluşur oluşmaz veya bozunmadan önce materyalden kaçabilir. Kaçma sürecinin birincil olasılığı, alfa yayılımından geri saçılmayla radon atomunun doğrudan dışarı çıkması işlemidir. Momentum korunumu ile ^{226}Ra tarafından 4,78 MeV'lik enerjiye sahip alfa yayılımının olduğu ve ^{222}Rn çekirdeğinin geri saçılma enerjisinin 86 keV'e sahip olduğu bulunur. Eğer radyum mineral yüzeyinin 26 nm içerisinde ise Şekil 4.5'de de gösterildiği gibi, geri saçılma gerçekleşir ve geri saçılma taneyi terk ederek ara yüzeye girer. Eğer gözenek boşluğu su içerirse, dışarı çıkan saçılma genellikle



Şekil 4.5: Farklı ortamlar a) su ve b) hava içerisinde radonun serbest kalma mekanizması [8].

sıvı içerisinde hareketsiz kalacaktır. Daha sonra radon atomları sudan serbestçe geçebilecek veya su yardımıyla taşınabileceklerdir. İkinci olasılık, ara yer ortamının kuru olması durumudur ve geri saçılan radonun durdurulması için yeterli büyüklüğe sahip olmamasıdır. Bu durumda, taneciği terk etmekte başarısız olmalarından daha düşük bir izolasyona sahip olurlar ve radyasyon hasarını genişleterek yeni bir taneye girerler [8]. Geri saçılma kesri tane boyutuyla ilgilidir. Örneğin, eğer tane büyüklüğü 1 μm yarıçapında ise, atomların yaklaşık olarak %5'i geri saçılma ile taneden ayrılır iken, milimetre boyutundaki tanelerde bu oran sadece % 0,005 civarındadır.

Radon ve bozunma ürünlerinin fiziksel davranışlarının daha iyi anlaşılabilmesi için, zincirden yayınlanan alfa parçacıklarının nüfuz edebilme güçlerinin bilinmesi ve aynı zamanda alfa bozunumundan sonra geri saçılan çekirdeğin de göz ününe alınması yardımcı olacaktır. Örneğin, 5,49 MeV enerjiye sahip bir ^{222}Rn 'dan yayılan bir alfa parçacığı su içerisinde 39 μm , polietilen terephthalate (yoğunluğu 1,2 g cm^{-3}) ise 32 μm , polietilende 31 μm , lexan policorbanatta 37 μm ve soda kireç camın da ise (yoğunluğu 2,5 g cm^{-3}) 23 μm dir. Alfa bozunumunun sonucu olarak geri saçılan çekirdek düşük enerjilerde olup (~100 keV) bunun sonucu olarak çok düşük erişim uzaklığına sahiptir.

Bazı araştırmacılar, radonun mineral örgüsünden difüzyon ile mineral tanesinden yayılabildiğini veya mineral tanesinde radyasyon hasarı oluşturarak su yardımıyla sızdığını kabul etmektedirler. Suda ve havadaki radonun difüzyon oranları oldukça farklıdır. Tablo 4.1'de de görüldüğü gibi radonun sudaki difüzyon katsayısı D, havadakinden 10.000 kat daha düşüktür. Toprak havasındaki ve yeraltı sularındaki radon ve toron yoğunluğu, mineral tanesinden gözenek boşluğuna ne kadar radon atomunun yayıldığı bu öğeleri çevreleyen toprak ve ana kayadaki radyum yoğunluğunu ve toprağın su ve gözenekliliği ile belirlenmektedir. Bunlara ilave olarak, ne kadar radon atomunun hareketlendiği veya difüzyon ile etkilendiği ve toprak havasının hareketi ile veya CO_2 ve CH_4 gibi yukarı yönde hareketliliği yüksek olan gazlar veya sular yardımıyla taşındığı da radon yoğunluğuna etki etmektedir.

Tablo 4.1: Farklı ortamlarda radon izotoplarının ortalama difüzyon uzaklıkları [8].

Ortam	Ortalama Mesafe		Difüzyon Sabiti ($\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$)
	^{222}Rn (cm)	^{220}Rn (cm)	
Hava	220	2.85	10^{-1}
Toprak gözeneği	155	2.0	5×10^{-1}
Su	2.2	0.0285	10^{-5}
Doymuş toprak gözeneği	1.55	0.020	5×10^{-6}

4.3.3. Radonun Taşınma Mekanizması

Radon taşımının üç şekli vardır ve bunlar radon hareketinin tahmin edilmesi ve anlaşılması için önemlidir. Bunlar;

- Katıdan gözenek uzayındaki ya sıvı ya da gaz geçişi
- Radonun taşımını sıvı veya gaz ile ilişkili olması (moleküler difüzyon)
- Sıvı veya gaz ile radonun taşımını.

Katıdan radonun taşımını yayılım olarak adlandırılan bir süreçtir ve yayılım gücü radon atomlarının sayısındaki oran olarak tanımlanır, bu da katıdaki radyumun bozunumundan oluşan radon atomlarının katıdan kaçan radon atomlarına oranıdır. Bu nicelik yayılım katsayısı, kaçış oranı veya yayılım yüzdesi olarak bilinir. Bir materyalin yayılım katsayısı yüksek radon yoğunluklarının tahmininde çok önemli bir faktördür.

Kristal katılarda radonun difüzyon katsayısı oldukça küçüktür ve radon kristal boyutlarına bağlı olmaksızın herhangi bir uzaklığa erişmeden önce bozulacaktır. Yüksek derişimlerde uranyum içeren minerallerde, arka arkaya oluşan geri saçılmalarından dolayı kristalde radyasyon hasarlı bölgeler vardır. Radyum genellikle yüzey tabakalarında ve tanelerde birikebilir.

Toprak içerisinde moleküler difüzyon ile radonun taşımını, radonun kısa yarı ömründen dolayı sınırlıdır. Bu taşım ile radonun çakılda erişim uzaklığı 5 m, doymuş çamur ve kilde 2 m'dir. 0,0002 ile 0,2 kg ağırlıklarındaki apatite, monazit ve uranit gibi tek kristaller için radonun yayılım katsayısı %0,5 ile %25 arasında değişmektedir. Zirkonda ise radon çok düşük yayılım katsayısına sahiptir (%0,001- %0,01) [29].

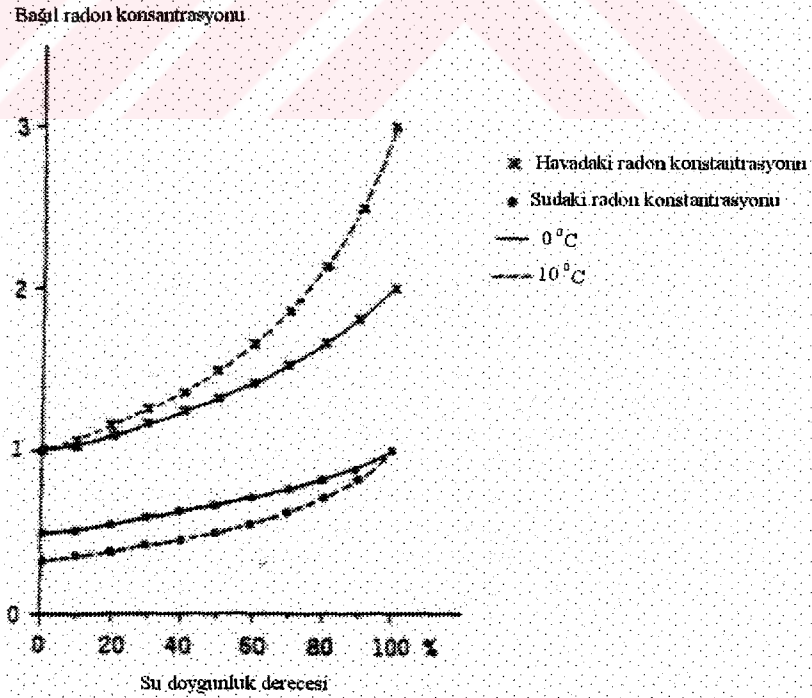
Genel olarak radon, difüzyon ile taşımının yanında, zorlanmış (forced) akım diye adlandırılan bir olay ile de hareket eder. Difüzyon boyut olarak sınırlı olabilmesine rağmen gerçekleşir. Bununla birlikte, radonun taşımında difüzyon göç düşük bir limitte gerçekleşir. Zorlanmış taşım, basınçtaki değişimlere bağlıdır. Basınç değişimleri yer kabuğundaki ara yüzeylerdeki sıvı ve gazların akmasına neden olabilirler ve böylelikle radonun bu maddeler ile taşınması sağlanır.

Radonun taşınması üzerine birçok incelemeler ve mekanik model önermeleri yapılmıştır. Mekanizmalar, deprem, volkanik patlamalar, petrol ve uranyum olasılığı gibi jeofiziksel ve jeokimyasal olaylara bağlı olarak farklılıklar gösterirler. Sıvı iletimi, gerilim ve gaz yayılımı olmak üzere üç ana kategori vardır. Gazlar, petrol yatakları aracılığıyla serbest kalabilirler, üretilebilirler ve volkanlar gibi sıcak bölgeler tarafından basınç altında tutulabilirler. Gerilimler, depremlerden ve volkanik patlamalardan önce olan zorlanmaların artmasıyla oluşabilirler ve gerilim değişimleri yer kabuğundaki sıvı akış yönünü değiştirebilirler. Sıvı

iletimi yeterince yüksek jeotermal değişimler ve yeterli geçirgenlik olduğu zaman akma şeklinde meydana gelir. Bu tür akmalar derinliklerden uranyum yataklarının izlerini taşır. Basıncın neden olduğu diğer bir katkı da basınç dalgalanmalarıyla ki bu da su sistemleriyle ilişkilidir, yzeze yakın topraktaki atmosferik pompalamadır [8].

Toprak gözeneklerindeki havada radon birikimi, gözenekteki su miktarına bağlı olarak artmaktadır. Sudaki radon ile havadaki radon oranı arasındaki denge ilişkisi sıcaklıktan bağımsızdır. Ayrıca gözeneğin nem oranının artmasına paralel olarak radon yayılımı da artmaktadır. Su ve havanın hacmine eşit kapalı bir hacimde ve +15 °C deki havada radon yayılımı su içerisindeki yayılımdan üç kat daha büyüktür. 0 °C de sıcaklıktaki havadaki radon yayılımı su içerisindeki yayılımdan iki kat daha yüksektir. Gözenek suyu ve gözenek havasındaki, farklı su miktarı ve farklı sıcaklıklardaki radon konsantrasyonu arasındaki ilişki Şekil 4.6'da verilmiştir.

Birçok araştırmacının yaptığı çalışmalarda radonun, topraktan, çatlak kayalardan veya bir betondan çıkışı ve yayılımı gözeneklerin su ile dolu olma durumuna bağlı olarak arttığını göstermiştir. Su içeriğinin artmasıyla radon yayılımının artmasının nedeni şöyle açıklanmaktadır; radyum atomunun bozunması sonucunda dışarı fırlatılan radon atomu, eğer gözenek boşluğu su ile dolu olursa en yakın mineral tanesinin içerisine girmesini engelleyecektir, dolayısıyla fırlatılan radon atomunu yavaşlatmış olacaktır.



Şekil 4.6: Topraktaki nem miktarıyla değişen su ve havadaki radon konsantrasyonu [29].

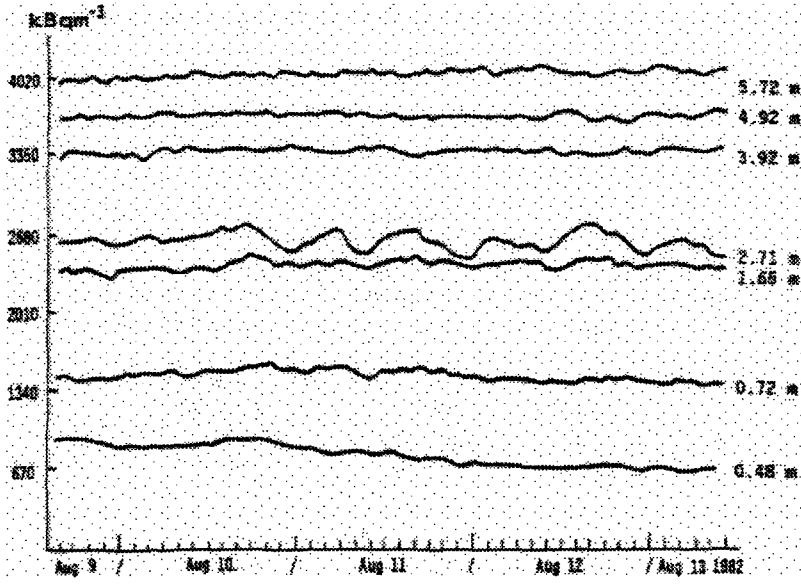
Toprak içerisinde suyun, CO₂ veya CH₄ gibi gazların hareket etmesiyle veya difüzyon ile toprakta radonun taşınımı gerçekleşir. Hareket eden hava erimiş kar veya süzülen yağmur ve hava basıncıyla değişebilmektedir. Toprak sıcaklığındaki farklılıklar başka durumlara da sebep olabilmektedirler. Yeryüzündeki radonun taşınımı, toprağın su miktarı, yoğunluk derecesiyle ve tane büyüklük dağılımına bağlı olan, geçirgenlik ile yakından ilişkilidir. Kaba taşlardan radonun difüz etmesi havada difüz etmesi kadar kolay iken, suya doymuş bir kilden difüzü çok küçüktür. Eğer toprak gözenekleri tamamen su ile dolu ise, topraktaki difüzyon sudaki ile aynı olacaktır (Tablo 4.1).

Radon sınırlı bir ömre sahiptir ve radonun büyük bir kısmı belirli bir difüzyon uzaklığından sonra bozulacaktır. Radon kaynağından yayılan radonun %90'ı su içerisinde 5 cm uzaklıktan sonra, ince taneli toprakta ve normal nem miktarında yaklaşık 2 cm ve havada 5 cm sonra bozunacaktır. Radonun izotopu olan toron için taşınım uzaklığı çok önemli değildir, çünkü yarı ömrü 56 saniyeden daha büyük değildir. Toprak yüzeyinden atmosfere yayılan radonun difüzyonu, farklı derinliklerdeki toprak havasındaki radon yoğunluğunun belirlenmesinde oldukça önemlidir. Yeryüzü üzerindeki rüzgarların etkisi toprak havasındaki radon yoğunluğunu azaltma yönünde etki etmektedir. Sonuç olarak; çok büyük havalandırılmalar toprağın üzerinde ve içinde çok düşük radon konsantrasyonlarının oluşmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, difüzyon ve rüzgarın etkisi, toprak havasındaki radon ölçümlerinin yorumlanmasında göz önünde bulundurulmalıdır.

4.3.4. Derinliklere Bağlı Olarak Radon Konsantrasyonları

Radonun farklı derinliklerdeki konsantrasyonları üzerine birçok araştırma yapılmıştır. Toprağın 0,5 metredeki derinlikteki radon yoğunluğu, toprak havasından kaçan ve giren radon arasındaki dengenin konsantrasyonunun yaklaşık olarak %50'si civarındadır ve topraktaki derinlik azalınca radon yoğunluğu büyük değişimlere maruz kalır. Bir metre derinliklerde ise denge konsantrasyonu yaklaşık olarak %70-80'i civarındadır. Farklı derinliklerdeki radon konsantrasyonlarındaki değişimler Şekil 4.7'de gösterilmiştir.

Radon ölçümleri yaklaşık olarak 1 m civarındaki derinliklerde en uygun ölçüm şartlarını sağlamaktadır. Daha fazla derinliklerdeki toprak havasındaki radon yoğunluğu, daha sığ bölgelerdekine göre hemen hemen sabittir. Çok daha fazla derinliklerdeki ölçümler çok daha pahalı ve büyük çakılların materyal içerikleri bilinmedikçe ilave olarak çok az bilgi verir. 1 m civarındaki derinliklerde ölçüm almanın diğer bir nedeni de, toprağın üst kısmından sızan uranyum ve radyumun toprağın 0-70 cm aralığında birikmesi, buralarda radon yoğunluğunu arttırmaktadır.



Şekil 4.7: Farklı derinliklerdeki radon konsantrasyonundaki değişimler [8].

Toprak tipine bağlı olarak, nem içeriğine ve maruz kaldığı rüzgar ile ilişkili olarak radon yoğunluğu biri birine çok yakın noktalarda dahi değişiklik göstermektedir. Kullanılan ölçüm metotlarında radon ve toron arasındaki ayrımı yapabilmek oldukça zordur, öyle ki her zaman torondan gelen ve aktiviteyi arttıran bir risk vardır. Bunun yanı sıra, nemin etkisi, boşluk büyüklüğü, detektöre hareketi boyunca radonun bozunması ve mineral taneleri üzerinde radonun tutulması gibi hata kaynakları da verilebilir.

4.3.5. Ana Kayadaki Fay ve Kırık Bölgelerinden Radon Yayılımı

Aktif faylardaki ayrıcalıklı gazların çıktığına dair oldukça fazla kanıt vardır. Yapılan çalışmalarla sismik kuşaklardaki yeraltı sularının HCO_3^- özellik gösterdiği, sismik olarak aktif faylarda CO_2 çıkışının olduğu, olayın sürekliliği aktif fayların göstergesi olduğu ve yüksek geçirgenlik, gözeneklilik ve hareketle karakterize edildiği kanıtlanmıştır. CO_2 çıkışı genel olarak, termal yer kabuğunun anormalliklerinin sonucu olan sismik faylar ile ilişkilendirilir. Fakat sismik faylarda CO_2 çıkışı olmadığı da görülebilir, bu durumda azotla zenginleştirilmiş helyumun açığa çıktığı gözlenir. Aktif faylardaki gazın çıkışı, üretilen diğer karasal gazlar için de geçerli bir özelliktir. Örneğin; Rn , He , H_2 , CH_4 , değişik alkanlar ve alkali aromatik hidrokarbonlar ve aynı zamanda uçuculuğu yüksek Hg , As , Sb gibi metallerdir. Fay gazları, tek bir fayda bile olsa, jeokimyasal özelliğin çok geniş bir aralıkta göstergesidir [30].

Ana kaya üzerindeki birçok kırık ve fay zonlarındaki yeraltı suyunda ve toprak havasındaki radon konsantrasyonunun yüksek olduğu yapılan birçok ölçümlerde ve çalışmalarda

gösterilmiştir [31-34]. Bunların yanı sıra, deprem ile birlikte konsantrasyonlarda değişimler olduğu da gösterilmiştir. Bütün bu gözlemler göstermiştir ki, kırık bölgelerinde radon, yeraltı suyu hareketi veya difüzyondan daha hızlı bir şekilde taşınabilmektedir. Bu olayın nasıl yukarı doğru bir şekilde gerçekleştiğine dair birçok teori vardır. Bunlardan biri, yukarı doğru hareket etmek için kendisine yol bulan jeo-gazlar (CO_2 , CH_4 , N_2) ile taşındığıdır. Kırık zonlar üzerindeki yeraltı sularında çözülmüş uranyum iyonları veya ürün çekirdekler vardır ve bunlar, yer yüzeyine yakın yerlerde çökelirler, böylece bunların bozunmasından oluşan radyumdan da radon yayılır.

Bazı durumlarda, helyum ve zengin karbondioksit miktarı ile birlikte radon çıkışı gözlemlenmektedir. Bu durumda, karbondioksitin kırık zonlardan yüzeylere radonun taşınmasında büyük bir taşıyıcı rolü vardır. Radonun yeryüzündeki çatlak ve kırıklardan, değişik gaz ve sıcak termal sular ile çıkabilmesinin yanı sıra, termal suların sıcaklığının artması çözünebilirliği arttığından aktivitesi de artar. Radonun bu karakteristikleri, hidrotermal sistemlerin karakteristiklerinin belirlenmesinde ve haritalanmasında, volkanik ve tektonik arazilerde fay kırıklarının belirlenmesinde, uranyum cevheri araştırmalarında, yeraltı sularının akış karakteristiklerinin belirlenmesinde bir araç olarak kullanılmasına imkan tanımaktadır. Yeraltı suları ve jeo-gazların yeryüzüne çıkışı ile hidrotermal sistemlerin ve sismik olarak aktif zonların güçlü bir ilişkisi vardır. Özellikle, jeolojik profillerin ve tektonik süreksizliklerin birlikte değerlendirilmesinde radon tekniği, yeryüzü araştırma radarı, elektromanyetik iletkenlik testi ve elektriksel direnç veya düşey manyetik farkı araştırmaları gibi jeofiziksel metotlar için alternatif bir araçtır [35-37].

Yerkabuğundan atmosfere yayılan radonun miktarı oldukça küçüktür, bununla birlikte jeolojik faylarda, jeotermal kaynaklarda ve volkanik bölgelerde yerkabuğundan yayılan radonun miktarı değişiklik gösterebilmektedir. Buralardaki radon anormallikleri, toprak ve kayaların radon yayım gücüne ve iklimsel faktörlere göre değişiklik gösterebilmektedir [38]

4.3.6. Yeraltı Suyundaki Radon

Toprakta yeraltı suyu ile dolu gözeneklere yayılan radon su dolu gözeneklerde kalır ve bozunmadan önceki difüzyon uzunluğu oldukça küçüktür. Sadece yeraltı suyunun hareket etmesiyle radonun herhangi bir miktarı yeraltı suyundan süratle kaçır. Bu durumlar, ana kayadaki ince çatlardaki sular ile farklı olabilmekte ve buralardaki radon yoğunluğu kaya havasındakinden oldukça yüksektir. Bu şekilde, yüksek radon yoğunluğunun granitteki kırık ve ince çatlaklardan çok suda olduğunun nedenini göstermektedir. Örnek olarak granit yaklaşık olarak 12 ppm (148 Bq/kg radyum) uranyum derişimine sahiptir. ^{226}Ra yoğunluğunun dengede olduğu kabul edilir. Özellikle, bu sularda radon konsantrasyonunun yüksek olmasının nedeni;

kolaylıkla çözülebilen 6 değerlikli uranyumun su vasıtasıyla kaya dışına kolaylıkla çıkabilmesinden kaynaklanmaktadır. Uranyum ve ürün çekirdekleri çatlakta çökebilirler ve kısmen çatlakların yüzeyindeki mineraller ile kimyasal olarak etkileşirler ve kısmen de ürün çekirdekler az çözülürler ve böylece dışarıda çökelirler.

Kırık tabakalarındaki uranyum miktarı burayı çevreleyen kayalardaki konsantrasyonlardan yaklaşık olarak 3-20 kat arası değişen yüksek bir yoğunluğa sahiptirler. Bu nedenle, radyum yönünden zengin mineral tabakaları ince çatlak ve kırıkların yüzeylerini oluştururlar ve buralardan yayılan radon doğrudan çatlak içerisindeki suya girerler. Diğer bir neden ise, özellikle uranyum mineral taneleridir, buralardaki radon miktarı çevre kaya ve sulardaki konsantrasyondan birkaç kat daha yüksektir. Bu nedenle, uranyum içeren tanelerdeki radon su fazına difüz eder.

Kaya gözeneklerinin çok düşük olması, radon konsantrasyonu için var olabilme durumu, kaya radon konsantrasyonundan 10-100 kat daha yüksektir. Yeraltı suyu radon yoğunluğu normal olarak 10-200 Bq^l civarındadır. Uranyum yönünden zengin granitlerin oluşturduğu ana kaya bölgesindeki yeraltı sularındaki radon yoğunluğu 1.000 Bq^l'yi geçebilmektedir.

Radon yoğunluğu bazen de pegmatitler (gneisses, volkanit yönünden zengin quartz ve feldspar) ile ilişkili olarak yüksek olabilmektedir. Uranyum yönünden fakir bölgelerdeki ana kayalar çevresindeki yeraltı suyundaki radon miktarı oldukça düşüktür (diorite, gabro, temel volkanit, limestone, sandstone ve shale).

