

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

(DOKTORA TEZİ)

**BATI ANADOLU GRANİT PLUTONLARINDA
DOĞAL RADYOAKTİVİTE SEVİYESİNİN
ÇOK DEĞİŞKENLİ İSTATİSTİK ANALİZ
YÖNTEMLERİ İLE İNCELENMESİ**

Buket CANBAZ ÖZTÜRK

Tez Danışmanı : Prof. Dr. N. Füsun ÇAM

İkinci Danışmanı : Prof. Dr. Günseli YAPRAK

Fizik Anabilim Dalı

Bilim Dalı Kodu : 404.04.01

Sunuş Tarihi : 02.07.2015

Bornova-İZMİR

2015

Buket CANBAZ ÖZTÜRK tarafından DOKTORA tezi olarak sunulan “Batı Anadolu Granit Plutonlarında Doğal Radyoaktivite Seviyesinin Çok Değişkenli İstatistik Analiz Yöntemleri İle İncelenmesi” başlıklı bu çalışma E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi’nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 02.07.2015 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri:

İmza

Jüri Başkanı	: Prof.Dr. Saim SELVİ
Raportör Üye	: Prof.Dr. N.Fusun ÇAM
Üye	: Prof.Dr. Günseli YAPRAK
Üye	: Prof.Dr. İsmail MARAŞ
Üye	: Prof.Dr. Osman CANDAN

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Doktora Tezi olarak sunduğum “Batı Anadolu Granit Plutonlarında Doğal Radyoaktivite Seviyesinin Çok Değişkenli İstatistik Analiz Yöntemleri İle İncelenmesi” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

05 /06 / 2015

Buket CANBAZ ÖZTÜRK

ÖZET

BATI ANADOLU GRANİT PLUTONLARINDA DOĞAL RADYOAKTİVİTE SEVİYESİNİN ÇOK DEĞİŞKENLİ İSTATİSTİK ANALİZ YÖNTEMLERİ İLE İNCELENMESİ

CANBAZ ÖZTÜRK, Buket

Doktora Tezi, Fizik Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. N. Füsün ÇAM

İkinci Danışmanı: Prof. Dr. Günseli YAPRAK

Temmuz 2015, 129 sayfa

Bu doktora tez çalışmasında, Batı Anadolu granit plutonlarından Orhaneli, Çataldağ ve Eğrigöz granit alanlarında yürütülen çevresel gözlem programı kapsamında, jeolojik kökenli radyasyona dayalı radyometrik veri tabanının oluşturulması, elde edilen bu verilerin işlenerek dağılımların haritalanması ve çok değişkenli istatistiksel yöntemlerle değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla, Orhaneli granit alanından 22 granit, 43 toprak; Çataldağ'dan 28 granit, 57 toprak ve Eğrigöz'den 23 granit, 54 toprak olmak üzere toplam 73 granit ve 154 toprak örneği alınmış, doğal gama yayımlayıcı radyonüklitlerin (^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K) aktivite konsantrasyonları NaI(Tl) gama spektrometre sistemi ile ölçülmüştür. Ayrıca, jeojenik radon potansiyelini de değerlendirebilmek için yerinde anlık toprak gazı radon ölçülmüş ve topraktan ^{222}Rn salınım hızı hesaplanmıştır. Söz konusu doğal radyonüklitlerden kaynaklanan havada soğurulmuş doz hızları UNSCEAR (2000) raporunda tavsiye edilen tipik aralık ($10\text{-}200\text{ nGy h}^{-1}$) içinde bulunmuştur. Jeolojik yapı ve radyometrik ölçümler arasındaki ilişkinin çok değişkenli istatistik yöntemlerle ortaya konulduğu ve haritalandığı bu tez çalışması Batı Anadolu granit plutonlarında (Orhaneli, Çataldağ ve Eğrigöz) jeolojik yapıya dayalı olarak radyolojik riskin değerlendirilmesinde önemli bir veri tabanı oluşturmaktadır.

Anahtar sözcükler: Jeojenik radyasyon, granit alanlar, NaI(Tl) gama spektrometresi, radyolojik risk parametreleri, dağılım haritaları, çok değişkenli istatistik analiz yöntemleri.

ABSTRACT**INVESTIGATION OF NATURAL RADIOACTIVITY LEVELS IN
WEST ANATOLIA GRANITE PLUTONS WITH MULTIVARIATE
STATISTICAL ANALYSIS METHODS**

CANBAZ ÖZTÜRK, Buket

PhD in Physics

Supervisor: Prof. Dr. N. Füsün ÇAM

Co-Supervisor: Prof. Dr. Günseli YAPRAK

July 2015, 129 pages

In this doctoral thesis, the scope of the environmental monitoring program carried out in Orhaneli, Çataldağ and Eğrigöz granite areas of Western Anatolia granite plutons, it is aimed to create of the radiometric database based on the geological origin of radiation, to map distributions processing obtained these data and to evaluate with multivariate statistical methods. For this purpose, totally 73 granite and 154 soil samples were taken, including from Orhaneli granite area 22 granite, 43 soil; from Çataldağ 28 granite 57 soil and from Eğrigöz 23 granite, 54 soil; activity concentration of natural gamma emitting radionuclides (^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K) was measured by NaI (Tl) gamma spectrometry system. Also, to assess the geogenic radon potential, in situ instant soil gas radon was measured and the flux density of ^{222}Rn from ground was calculated. The corresponding absorbed dose rates in air from all those radionuclides were in the range of (10-200 nGy h⁻¹) recommended in the UNSCEAR (2000) report. This thesis study, which is mapping and setting out the relationship between geological structure and radiometric measurements by means of multivariate statistical methods, is an important data base for assessing the radiological risk on the basis of geological structure in Western Anatolia granite plutons (Orhaneli, Çataldağ and Eğrigöz).

Keywords: Geogenic radiation, granite areas, NaI(Tl) gamma spectrometry, radiological risk parameters, distribution maps, multivariate statistical analysis.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, Değerli Hocam Sayın Prof. Dr. N. Fusun ÇAM’a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma süresince her türlü yardım ve fedakârlığı sağlayan, bilgi ve tecrübesi ile çalışmamı şekillendiren Sayın Hocam Prof. Dr. Günseli YAPRAK’a içten teşekkürlerimi sunarım.

Arazi çalışmalarında bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan, jeolojik bilgileri yorumlamamda katkıda bulunan, mevcut laboratuvar olanaklarını kullanmama izin veren Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Sayın Prof. Dr. Osman CANDAN’a teşekkür ederim.

Çalışmamda kullanmış olduğum ArcGIS haritalama programını öğrenmem aşamasında benden desteğini esirgemeyen Dr. M. Tolga ESETLİLİ’ye teşekkür ederim.

İstatistiksel analizleri yorumlamamda katkıda bulunan Yrd. Doç.Dr. Özge ELMATAŞ GÜLTEKİN’e teşekkür ederim.

Arazi ve laboratuvar çalışmaları sırasında yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. İbrahim ÖZKEN’e, Dr. Fadıl İNCEOĞLU’na, Şenay ŞAHİN’e, Yusuf ÜNLÜSOY’a, Serkan GÜRLEYEN’e, Raziye SARIKÖSE’ye, Bengi Ekin ÖZDİŞ’e ve Murat Hazer UYGUNOL’a teşekkürü bir borç bilirim.

Bu çalışmaya Bilimsel Araştırma Projeleri Fonu kapsamında (2013FEN032 numaralı proje) maddi destek sağlayan Ege Üniversitesi’ne teşekkür ederim.

Her konuda sabırla yardımcı olan, maddi manevi desteklerini esirgemeyen eşim Onur ÖZTÜRK’e, annem Muteber CANBAZ’a ve babam İsmet CANBAZ’a tüm kalbimle teşekkür ederim. Bu çalışmayı, en büyük manevi destekçim kızım Defne ÖZTÜRK’e ithaf ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	vii
ABSTRACT	ix
TEŞEKKÜR	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xvii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xxi
RESİMLER DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	5
2.1 Batı Anadolu Granit Plutonlarının Oluşumu	8
2.1.1 Eosen magmatizması	11
2.1.2 Miyosen magmatizması	13
2.2 Granitik Alanlar ve Doğal Radyoaktivite	14
3. MATERYAL VE METOT	19
3.1 Radyolojik Gözlem Programı	19
3.1.1 Genel jeolojik yapının değerlendirilmesi	19
3.1.2 Çalışma alanlarında örnekleme ve örnek hazırlama	32
3.1.3 NaI(Tl) gama spektrometre sistemi ile doğal radyonüklit analizi	36

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
3.1.4 Radyolojik risk parametrelerinin hesaplanması	45
3.2 Radon Gözlem Programı.....	47
3.2.1 Toprak gazı radon ölçümü	47
3.2.2 Radon salınım hızının tayin edilmesi.....	48
3.3 Dağılım Haritalarının Oluşturulması	48
3.4 İstatistiksel Veri Analizi.....	49
4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA	51
4.1 Radyolojik Gözlem	51
4.1.1 Orhaneli plutonunun radyolojik karakteristikleri.....	51
4.1.2 Çataldağ plutonunun radyolojik karakteristikleri	59
4.1.3 Eğrigöz plutonunun radyolojik karakteristikleri	65
4.2 Radon Gözlem.....	73
4.2.1 Çalışma alanlarında yerinde toprak gazı ^{222}Rn ölçümü	73
4.2.2 Topraktan ^{222}Rn salınım hızının tayini.....	76
4.3 Dağılım Haritaları	77
4.3.1 Orhaneli plutonu radyolojik haritalar.....	77
4.3.2 Çataldağ plutonu radyolojik haritalar	83

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

4.3.3 Eğrigöz plutonu radyolojik haritalar.....	89
4.4 Sonuçların Çok Değişkenli İstatistik Analiz Yöntemleri İle	
Değerlendirilmesi	95
4.4.1 Korelasyon analizi	95
4.4.2 Varyans analizi (ANOVA-MANOVA).....	104
4.3.3 Kümeleme Analizi	108
5. SONUÇLAR.....	113
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	121
ÖZGEÇMİŞ	129
EKLER	

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Jeojenik radon risk parametreleri	8
2.2 Doğu Akdeniz'deki aktif tektonik hatları gösteren harita.....	9
2.3 Türkiye ve çevresindeki ana tektonik üniteleri gösteren genelleştirilmiş harita.....	10
2.4 Kuzey Batı Anadolu'daki volkanik kayalar ve granitik plutonların dağılımı.....	11
3.1 Çalışma bölgesinin jeoloji haritası	20
3.2 Orhaneli plutonu granit ve toprak örnekleme noktaları	33
3.3 Çataldağ plutonu granit ve toprak örnekleme noktaları	34
3.4 Eğrigöz plutonu granit ve toprak örnekleme noktaları.....	35
3.5 EG49 kodlu örneğin 10000s süre ile alınan gama spektrumu ve aktivite hesaplarında kullanılan gama enerjileri	37
3.6 ^{232}Th sintilasyon gama spektrumu ve seçilen enerji aralığı	38
3.7 ^{238}U sintilasyon gama spektrumu ve seçilen enerji aralığı	39
3.8 ^{40}K sintilasyon gama spektrumu ve seçilen enerji aralığı	40
3.9 Radyoaktif denge durumuna göre ^{238}U serisinin gruplandırılması	45
4.1 Orhaneli plutonu granitik kayalarda gözlenen doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonlarına ait kümülatif dağılım grafiği.....	55
4.2 Orhaneli plutonu toprak örneklerinde gözlenen doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonlarına ait kümülatif dağılım grafiği.....	56

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.3 Orhaneli plutonu granitik kayalara ait radyolojik risk parametrelerine ilişkin box plot grafiğı.....	58
4.4 Orhaneli plutonu toprak örneklerine ait radyolojik risk parametrelerine ilişkin box plot grafiğı.....	58
4.5 Çataldağ plutonu granitik kayalarda gözlenen doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonlarına ait kümülatif dağılım grafiğı	62
4.6 Çataldağ plutonu toprak örneklerinde gözlenen doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonlarına ait kümülatif dağılım grafiğı	63
4.7 Çataldağ plutonu granitik kayalara ait radyolojik risk parametrelerine ilişkin box plot grafiğı.....	64
4.8 Çataldağ plutonu toprak örneklerine ait radyolojik risk parametrelerine ilişkin box plot grafiğı.....	65
4.9 Eğrigöz plutonu granitik kayalarda gözlenen doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonlarına ait kümülatif dağılım grafiğı	70
4.10 Eğrigöz plutonu toprak örneklerinde gözlenen doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonlarına ait kümülatif dağılım grafiğı	70
4.11 Eğrigöz plutonu granitik kayalara ait radyolojik risk parametrelerine ilişkin box plot grafiğı.....	72
4.12 Eğrigöz plutonu toprak örneklerine ait radyolojik risk parametrelerine ilişkin box plot grafiğı.....	72
4.13 Orhaneli plutonu yerinde toprak gazı ölçümleri.....	73
4.14 Çataldağ plutonu yerinde toprak gazı ölçümleri.....	74

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.15 Eğrigöz plutonu yerinde toprak gazı ölçümleri.....	75
4.16 Orhaneli plutonu yüzey topraklarında ^{226}Ra dağılımı	78
4.17 Orhaneli plutonu yüzey topraklarında ^{232}Th dağılımı	79
4.18 Orhaneli plutonu yüzey topraklarında ^{40}K dağılımı.....	80
4.19 Orhaneli plutonunda doğal radyasyondan kaynaklanan karasal gama doz dağılımı	81
4.20 Orhaneli plutonunda yüzey topraklarından salınan radon akısı	82
4.21 Çataldağ plutonu yüzey topraklarında ^{226}Ra dağılımı.....	84
4.22 Çataldağ plutonu yüzey topraklarında ^{232}Th dağılımı.....	85
4.23 Çataldağ plutonu yüzey topraklarında ^{40}K dağılımı.....	86
4.24 Çataldağ plutonunda doğal radyasyondan kaynaklanan karasal gama doz dağılımı	87
4.25 Çataldağ plutonunda yüzey topraklarından salınan radon akısı.....	88
4.26 Eğrigöz plutonu yüzey topraklarında ^{226}Ra dağılımı	90
4.27 Eğrigöz plutonu yüzey topraklarında ^{232}Th dağılımı	91
4.28 Eğrigöz plutonu yüzey topraklarında ^{40}K dağılımı	92
4.29 Eğrigöz plutonunda doğal radyasyondan kaynaklanan karasal gama doz dağılımı	93

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.30 Eğrigöz plutonunda yüzey topraklarından salınan radon akısı.....	94
4.31 Orhaneli plutonu granit kayaçlarda eU, eTh ve K ilişkisini gösteren üçgen grafik	98
4.32 Orhaneli plutonu toprak örneklerinde eU, eTh ve K ilişkisini gösteren üçgen grafik.....	99
4.33 Çataldağ plutonu granit kayaçlarda eU, eTh ve K ilişkisini gösteren üçgen grafik	101
4.34 Çataldağ plutonu toprak örneklerinde eU, eTh ve K ilişkisini gösteren üçgen grafik.....	101
4.35 Eğrigöz plutonu granit kayaçlarda eU, eTh ve K ilişkisini gösteren üçgen grafik	103
4.36 Eğrigöz plutonu toprak örneklerinde eU, eTh ve K ilişkisini gösteren üçgen grafik	104
4.37 Bir dendrogramın yapısı	109
4.38 Granit örneklerinin ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktivite konsantrasyonlarına göre kümelenmesini gösteren dendrogram	110
4.39 Toprak örneklerinin ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktivite konsantrasyonlarına göre kümelenmesini gösteren dendrogram	111
4.40 Toprak örneklerinin ^{226}Ra ve ^{232}Th aktivite konsantrasyonlarına göre kümelenmesini gösteren dendrogram	112

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Kabuksal kayalarda gözlenen doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonları	15
2.2 Dünyadaki çeşitli ülkelerde granit alanların radyolojik özellikleri	16
3.1 Çalışma alanlarında yürütülen metodoloji	19
3.2 Orhaneli granitinin başlıca alan, petrografik ve jeokimyasal karakteristikleri	23
3.3 Çataldağ granitinin başlıca alan, petrografik ve jeokimyasal karakteristikleri	27
3.4 Eğrigöz granitinin başlıca alan, petrografik ve jeokimyasal karakteristikleri	31
3.5 Gama spektrometre sisteminin duyarlılık faktörleri.....	42
3.6 Gama spektrometre sisteminin sıyırma oranları.....	43
4.1 Orhaneli plutonu granitik kayalar için tanımlayıcı istatistik	52
4.2 Orhaneli plutonu toprak örnekleri için tanımlayıcı istatistik	53
4.3 Çataldağ plutonu granitik kayalar için tanımlayıcı istatistik.....	60
4.4 Çataldağ plutonu toprak örnekleri için tanımlayıcı istatistik	61
4.5 Eğrigöz plutonu granitik kayalar için tanımlayıcı istatistik	67
4.6 Eğrigöz plutonu toprak örnekleri için tanımlayıcı istatistik.....	68

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
4.7 Çalışma alanlarında anlık toprak gazı ölçüm sonuçları.....	73
4.8 Çalışma alanlarında radon salınım hızına ilişkin tanımlayıcı istatistik	76
4.9 Kayaç ve toprak örnekleri için uygulanacak korelasyon analizleri	96
4.10 Orhaneli plutonu kayaç ve toprak örnekleri için doğal radyonüklitler arasındaki korelasyon.....	97
4.11 Çataldağ plutonu kayaç ve toprak örnekleri için doğal radyonüklitler arasındaki korelasyon.....	100
4.12 Eğrigöz plutonu kayaç ve toprak örnekleri için doğal radyonüklitler arasındaki korelasyon.....	102
4.13 Varyansların homojenliği testi.....	106
4.14 Varyansların analizi tablosu	106
4.15 Çoklu karşılaştırma tablosu	107
4.16 Bağımlı değişkenlere göre oluşturulmuş alt gruplar.....	108
5.1 Plutonlara göre granit ve toprak örneklerinin radyometrik özellikleri	114
5.2 Korelasyon analizi sonuçları	118
5.3 Granit ve topraklar için Th/U ve Th/K oranları.....	118

RESİMLER DİZİNİ

<u>Resim</u>	<u>Sayfa</u>
3.1 Orhaneli granitlerinin tipik görünüşleri	20
3.2 Çataldağ granitoidinden bir görünüm	24
3.3 Eğrigöz çalışma alanında gözlenen granitlerin genel arazi görünüşleri	30
3.4 Yerinde toprak gazı radon ölçümü ve ölçüm sistemi.....	47

1. GİRİŞ

Çevresel radyoaktivite gözlem çalışmaları, çevredeki radyoaktivite seviyelerinin ve insanlar üzerindeki etkilerinin belirlenmesini amaçlayan sistematik çalışmalar bütünü olarak tanımlanabilir. Bu programın rutin olarak yürütülmesi, halkın yaşadığı çevre hakkında bilinçlenmesinin yanı sıra gelecekte olabilecek radyoaktif kontaminasyonun çevre ve insan üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesine de olanak sağlamaktadır.

Avrupa Birliği (AB) Ortak Araştırma Merkezi (Joint Research Centre, JRC)'nin misyonu AB politikalarına bilimsel destek sağlamaktır. Ayrıca, JRC'nin Çevresel Radyoaktivite Gözlem (The Radioactivity Environmental Monitoring, REM) grubu tarafından Avrupa mevzuatına (Euratom Antlaşması'na) dayalı olarak yürütülen görevlerinden biri de; veri toplama, doğrulama, değerlendirme ve harmonize etme yoluyla çevredeki radyoaktivite seviyeleri hakkında bilgi sağlamaktır (Dubois et al., 2010). Avrupa Birliği (AB) üyesi ülkelerde, binden fazla gözlem istasyonunda radyoaktivite ve doz hızı ölçümleri sürekli olarak gerçekleştirilmekte ve elde edilen veriler eş zamanlı olarak Avrupa Komisyonu'na iletilmektedir. AB'deki bu çevresel gözlem programının temel amacı, nükleer kazalar sonucu açığa çıkan yüksek radyasyon seviyelerine karşı gereken uyarıların yapılması ve önlemlerin alınmasıdır. Bununla birlikte, söz konusu radyolojik gözlem programı "doğal background" düzeyi için de büyük bir veri bankası oluşturmaktadır. Bu verilere dayalı olarak radyasyon/doz haritaları yapılmakta ve *Avrupa Doğal Radyasyon Atlası* oluşturulmaktadır (Bossew et al., 2015).

Radyolojik açıdan bakıldığında, karasal çevrede en önemli doğal radyonüklitler ^{232}Th , ^{238}U ve onu bozunum ürünü olan ^{222}Rn 'dir. Teknik olarak, karasal doğal radyonüklitler jeolojik/jeokimyasal yapıya dayalı bir haritalama ile daha iyi açıklanabilirler. O halde, jeolojik kökenli radyasyonu kontrol eden temel faktörler bölgenin jeolojik/jeokimyasal yapısı ve tektonik özellikleridir. Ayrıca, faylar, kırıklar, makaslama zonları, yer altı su havzaları gibi yapısal jeolojik faktörler ile toprağın permeabilitesi (geçirgenliği), nem içeriği, partikül boyutu gibi fiziksel faktörler de topraktaki radon konsantrasyonunu ve radon salınımını kontrol eden etkenlerdendir.

Bulunduğu bölgenin jeokimyasal yapısına ve jeolojik oluşumuna bağlı olarak değişik oranlarda doğal radyonüklitleri (^{238}U , ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K)

yapısında bulunduran granitler, magmanın yer kabuğu tabakaları arasında yavaş yavaş katılaşması sonucu oluşan magmatik kayalardır.

Kuzeybatı Anadolu'da İzmir-Ankara-Erzincan Okyanusu'nun kapanmasını takiben gelişen çarpışma sonrası magmatizma Orta Eosen (Lütesiyen)'de başlamıştır. Bu magmatik aktivitenin ürünleri, İzmir-Ankara-Erzincan suture zonunun kuzeyinde yaklaşık doğu-batı uzanımlı bir hat (Armutlu Yarımadası, Kapıdağ Yarımadası, Marmara Adası, Biga Yarımadası) boyunca dizilmektedirler. Eosen yaşlı magmatik seriye ait plutonlar (Karabiga, Kapıdağ, Armutlu, Orhaneli, Topuk, Tepeldağ, Göynükbelen, Sarıkavak, Kaymaz ve Sivrihisar) granitik, volkanikler (Balıklıçeşme) ise bazik-andezitik-asidik nitelikli kayalardan oluşurlar. Çarpışma sonrası magmatizma ikinci evre ürünlerini ise Oligosen ve Oligo-Miyosen döneminde vermiştir. İkinci evre magmatik seri, Eosen yaşlı birinci evre magmatik serinin daha güneyinde yer almakta ve yine yaklaşık doğu-batı uzanımlı bir hat boyunca dizilmektedir. Oligosen-Miyosen yaşlı magmatik seriye ait plutonlar (Kestanbol, Evciler, Eybek, Kozak, Ilıca-Şamlı, Çataldağ, Koyunoba ve Eğrigöz) granitik, volkanikler (Sarıkaya/Çan) ise genellikle andezitik-asidik karakterde kayalardan oluşmaktadırlar (Akgündüz vd., 2015).

Farklı bileşimlerde magmatik kayaların ve bu magmatik kayalarla ilişkili farklı tipte cevherleşmelerin yaygın olarak gözlemlendiği Ege bölgesi, genişlemeli tektonik rejimin dünyadaki önemli örneklerinden biridir. Gerek bölgenin tektonizması ve gerekse bölgede yüzeylenen Senozoyik yaşlı granitoidler ve bu granitoidlerle doğrudan veya dolaylı ilişkili farklı tipte birçok maden yatak ve zuhurunun bulunması nedeniyle bölge bugüne kadar çok sayıda çalışmaya konu olmuştur (Delibaş vd., 2012). Elde birçok çalışma olmasına rağmen, bu çalışmalar yerel bazı kayalar ve konular üzerinde yoğunlaşmış, çoğunlukla jeokimyasal ağırlıklı incelemeler niteliğinde olmuştur. Granitoid alanların jeolojik yapılarının değerlendirilerek radyolojik risk kriterlerinin ortaya konulduğu türde çok disiplinli ve ayrıntılı radyolojik gözlem çalışmaları azdır.

Batı Anadolu, granitoid alanların radyolojik etkisini araştırmak için en iyi doğal laboratuvarlarından biri olmasına rağmen henüz granitik plutonların doğal radyoaktivite seviyelerine ilişkin nicel bilgiler oldukça sınırlıdır ve literatür çalışmaları sadece birkaç çalışmanın Kuzey Batı Anadolu'da gerçekleştirildiğini göstermektedir (Canbaz et al. 2010; Karadeniz et al. 2011; Canbaz Öztürk et al. 2013). Bu backgrounda (jeolojik yapıya) dayalı olarak, Batı Anadolu granit

plutonlarından Orhaneli, Çataldağ ve Eğrigöz granit alanlarında yeni, kapsamlı bir radyometrik gözlem çalışması gerçekleştirilmesi amacıyla sunulan doktora tez çalışmasında, jeolojik yapısı gereği yüksek radyoaktivite içerdiği bilinen Orhaneli, Çataldağ ve Eğrigöz granit alanlarında

- ✓ toprak ve kayaç örneklerinde doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonlarının belirlenmesi,
- ✓ radyolojik risk tayini için karasal doğal radyasyondan kaynaklanan içsel ve dışsal dozlarının hesaplanması,
- ✓ yerinde toprak gazı ölçümü ve topraktan ^{222}Rn salınım hızının hesaplanması,
- ✓ dağılım haritalarının oluşturulması ve
- ✓ elde edilen sonuçların çok değişkenli istatistik analiz yöntemleri ile değerlendirilmesi hedeflenmiştir.

2. GENEL BİLGİLER

Avrupa Birliği Ortak Araştırma Merkezi (Joint Research Centre, JRC) bünyesinde yer alan Çevresel Radyoaktivite Gözlem (The Radioactivity Environmental Monitoring, REM) grubu, Çernobil kazası sonrasında (26 Nisan 1986) bir veri bankasının oluşturulması ve Avrupa Birliği (AB) üye ülkeleri ile Avrupa Komisyonu (AK) arasında bilgi alışverişinin geliştirilmesi amacıyla 1988 yılında kurulmuştur. Çevresel radyoaktivite seviyelerinin belirlenmesi, değerlendirilmesi ve harmonizasyonu için yöntemlerin geliştirilmesi, hem rutin hem de acil durumlar için çevredeki radyoaktivite hareketinin modellenmesi ve ayrıca kamu için bu bilgilerin açık ve ulaşılabilir duruma getirilmesi REM aktivitelerinin ana çerçevesini oluşturur (JRC/REM, 2015).

Avrupa Komisyonu'nun çevredeki radyoaktivite düzeyleri üzerine nitelikli bilgi sağlama görevi Avrupa Komisyonu yasalarında (özellikle Euratom Antlaşması'nın 35-36. Maddelerinde ve bir radyolojik olay durumunda erken bilgi alışverişi için toplumdaki düzenlemeler konusunda 87/600 sayılı Konsey kararı'nda) belirlenmiş ve detaylandırılmıştır (JRC/REM, 2015).

İleriye yönelik bilimsel çalışmalar için Çernobil kazasının bilimsel kaydının tutulması, izleme raporunun hazırlanması ve AB üyesi ülkelerinin radyoaktivite gözlem verilerinin saklanması hedefleri doğrultusunda REM veri bankası oluşturulmuştur. 1984'ten beri hava, toprak, su, süt, et ve sebze başta olmak üzere çevresel örnekler ve gıda maddeleri için hem yirmi sekiz AB üye ülkelere ait veriler hem de Avrupa'daki diğer ülkelere ait veriler bu bankada toplanmaktadır. REM veri bankasına kayıtlı güncel verilerin toplam sayısı 2 milyonu aşmaktadır. Verilerin aynı şemsiye altında toplanması amacıyla tasarlanan ve geliştirilen "REM veri gönderme aracı" ile tüm veriler JRC'nin ulusal iletişim noktalarına gönderilirler. Dışarıdaki kullanıcılar bankadaki verilere on-line olarak ulaşabilir, bu verileri kendi bilgisayarlarına indirebilir ve kullanabilirler (JRC/REM, 2015).

Ayrıca, 1987 yılından beri REM, Avrupa Komisyonu'na, Avrupa Parlamentosu'na ve Üye ülkelere çevresel radyoaktivite hakkında nitelikli bilgi sağlayarak kendi sorumlulukları dahilinde Avrupa Komisyonu'nu (AK) hem acil hem de rutin durumlar için bilgilendirmektedir:

- Bir nükleer veya radyolojik acil durumda REM, resmi AK acil ağı olan ECURIE (European Community Urgent Radiological Information Exchange)

aracılığıyla tüm resmi bilgilerin yanı sıra bir kaza olduğunu bildiren mesajların yayınlanması; EURDEP (European Radiological Data Exchange Platform) sistemi ile 37 Avrupa ülkesinde yer alan otomatik gözlem istasyonlarından alınan gerçek zamanlı bilgilerin ulusal ve uluslararası yetkili mercilere iletilmesi ve ENSEMBLE (komisyonda bu işi yapan topluluk) aracılığıyla atmosferik dağılım tahminleri modellemeleriyle temel veri ve bilgi alışverişi için destek sağlamaktadır.

•Rutin ölçümler ise REM veri tabanında yönetilmektedir. Bu veri tabanı 1984'ten beri AB üye ülkelerine ait çevresel radyoaktivite verilerini içermektedir. Bu veri tabanı, yıllık raporların hazırlanmasının yanı sıra Çernobil Depozisyon Atlas'ı gibi bazı özel yayınların hazırlanmasına da olanak sağlamaktadır. Ek olarak, yetkili otoriteler ile iş birliği içinde, bir Doğal Radyasyon Atlası (European Atlas of Natural Radiation, EANR) geliştirilme aşamasındadır (JRC/REM, 2015).

Avrupa Doğal Radyasyon Atlas'ının oluşturulmasında;

Temel hedefler:

- Kamu bilincini artırmak (dolaylı olarak siyasi farkındalık): **didaktik ve eğitimsel hedef**,
- Halkı yaşadığı çevredeki radyoaktivite hakkında bilgilendirmek, halkın **endişelerini gidermek**,
- Metodoloji ve bilimsel açıdan katkıda bulunarak **referans malzeme** sağlamak,
- Yüksek seviyeli** bölgelerin belirlenmesi için veri tabanı sağlamak,

Dolaylı hedefler:

- Bilimsel toplantılar, çalıştaylar aracılığıyla radon haritalama, tanımı ve risklerin tahmini gibi karmaşık konularda **bilimsel iletişimi desteklemek ve teşvik etmek**;
- Epidemiyolojik, jeolojik, radyoekolojik vb. disiplinler arası bilimsel çalışmalar ile **harmonize veri** oluşturmak;
- Radon eylem planı** için AB Üye ülkelere destek sağlamak

olarak sıralanmaktadır (Gruber et al., 2012).

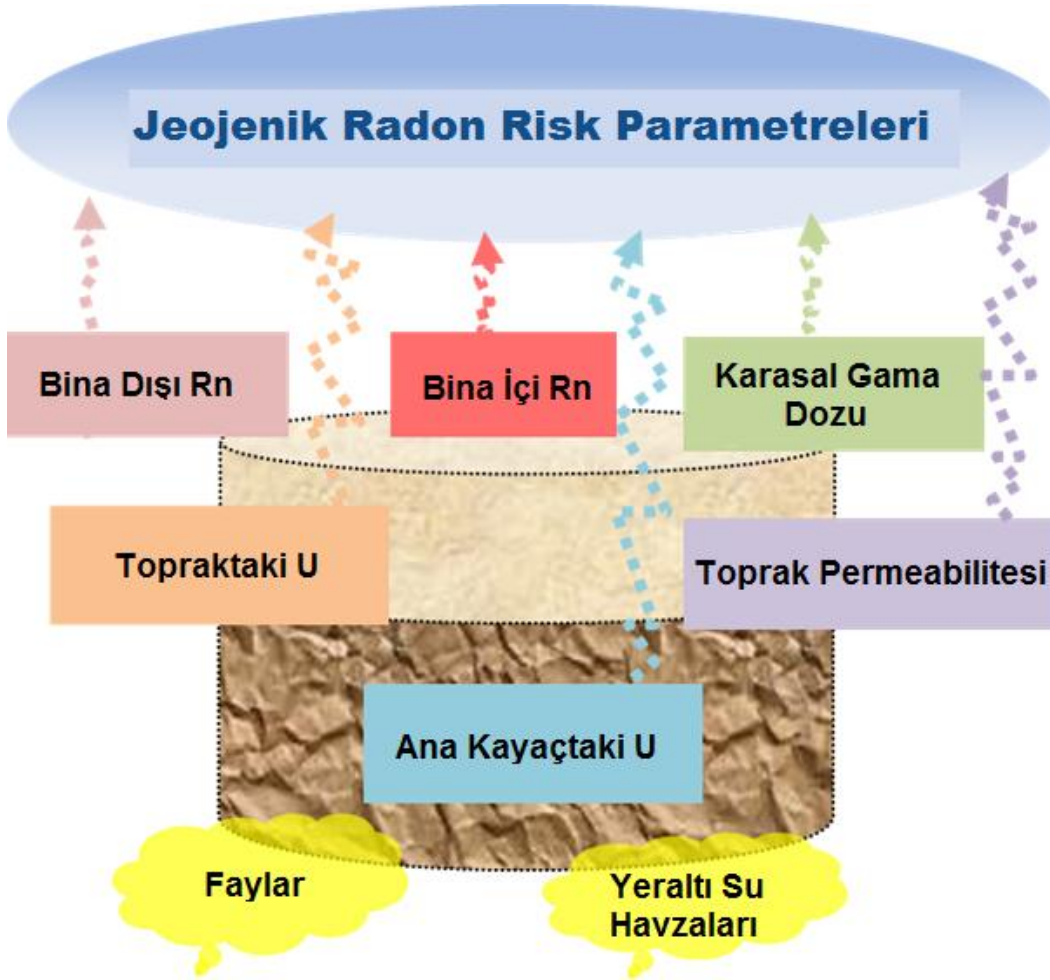
Avrupa Doğal Radyasyon Atlas'ını oluşturacak temel haritalar ise,

- Bina içi radon
- Jeojenik radon
- Kozmik radyasyon
- Bina dışı radon
- Karasal gama doz hızı
- Karasal radyasyon kaynakları
- Yeraltı ve yerüstü suları
- İçsel ve dışsal maruz kalma
- Doğal radyasyondan kaynaklanan toplam doz

olarak sıralanmaktadır. AB'de bilimsel destek kapsamında, 2005 yılında REM grubu, Avrupa Doğal Radyasyon Atlası hazırlamaya yönelik ilk adım olarak, Avrupa'daki evlerde bina içi radonun haritalanması konusunda çalışmalarını sürdürmektedir (Dubois et al., 2010). Temel haritalardan, jeojenik radon haritası ileri düzeyde planlama, kozmik radyasyon haritası gelişme ve diğer haritalar ise tartışma aşamasındadır (Gruber et al., 2012).

Türkiye'de çevresel radyoaktivitenin belirlenmesi amacıyla toprak ve kayaç örneklerinde radyoaktivite seviyelerinin belirlenmesine yönelik birçok çalışma gerçekleştirilmiştir (Camgöz ve Yaprak, 2009; Yaprak and Aslani, 2010; Kam et al., 2010; Otansev et al., 2012; Tufan and Bostancı, 2012; Agar et al., 2014; Özmen et al., 2014). Ancak, jeojenik radyasyon konusunda özelleştirilmiş çevresel radyoaktivite çalışmaları oldukça sınırlıdır. Bu eksiklik göz önüne alınarak, Batı Anadolu granit plutonlarından Orhaneli, Çataldağ ve Eğrigöz granit alanlarında yürütülen çevresel gözlem programı kapsamında gerçekleştirilen doktora tez çalışmasında, jeojenik radyasyona dayalı radyometrik veri tabanının oluşturulması, elde edilen bu verilerin işlenerek dağılımların haritalanması ve istatistik olarak değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Jeojenik radyasyonun temel bileşenleri ana kayaç ve topraktaki doğal radyonüklitler, karasal gama doz hızı ve topraktaki radon olarak sıralanabilir (Şekil 2.1). Bu radyometrik bileşenleri kontrol eden temel faktörler bölgenin jeolojik/jeokimyasal yapısı ve tektonik özellikleridir. Bunun yanı sıra, topraktaki radon konsantrasyonunu ve radon salınımını faylar, kırıklar, makaslama zonları, yer altı su havzaları gibi yapısal jeolojik faktörler ve toprağın permeabilitesi (geçirgenliği), nem içeriği, partikül boyutu gibi fiziksel faktörler kontrol eder. Bu bağlamda, ilk önce Batı Anadolu tektonik yapısı ve granit alanların oluşumu değerlendirilmiş, daha sonra Dünya

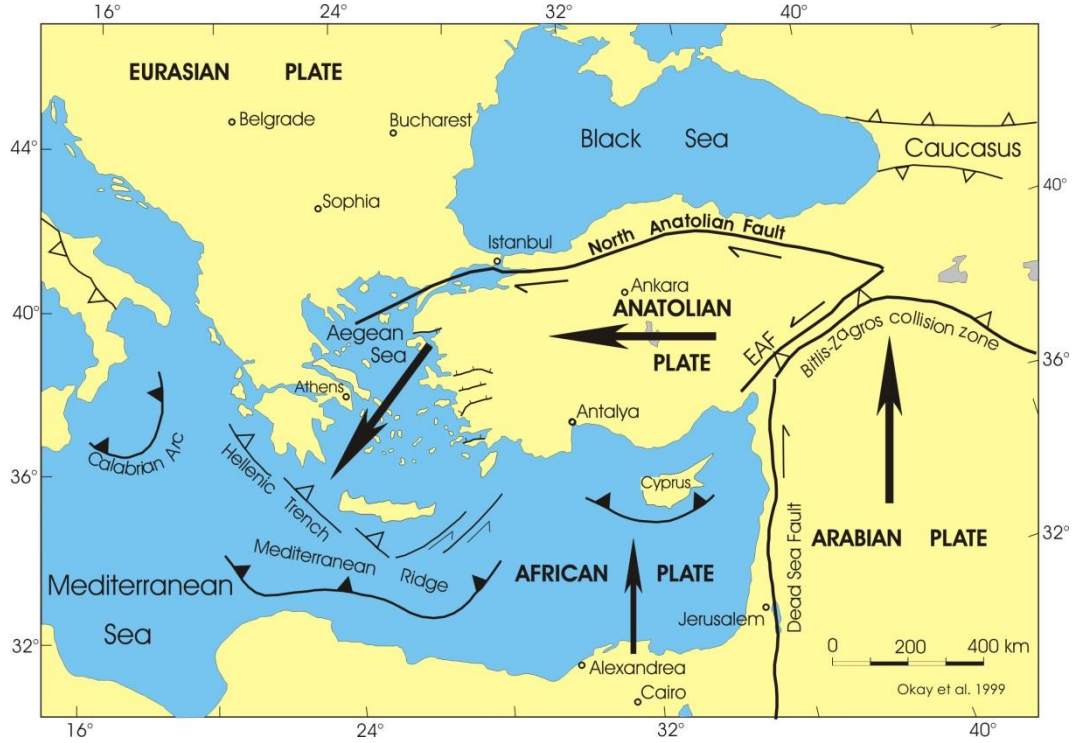
üzerinde granit alanlara ait radyometrik veriler irdelenmiş ve aşağıdaki başlıklar altında detaylandırılmıştır.



Şekil 2.1 Jeojenik radon risk parametreleri (JRC/REM 2015).

2.1 Batı Anadolu Granit Plutonlarının Oluşumu

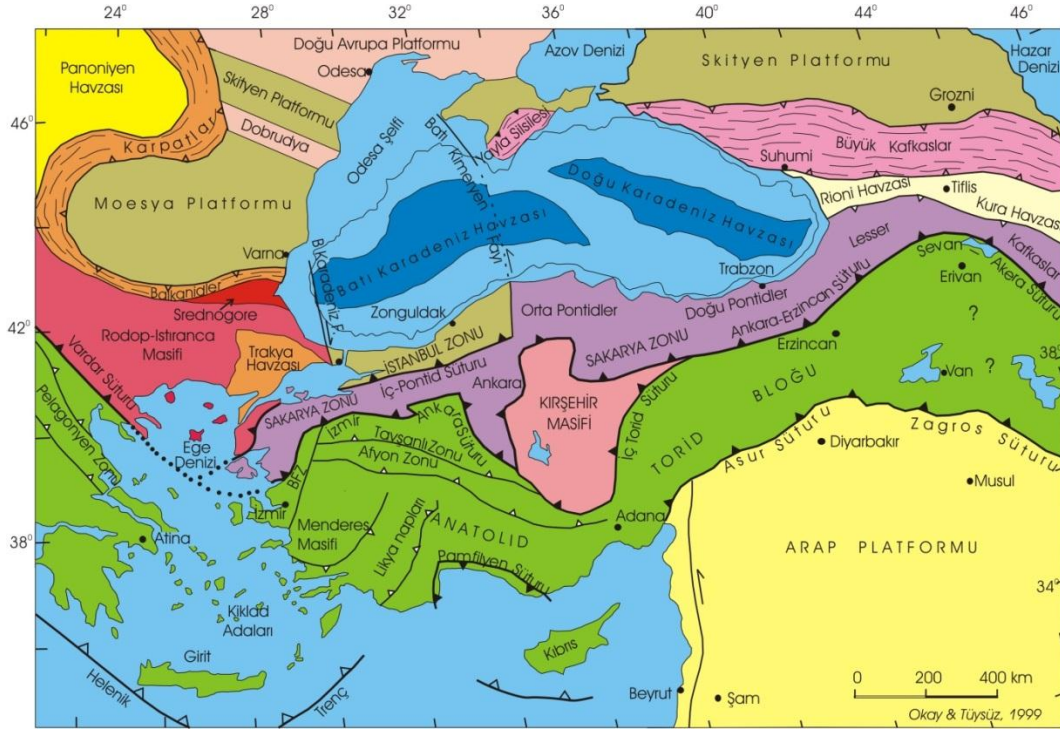
Türkiye, Avrupa-Afrika-Arabistan levhalarının doğrudan dokanak halinde bulunduğu Alp-Himalaya dağ oluşum zinciri içerisinde yer alır (Şekil 2.2). Bu oluşum, Anadolu Yarımadası'nda günümüzde doğuda sıkışma ve batıda genişleme tektonizması olarak tanımlanabilecek karmaşık bir tektonik yapı meydana getirmiştir. Diğer taraftan Kuzey Anadolu (KAF) ve Doğu Anadolu (DAF) gibi doğrultu atımlı faylar Anadolu'nun kuzeyinde ve güney/güneydoğusunda bu deformasyonun bir ürünü olarak ortaya çıkmıştır. Türkiye'nin güney/güneybatısında ise Akdeniz levhasının Girit altına güncel dalma-batma zonu bulunmaktadır (Yüksel, 2005).



Şekil 2.2 Doğu Akdeniz'deki aktif tektonik hatları gösteren harita (Okay et al., 1999).

Geç Kretase'de Arap-Afrika levhalarının kuzeye doğru hareketi sonucu Anadolu levhasının bazı zonlar boyunca kenetlendikleri görülür. Bu kıta-kıta çarpışmalarında levha arası havzalarda meydana gelen çökeller güneye itilerek Şekil 2.3'de görülen Menderes ve Toros levhaları üzerinde kalın Likya Napları'nı oluşturmuşlardır. Eosen'de güneyde sıkışma ve kabuk kalınlaşması devam ederken kuzeyde Pontid üzerinde bir gerilme ve kabuk incelmeleri görülmektedir (Ek 1) (Yüksel, 2005).

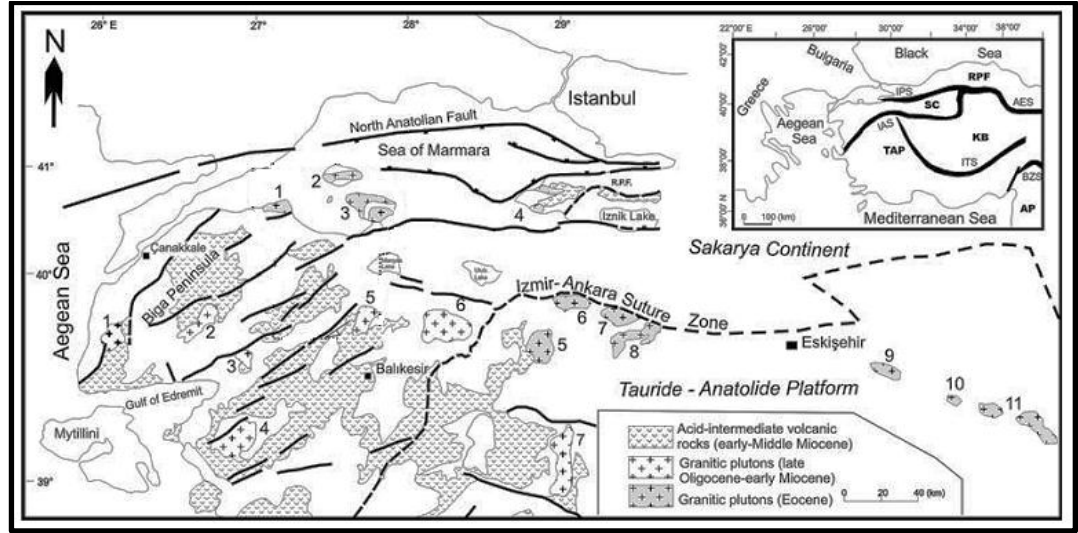
Batı Anadolu'da Sakarya Kıtası ile Toros (Torid-Anatolide platformu) arasındaki kıta/kıta çarpışması Üst Kretase'de başlayıp Alt Tersiyer'de sona ermiştir (Candan et al., 2005). Ancak kıtaların, okyanusal gerecin bütünüyle yok olmasının ardından, birbirlerine kuzey-güney yönlü yaklaşmaları Eosen'de de devam etmiştir. Bu yaklaşma kıta kabuğu ve litosferde kısalıp kalınlaşma ile karşılanmış ve sıkışma sistemi olasılıkla Orta Miyosen'e kadar sürmüştür. Orta Miyosen'de kuzey-güney sıkışma yerini kuzey-güney gerilme sistemine bırakmıştır. Bu yeni rejim içinde Batı Anadolu'nun bugünkü yapısal çatısı ve morfolojisi oluşmaya başlamıştır. Bu tektonik rejimin sonucu olarak bölgede yaklaşık doğu-batı gidişli 8 büyük graben-hors sistemi gelişmiştir (Yılmaz, 1995).



Şekil 2.3 Türkiye ve çevresindeki ana tektonik üniteleri gösteren genelleştirilmiş harita (Okay & Tüysüz, 1999).

Litosferdeki bu önemli ve hızlı değişim döneminde, Menderes Masifi'nin oluşumu ile yaklaşık aynı süreçte yaygın bir magmatik aktivite başlamıştır. Bu magmatizma kısa bir kesiklik dışında Batı Anadolu'nun özellikle kuzey ve batı alanlarında 35 ile 4 milyon yılları arasında süregelmiştir (Yılmaz, 1995).

Kıta-kıta çarpışmasının ardından Sakarya kıtası ile Torid-Anatolid platformu arasında, tüm kuzey Türkiye'yi kat eden İzmir-Ankara-Erzincan kenet kuşağı gelişmiştir. Kuzeybatı Anadolu'da kenet kuşağı gelişiminin ardından, hem kenet kuşağı birimleri; hem de Sakarya Kıtası'na ait temel kayalar Orta Eosen yaşlı çökel kayalar ile uyumsuz olarak örtülmüştür. Bu stratigrafik veri, en azından kıta-kıta çarpışmasının Orta Eosen döneminden önce tamamlanmış olduğunun bir verisi olarak kabul edilmektedir. Kıta-kıta çarpışmasının ardından, Orta Eosen'den başlayarak tüm Batı Anadolu'da yaygın magmatik faaliyet meydana gelmiştir. Çarpışma sonrası nitelikli bu magmatik aktivite Orta Eosen döneminde kuzey alanlarda etkin olmuş, Oligosen ve Miyosen dönemleri boyunca ise kesiksiz olarak güneye doğru gençleşerek devam etmiş ve yaygın alanlar kaplamıştır. Orta Eosen'den Miyosen sonlarına değin etkinliğini sürdürmüş olan bu magmatik aktivite, başlıca granitik kayalar ile bunların yarı derinlik ve yüzey eşdeğeri ürünlerini oluşturmaktadır (Şekil 2.4) (Genç ve Altunkaynak, 2007).



Şekil 2.4 Kuzey Batı Anadolu'daki volkanik kayaçlar ve granitik plutonların dağılımı ((Karacık et al., 2007)'den uyarlanmıştır) Eosen plutonlar: 1 Karabiga plutonu, 2 Marmara sil, 3 Kapıdağ, 4 Armutlu, 5 Orhaneli, 6 Topuk, 7 Tepeldağ, 8 Göynükbelen, 9 Sarıkavak, 10 Kaymaz, 11 Sivrihisar plutonları. Miyosen plutonlar: 1 Kestanbol, 2 Evciler, 3 Eybek, 4 Kozak, 5 Ilıca, 6 Çataldağ, 7 Eğrigöz plutonları. [Türkiye'nin temel tektonik unsurları ve suture bölgeleri. Kısaltmalar: IPS Intra Pontides Suture, AES Ankara-Erzincan Suture, IAS İzmir-Ankara Suture, ITS Inner Tauride Suture, BSZ Bitlis-Zagros Suture, RPF Rhodope-Pontide Fragment, SC Sakarya continent, TAP Tauride-Anatolide Platform, KB Kırşehir Block, AP Arabian Platform].

Bu çarpışma sonrası magmatizmanın ilk ürünleri Orta Eosen'de granitik plutonlar ve andezitik volkaniklerden oluşmaktadır. Batı Anadolu'daki Eosen magmatizmasının plutonları; **Karabiga, Kapıdağ, Armutlu, Orhaneli, Topuk, Tepeldağ, Göynükbelen, Sarıkavak, Kaymaz ve Sivrihisar plutonları** ile temsil edilmektedir. Çarpışma sonrası magmatizmanın ikinci evre ürünleri ise Oligo-Miyosen döneminde plutonik ve volkanik birimler olarak gelişmiştir. **Kestanbol, Evciler, Eybek, Kozak, Ilıca-Şamlı, Çataldağ, Koyunoba ve Eğrigöz plutonları** da bölgedeki Oligosen/Oligo-Miyosen plutonları temsil etmektedir (Bkz. Şekil 2.4) (Akgündüz vd., 2015; Karacık et al., 2007).

2.1.1 Eosen magmatizması

Şekil 2.4'de görüldüğü gibi, KB Anadolu'daki Eosen granitoidler kenet kuşağına paralel uzanan iki ayrı kuşakta ortaya çıkmaktadır. Kuzey kuşağındaki plutonlar Marmara Denizi'nin güney kenarından İzmir-Ankara-Erzincan Suture Zonunun (IAESZ) kuzeyine doğru dağılmakta iken güney kuşağındaki plutonlar IAESZ içerisinde oluşmaktadır (Altunkaynak et al., 2012a).

Kuzey kuşak *Armutlu, Kuzey ve Güney Kapıdağ ve Karabiga* plutonları olmak üzere dört bağımsız plutondan oluşmaktadır. Kuzey kuşaktaki granitoidler, diyoritten granite değişen bir bileşimde, batı Pontidlerin metamorfik kayaçları içerisinde yerleşmiştir (Altunkaynak et al., 2012a).