Sulardaki radon derişimi düşük uranyum konsantrasyonuna sahip ana kayalarda dahi yüksek olabilmektedir. Başka bir ifadeyle, ana kayadaki yüksek uranyum derişimi, bunu çevreleyen sulardaki yoğunluklardan her zaman yüksek olacağı anlamına gelmez. Buna bir örnek olarak, killi yaprak taşıdaki uranyum miktarının yüksek olmasına rağmen, killi yaprak taşı bölgesindeki yeraltı suyundaki radon konsantrasyonunun nadiren yüksek olması verilebilir [8, 29].

Fay sistemi yer yer örgülü geometri sergileyen çok sayıda kısa, yarı paralel fay parçalarından oluşmaktadır. Kuzeydeki Avrasya Levhası ile güneydeki Anadolu Levhası arasındaki sınırın önemli bir bölümünü oluşturan KAFS Karadeniz Kıyısı'na az çok paralel olarak uzanır. Fay sisteminden ayrılan ve Anadolu Levhası'nın içlerine uzanan ikincil faylar (Almus Fay Zonu, Yıldızeli Fay Zonu, Taşova-Çorum Fay Zonu v.b), sistemin en karakteristik özelliklerinden birisidir.

22 Mayıs 1971 Bingöl (Mw: 6.8), 1 Mayıs 2003 tarihinde Bingöl- Çeltiksuyu (Mw: 6.4) ve 11 Ağustos 2004 Sivrice (Elazığ, Mw: 5.5) depremleri hariç tutulduğunda, 20. yüzyılda önemli bir deprem üretmeyen Doğu Anadolu Fay Sistemi (DAFS), kuzeydoğuda Karlıova üçlü eklem noktası ile güneybatıda Karataş (Adana) ve Samandağ (Hatay) ilçeleri arasında uzanan, yaklaşık KD gidişli, 30 km genişliğinde, 700 km uzunluğunda sol yanal bir doğrultu atımlı fay sistemidir. DAFS, boyut ve geometrileri birbirine benzeyen bir dizi paralel ve yarı paralel fay zonları, fay takımları ve tekil faylardan oluşmaktadır. 1874 Gölcük (Sivrice-Elazığ) depreminden bu yana, 130 yıldır önemli bir deprem üretmeyen fay sistemi, yakın gelecekte hasar yapıcı önemli depremler üretebilecektir [39].

Karlıova ve yakın çevresinde Paleozoyik'ten günümüze kadar oldukça farklı kayaç birimleri yüzeylenmektedir. Bölgede yüzeyleyen kayaçları esas olarak iki başlık altında toplamak mümkündür. Bunlar;

- a) Paleotektonik dönem kayaçları,
- b) Neotektonik dönem kayaçları.

Paleotektonik dönem kayaçları mermer ve amfibolit gibi Paleozoyik-Mezozoyik yaşlı metamorfik kayaçlar, Jura-Alt Kretase yaşlı ofiyolitik kayaçlar ve kaotik dokulu pelajik kireçtaşı, radiolarit, andezit, bazalt, piroklastitler ve türbiditlerden oluşan Üst Kretase-Eosen yaşlı kayaçlardan oluşmaktadır. Neotektonik dönem kayaçları ise Pliyosen yaşlı bazalt, tuf ve bazaltik piroklastitler ile Kuvaterner yaşlı havza dolgusu çökellerinden oluşmaktadır. Mevsimsel akarsular ve geçici göllerde depolanmış ve zayıf tutturulmuş kaba kum ve çakıllar ile ince silt ve killer en karakteristik havza dolgusu çökelleridir. Tüm bu birimlerin üzerinde kalınlığı yer yer 2 m'yi bulan koyu kahve renkli, baskın olarak kil ve silt ile çok az oranda kum ve çakıl içeren toprak seviyesi söz konusudur.

Bu çalışmada; Kuzey ve Doğu Anadolu Fay hatlarının kesiştiği bölgedeki (Karlıova-Bingöl) yeraltı, yerüstü suları, hava ve topraktaki doğal radyoaktivite seviyelerin belirlenmesi için örnekleme işlemi, örnek toplama kriterleri göz önünde bulundurularak yapılmıştır. Doğu Anadolu ve Kuzey Anadolu Fay Zonlarının kesiştiği bir bölge olan Karlıova (Bingöl) ve çevresindeki toprak ve sularındaki toplam alfa, toplam beta ve özellikle doğal olarak oluşmuş

radyoçekirdeklerden olan ^{238}U (uranyum), ^{232}Th (toryum) ve ^{40}K (potasyum)'un aktiviteleri bulunarak, bu radyoçekirdeklerin neden olduğu topraktaki radyum eşleşimini, havada tutulan dozu, yıllık etkin doz oranı ve radyolojik açıdan dış tehlike indeksi hesaplanmıştır.

Karlıova ve çevresi iki kısma ayrılarak irdelenmeye çalışılmıştır. Birinci bölge olarak, Karlıova'nın Doğu Anadolu Fay Zonun'un bulunduğu kısım seçilmiş ve örnekler bu bölgeden alınmıştır. İkinci kısım olarak, Kuzey Anadolu Fay Zonu'nun Karlıova bölgesine yakın bölümü seçilerek örnekleme yapılmıştır. Çalışılan her bir bölge ise iki bölüme ayrılarak irdelenmesi yapılmıştır. Birinci bölümde, Göynük çayı üzerindeki göynük köprüsünden toplanan numunelerin, mümkün olan en kısa sürede (ağır metal tayini, radyoaktivite) ölçümü gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen ölçüm sonuçları, ilgili denklemlerde kullanılarak, numunelerin tamamının toplam alfa, beta, ve bazı radyoizotop (^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K) konsantrasyon seviyeleri hesaplanmıştır. Toplanan her bir toprak ve su numunelerinin ağır metal (Fe, Pb, Cu, K, Mn, Cr ve Zn) analizleri de yapılmıştır.

Ayrıca, Kuzey ve Doğu Anadolu Fay hatlarının her biri üzerine faya paralel ve faya dik şekilde radon detektörleri yerleştirilerek, bu fay zonlarındaki radonun çıkış yoğunlukları bulunmuştur. Bu işlemleri yaparken, her bir ölçüm istasyonundaki havada doğrudan gama doz ölçümleri yapılmıştır.

5.1. Örneklemenin Yapılması ve Radon Ölçüm İstasyonlarının Belirlenmesi

Bu çalışmadaki, Göynük köprüsünden itibaren DAFS ve KAFS'inde su ve toprak örneklerinin alındığı, havada çevresel gama doz oranının ölçüldüğü ve radon ölçüm noktalarının yerleri Şekil 5.2 (a) ve (b) 'de gösterilmiştir.

Çalışılan bölgede su numuneleri, bölgenin genelinde var olan yeraltı ve yer üstü sularından alınmıştır. Su numuneleri 1 L'lik polietilen şişeler ile alınarak, numaralandırıldıktan sonra, örneklere 15 mL 1 N nitrik asit (HNO_3) ilave edilerek örneklerin pH'larının 2'den küçük bir değerde olması sağlanmıştır. Toprak örnekleri ise, her bir fay zonu üzerine yerleştirilecek radon detektörleri koymak için açılan, yaklaşık 30-50 cm derinlikten çıkan ve dış etkenlerden etkilenmemiş (taşınma ile gelmemiş, çevresel etkilerden uzak) topraklardan seçilmiştir. Alınan bu örnekler, tek kullanımlık kilitli poşetler içerisine konularak numaralandırılmıştır.

Havadaki çevresel gama dozu ölçümleri ise, genellikle toprak alınan yerde toprak seviyesinde yapılmıştır.

Fay zonundaki toprak havasındaki radon ölçümleri ise, pasif algılayıcılardan olan katı hal iz detektörleri (CR-39 tipi) kullanılarak yapılmıştır. Kuzey Anadolu ve Doğu Anadolu Aktif Fay Sistemleri üzerinde, fay kırığına dikey ve yatay olacak yerler belirlenerek, buralara yaklaşık 30-50 cm arasında detektörün koyulabileceği genişlikte küçük kuyular açılmıştır. Bu kazma esnasında toprağın çok fazla havalandırılmamasına özen gösterilmiştir. Radon gazının ölçülmesi sırasında, radonun ürün çekirdeği olan torondan gelebilecek katkıyı yok etmek, pasif detektörün içerisinde bulunduğu difüzyon kaplarını 0,5 cm kalınlığında bir sünger ile sarılmıştır. Açılan bu kuyuların her birine CR-39 pasif algılayıcıları dikkatli bir şekilde yerleştirilerek yaklaşık 3 hafta bekletildikten sonra detektör toplanmış ve küçük alüminyum folyolara sarılarak muhafaza edilmiştir.

5.2. Örneklerin Sayıma Hazır Hale Getirilmesi

Çalışma bölgesinin doğal radyoaktivitesini belirlemek için, bölgeden alınan çevresel örneklerin (su, toprak) ve fay zonları üzerine yerleştirilen pasif algılayıcıların analizlerinin yapılmadan önce çeşitli ön işlemlerden geçirilmesi gerekmektedir. Her bir analiz ve ölçümler için yapılması gereken ön işlemlerin detayları aşağıda açıklanmıştır.

5.2.1. Su Örnekleri

Deneyde kullanılacak olan malzemeler (planşetler, spetula ve beherler) deterjanlar ile yıkanarak iç kısımları özenle temizlenmiştir. Deterjanlı su ile yıkanan malzemeler musluk suyu ile bolca durulanmış ve içerisine su konularak belirli bir süre beklenmiştir. Malzemeler daha sonra $K_2Cr_2O_7$ yıkama suyu ile iyice temizlenmiştir. Yıkama suyu ile temizlenen malzemeler, iki kez saf su ile çalkalanarak etüvde kurutulmuştur.

Steril 1 L'lik polietilen şişelerdeki su numuneleri self emilime neden olmayacak bir şekilde 100 mL'lik üç farklı beher içerisine alınmış ve bir elektrik ocağı ile kaynamasına izin verilmeden, her bir beher içerisnde 5-10 cm³ su kalıncaya kadar buharlaştırılmıştır. Her bir beher içerisnde bulunan bu su miktarı, darası alınmış 11,34 cm² alanlı planşetlere aktarılmıştır. Kayıpları minimuma indirmek için, beher içerisndeki kalıntılar saf su yardımıyla spetula ile kazınarak ilgili planşetlere aktarılmış ve tamamen kurumunun gerçekleşmesi için elektrikli ocak üzerinde buharlaştırma işlemine devam edilmiştir. Planşetler daha sonra 2 saat kadar 105 °C'deki bir etüvde kurutulmuştur. Bu işlemden sonra, örneklerin beta aktivitesi sayımlarına hemen başlanılmış, toplam alfa aktivitesi sayımları için 72 saat beklenilmiştir.

5.2.2. Toprak Örnekleri

Arazi çalışmaları sonucunda alınan toprak numuneleri hemen laboratuvar ortamına taşınmış ve alüminyum folyolar üzerine serilerek 10 gün süreyle oda sıcaklığında kurutulmuşlardır. Bu işlem ile numuneler içerisinde var olan nem miktarı minimuma indirilmiştir. Alüminyum folyolar içerisine sarılan toprak örnekleri daha sonra 105 °C'deki bir etüvde kurutulma işlemine tabi tutulmuştur. Kurutulma işlemi esnasında buharlaştırma ile kaybolacak radyoaktivite miktarı ihmal edilebilecek düzeydedir. Bu süreç sonucunda tamamen kurumasa sağlanan toprak numuneleri 100 mesh'lik gözenekli eleklerden geçirilerek, temiz plastik poşetler içerisinde muhafaza edilmiştir. Daha sonra, her bir toprak numunesi self soğurmaya neden olmayacak miktarda darası alınmış üç farklı planşet içerisine homojen bir dağılım sergileyecek biçimde aktarılmış ve üzerine örnek kaybına neden olmayacak miktarda saf su ilave edilerek elektrik ocağı üzerinde kurutulmuştur. Bütün bu işlemler sonunda örneklerin toplam alfa, toplam beta ve ²³⁸U, ²³²Th, ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr ve ⁴⁰K gibi radyoçekirdek aktivite ölçümleri uygun algılama sistemleri kullanılarak yapılmıştır.

5.2.2.1. Toprak Örneklerinin Ağır Metal Analizleri

Toprak numunelerinin ağır metal analizleri için, araziden toplanan toprak numunelerinin her birinden 1 g alınarak, bir alüminyum folyo içerisine konulduktan sonra 90 °C'lik etüvde kurutuldu. Kurutulan her bir örnek, cam beherler içerisine aktararak 2/1 oranında nitrik asit-hidrojenperoksit karışımı ilave edildikten sonra, bir çeker ocak içerisinde, sıcak bir yüzey üzerinde dikkatlice çalkalanarak toprak numunesinin kuruması sağlandı. Kurutulan her bir toprak numunesine 1,5 molL⁻¹ HNO₃ ilave edilmesiyle çözünmesi sağlandı. Daha sonra çözünen bu karışım 2 mL'ye seyreltildikten sonra, uzun cam tüplere dikkatlice aktarıldı ve bu cam tüpler bir santrifüj içerisinde yaklaşık 3-4 dakika döndürülerek toprak numunesi ile çözünmüş toprağın olduğu temiz çözeltinin ayrışması sağlandı. Cam tüpler içerisindeki toprak kalıntısından ayrılmış temiz çözelti bir başka cam tüp içerisinde bir filtre kâğıdı yardımıyla boşaltıldı. Aktarılan bu temiz çözeltide, UNICAM 929 model bir atomik soğurma spektrometresi kullanılarak ağır metal analizleri yapıldı [40].

5.3. Kullanılan Sayım Sistemleri ve Algılayıcılar

Bu çalışmada, örneklerin toplam alfa radyoaktivite ölçümleri 7286 Düşük Seviyeli Alfa Sayıcısı, toplam beta radyoaktivite ölçümleri ise Penceresiz Sintilyasyon Sayıcısı ve BP4 Beta Problu Sintilyasyon Sayacı kullanılarak yapılmıştır. Örneklerin ⁹⁰Sr radyoizotop aktivite analizi

Penceresiz Sintilasyon Sayıcısı ile, ^{238}U , ^{232}Th , ^{137}Cs ve ^{40}K radyoizotop aktivite yoğunluğu ise gama hassas sintilasyon sayacı ile gerçekleştirilmiştir.

Toprakta radon analizleri ise, pasif bir algılayıcı olan CR-39 nükleer iz detektörleri ile yapılmıştır. Ayrıca, havadan doğrudan gama dozu ölçümleri portatif bir NaI(Tl) sintilasyon kristali içeren Eberline SPA2 model bir ölçüm cihazıyla yapılmıştır. Kullanılan sayım sistemleri ve algılayıcılar hakkından detaylı bilgiler aşağıda verilmiştir.

5.3.1. 7286 Düşük Seviyeli Alfa Sayıcısı

Bu sayım sistemi, 44 mm çapında ZnS katmanlı bir organik parıldayıcıdır, EMI 6097B marka bir foto çoğaltıcı tüp ve bir sayıcıdan meydana gelmiştir. Sayıcı birimine dört adet birbirinden bağımsız foto çoğaltıcı tüp bağlanabilmektedir. Her bir foto çoğaltıcı tüp kendisine ait ayarlanabilir yüksek voltaj kaynağına ve ayırıcı devresine sahiptir. Bu sistem çok düşük temel seviye radyasyonu ölçümlerinde ve düşük sayımlı numune hızlı sayımı uygulamalarında kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Sistem kalibrasyonu kullanma kılavuzu esas alınarak yapılmış ve örneklerin toplam alfa radyoaktivite ölçümleri bu cihazla gerçekleştirilmiştir [41].

5.3.2. Penceresiz Parıldayıcı Sayaç

Bu sayım sistemi, bir parıldayıcı ve foto çoğaltıcı tüpten ibarettir. Penceresiz sintilasyon sayacı katı örneklerden zayıf enerjili beta radyasyonu ya da alfa radyasyonu ölçümleri için geliştirilmiştir. Bu parıldayıcı içeren sayıcının penceresiz olması ve parıldayıcı ile örnek arasındaki mesafenin 1,6 mm'den daha küçük olması sayım veriminin yüksek olmasını sağlamaktadır. Penceresiz ve bir parıldayıcı kristale dayanan sayacı SR7, SR8 ve ST7 gibi uygun sayıcı donanımları ile kullanılabilir. 2059 plastik parıldayıcıya sahip olan bu sistemin kalibrasyonu kullanma kılavuzu esas alınarak yapılmış ve örneklerin toplam beta radyoaktivite ölçümleri bu cihazla gerçekleştirilmiştir [42].

5.3.3. BP4 Beta Problu Parıldayıcı Sayaç

Bu sistem, yüksek hassasiyetli BP4 tipi bir sintilatör ve foto çoğaltıcı bir tüpten ibarettir. Sintilatör ve foto çoğaltıcı tüp, minimum 3,2 cm kalınlıklı ve %4 oranında antimon içeren kurşun bir blok içerisine yerleştirilmiştir. Bu donanım zayıf enerjili beta radyasyonu ölçümleri için geliştirilmiştir. Bu sintilasyon sayacı SR7, SR8 ve ST7 gibi uygun sayım donanımları ile birlikte kullanılabilir. Sayım verimi ^{90}Sr radyoaktif kaynağı için yaklaşık %30'dur.

Sistemin kalibrasyonu, kullanma kılavuzu esas alınarak yapılmış ve örneklerin toplam beta radyoaktivite ölçümleri bu cihazla gerçekleştirilmiştir [43].

5.3.4. Gama Hassas Parıldayıcılı Sayaç

Bu sistem, gama radyasyonuna hassas 50,8 mm x 50,8 mm boyutlarındaki kuyu tipi bir sintilatör [NaI(Tl)] ve bir foto çoğaltıcı tüpten oluşur. Kuyu tipi sintilatör foto çoğaltıcı tüpe optik kontak yapılarak monte edilmiştir. Sintilatör ve foto çoğaltıcı tüp kurşun bir blok içerisine yerleştirilmiştir. 10 keV ile 10 MeV gama enerji aralığında algılama yapabilen bu sistem SR7, SR8 ve ST7 gibi uygun sayım donanımları ile kullanılabilir. Sistemin kalibrasyonu, kullanma kılavuzu esas alınarak yapılmış ve örneklerin radyo-izotop analizleri bu cihazla gerçekleştirilmiştir [44].

5.3.5. CR-39 Katı Hal İz Radon Algılayıcıları

Radon ölçümlerinde kullanılan ve genel ismi Alil Diglikol Karbonat olan bu algılayıcılar; camın optik özellikleri ile mekanik ve fiziksel özellikleri birleştirilerek yapılmış ve ısı altında sertleştirilmiş bir tür plastiktir. CR-39 radon algılayıcıları aşağıda verilen karakteristik özelliklere sahiptirler;

- Camla kıyaslanabilecek optik özelliklere sahip olup yüzeyi cam gibi parlak ve pürüzsüzdür.
- Sahip olduğu üstün optik özellikleri sayesinde her türlü şartlarda kullanılabilirler. Çözücüler ile temas edildiğinde veya uzun süre çözücü içerisinde bekletildiğinde iç ve dış yüzeylerinde çatlama ve kırılmalar olmaz.
- Aşırı direnci akrilik plastiklerden 30-40 kat daha fazladır. Kimyasal maddelere, aseton ve benzin içeren çözücülere karşı dayanıklıdır.
- 100 milyon röntgen şiddetindeki gama ışınlarına maruz bırakıldığında saydamlığından %5 oranında kayıp verir. Bu kayıp akrilik maddelerde %45 civarındadır.
- CR-39'un özgül ağırlığı birçok plastikten daha azdır.

5.4. Örneklerin Aktivite Konsantrasyonları

5.4.1. Sayma Hataları

- %95 güvenirlilik sayesinde standart sapma aşağıdaki denklem ile verilir:

$$E_s = \pm 1.96 (N_s/t_s + N_b/t_b)^{1/2} \quad (5.1)$$

Burada; N örneğin veya temel seviye cpm cinsinden sayma hızı, t örnek veya temel seviyenin dakika cinsinden sayma zamanı, E_s ise net sayma hızının (cpm) %95 güvenilirlik seviyesindeki hatasıdır.

Sayma hızlarının toplama ve çıkarılması hallerinde toplam veya farkın hatası şu şekilde ifade edilir;

$$E = \pm (E_a^2 + E_b^2)^{1/2} \quad (5.2)$$

Bu denklemde, E_a ve E_b toplanan veya çıkarılan değerlerin hatasıdır.

5.4.2 Verim Düzeltmeleri

- Sayma hızını bozunumlara dönüştürmek için aşağıdaki denklemden faydalanılır;

$$dpm = cpm/verim = cpm / GBT = cpm \times (VDF) \quad (5.3)$$

Burada, G, B ve T geometri, geri saçılma ve self-emilim için düzeltme faktörleridir. $1/GBT$ ise Verim Düzeltme Faktörü veya kısaca VDF'dir.

- Kalınlık, örneğin kütlesi ile etkin alana göre değişme gösterir ve denklem (5.4) ile ifade edilir.

$$\text{Kalınlık}(mg/cm^2) = (\text{örneğin mg cinsinden kütlesi}) / (\text{etkin alan}) \quad (5.4)$$

- Alüminyum planşet üzerinde sayılan aktivite için verim düzeltme faktörü (5.5) denklemini ile verilir.

$$VDF = 1 / V_x(T) \quad (5.5)$$

Bu denklemdeki T'nin değeri, mg/cm^2 cinsinden kalınlığın fonksiyonu olarak daha önceden belirli standartlara göre çizilmiş eğrilerden bulunur (U_3O_8 ve KCl için iç-emilim değerleri) [45,46] ve V ise verimdir.

5.4.3 Örneklerin Aktivite Konsantrasyonlarının Hesaplanması

Örneklerin toplam alfa, beta ve radyoçekirdek konsantrasyonları sırasıyla denklem (5.6) ve (5.7) kullanılarak hesaplanır.

$$A_{\alpha,\beta} = [(NS \pm SS) \times VDF]/2,22 \quad (5.6)$$

$$A_U (Bq/kg^{-1}) = \frac{C}{\epsilon \times P_\gamma \times M_s} \quad (5.7)$$

Bu denklemde, A pCi cinsinden aktivite, NS ve SS sırasıyla örneğin dakikada net sayım sayısı ve standart sapması, VDF verim düzeltme faktördür. Denklem (5.7)'de ise, A_U uranyum, toryum veya potasyum izotoplarının aktivitesi, C gama ışınlarının saniyedeki net sayımı, ε her bir γ-ışını için detektörün verimi, P_γ her bir çekirdek için γ bozunumunun bozunma ihtimaliyeti ve M_s örneğin (kg) cinsinden miktarıdır [45-48].

Topraktaki uranyum, toryum ve potasyum dağılımı düzenli değildir. Bu homojenlik radyasyon pozlama ile ilgili olarak, radyum eşlenek aktivitesi olarak tanımlanır ve denklem (5.8) ile hesaplanır,

$$Ra_{eş} = A_U + 1,43 A_{Th} + 0,077 A_K \quad (5.8)$$

Burada A_U, A_{Th} ve A_K sırasıyla uranyum, toryum ve potasyum konsantrasyonlarıdır. Karasal dış gama radyasyonunu karakterize edebilmek için, yerden yaklaşık bir metre yukarıdaki tutulan doz oranı (nGy/ saat),

$$D = 0,430 A_U + 0,666 A_{Th} + 0,042 A_K \quad (5.9)$$

denklemini ile hesaplanır. Burada, 0,430, 0,666 ve 0,042 sırasıyla uranyum, toryum ve potasyumun doz dönüşüm faktörleridir (nGy/saat/Bq/kg).

Yıllık etkin doz miktarını tahmin edebilmek için etkin doz için havada tutulan dozun dönüşüm katsayısı 0,7 Sv/Gy ve dış ortamda kalma faktörünün katsayısı 0,2 olarak alınır ve etkin doz oranı denklem (5.10) ile hesaplanır,

$$D_{etkin} (mSv/y) = D(nGy/saat) \times 8760 (yıl/saat) \times 0,2 \times 0,7 (Sv/Gy) \times 10^{-6} \quad (5.10)$$

Sonuç olarak, doğal radyasyon dış tehlikesini değerlendirmek için, dış tehlike indeksi T_{ind},

$$T_{ind} = A_U/370 + A_{Th}/259 + A_K/4810 \leq 1 \quad (5.11)$$

denklemini ile hesaplanır [49].

5.5. Toprakta Radon Ölçümleri

Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi (ÇNAEM) Sağlık Fiziği Bölümü Radon Laboratuvarında hazırlanan CR-39 pasif radon algılayıcıları, çalışma yapılan bölgede (Karlova ve çevresi) fay zonu üzerinde seçilen yerlere, toprak altına yaklaşık 30-50 cm kuyular kazılarak yerleştirilmiş ve yaklaşık 3 hafta bekletildikten sonra toplanmıştır. Toplanan CR-39 algılayıcılarının ilk analizleri ÇNAEM Sağlık Fiziği Bölümü Radon Laboratuvarında yapılmış, ikinci çalışmada ise analizler Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliğindeki teknik imkanlar kullanılarak yapılmıştır.

5.5.1. CR-39 Radon Algılayıcıların Kalibrasyonu

Bu algılayıcıların kalibrasyon işlemleri 225 litrelik bir radon kalibrasyon odası kullanılarak yapılmıştır. Bu kalibrasyon odasının denge konsantrasyonu $3,2 \text{ kBq/m}^3$ 'tür. Kalibrasyon için hazırlanmış olan algılayıcılar 1-5 günlük süreler ile radon kalibrasyon odasında ışınlanmış ve kimyasal iz kazıma işlemine tabi tutulmuştur. Daha sonra, algılayıcıların üzerinde oluşan izler optik mikroskop kullanılarak sayılmış ve kalibrasyon faktörü yaklaşık olarak $6 \text{ (kBq/m}^3) / \text{net iz sayısı/ saat}$ olarak hesaplanmıştır.

5.5.2. CR-39 Radon Algılayıcıların Analizleri

Doğu Anadolu ve Kuzey Anadolu Fay Zonları üzerinde toprağın altına yerleştirilen bu katıhal iz algılayıcıları yaklaşık 3 hafta sonra toplanmıştır. Toplanan algılayıcılar radon ve onun ürünlerinden, analizleri yapılmaya kadar etkilenmemesi için algılayıcıların içinde bulunduğu difüzyon kapları önce PVC türü poşetlere konulduktan sonra alüminyum folyo ile sarılmıştır. Bu algılayıcılar, analiz yapılmak üzere vakit kaybedilmeden ÇNAEM Sağlık Fiziği Bölümü Radon Laboratuvarına götürülerek iz kazıma işlemine tabi tutulmuşlardır. Algılayıcılar, $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de 15 saat süreyle %30'luk NaOH çözeltisi içerisinde bekletildikten sonra saf su ile dikkatlice yıkanarak kurutulmuştur. Daha sonra, her bir algılayıcı üzerinde farklı en az 10 bölge seçilerek radon gazından dolayı bu bölgeler üzerinde alfa parçacıklarının bırakmış olduğu izler optik mikroskop kullanılarak sayılmıştır. Sayılan her bir bölgenin yüzey alanı yaklaşık olarak $0,025 \text{ cm}^2$ ve Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliğindeki kullanılan mikroskobun yüzey alanı ise $5,67 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$ 'dir.

5.5.3. Radon Gazı Aktivite Yoğunluğunun Hesaplanması

Toprak havasındaki radon gazı aktivitesinin hesaplanması,

$$RY= [(KF) \times (NIS)] / [(DRMS)] \quad (5.12)$$

denklemleri kullanılarak yapılmıştır. Burada, RK (kBq/m³) birimi cinsinden radon derişimi, KF kalibrasyon faktörü, NIS net iz sayısı ve DRMS algılayıcının radona maruz kaldığı süredir [45].



6. BULGULAR VE TARTIŞMA

6.1. Doğu Anadolu Fay Sisteminin Karlıova Kesimindeki Toprak ve Sulardaki Radyoaktivite Seviyeleri

6.1.1. Su ve Toprak Örneklerindeki Toplam Alfa ve Beta Radyoaktivitesi

6.1.1.1. Su Örneklerindeki Toplam Alfa ve Beta Radyoaktivitesi

Doğu Anadolu ve Kuzey Anadolu Fay Zonlarının Karlıova ve çevresinden toplanan farklı türlerdeki 32 tane su örneklerindeki toplam alfa ve beta radyoaktivite seviyeleri Tablo 6.1 ve Şekil 6.1'de gösterilmiştir. Hem toprak hem de su örneklerinde ^{137}Cs ve ^{90}Sr aktivitesine rastlanmamıştır. Çalışılan bölgedeki su kaynakları genel olarak, yeryüzü suları ve kaynak (çeşme) sularından oluşmaktadır.

Tablo 6.1 ve Şekil 6.1 incelendiğinde, en yüksek alfa radyoaktivite seviyesinin $1,6886 \pm 0,0597$ Bq/L değeri ile Doğu Anadolu Fay Zonu üzerinde, Bingöl ilinin Hamamlar mevkiindeki termal su örneğinde olduğu tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra en yüksek toplam beta radyoaktivite seviyesi $0,1691 \pm 0,0042$ Bq/L değeri ile en düşük alfa radyoaktivite seviyesine sahip Sakaören'den alınan çeşme suyu örneğinde, en düşük toplam beta radyoaktivite seviyesi ise küçük bir dere olan Baran deresi ve Sakaören'de bir çeşmeden alınan su örneklerinde ölçülmüştür.

Bütün su örneklerinde toplam alfa radyoaktivite seviyeleri temel seviye ile $1,6886 \pm 0,0597$ Bq/L değerleri arasında, toplam beta radyoaktivite seviyeleri ise, temel seviye ile $0,1691 \pm 0,0042$ Bq/L değerleri arasında bir dağılım göstermektedir. Şekil 6.1 dikkatlice incelendiğinde, toplam alfa radyoaktivite seviyesinin dağılım aralığının, toplam beta radyoaktivite seviyesinin dağılımına göre, daha geniş ve daha büyük değerlere sahip olduğu görülmektedir. Bunu nedeni, incelen bölgenin daha birçoğu tanımlanmamış çok fazla ana ve yan faylardan oluşmuş olması ve buradaki birçok su kaynaklarını bölgeyi çepeçevre saran aktif fay zonlarının yardımıyla yer yüzene taşınan yeraltı orijinli kaynaklar olmasıdır. Yeraltı sularında radyoaktivitenin yüksek çıkmasının temel nedeni, bu suların radyoçekirdek ayrımını kolaylaştırmasıdır [2]. Özellikle 33. su örneğindeki toplam alfa radyoaktivite seviyesi, diğer su örneklerine göre 5-20 kat arasında değişen bir oranda daha yüksek çıkmıştır. Bunun nedeni ise, örnek cinsinin termal su olmasından kaynaklanmaktadır. Termal sularda radyoaktivite seviyesi yüksek miktarlarda bulunabilmektedir [50].

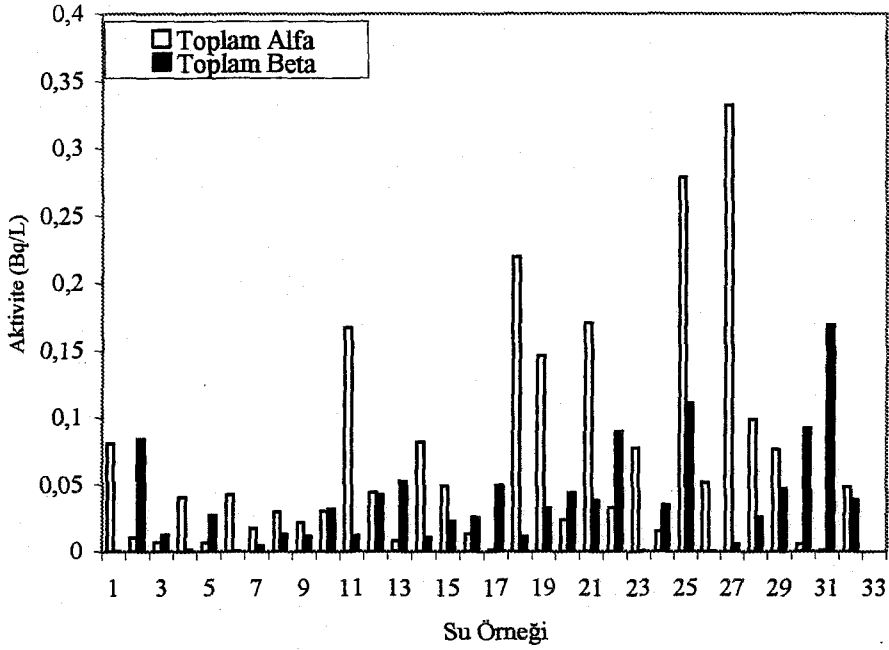
Tam fay zonları üzerinden alınan yerüstü suları ve kaynak sularındaki (11., 18., 21. 25 ve 27. örnekler) toplam alfa radyoaktivite değerleri, diğer su örneklerine göre daha yüksek seviyededir. Dünya Sağlık Teşkilatı (WHO) ve Türk Standartları Enstitüsü tarafından sularda

toplam alfa radyoaktivite seviyesi için müsaade edilen üst sınır değeri 0,5 Bq/L'den küçük sdeğerde olduğu görülmektedir [51]. Aynı bölgeden alınan 25. ve 31. su örneklerindeki toplam beta radyoaktivite seviyesi 1 ile 10 kat arasında değişen bir oranda daha yüksektir.

Tablo 6.1: Su örneklerinin toplam alfa ve beta radyoaktivite seviyeleri.

Numune No	Toplam Alfa Aktivitesi (Bq/L)	Toplam Beta Aktivitesi (Bq/L)	Kaynak Cinsi
1	0,0807 ± 0,0057	ALA	Küçük Dere (Baran Deresi)
2	0,0105 ± 0,0036	0,0843 ± 0,0025	Küçük Dere (Kesişim Bölgesi)
3	0,0073 ± 0,0020	0,0127 ± 0,0012	Küçük Dere (Hacılar)
4	0,0415 ± 0,0017	0,0011 ± 0,0014	Çeşme (Tokular)
5	0,0067 ± 0,0023	0,0270 ± 0,0009	Çeşme (Gazik)
6	0,0426 ± 0,0035	0,0002 ± 0,0001	Çeşme (Karlıova)
7	0,0176 ± 0,0048	0,0043 ± 0,0004	Çeşme (Göynük)
8	0,0294 ± 0,0062	0,0130 ± 0,0009	Çeşme (Hacılar)
9	0,0220 ± 0,0063	0,0118 ± 0,0004	Çeşme (Bingöl)
10	0,0302 ± 0,0035	0,0321 ± 0,0009	Kaynak (KAF)
11	0,1670 ± 0,0096	0,0121 ± 0,0004	Küçük Dere (Karlıova)
12	0,0443 ± 0,0023	0,0426 ± 0,0010	Çeşme (Kargapazarı)
13	0,0081 ± 0,0019	0,0524 ± 0,0013	Küçük Dere (Kargapazarı)
14	0,0818 ± 0,0029	0,0107 ± 0,0013	Çeşme (Yado çeşmesi)
15	0,0490 ± 0,0039	0,0230 ± 0,0007	Çeşme (Soğuk Çeşme)
16	0,0135 ± 0,0026	0,0258 ± 0,0013	Büyük Dere (Göynük)
17	0,0015 ± 0,0038	0,0496 ± 0,2203	Çeşme (Hamamlar)
18	0,2196 ± 0,0347	0,0115 ± 0,0005	Küçük Dere (Yoncalık)
19	0,1461 ± 0,0120	0,0326 ± 0,0017	Çeşme (Yoncalık)
20	0,0239 ± 0,0067	0,0438 ± 0,0016	Küçük Dere (DAF)
21	0,1705 ± 0,0094	0,0382 ± 0,0012	Çeşme (Yoncalık)
22	0,0331 ± 0,0059	0,0896 ± 0,0015	Çeşme (Sakaören)
23	0,0774 ± 0,0073	0,0003 ± 0,0035	Çeşme (Yoncalık)
24	0,0154 ± 0,0043	0,0347 ± 0,0028	Çeşme (Sakaören)
25	0,2784 ± 0,0053	0,1104 ± 0,0043	Çeşme (Sakaören)
26	0,0518 ± 0,0060	ALA	Çeşme (Sakaören)
27	0,3323 ± 0,0239	0,0058 ± 0,0006	Küçük Dere (Yoncalık)
28	0,0987 ± 0,0149	0,0256 ± 0,0015	Çeşme (Hamamlar)
29	0,0763 ± 0,0091	0,0471 ± 0,0011	Çeşme (Hamamlar)
30	0,0056 ± 0,0029	0,0920 ± 0,0044	Çeşme (Yoncalık)
31	ALA	0,1691 ± 0,0042	Çeşme (Sakaören)
32	0,0483 ± 0,0050	0,0390 ± 0,0044	Küçük Dere (I. Profil)
33	1,6886 ± 0,0597	0,0137 ± 0,0045	Hamamlar (Termal)

ALA: Algulama Limitinin Altında.



Şekil 6.1: Su örneklerinin toplam alfa ve beta radyoaktivite seviyeleri.

Su örneklerinin hemen hemen tamamında toplam beta radyoaktivite seviyesi, Dünya Sağlık Teşkilatı (WHO) ve Türk Standartları Enstitüsü tarafından içme suyu için müsaade edilen üst sınır değeri olan 1 Bq/L'den daha düşüktür [51, 52]. Özellikle 25. su numunesinin hem toplam alfa hem de toplam beta radyoaktivite seviyesi, diğer örneklere göre yüksektir. Literatürde yapılan diğer çalışmalarda yeraltı sularında radon ve radyum konsantrasyonlarının, dolayısıyla da bu izotoplardan ve ürün çekirdeklerinden kaynaklanan toplam alfa ve beta radyoaktivite seviyelerinin yüksek çıktığı gözlenmiştir [50].

6.1.1.2. Toprak Örneklerindeki Toplam Alfa ve Beta Radyoaktivitesi

Doğu Anadolu ve Kuzey Anadolu Fay Sistemleri ve üzerinde alınan toplam 72 adet toprak numunesinin toplam alfa ve toplam beta radyoaktivite seviyeleri sırasıyla, Tablo 6.2, Şekil 6.2 ve Tablo 6.3 ve Şekil 6.3'de verilmiştir.

Doğu Anadolu Fay Zonu'nundan alınan toprak örneklerindeki toplam alfa radyoaktivite dağılımı $17,3 \pm 4,7$ ile $888,3 \pm 23,8$ Bq/kg arasında, toplam beta radyoaktivitesi temel seviye ile $121,6 \pm 4,2$ Bq/kg arasında değişmektedir. Bu bölgeden alınan toprak örnekleri arasında, en yüksek toplam alfa aktivitesi $888,3 \pm 23,8$ Bq/kg değeriyle 28 numaralı örnekte, en yüksek toplam beta radyoaktivite seviyesi $121,6 \pm 4,2$ Bq/kg değeri ile 43 numaralı örnekte bulunduğu görülmektedir. Bunların yanı sıra, en düşük toplam alfa radyoaktivite seviyesi $17,3 \pm 4,7$ Bq/kg

değeri ile 38 numaralı örnekte ve en düşük toplam beta aktivitesi temel seviye değeri ile 9., 17., 19., 26., 27., 41. örnekte bulunmuştur.

Kuzey Anadolu Fay Zonu'ndan alınan toprak örneklerindeki toplam alfa radyoaktivite dağılımı $52,3 \pm 18,8$ Bq/kg ile $752,2 \pm 19,0$ Bq/kg arasında, toplam beta radyoaktivitesi $1,3 \pm 0,6$ Bq/kg ile $65,4 \pm 16,5$ Bq/kg arasında değişmektedir. Kuzey Anadolu Fay Zonu'ndaki en yüksek toplam alfa radyoaktivitesi $752,2 \pm 19,0$ Bq/kg değeri ile 52 numaralı örnekte ve en düşük alfa radyoaktivite değeri ise 53 numaralı örnekte olduğu görülmektedir. En yüksek beta radyoaktivitesi $65,4 \pm 16,5$ Bq/kg 67 numaralı örnekte ve en düşük beta aktivitesi ise temel seviye değeri ile 44. ve 51. örnekte olduğu görülmektedir.

Tablo 6.2 ile Tablo 6.3 ve Şekil 6.2 ile Şekil 6.3 birlikte incelendiğinde, Doğu Anadolu Fay Zonu'ndan toplanan toprak numunelerindeki hem toplam alfa aktivitesi hem de toplam beta radyoaktivitesi, Kuzey Anadolu Fay Zonu'ndaki toprak örneklerinin toplam alfa beta radyoaktivitesinden yüksek bulunmuştur. Öyle ki, her iki fay zonundaki toprak numunelerinde bulunan en yüksek toplam beta radyoaktiviteleri arasında yaklaşık iki kat fark vardır. Her iki fay zonundan alınan toprak örneklerindeki toplam alfa ve beta radyoaktivite değerleri, değişik bölgelerdeki toprak örneklerinde yapılan çalışmalarda bulunan değerlerden 2 ile 5 kat arasında değişen oranlarda daha yüksek çıkmaktadır [53]. Bunun nedeni, çalışılan bölge ana ve yan fay parçalarından oluşan tektonik bir bölge olmasıdır. Toprakların içermiş oldukları radyoaktivite yoğunluğu; hava koşulları, sedimantasyon, filtreleme, emilme, yeraltı sularının hareketi sonucu oluşan çökelmeler ve yüksek derecedeki toprak gözenekliliği vb. pek çok etkiye bağlı olarak değişim gösterebilmektedir.

İncelenen bölgede genellikle bazalt ve bazaltik proklastik kayalardan, tuf ve ince silt topraklardan oluşması, pratikte alfa radyoaktivitesinin düşük olmasını gerektirir, fakat bölgede aktiviteye en büyük etkiyi fay zonları, yerkabuğundaki granit magma içerisindeki uranyum ve toryum radyoçekirdekleri değişik jeolojik işlemlerin yardımıyla (başkalaşım ve sıcak hidrotermal sular gibi), geçirgen yapılarda veya yerkabuğundaki çatlaklarda rahatlıkla birikmesinden dolayı yapmaktadır. Fay zonlarındaki ana kayalardaki çatlaklar yardımıyla da uranyum ve toryumun yeryüzüne, yeraltı suları yardımıyla taşınması daha da kolaylaşır.

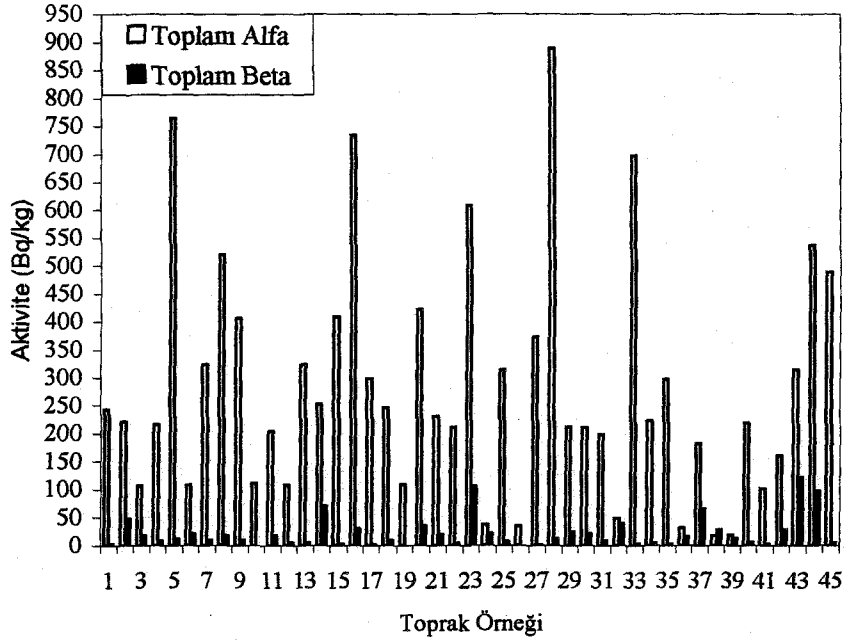
Fay zonlarından oluşmuş alanlardaki radyoaktivite yoğunluğunun yüksek olması, o bölgelerde çevresel doğal radyasyon temel seviyesini değiştirir ve o oranda da insanlar yüksek doğal radyasyon seviyesine maruz kalırlar.

Doğu Anadolu Fay Zonu'ndaki toprak örneklerindeki ortalama hem toplam alfa hem de toplam beta radyoaktivitesi Kuzey Anadolu Fay Zonu'nundaki toprak örneklerine göre daha yüksektir.

Tablo 6.2: Doğu Anadolu Fay Zonu'ndaki toprak örneklerindeki toplam alfa ve beta radyoaktivite seviyeleri.

Numune No	Toplam Alfa Aktivitesi (Bq/kg)	Toplam Beta Aktivitesi (Bq/kg)
1	242,6 ± 23,5	1,3 ± 0,6
2	220,6 ± 17,4	46,6 ± 0,8
3	106,1 ± 18,8	17,3 ± 0,7
4	215,3 ± 19,7	8,0 ± 0,7
5	763,4 ± 23,3	11,1 ± 0,5
6	107,0 ± 18,9	20,5 ± 0,5
7	322,9 ± 14,7	8,9 ± 1,0
8	518,6 ± 24,5	16,4 ± 0,9
9	405,5 ± 20,5	9,0 ± 0,8
10	110,3 ± 16,7	ALA
11	203,2 ± 18,6	16,4 ± 0,7
12	107,3 ± 14,7	4,3 ± 0,6
13	323,4 ± 20,3	4,1 ± 0,7
14	251,8 ± 18,2	70,0 ± 1,0
15	408,6 ± 16,2	2,0 ± 0,6
16	732,3 ± 21,9	29,7 ± 1,1
17	297,9 ± 16,3	ALA
18	244,7 ± 17,7	9,2 ± 0,6
19	107,5 ± 19,0	ALA
20	421,2 ± 16,7	34,0 ± 0,9
21	230,3 ± 23,5	18,9 ± 0,5
22	210,8 ± 18,0	3,5 ± 0,8
23	608,7 ± 18,5	104,0 ± 0,7
24	36,6 ± 13,9	20,7 ± 0,8
25	314,3 ± 18,5	5,9 ± 0,7
26	34,2 ± 13,0	ALA
27	372,2 ± 16,5	ALA
28	888,3 ± 23,8	10,9 ± 0,8
29	211,1 ± 22,6	23,5 ± 3,1
30	209,7 ± 19,1	20,4 ± 1,1
31	197,1 ± 14,2	7,4 ± 0,7
32	48,3 ± 5,0	39,0 ± 4,4
33	697,5 ± 23,7	2,7 ± 0,6
34	221,8 ± 16,0	3,1 ± 0,7
35	296,9 ± 15,0	2,2 ± 0,7
36	30,7 ± 5,6	14,4 ± 1,5
37	181,6 ± 13,8	64,5 ± 15,6
38	17,3 ± 4,7	27,9 ± 2,5
39	18,1 ± 20,4	12,1 ± 1,5
40	218,2 ± 16,5	5,1 ± 0,8
41	100,5 ± 10,3	ALA
42	159,1 ± 18,4	28,0 ± 2,8
43	314,3 ± 18,5	121,6 ± 4,2
44	536,4 ± 21,3	96,2 ± 34,2
45	488,1 ± 19,5	3,6 ± 0,7

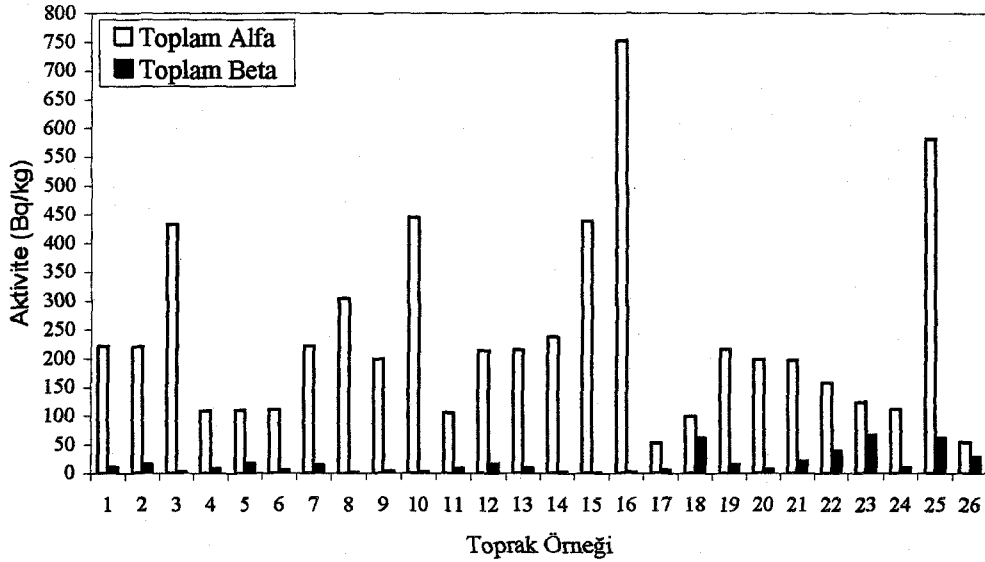
ALA: Algılama Limitinin Altında



Şekil 6.2: Doğu Anadolu Fay Zonu'ndaki toprak örneklerindeki toplam alfa ve beta radyoaktivite seviyeleri.