Kuzey kuşaktaki granitoidler çeşitli granofirik, grafik ve mirmekitik birlikte büyüme dokularına sahip bazı örnekler ile holokristalen, hipidiomorfik granüler porfirik dokular gösterir. Bu granitoidler değişken miktarlarda ortoklas (pertit), minör hornblend ve biyotit eşliğinde ana mineral faz olarak kuvars ve plajiyoklazdan (oligoklaz-andezin) oluşur. Aksesuar mineraller apatit, titanit, zirkon, allanit ve opak fazlar içermektedir. Alterasyon ürünleri olarak epidot, klorit, serisit ve kil mineralleri bulunur. Bu granitlerin yüzeydeki püskürük karşılıkları zaman zaman Biga Yarımadası'nda ortaya çıkar. Köprübaşı ve Aldanmaz (2004), amfibolun Al içeriğine dayanarak, Karabiga ve Armutlu granitoidleri için 2.7 ± 0.6 kbar basınca karşılık yaklaşık 10 km ve Kapıdağ plutonu için 5.8 ± 0.6 kbar basınca karşılık yaklaşık 22 km yerleşme derinlikleri tespit etmişlerdir (Altunkaynak et al., 2012a; Koprubasi and Aldanmaz, 2004).

Güney kuşak, İzmir-Ankara Sütur Zonu boyunca Kretase mavişist toplulukları, Tetis ofiyolit parçaları ve dalma-yığılma kompleksinin litolojilerini içeren kayaların içine sokulmuş olan *Orhaneli, Topuk, Gürgenyayla, Tepeldağ, Göynükbelen, Sarıkavak, Kaymaz ve Sivrihisar plutonları* ile temsil edilir. Güney kuşak granitoidleri genellikle geçişli temaslar gösteren orta taneli, hipidiomorfik granüler porfirik granodiyorit, monzodiyorit ve granitlerden oluşur. Siyenitik kayaların alt miktarı da güney kuşağının en iyi temsilcilerinden biri olan Orhaneli plutonunda ortak kaya birliklerine eşlik etmektedir. Kuvars diyorit ve diyorit kayalar, granitoidler ile kaynaşan dokular gösteren, mafik syn-plutonik dayklar ve magmatik enklavlar olarak ortaya çıkar. Granodiyorit bu plutonların çoğunda baskın bileşimdir ve orta-iri taneli kuvars (% 8 -20%) ve K-feldspat (ortoklas; 15% -20%) matrisi içerisinde yer alan plajiyoklazdan (An₂₅₋₄₅; 45%–55%) oluşmaktadır. Hornblend (3%–10%) temel mafik mineral olarak ortaya çıkmaktadır ve biyotit (5%–10%) ile bulunmaktadır. Aksesuar mineraller ikincil serisit ve kil mineralleri ile birlikte titanit, zirkon, apatit, manyetit ve klorit ile temsil edilmektedir. Siyenitik kayalar Orhaneli Plutonun kuzeybatı ve güneybatı sınır bölgelerinde, orta-iri taneli siyenitin temel granodiyoritik yapı karşısında soğutulmuş marjlar sergilediği küçük yapılar olarak yüzeylenirler. Bu siyenitik birimler alkali feldspattan genellikle değişen miktarlarda plajiyoklaz ve kuvars ile amfibol-klinopiroksen taşıyan siyenitler olan kuvars siyenite bileşiminde

değişirler. Bu kayaçların çoğunda kuvars azdır; amfibol ve piroksen oldukça boldur. Feldspat ağırlıklı olarak kaba, plajiyoklazla birlikte yamalı pertitik birlikte büyüme dokuları gösteren pertitik feldspat (~% 80 modal yüzdesi) içerir. Bazı örneklerde, amfibol tane sınırlarında tercihen piroksen ile yer değiştirir. Apatit, zirkon ve opak mineraller, tüm siyenitik kayaların belirgin aksesuar fazlarıdır (Altunkaynak et al., 2012a).

Porfirik sokulumlar ve aplik dayklar güney kuşak plutonların yanı sıra civar kayaçları da keserler. Petrografik olarak, porfirik sokulumlar porfirik mikrodiorit, mikrokuvars-diorit ve mikrogranodiorit bileşimindedir ve ağırlıklı olarak plajiyoklaz (An30-50;% 30-70), K-feldspat (3-30%), kuvars (3-20 %), hornblend ve biyotitten oluşur. Ana materyal felsitik mikrokristalin kriptokristalın arasında değişir. Porfiriaların bazıları mikrografik ve granofirik dokular gösterir. Sınır bölgeleri yakınında siyenitik yapıları ve civar kayaları kesen küçük pegmatitik dayklar da vardır (Altunkaynak et al., 2012a).

2.1.2 Miyosen magmatizması

KB Anadolu'nun geç Oligosen-Orta Miyosen sırasında oluşan ikinci magmatik fazı, kuzeybatıdan güneydoğuya **Kestanbol, Evciler, Karaköy, Katrandağ, Yenice, Hıdırlar, Ilıca-Şamlı, Kozak, Çataldağ, Eybek, Çamlık, Koyunoba, Eğrigöz ve Salihli** granitoidleri ile temsil edilir (Bkz. Şekil 2.4). Katrandağ, Yenice, Hıdırlar ve Salihli granitleri küçük stoklar yani pluton şekilli ama çapı 1 km den az olan sokulumlar iken, diğerleri oldukça büyük plutonlardır. Kestanbol graniti, Çamlıca mikaşistinin Rodop kuşağının üstüne binmesiyle Sakarya temel kayalarının içine; Kozak, Evciler, Ilıca-Şamlı, Eybek, Çataldağ, Hıdırlar ve Katrandağ granitleri Sakarya kıtası metamorfik temel kayalarının içine ve Çamlık, Koyunoba, Eğrigöz ve Salihli granitoidleri Anatolid-Toros Platformu içine (yani Menderes Masifi metamorfik kayalarının içine) yerleşmiştir (Altunkaynak et al., 2012b). Evciler, Kozak, Kestanbol, Alaçam, Eğrigöz, Koyunoba, Baklan plutonlarının ve volkanik fazlarının jeolojik-jeokimyasal özelliklerindeki ve tektonik yapılarındaki benzerlikler onları Sakarya kıtası ile Menderes Masifi'ni ayıran ve Menderes Masifi'nin kuzey sınırı boyunca uzanan KB-GD doğrultulu bir magmatik kuşak yapmaktadır (Akay, 2009).

Geç Oligosen-Orta Miyosen plutonları kabuk sığ derinliklerde yerleşmiş olan magmatik yapılardır. Bu plutonlar metamorfik kayaları çapraz keserler ve çevrelerinde temas halkası oluştururlar. Sınır bölgesi boyunca, plutonlar sayısız metamorfik anklavlarını ve mafik mikro enklavlarını içerirler. Geç Oligosen-Orta Miyosen granitlerin çoğu, zaman ve mekan içinde, kendi eş-genetik volkanik kayalar ile yakın ilişkiler gösteren kaldera tipi, alt volkanik plutonlar olarak tanımlanmıştır (Altunkaynak et al., 2012b).

Kestanbol, Evciler, Kozak ve Baklan plutonlarının tümü hem önemli oksitler hem de iz elementlere dayalı nomenklatur diyagramlarında granitten granodiyorit ve monzonit petrografik ve jeokimyasal dağılım gösterirler ve tümü doğada yüksek potasyum kalk-alkalidir (Akay, 2009).

2.2 Granitik Alanlar ve Doğal Radyoaktivite

Jeolojik yapıya dayalı radyolojik gözlem çalışmalarının temel amacı, insanların jeolojik kaynaklardan aldıkları radyasyon dozunun belirlenmesi ve oluşturacağı riskin değerlendirilmesidir. Dünyanın jeolojik yapısı incelendiğinde granitik kayaçlar, bunların eşleniği volkanik kayaçlar ve her ikisinden türeyen sedimanter ve metamorfik kayaçların yer kabuğunda oldukça geniş alanlar kapladıkları görülmektedir. Bu kayaçlar doğa şartlarına bağlı olarak zamanla ufalanarak çok küçük partiküller halinde yağmur veya akıntı sularıyla toprağa karışarak toprağın doğal radyoaktivitesini (^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K) artırmaktadırlar (NCRP, 1975). Herhangi bir toprak veya kayaç örneğinde, bu elementlerin miktarı ve radyasyon etkileri yeryüzünde bir konumdan diğer konuma, yüzlerce kata varan değişiklikler gösterebilmektedir. Magmatik bir kayaç olan granit kayaçlar, canlı yaşamında temel mineral elementleri olan Ca, P, Na, K, Zn, Cu, Se, Mo, Mn, ve F içerirken belirli dozun üzerinde olduğunda yaşam için risk oluşturan U, Th ve K gibi elementler bakımından zenginleşme eğilimindedir (Örgün vd., 2009). Kabuksal kayaçlarda gözlenen doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonlarının listelendiği Çizelge 2.1 magmatik kayaçlardaki ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K aktivite konsantrasyonlarının diğer metamorfik ve sedimenter (fosfatlı kayaçlar hariç) kayaçlara göre daha yüksek olduğunu göstermektedir.

Çizelge 2.1 Kabuksal kayalarda gözlenen doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonları (IAEA, 1979).

Kaya tipi	⁴⁰ K (Bq/kg)	²³⁸ U (Bq/kg)		²³² Th (Bq/kg)	
		Ortalama	Tipik Aralık	Ortalama	Tipik Aralık
Kabuksal ortalama	650	37	-	49	-
Mağmatik (Mafik)	155	12	2-37	12	2-41
Mağmatik (Inter.)	309-772	28	6-86	37	8-81
Mağmatik (Asitik)	1237	55	12-148	73	20-80
Sedimenter (arenaceous)	433	12	6-25	12	8-24
Sedimenter (argillaceous)	835	25	12-160	65	8-191
Kireçtaşı	93	25	12-123	8	-
Siyah shale	835	99	37-3088	65	-
Lateritler	Düşük	123	37-494	65	-
Metamorfik	İlksel kaya tipine bağlıdır.				

Genel olarak magmatik kökenli asidik bir kayaç olan granitlerde, ortalama U konsantrasyonu 5 ppm [(~60 Bq/kg); 1ppmU= 12.353 Bqkg⁻¹], Th konsantrasyonu 15 ppm [(~60 Bq/kg); 1ppmTh= 4.074 Bqkg⁻¹] ve K içeriği % 4 (%1K = 309.34 Bqkg⁻¹ ⁴⁰K) olarak rapor edilmektedir (IAEA, 1979). Ancak, zirkon ve monazit mineral içeriğine bağlı olarak, granit kayaçlarda doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonlarının arttığı bilinmektedir. Dünyada granitik alanlarda yapılan radyometrik ölçümlerden elde edilen sonuçlar Çizelge 2.2’de özetlenmiştir. Bu çizelgeden, yüksek backgroundlı alanlar olarak bilinen granitik kayaçların bulunduğu alanlarda doğal radyoaktivite konsantrasyonlarının UNSCEAR 1993 Raporunda verilen değerlerle kıyaslanabilir düzeydedir. Diğer taraftan, yüzey topraklarının aktivite konsantrasyonları jeolojik kökene dayalı olarak değiştiğinden granitik alanların yüzey topraklarındaki doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonlarının da normal alanlara göre daha yüksektir (Çizelge 2.2).

Yer kabuğunda oldukça geniş alanlar kaplayan granitik kayaçlar antik çağlardan günümüze yerleşim yeri, tarım alanı ve maden sahası olarak insanlık tarafından yoğun bir şekilde kullanılmıştır. Bu alanlarda yaşayan insanlar su ve yapı malzemesi ihtiyaçlarını bu kayaçlardan karşılamışlardır (Örgün vd., 2009).

Çizelge 2.2 Dünyadaki Çeşitli Ülkelerde Granit Alanların Radyolojik Özellikleri.

Ülke (Şehir/Alan)	Örnek Türü	N	²²⁶ Ra (Bq kg ⁻¹)	²³² Th (Bq kg ⁻¹)	⁴⁰ K (Bq kg ⁻¹)	D (nGy h ⁻¹)	Referans
Malezya (Johor)	Kayaç	5	25-67 (39)	24-85 (52)	429-722 (611)	47-112 (75)	(Alnour et al., 2012)
Mısır (Wadi Karim)	Kayaç	10	14-227	11-183	2299-7356	110-359	(El-Arabi, 2007)
Mısır (Gabel El Majal)	Kayaç	10	36-511	11-72	204-1574	41-322	(Arafa, 2004)
Mısır (Gabel El Misikat)	Kayaç	10	109-17100	23-72	321-1672	96-7388	(Arafa, 2004)
Mısır (Gabel El Aradiya)	Kayaç	10	5-337	3-64	160-775	20-207	(Arafa, 2004)
Mısır (Homret Waggat North)	Kayaç	10	257-666	70-149	1279-2050	246-443	(Arafa, 2004)
Mısır (Homret Waggat South)	Kayaç	10	308-1524	67-300	1339-3718	234-1010	(Arafa, 2004)
Mısır (Gabal Aradia and Aswan)	Kayaç	5	55-212 (118)	21-171 (91)	2068-2344 (2208)	138-293 (201)	(Harb et al., 2012)
Türkiye (Kestanbol Granitoid)	Kayaç	10	94-637	120-601	1074-1527	170-721	(Canbaz et al., 2010)
Türkiye (Kestanbol Granitoid)	Toprak	52	20-521 (135)	11-499 (140)	126-3181 (1080)	30-641 (192)	(Canbaz Öztürk et al., 2013)
Türkiye (Kozak Granodiyorit)	Kayaç	11	29-111 (61)	35-87 (64)	698-1100 (883)	71-144 (104)	(Karadeniz et al., 2011)

Çizelge 2.2 Dünyadaki Çeşitli Ülkelerde Granit Alanların Radyolojik Özellikleri (devam).

Ülke (Şehir/Alan)	Örnek Türü	N	²²⁶ Ra (Bq kg ⁻¹)	²³² Th (Bq kg ⁻¹)	⁴⁰ K (Bq kg ⁻¹)	D (nGy h ⁻¹)	Referans
Türkiye (Kozak Granodiyorit)	Toprak	19	32-82 (52)	42-88 (68)	667-1127 (824)	76-135 (100)	(Karadeniz et al., 2011)
Türkiye (Kaymaz Plutonu)	Kayaç	7	172-652 (307)	165-352 (248)	419-1618 (1266)	249-532 (345)	(Orgün et al., 2005)
Türkiye (Sivrihisar Plutonu)	Kayaç	7	44-135 (67)	51-293 (153)	857-1695 (1058)	87-300 (167)	(Orgün et al., 2005)
Türkiye (Trabzon)	Kayaç	40	8-26 (16)	24-58 (34)	257-495 (359)	34-71 (43)	(Osmanlioglu, 2006)
Yunanistan (Rodop Masifi)	Kayaç	121	1-315 (74)	2-376 (85)	55-1632 (881)	-	(Papadopoulos et al., 2013)
Normal granit	Kayaç	-	20-120	20-80	600-1800	46-179	(UNSCEAR, 1993)
Uranyum ve toryumca zengin granit	Kayaç	-	100-500 (50)	40-350 (50)	1200-1800 (500)	120-517	(UNSCEAR, 1993)
Normal toprak	Toprak	-	17-60 (35)	11-64 (30)	140-850 (400)	10-200 (59)	(UNSCEAR, 2000)

*Ortalama değerler parantez içinde verilmiştir.

Magmatik kökenli doğal taşların, uranyum içeren kil taşlarının (alumshale) ve endüstri kökenli bazı malzemelerin (fosfatlı jips ve kömür külü) bina yapımında kullanılması dışsal maruz kalmanın yanı sıra içsel maruz kalmayı da önemli derecede arttırmaktadır (Canbaz, 2007; UNSCEAR, 1993; UNSCEAR, 2000; Sohrabi, 1998). Uranyum serisinde ^{226}Ra 'nın bozunum ürünü olan ^{222}Rn ve ürünlerinin solunması dünya çapında bir problem ve belirgin bir kanser riski olarak tanımlanmaktadır (UNSCEAR, 1988). Bu doğrultuda, Ulusal ve Uluslararası Kuruluşlar tarafından kapalı ortamlarda radon gazı konsantrasyonunu sınırlayan değerler belirlenmiş ve dünyanın değişik ülkelerinde geniş ölçekli sistematik çalışmalar başlatılmıştır (UNSCEAR, 1988). Bu çalışmaların derlendiği UNSCEAR Raporlarında (UNSCEAR, 1988; UNSCEAR, 1993; UNSCEAR, 2000), radon konsantrasyonu dünya ortalaması bina içinde 40 Bqm^{-3} ve bina dışında 10 Bqm^{-3} olarak verilmektedir.

Radyasyondan korunma standartlarının oluşturulmasında referans alınan değerlerden elde edilen radyolojik ve radyoekolojik bilgiler insan sağlığı ve çevre kalitesi için geçmiş, bugün ve gelecekteki kontaminasyonlardan kaynaklanan risk-doz tahmininde, çeşitli ortamlarda radyonüklitlerin akümüasyonu ve taşınmasını konu alan çalışmalarda kullanılmaktadır (Camgöz ve Yaprak, 2009; Yaprak and Aslani, 2010). Bu nedenle radyolojik gözlem çalışmaları herhangi bir ekosistemdeki doğal ve yapay radyonüklitlerin davranışını gözlemleyerek atmosferik, jeolojik, ekolojik ve fizyolojik olaylar üzerine kalitatif ve kantitatif bilgi edinilmesini sağlaması açısından oldukça önemlidir. Bu doğrultuda, granitoid alanların radyolojik etkisini araştırmak için en iyi doğal laboratuvarlardan biri olan Batı Anadolu'da yürütülen kapsamlı radyolojik gözlem programı çerçevesinde sunulan doktora tez çalışması, Eosen yaşlı Orhaneli granit plutonu ile Miyosen yaşlı Çataldağ ve Eğrigöz granit plutonlarında

- ✓ toprak ve kayaç örneklerinde doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonlarının belirlenmesini,
- ✓ radyolojik risk tayini için karasal doğal radyasyondan kaynaklanan içsel ve dışsal dozlarının hesaplanmasını,
- ✓ yerinde toprak gazı ölçümü ve topraktan ^{222}Rn salınım hızının hesaplanmasını,
- ✓ dağılım haritalarının oluşturulmasını ve
- ✓ elde edilen sonuçların çok değişkenli istatistik analiz yöntemleri ile değerlendirilmesini hedeflemektedir.

3. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada, Orhaneli, Çataldağ ve Eğrigöz granit alanlarında doğal radyasyon seviyesinin belirlenmesi, çalışma bölgelerinin radyolojik risk açısından değerlendirilmesi, yerinde radon ölçümü ve topraktan ^{222}Rn salınım hızının hesaplanması hedeflenmiştir. Bu doğrultuda, Orhaneli, Çataldağ ve Eğrigöz granit alanlarında yürütülen metodoloji Çizelge 3.1’de verilen adımlardan oluşmuştur.

Çizelge 3.1 Çalışma alanlarında yürütülen metodoloji.

Yürütülen Metodoloji	
Genel Radyolojik Gözlem Programı	Radon Gözlem Programı
Genel jeolojik yapının değerlendirilmesi	Yerinde toprak gazı radon ölçümü
Sistematik örnekleme ve örnek hazırlama	
Doğal radyonüklit analizleri	
Radyolojik risk parametrelerinin hesaplanması	Radon salınım hızının tayin edilmesi
Dağılım haritalarının oluşturulması	
İstatistiksel Veri analizi	

3.1 Radyolojik Gözlem Programı

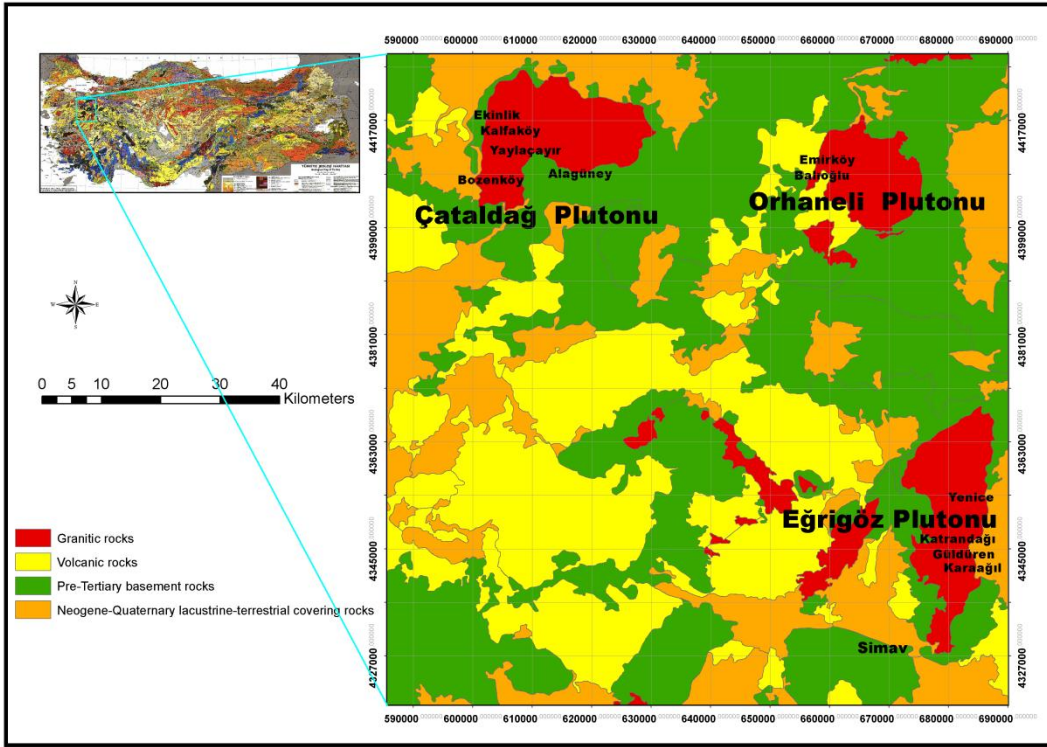
3.1.1 Genel jeolojik yapının değerlendirilmesi

3.1.1.1 Orhaneli Plutonu

Kuzeybatı Anadolu’da intrüzif sahalar geniş yer kaplamaktadır. 39°42'-39°52' kuzey enlemleri ve 28°51'-29°03' doğu boylamları arasında yer alan Orhaneli Granodiyorit Plutonu bu kütlelerden birisi olup, Bursa il sınırları içerisinde Uludağ’ın yaklaşık 28 km güneyinde yer almaktadır (Şekil 3.1). Plutonun çapı 15 km, yüzey alanı yaklaşık 200 km²’dir. Sığ kabuk derinliğinde yerleşen plutonlara bir örnek olan Orhaneli Plutonu, bu tür iyi yüzeylemiş intrüzif kütlelerin yüzeyleme süreçlerinin açıklanmasında önemli jeomorfolojik ve petrografik göstergeler sunmaktadır (Resim 3.1) (Erginal ve Ertek, 2008).

Erken Eosen yaşlı granodiyoritik kayalar doğuda Paleozoyik şist ve mermerler ile sınırlı olup bu temelin çatı kalıntıları Eskidanişment Köyü yakınlarında görülmektedir. Biyotit örnekleri üzerinde yapılan Ar/Ar lazer spot analizlerine göre plutonun Erken Eosen’de (52.4 ± 1.4 My) yaklaşık 10 km

derinde metamorfik temel içine sokulduğu belirtilmiştir (Harris et al., 1994; Erginal ve Ertek, 2008).



Şekil 3.1 Çalışma bölgesinin jeoloji haritası ((MTA Jeoloji Haritaları, 2015.)’dan uyarlanmıştır).



Resim 3.1 Orhaneli granitlerinin tipik görünüşleri.

Orhaneli Plutonunun mineral bileşimi ‘%50-60 plajiyoklas, %20-25 kuvars, %10-15 biyotit, %10 alkali feldispat, %5 hornblend ve aksesuar mineral olarak zirkon, apatit ve opak mineraller’ den oluşmaktadır (Erginal ve Ertek, 2008;

Harris et al., 1994). Ayrıca bol mikrogranitoid anklavları içermektedir. Kaya genel olarak orta taneli holokristalin dokuya sahiptir (Erginal ve Ertek, 2008).

Orhaneli Plutonu'nun sokulduğu temel kayalar şist, mermer ve metagranitlerden oluşmaktadır. Bunlar içinde mermer ve metagranitler plutonun kuzey, doğu ve güneyinde geniş yer kaplamaktadır. Doğu ve güneyden plutonu sınırlayan gri-beyaz renkli mermerler mozayik bir dokuya sahip olup kalsit ve opak mineraller içerirler. Plutonun doğusundaki Kocadağ üzerinde tipik kesiti gözlenen mermerler yoğun kırıklıdır (Erginal ve Ertek, 2008).

"Belenoluk Metagraniti" olarak bilinen metagranit ise plutonu kuzeyden sınırlamakta ve hornblend, kuvars, plajiyoklas, ortoklas, opak mineraller ve bol miktarda titanit içermektedir. Kayacın dokusu holokristalin porfiritik olup mineral taneleri üzerinde yaygın ayrışma gözlenmektedir (Erginal ve Ertek, 2008).

Pluton batı sınırı boyunca, eğimli aşınım basamakları ile belirginleşen Miyosen volkanikleri ile örtülüdür. Metamorfikleri örten lavlar genelde andezit ve dasit bileşimindedir ve vitrofirik bir doku oluşturan plajiyoklaz, biyotit ve opak mineraller içermektedir. Büyükorhan yakınlarında andezitlerle örtülen tüf örneklerinden alınan 17.6 ± 0.2 My izotopik yaşa (Okay et al., 1998) göre volkaniklere Erken Miyosen yaşı verilmiştir. Volkanikler Türkiye'nin Batı ve Kuzeybatı Anadolu kesimlerindeki volkaniklerin doğuya doğru bir devamını oluşturmaktadırlar (Erginal ve Ertek, 2008). Orhaneli granitinin yukarıda detaylandırılmış olan alan, petrografik ve jeokimyasal karakteristikleri Çizelge 3.2'de özetlenmiştir.

Jeomorfolojik açıdan Orhaneli Plutonu yükseltisi 750-950 m arasında değişen dalgalı, hafif yarılmış bir plato sahasına karşılık gelmektedir. Pluton 1400 m'ye ulaşan yüksek sırtlarla çevrili olup, bunların en önemlileri batıda silisik volkanik kayalardan oluşan Belpınar Dağı (1391 m) ve doğuda mermerden oluşan Kocadağ (1323 m)'dir. Bu kütleler plutondan kuzey-güney yönlü, yaklaşık 200 m yükseklikte diklikler ile ayrılırlar. Granodiyoritik kayalar bu yüksek sahalar arasında dalgalı bir plato oluşturacak şekilde aşınmıştır (Erginal ve Ertek, 2008).