Tablo 6.3: Kuzey Anadolu Fay Zonu'ndaki toprak örneklerindeki toplam alfa ve beta radyoaktivite seviyeleri.

Numune No	Toplam Alfa Aktivitesi (Bq/kg)	Toplam Beta Aktivitesi (Bq/kg)
1 (37)	220,9 ± 17,5	10,6 ± 0,9
2 (38)	220,5 ± 20,1	15,4 ± 0,8
3 (39)	433,1 ± 18,5	1,6 ± 0,9
4 (40)	108,5 ± 22,7	7,3 ± 0,7
5 (41)	109,8 ± 16,6	17,6 ± 0,8
6 (42)	110,3 ± 16,7	5,2 ± 0,8
7 (43)	221,0 ± 21,4	14,3 ± 0,6
8 (44)	303,9 ± 17,9	ALA
9 (45)	199,0 ± 14,4	3,3 ± 0,7
10 (46)	444,6 ± 17,6	2,2 ± 0,4
11 (47)	104,5 ± 15,8	8,9 ± 0,7
12 (48)	213,5 ± 15,4	16,8 ± 0,8
13 (49)	214,8 ± 17,0	9,4 ± 0,7
14 (50)	236,5 ± 18,0	1,8 ± 0,6
15 (51)	438,4 ± 18,7	ALA
16 (52)	752,2 ± 19,0	2,3 ± 0,8
17 (53)	52,3 ± 18,8	5,3 ± 1,2
18 (54)	99,0 ± 30,6	61,3 ± 7,8
19 (55)	216,0 ± 20,9	15,2 ± 0,7
20 (56)	197,9 ± 15,6	6,9 ± 0,4
21 (65)	197,1 ± 14,9	20,7 ± 0,5
22 (66)	156,9 ± 11,0	38,7 ± 10,0
23 (67)	123,6 ± 17,0	65,4 ± 16,5
24 (68)	111,2 ± 8,8	9,6 ± 0,5
25 (69)	581,6 ± 18,4	61,6 ± 1,4
26 (70)	54,1 ± 17,4	28,5 ± 3,6
27 (71)	111,1 ± 22,1	3,5 ± 1,6



Şekil 6.3: Kuzey Anadolu Fay Zonu'ndaki toprak örneklerindeki toplam alfa ve beta radyoaktivite seviyeleri.

6.1.2. Doğu Anadolu Fay Zonu'ndaki Toprak Örneklerinde ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K Aktiviteleri

Çalışma bölgesinden toplanan toplam 45 toprak örneklerinde uranyum, toryum ve potasyum derişimleri gama spektroskopik yöntem kullanılarak belirlenmiştir (Tablo 6.4). Örnek numarasına göre uranyum ve toryum konsantrasyonlarının dağılımı Şekil 6.4, örnek numarasına göre potasyum derişiminin dağılımı ise, sırasıyla Şekil 6.5'de gösterilmiştir.

Tablo 6.4 incelendiğinde en yüksek ^{238}U derişimi $251,1 \pm 47,5$ Bq/kg değeri ile 14 nolu toprak örneğinde, en düşük derişimi ise $12,4 \pm 2,2$ Bq/kg değeri ile 38 numaralı örnekte, en yüksek ^{232}Th konsantrasyonu $195,5 \pm 28,5$ Bq/kg değeriyle 39 numaralı örnekte en düşük konsantrasyonu ise $14,1 \pm 1,4$ Bq/kg ile 45 numaralı örnekte ve en yüksek ^{40}K yoğunluğu $963,1 \pm 62,6$ Bq/kg değeriyle 27 numaralı toprak örneğinde, en düşük yoğunluk ise $183,3 \pm 16,4$ Bq/kg değeri ile 41 numaralı toprak örneğinde olduğu görülmektedir. Bazalt türü kayalardaki ^{40}K aktivitesi ortalama olarak 230 Bq/kg civarındadır. Yapılan bu çalışmada ise, çalışılan bölgedeki ana kaya bazalt ve bazaltik pyroclastik kayalardan oluştuğundan potasyum seviyesi yüksek bulunmuştur. Literatürde yapılan diğer çalışmalarda, topraktaki uranyum, toryum ve potasyum konsantrasyonlarının dünya ortalaması sırasıyla 25 Bq/kg, 25 Bq/kg ve 370 Bq/kg olarak verilmektedir [53, 54].

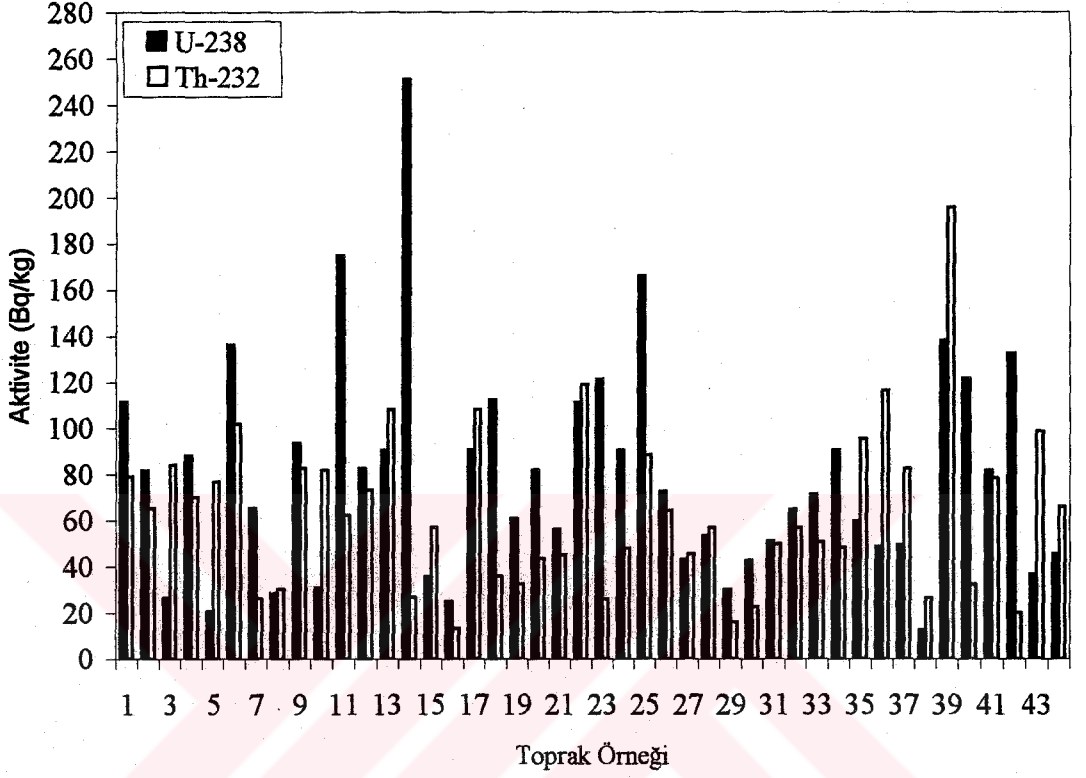
Tablo 6.4: DAFZ'nundaki toprak örneklerinde birincil radyoçekerdek aktiviteleri .

Örnek No	²³⁸ U (Bq/kg)	²³² Th (Bq/kg)	⁴⁰ K(Bq/kg)
1	111,3 ± 23,1	78,8 ± 69,8	417,0 ± 57,7
2	81,7 ± 1,7	65,3 ± 4,3	920,0 ± 48,7
3	26,3 ± 15,1	83,9 ± 32,8	298,2 ± 14,9
4	88,0 ± 20,3	70,1 ± 15,4	498,8 ± 20,1
5	20,6 ± 11,8	76,6 ± 23,4	700,3 ± 29,9
6	136,5 ± 18,4	101,6 ± 42,2	920,9 ± 44,1
7	65,4 ± 6,2	26,1 ± 16,9	370,6 ± 13,2
8	28,4 ± 12,4	30,2 ± 13,5	643,4 ± 22,5
9	93,3 ± 27,9	82,6 ± 14,5	704,7 ± 29,8
10	30,7 ± 13,4	81,6 ± 14,6	696,5 ± 29,6
11	174,6 ± 52,2	61,9 ± 16,8	659,8 ± 39,8
12	82,5 ± 17,1	73,1 ± 19,1	623,7 ± 16,0
13	90,4 ± 23,9	107,1 ± 21,7	256,2 ± 18,5
14	251,1 ± 47,5	26,7 ± 4,5	569,3 ± 29,5
15	35,5 ± 3,1	56,6 ± 5,2	390,9 ± 163
16	24,9 ± 2,6	13,2 ± 2,8	846,8 ± 52,4
17	90,4 ± 23,9	108,1 ± 20,7	256,2 ± 18,5
18	112,1 ± 18,2	35,7 ± 5,5	756,0 ± 35,0
19	60,6 ± 9,8	32,2 ± 4,7	687,7 ± 10,1
20	81,7 ± 39,4	43,4 ± 5,6	617,2 ± 13,5
21	55,8 ± 28,2	44,8 ± 3,9	948,5 ± 31,4
22	111,0 ± 10,5	119,0 ± 15,5	950,4 ± 42,4
23	121,0 ± 19,6	25,7 ± 4,4	548,6 ± 14,3
24	90,2 ± 27,0	47,9 ± 5,3	511,1 ± 24,3
25	165,7 ± 83,6	88,0 ± 17,8	938,9 ± 50,4
26	72,5 ± 28,3	64,2 ± 22,9	822,2 ± 21,0
27	42,7 ± 4,4	45,2 ± 7,1	963,1 ± 62,6
28	53,4 ± 23,3	56,7 ± 5,6	907,5 ± 20,1
29	30,1 ± 3,73	15,9 ± 2,4	679,3 ± 25,9
30	42,4 ± 14,3	22,5 ± 3,2	476,7 ± 33,0
31	50,7 ± 22,3	49,5 ± 3,3	256,9 ± 23,0
32	64,8 ± 24,5	56,8 ± 7,3	438,6 ± 30,0
33	71,0 ± 21,2	50,3 ± 8,3	576,7 ± 11,8
34	90,3 ± 27,0	48,0 ± 4,7	682,3 ± 15,7
35	59,5 ± 12,4	94,9 ± 23,6	224,8 ± 15,6
36	48,7 ± 17,9	116,5 ± 35,6	276,2 ± 13,8
37	49,2 ± 17,9	82,3 ± 5,4	585,0 ± 25,3
38	12,4 ± 2,2	26,3 ± 2,5	140,4 ± 13,5
39	138,0 ± 31,1	195,5 ± 28,5	517,1 ± 24,8
40	121,6 ± 17,0	32,3 ± 3,7	911,1 ± 62,9
41	81,5 ± 13,2	78,0 ± 9,4	183,3 ± 16,4
42	132,4 ± 16,3	20,1 ± 1,9	428,9 ± 11,2
43	36,4 ± 12,5	98,3 ± 20,0	406,0 ± 41,3
44	45,3 ± 13,3	65,8 ± 19,3	250,4 ± 29,0
45	26,6 ± 4,6	14,1 ± 1,4	301,1 ± 34,6

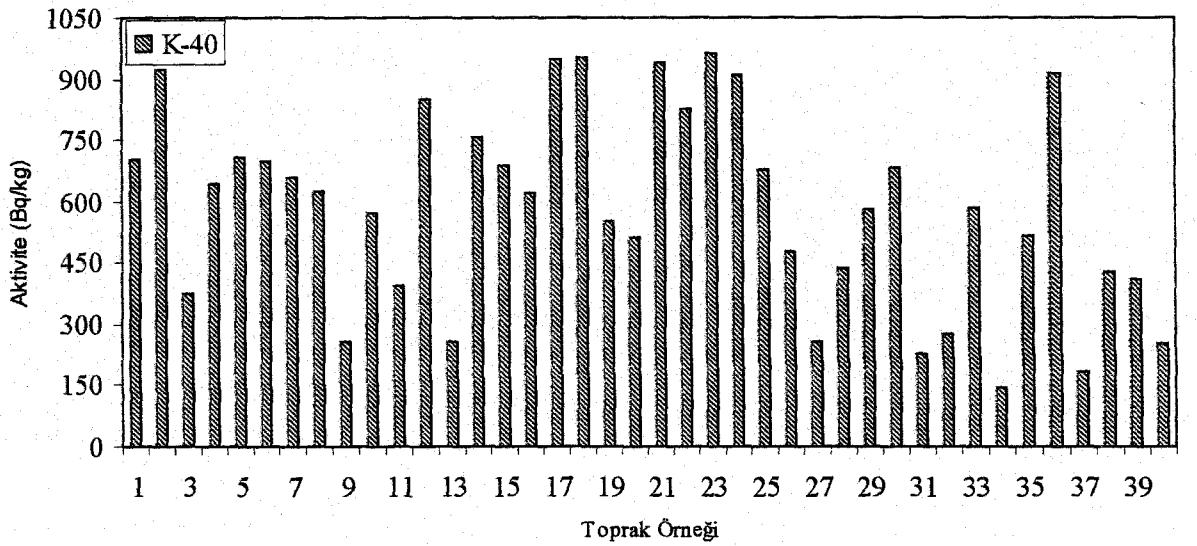
Tablo 6.4 irdelendiğinde, Doğu Anadolu Fay Zonu'ndan alınan toprak örneklerindeki uranyum konsantrasyonunun %90, toryum konsantrasyonunun %70 ve potasyum konsantrasyonunun ise %75 civarında olduğu ve değerlerin kabul edilmiş olan ortalama değeri

aştığı görülmektedir. Bunun en büyük nedeni ise, çalışılan bölgenin aktifliği yüksek fay zonlarının oluşturduğu bir bölge olmasıdır.

Doğu Anadolu Fay Zonu'ndaki toprak örneklerindeki ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K aktivitesi dünya ortalamasının çok üzerindedir.



Şekil 6.4: DAFZ'undaki toprak örneklerindeki ^{238}U ve ^{232}Th konsantrasyon dağılımları.



Şekil 6.5: DAFZ'undaki toprak örneklerindeki ^{40}K konsantrasyon dağılımları.

6.1.2.1. Doğu Anadolu Fay Sistemindeki Karasal Kaynaklı Dış Gama Radyasyon Doz Seviyeleri

Bu fay sistemi üzerindeki örnekleme noktalarındaki çevresel gama doz miktarları iki yöntem ile belirlendi. Birinci yöntem; çevresel gama dozu miktarını ölçen portatif bir GM radyasyon sayacı ile belirlendi. İkinci metot ise, örnekleme ve ölçüm yapılan noktalardaki toprak içerisindeki birinci radyoçekirdeklerden kaynaklanan ve yer seviyesinden yaklaşık 1 m yukarıda tutulan doz olarak ifade edilen çevresel gama dozları hesaplandı. Bunlara ilave olarak da uranyum, toryum ve potasyum içeren maddelerin tehlikeli olup olmadıklarını değerlendirmek için radyum eşleneği aktivitesinin yanı sıra, etkin doz ve doğal gama radyasyon dozunun değerlendirilmesi de yapılarak Tablo 6.5' de gösterilmiştir.

Tablo 6.5'den de görüleceği gibi, radyum eşlenek aktivitesi 457,3 Bq/kg ile 60,81 Bq/kg arasında değişmekte ve ortalama aktivitesi ise 209,2 Bq/kg'dır. Uluslararası maksimum kabul edilebilir değer 370 Bq/kg'dır. Bu fay sistemindeki toprak örneklerinde hesaplanan radyum eşleneği değeri kabul edilen ortalama değerden yüksek değildir. Ancak, 39 numaralı toprak örneği kabul edilen maksimum değeri aşmaktadır. Ölçülen ile hesaplanan doz değerleri sırasıyla 168,2 nGy/saat ile 62,2 nGy/saat değerleri, 211,2 nGy/saat ile 33,4 nGy/saat değerleri arasında değişmektedir. Ölçülen ve hesaplanan doz değerlerinin ortalaması sırasıyla, 105,1 nGy/saat ve 100,1 nGy/saat'dir. Burada en önemli sonuçlardan biri de ölçülen ve hesaplanan doz oranlarının hemen hemen aynı olmasıdır.

Etkin doz oranı ise, 259,0 μ Sv/yıl ile 35,2 μ Sv/yıl arasında değişmekte ve ortalama değeri ise 123,1 μ Sv/yıl'dır. Bu ortalama değer ile bölge normal seviyede bir radyasyon dozuna sahiptir.

Radyoloji açıdan önemli olan dış tehlike indeksi (T_{ind}) ise 0,16 ile 1,23 arasında değişmektedir ve çalışılan bu bölge için ortalama değeri ise 0,57'dir. Dış radyolojik açıdan karasal radyoçekirdeklerin sağlık açısından herhangi bir risk taşımadığını gösterebilmek için bu değer 1'den küçük olması gerekmektedir. Çalışılan bu bölge için, insan sağlığı açısından risk oluşturabilecek 6. ve 22. örnekleme noktalarındaki dış tehlike indeksi 1 değeri civarında olmasına karşı, 39. örnekleme noktasındaki değer ise 1 değerinin üzerindedir.

6.1.3. Kuzey Anadolu Fay Zonu'ndaki Toprak Örneklerinde ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K

Aktivite Seviyeleri

Bu çalışma bölgesinden toplanan toplam 26 toprak örneklerinde uranyum, toryum ve potasyum aktivite seviyeleri Tablo 6.6'de verilmiştir. Ayrıca, örnek numarasına göre uranyum ve toryum konsantrasyonunun dağılımı Şekil 6.6, örnek numarasına göre potasyum konsantrasyonu Şekil 6.7'de gösterilmiştir.

Tablo 6.5: DAFS'deki karasal gama doz seviyeleri.

Örnek No	Ölçülen Doz ($\mu\text{R/saat}$)	Ölçülen Doz (nGy/saat)	Hesaplanan Doz (nGy/saat)	Etkin Doz oranı ($\mu\text{Sv/yıl}$)	Radyum Eşleneği (Bq/kg)	T_{ind}
1	19,2	168,3	117,9	144,9	256,0	0,69
2	12,5	109,6	117,2	143,8	245,9	0,64
3	9,6	84,1	79,7	97,7	169,2	0,45
4	9,7	85,1	105,4	129,3	226,6	0,61
5	11,7	102,6	89,2	109,4	184,0	0,49
6	14,4	126,3	165,0	202,3	352,6	0,95
7	14,6	128,0	60,0	74,8	132,2	0,35
8	14,5	127,1	59,3	72,7	121,1	0,32
9	12,3	107,9	124,7	152,9	265,6	0,71
10	9,5	83,1	96,7	118,6	201,0	0,54
11	7,2	63,2	144,0	176,6	313,9	0,84
12	9,8	85,9	110,3	135,3	235,0	0,63
13	14,3	125,4	120,2	147,2	263,2	0,71
14	14,5	127,0	147,1	180,4	333,1	0,90
15	14,6	127,9	69,02	84,6	146,5	0,39
16	7,1	62,2	54,8	67,2	108,9	0,29
17	11,9	104,3	120,7	148,0	264,7	0,71
18	9,5	83,3	167,3	205,5	221,3	0,59
19	9,6	84,2	76,3	93,6	118,2	0,43
20	11,7	102,6	89,1	109,3	191,2	0,51
21	11,8	103,5	93,1	114,7	192,8	0,52
22	9,9	86,8	166,9	204,4	354,3	0,95
23	12,3	107,9	92,3	113,5	200,0	0,54
24	16,8	147,3	92,2	113,0	198,0	0,53
25	12,4	108,8	169,2	207,6	363,8	0,98
26	12,2	106,9	108,4	133,0	227,6	0,61
27	14,2	124,5	88,9	109,3	181,4	0,49
28	9,5	83,3	98,8	121,2	204,3	0,55
29	9,6	84,2	52,0	63,8	105,1	0,28
30	12,4	108,7	52,2	64,0	111,2	0,30
31	11,8	103,5	65,5	80,3	141,6	0,38
32	9,7	85,0	84,1	103,1	179,9	0,48
33	12,8	112,2	88,2	108,2	137,3	0,50
34	12,9	113,1	99,4	121,9	211,4	0,57
35	12,9	113,1	98,2	120,4	212,5	0,57
36	12,8	112,2	110,1	135,6	236,5	0,63
37	9,2	80,6	100,5	123,2	211,9	0,57
38	8,8	77,1	28,7	35,2	60,8	0,16
39	10,2	89,4	211,2	259,0	457,3	1,23
40	10,5	92,0	112,0	137,4	237,9	0,64
41	13,5	118,4	94,6	116,2	207,1	0,55
42	10,3	90,3	88,3	108,3	194,1	0,52
43	11,5	100,8	98,7	120,5	208,2	0,56
44	18,1	158,7	73,8	90,5	158,7	0,42
45	15,2	133,3	33,4	41,0	69,9	0,18

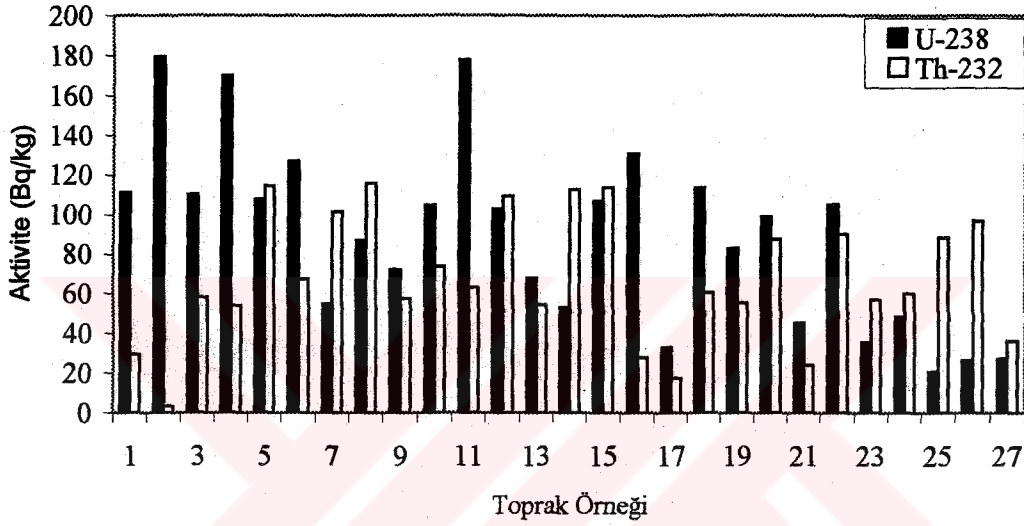
Tablo 6.6: KAFZ'nundan alınan toprak örneklerindeki doğal izotop aktiviteleri.

Örnek No	²³⁸ U (Bq/kg)	²³² Th (Bq/kg)	⁴⁰ K(Bq/kg)
1 (37)	111,2 ± 40,9	29,5 ± 7,8	630,0 ± 25,3
2 (38)	179,4 ± 45,0	3,3 ± 1,2	714,4 ± 23,5
3 (39)	110,2 ± 53,2	58,2 ± 10,9	620,3 ± 19,9
4 (40)	169,7 ± 36,8	54,1 ± 9,7	381,0 ± 36,8
5 (41)	107,7 ± 39,6	114,5 ± 36,6	610,6 ± 23,3
6 (42)	126,6 ± 21,4	67,4 ± 10,5	712,8 ± 11,2
7 (43)	54,5 ± 12,5	101,3 ± 42,0	306,0 ± 21,3
8 (44)	87,0 ± 26,0	115,6 ± 53,1	978,4 ± 65,5
9 (45)	72,1 ± 26,5	57,5 ± 4,2	819,8 ± 34,6
10 (46)	104,6 ± 31,3	74,1 ± 14,7	345,4 ± 14,3
11 (47)	177,6 ± 45,0	62,9 ± 19,2	672,2 ± 21,5
12 (48)	102,6 ± 28,0	109,2 ± 32,3	933,8 ± 50,8
13 (49)	68,0 ± 25,0	54,2 ± 9,2	382,4 ± 22,5
14 (50)	52,9 ± 15,8	112,5 ± 34,3	890,9 ± 23,1
15 (51)	106,5 ± 63,2	113,4 ± 53,1	820,3 ± 26,3
16 (52)	130,4 ± 28,3	27,7 ± 4,7	591,4 ± 14,8
17 (53)	33,0 ± 14,4	17,5 ± 3,4	533,5 ± 11,0
18 (54)	113,3 ± 26,1	60,3 ± 26,1	642,1 ± 12,9
19 (55)	83,0 ± 7,8	55,1 ± 14,0	705,8 ± 26,6
20 (56)	98,9 ± 20,5	87,5 ± 19,2	740,8 ± 49,6
21 (65)	45,1 ± 2,8	23,9 ± 13,5	255,4 ± 18,7
22 (66)	105,0 ± 45,8	90,2 ± 12,8	876,3 ± 13,8
23 (67)	35,6 ± 14,4	56,8 ± 11,4	456,8 ± 14,4
24 (68)	48,5 ± 1,6	60,1 ± 25,0	366,5 ± 20,4
25 (69)	20,8 ± 6,2	88,6 ± 32,7	708,5 ± 42,0
26 (70)	26,1 ± 5,7	96,9 ± 26,0	590,8 ± 32,6
27 (71)	27,2 ± 2,6	36,1 ± 14,7	616,0 ± 30,8

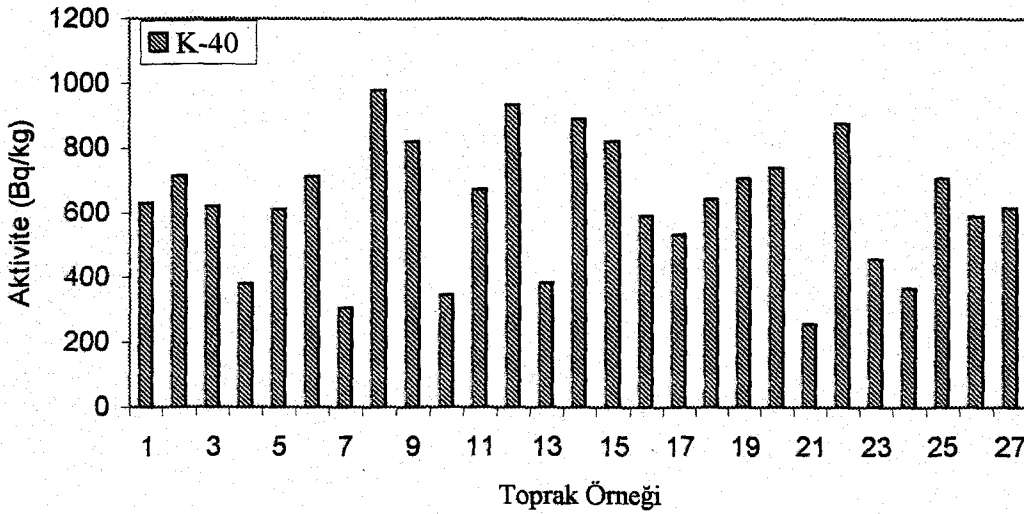
Tablo 6.6 irdelendiğinde, en yüksek uranyum derişimi 179,4 ± 45,0 Bq/kg değeri ile 38 numaralı örnekte, en düşük uranyum aktivite derişimi ise 20,8 ± 6,2 Bq/kg ile 69 numaralı toprak örneğinde bulunmuştur. Bunun yanı sıra, en yüksek ve en düşük toryum konsantrasyonu sırasıyla, 115,6 ± 53,1 Bq/kg ile 44 numaralı ve 3,3 ± 1,2 Bq/kg ile 38 numaralı örnekte bulunduğu görülmektedir. En yüksek potasyum aktivitesi ise 978,4 ± 65,5 Bq/kg ile 44 numaralı

örnekte ve en düşük potasyum aktivitesi ise $255,4 \pm 18,7$ Bq/kg ile 65 numaralı örnekte bulunduğu görülmektedir.

Doğu Anadolu ve Kuzey Anadolu Fay Zonları'ndan alınan toprak örneklerindeki uranyum ve toryum konsantrasyonları karşılaştırıldığında, DAFZ'nundaki toprak örneklerindeki birincil radyoçekirdeklerin yoğunluğunun daha yüksek ve daha geniş bir dağılım gösterdiği görülmektedir. Ayrıca, KAFZ'undaki toprak örneklerinin ortalama potasyum yoğunluğu DAFZ'nundaki toprak örneklerinin ortalama potasyum yoğunluğundan daha yüksektir.



Şekil 6.6: KAFZ'undaki toprak örneklerindeki ^{238}U ve ^{232}Th konsantrasyon dağılımları.



Şekil 6.7: KAFZ'undaki toprak örneklerindeki ^{40}K konsantrasyon dağılımları.

6.1.3.1. Kuzey Anadolu Fay Sistemindeki Karasal Kaynaklı Dış Gama Radyasyon Doz Seviyeleri

Bu fay sistemi üzerindeki örnekleme noktalarındaki çevresel gama doz miktarları iki yöntem ile belirlendi. Birinci yöntem; çevresel gama dozu miktarını ölçen portatif bir radyasyon sayacı ile belirlendi. İkinci metot ise, örnekleme ve ölçüm yapılan noktalardaki toprak içerisindeki birinci radyoçekirdeklerden kaynaklanan ve yer seviyesinden yaklaşık 1 m yukarıda tutulan doz olarak ifade edilen çevresel gama dozları hesaplandı. Bunlara ilave olarak da uranyum, toryum ve potasyum içeren maddelerin tehlikeli olup olmadıklarını değerlendirmek için radyum eşleneği aktivitesinin yanı sıra, etkin doz ve doğal gama radyasyon dozunun değerlendirilmesi de yapılarak Tablo 6.7' de gösterilmiştir.

Tablo 6.7'den de görüleceği gibi, radyum eşlenek aktivitesi 330,6 Bq/kg ile 98,9 Bq/kg arasında değişmekte ve ortalama aktivitesi ise 233,6 Bq/kg'dır. Uluslararası kabul edilebilir maksimum değer 370 Bq/kg'dır. Bu fay sistemindeki toprak örneklerinde hesaplanan radyum eşleneği değeri kabul edilen ortalama değerden yüksek değildir. Ölçülen ile hesaplanan doz değerleri sırasıyla 125,4 nGy/saat ile 57,0 nGy/saat değerleri, 156,0 nGy/saat ile 46,0 nGy/saat değerleri arasında değişmektedir. Ölçülen ve hesaplanan doz değerlerinin ortalaması sırasıyla, 87,8 nGy/saat ve 107,7 nGy/saat'dir. Ölçülen ile hesaplanan doz oranlarının arasında çok büyük bir farklılık yoktur. Bulunan bu her iki değer içinde, dünyada kabul edilen 55 nGy/saat değerinden yüksektir.

Etkin doz oranı ise, 191,0 μ Sv/yıl ile 56,4 μ Sv/yıl arasında değişmekte ve ortalama değeri ise 132,5 μ Sv/yıl'dır. Bu ortalama değer ile bölge normal seviyede bir radyasyon dozuna sahiptir ve karasal radyoçekirdeklerden kaynaklanan yıllık etkin dozun dünya genelindeki ortalama değeri 0,5 mSv/yıl'dır.

Radyolojik açıdan önemli olan dış tehlike indeksi (T_{ind}) ise 0,26 ile 0,90 arasında değişmektedir ve çalışılan bu bölge için ortalama değeri ise 0,62'dir. Dış radyolojik açıdan karasal radyoçekirdeklerin sağlık açısından herhangi bir risk taşımadığını gösterebilmek için bu değer 1'den küçük olması gerekmektedir. Çalışılan bu bölge için, insan sağlığı açısından risk oluşturabilecek 12. ve 15. örnekleme noktalarındaki dış tehlike indeksi 1 değeri civarındadır. Diğer örnekleme noktalarındaki tehlike indeksi 1'den küçüktür.

Tablo 6.7: KAFS'deki karasal gama doz seviyeleri.

Örnek No	Ölçülen Doz (μ R/saat)	Ölçülen Doz (nGy/saat)	Hesaplanan Doz (nGy/saat)	Etkin Doz oranı (μ Sv/yıl)	Radyum Eşleneği (Bq/kg)	T_{ind}
1 (37)	7,2	63,1	94,3	115,7	201,1	0,54
2 (38)	7,5	65,7	109,3	134,0	239,1	0,64
3 (39)	7,4	64,8	112,1	137,5	241,1	0,66
4 (40)	7,6	66,6	125,0	153,4	276,4	0,75
5 (41)	7,5	65,7	148,2	181,7	318,4	0,86
6 (42)	9,6	84,2	129,2	158,5	274,0	0,75
7 (43)	9,7	85,0	103,7	127,2	222,9	0,60
8 (44)	12,4	108,7	155,4	190,6	327,6	0,88
9 (45)	7,6	66,6	103,7	127,2	217,4	0,58
10 (46)	12,3	107,8	108,8	133,4	237,1	0,64
11 (47)	12,5	109,6	146,4	179,6	319,3	0,70
12 (48)	7,7	67,5	156,0	191,3	330,6	0,90
13 (49)	12,2	106,9	81,3	99,8	174,9	0,47
14 (50)	7,3	64,0	135,0	165,6	282,3	0,76
15 (51)	7,4	64,9	155,7	191,0	331,8	0,90
16 (52)	7,1	62,2	48,8	59,9	215,5	0,58
17 (53)	7,2	63,1	48,2	59,1	99,1	0,26
18 (54)	12,2	106,9	115,8	142,0	248,9	0,67
19 (55)	12,4	108,7	102,3	125,1	216,1	0,58
20 (56)	12,3	107,8	131,9	161,7	281,0	0,75
21 (65)	12,5	109,6	46,0	56,4	98,9	0,26
22 (66)	14,1	123,6	142,0	174,1	301,4	0,81
23 (67)	13,5	118,4	72,3	88,6	151,9	0,41
24 (68)	11,3	99,0	76,7	93,5	162,6	0,44
25 (69)	11,5	100,8	97,7	119,8	202,0	0,54
26 (70)	14,3	125,4	100,5	123,3	210,1	0,56
27 (37)	6,5	57,0	61,6	75,5	126,2	0,34

6.2. DAFZ ve KAFZ'nundaki Toprak Örneklerinde Ağır Metal Miktarları

DAFZ ve KAFZ'nunda alınan toprak örneklerindeki bazı ağır metal miktarları, sırasıyla, Tablo 6.8 ve Tablo 6.9'de verilmiştir. Genel olarak doğadaki ağır metallerin dağılımı, çevresel iklim, ağır metallerin hareketliği ve mineroloji, toprağın yapısı ve sınıfı ile toprağın pH ve eH gibi toprak parametrelerine göre değişiklik göstermektedir. Ayrıca, değişik fiziko-kimyasal ve biyolojik faktörler topraktaki metallerin hareketliliğini kontrol ederler. Antropojenik aktivitelerde topraktaki ağır metal yoğunlaşmasına büyük etki yaparlar.

Çalışılan bölgelerde herhangi bir tarımsal aktivite veya sanayileşme olmadığından, bulunan ağır metal miktarları çevreden herhangi bir katkının olmadığı, bölgedeki toprağın gerçek metal miktarlarını veren sonuçlardır.

Tablo 6.8: DAFZ'deki toprak örneklerindeki ağır metal miktarları.

Numune No	Fe (ppm)	Pb (ppm)	Cu (ppm)	Mn (ppm)	Cr (ppm)	Zn (ppm)	K (ppm)
1	4810,81	5,76	3,72	471	6,23	12,82	1372,34
2	3621,62	4,16	2,44	253	76,85	9,95	1292,25
3	5783,78	7,78	5,15	406	16,73	12,23	>4000
4	5783,75	5,37	2,86	379	6,67	10,47	1345,74
5	3405,40	4,55	2,88	263	98,46	10,16	1478,72
6	2324,32	4,95	3,87	312	3,61	11,06	1279,25
7	4365,87	5,36	4,69	369	7,96	12,34	>4000
8	6216,21	8,60	4,75	792	11,48	13,19	>4000
9	5351,35	4,16	3,41	362	7,76	11,86	1651,59
10	5567,56	7,79	4,56	604	8,86	10,97	1797,87
11	6648,64	5,76	4,39	483	9,29	16,58	>4000
12	7621,62	3,35	4,79	633	10,17	16,86	>4000
13	8270,27	5,76	4,64	582	10,61	16,09	>4000
14	2356,34	3,36	1,69	286	9,75	12,89	>4000
15	4162,16	4,16	2,02	193	8,42	10,91	1797,80
16	3513,51	4,16	2,14	174	7,33	9,42	1625,10
17	7729,72	4,97	3,70	331	11,48	16,12	>4000
18	11405,40	5,37	3,74	629	14,11	16,89	>4000
19	6234,32	6,58	4,06	436	247,26	17,88	>4000
20	10432,43	5,77	4,71	609	12,14	187,85	>4000
21	6864,86	5,36	4,10	393	9,51	18,47	>4000
22	9783,78	4,55	4,58	980	13,45	21,43	>4000
23	4702,70	6,85	5,73	458	13,89	18,81	>4000
24	6540,54	4,95	3,34	374	9,95	14,02	1092,50
25	5351,35	4,16	2,99	197	10,17	13,78	1395,63
26	7297,29	5,37	3,24	636	10,61	11,62	1264,56
27	12054,05	5,37	3,66	737	13,67	15,07	>4000
28	9567,56	5,37	3,53	516	14,98	14,45	>4000
29	10864,86	4,16	3,11	292	9,08	9,92	1944,00
30	8054,05	5,37	3,57	337	13,45	14,21	>4000
31	8378,37	5,37	3,57	477	13,67	11,40	>4000
32	8918,91	4,16	3,17	682	11,70	11,03	>4000
33	1675,67	3,35	1,85	155	67,83	8,37	2210,10
34	8162,16	6,97	3,41	273	14,55	14,08	>4000
35	5675,67	2,14	5,48	229	32,00	13,31	627,65
36	8918,91	6,97	3,87	277	14,77	15,23	2130,31
37	4365,87	1,05	1,62	320	5,36	7,98	>4000
38	4963,36	9,68	2,32	865	2,66	105,78	>4000
39	4620,87	7,48	1,72	784	4,53	98,36	>4000
40	4926,36	11,64	1,62	965	2,66	86,95	>4000
41	4913,56	7,28	3,59	932	2,56	96,38	>4000
42	11304,36	8,71	5,32	867	11,35	139,12	>4000
43	4419,58	9,26	4,59	968	2,07	157,15	>4000
44	12755,65	3,26	3,31	835	17,01	52,17	>4000
45	4899,36	7,08	3,67	875	5,76	132,10	>4000

Tablo 6.9: KAFZ'deki toprak örneklerindeki ağır metal miktarları.

Numune No	Fe (ppm)	Pb (ppm)	Cu (ppm)	Mn (ppm)	Cr (ppm)	Zn (ppm)	K (ppm)
1 (37)	4918,91	6,18	4,20	394	14,11	11,92	1226,06
2 (38)	9567,56	5,77	3,40	398	13,89	13,84	>4000
3 (39)	4810,81	2,95	4,03	380	13,45	11,95	>4000
4 (40)	2864,86	3,61	3,61	273	17,83	11,25	1359,04
5 (41)	6216,21	3,76	3,30	373	16,30	11,68	>4000
6 (42)	4162,16	4,95	3,24	321	13,01	11,65	>4000
7 (43)	2864,86	3,35	2,40	165	7,76	9,98	>4000
8 (44)	5135,13	2,55	2,42	163	9,29	9,55	3218,30
9 (45)	6324,32	5,77	3,72	421	15,20	15,07	>4000
10 (46)	4486,48	5,76	3,26	342	10,39	9,64	>4000
11 (47)	3945,94	4,95	2,88	240	11,26	9,67	>4000
12 (48)	2324,32	0	0,99	146	2,29	7,57	>4000
13 (49)	1743,78	2,95	1,45	100	3,39	6,34	>4000
14 (50)	1783,78	1,74	1,33	159	3,17	8,87	>4000
15 (51)	3945,94	6,16	1,72	259	4,92	12,57	1546,98
16 (52)	1683,78	2,55	3,32	153	4,48	12,20	>4000
17 (53)	1526,36	2,50	3,25	165	4,50	11,59	>4000
18 (54)	1135,13	3,76	1,03	143	2,51	8,44	1359,25
19 (55)	5678,02	4,23	4,89	560	12,36	16,32	>4000
20 (56)	4620,58	7,48	1,72	468	4,53	131,22	>4000
21 (65)	4547,65	9,66	0,55	175	1,48	85,61	>4000
22 (66)	5486,36	4,68	2,35	345	5,64	12,35	>4000
23 (67)	6435,85	3,98	2,68	364	8,65	6,89	>4000
24 (68)	4995,69	8,69	1,26	227	4,14	119,82	>4000
25 (69)	4798,36	8,26	1,93	218	3,94	7,69	>4000
26 (70)	3490,16	9,46	4,62	320	9,58	89,98	>4000
27 (71)	3268,5	7,68	3,96	350	9,02	90,36	>4000

Toprak örneklerindeki ağır metal ile radyoaktivite ilişkisi her bir çalışma bölgesi için, sırasıyla Tablo 6.10 ve Tablo 6.11'da %95 güvenirlilik sınırları çerisinde verilmiştir. Verilen tablolar incelendiğinde, toplam alfa ve beta radyoaktivitesi ile ağır metal miktarları arasında genel olarak negatif yönde zayıf bir ilişki göze çarpmaktadır. Yani, verilen niceliklerden biri azalırken diğer nicelik ise ters yönde artmaktadır. Örneğin, Tablo 6.10'da toplam alfa ve beta ile demir ağır metal yoğunluğu arasındaki ilişki sırasıyla, -0,080 ve -0,050'dir.

Sonuç olarak, elde edilen bu veriler ışığında topraktaki doğal radyoaktivite ile ağır metal yoğunluğu arasında doğrusal bir ilişkiye rastlanılmamıştır.

Toprak içerisindeki demir yoğunluğunun herhangi bir limiti yoktur, çünkü bu ağır metal toprakta bol miktarda bulunmaktadır. Topraktaki potasyum miktarı da boldur, ancak değişik aktivite ile potasyum miktarı çok fazla değişiklik gösterebilmektedir.

Tablo 6.10: DAFS'indeki toprak örneklerindeki ağır metal miktarları ve radyoaktivite arasındaki ilişki.

	Top. alfa	Top. beta	²³⁸ U	²³² Th	⁴⁰ K	Fe	Pb	Cu	Mn	Cr	Zn	K
Top.alfa	1											
Top. beta	0,153	1										
²³⁸ U	-0,200	0,067	1									
²³² Th	-0,267	-0,098	0,163	1								
⁴⁰ K	0,182	-0,122	0,223	-0,093	1							
Fe	-0,080	-0,050	-0,131	-0,096	0,001	1						
Pb	-0,205	-0,024	-0,073	-0,086	-0,116	0,005	1					
Cu	-0,037	0,024	-0,080	-0,002	-0,168	0,352	0,183	1				
Mn	-0,189	0,134	-0,046	0,050	-0,122	0,341	0,589	0,205	1			
Cr	0,077	-0,115	-0,123	-0,104	0,134	-0,125	-0,07	-0,009	-0,213	1		
Zn	-0,055	0,269	-0,016	-0,024	-0,262	0,103	0,533	0,09	0,638	-0,156	1	
K	-0,032	0,232	0,046	-0,151	-0,183	0,351	0,342	0,189	0,546	-0,060	0,365	

Tablo 6.11: KAFS'indeki toprak örneklerindeki ağır metal miktarları ve radyoaktivite arasındaki ilişki.

	Top. alfa	Top. beta	²³⁸ U	²³² Th	⁴⁰ K	Fe	Pb	Cu	Mn	Cr	Zn	K
Top.alfa	1											
Top. beta	-0,102	1										
²³⁸ U	0,083	-0,267	1									
²³² Th	0,045	0,050	-0,140	1								
⁴⁰ K	0,102	-0,055	0,183	0,418	1							
Fe	-0,044	0,104	0,189	-0,124	0,135	1						
Pb	-0,090	0,153	-0,294	-0,187	-0,288	0,346	1					
Cu	-0,030	-0,238	0,154	-0,279	0,008	0,298	0,048	1				
Mn	-0,137	-0,044	0,157	-0,131	0,145	0,679	0,313	0,641	1			
Cr	-0,182	-0,254	0,454	-0,133	-0,002	0,514	-0,013	0,778	0,625	1		
Zn	-0,263	-0,105	-0,349	-0,078	-0,225	0,051	0,698	-0,139	0,183	-0,244	1	
K	0,032	-0,069	-0,339	0,015	-0,032	0,198	0,034	0,024	0,079	-0,143	0,206	1

6.3. Fay Zonlarındaki Radon Konsantrasyonu

6.3.1. DAFZ ve KAFZ'undaki Toprak Havasındaki Radon Konsantrasyonu

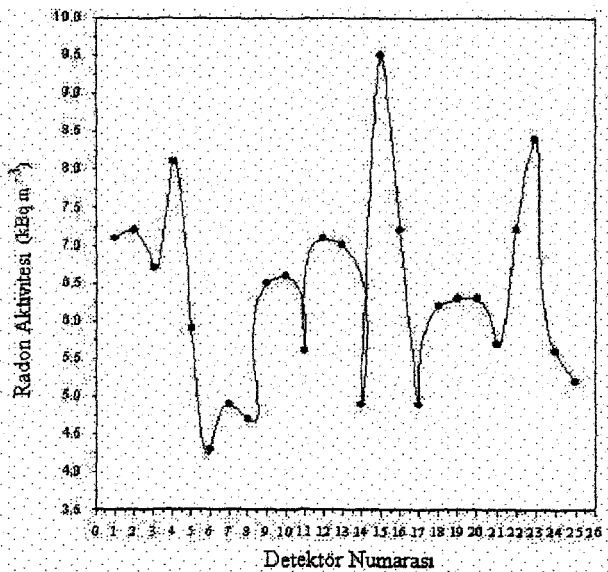
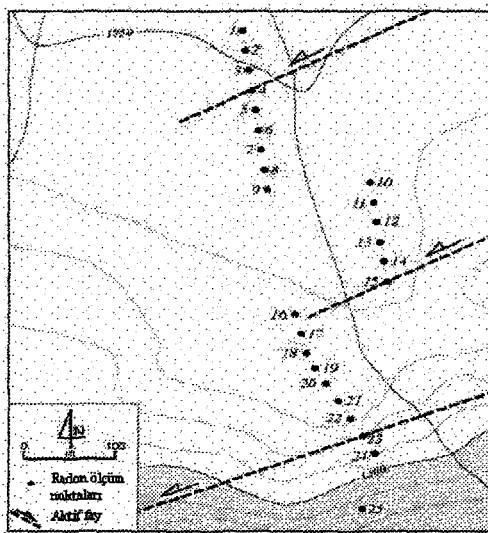
Bingöl ile Karlıova arasındaki, özellikle Göynük köprüsünden sonra fay zonlarına paralel olarak yaklaşık 16 tane ve DAFZ ve KAFZ'nun Sakaören ve Yoncalık bölümüne (Şekil 6.10, 11 ve 12) toplam 56 tane pasif radon algılayıcı olan CR-39 yerleştirilerek fay zonlarındaki radon konsantrasyonları bulunmuştur.