Plato zayıf bir bitki kapallığına sahip olup hafifçe yarılmış yatık V şekilli vadilerle parçalanmış aşınım yüzeyleri ile karakterize olmaktadır. Inselberg benzeri iki tepe olan Dikmen ve Hepbir tepeleri ayrışma ve aşınmaya karşı

dirençli olmaları nedeniyle plutonun morfolojisinde belirgin yükseltiler oluşturmaktadırlar. Alçak saha kuzey yönünde 300-450 m derinlikte bir kanyon (Sadağı Kanyonu) açan Sadağı Deresi ve kolları tarafından akaçlanmaktadır. Pluton yüzeyini akaçlayan drenajın büyük kısmı eklem kontrollüdür (Erginal ve Ertek, 2008).

Çizelge 3.2 Orhaneli granitinin başlıca alan, petrografik ve jeokimyasal karakteristikleri.

Alan		
Yüzölçümü	~200 km ²	(Erginal ve Ertek, 2008)
Yaş	52.4 ± 1.4 My (Ar/Ar Biyotit)	(Harris et al., 1994)
Kayaç birimi	Baskın olarak granodiyorit, monzodiyorit ve granit, az oranda siyenit	(Altunkaynak et al., 2012a)
Tane boyutu	Orta taneli, yarı öz şekilli granülerden porfiritike kadar değişen doku türleri	(Altunkaynak et al., 2012a)
Petrografi		
Mineral bileşimi	Plajiyoklas + kuvars + biyotit + alkali feldispat + hornblend	(Harris et al., 1994)
Doku	Holokristalin porfiritik	(Erginal ve Ertek, 2008)
Mafik faz	K-feldispat, biyotit	(Altunkaynak et al., 2012a)
Aksesuar faz	Mikrogranitoid anklavları, zirkon, apatit, opak mineraller	(Erginal ve Ertek, 2008)
Alterasyon	Serisit, klorit, opak, silis	(Kolay, 1998)
Jeokimya		
Alkali-kireç indeksi	Kalk-alkalin	(Okay and Satır, 2006)
Shand indeksi	Metalumina	(Okay and Satır, 2006)

3.1.1.2 Çataldağ Plutonu

Çataldağ Granitoid Plutonu 39°46'-39°58' kuzey enlemleri ve 28°10'-28°32' doğu boylamları arasında, Balıkesir ili Susurluk ilçesinin doğusunda yaklaşık 450 km²'lik geniş bir alanı kaplamaktadır (Şekil 3.1). İzmir-Ankara-Erzincan kenet kuşağının kuzeybatısında Sakarya Kıtası içerisinde yer alan Çataldağ Granitoid Plutonunu (Resim 3.2) içeren bölgenin en yaşlı birimi Paleozoyik yaşlı amfibolitışist, mikaşist ve mermerlerden oluşan Fazlıkonağı Formasyonudur. Fazlıkonağı Formasyonu üzerinde uyumsuz olarak Alt Triyas yaşlı Karakaya Formasyonu bulunmaktadır. Karakaya Formasyonu Kaz Dağı'nın güneyinde ve güneydoğusunda, Uludağ kuzeyinde, Manisa ve Simav kuzeyinde, Bilecik, Eskişehir ve Ankara dolaylarında ve Amasya'nın güneyinde geniş bir alanda yayılım sunmaktadır. Kristalize kireçtaşı ve mermerler Karakaya Formasyonu üzerinde uyumsuzlukla yer alır. Tüm bu birimlerin üzerine Üst Kretase yaşlı ilksel ilişkileri ve dokanakları bozulmuş çökel, metamorfik, mafik ve ultramafik kayalardan ibaret olan Yayla Melanjı yerleşmiştir. Yayla Melanjı tüm eski birimleri tektonik dokanakla üzerlemektedir (Sapancı vd., 2012).



Resim 3.2 Çataldağ granitoidinden bir görünüm.

Söz konusu olan Paleozoyik ve Mesozoyik yaşlı birimler Oligo-Miyosen yaşlı Çataldağ Granitoidi tarafından kesilmiştir. Çataldağ Granitoidi inceleme alanında izlenen yaşlı birimlere sokulmakta ve Neojen yaşlı çökel ve volkanik lavlar ile üzerlenmektedir. Neojen yaşlı birimler, tamamen karasal özellikteki Miyosen-Pliyosen yaşlı çamurtaşı, killi kireçtaşı birimleri ile bunlarla yanal ve düşey geçişli andezit, lav, tuf ve aglomeralar ile temsil edilmektedir. Neojen volkanik kayaları ise genellikle asit ve kalk-alkalen bileşimdedir (Ercan vd., 1990; Sapancı vd., 2012).

Kuzeybatı Anadolu'daki çarpışma sonrası genişleme tektonizmasına bağlı magmatik aktivite ürünü Çataldağ plutonu, BD-KB-GD ve KB-GD doğrultulu Miyosen yaşlı birimleri de kesen normal atımlı faylar ile kesilmiştir. Çalışma sahası içerisinde bulunan yükseltilerden biri olan Çataltepe de söz konusu bu normal faylanma sonucu oluşmuştur. İnceleme alanında gözlenen en büyük faylanmalardan biri olan Çataltepe fayı aynı zamanda oblik bir bileşene de sahiptir. Ayrıca granitoid doğu ve kuzeydoğu kenarı boyunca Fazlıkonağı formasyonu ile faylı bir dokanak sunmaktadır (Sapancı vd., 2012). Çataldağ Granitoidi genellikle yaşlı birimlerin tabaka ve düzlemlerine uyumlu olarak sokulum yapmıştır (Sapancı vd., 2012).

Sünlük Köyü'nün güneyindeki bazı kesimlerde ve granitoid gövdesinin kuzeydoğu kesimlerinde iyi gelişmiş foliasyon düzlemleri izlenmiştir. Söz konusu foliasyon düzlemlerinin, Fazlıkonağı formasyonu ve granitoid arasında uzanan ana fay zonuna paralellik sunmaktadır. Çataldağ Granitoidinin Fazlıkonağı formasyonu ve Mesozoyik yaşlı mermerlere sokulumu bazı mevkilerde kontakt metamorfizmaya neden olmuştur. Plutonun güney sınırı boyunca yer alan Serçeören ve Alagüney köyleri civarında kontakt metasomatizma etkisiyle skarn zonları gelişmiştir (Sapancı vd., 2012).

Granitoidin şistlerle olan kontakları genellikle keskin olup, kontak zonları ise oldukça geniş yayılımlar sunmaktadır. Dokanakta gelişen muskovit + margarit + siderofillit + andaluzit birlikteliği 3,5 kbar'dan düşük basınç ve 550-650°C civarında sıcaklık koşullarını işaret etmektedir. Çataldağ Granitoidine ait örnekler üzerinde yapılan Ar/Ar, K/Ar ve Rb/Sr yaş analizleri 20.6 ± 0.1 (Altunkaynak et al., 2012b), 21.2 ± 0.6 - 25.9 ± 0.5 My (Boztuğ et al., 2009) ve 20.9 My (Orhan ve Mutlu, 2009) arasında değişen ve plutonun sokulum yaşı olarak yorumlanan Oligosen-Miyosen yaşlar vermiştir (Sapancı vd., 2012).

Çataldağ Granitoidinin önemli bir bölümü granitlerden oluşmaktadır. Çobandede Tepe'de ve tepenin doğusu ve güneydoğusunda mostralara veren granitler, arazide krem rengi ve grimsi tonlardadır. Granodiyoritler inceleme alanında, Serçeören köyü güneybatısı ve Alagüney köyünün güneyinde mostra vermektedir. Granodiyoritler arazide hafif pembemsi tonlarda görülmüştür. Turfal Dağları'nın kuzey yamaçlarında ise kuvars monzonit ve kuvars monzodiyoritler mostra vermekte ve arazide gri renklerde gözlenmektedir (Sapancı vd., 2012).

Sapancı ve arkadaşları tarafından, polarizan mikroskop ile yapılan petrografik çalışmalarda, genel olarak iri taneli holokristalin doku izlenmiştir. Bununla birlikte plutonun dış zonlarında kataklazma etkili porfirik doku izlenmiştir. Kuvars kristallerinin özşekilsiz taneler şeklinde izlendiği örneklerde, granitoidin kenar kısımlarından alınan örneklerde kuvarsların, kataklastik etkiler nedeni ile hafif dalgalı sönme gösterdikleri belirlenmiştir. Karlsbad ikizlenmelerinin izlendiği alkali feldspatlar ortoklas bileşiminde olup yaygın serisitleşme türü alterasyon göstermektedir. Plajiyoklas minerallerinde granitin özellikle dış ve kenar zonlarındaki hızlı soğumayı işaret eden zonlu yapı ve polisentetik ikizlenme yaygındır. Plajiyoklasların çekirdek kısımlarında az da olsa serisitleşmeler gelişmiştir. Bu tip doku plutonun sokulumu sırasında meydana gelen soğumanın özellikle dış zonlarda daha hızlı gerçekleştiğini göstermektedir (Sapancı vd., 2012).

Genel olarak alkali karakterde olmakla birlikte subalkali bileşenler de içeren Çataldağ Granitoidi, ağırlıklı olarak siyenitik ve granitik kayalardan yapılıdır. Pluton orta-K kalkalkalin içeriğinden yüksek-K kalk-alkalin içeriğine geçiş göstermekte, potasyum içerikleri diyoritten granite doğru yükselim sunmaktadır (Sapancı vd., 2012). Burada detaylandırılan Çataldağ granitinin alan, petrografik ve jeokimyasal karakteristikleri özet olarak Çizelge 3.3' te verilmiştir.

Çizelge 3.3 Çataldağ granitinin başlıca alan, petrografik ve jeokimyasal karakteristikleri.

Alan		
Yüzölçümü	~450 km ²	(Sapancı vd., 2012)
Yaş	20.6±0.1 My (Ar/Ar K-Feldspat)	(Altunkaynak et al., 2012b)
Kayaç birimi	Granit, granodiyorit, kuvars monzonit ve kuvars monzodiyorit	(Sapancı vd., 2012)
Tane boyutu	İri taneli holokristalin	(Sapancı vd., 2012)
Petrografi		
Mineral bileşimi	Kuvars + alkali feldspat + plajiyoklas + biyotit + amfibol	(Sapancı vd., 2012)
Doku	Holokristalin porfirik	(Sapancı vd., 2012)
Mafik faz	K-feldspat, hornblend, biyotit	(Sapancı vd., 2012)
Aksesuar faz	Sfen, apatit	(Sapancı vd., 2012)
Alterasyon	Serisit, klorit	(Sapancı vd., 2012)
Jeokimya		
Alkali-kireç indeksi	Kalk-alkalin	(Sapancı vd., 2012)
Shand indeksi	Peralumina	(Sapancı vd., 2012)

3.1.1.3 Eğrigöz Plutonu

Yaklaşık olarak 400 km²'lik bir alanda yüzeyleyen Eğrigöz Granitoid Plutonu 39°05'-39°27' kuzey enlemleri ve 28°60'-29°11' doğu boylamları arasında, Kütahya ili, Emet ilçesinin batısında yer almaktadır (Şekil 3.1). Oldukça engebeli bir topoğrafya sunan pluton sık bitki örtüsü ve ormanlarla kaplıdır (Resim 3.3). Granitler gri, beyazımsı gri ve kirli gri renklerde. Ayrışmış kesimlerinde sarımsı gri ve beyazımsı gri renk gözlenir. Konağa yakın bölgelerde ince taneli ve aplitik özellik sunan sokulumkontakta uzaklaştıkça iri taneli, tipik soğan kabuğu ayrışması gösteren granodiyoritlere geçmektedir. Eğrigöz plutonu, kalınlığı 60 m'ye kadar ulaşabilen aplit daykları ve granitleşme sonrası volkanizmaya bağlı andezitik ve dasitik dayklarla kesilmiştir. Aplit daykları yan kayayı da kesmektedir. Andezitik ve dasitik dayklar plutonun kuzey konağına yakın kesimlerde 0.5-50 m arasında değişen kalınlıklara sahiptir ve genellikle KB-GD yönlü uzanım sunmaktadır (Albayrak, 2003).

Genellikle holokristalen hipidiyomorfik dokulu olan granodiyoritin genel mineral bileşimi kuvars, plajiolklas, ortoklas, biyotit, hornblend, muskovit, apatit, zirkon, sfen, manyetit, opak mineraller, klorit, serisit, epidot ve turmalin'den oluşmaktadır. Çalışma alanının güney ve güneydoğusunda Eğrigöz Plutonu mafik minerallerce nispeten daha zengindir (Albayrak, 2003; Akay, 2009; Özgenç and İlbeyli, 2008).

Kuvars, granodiyoritin ana mineralini oluşturur ve öz şekilsiz taneler şeklindedir. Dalgalı sönme gösteren kuvars kristalleri, bol apatit ve zirkon kapanımları içerir ve yer yer feldispatlarla grafik doku oluşturur (Albayrak, 2003).

Yarı öz şekilli ve öz şekilli, oldukça iri (2.5 cm'ye kadar) kristaller halindeki plajiolklaslar tipik polisentetik ikizlenmelidir ve zonlu yapı sunmaktadırlar. İkiz lamellerin sönme açlarına dayanarak yapılan ölçümlerde, plajiolklaslarda anortit oranının %28-52 arasında (Andezin) olduğu tespit edilmiştir. Apatit, turmalin ve opak mineral kapanımları içerir ve ayrışmış bölgelerde genellikle serisitleşme, killeşme ve epidotlaşma göstermektedir. Ortoklaslar birkaç santimetreye kadar ulaşabilmekte ve kayaya porfirik doku kazandırmaktadırlar. Çoğunlukla pertitik yapılıdır ve tipik karlspat ikizlenmesi göstermektedir. Koyu yeşil renkli, açık kahveden yeşile kadar pleokroizma gösteren biyotitler, yarı öz şekilli ve öz şekilli kristaller halindedir. Biyotit oranı %20'ye kadar ulaşabilir. Apatit, zirkon, turmalin ve opak mineraller içerir ve yer

yer kloritlemiştir. Özellikle plutonun kuzeybatısında biyotitler sünümlü ve kırılğan deformasyon izleri göstermektedir. Biyotitlere nispeten daha az gözlenen hornblendler öz şekilli kristaller halindedir ve boyutları 2 cm'ye kadar ulaşabilir. Ayırılmış örneklerde hornblendler çoğunlukla kloritlemiştir. Muskovit, apatit, zirkon, sfen, turmalin ve opak mineraller Eğrigöz Plutonu içinde yer yer gözlenen aksesuar minerallerdir. Serisit, epidot, klorit ve kil mineralleri alterasyon ürünleri olarak ortaya çıkmaktadır. Kuvars, K-feldispat ve plajiolklas oranları doğrultusunda, Eğrigöz Plutonu'nun monzogranit ve granodiyorit sınırında yayılım gösterdiği gözlenir (Albayrak, 2003).

Çalışma alanında Eğrigöz Plutonu genel olarak Paleozoyik yaşlı şistlerle, plutonun güneybatısında Paleozoyik kireçtaşlarıyla sınırlandırılmıştır. Sokulum bu birimlerin, özellikle kontağa yakın kesimlerde, kontak metamorfizma ve metazomatizmasına neden olmuştur (Albayrak, 2003).

Eğrigöz Plutonu'nun yaşı (Altunkaynak et al., 2012b)'e göre hornblend ve biyotit üzerine yapılan Ar/Ar yaş analizinde 19.0 ± 0.1 ve 18.9 ± 0.1 My; (Isik et al., 2004)'e göre biyotit ve muskovit üzerine yapılan Ar/Ar yaş analizinde 20.19 ± 0.28 ve 22.86 ± 0.47 My; (Ring and Collins, 2005)'e göre zirkon üzerine yapılan U-Th-Pb analizinde 20.7 ± 0.6 My olarak ve (Hasözbek et al., 2010)'e göre biyotit üzerine yapılan Rb/Sr analizinde 18.77 ± 0.19 My olarak belirlenmiştir.

Kimyasal açıdan homojen bir bileşim yansıtan Eğrigöz Plutonu, farklı sınıflandırma diyagramlarında değerlendirildiğinde, granit ve granodiyorit bileşimi sunmaktadır. Kuvars - K feldispat - Plajiolklas üçgen sınıflandırma diyagramında granodiyorit-monzogranit sınırında, $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 'ya karşı SiO_2 sınıflandırma diyagramında granit ve granodiyorit alanlarında, Q-P sınıflandırma diyagramında adamellit ve granodiyorit alanlarında ve $\text{SiO}_2 - \log(\text{Zr}/\text{TiO}_2 \cdot 0,0001)$ sınıflandırma diyagramında granodiyorit-monzogranit alanlarında yer almaktadır (Albayrak, 2003).

Eğrigöz Plutonu'nun, alkali ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) ve silis (SiO_2) içeriği göz önüne alınarak çizilen diyagramlarda subalkalen alanında; alkali, demir ve magnezyum içeriği baz alınarak çizilen AFM diyagramında ise kalkalkalen-toleyit sınırında, kalkalkalen alanında kümелendiği gözlenir (Albayrak, 2003). Yukarıda detaylandırılmış olan Eğrigöz granitine ait alan, petrografik ve jeokimyasal karakteristikleri Çizelge 3.3'de özet olarak listelenmiştir.



Resim 3.3. Eğrigöz çalışma alanında gözlenen granitlerin genel arazi görünimleri.

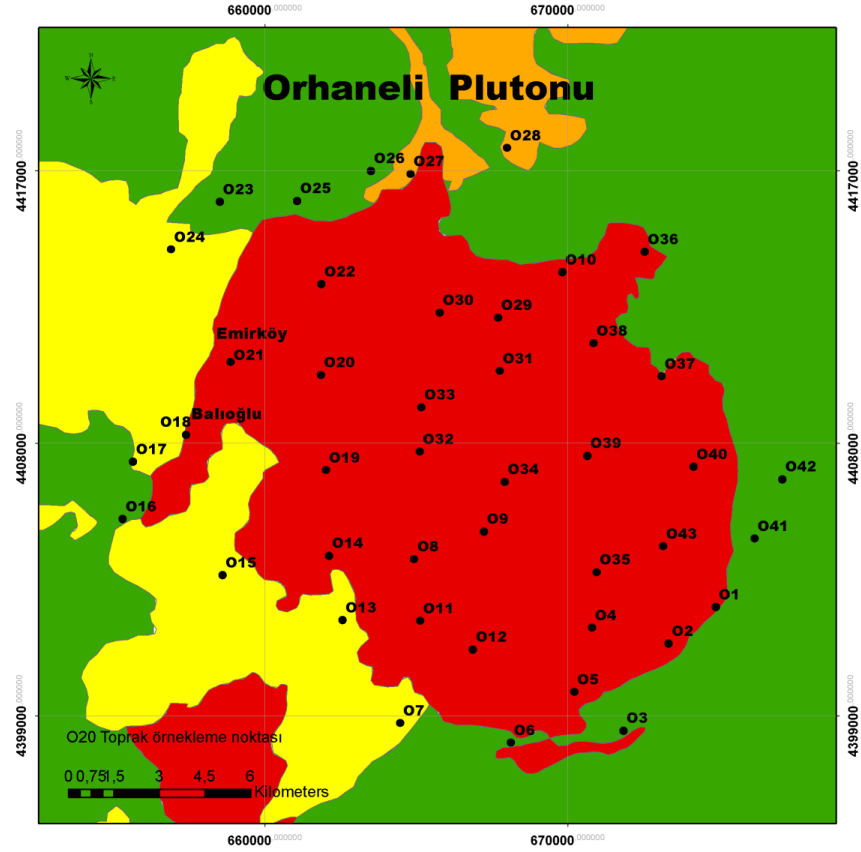
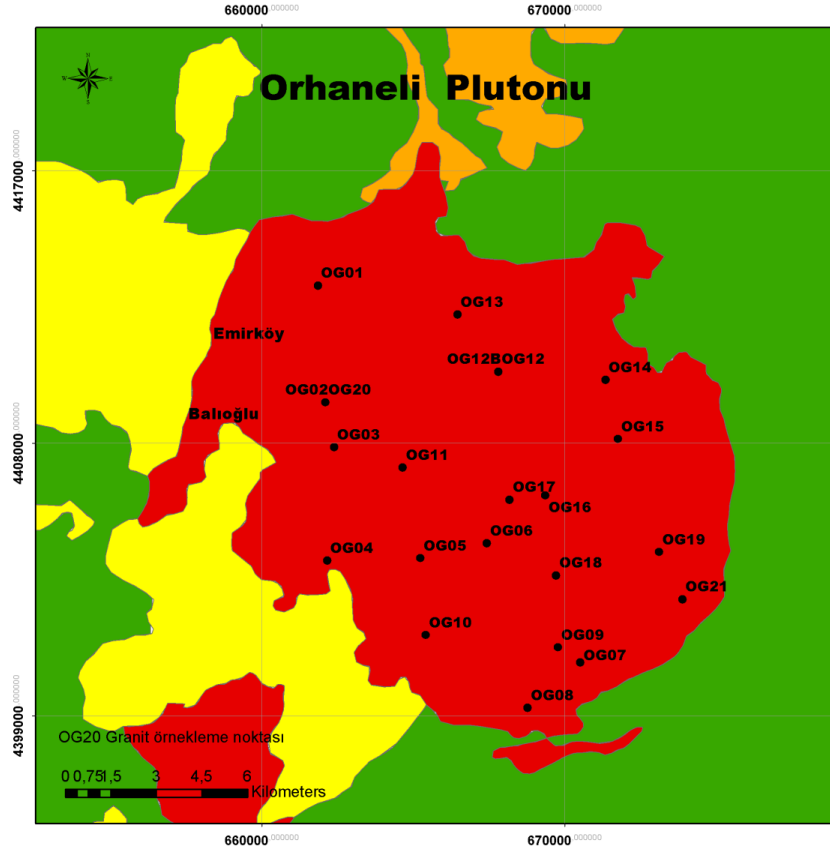
Çizelge 3.4 Eğrigöz granitinin başlıca alan, petrografik ve jeokimyasal karakteristikleri.

Alan		
Yüzölçümü	~400 km ²	(Özgenç and İlbeyle, 2008)
Yaş	20.19±0.28 My (Ar/Ar Biyotit) (Erken Miyosen)	(Isik et al., 2004)
Kayaç birimi	Kuvars monzonit, granodiyorit, granit, syenogranit, az miktarda kuvars diyorit ve diyorit	(Isik et al., 2004)
Tane boyutu	Orta – iri taneli, nadiren porfiritik	(Özgenç and İlbeyle, 2008)
Petrografi		
Mineral bileşimi	Plajiyoklas + alkali feldspat + kuvars + biyotit + hornblend ± klinopiroksen ± muskovit	(Özgenç and İlbeyle, 2008; Akay, 2009)
Doku	Hipidiyomorfik	(Özgenç and İlbeyle, 2008; Albayrak, 2003)
Mafik faz	Biyotit, hornblend	(Albayrak, 2003)
Aksesuar faz	Zirkon, apatit, titanit, opak mineraller	(Albayrak, 2003)
Alterasyon	Serisit, klorit, epidot	(Albayrak, 2003)
Jeokimya		
Alkali-kalsiyum indeksi	Kalk-alkalin	(Albayrak, 2003)
Shand indeksi	Metalumina	(Özgenç and İlbeyle, 2008)

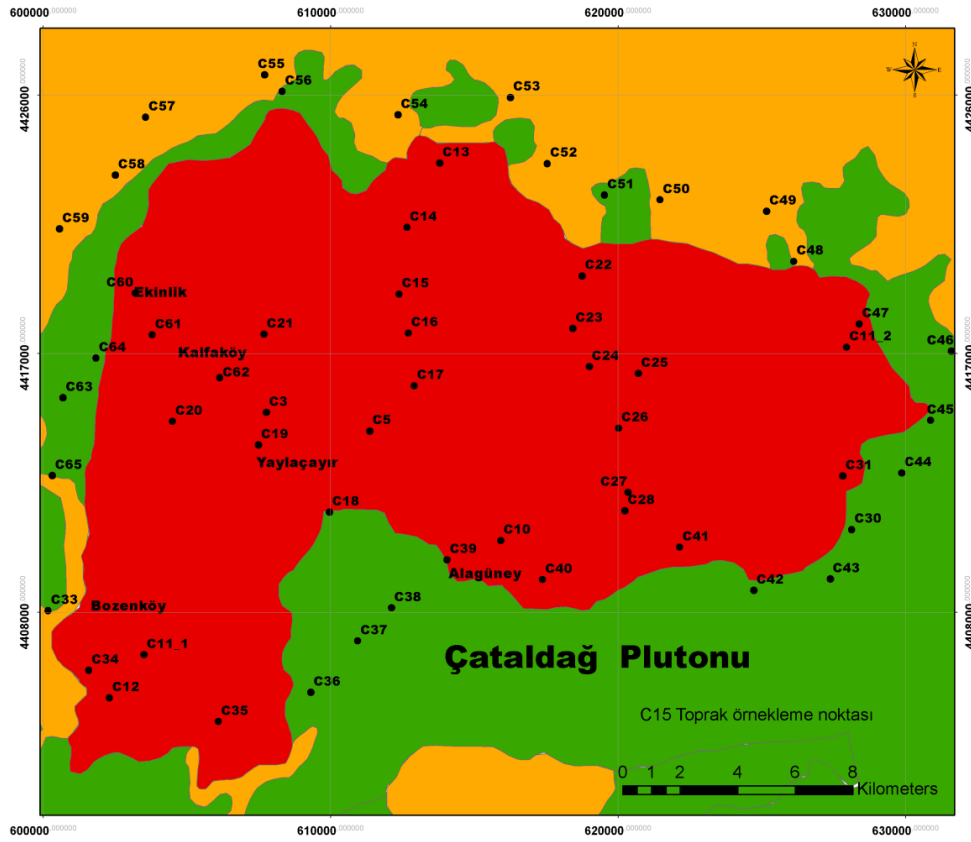
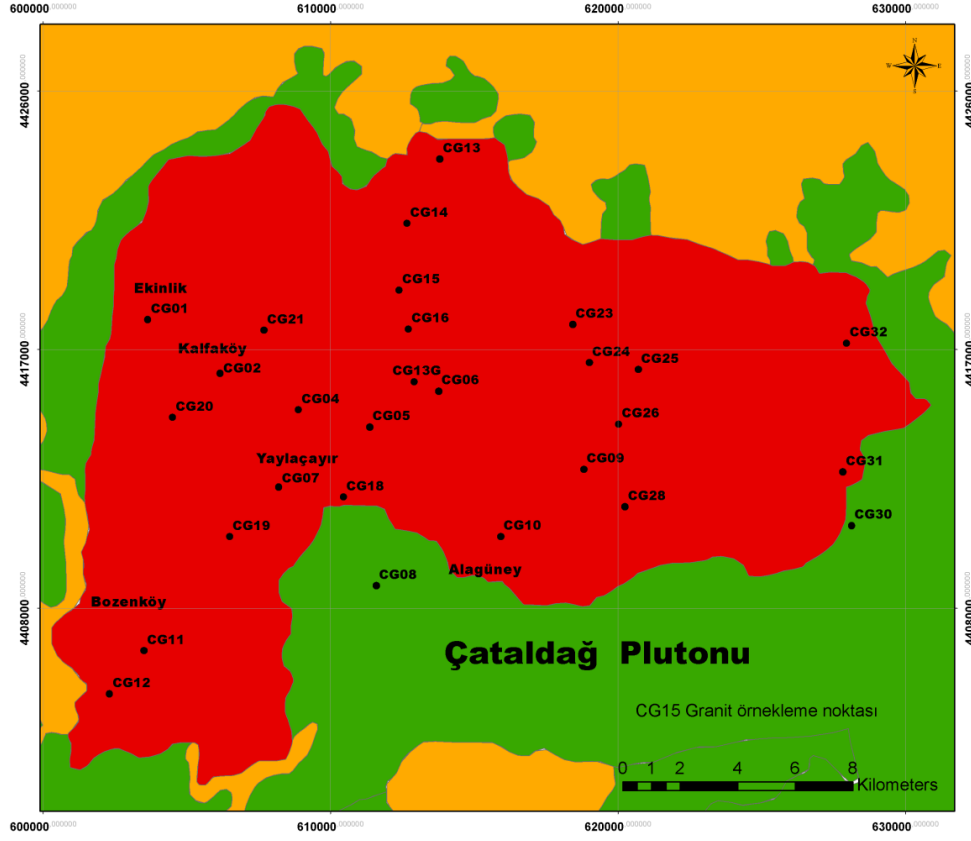
3.1.2 Çalışma alanlarında örnekleme ve örnek hazırlama

Bu çalışmada, Orhaneli, Çataldağ ve Eğrigöz granit alanlarında örnekleme noktaları 3x3 km²'lik karelerle sistematik olarak belirlenmiş ve genel jeolojik yapıya dayalı olarak granit kayaç ve yüzey toprakları örneklenmiştir. Örnekleme koordinatları GPS ile belirlenmiş ve her örnekleme noktasında yerinde yüzey gama ölçümleri yapılmıştır. Her bir plutona ait örnekleme noktaları sırasıyla Şekil 3.2-3.4'de gösterilmiştir. Orhaneli'nden 22 granit, 43 toprak; Çataldağ'dan 28 granit, 57 toprak ve Eğrigöz'den 23 granit, 54 toprak olmak üzere toplam 73 granit ve 154 toprak örneği alınmıştır.