Fay zonlarına ilk olarak yerleştirilen 16 adet pasif radon algılayıcılardan elde edilen radon yoğunluğu 1 kBq/m³ civarındadır. Genellikle karayolu kenarlarına yerleştirilen bu detektörler dış etkenlerden etkilendiklerinden sağlıklı sonuçlar elde edilememiştir. Ancak

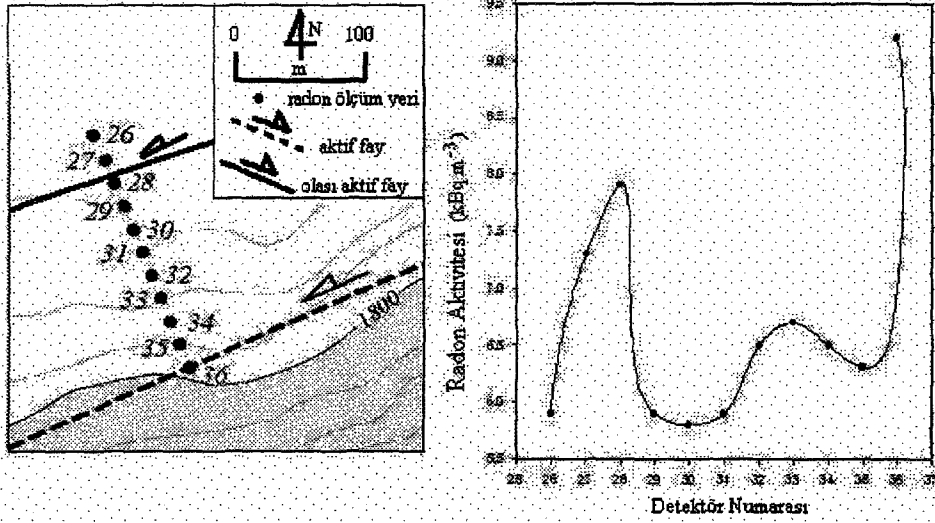
burada daha çok, fay zonlarına dik olarak atılan profillerden elde edilen sonuçlar üzerinde durulacaktır. Doğu Anadolu Fay Zonu'nda kesişim bölgesine yakın bir yer olan Sakaören civarında dört farklı fay kırığı üzerine, iki bölgede faylara dik şekilde profiller atılarak tam fay çizgileri üzerindeki ve yakınlarındaki radon konsantrasyonları ve bu konsantrasyonların detektör numaraları, dolayısıyla fay çizgisine yakınlığıyla değişimini gösteren tablo birinci ve ikinci profiller için Tablo 6.12 gösterilmiştir. Ayrıca, bulunan bu radon konsantrasyonlarının detektör numaralarına dolayısıyla fay çizgisine yakınlığına göre değişim grafikleri birinci profil için Şekil 6.8'da ve ikinci profil için ise Şekil 6.9'de gösterilmiştir

Tablo 6.12: DAFZ'daki birinci ve ikinci profillerin radon konsantrasyonları.

I. Profil			II. Profil		
Detektör No	Radon Konst. (kBq/m ³)	Detektör No	Radon Konst. (kBq/m ³)	Radon Konst. (kBq/m ³)	
1	7,1	14	4,9	26	5,9
2	7,2	15	9,5	27	7,3
3	6,7	16	7,2	28	7,9
4	8,1	17	4,9	29	5,9
5	5,9	18	6,2	30	5,8
6	4,3	19	6,3	31	5,9
7	4,9	20	6,3	32	6,5
8	4,7	21	5,7	33	6,7
9	6,5	22	7,2	34	6,5
10	6,6	23	8,4	35	6,3
11	5,6	24	5,6	36	9,3
12	7,1	25	5,2		
13	7,0				



Şekil 6.8: DAF üzerindeki birinci profildeki radon konsantrasyonunun detektör numarasına göre değişimi.

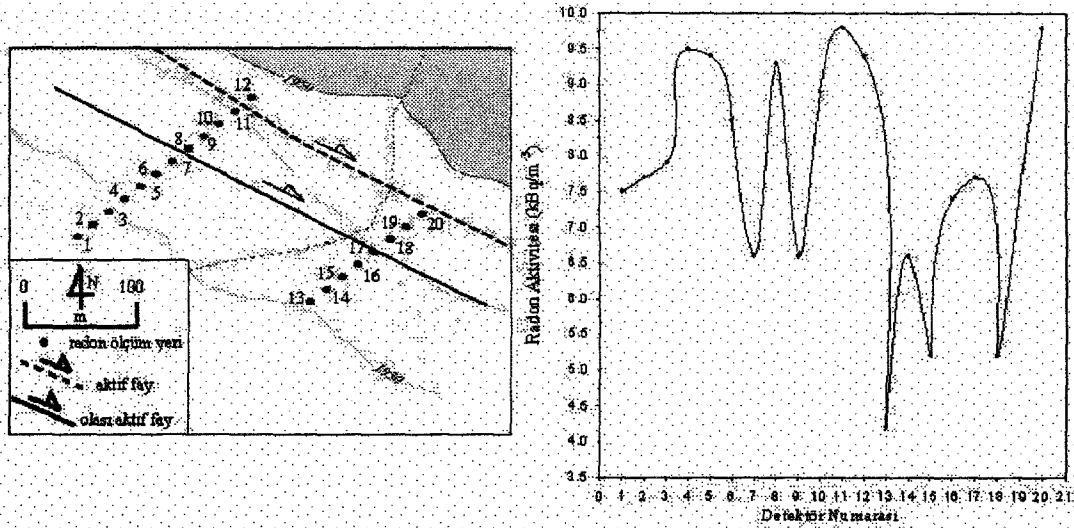


Şekil 6.9: DAF üzerindeki ikinci profildeki radon konsantrasyonunun detektör numarasına göre değişimi.

Kuzey Anadolu Fay Zonu'nda kesişim bölgesine yakın bir yer olan Yoncalık civarında iki farklı fay kırığı üzerine dik bir şekilde profiller atılarak tam fay çizgileri üzerindeki ve yakınlarındaki radon konsantrasyonları ve bu konsantrasyonların detektör numaraları veya fay çizgisine yakınlığıyla değişimi Tablo 6.13'de gösterilmiştir. Ayrıca, her iki fay kırığında bulunan bu radon konsantrasyonlarının detektör numaralarına veya fay çizgisine yakınlığına göre değişim grafiği ise Şekil 6.10'de gösterilmiştir

Tablo 6. 13: KAFZ'daki birinci ve ikinci profildeki radon konsantrasyonu.

I. Profil		II. Profil	
Detektör No	Radon Konst. (kBq/m ³)	Detektör No	Radon Konst. (kBq/m ³)
1	7,5	13	7,5
2	7,7	14	7,7
3	7,9	15	7,9
4	9,5	16	9,5
5	9,4	17	9,4
6	8,5	18	8,5
7	6,6	19	6,6
8	9,3	20	9,8
9	6,6		
10	8,9		
11	9,8		
12	9,4		



Şekil 6.10: KAF üzerindeki birinci ve ikinci profillerdeki radon konsantrasyonunun detektör numarasına göre değişimi.

Radon yoğunluğunun fay çizisine yakınlığına göre değişimini gösteren yukarıdaki şekil ve tablolara bakıldığında, DAFZ üzerindeki en yüksek radon yoğunluğunun $9,5 \text{ kBq/m}^3$ değeri ile 15 numaralı istasyonda ve en düşük değeri ise $4,3 \text{ kBq/m}^3$ değeri ile 6 numaralı istasyonda bulunmuştur. Bu fay zonundaki ortalama radon yoğunluğu $6,4 \text{ kBq/m}^3$ 'tür. Şekil 6.8 ve Şekil 6.9 irdelendiğinde, en üst değere ulaşmış radon yoğunlukları tam fay üzerindeki istasyonlarda ölçülmüştür. Bu da, aktif fay zonlarının hareketliliğini göstermektedir. Literatürde yapılan çalışmalarda da, ana kayalardaki birçok kırık ve fay zonlarındaki toprak havasında radon konsantrasyonunun arttığı gözlenmiştir [8, 32]. Bulunan radon yoğunluklarına diğer bir katkı da, fay zonu üzerindeki toprağın içerdiği uranyum miktarından ileri gelmektedir. Bunun nedeni, yeraltı sularında çözülmüş uranyum iyonları veya bunların ürün çekirdekleri, yeryüzüne yakın bölgelerde çökerler ve radyumun bozunmasından yayınlanan radon da fay kırıklarındaki radon yoğunluğuna katkı yapabilir.

KAFZ üzerindeki radon ölçüm istasyonlarından alınan değerlere göre, en yüksek radon yoğunluğunun $9,8 \text{ kBq/m}^3$ değeri ile 11. ve 20. istasyonlarda bulunmuştur ki, bu iki istasyonda aynı fay zonu üzerindedir. Ancak, tam fay kırıklarının bu noktalarda geçebildiklerinin söylenebilmesi için, aynı yerdeki toprak içerisindeki uranyum veya ürün radyoçekirdeklerinin konsantrasyonlarının da belirlenmesi gerekmektedir. En düşük radon yoğunluğu $4,2 \text{ kBq/m}^3$ ile 13 numaralı istasyonda bulunmuştur. Bu fay zonundaki ortalama radon yoğunluğu $8,4 \text{ kBq/m}^3$ 'tür. Şekil 6.10 incelendiğinde, en üst değer yapan radon konsantrasyonları tam fay üzerindeki istasyonlarda ölçülmüştür. Bu üst değerlerin haricindeki yüksek radon yoğunlukları

ya fay zonu üzerindeki toprak örtüsü içerisindeki uranyumdan ya da henüz belirlenememiş farklı gömülü fay zonlarından kaynaklanabilir.

Çalışılan bölgedeki KAFZ'nun bir kesimindeki ortalama radon konsantrasyonu DAFZ'nundaki ortalama radon konsantrasyonundan daha yüksektir. Bu sonuç, Kuzey Anadolu Fay Zonu'nun daha aktif olabileceği sonucunu doğurur. Son günlerde (Mart, 2005) çalışma bölgesi olan Karlıova ve çevresindeki tektonik hareketlilik Kuzey Anadolu Fay Zonları üzerinde görülmektedir.

Doğu ve Kuzey Anadolu Fay Zonlarını kesişim noktası olan bu bölgede, radyoaktivite ve radon ilişkisinin irdelendiği bu çalışma Türkiye'de bu yönde yapılan ilk ve tek çalışma olması bakımından önemlidir.

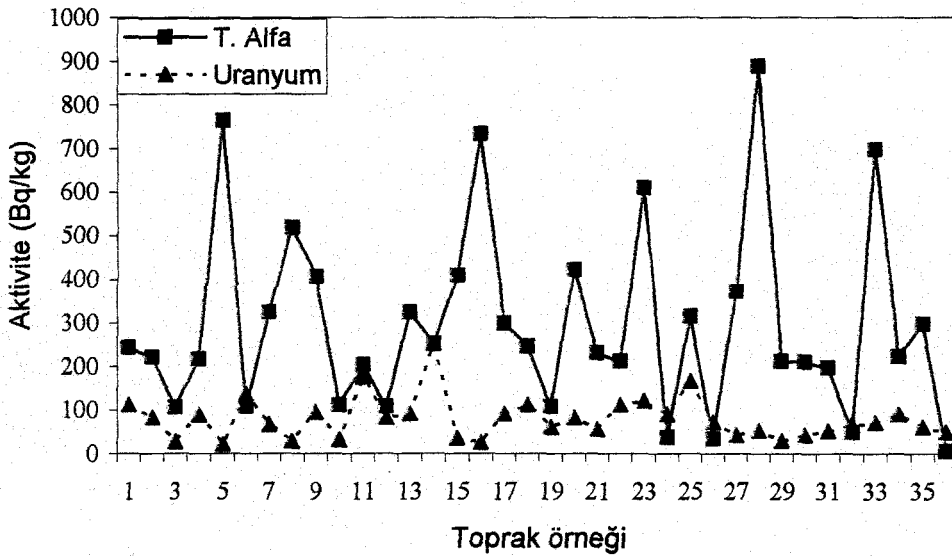


7. SONUÇLARIN YORUMLANMASI

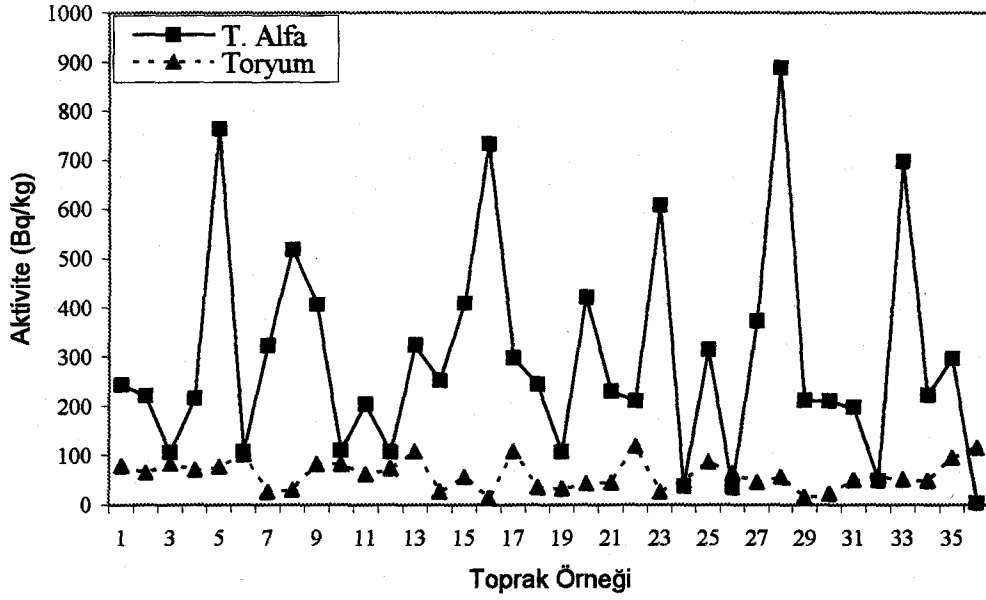
7.1. Doğu Anadolu Fay Zonu'ndaki Genel Radyoaktivite Seviyesi

Doğu Anadolu ve Kuzey Anadolu Fay Zonlarının kesişim noktası olan Bingöl-Karlıova ve çevresinden alınan su örneklerindeki toplam alfa ve beta radyoaktivite seviyeleri, Dünya Sağlık Örgütü'nün (WHO) belirlediği (toplam alfa için 0,5 Bq/L ve toplam beta için 1 Bq/L) standartların altında olup sadece 33. su numunesindeki toplam alfa seviyesi 1 Bq/L'den yüksek çıkmıştır. Bunun nedeni, bu su numunesinin termal bir su kaynağından alınmış olmasıdır ki kaplıca sularında toplam alfa ve beta radyoaktivite seviyelerinin 0,5 ile 2 Bq/L arasında olduğu daha önceki çalışmalarda gözlenmiştir [55].

Doğu Anadolu Fay Zonu bölgesinden alınan toprak örneklerinin genelinde toplam alfa ve beta radyoaktivite seviyeleri ile radyoizotop konsantrasyonları için yüksek değerler bulunmuştur. Bunun nedeni, çalışılan bölgedeki toprak altındaki ana kaya bazalt ve bazaltik pyroclastic kayalardan oluştuğundan, toryum yönünden zengin olan bu kayalarındaki toryumun yanı sıra uranyum da topraktaki toplam alfa aktivitesine önemli bir katkı yaptığı söylenebilir. Doğu Anadolu Fay Zonu'ndaki her bir çalışma alanından (profil) elde edilen sonuçlar kendi aralarında değerlendirildiğinde, birinci profildeki toprak örneklerinde toplam alfa radyoaktivitesinin, aynı örneklerdeki uranyum ve toryum konsantrasyonlarına göre değişimi sırasıyla Şekil 7.1 ve Şekil 7.2'de gösterilmiştir.



Şekil 7.1: DAFZ'ndaki toprak örneklerinin toplam alfa ile uranyum aktivitesi değişimi.



Şekil 7.2: DAFZ'ndaki toprak örneklerinin toplam alfa ile toryum aktivitesi değişimi.

Şekil 7.1 ve Şekil 7.2 incelendiğinde; 5., 8., 16., 20., 23. ve 33. toprak örneklerinde toplam alfa aktivitesi en yüksek olmasına rağmen uranyum ve toryum aktivitesi çok düşük seviyededir. Bu profildeki toprak örneklerinde toplam alfa radyoaktiviteye uranyum ve toryumun ürünlerinden gelen katkı daha fazladır. Ayrıca, bu toprak örnekleri ya tam fay zone üzerinde veya faya en yakın bir noktadan alınan toprak örnekleridir. Burada, fay zoneunun toplam alfa radyoaktivitesine katkısı da açıkça görülmektedir.

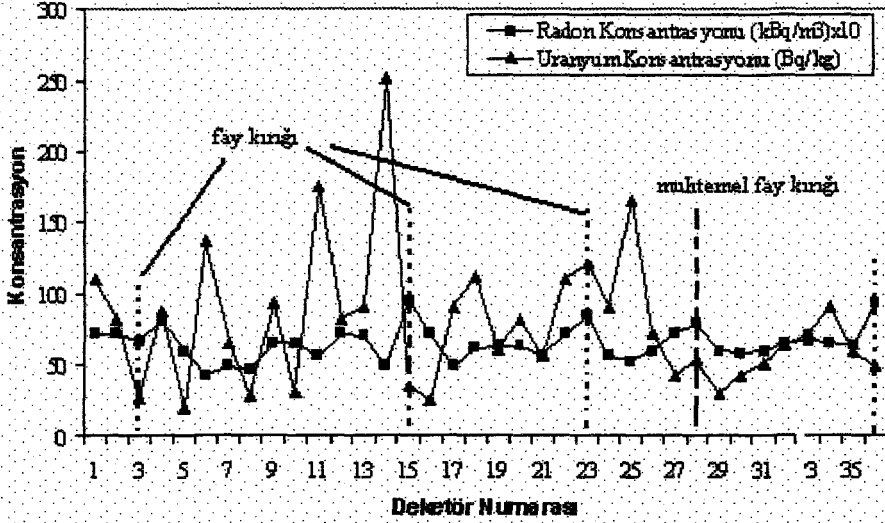
Bu çalışma bölgesinden alınan toprak örneklerindeki ortalama toplam alfa radyoaktivite seviyesi 297,0 Bq/kg, ortalama uranyum seviyesi ise 79,32 Bq/kg ve ortalama toryum seviyesi ise 61,15 Bq/kg'dır. Uranyum yoğunluğu ile toplam alfa radyoaktivitesi arasındaki oran 0,26 civarındadır ki bu değerde toprak örneklerindeki toplam alfa radyoaktivitesine ^{238}U radyoizotopunun yaptığı katkı %26 demektir. Toprak örneklerindeki ortalama ^{232}Th yoğunluğunu 61,15 Bq/kg civarındadır. Bu miktarın toplam alfa radyoaktivitesine yaptığı ortalama katkı yaklaşık %21 civarındadır. Uranyum ve toryum'un toplam alfa radyoaktivitesine katkısı %47 civarındadır. Oysa bazalt türü kayalarda ortalama toryum derişimi uranyumdan yüksektir. Dolayısıyla buradaki asıl katkı uranyumdan gelmektedir ve fay zonlarındaki toprakta uranyum birikimi ana kayadan bağımsızdır denilebilir. Bu profildeki Th/U oranı yaklaşık olarak 0,7 civarındadır. Literatürde yapılan çalışmalarda bu oran 3 ile 8 arasında değişmektedir [56]. Fay zonlarında özellikle radon yayılımının yüksek olduğu bilinmektedir. Radon, radyumun bozunmasından ortaya çıkan radyoaktif bir gazdır ve radyum uranyum elementinin bir izotopu olduğundan fay zonlarındaki uranyum birikimi daha fazladır.

Doğu Anadolu Fay Zonu'ndan alınan toprak örneklerindeki toplam beta aktivitesi temel seviye ile $121,6 \pm 4,2$ Bq/kg ve ^{40}K aktivitesi ise $140,4 \pm 13,5$ ile $963,1 \pm 62,6$ Bq/kg arasında değişmektedir. Bunun yanı sıra aynı toprak örneklerindeki potasyum miktarı $627,85$ ile >4000 ppm arasında değişmektedir. Buradan görüleceği gibi, topraktaki toplam beta aktivitesine ana katkıyı potasyumun (^{40}K) yanı sıra topraktaki diğer beta aktifliği yüksek uranyum ve toryumun ürünleri de yapmaktadır ve buda potasyum ile toplam beta aktivitesi arasında doğrusal bir ilişki olmadığını göstermektedir.

Doğu Anadolu Fay Zonu'na yerleştirilen pasif radon detektörlerinden elde edilen, toprak havasındaki radon konsantrasyonu ile aynı noktadaki topraktaki uranyum konsantrasyonu arasındaki ilişki Şekil 7.3'de gösterilmiştir. Bu şekilden görüldüğü gibi, tam fay kırığı üzerindeki radon aktivitesinin yanı sıra o noktadaki uranyum aktivitesi de yüksek bulunmuştur. Elde edilen bu sonuçlar literatürle uyum içerisindedir ve fay zonlarındaki uranyum ve radon aktivitesinin yüksek olduğu sonucunu desteklemektedir [31, 51].

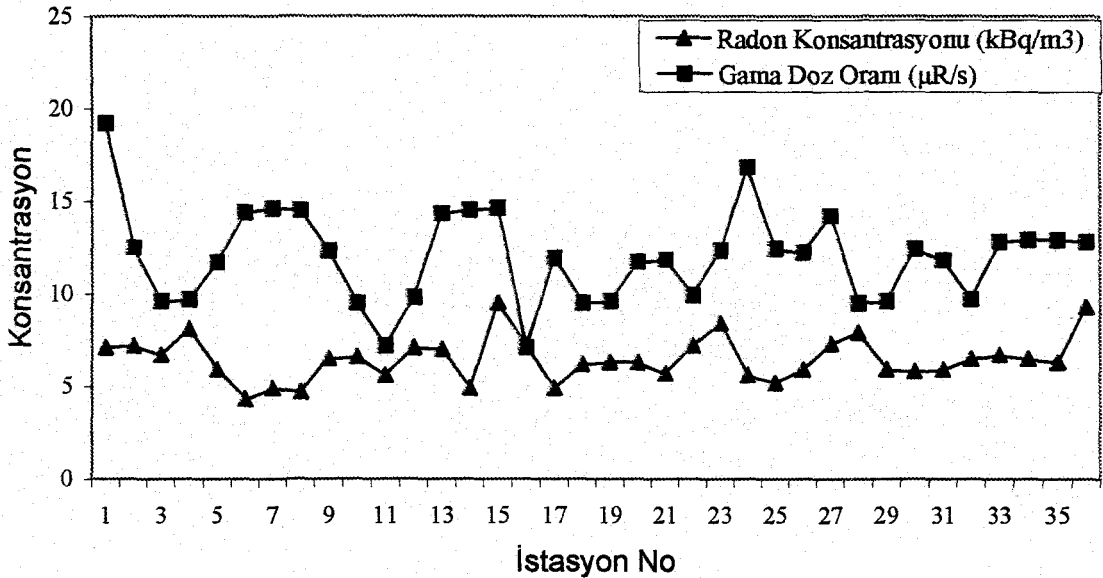
I. profildeki toprak havasındaki radon yoğunluğu ile toprak örneğindeki uranyum yoğunluğunun karşılaştırıldığında, 4, 15 ve 23 nolu istasyonlar tam fay zonları üzerindedir ve toprak havasındaki radon konsantrasyonunun yüksek olmasına karşın topraktaki uranyum derişimi oldukça düşüktür. Ayrıca, I. profildeki ortalama radon yoğunluğu $6,4$ kBq/m³ ve ortalama uranyum yoğunluğu $88,6$ Bq/kg ve toryum yoğunluğu ise $63,28$ Bq/kg'dır. Özellikle, radon yoğunluğunun ortalama değerden düşük olan 6, 11, 14, 17, 18 ve 25 numaralı istasyonlardan alınan toprak örneklerindeki uranyum konsantrasyonunun ortalama değerden çok üzerinde ve toryum yoğunluğu ise 6. ve 17. ve 25. toprak örneğinde ortalama değerden yüksek, diğerlerinde ise ortalama değerden küçüktür.

Bu sonuçlarda, fay zonlarındaki radon konsantrasyonunun yüksek olmasının nedenini açıklamaktadır. Fay zonlarındaki radon yayılımının yüksek olmasının nedeni; bu bölgelerde yeraltı sularının rahatlıkla yeryüzüne çıkabilmelerinden dolayı, yeraltı sularında çözünmüş uranyum veya ürün radyoçekirdeklerinin yeryüzüne yakın yerlerde birikme eğiliminin daha yüksek olmasıdır. Oysa toryum elementi sulara kolaylıkla çözünemez. Bu nedenle, incelenen fay zonlarındaki toprak örneklerindeki ortalama uranyum yoğunluğu ortalama toryum yoğunluğundan daha yüksek çıkmıştır.



Şekil 7.3: DAFZ'nundaki toprak havasındaki radon ile uranyum dağılımı.

I. profildeki her bir istasyondan alınan çevresel gama dozu ortalama 12,5 $\mu\text{R/s}$ civarındadır. Çevresel gama dozuna en büyük katkıyı, topraktaki toryum izotopu yapmaktadır. Topraktaki toryum yoğunluğu en düşük olduğu 16. istasyonda en düşük gama dozu değeri bulunmuş ve bu toprak örneğinde potasyum aktivitesi, ortalama potasyum aktivitesinden daha yüksek bir aktivitede bulunmuştur. Toryum yoğunluğu en yüksek olduğu noktada (23. istasyon) ise gama dozu seviyesi 9,9 $\mu\text{R/s}$ olarak ölçülmüştür. I. profildeki her bir istasyonda ölçülen fay zonundaki radon yoğunluğu ile çevresel gama radyasyon doz oranı Şekil 7.4'de gösterilmiştir.



Şekil 7.4: DAFZ'nundaki istasyonlarda toprak havasındaki radon ile çevresel doz oranı değişimi.

Radon konsantrasyonlarının maksimum olduğu noktalar veya en yakın komşularında, çevresel gama radyasyon doz miktarı, ortalama değerin üzerindedir. Gama dozunun en düşük ölçüldüğü noktalardan biri olan 11 nolu istasyonda ise, toprak örneğindeki toryum yoğunluğu ortalama değerden küçüktür.

Bu profildeki ortalama çevresel gama doz ölçümleri, İstanbul için ölçülen ortalama doz seviyesinden yaklaşık 1,85 kat, Elazığ için ölçülen ortalama değerden ise yaklaşık 1,75 kat daha yüksektir. Literatürde volkanik bölgede yapılan diğer bir çalışmadaki bulunan çevresel gama doz oranı ortalama 20 $\mu\text{R/s}$ civarındadır [57]. Bu çalışmada, bu değere yakın sonuçlar elde edilmiştir.

II. profildeki ortalama radon yoğunluğu $6,8 \text{ kBq/m}^3$ ve ortalama uranyum ve toryum konsantrasyonu ise $55,5 \text{ Bq/kg}$ civarındadır. Özellikle 28., 33. ve 36. istasyonlarda radon konsantrasyonunda ortalama değerin üzerinde değerler görülmektedir. 36. istasyon bilenen bir fay zonu üzerinde olduğundan, buradaki radon yoğunluğu yüksek olması normaldir, ancak 28. istasyondaki toprak örneğinde uranyum derişimi ortalama değerin altındadır. Bu istasyondaki radon derişiminin yüksek olması, ancak bu noktadan geçen ve henüz tanımlanmamış gömülü bir fay kırığının olması ihtimalini güçlendirmektedir (Şekil 7.3).

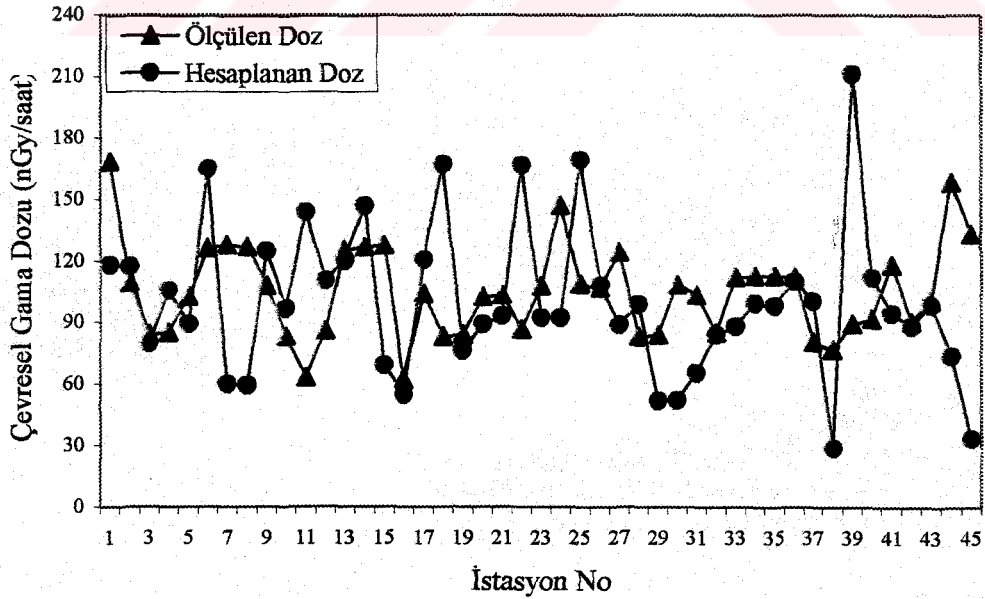
En yüksek radon konsantrasyonunun ölçüldüğü fay zonu üzerindeki 28 ve 33 numaralı istasyonlardaki toprak örneklerinde, özellikle 33 nolu istasyondaki toprakta uranyum aktivitesi ortalama değerin üzerinde ve 28 numaralı istasyonda ise ortalama değerin altında uranyum aktivitesine rastlanmıştır. Maksimum uranyum yoğunluğunun bulunduğu 34 numaralı toprak örneğinin alındığı istasyonda ise radon yoğunluğu $6,7 \text{ kBq/m}^3$ bulunmasına karşılık hemen yanındaki 33 numaralı istasyonda daha düşük bir uranyum aktivitesine karşı daha yüksek bir radon yoğunluğu değerine rastlanmıştır. Topraktaki uranyumdan, dolayısıyla radyumdan kaynaklanan radon yayılımına, toprağın tane büyüklüğü, gözenekliliği, nem miktarı gibi toprağın fiziksel özelliklerinin etkisi oldukça fazladır. Bu nedenle, uranyum yoğunluğun yüksek olduğu noktalarda daima radon yoğunluğu da yüksek olacağı söylenemez. Bu sonucun tam olarak söylenebilmesi için, o noktadan alınan toprak örneklerindeki radon yayılımına bakılması gerekmektedir [48].

Fay zonları üzerindeki noktalarda (33. ve 36. istasyonlar) yüksek çevresel radyasyon dozu gözlenmişse de, 28 numaralı istasyonda ise en düşük gama dozu gözlenmesine karşın hemen yanındaki istasyonda, bu profildeki maksimum çevresel gama dozu değeri elde edilmiştir. Bu noktadaki toprakta ortalama değerin altında bir toryum yoğunluğu elde edilmesine karşın maksimum potasyum yoğunluğu elde edilmiştir. En yüksek toryum yoğunluğu bulunduğu noktalarda minimum potasyum yoğunluğu ve maksimum çevresel gama dozu elde edilmiştir.

Bu fay zonundaki toprak örneklerinde ölçülen ortalama ağır metal miktarları, sırasıyla demir, kurşun, bakır, mangan, krom ve çinko için 6500 ppm, 5,63 ppm, 3,58 ppm, 510 ppm, 20,27 ppm ve 34,17 ppm olarak bulunmuştur. Toprak içerisindeki ağır metallerin hareketliliği toprağın pH, Eh ve çevresel iklim ile ilişkilidir. Toprak içerisindeki demir miktarı bölgeden bölgeye çok fazla değişiklik göstermekle birlikte ortalama bir derişim seviyesi yoktur. Potasyum miktarı ise, yapılan tarımsal aktivite ve çalışılan bölgeler etrafındaki bulunan sanayi aktiviteleri gibi etkiler ile artmakta olduğu bilinmektedir. Topraktaki ağır metal miktarlarının kabul edilen standart seviyeleri, sırasıyla, Pb (kurşun), Cu (bakır), Mn (mangan), Cr (krom) ve Zn (çinko) için 2-13,4 ppm, 5-5,6 ppm, 100-400 ppm 10-80 ppm ve 60-780 ppm arasındadır [58]. Bu çalışmada, DAFZ'nundan toplanan 47 tane toprak örneğinde, anılan bu ağır metallerin ortalama miktarları kabul edilen standartlar aralığındadır. Ancak, topraktaki mangan miktarı kabul edilen üst limiti aşmakta iken, çinko miktarı ise kabul edilen alt limitin de altındadır.

Elde edilen bu sonuçlara göre, Doğu Anadolu Fay Zonu'nda çalışılan bölgedeki toprak örneklerindeki ağır metal miktarlarında kayda değer bir anormalliğin olmadığı sonucuna varılmıştır.

Doğu Anadolu Fay Sistemi üzerinde portatif bir çevresel gama doz seviyesini ölçen bir sayıcı yardımıyla yapılan ölçümler ile, toprak içerisindeki doğal radyoçekirdeklerden kaynaklanan karasal (çevresel) gama radyasyon doz seviyelerinin dağılımı Şekil 7.5'de gösterilmiştir.



Şekil 7.5:DAFS üzerinde ölçülen ve hesaplanan çevresel doz değişimleri.

Ölçülen doz ile hesaplanan dozların ortalama değerleri yaklaşık olarak aynıdır. Genellikle, hesaplanan doz değerlerindeki dalgalanma daha yüksektir ve her iki değerde ölçüm noktalarında aynı eğilimi göstermektedir. Yani, ölçülen gama dozunun yüksek olduğu noktalarda, topraktaki birincil radyoçekerdeklerden kaynaklanan çevresel gama dozunun da yüksek çıktığı gözlemlenmiştir. Bu sonuç da, yapılan ölçümlerin doğruluğu göstermektedir. Bu fay sisteminde ölçülen ve hesaplanan doz değerleri, kabul edilen ve dünya ortalaması olan 55 nGy/saat'ten daha yüksektir [13]. Aynı zamanda radyum eşlenek aktivitesi dünyanın bir çok yerinde yapılan çalışmalarda bulunan ortalama değerler yüksektir [49]. Bununda en önemli nedeni, kırık zonları genellikle uranyum elementinin hareketi için çok iyi bir kanaldır. Bu nedenle, radyum eşleneginin ve çevresel gama dozunun yüksek olduğu noktalar uranyum depolanan zonlardır diyebiliriz.

Bu fay sistemindeki ortalama etkin doz oranı ise 0,12 mSv/yıl civarındadır. Karasal raydoçekerdeklerden kaynaklanan ortalama yıllık dış etkin doz oranının kabul edilen değeri ise 0,5 mSv/yıl'dır. Bu sonuçlara göre bölgedeki etkin yıllık doz kabul edilen değer altındadır. Bu sonuç ise, bölgenin normal doğal temel seviye radyasyonlu bir bölge olduğu gösterir.

Çalışılan bölgeyi radyolojik açıdan değerlendirebilmek için hesaplanan ortalama dış tehlike indeksi yaklaşık olarak 0,57 civarındadır. Sadece 39 numaralı ölçüm noktasındaki değer 1.23 olup, diğer bütün noktalarda 1'den küçüktür. Genel olarak, bu bölgenin insan sağlığı açısından tehlikeli etkiye neden olmayacağı sonucuna varılabilir.

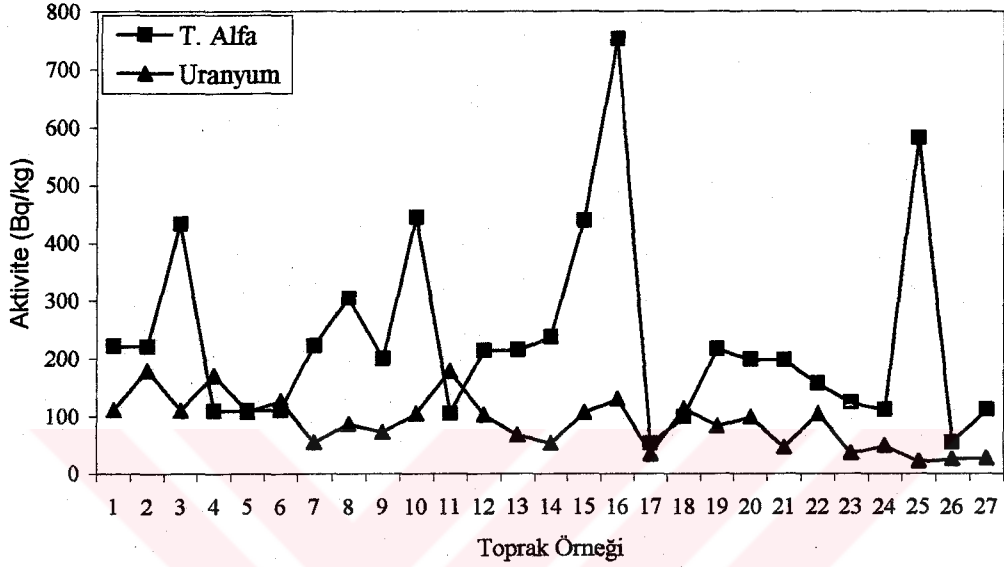
7.2. Kuzey Anadolu Fay Zonu'ndaki Genel Radyoaktivite Seviyesi

Kuzey Anadolu Fay Zonu'nundan toplanan toprak örneklerindeki toplam alfa ve beta radyoaktivite seviyeleri yüksektir. Ortalama toplam alfa aktivitesi 230,82 Bq/kg ve ortalama toplam beta aktivitesi ise 16,15 Bq/kg'dır. Toprak örneklerinin ortalama uranyum, toryum ve potasyum konsantrasyonları sırasıyla, 88,8 Bq/kg, 67,8 Bq/kg ve 626 Bq/kg'dır. Topraktaki toplam alfa aktivitesine ²³⁸U izotopunun yaklaşık %40 civarında ve toryum ise %29 civarında bir katkısı vardır. Buna göre, birinci profildeki toprak örneklerindeki toplam alfa radyoaktivitesinin, aynı örneklerdeki uranyum ve toryum konsantrasyonlarına göre değişimi sırasıyla Şekil 7.6 ve Şekil 7.7'de gösterilmiştir.

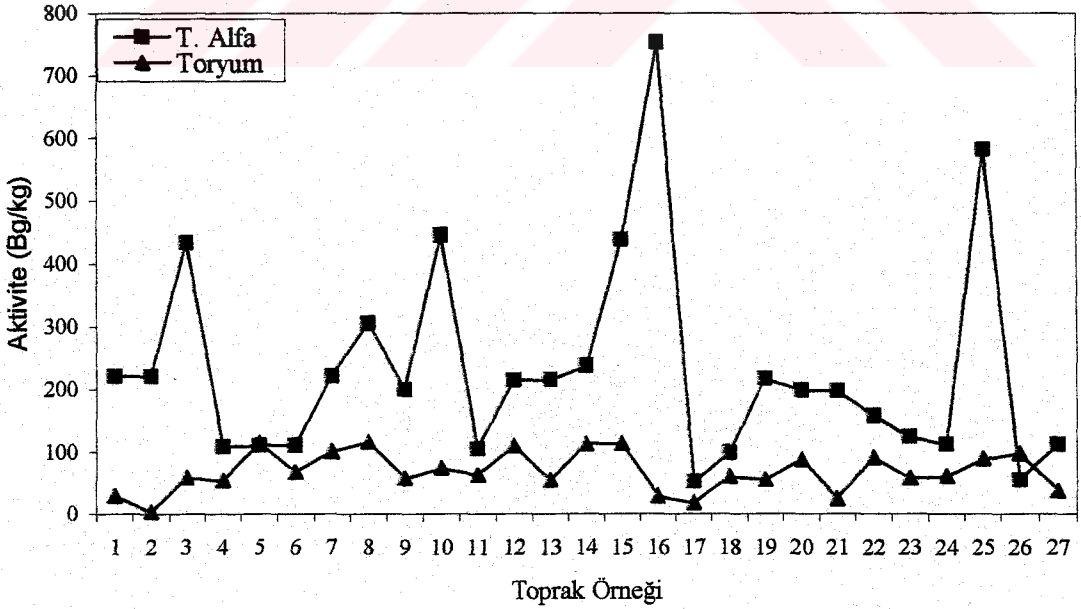
Şekil 7.6 ve Şekil 7.7 incelendiğinde, maksimum toplam alfa radyoaktivitesinin elde edildiği 3., 10. ve 16. örneklerde ortalama değer üzerinde bir uranyum aktivitesine rastlanmış, ancak 25 numaralı toprak örneğinde, uranyum aktivitesi çok düşük olmasına karşın toryum aktivitesi ortalama değer üzerinde bir değerde bulunmuştur. Toprak örneklerinde en yüksek toplam alfa aktivitesine rastlanılan yerler (10. ve 16. toprak örneği) fay çizgisine yakın noktalardır. Bu zondaki toprak örneklerinin ortalama potasyum aktivitesi 626 Bq/kg'dır. Bu

sonuçlara göre, Kuzey Anadolu Fay Zonu'ndaki toprak örneklerinin ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K radyoizotop yoğunlukları, Doğu Anadolu Fay Zonu'ndaki toprak örneklerindeki konsantrasyona göre daha yüksek olmasına karşın, toplam alfa beta aktivitesi hemen hemen aynıdır.

Bu fay zonundaki toprak örneklerinde de uranyum aktivitesi toryum aktivitesinden yüksektir. Çalışılan bu bölgedeki ana kaya bazalt ve bazaltik pyroclastic kayalardan meydana



Şekil 7.6: Kuzey Anadolu Fay Zonu'ndaki toprak örneklerinin toplam alfa ile uranyum aktivitesi değişimi.

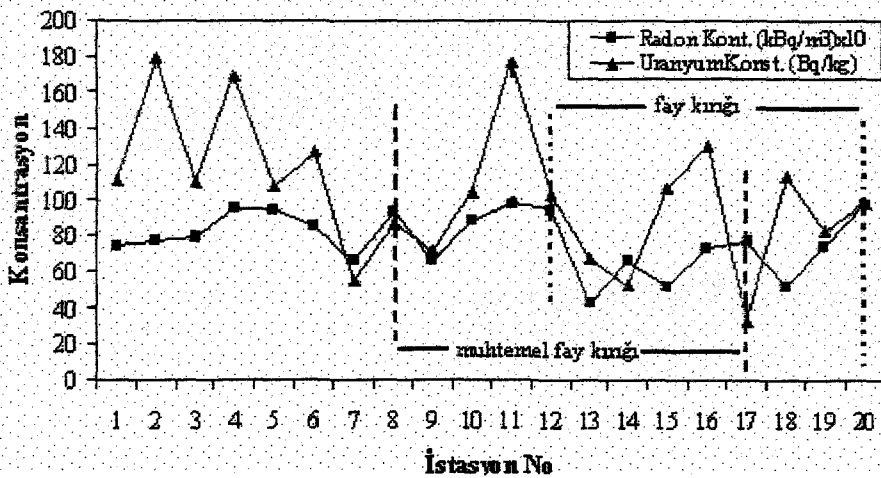


Şekil 7.7: Kuzey Anadolu Fay Zonu'ndaki toprak örneklerinin toplam alfa ile toryum aktivitesi değişimi.

gelmekte ve bazı yerlerinde ise toprak örtüsü tüf cinsi topraklardan oluşturmaktadır. Toryum aktivitesinin uranyum aktivitesine oranı (Th/U) 0,76 civarındadır ve bu oran Doğu Anadolu Fay Zonu'ndan elde edilen değerden yüksektir.

Bu çalışma bölgesindeki toplam beta aktivitesi temel seviye ile $65,4 \pm 16,5$ Bq/kg arasında ve ^{40}K ise $255,4 \pm 18,7$ ile $978,4 \pm 65,5$ Bq/kg değişmektedir. Topraktaki potasyum miktarı ise 1226,06 ile > 4000 ppm arasındadır. Topraktaki potasyum yoğunluğu ile toplam beta aktivitesi veya ^{40}K arasında herhangi bir ilişkiye rastlanmamıştır.

Kuzey Anadolu Fay Zonu'nda yapılan radon ölçümlerinde ortalama radon konsantrasyonu $7,7$ kBq/m³ olarak bulunmuştur. Bu fay zonundaki toprak havasındaki radon yoğunluğu ile toprak içerisindeki uranyum derişiminin değişimi Şekil 7.8'de gösterilmiştir. En yüksek radon konsantrasyonu, fay kırığı üzerindeki 11. ve 20. istasyonlarda $9,8$ kBq/m³ olarak bulunmuştur, ayrıca 11 numaralı istasyondan alınan toprak örneğinde ikinci en yüksek uranyum konsantrasyonuna, 20 numaralı toprak örneğinde ise ortalamanın üzerinde bir uranyum konsantrasyonuna rastlanmıştır. En yüksek uranyum derişimi 2 numaralı istasyonda bulunmasına rağmen, aynı noktadaki radon yoğunluğu ise ortalama bir değerdedir. Ortalama radon yoğunluğundan yüksek bir değerde bulunan 8. ve 17. numaralı istasyonlarda ise ortalama değerden küçük uranyum konsantrasyonu elde edilmiş, hatta en düşük uranyum konsantrasyonu 17 numaralı toprak örneğinde ölçülmüştür. Bu sonuca göre, Şekil 6.10'da çizilen fay kırığına ilave olarak 8 ve 17 numaralı istasyonlardan geçen gömülü bir fay kırığının olması ihtimali yüksektir. Çünkü Şekil 6.10'da çizilen fay kırığı tamamen arazinin topografik yapısına göre çizilmiş olduğundan, diğer kırık faylar çıplak göz ile arazinin topografik yapısına bakılarak görülememektedir.