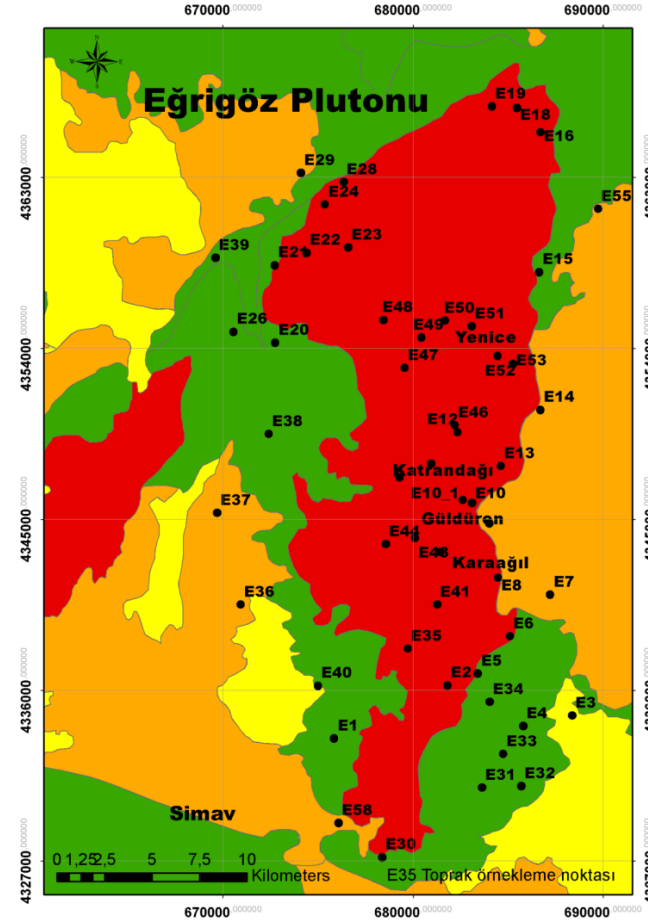
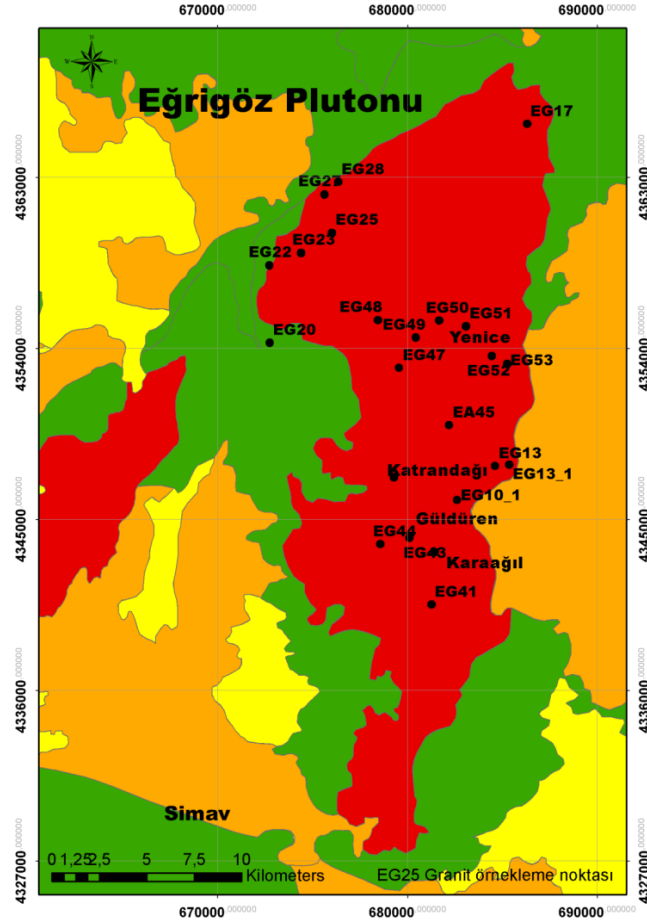
Alınan kayaç örnekleri DEÜ Jeoloji Mühendisliği Bölümünde çeneli kırıcıdan geçirilip öğütülerek inceltirilmiştir. Kayaç ve toprak örnekleri etüvde 105°C'de sabit ağırlığa ulaşmaya kadar kurutulduktan sonra, gama spektrometrik analiz için 1 L Marinelli kaplara yerleştirilmiştir. Radyum (²²⁶Ra) ve radon (²²²Rn) arasındaki radyoaktif dengenin oluşması için kapatılan örnekler, ölçümlerden önce 4 hafta süre ile bekletilmiştir.



Şekil 3.2 Orhaneli plutonu granit ve toprak örnekleme noktaları.



Şekil 3.3 Çataldağ plutonu granit ve toprak örnekleme noktaları.



Şekil 3.4 Eğrigöz plutonu granit ve toprak örnekleme noktaları.

3.1.3 NaI(Tl) gama spektrometre sistemi ile doğal radyonüklit analizi

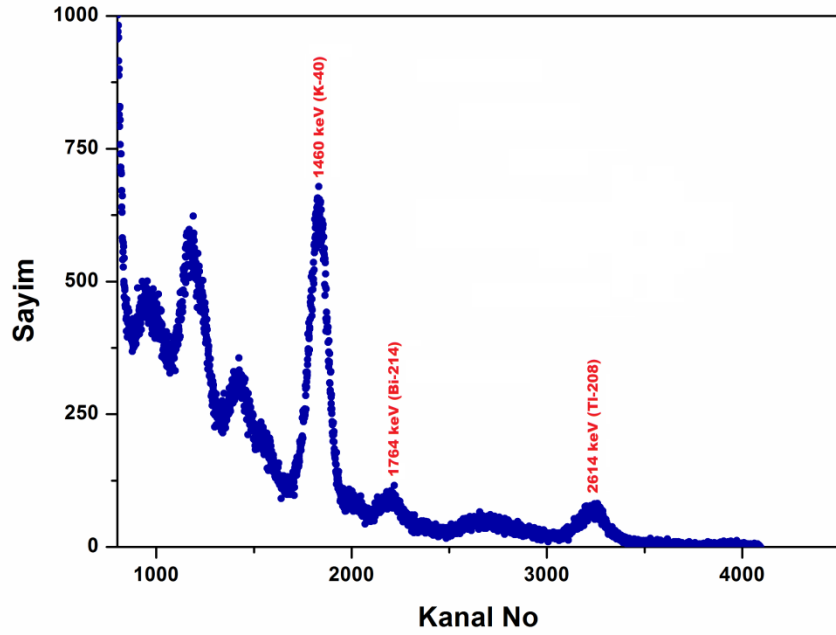
Herhangi bir örnekteki radyoaktif elementlerin yayımladığı gama ışınlarını enerjilerine ayırarak algılama esasına dayanan gama spektroskopisi, radyonüklit kimliklerinin belirlenmesinde ve kantitatif tayininde birçok analitik ve nükleer tekniğe tercih edilerek kullanılan çok yönlü, tahripkar olmayan, basit, hızlı ve pratik bir radyometrik tekniktir (Yaprak, 1995; Canbaz, 2007).

1950’li yılların başlarında sintilasyon materyali olarak talyumla aktive edilmiş sodyum iyodür “NaI(Tl)” kristalinin geliştirilmesi ve Hofstadter tarafından bu kristalin gama radyasyonunun algılanmasında kullanılması modern gama spektroskopisi çağını başlatmıştır (Yaprak, 1995).

Birçok alana değişik amaçlarla uygulanan sintilasyon gama spektroskopisi, uzun yıllar yaygın şekilde radyoaktif mineral keşfinde ve bünyesinde radyoaktif mineral bulunduran jeolojik örneklerin radyonüklit içeriğinin saptanmasında kullanılmıştır (Canbaz, 2007).

Sintilasyon gama spektrometresinde ^{238}U , ^{232}Th nin kendilerine ait doğrudan tespit edilebilecek karakteristik gamaları olmadığı için iki radyoaktif serinin bozunum zincirinde bulunan birçok ürününün gama verici olması yardımıyla jeolojik örneklerdeki radyonüklit tayini yapılır (Yaprak, 1995; Özken, 2011; Çam et al., 2013).

Uranyum ve toryumun bozunum ürünleri ile radyoaktif dengede olduğu varsayılarak, ^{238}U serisinde ^{214}Bi ’ün 1.76 MeV, ^{232}Th serisinde ^{208}Tl ’in 2.6 MeV ve ^{40}K ’ın 1.46 MeV yüksek enerjili gamaları kullanılmaktadır (Yaprak, 1995; Canbaz, 2007; Özken, 2011; Çam et al., 2013) (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 EG49 kodlu örneğin 10000 s süre ile alınan gama spektrumu ve aktivite hesaplarında kullanılan gama enerjileri.

Bu metotta uranyum ve toryumun doğrudan kendi gamaları yerine ürünlerinin gamaları kullanıldığı için bulunan U ve Th konsantrasyonları eşdeğer uranyum (eU) ve eşdeğer toryum (eTh) olarak ifade edilir. ^{40}K 'ın kendi karakteristik gaması kullanıldığından bulunan %K konsantrasyonu doğrudan potasyum içeriğini vermektedir (Yaprak, 1995; Canbaz, 2007).

Herhangi bir jeolojik örnek matrisi içinde genelde U, Th, K radyoelementleri değişik konsantrasyonlarda ve bir arada bulunurlar. NaI(Tl) sintilasyon dedektörlerinin sınırlı ayırma gücü nedeniyle, bu primordial radyonüklitler için seçilen gama enerjileri (2.6 MeV, 1.76 MeV, 1.46 MeV), sintilasyon gama spektroskopisiyle yapılan ölçümlerde konsantrasyon hesabında doğrudan kullanılamazlar. Böyle bir örneğin sintilasyon gama spektrumunda, bu radyonüklitlerin birbirlerine olan katkılarının uygun faktörlerle çıkartılması gerekmektedir. Sıyırma oranı olarak geçen bu oran geometriye ve sistemin çeşitli ayarlarına bağlı olarak değişir. Ayrıca spektrometreden elde edilen net sayımlardan duyarlılık faktörleri yardımıyla K (%), U (ppm), Th (ppm) konsantrasyonları hesaplanır (Yaprak, 1995; Canbaz, 2007).

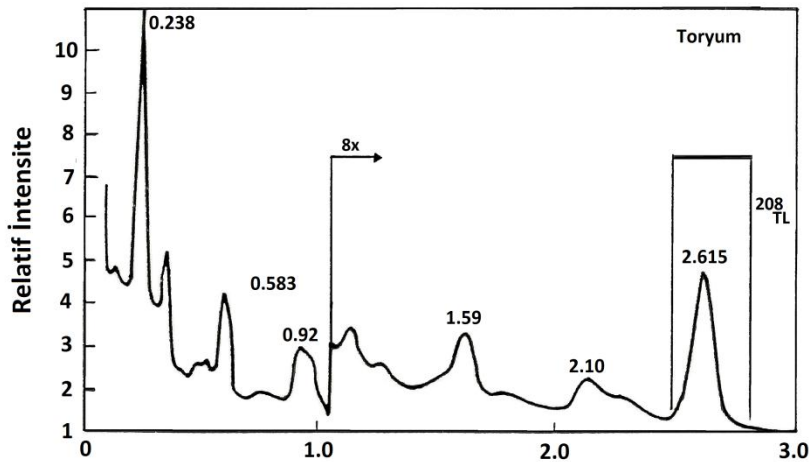
Potasyum spektrumu, tek enerjili bir gama kaynağına karşı NaI(Tl) dedektörünün tipik bir cevabıdır. ^{40}K pikinin enerjisi 1.461 MeV gama ışınının Compton uzantısıdır (Yaprak, 1995).

Uranyum spektrumu, çok sayıda ürün çekirdekten gelen birçok gama ışını içerir. Uranyum tayinlerinde şiddeti yüksek ve girişim etkilerinden uzak olması nedeni ile çoğunlukla ^{214}Bi 'den gelen 1.76 MeV enerjili gama piki kullanılır (Yaprak, 1995).

Toryum spektrumu da ürün nükleitlerinin bozunmasıyla oluşan birçok gama ışını pikine sahiptir. Bunlardan en önemlisi ^{208}Tl dir ve bu pik içindeki Th konsantrasyonunu ölçmek için kullanılır. Jeolojik örneklerde K, U, Th tayini yapmak için spektrumlarda yukarıda bahsedilen gama enerjilerine karşılık gelen enerji aralıkları belirlenir (Yaprak, 1995; Canbaz, 2007; Özken, 2011; Çam et al., 2013).

3.1.3.1 Toryum kanalı

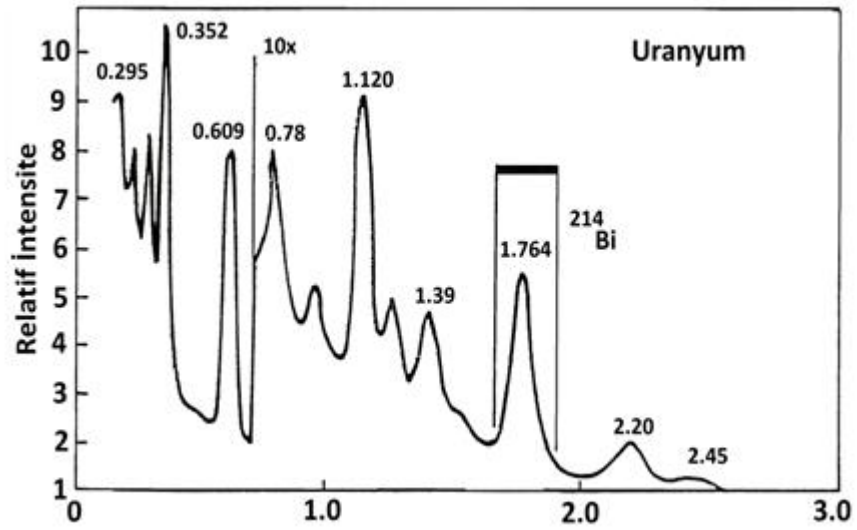
Toryum için seçilen kanallardaki sayımların %86'sı toryumdan %2'si uranyumdan geri kalanı da art-ortamdan gelmektedir. Şekil 3.6'de görüldüğü gibi uranyum spektrumunda yer alan ^{214}Bi 'ün 2.42 MeV enerjili gama pikinden bu kanala küçük bir katkı gelir (Yaprak, 1995; Özken, 2011).



Şekil 3.6 ^{232}Th sintilasyon gama spektrumu ve seçilen enerji aralığı (Yaprak, 1995; Özken, 2011).

3.1.3.2 Uranyum kanalı

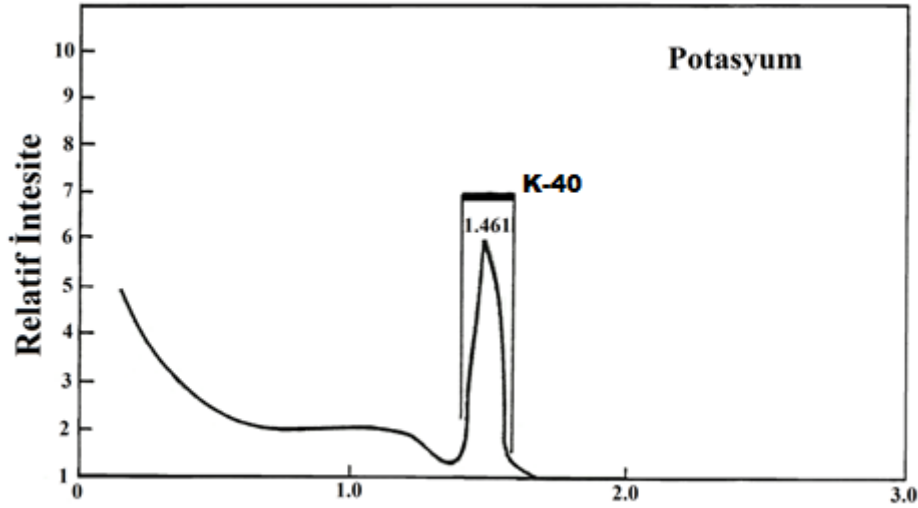
Spektrumda uranyum için seçilen kanallara toryum'dan ihmal edilemeyecek katkılar gelir. Uranyumu saptamakta kullanılan ^{214}Bi 'ün 1.76 MeV gama piki toryum serisinden ^{208}Tl 'in 2.61 MeV enerjili gamasının 2.10 MeV tek kaçak piki ve 1.59 MeV çift kaçak piki arasına düşer (Şekil 3.7). Bunlardan başka toryum serisinde ^{228}Ac 'in 1.588 MeV enerjili gaması da uranyum kanalındaki sayımlara katkıda bulunur. Bu yüzden uranyum kanallarındaki sayımlar uranyum konsantrasyonu hesabında doğrudan kullanılmaz (Yaprak, 1995; Özken, 2011).



Şekil 3.7 ^{238}U sintilasyon gama spektrumu ve seçilen enerji aralığı (Yaprak, 1995; Özken, 2011).

3.1.3.3 Potasyum kanalı

Potasyum kanalındaki sayımların çoğu art-ortamdan kaynaklanmaktadır. Sistem bulunduğu odadaki ortamdan potasyum kanalına gelen katkılar %65 dolayındadır (Şekil 3.8). Toryum ve uranyumdan gelen katkılar da %15-20 arasındadır. Aynı şekilde potasyum kanallarındaki sayımlar da doğrudan konsantrasyon hesabında kullanılmazlar (Yaprak, 1995; Özken, 2011).



Şekil 3.8 ^{40}K sintilasyon gama spektrumu ve seçilen enerji aralığı (Yaprak, 1995; Özken, 2011).

Potasyum, uranyum, toryum konsantrasyonlarını saptamak için seçilen kanallardaki katkıları uygun sıyırma faktörleriyle çıkarmak gerekir. Bu katkı oranlarını geometriye ve spektrometrenin çeşitli ayarlarına bağlı olarak veren faktörlere sıyırma oranları denir. Sıyırma oranları aşağıda gösterildiği gibi bulunur;

$$\alpha = \frac{\text{Toryum'dan Uranyum'a gelen katkı}}{\text{Toryum net sayımı}}$$

$$\beta = \frac{\text{Toryum'dan Potasyum'a gelen katkı}}{\text{Toryum net sayımı}} \quad (3.1)$$

$$\gamma = \frac{\text{Uranyum'dan Potasyum'a gelen katkı}}{\text{Uranyum net sayımı}}$$

Net sayımlardan %K, ppmU, ppmTh olarak konsantrasyona geçmeyi sağlayan faktörlere de duyarlılık faktörleri denir. Duyarlılık faktörleri aşağıda gösterildiği gibi bulunur;

$$K_1 = \frac{C(Th)}{Th(ppm)}$$

$$K_2 = \frac{C(U)}{U(ppm)} \quad (3.2)$$

$$K_3 = \frac{C(K)}{\%K}$$

$C(Th)$ = Toryum kanallarındaki net sayım

$Th(ppm)$ = Hazırlanan standart kaynağın ppm olarak Th içeriği

$C(U)$ = Uranyum kanallarındaki net sayım

$U(ppm)$ = Hazırlanan standart kaynağın ppm olarak U içeriği

$C(K)$ = Potasyum kanallarındaki net sayım

$\%K$ = Hazırlanan standardın % olarak potasyum içeriği

Uygun standartlar ile duyarlılık faktörleri ve sıyırma oranları saptandıktan sonra, örnek içindeki eU, eTh ve %K konsantrasyonlarına aşağıdaki şekilde geçilir (Yaprak, 1995; Özken, 2011).

$$eTh(ppm) = \frac{C(Th)}{K_1}$$

$$eU(ppm) = \frac{[C(U) - \alpha C(Th)]}{K_2} \quad (3.3)$$

$$\%K = \frac{[C(K) - \gamma [C(U) - \alpha C(Th)] - \beta C(Th)]}{K_3}$$

3.1.3.4 Analitik kalite kontrolü

Gama spektrometre sisteminin analitik kalite kontrolü IAEA kaynaklı referans materyallerinden örneklerle benzer matris ve geometride hazırlanan standartlar kullanılarak yapılmıştır.

Çalışmada kullanılan NaI(Tl) sintilasyon gama spektrometresi 3x3 NaI(Tl) dedektör, ilgili elektronik ekipman ve PC bazlı çok kanallı analizörden oluşmaktadır. Dedektör sistemi 110 mm kalınlıkta kurşun ile zırhlanmıştır.

Currie kriterleri uyarınca gama spektrometre sisteminin ölçebileceği minimum dedekte edebilen aktiviteler (MDA) aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmıştır (Currie, 1968).

$$MDA = \frac{2.71 + 3.29\sqrt{\mu_B}}{K} \quad (3.4)$$

Bu eşitlikte; μ_B tabii fon sayım hızı ve K kullanılan gama spektrometre sisteminde, sayımlarda $Bq kg^{-1}$ olarak aktiviteye geçmeyi sağlayan kalibrasyon faktörleridir (K_{Ra} , K_{Th} , K_K) (Canbaz, 2007). Yukarıdaki eşitliğe dayalı olarak, çalışmada kullanılan gama spektrometre sisteminin 10 000 s'de ölçebileceği MDA'lar; ^{238}U için $1.0 Bq kg^{-1}$, ^{232}Th için $1.0 Bq kg^{-1}$ ve ^{40}K için $5.0 Bq kg^{-1}$ olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 3.5 ve 3.6'de kullanılan gama spektrometre sistemi için duyarlılık faktörleri (10 000s) ve sıyırma oranları verilmektedir.

Çizelge 3.5 Gama spektrometre sisteminin duyarlılık faktörleri.

Radyonüklit	Duyarlılık faktörleri (sayım/Bq kg^{-1})
^{238}U	92.1
^{232}Th	94.4
^{40}K	36.8

Çizelge 3.6 Gama spektrometre sisteminin sıyırma oranları.

α	0.70
β	0.74
γ	1.01

3.1.3.5 Radyoaktif denge

Radyoaktif bir seride bozunma sırasında meydana gelen kayıp, ana çekirdek sayısı N_1 ve bozunma sabiti λ_1 ile orantılıdır. Bozunma sabiti radyoaktif bir çekirdeğin saniyede parçalanma olasılığını verir.

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1 \quad (3.5)$$

Seride ana çekirdekten bozunma yoluyla meydana gelen ürün çekirdeklerde aynı şekilde bozunma yoluyla diğer bir ürün çekirdeğe dönüşür. Bu zincir kuralı çekirdek kararlı hale gelinceye kadar devam eder.