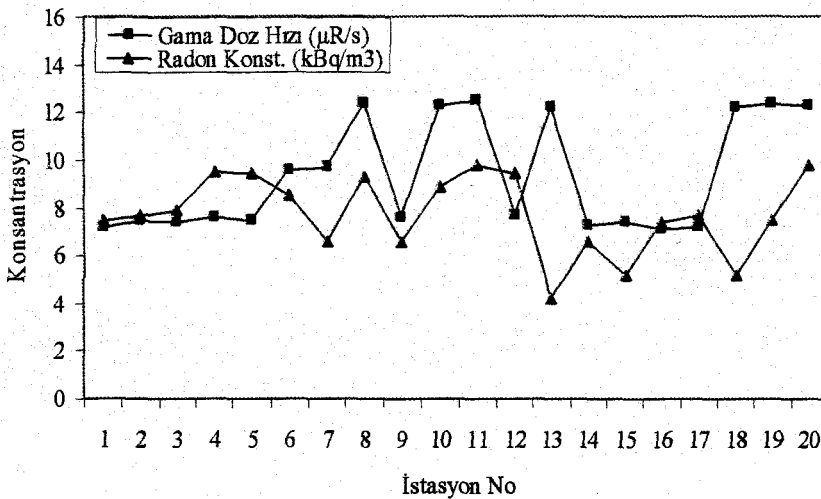


Şekil 7.8: KAFZ'nundaki toprak havasındaki radon ile uranyum dağılımı.

4 numaralı istasyonda ikinci en yüksek radon yoğunluğuna rastlanmasına rağmen, bu noktadaki toprak örneğinde ise ortalamanın çok üzerinde, üçüncü en büyük uranyum derişimi ölçülmüştür. Fay hattı bölgelerinde yapılan ilk çalışmalarda, fay hattı üzerindeki radon yoğunluğu diğer bölgelere göre oldukça yüksek bulunmuştur [31, 37].

Kuzey Anadolu Fay Zonu'nundaki profillerden elde edilen genel bir sonuç; radon konsantrasyonunun yüksek olduğu noktalardaki toprakta, 8 ve 17 numaralı toprak örneği hariç, uranyum konsantrasyonu oldukça yüksektir. Kuzey Anadolu Fay Zonu'nundaki ortalama radon yoğunluğu, Doğu Anadolu Fay Zonu'ndaki radon yoğunluğundan büyüktür. Bu sonuçta, KAFZ'nun daha aktif olduğunu göstermektedir.

Bu çalışma bölgesindeki, radon ölçüm noktalarında alınan ortalama çevresel gama doz oranı 10,1 $\mu\text{R/s}$ 'dir. En yüksek toryum ve potasyum yoğunluğunun bulunduğu toprak örneğinin (8 numaralı) hemen üzerindeki çevrede, ortalama değerin üzerinde bir çevresel gama doz oranı elde edilmiştir. En yüksek çevresel gama dozu değerine ulaşılan 26 numaralı istasyondaki toprak örneğinde ortalama değerin çok üzerinde toryum yoğunluğuna rastlanmıştır. Her bir profildeki, her bir istasyonda ölçülen fay zonundaki radon yoğunluğu ile çevresel gama radyasyon doz oranı değişimi Şekil 7.9'de gösterilmiştir. Şekil 7.9 incelendiğinde, radon yoğunluğunun yüksek olduğu noktalarda yüksek çevresel gama doz hızı elde edilmiştir, ancak en düşük radon yoğunluğunun bulunduğu 13 ve 18 nolu yerlerde yüksek gama doz hızı gözlenmiştir. Muhtemel fay kırığının tam üzerindeki nokta (8. istasyon) çevresel gama doz hızı en yüksek seviyededir, çünkü bu noktadaki toprakta toryum ve potasyum aktivitesi çok yüksektir.

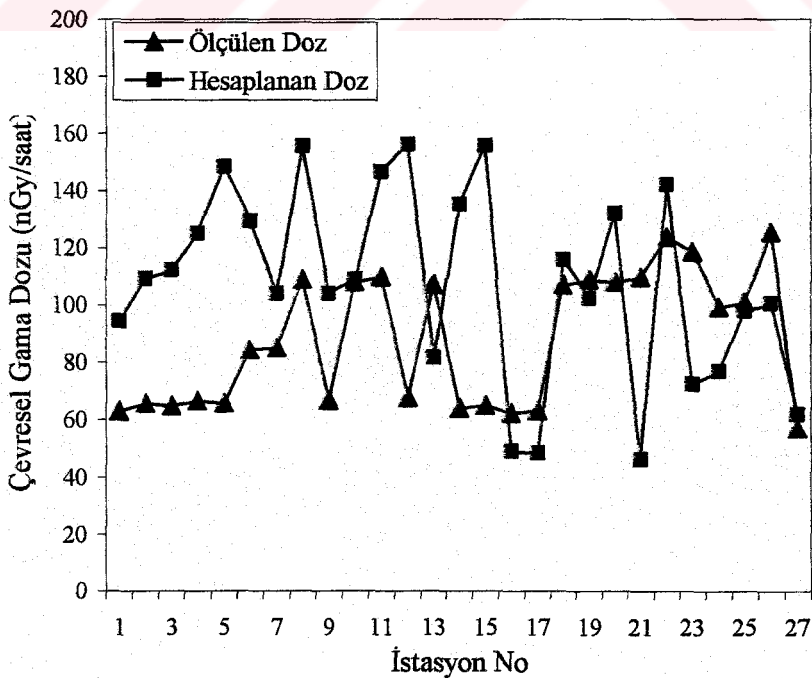


Şekil 7.9: KAFZ'nundaki istasyonlarda toprak havasındaki radon ile çevresel doz oranı değişimi.

Kuzey Anadolu Fay Sistemi üzerinde portatif bir çevresel gama doz seviyesini ölçen bir sayıcı yardımıyla yapılan ölçümler ile, toprak içerisindeki doğal radyoçekirdeklerden kaynaklanan karasal (çevresel) gama radyasyon doz seviyeleri arasındaki ilişki Şekil 7.10'de gösterilmiştir.

Bu fay sisteminde hesaplanan doz ölçülen doz dan yaklaşık 1.22 kat daha yüksektir. Bunu da nedeni yerden yaklaşık 1 m yükseklikteki tutulan doz oranına karşılık gelen karasal kaynaklı gama radyasyon dozuna neden olan topraktaki birincil radyoçekirdeklerin yoğunluğunu yüksek olmasıdır. Bu fay sistemindeki ölçümlerde de hesaplanan doz değerlerindeki dalgalanma daha yüksektir ve her iki değerinde ölçüm noktalarında hemen hemen aynı eğilimi göstermektedir. Yani, ölçülen gama dozunun yüksek olduğu noktalarda, topraktaki birincil radyoçekirdeklerden kaynaklanan çevresel gama dozunun da yüksek çıktığı gözlemlenmiştir. Bu fay sisteminde ölçülen ve hesaplanan doz değerleri, kabul edilen ve dünya ortalaması olan 55nGy/saat'ten daha yüksektir. Aynı zamanda radyum eşlenek aktivitesi dünyanın bir çok yerinde yapılan çalışmalarda bulunan ortalama değerden yüksektir [26, 49]. Bununla birlikte en önemli nedeni, kırık zonları genellikle uranyum elementinin hareketinin yüksek olduğu yerler olmasıdır.

Bu fay sistemindeki ortalama etkin doz oranı ise 0,13 mSv/yıl civarındadır. Karasal radyoçekirdeklerden kaynaklanan ortalama yıllık dış etkin doz oranının kabul edilen değeri ise 0,5 mSv/yıl'dır. Bu sonuçlara göre bölgedeki etkin yıllık doz kabul edilen değer altındadır. Bu sonuç ise, bu bölgenin de normal doğal temel seviye radyasyonlu bir bölge olduğu gösterir.



Şekil 7.10: Hesaplanan ve ölçülen çevresel gama doz dağılımları.

Çalışılan bölgeyi radyolojik açıdan değerlendirebilmek için hesaplanan ortalama dış tehlike indeksi yaklaşık olarak 0,62 civarındadır ve bu sistemdeki hiç bir ölçüm noktalarındaki tehlike indeksi değeri 1'i aşmamaktadır. Sonuç olarak, bu bölgenin de insan sağlığı açısından tehlikeli etkiye neden olmayacağı sonucuna varılabilir.

Kuzey Anadolu Fay Zonu'ndaki toprak örneklerindeki ortalama radyum eşleneği (233.62 Bq/kg), Doğu Anadolu Fay Zonlarındaki toprak örneklerindeki ortalama radyum eşleneğinden (209,2 Bq/kg) daha yüksektir. Ancak, kabul edilen maksimum radyum eşleneği değeri 370 Bq/kg olduğundan, çalışılan her iki sistemde bulunan radyum eşleneği değeri, Doğu Anadolu Fay Sistemindeki 39 numaralı ölçüm noktası hariç, bu değeri aşmamaktadır. Her iki fay sisteminde de hesaplanan doz oranları yaklaşık olarak aynıdır. Bu sonuç ise bölgenin genelinin karasal kaynaklı doz seviyesini göstermektedir ve hesaplanan ve bulunan bu değerlerin kabul edilen üst limiti üzerinde olduğu görülmektedir.

Kuzey Anadolu Fay Sistemindeki etkin doz oranı ve dış tehlike indeksi, Doğu Anadolu Fay Sisteminde bulunan değerlerden yüksektir. Özellikle dış tehlike indeksi 1 ve 1'in üzerinde bulunan yerlerdeki toprak, o bölgede yaşayan insanların, özellikle de çiftçilerin sağlığı açısından tehlikeye neden olabilir.

Çalışılan bu bölgedeki toprak örneklerindeki ağır metal miktarları sırasıyla, demir (Fe), kurşun (Pb), bakır (Cu), mangan (Mn), krom (Cr) ve çinko (Zn) için 4211 ppm, 4,83 ppm, 2,67 ppm, 279,69 ppm, 8,38 ppm ve 25,52 ppm olarak bulunmuştur. Bu sonuçlara göre, sadece bakır kabul edilen standart değerinin altında bulunmuş olup diğer ağır metal miktarları kabul edilen standart değerler arasındadır.

DAFZ ile KAFZ'nundaki toprak örneklerindeki ağır metal miktarları karşılaştırıldığında, bakır metali hariç diğer ağır metal miktarları DAFZ'nundaki toprak örneklerinden daha fazladır.

Bu çalışma, bölgenin özellikle de Türkiye'nin her yönüyle doğal radyoaktivite haritasının yapılmasına bir öncülük etmesi bakımından önemlidir. Ayrıca, karasal doğal radyoçekirdeklerin neden olduğu, karasal gama doz seviyesinin çok yüksek olduğu noktalar genellikle uranyum ve toryum maden yataklarının varlığını göstermektedir ve bu bölgelerde yaşayan canlıların sağlığı ciddi bir tehlike ile karşı karşıyadır. Bu yerleşim yerlerindeki bina içi radon yoğunluğu da artacağından, buna bağlı olarak solunumla radonun alınması iç radyasyon pozlamayı ve iç tehlike indeksini de arttıracığından insanların akciğer kanseri olma riskini arttıracaktır.

Bu tür çalışmaların periyodik olarak devam ettirilmesi, özellikle doğal radyoaktivite seviyesinin yüksek olduğu bölgelerdeki temel radyoaktivite seviyesinin bilinmesi ileriki yıllarda olabilecek bir radyoaktif kirliliğin belirlenmesinde önemli bir rol oynayacaktır. Ayrıca, özellikle

son yıllarda fay bölgelerindeki toprak, hava, su ve diğer materyaller üzerindeki, depremi önceden algılamaya yönelik fiziksel ve kimyasal analizlerin yapılmasının önemi artmaktadır. Özellikle, toprak havasındaki radon konsantrasyonunun değişiminin izlenmesi ile deprem arsındaki ilişkinin ortaya çıkarılmasına çalışılmaktadır. Kullandığımız toprak havasındaki radon yoğunluk ölçme tekniği jeolojide fay kırıklarının tespitinin yapılması ve değerlendirilmesinde en güvenilir tekniklerden birisidir. İleriki yıllarda bu çalışma bölgesinde yapılması planlanan bu ve buna benzer çalışmalarda, bu çalışma ile ortaya konulan sonuçlar araştırmacılara çok önemli bir kılavuz ve veri bankası olacaktır.

Çalışılan bölgenin çok önemli fay kırıklarının kesişim noktası olması dolayısıyla, depremleri önceden kestirebilme çalışmalarında ve sismik hareketliliğin izlenmesine yardımcı olacak teknolojik araç ve gereçlerin kurulması için çok müsait bir bölgedir. Bu çalışma, bu tür cihazların kurulması için bölgede yapılması gereken ön hazırlık çalışmaların özelliğini de taşımaktadır.

Bölgenin iki önemli fay zonu üzerinde yapılan bu çalışmanın kapsamı daha da genişletilerek, bölgenin daha büyük bir kısmı, özellikle doğal radyoaktivite ve jeolojik açıdan daha da detaylı çalışılabilecektir.

KAYNAKLAR

- [1] Kathren, R. L., 1998, NORM Sources and Their Origins. Applied Radiation and Isotopes, 49, 3, 149-168.
- [2] Valkovic, V., 2000, Radioactivity in the Environment. Elsevier Science B. V., Netherlands.
- [3] Kathren, R. L., 1984, Radioactivity in the Environment: Sources, Distribution and Surveillance. Harwood Academic Publishers, New York.
- [4] Leo, W. R., 1987, Techniques for Nuclear and Particles Physics Experiments. Springer Verlag, Berlin, Germany.
- [5] Epik, Ö., 1997, HPGe Detektörünün Verim Tayini ve Verim Fonksiyonunun Geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Nükleer Bilimler Anabilim Dalı, Bornova, İzmir.
- [6] Lapp, R. E., 1972. Nuclear Radiation Physics, Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, U.S.A.
- [7] Knoll, P., 1979, Radiation Detection and Measurement, John Wiley & Sons, Inc. New York.
- [8] Durrani, S. A., Ilić, R., 1997, Radon Measurements by Etched Track Detectors, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore.
- [9] Nikolaev, V. A., Ilić, R., 1999, Etched track radiometers in radon measurement: a Review. Radiation Measurement. 30, 1-13.
- [10] Fazal-ur-Rehman, Al-Jarallah, M. I., Musazay, M. S., Abu-Jarad, F., 2003, Applications of the Can Technique and Radon Gas Analyzer for Radon Exhalation Rate, Applied Radiation and Isotopes, 59, 353-358.
- [11] Tykva, R. and Holm, E., 1985, Low Level Environmental Radioactivity. Technoic Publication, USA.
- [12] Chiozzi, P., Pasquale, V., Verdoya, M., 2002, Heat From Radioactive Elements in Youngs Volcanics by γ -ray Spectrometry. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 119, 205-214.
- [13] Jibiri, N. N., 2001, Assessment of Health Risk Levels Associated with Terrestrial Gamma Radiation Dose Rates in Nigeria, Environment International, 27, 21-26.
- [14] Nada, A., 2003, Evaluation of Natural Radionuclides at Um-Greifat Area, Eastern Desert of Egypt, Applied Radiation and Isotopes, 58, 275-280.
- [15] Hakam, O. K., Choukri, A., Moutia, Z., Chouak, A., Cherkaoui, R., Reyss, J. L., Lferde, M., 2001, Uranium and Radium in Groundwater and Surface Water Samples Morocco, Radiation Physics and Chemistry, 61, 653-654.

- [16] Abumurad, K. M., Al-Tamimi, M., 2001, Emanation power of radon and its concentration in soil and rocks, *Radiation Measurements*, 34, 423-426.
- [17] Tzortzis, M., Tsertos, H., Christofides, S., Christodoulides, G., 2003, Gamma-ray Measurements of Naturally Occurring Radioactive Samples From Cyprus Characteristic Geological Rocks, *Radiation Measurement*. 37, 221-229.
- [18] Shenber, M. A., 1997, Measurement of Natural Radioactivity Levels in Soil in Tripoli, *Applied Radiation and Isotopes*, 48, 147-148
- [19] Abumurad, K. M., Al-Tamimi, M., 2001, Emanation Power Of Radon And Its Concentration in Soil and Rocks, *Radiation Measurements*, 34, 423-426.
- [20] Saad, A. F., Talaat, T. M., Atwa, S. T., Espinosa, G., Fuji, M., 2003, *Determination of the Uranium Content of Egyptian Phosphate Ores by Passive and Active Detectors*, *Radiation Measurements*, 36, 561-565.
- [21] Sun, H., Semkow, T. M., 1998, Mobilization of Thorium, Radium and Radon Radionuclides in Groundwater by Successive Alphas-Recoils, *Journal of Hydrology*, 205, 126-136.
- [22] Higgy R. H., Pimil, M., 1998, Natural and Man-Made Radioactivity in Soils and Plants Around the Research Reactors of Inshass, *Applied Radiation and Isotopes*, 49, 1709-1712
- [23] Steindl, K. H., Pröhl, G., 2001, Considerations on the Behavior of Long-Lived Radionuclides in Soil, *Radiant. Environ. Biophys.* 40, 93-104.
- [24] Mollah, A. S., Begum, A., Ullah, S. M., 1998, Determination of Soil-to-Plant Transfer Factors of ^{137}Cs and ^{90}Sr in the Tropical Environment of Bangladesh, *Radiant. Environ. Biophys.* 37, 125-128.
- [25] Al-Bataina, B. A., Ismail A. M., Kullab, M. K., Abumurad, K. M., Mustafa, H., 1997, Radon Measurements in Different Types of Natural Waters in Jordan, *Radiation Measurements*, 28, 591-597.
- [26] Singh, S., Malhotra, R., Kumar, J., Singh, L., 2001. Uranium Analysis of Geological Samples, Water and Plants From Kulu Area, Himachal Pradesh, India, *Radiation Measurements*, 34, 427-431.
- [27] Kullab, M. K., Al-Bataina, B. A., Ismail, M. A., Abumurad, K.M., 2001, Seasonal Variation of Radon-222 Concentrations in Specific Locations in Jordan, *Radiation Measurements*, 34, 361-364.
- [28] Cothorn, C. R. and Smith, J. E., 1987, *Environmental Radon*, *Environmental Science Research*, Volume 35, Plenum Press, New York, USA.
- [29] Toutain, J. P., 1999, *Gas Geochemistry and Seismotectonics: a Review*,

- Tectonophysics, 304, 1-27.
- [30] Singh, M., 1999, Radon in Groundwater Related to Seismic Events, Radiation Measurements, 30, 465-469.
- [31] Zmazek, B., 2002, Soil radon monitoring in the Krško Basin, Slovenia, Applied Radiation and Isotopes, 56, 649-657.
- [32] Papastefanou, C., Manolopoulou, M., Stoulos, S., Ioannidou and Gerasopoulos, E., 2001. Radon Measurements Along Active Faults in the Langadas Basin, Northern Greece. Natural Hazards and Earth System Sciences. 1, 159-164.
- [33] Ioannides, K., Papachristodoulou, C., Stamoulis, K., Karamanis, D., Pavlides, S., Chatzipetros, A., Karakala, D., 2003. Soil Gas Radon: A Tool for Exploring Active Fault Zones. Applied Radiation Isotopes, 59, 205-213.
- [34] Planinić, J., 2001, Temporal Variations of Radon in Soil Related to Earthquakes, Radiation Measurements, 55, 267-272.
- [35] Planinić, J., 2000, Searching for Earthquake Precursory: Temporal Variations of Radon in Soil and Water, Fizika B (Zagreb), 9, 2, 75-82.
- [36] Baykara, O., İnceöz, M., Aksoy, E. ve Doğru, M. , Aktif Faylar Üzerindeki Radon Anomalilerine Bir Örneğ: Doğu Anadolu Fay Sistemi , Aktif Tektonik Araştırma Grubu Sekizinci Toplantısı , 33 , Elazığ , 2004.
- [37] Al-Tamimi, M.H., Abumurad, K.M., 2001. Radon Anomalies Along Faults in North of Jordan. Radiation Measurement, 34, 397-400.
- [38] Bozkurt, E., 2001. Neotectonics of Turkey, a Synthesis. Geodinamica Acta. 14, 1-3, 3-30.
- [39] Koçyiğit, A., Özacar, A., 2003. Extensional Neotectonic Regime Through the NE Edge of the Outer Isparta Angle, SW Turkey: New Field and Seismic Data. Turkish J. Earth Science 12, 67-90.
- [40] Yaman, M., Hasar, H., Cuci Y. and Dilgin, Y., Distribution of Some Toxic Metals Between Water and Sludge in Domestic Wastewater Treatment Plant , CSI XXXI Pre-Symposium Spectroscopic Methods for Speciation of Elements, Bursa, Turkey, Eylül , 1999.
- [41] Littlemore Scientific Engineering (ELSEC), 1994, 7286 Low Level Alpha Counter User Manual. Railway Lane, Littlemore, Oxford OX4 4PZ, UK.
- [42] NE Technology Limited, 1994, Instruction Manual for Windowless Scintillation Counter (Type 6001). Bath Road, Beenham, Reading, Berkshire RG7 5PR, England.
- [43] NE Technology Limited, 1994, Instruction Manual for Lead Castle (Type 710C).

- Bath Road, Beenham, Reading, Berkshire RG7 5PR, England.
- [44] NE Technology Limited, 1991, Instruction Manual for Gamma Assay Scintillation Counter (Type 8F8/DM1-2). Sighthill, Edinburgh, EH11 4BY, Southland U.K.
- [45] Karahan, G., 1997, İstanbul'un Çevresel Doğal Radyoaktivite Seviyesinin Tayini, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Nükleer Bilimler Enstitüsü, İstanbul.
- [46] Tuncer, S., 1991, Çeşitli İçme Sularında Radyoaktivite Seviyelerinin Tayini, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Nükleer Bilimler Enstitüsü, İstanbul
- [47] Ipek, U., Öbek, E., Akca, L., Arslan, E. I., Hasar, H., Doğru, M., Baykara, O., 2002, Determination of Degradation Radioactivity and Its Kinetics in Aerobic Composting Bioresource Technology, 8, 283-286.
- [48] Baykara, O., Hasar, H., Öbek, E., Doğru, M., 2005, Determination of Radioactive Pollution From an Open Landfill, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 265, 95-99.
- [49] Yang Y., Wu, X., Jiang, Z., Wang, W., Lu, J., Lin, J., Wang W., Hsia, Y., 2005, Radioactivity Concentrations in Soils of the Xiazhuang Granite Area, China. Applied Radiation and Isotopes 63, 255-259.
- [50] WHO, 2004, Drinking-water Quality, Vol. 1 Recommendations, Geneva.
- [51] ITS, 2003, Institution of Turkish Standards. Annual Progress Report.
- [52] Baykara, O., Doğru, M., İnceöz, M., Aksoy, E., 2005, Measurements of Radon Emanation from Soil Samples in Triple-Junction of North and East Anatolian Active Faults Systems in Turkey, 39, 209-212.
- [53] Bikit, I., Slivka, J., Čonkić, Lj., Krmar, M., Vesković, M., Žikić, T. N., Varga, E., Ćurčić, S., Mrdja, D., 2005, Radioactivity of the Soil Vojvodina (Northern Province of Serbia and Montenegro), 78, 11-19.
- [54] UNSCEAR, 1982, Annex A Terrestrial Sources of Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR Report No:82, United Nations, New York, USA.
- [55] Dueñas, C., Fernández, M. C., Enriquez, C., Carretero J., Liger, E., 1998, Natural Radioactivity Levels in Andalusian Spas, Water Research, 32, 2271-2278.
- [56] Tzortzis, M., Tsertos, H., 2004, Determination of Thorium, Uranium and Potassium Elemental Concentrations in Surface Soils in Cyprus, Journal of Environmental Radioactivity, 77, 325-338.
- [57] Chiozzi, P., Pasquale, P., Verdoya P., Minato, S., 2003, Gamma-ray Activity in

the Volcanic Islands of the Southern Tyrrhenian Sea, *Journal of Environmental Radioactivity*, 67, 235-246.

- [58] Türkdoğan, M. K., Kilicel, F., Kara, K., Tuncer, I., Uygan, I., 2002, Heavy Metals in Soil, Vegetables and Fruits in the Endemic Upper Gastrointestinal Cancer Region of Turkey, *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 13, 175-179.



ÖZGEÇMİŞ

1976 yılında Elazığ'da doğdu. İlkokul eğitimini Elazığ'da, orta ve lise eğitimini İzmir'de tamamladı. 1994 yılında Fırat Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü'nde lisans eğitimine başlayıp, 1998 yılında mezun oldu. 1998-2000 yılları arasında Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimini tamamladı.