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \lambda_3 N_3 = \dots = \lambda_n N_n \quad (3.6)$$

3.6 eşitliği radyoaktif bozunum serileri için daimi denge koşuludur. Bir bozunum zincirinde ana çekirdek ömrünün, ürün ömrüne göre ($\tau_1 \gg \tau_2, \tau_3 \dots \tau_n$ veya $\lambda_1 \ll \lambda_2, \lambda_3 \ll \lambda_n$) çok uzun olması halinde belli bir süre sonunda, bir ürünün radyoaktif parçalanma ile kayıp hızı oluşum hızına eşit olur (Yaprak, 1995).

(3.6) bağıntısı sistemde herhangi bir kaçak olmadığı sürece, zincirin dengede devam edeceğini ve ürün aktivitesini ölçerek ana çekirdek aktivitesine ulaşabileceğimizi göstermektedir. Söz konusu denge bozulduğunda yani sistemden ana çekirdek veya ürünlerden biri radyoaktif parçalanma dışında sistemden yok olduysa yukarıdaki eşitlik de bozulur. Sistemin tekrardan dengeye gelmesi için serideki en uzun yarı ömürlü radyonüklitin 6-7 yarı ömrü kadar sürenin geçmesi gerekmektedir (Yaprak, 1995; Canbaz, 2007).

Uranyum, bozunum zincirindeki üyeleri arasındaki denge, serideki iki uzun yarı-ömürlü nüklit ^{234}U ($t_{1/2}$) = 250 000 yıl ve ^{230}Th ($t_{1/2}$) = 80000 yıl nedeniyle 10^6 yıldan daha fazla zaman alırken, ^{232}Th ile bozunum ürünleri arasındaki

radyometrik denge yaklaşık 40-50 yılda kurulur. Bunun nedeni toryum serisindeki ürünlerin ^{238}U serisindeki ürünlere göre çok daha kısa yarı ömürlü olmalarıdır (Yaprak, 1995; Canbaz, 2007).

Toryum serisinde en uzun yarı ömürlü ürün $t_{1/2} = 6.7$ yıl ile ^{228}Ra 'dir. Bu yüzden çoğu jeolojik örnekte toryum serisinin dengede olduğu varsayılır. Herhangi bir metamorfik olay ile seri dağılmış olsa bile bu geçici bir dengesizlikle sonuçlanır ve seri jeolojik olarak hemen denge durumuna döner (Yaprak, 1995; Canbaz, 2007).

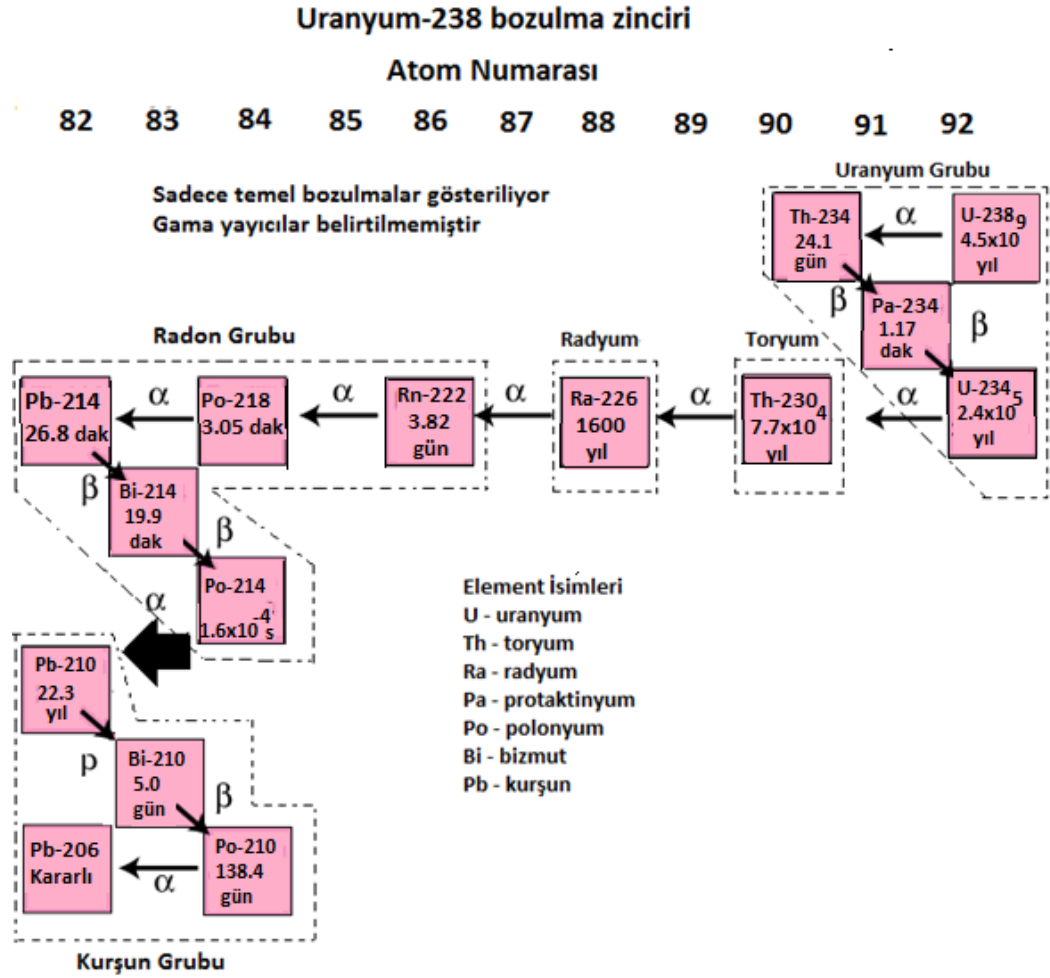
^{232}Th 'nin aksine ^{238}U serisinde radyometrik dengesizliğin çok yaygın olduğu bilinmektedir. Uranyum bozunum ürünlerinin jeolojik olarak bile uzun sayılan yarı ömürleri ile aynı ortamdaki farklı fiziksel ve kimyasal davranışları bu dengesizliğin en önemli nedenidir. Bu yüzden radyoaktif bozunum dışında ürünlerden birinin veya birkaçının kaybedilmesi ile sonuçlanan dağınıklıkta denge kolay tamir edilemez ve radyometrik dengesizlik oluşur (Yaprak, 1995; Canbaz, 2007).

Uranyum bozunum zinciri denge yönündeki 5 ayrı grupta incelenebilir (Şekil 3.9). Her bir gruptaki ürünler kendi gruplarının ana çekirdeği ile dengede kalmak eğilimindeyken, her bir grubun başındaki radyonüklit serisinin ana izotopu ile dengede olmayabilir.

Uranyum bozunum zincirinde, uranyum grubunun ilk üç üyesi arasında (^{238}U , ^{234}Th , ^{234}Pa) radyoaktif denge bir yıldan az sürede kurulur. ^{234}U ile ^{238}U aynı kimyasal özelliklere sahip olduğundan, genelde doğada uranyum grubunun ilk dört üyesi arasında radyoaktif dengenin sürdüğü varsayılır.

Uranyum bozunum zincirinde ilk kırılma ^{230}Th 'dan kaynaklanır. U ve Th kimyasındaki farklılık ^{230}Th 'un uzun yarı ömrü ($t_{1/2} = 80000$ yıl) bu dengesizliğin en büyük nedenidir.

Bozunum zincirindeki ikinci önemli kırılmayı ise 1600 yıl yarı ömre sahip ve toprak alkalilere benzer kimyası ile ^{226}Ra ve bozunum ürünü ^{222}Rn oluşturur. ^{222}Rn , 3.85 gün yarı ömürlü asal bir gazdır ve gözenekli ortamda 1.6 m olan difüzyon uzunluğu ile sistemden kaçma olasılığı çok fazladır (Yaprak, 1995; Canbaz, 2007).



Şekil 3.9 Radyoaktif denge durumuna göre ²³⁸U serisinin gruplandırılması (U.S. Geological Survey, 2015).

Son grubun ilk üyesi olan ²¹⁰Pb'a 22 yıl yarı ömrü ve önünde yer alan ²²²Rn hareketliliği jeokimyasal bağımsızlık kazandırmaktadır.

3.1.4 Radyolojik risk parametrelerinin hesaplanması

Radyasyona maruz kalma sonucu oluşabilecek radyolojik risk, radyasyonun tipi ve enerjisi, radyasyon kaynağına içsel veya dışsal maruz kalma, radyasyonun insan vücudu içinde dağılımı ve radyasyona maruz kalma süresi değerlendirilerek tahmin edilmektedir.

Açık alanlarda insanlar, yüzey toprak/kayaçlarındaki (veya yüzeyi örten diğer tabakalar) radyoaktiviteye dayalı olarak karasal radyasyona maruz

kalmaktadır ve dışsal gama doz hızı bu materyallerdeki doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonları ölçülerek hesaplanmaktadır (UNSCEAR, 1993).

Karasal gama doz hızı, UNSCEAR 2000' de verilen doz dönüşüm katsayıları kullanılarak, aşağıdaki eşitlik uyarınca hesaplanmaktadır.

$$D(nGy\ h^{-1}) = 0.462A_{Ra} + 0.604A_{Th} + 0.0417A_K \quad (3.7)$$

Burada; A_K , A_{Ra} ve A_{Th} sırasıyla topraklarda gözlenen ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktivite konsantrasyonlarıdır ($Bq\ kg^{-1}$).

Yıllık etkin doz eşdeğerinin hesaplandığı dozimetrik bağıntıda, insanların zamanlarının %20'sini bina dışı ortamda geçirdiği varsayımı yapılmıştır (UNSCEAR, 2000).

$$AED (\mu Sv\ y^{-1}) = D(nGy\ h^{-1}) \times 8760(ha^{-1}) \times 0.2 \times 0.7SvGy^{-1} \times 10^{-3} \quad (3.8)$$

Topraklardaki ve bina materyallerindeki doğal radyonüklitler nedeni ile dışsal maruz kalma (karasal gama radyasyonu) ve içsel maruz kalma (^{222}Rn ve ürünlerinin solunması) ile oluşabilecek, dış ve iç radyasyon zarar indeksleri

$$H_{ex} = \frac{A_{Ra}}{370} + \frac{A_{Th}}{259} + \frac{A_K}{4810} \quad (3.9)$$

$$H_{in} = \frac{A_{Ra}}{185} + \frac{A_{Th}}{259} + \frac{A_K}{4810} \quad (3.10)$$

bağıntıları ile tanımlanmakta ve radyolojik risk açısından <1 olması istenmektedir (UNSCEAR, 1982).

Bina materyallerinin spesifik aktivitelerini karşılaştırmak için tanımlanan bir diğer uluslararası ortak indeks, Radyum Eşdeğer Aktivitesi $Ra(eq)$ 'dir ve

$$Ra_{eq} = A_{Ra} + 1.43A_{Th} + 0.077A_K \quad (3.11)$$

bağıntısı ile hesaplanmaktadır (UNSCEAR, 1988).

3.2 Radon Gözlem Programı

3.2.1 Toprak gazı radon ölçümü

Toprak gazı radon aktif ve pasif yöntem ile ölçülmektedir. Aktif metotlar, kısa süreli radon ölçümlerini kapsamaktadır ve bu yöntemde, sık aralıklı periyodik örnekleme zamana bağlı radon konsantrasyon değişimlerini kaydetmek için temel yoldur. Pasif metot ise uzun süreli entegre araç kullanarak (haftalık/aylık), değişken verilerin ortalamasını temel almaktadır (Dursun, 2014). Bu çalışma kapsamında bulunan Orhaneli, Çataldağ ve Eğrigöz plutonlarında her bir kayaç örnekleme noktasında yerinde toprak gazı radon ölçümü yapılmıştır.

Toprak gazında radon konsantrasyonlarının saptanmasında, yerinde anlık ölçümler için radon emanometre tekniği kullanılmaktadır. Radon emanasyon yöntemleri, radon gazını vakum edilmiş bir hacimde üretme tekniğidir. Çalışmada bu amaçla RDU-200 kullanılmıştır. ZnS (Ag) sintilasyon hücrelerine özel pompası ile alınan toprak gazı örneği, radon ve ürünlerinin dengeye gelmesi için 4 saat bekletilerek ve foto-çoğaltıcı tüp (PMT) ve sayıcı içeren RDA-200 sistemiyle 10 dakika sayılmıştır. 16 ZnS (Ag) sintilasyon hücrelerine sahip olan yerinde toprak gazı radon ölçüm sistemi arazi çalışmasına uygundur (Resim 3.4). Ölçüm sisteminden sayım/dakika olarak elde edilen sayımlar, arazide yüksek radon içeriğine sahip alanların rölatif olarak haritalanmasına izin vermektedir.



Resim 3.4 Yerinde toprak gazı radon ölçümü ve ölçüm sistemi.

3.2.2 Radon salınım hızının tayin edilmesi

Dikey yönde toprak gazı akışının radon emanasyonu üzerine etkisi, Clements tarafından önerilen bir boyutlu model göz önüne alınarak kantitatif olarak tayin edilmektedir. Fick ve Darcy yasalarını kullanan bu modele göre, toprak katmanı sabit bir radon üretim değerine sahip, homojen, gözenekli ve yarı sonsuz bir yapıdadır. Radonun yeraltındaki hareketini, onun bozunma sabitiyle sınırlandıran difüzyon teorisine göre, yeryüzünden radon salınım hızı aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır (UNSCEAR, 1993).

Genel olarak, gözenekli homojen, yarı sonsuz bir materyalden atmosfere salınan radon akısı J_D ($\text{Bqm}^{-2}\text{s}^{-1}$) olmak üzere;

$$J_D = C_{Ra} \lambda_{Rn} f \rho \left[\frac{D}{\lambda_{Rn} \varepsilon} \right]^{0.5} \quad (3.12)$$

ile verilir. Bu bağıntıda,

C_{Ra} ; ^{226}Ra aktivite konsantrasyonu (Bq kg^{-1})

λ_{Rn} ; ^{222}Rn bozunum sabiti ($2.1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$)

f ; Radon emanasyon kesri (normal topraklar için değeri=0.2)

ρ ; Materyalin yoğunluğu (kg/m^3 ; normal topraklar için $1.3\text{-}1.6 \text{ kg/m}^3$)

D ; Etkin difüzyon uzunluğu (m^2s^{-1} ; normal topraklar için değeri= $5 \times 10^{-7} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$)

ε ; Materyalin gözenekliliği (normal topraklar için değeri=0.25)

Normal topraklar için radon akısının dünya ortalaması; $J_D \approx 0.022 \text{ Bqm}^{-2}\text{s}^{-1}$ (0.016-0.026) olarak verilmektedir (UNSCEAR, 1993).

3.3 Dağılım Haritalarının Oluşturulması

Haritalar görsel araçlar olduklarından ilk bakışta algılanmaları ve yorumlanmaları daha kolaydır. Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ile Jeostatistik Yöntemler (Kriging, IDW-Inverse Distance Weighting gibi) yardımıyla, arazide ölçülmüş (toprakta, suda ya da havada) radyoaktivitenin alansal dağılışı iki ya da üç boyutlu olarak çok hassas ve görsel açıdan zengin bir şekilde sunulabilmektedir.

CBS ayrıca radyoaktivitenin veya analizi yapılan herhangi bir radyonüklitin alansal dağılımının diğer parametrelerle (topografya, toprak özellikleri, su örtüsü, jeolojik yapı, bitki örtüsü, yerleşim yerleri vb.) ilişkisini de belirlemede oldukça etkili sonuçlar vermektedir. CBS, herhangi bir radyonüklitin bulunduğu ortamda dağılımını, kimyasal ve fiziksel parametrelerle değişimini belirlemede ve incelenen bölgeye ait kontur haritalarının oluşturulmasında da etkili bir yöntemdir. Ayrıca bir araziden elde edilen radyoaktivite ve radyolojik risk parametrelerine ilişkin verilerin bir veri tabanında depolanması, daha sonra yapılacak çalışmalar için de hem karşılaştırma hem de yeniden kullanma açısından son derece önemlidir. Bu bağlamda, bu doktora tez çalışmasında Orhaneli, Çataldağ ve Eğrigöz granit alanlarına ilişkin dağılım haritaları ArcGIS 10.1 yazılımı ile ArcGIS Geostatistical Analyst modülü kullanılarak çizilmiştir. Diğer interpolasyon tekniklerine kıyasla daha avantajlı olduğu için Kriging yöntemi kullanılmıştır. Kriging yöntemleri arasında ise çevresel araştırmalarda daha uygun olduğu ve daha çok kullanıldığı için normal kriging (ordinary kriging) yöntemi kullanılmıştır.

3.4 İstatistiksel Veri Analizi

Deneye dayalı bir bilimsel çalışma doğru ekipman, kalibrasyon ve teknikle birlikte doğru ölçüm yapma ve elde edilen verilerin uygun yöntemlerle analiz edilerek yorumlanmasına dayanmaktadır.

Deneysel olarak incelediğimiz bir olayı çözmek için olayı çok yönlü olarak ele almak gerekmektedir. İncelenen bir olayı etkileyen sayısız faktör bulunabileceğinden, incelenecek olayı tüm faktörleri ile dikkate alarak incelemek ve çözüm önerilerini ortaya koymak gerekmektedir.

Çok değişkenli (multivariate) istatistiksel analiz, incelenen olay ve çevresindeki çok sayıda içsel ve dışsal faktörleri dikkate alarak, problemi doğasındaki yapısına ilişkin bilgilere göre (gerçek oluşumuna göre) incelemek ve çözümlere ulaşmak için geliştirilmiş yöntemler bütünüdür (Özdamar, 2004).

Tek değişkenli (univariate) istatistiksel analiz yöntemleri; incelenen değişken üzerindeki iç ve dış faktörleri toplumdaki tüm birimler için sabit ya da türdeş kabul ederek çözümlemelere gitmeyi amaçlamaktadır. Türdeş ya da sabit koşulları sağlamak çoğu zaman mümkün değildir. Bu nedenle bir problemin

özümünde çok sayıda ilgili değişkeni dikkate alarak özümleler üretmek gerçekçi bir yaklaşımdır (Özdamar, 2004).

Ayrıntılı olarak ele alındığında incelenen bir değişken, doğasında tek başına bağımsız olarak dağılım göstermez. Az ya da çok, bir ya da daha fazla değişken ile birlikte değişim/ilişki içindedir. Bir değişkeni incelerken bu değişken ile birlikte değişen ya da ilişkili diğer tüm değişkenleri (faktör, koşul) sabit/türdeş kabul etmek ya da kontrol altına almak mümkün değildir. Bu koşulların değişimini problem çözümüne katmak ve gerçekçi özümlelere ulaşmak için çok değişkenli istatistiksel yöntemlerden yararlanmak gerekir (Özdamar, 2004).

Bu doğrultuda, tez çalışması kapsamındaki bölge topraklarında ve kayaçlarında elde edilen radyometrik verilerin çok değişkenli istatistiksel analizleri Korelasyon Analizi (Pearson Korelasyonu ve Spearman Korelasyonu), Varyans Analizi (Tek Yönlü ANOVA, ok Değişkenli Varyans Analizi (MANOVA) ve Kümeleme Analizi (Cluster Analysis) yöntemleri ile SPSS 13.0 ve/veya MATLAB yazılımları kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

Orhaneli, Çataldağ ve Eğrigöz granit alanlarında sürdürülen bu geniş kapsamlı radyolojik gözlem çalışmasında;

- ✓ granit alanları temsil eden granit kayaçlarda ve yüzey topraklarında doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonları ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K saptanmış,
- ✓ radyolojik risk tayini için karasal doğal radyasyondan kaynaklanan içsel ve dışsal dozlar hesaplanmış,
- ✓ yerinde toprak gazı radon ölçülmüş ve topraktan ^{222}Rn salınım hızı hesaplanmış,
- ✓ doğal radyonüklit ve doz dağılım haritaları oluşturulmuş
- ✓ elde edilen sonuçlar çok değişkenli istatistik analiz yöntemleri ile değerlendirilmiştir.

Elde edilen sonuçlar aşağıdaki başlıklar altında detaylandırılmıştır.

4.1 Radyolojik Gözlem

4.1.1 Orhaneli plutonunun radyolojik karakteristikleri

Orhaneli granitoid alanını temsil edecek şekilde alınan granitik kayaç ve toprak örneklerinde doğal radyonüklit (^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K) aktivite konsantrasyonları gama spektrometrik olarak belirlenmiştir. Çizelge 4.1 ve 4.2, sırasıyla, kayaçlarda ve topraklarda belirlenen doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonlarını ve bu konsantrasyonlara dayalı olarak hesaplanan karasal doğal radyasyondan kaynaklanan doz hızlarını (D), yıllık etkin doz eşdeğerlerini (AED), radyum eşdeğer aktivitelerini (Ra_{eq}), dış ve iç zarar indekslerini (H_{ex} ve H_{in}) tanımlayıcı istatistik sonuçları ile birlikte listelemektedir. Çizelgelerde, doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonları % 68 güven aralığında (1σ standart sapma ile) ve kuru ağırlığa göre ifade edilmiş ve bu aktivite konsantrasyonlarının bağlı belirsizliklerinin ^{226}Ra ve ^{232}Th için % 3'ten, ^{40}K için ise %1'den daha düşük olduğu gözlenmiştir.

Çizelge 4.1 Orhaneli plutonu granitik kayaçlar için tanımlayıcı istatistik.

	Doğal Radyonüklit Aktivite Konsantrasyonları			Radyolojik Risk Parametreleri				
	²²⁶ Ra (Bq kg ⁻¹)	²³² Th (Bq kg ⁻¹)	⁴⁰ K (Bq kg ⁻¹)	D (nGy h ⁻¹)	AED (μSv y ⁻¹)	Ra _(eq) (Bq kg ⁻¹)	H _(ex)	H _(in)
Örnek Sayısı	22	22	22	22	22	22	22	22
Aritmetik Ortalama ± SH	26±1	32±1	515±19	53±2	65±2	112±3	0.30±0.01	0.37±0.01
Standart Sapma (SD)	6	5	90	8	9	16	0.04	0.06
Geometrik Ortalama	25	32	506	52	64	110	0.30	0.37
Min.	15	23	217	35	43	76	0.21	0.27
25'nci Yüzdelik	23	29	488	46	57	97	0.26	0.31
Medyan	25	32	515	53	65	112	0.31	0.37
75'nci Yüzdelik	30	36	560	60	74	126	0.34	0.43
Max.	38	42	748	65	79	137	0.37	0.46
Skewness	0.386	-0.266	-0.935	-0.371	-0.371	-0.266	-0.191	0.049
Kurtosis	-0.103	-0.330	6.913	-0.311	-0.311	-0.585	-0.791	-1.045
Kolmogorov-Smirnov Test Sig.	0.470	0.960	0.198	0.980	0.980	0.971	0.870	0.876
Frekans Dağılımı	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal

Hatalar 1σ standart sapma ile ifade edilmiştir.

Çizelge 4.2 Orhaneli plutonu toprak örnekleri için tanımlayıcı istatistik.

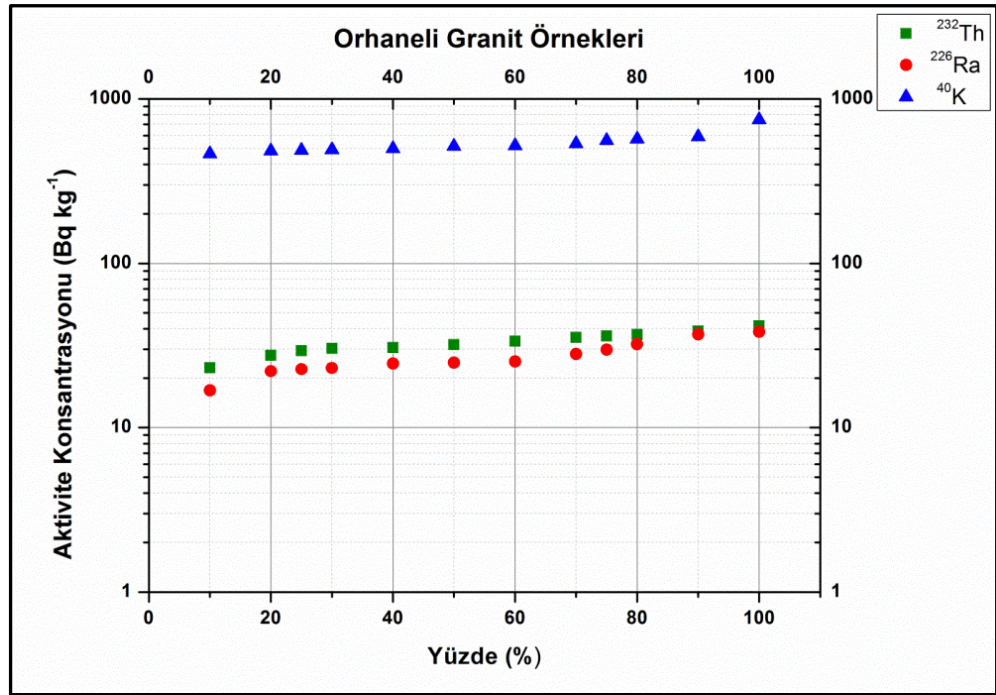
	Doğal Radyonüklit Aktivite Konsantrasyonları			Radyolojik Risk Parametreleri				
	²²⁶ Ra (Bq kg ⁻¹)	²³² Th (Bq kg ⁻¹)	⁴⁰ K (Bq kg ⁻¹)	D (nGy h ⁻¹)	AED (μSv y ⁻¹)	Ra _(eq) (Bq kg ⁻¹)	H _(ex)	H _(in)
Örnek Sayısı	43	43	43	43	43	43	43	43
Aritmetik Ortalama ± SH	33±3	50±4	619±36	71±5	87±6	151±11	0.41±0.03	0.50±0.04
Standart Sapma (SD)	18	29	234	34	42	74	0.20	0.24
Geometrik Ortalama	29	44	584	65	80	139	0.37	0.45
Min.	8	17	323	39	48	81	0.20	0.30
25'nci Yüzdelik	22	35	448	51	62	108	0.29	0.35
Medyan	25	40	548	56	69	119	0.32	0.39
75'nci Yüzdelik	34	53	735	78	95	165	0.45	0.53
Max.	84	159	1409	189	232	410	1.11	1.30
Skewness	1.540	2.047	1.580	1.822	1.822	1.842	1.842	1.766
Kurtosis	1.536	4.363	2.284	2.900	2.900	2.984	2.984	2.477
Kolmogorov-Smirnov Test Sig.	0.008	0.004	0.010	0.002	0.002	0.002	0.002	0.004
Frekans Dağılımı	Log-Normal	Log-Normal	Log-Normal	Log-Normal	Log-Normal	Log-Normal	Log-Normal	Log-Normal

Hatalar 1σ standart sapma ile ifade edilmiştir.

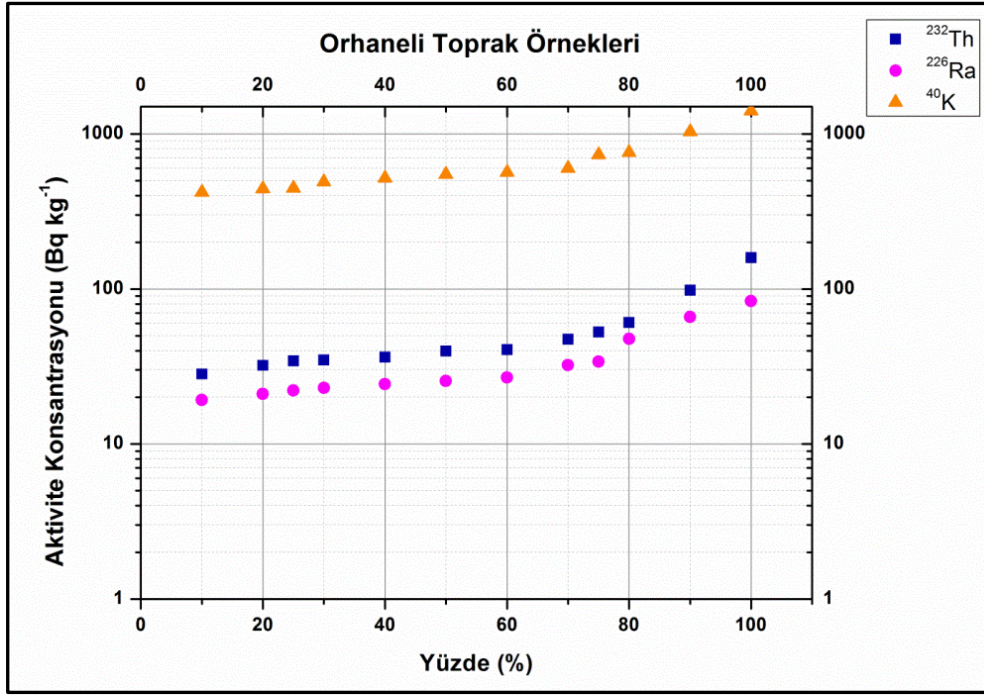
Ana kaya litolojisinin topraklarda doğal radyonüklitlerin varlığına ve dağılımına ilişkin önemli bir faktör olduğu bilinmektedir. Granit kayaçlarda belirlenen ortalama ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktivite konsantrasyonları ve tipik aralıkları sırasıyla, 26 ± 1 (15-38) Bq kg^{-1} , 32 ± 1 (23-42) Bq kg^{-1} ve 515 ± 19 (217-748) Bq kg^{-1} 'dir (Çizelge 4.1). Topraklarda ise, ^{226}Ra aktivite konsantrasyonu 33 ± 3 Bq kg^{-1} ortalama ile 8-84 Bq kg^{-1} arasında; ^{232}Th 50 ± 4 Bq kg^{-1} ortalama ile 17-159 Bq kg^{-1} arasında ve ^{40}K 619 ± 36 Bq kg^{-1} ortalama ile 323-1409 Bq kg^{-1} arasında değişmektedir (Çizelge 4.2).

Şekil 4.1 ve 4.2'de, sırasıyla, granit kayaçlarda ve topraklarda gözlenen doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonlarına ait kümülatif dağılım grafikleri verilmektedir. Bu grafiklerden maksimum değerlerle kıyaslandığında dağılımların %75'inin nispeten düşük radyasyon seviyeleri gösterirken sadece birkaç örneğin yüksek doğal radyasyon seviyelerine ulaştığı görülmektedir. Bunun yanı sıra, ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktivite konsantrasyonlarının medyan değerleri etrafında geniş bir yayılım bölgesi bulunmaktadır ve bu bölge genellikle 25. ve 75. yüzdelik dilimler tarafından tanımlanmaktadır. Granit kayaçlar için bu aralıklar, Çizelge 4.1 ve Şekil 4.1'de görüldüğü gibi, ^{226}Ra için 23-30 Bq kg^{-1} ; ^{232}Th için 29-36 Bq kg^{-1} ve ^{40}K için 488-560 Bq kg^{-1} 'dir. UNSCEAR 1993 Raporunda, normal granitlerde ^{226}Ra aktivite konsantrasyonu 20-120 Bq kg^{-1} ; ^{232}Th 20-80 Bq kg^{-1} ve ^{40}K 600-1800 Bq kg^{-1} olarak; uranyum ve toryumca zengin granitlerde ise ^{226}Ra 100-500 Bq kg^{-1} ; ^{232}Th 40-350 Bq kg^{-1} ve ^{40}K 1200-1800 Bq kg^{-1} olarak rapor edilmektedir. Orhaneli granit plutonu granit kayaçlar için elde edilen bu değerler UNSCEAR 1993'te normal granitler için verilen tipik aralıklar ile uyumludur. Toprak örnekleri için ise 25. ve 75. yüzdelik dilimler tarafından tanımlanan aktivite aralıkları ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K için, sırasıyla, 22-34; 35-53 ve 448-735 Bq kg^{-1} olarak bulunmuştur (Çizelge 4.2 ve Şekil 4.2). Bu değerler de, UNSCEAR 2000'de normal topraklar için verilen doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonlarının tipik aralıkları [^{226}Ra : 35 (17-60) Bq kg^{-1} , ^{232}Th : 30 (11-64) Bq kg^{-1} ve ^{40}K : 400 (140-850) Bq kg^{-1}] ile karşılaştırılabilir düzeydedir. Diğer yandan, Orhaneli granit plutonunda gerçekleştirilen jeokimyasal çalışmalarda uranyum konsantrasyonunun 1.39-2.93 ppm [(17.2-36.2 Bq/kg); 1ppmU= 12.353 Bqkg^{-1}] (Harris et al., 1994) ve 2.55-30.40 ppm [(31.5-375.5 Bq/kg); 1ppmU= 12.353 Bqkg^{-1}] (Altunkaynak et al., 2012a) arasında, toryum konsantrasyonunun ise 8.04-12.10 ppm [(32.8- 49.3 Bq/kg); 1ppmTh= 4.074 Bqkg^{-1}] (Harris et al., 1994) ve 10.39-46.10 ppm [(42.3-187.8 Bq/kg); 1ppmTh= 4.074 Bqkg^{-1}] (Altunkaynak et al., 2012) arasında değiştiği gözlenmiştir.

Frekans dağılımlarını belirlemek için her bir değişkene parametrik olmayan Kolmogorov-Smirnov normalite testi uygulanmıştır. Bu test sonucu elde edilen anlamlılık (significance) değerlerinin istatistiksel hesaplamalarda sınır değeri kabul edilen 0,05'ten büyük olması dağılımların normal olduğunu göstermektedir. Bu testin yanı sıra, skewness ve kurtosis değerlerinin sıfıra yakın olması ile aritmetik ortalama, medyan ve geometrik ortalama değerlerinin karşılaştırılması da dağılımlar hakkında bilgi verir. Normal dağılım fonksiyonunda, aritmetik ortalama ile medyan değeri benzer iken, log-normal dağılım fonksiyonunda geometrik ortalama ile medyan değeri birbirine benzer olmaktadır (Blagoeva and Zikovsky, 1995). Buna göre, Orhaneli granit plutonu granit kayaç örneklerinin doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonu dağılımlarının normal dağılıma uyduğu Çizelge 4.1 ve Şekil 4.1'den açıkça görülmektedir. Toprak örneklerinin doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonu dağılımları ise normal dağılıma uymamaktadır (Çizelge 4.2 ve Şekil 4.2).



Şekil 4.1 Orhaneli plutonu granitik kayaçlarda gözlenen doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonlarına ait kümülatif dağılım grafiği.

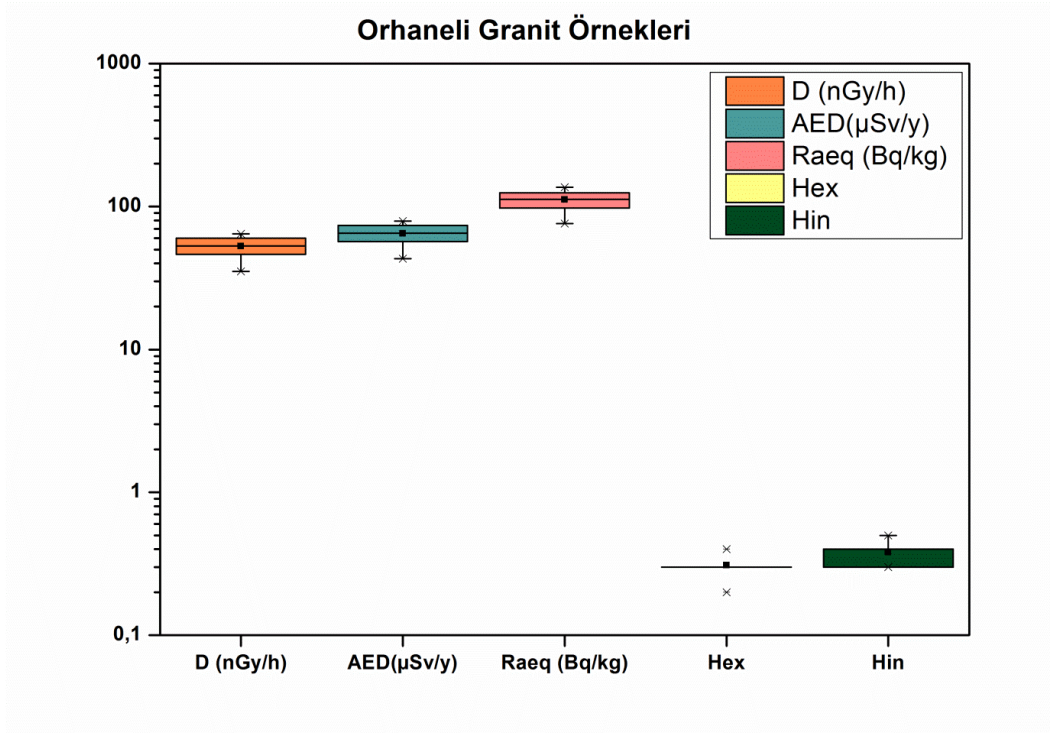


Şekil 4.2 Orhaneli plutonu toprak örneklerinde gözlenen doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonlarına ait kümülatif dağılım grafiği.

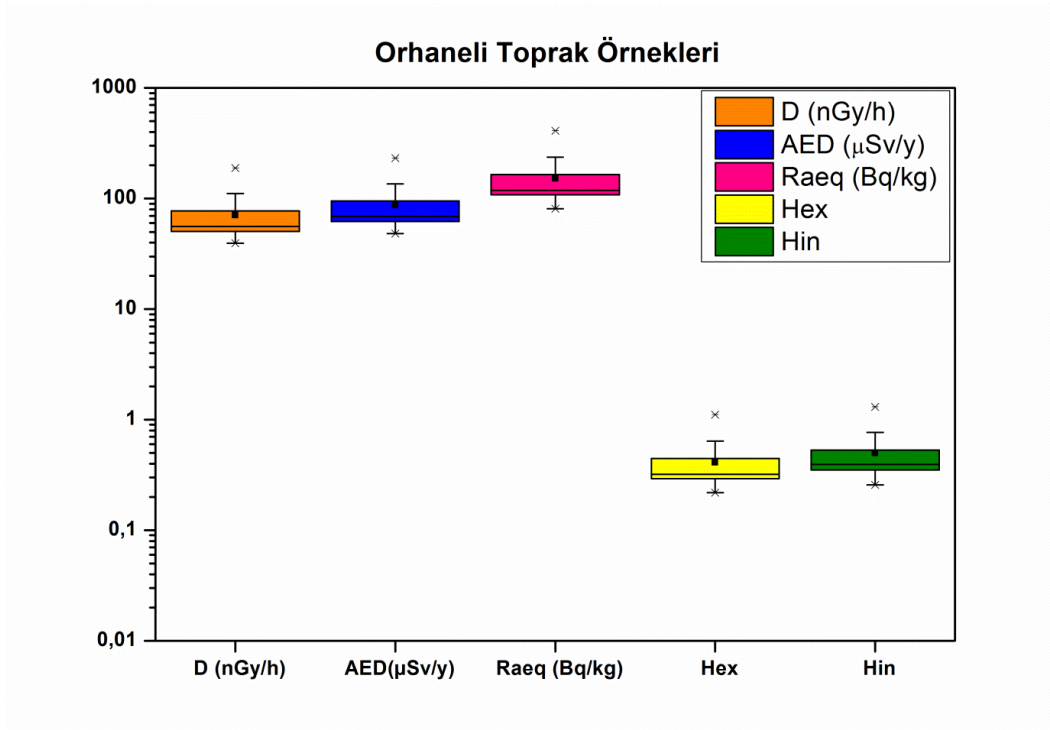
Orhaneli plutonuna ait kayaç ve topraklar için UNSCEAR Raporları doğrultusunda hesaplanan radyolojik risk parametrelerinin değişkenliğini ve dağılımını değerlendirmek üzere kutu grafikleri, sırasıyla, Şekil 4.3'te ve Şekil 4.4'te verilmiştir. Kutu grafiği yüzdelerle dayanan tanımlayıcı istatistikleri kullanır ve değişkenin temel özellikleri hakkında bilgi verir. Sapın alt kısmındaki düz çizgi en küçük değeri (minimum), kutunun alt kısmı değerlerin %25'inin başladığı sınırı, kutunun ortasındaki düz çizgi medyan (ortanca) değeri, kutuların içindeki siyah kareler aritmetik ortalamayı, kutunun üst kısmı değerlerin %75'inin başladığı sınırı ve sapın üst kısmındaki düz çizgi en büyük değeri (maksimum) ifade etmektedir. Sapların alt ve üst kısmındaki çarpı işaretleri ise dağılımın %1'lik ve %99'luk kısımlarını göstermektedir. Kutu, dağılımın %50'sinin merkezi eğilimi ve yaygınlığı ile ilgili bilgi verir. Eğer medyan çizgisi merkezin altında ise dağılım pozitif çarpık, üstünde ise negatif çarpıktır. Tam ortada yer alması dağılımın normal olduğunu göstermektedir. Bu açıklamalar doğrultusunda, Çizelge 4.1 ve Şekil 4.3'den, granit örneklerinde karasal doğal radyasyondan kaynaklanan gama doz hızlarının 53 ± 2 nGy h⁻¹ ortalama ile 35-65 nGy h⁻¹ arasında; yıllık etkin doz eşdeğerinin ise 43-79 µSv y⁻¹ aralığında ve ortalama 65 ± 2 µSv y⁻¹ olduğu görülmektedir. Bu değerler UNSCEAR 1993 Raporunda normal granitler için verilen doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonlarına dayalı olarak hesaplanan doz hızları (46-179 nGy h⁻¹) ve yıllık etkin doz eşdeğeri (57-

219 $\mu\text{Sv y}^{-1}$) referans aralıkları içerisinde (UNSCEAR, 1993). Diğer radyolojik risk parametreleri R_{eq} , H_{ex} ve H_{in} için, sırasıyla, 112 ± 3 (76-137) Bq kg^{-1} , 0.30 ± 0.01 (0.21-0.37) ve 0.37 ± 0.01 (0.27-0.46) olarak hesaplanan ortalama, min.-max. değerleri, UNSCEAR Raporunda normal granitler için özelleştirilen R_{eq} (95-373 Bq kg^{-1}), H_{ex} (0.26-1.01) ve H_{in} (0.31-1.33) değerleri ile uyumludur. Ayrıca Çizelge 4.1'deki Kolmogorov-Smirnov normalite tesiti sonuçları, skewness ve kurtosis değerleri ve Şekil 4.3'te tam ortada yer alan medyan çizgisi ve aritmetik ortalamayı gösteren siyah kutuların da bu medyan çizgisi üzerinde yer alması radyolojik risk parametrelerinin normal dağılıma uyduğunu açıkça göstermektedir.

Orhaneli plutonu toprak örneklerine ait radyolojik risk parametrelerine ilişkin tanımlayıcı istatistik Çizelge 4.2'de ve bunları özetleyen kutu grafiği Şekil 4.4'te verilmiştir. Karasal doğal radyasyondan kaynaklanan gama doz hızları 71 ± 5 nGy h^{-1} ortalama ile 39-189 nGy h^{-1} arasında değişmiştir. Yıllık etkin doz eşdeğeri ise 87 ± 6 $\mu\text{Sv y}^{-1}$ ortalama ile 48-232 $\mu\text{Sv y}^{-1}$ aralığındadır. Normal alanlarda karasal gama doz hızları, UNSCEAR 2000 Raporunda 59 (10-200) nGy h^{-1} olarak tahmin edilmektedir. Buna bağlı olarak, havada soğurulmuş doz hızını etkin doz eşdeğerine dönüştürmek için 0.7 Sv Gy^{-1} katsayısının uygulanması ve insanların zamanlarının %20'sini bina dışı ortamda geçirdiği varsayımıyla maksimum yıllık etkin doz eşdeğeri yaklaşık 245 $\mu\text{Sv y}^{-1}$ olarak bulunmuştur. Çizelge 4.2 ve Şekil 4.4'ten görüldüğü gibi Orhaneli plutonu toprak örneklerinde doğal radyasyondan kaynaklanan karasal gama doz hızları 200 nGy h^{-1} 'den küçüktür. Benzer şekilde, elde edilen sonuçlar yıllık etkin doz eşdeğerinin de maksimum dozdan daha düşük olduğunu göstermektedir. Radium eşdeğer aktivitesi R_{eq} 151 ± 11 (81-410) Bq kg^{-1} olarak bulunmuş olup örneklerin %75'i UNSCEAR 1988'de müsaade edilen limit değer olan 370 Bq kg^{-1} 'i geçmemektedir. H_{ex} 0.41 ± 0.03 (0.20-1.11) ve H_{in} 0.50 ± 0.04 (0.30-1.30) ise olarak bulunmuştur. UNSCEAR 1982 raporunda H_{ex} ve H_{in} değerlerinin <1.0 olması tavsiye edilmektedir. Bulunan sonuçlar bu limit değer ile karşılaştırılabilir düzeydedir. Frekans dağılımına gelince, Çizelge 4.2'de Kolmogorov-Smirnov normalite tesiti sonuçları, skewness ve kurtosis değerleri ve Şekil 4.4'te medyan çizgisinin ortadan sapması (sağa çarpık) ve aritmetik ortalamayı gösteren siyah kutuların da bu medyan çizgisinden sapmış olması tüm radyolojik risk parametrelerinin dağılımlarının normal dağılıma uymadığını net bir şekilde ortaya koymaktadır.



Şekil 4.3 Orhaneli plutonu granitik kayalara ait radyolojik risk parametrelerine ilişkin box plot grafiği.



Şekil 4.4 Orhaneli plutonu toprak örneklerine ait radyolojik risk parametrelerine ilişkin box plot grafiği.

4.1.2 Çataldağ plutonunun radyolojik karakteristikleri

Çataldağ granitoid alanını temsil edecek şekilde alınan 28 kayaç ve 57 toprak örneğinde belirlenen doğal radyonüklit (^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K) aktivite konsantrasyonları ve bu konsantrasyonlara dayalı olarak hesaplanan karasal doğal radyasyondan kaynaklanan doz hızları (D), yıllık etkin doz eşdeğerleri (AED), radyum eşdeğer aktiviteleri (Ra_{eq}), dış ve iç zarar indeksleri (H_{ex} ve H_{in}) tanımlayıcı istatistik sonuçları ile birlikte Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4'te listelenmiştir. Doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonları 1σ hata payı içerisinde, kuru ağırlığa göre ifade edilmiş ve kayaç ve toprak örneklerinde aktivite konsantrasyonlarına ait bağıl belirsizliklerin % 68 güven aralığında ^{226}Ra ve ^{232}Th için % 10'dan, ^{40}K için ise %5'ten daha düşük olduğu gözlenmiştir. İlgili çizelgelere göre, granit kayaçlarda ^{226}Ra aktivite konsantrasyonu 58 ± 4 Bq kg^{-1} ortalama ile 21-115 Bq kg^{-1} arasında; ^{232}Th 53 ± 4 Bq kg^{-1} ortalama ile 14-103 Bq kg^{-1} arasında ve ^{40}K 774 ± 33 Bq kg^{-1} ortalama ile 450-1194 Bq kg^{-1} arasında değişirken, topraklarda ölçülen ortalama aktivite konsantrasyonları ve tipik aralıkları ^{226}Ra için 48 ± 4 (4-130) Bq kg^{-1} , ^{232}Th için 52 ± 4 (5-114) Bq kg^{-1} ve ^{40}K için 667 ± 33 (54-1279) Bq kg^{-1} 'dir. Granit kayaçlar ve topraklar için elde edilen minimum ve maksimum değerler UNSCEAR raporlarında normal granitler ve normal topraklar için verilen tipik aralıkları aşıyor gibi görünse de Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da gösterilen granit kayaçlarda ve topraklarda gözlenen doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonlarına ait kümülatif dağılım grafiklerinden sadece birkaç örneğin düşük/yüksek doğal radyasyon seviyeleri gösterdiği görülmektedir.

Çizelge 4.3 Çataldağ plutonu granitik kayaçlar için tanımlayıcı istatistik.

	Doğal Radyonüklit Aktivite Konsantrasyonları			Radyolojik Risk Parametreleri				
	²²⁶ Ra (Bq kg ⁻¹)	²³² Th (Bq kg ⁻¹)	⁴⁰ K (Bq kg ⁻¹)	D (nGy h ⁻¹)	AED (μSv y ⁻¹)	Ra _(eq) (Bq kg ⁻¹)	H _(ex)	H _(in)
Örnek Sayısı	28	28	28	28	28	28	28	28
Aritmetik Ortalama ± SH	58±4	53±4	774±33	91±4	112±5	194±9	0.52±0.02	0.68±0.03
Standart Sapma (SD)	23	22	174	20	24	45	0.12	0.18
Geometrik Ortalama	53	48	754	89	109	188	0.51	0.66
Min.	21	14	450	43	53	88	0.24	0.29
25'nci Yüzdelik	39	36	635	79	97	164	0.44	0.57
Medyan	57	52	795	91	112	195	0.53	0.67
75'nci Yüzdelik	72	72	898	109	133	233	0.63	0.82
Max.	115	103	1194	127	155	277	0.75	1.06
Skewness	0.510	0.164	0.163	-0.360	-0.360	-0.281	-0.281	-0.040
Kurtosis	-0.015	-0.498	-0.234	0.183	0.183	-0.005	-0.005	0.144
Kolmogorov-Smirnov Test Sig.	0.998	0.981	0.998	0.989	0.989	0.934	0.934	0.983
Frekans Dağılımı	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal

Hatalar 1σ standart sapma ile ifade edilmiştir.

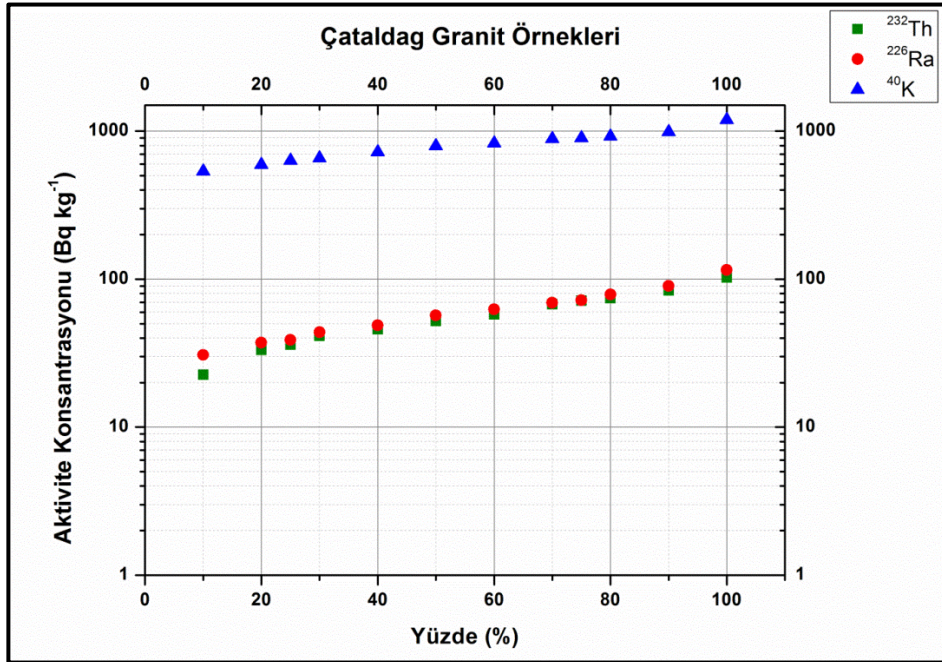
Çizelge 4.4 Çataldağ plutonu toprak örnekleri için tanımlayıcı istatistik.

	Doğal Radyonüklit Aktivite Konsantrasyonları			Radyolojik Risk Parametreleri				
	²²⁶ Ra (Bq kg ⁻¹)	²³² Th (Bq kg ⁻¹)	⁴⁰ K (Bq kg ⁻¹)	D (nGy h ⁻¹)	AED (μSv y ⁻¹)	Ra _(eq) (Bq kg ⁻¹)	H _(ex)	H _(in)
Örnek Sayısı	57	57	57	57	57	57	57	57
Aritmetik Ortalama ± SH	48±4	52±4	667±33	81±5	99±6	173±10	0.47±0.03	0.60±0.04
Standart Sapma (SD)	29	29	248	35	43	77	0.21	0.28
Geometrik Ortalama	38	42	599	71	87	151	0.41	0.51
Min.	4	5	54	8	10	17	0.05	0.06
25'nci Yüzdelik	26	30	535	60	73	124	0.34	0.41
Medyan	41	49	659	79	97	167	0.45	0.57
75'nci Yüzdelik	68	74	828	103	126	221	0.60	0.76
Max.	130	114	1279	169	207	362	0.98	1.27
Skewness	0.811	0.449	-0.048	0.114	0.114	0.117	0.117	0.321
Kurtosis	0.360	-0.629	0.780	0.057	0.057	-0.46	-0.46	0.015
Kolmogorov-Smirnov Test Sig.	0.672	0.586	0.806	0.943	0.943	0.943	0.943	0.986
Frekans Dağılımı	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal

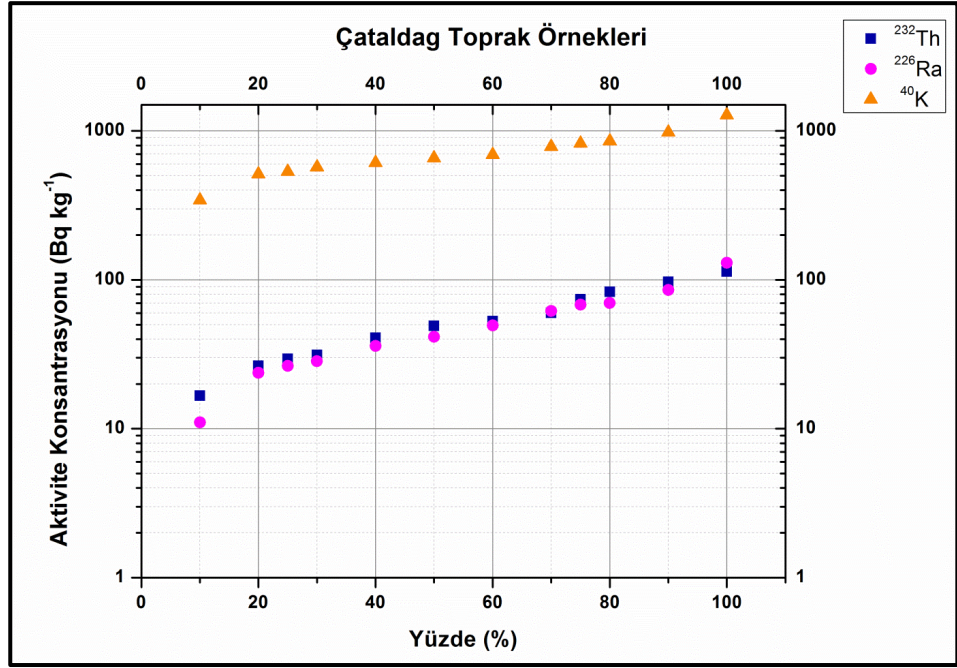
Hatalar 1σ standart sapma ile ifade edilmiştir.

Şekil 4.5 ve 4.6'ya göre, doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonu dağılımları genellikle 25. ve 75. yüzdilik dilimler arasında medyan etrafında yayılmaktadır. 25. ve 75. yüzdilik dilimler tarafından tanımlanan aktivite aralıkları granit kayaçlarda ^{226}Ra için 39-72 Bq kg⁻¹, ^{232}Th için 36-72 Bq kg⁻¹ ve ^{40}K için 635-898 Bq kg⁻¹ iken ve topraklarda ^{226}Ra için 26-68 Bq kg⁻¹, ^{232}Th için 30-74 Bq kg⁻¹ ve ^{40}K için 535-828 Bq kg⁻¹'dir. Bu değerler, UNSCEAR 1993'de, normal granitler için verilen doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonları tipik aralıkları [^{226}Ra : 20-120 Bq kg⁻¹, ^{232}Th : 20-80 Bq kg⁻¹ ve ^{40}K : 600-1800 Bq kg⁻¹] ile ve UNSCEAR 2000'de normal topraklar için verilen doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonları tipik aralıkları [^{226}Ra : 35 (17-60) Bq kg⁻¹, ^{232}Th : 30 (11-64) Bq kg⁻¹ ve ^{40}K : 400 (140-850) Bq kg⁻¹] ile karşılaştırılabilir düzeydedir (UNSCEAR, 1993; 2000). Ayrıca, Sapancı ve ark. (2012) tarafından Çataldağ Granitoidi'nden alınan örnekler üzerinde yapılan jeokimyasal çalışmalarda, uranyum konsantrasyonunun 1.1-16.3 ppm [(13.6-201.3 Bq/kg); 1ppmU= 12.353 Bqkg⁻¹], toryum konsantrasyonunun ise 9.9-23.2 ppm [(40.3- 94.5 Bq/kg); 1ppmTh= 4.074 Bqkg⁻¹] arasında değiştiği gözlenmiştir (Sapancı vd., 2012).

Çizelge 4.3 ve 4.4'te verilen parametrik olmayan Kolmogorov-Smirnov normalite tesiti sonuçları ile diğer tanımlayıcı istatistik sonuçlarından Çataldağ plutonunda hem kayaç örneklerinde hem de toprak örneklerinde doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonu dağılımlarının normal dağılıma uyduğu görülmektedir.



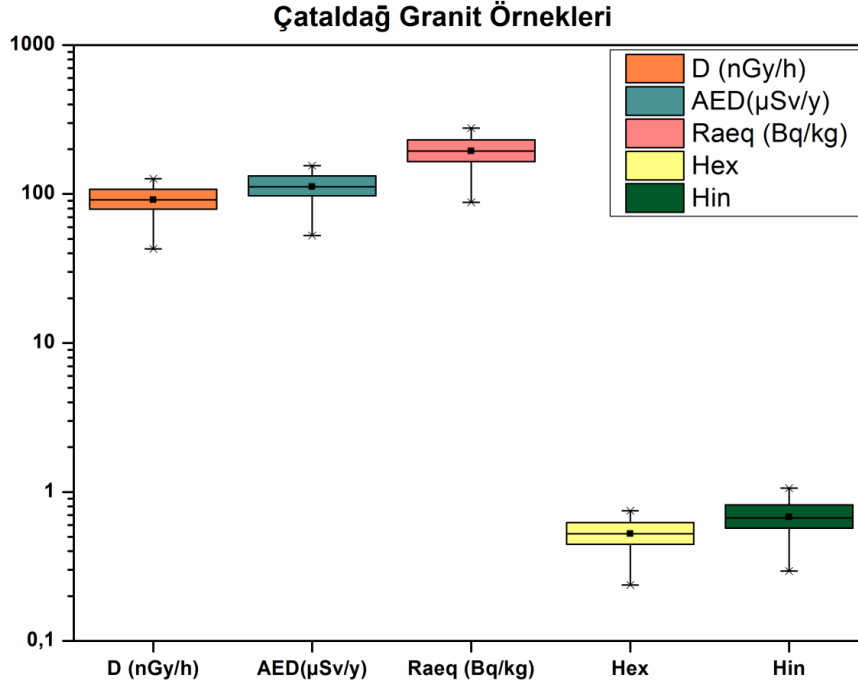
Şekil 4.5 Çataldağ plutonu granitik kayaçlarda gözlenen doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonlarına ait kümülatif dağılım grafiği.



Şekil 4.6 Çataldağ plutonu toprak örneklerinde gözlenen doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonlarına ait kümülatif dağılım grafiği.

Şekil 4.7 ve 4.8, sırasıyla, Çataldağ plutonu granit ve toprak örnekleri için Çizelge 4.3 ve 4.4'te tanımlayıcı istatistik sonuçları verilmiş olan radyolojik risk parametrelerine ait kutu grafiklerini göstermektedir. Grafikler, bu parametrelerin değişkenliğinin ve dağılımının görsel olarak da değerlendirilmesini sağlar. Çataldağ plutonu granit örneklerinde karasal doğal radyasyondan kaynaklanan gama doz hızları 91 ± 4 nGy h⁻¹ ortalama ile 43-127 nGy h⁻¹ arasında; yıllık etkin doz eşdeğeri ise 112 ± 5 µSv y⁻¹ ortalama ile 53-155 µSv y⁻¹ arasında bulunmuştur. UNSCEAR 1993'te normal granitler için verilen doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonlarına dayalı olarak hesaplanan doz hızları 46-179 nGy h⁻¹ aralığında ve bu doz hızlarına karşılık gelen yıllık etkin doz eşdeğeri ise 57-219 µSv y⁻¹'dir. Granit örnekleri için elde edilen doz hızlarının ve yıllık etkin doz eşdeğerinin UNSCEAR 1993'te özelleştirilen değerler ile uyumlu olduğu görülmektedir. Doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonlarına bağlı olan diğer risk parametreleri ise: Ra_{eq} 194 ± 9 (88-277) Bq kg⁻¹, H_{ex} 0.52 ± 0.02 (0.24-0.75) ve H_{in} 0.68 ± 0.03 (0.29-1.06) olarak hesaplanmıştır. Elde edilen değerler UNSCEAR 1993'te normal granitler için özelleştirilen [Ra_{eq} (95-373 Bq kg⁻¹), H_{ex} (0.26-1.01) ve H_{in} (0.31-1.33)] aralıklar içinde yer almaktadır. Ayrıca Çizelge 4.3'teki parametrik olmayan Kolmogorov-Smirnov normalite testi sonuçları ile diğer tanımlayıcı istatistik sonuçları bu plutona ait kayalarda radyolojik risk

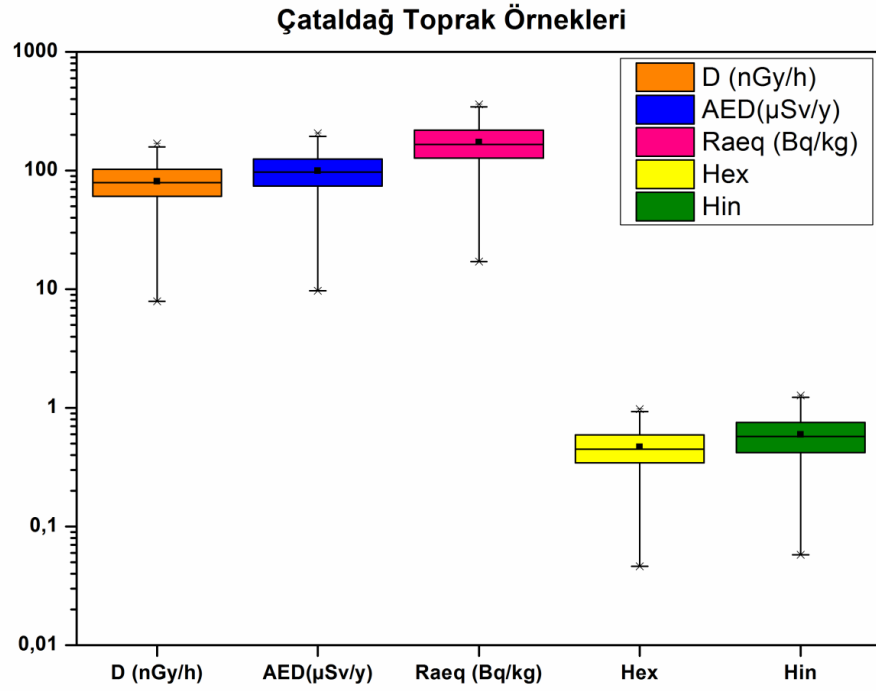
parametrelerinin dağılımının normal olduğunu göstermektedir. Şekil 4.7’de verilen kutu grafiklerinde aritmetik ortalamayı gösteren siyah kutuların tam ortada medyan çizgisi üzerinde yer alması bu dağılımların normal dağılıma uyduğunu desteklemektedir.



Şekil 4.7 Çataldağ plutonu granitik kayalara ait radyolojik risk parametrelerine ilişkin box plot grafiği.

Çataldağ plutonu toprak örneklerine ait karasal doğal radyasyondan kaynaklanan gama doz hızları $81 \pm 5 \text{ nGy h}^{-1}$ ortalama ile $8\text{-}169 \text{ nGy h}^{-1}$ arasında değişmiştir. Yıllık etkin doz eşdeğeri ise $99 \pm 6 \text{ μSv y}^{-1}$ ortalama ile $10\text{-}207 \text{ μSv y}^{-1}$ aralığındadır. Normal alanlarda karasal gama doz hızları, UNSCEAR 2000 Raporunda $59 (10\text{-}200) \text{ nGy h}^{-1}$ olarak, ortalama yıllık etkin doz eşdeğeri ise yaklaşık 70 μSv y^{-1} olarak tahmin edilmektedir. Çizelge 4.4 ve Şekil 4.8’den görüldüğü gibi Çataldağ plutonu toprak örneklerinde doğal radyasyondan kaynaklanan karasal gama doz hızları ortalaması UNSCEAR tarafından önerilen ortalama değerden yüksek fakat maksimum değer olan 200 nGy h^{-1} ’den küçüktür. Benzer şekilde, elde edilen yıllık etkin doz eşdeğeri ortalaması da UNSCEAR tarafından önerilen ortalama değerden yüksek fakat maksimum değer olan 245 μSv y^{-1} ’dan küçüktür. $173 \pm 10 \text{ Bq kg}^{-1}$ ortalama ile $17\text{-}362 \text{ Bq kg}^{-1}$ aralığında hesaplanmış olan radyum eşdeğer aktivitesi (R_{eq}) de UNSCEAR 1988’de

müsaade edilen limit değeri (370 Bq kg^{-1}) aşmamaktadır. Çizelge 4.4'ten dış ve iç zarar indekslerinin (H_{ex} ve H_{in}) ortalamaları limit değer olan 1'den küçüktür. Sadece üç örnekte H_{in} değeri >1 fakat karşılaştırılabilir düzeydedir. Son olarak, toprak örnekleri için tüm radyolojik risk parametrelerinin dağılımlarının normal dağılıma uyduğu Çizelge 4.4 ve Şekil 4.8'den açıkça görülmektedir.



Şekil 4.8 Çataldağ plutonu toprak örneklerine ait radyolojik risk parametrelerine ilişkin box plot grafiği.

4.1.3 Eğrigöz plutonunun radyolojik karakteristikleri

Eğrigöz granitoid alanında genel jeolojik yapıya dayalı olarak alınan 23 granitik kayaç ve 54 toprak örneğine ait doğal radyonüklit (^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K) aktivite konsantrasyonları ve bu konsantrasyonlara dayalı olarak hesaplanan radyolojik risk parametreleri tanımlayıcı istatistik sonuçları ile birlikte Çizelge 4.5 ve 4.6'da verilmiştir. 1σ hata payı içerisinde (% 68 güven aralığında) ve kuru ağırlığa göre ifade edilen ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktivite konsantrasyonlarına ait bağlı belirsizliklerinin ^{226}Ra ve ^{232}Th için % 5'in, ^{40}K için ise %2'nin altında kaldığı gözlenmiştir. Granitik kayaç örnekleri için ^{226}Ra aktivitesi $55 \pm 4 \text{ Bq kg}^{-1}$ ortalama ile $28\text{-}95 \text{ Bq kg}^{-1}$ arasında; ^{232}Th aktivitesi $76 \pm 4 \text{ Bq kg}^{-1}$ ortalama ile $50\text{-}122 \text{ Bq kg}^{-1}$ arasında ve ^{40}K aktivitesi $1111 \pm 33 \text{ Bq kg}^{-1}$ ortalama ile $782\text{-}1365 \text{ Bq kg}^{-1}$ arasında değişmiştir (Çizelge 4.5). Toprak örneklerinde tanımlayıcı istatistik

analiz yapılırken E10/1 kodlu örnek anomali gösterdiği için istatistik dışında tutulmuştur. Geri kalan 53 toprak örneği için ^{226}Ra aktivitesi $43\pm 2 \text{ Bq kg}^{-1}$ ortalama ile $7\text{-}84 \text{ Bq kg}^{-1}$ arasında; ^{232}Th aktivitesi $66\pm 5 \text{ Bq kg}^{-1}$ ortalama ile $11\text{-}174 \text{ Bq kg}^{-1}$ arasında ve ^{40}K aktivitesi $853\pm 40 \text{ Bq kg}^{-1}$ ortalama ile $149\text{-}1622 \text{ Bq kg}^{-1}$ arasında değişmiştir (Canbaz Öztürk et al., 2015). İlgili çizelgelerdeki radyometrik sonuçlar karşılaştırıldığında jeolojik ana materyal ve toprak arasındaki ilişki açıkça görülebilmektedir.

Çizelge 4.5 Eğrigöz plutonu granitik kayalar için tanımlayıcı istatistik.

	Doğal Radyonüklit Aktivite Konsantrasyonları			Radyolojik Risk Parametreleri				
	²²⁶ Ra (Bq kg ⁻¹)	²³² Th (Bq kg ⁻¹)	⁴⁰ K (Bq kg ⁻¹)	D (nGy h ⁻¹)	AED (μSv y ⁻¹)	Ra _(eq) (Bq kg ⁻¹)	H _(ex)	H _(in)
Örnek Sayısı	23	23	23	23	23	23	23	23
Aritmetik Ortalama ± SH	55±4	76±4	1111±33	118±4	145±5	250±9	0.67±0.02	0.82±0.03
Standart Sapma (SD)	18	19	159	20	24	43	0.12	0.15
Geometrik Ortalama	53	74	1099	116	143	246	0.66	0.81
Min.	28	50	782	91	112	191	0.52	0.61
25'nci Yüzdelik	41	60	1007	101	124	214	0.58	0.68
Medyan	54	71	1115	114	139	239	0.65	0.80
75'nci Yüzdelik	71	85	1263	136	167	292	0.79	0.95
Max.	95	122	1365	158	193	337	0.91	1.14
Skewness	0.561	1.020	-0.266	0.464	0.464	0.497	0.497	0.513
Kurtosis	-0.336	0.374	-0.413	-0.937	-0.937	-0.928	-0.928	-0.723
Kolmogorov-Smirnov Test Sig.	0.600	0.645	0.953	0.681	0.681	0.826	0.826	0.769
Frekans Dağılımı	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal

Hatalar 1σ standart sapma ile ifade edilmiştir.

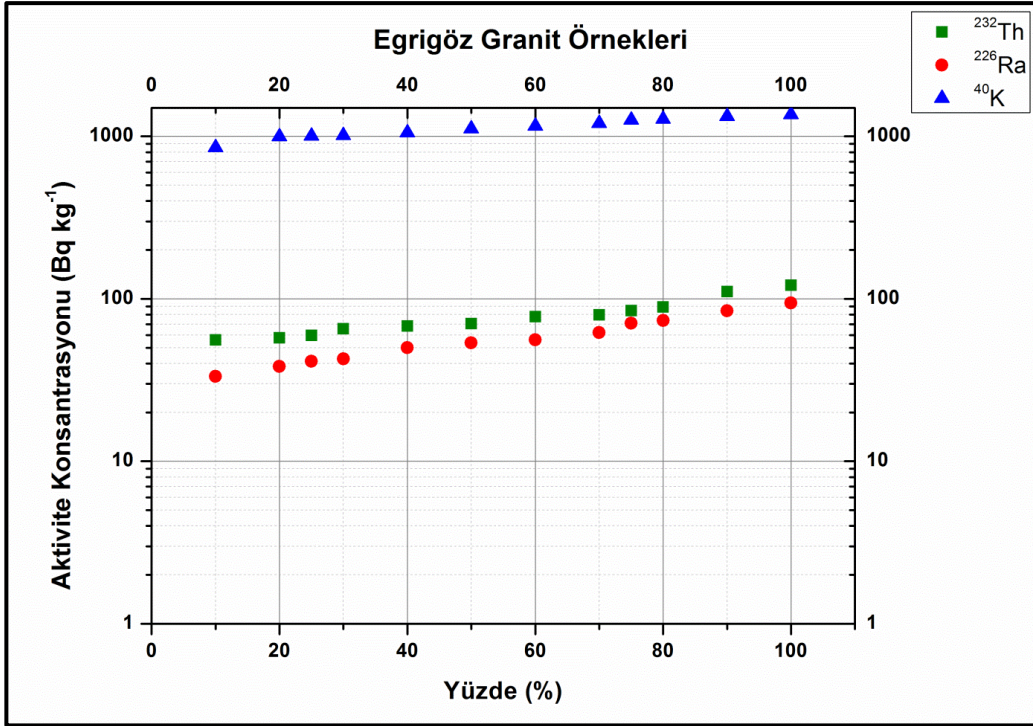
Çizelge 4.6 Eğrigöz plutonu toprak örnekleri için tanımlayıcı istatistik.

	Doğal Radyonüklit Aktivite Konsantrasyonları			Radyolojik Risk Parametreleri				
	²²⁶ Ra (Bq kg ⁻¹)	²³² Th (Bq kg ⁻¹)	⁴⁰ K (Bq kg ⁻¹)	D (nGy h ⁻¹)	AED (μSv y ⁻¹)	Ra _(eq) (Bq kg ⁻¹)	H _(ex)	H _(in)
Örnek Sayısı	53	53	53	53	53	53	53	53
Aritmetik Ortalama ± SH	43±2	66±5	853±40	95±5	117±6	203±10	0.55±0.03	0.67±0.03
Standart Sapma (SD)	17	33	294	33	40	72	0.19	0.23
Geometrik Ortalama	39	58	789	88	108	187	0.50	0.61
Min.	7	11	149	16	20	34	0.10	0.10
25'nci Yüzdelik	32	43	659	74	91	158	0.43	0.52
Medyan	43	60	827	91	112	198	0.54	0.66
75'nci Yüzdelik	54	79	1056	117	144	252	0.68	0.83
Max.	84	174	1622	172	211	378	1.00	1.10
Skewness	0.340	1.038	-0.107	-0.079	-0.079	0.011	0.011	-0.107
Kurtosis	0.233	1.521	0.197	-0.100	-0.100	-0.073	-0.073	-0.176
Kolmogorov-Smirnov Test Sig.	0.944	0.485	0.969	0.975	0.975	0.971	0.971	0.998
Frekans Dağılımı	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal

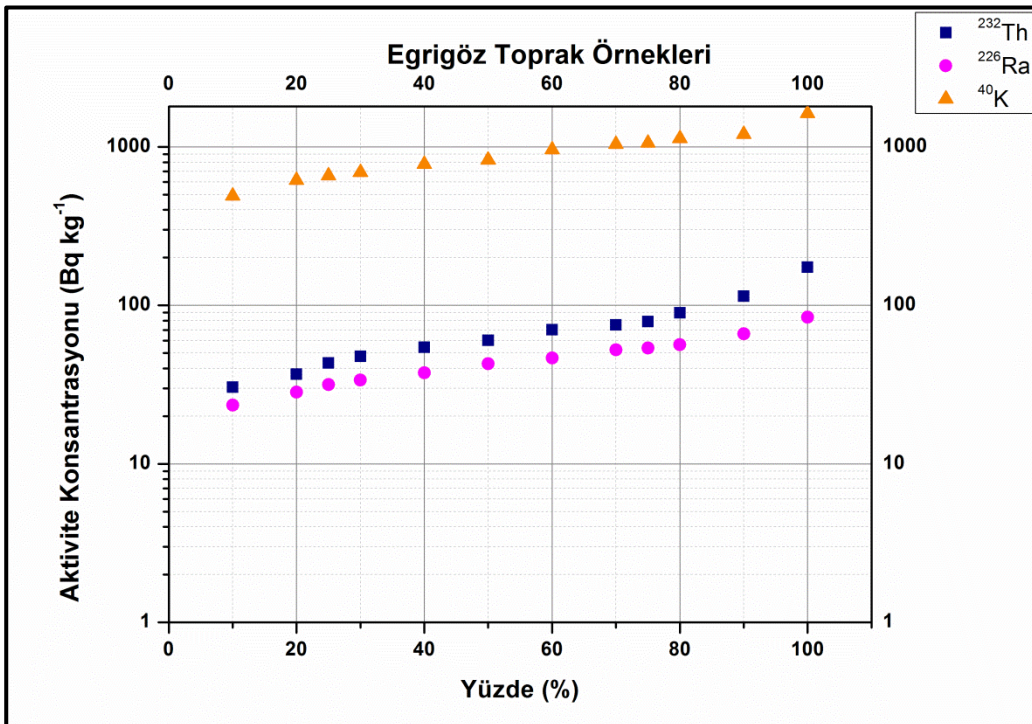
** Anomali gösteren E10/1 kodlu örnek istatistik dışı tutulmuştur.
Hatalar 1σ standart sapma ile ifade edilmiştir.

Şekil 4.9 ve 4.10 Eğrigöz plutonuna ait granit ve toprak örneklerinde gözlenen doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonları için kümülatif dağılım grafiklerini vermektedir. Bu grafiklerden, sadece birkaç örneğin yüksek doğal radyasyon seviyelerine ulaştığı geriye kalan %75'in ise nispeten düşük seviyeler gösterdiği görülmektedir. Ayrıca, ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktivite konsantrasyonlarının medyan değerleri etrafında tanımlanabilecek aralıklar aktivite dağılımının 25. ve 75. yüzdelik dilimleri arasına karşılık gelmektedir. Çizelge 4.5 ve Şekil 4.9'dan görüldüğü gibi, granit kayaçlarda bu aralıklar ^{226}Ra için 41-71 Bq kg⁻¹; ^{232}Th için 60-85 Bq kg⁻¹ ve ^{40}K için 1007-1263 Bq kg⁻¹'dir. UNSCEAR 1993 Raporunda, normal granitlerde ^{226}Ra aktivite konsantrasyonu 20-120 Bq kg⁻¹; ^{232}Th 20-80 Bq kg⁻¹ ve ^{40}K 600-1800 Bq kg⁻¹ olarak; uranyum ve toryumca zengin granitlerde ise ^{226}Ra 100-500 Bq kg⁻¹; ^{232}Th 40-350 Bq kg⁻¹ ve ^{40}K 1200-1800 Bq kg⁻¹ olarak rapor edilmektedir. Eğrigöz plutonuna ait kayaçlar için elde edilen bu değerler UNSCEAR 1993'te normal granitler için öngörülen aralıklar ile uyumludur. Toprak örnekleri için ise 25. ve 75. yüzdelik dilimler tarafından tanımlanan aktivite konsantrasyonlarına ait aralıklar ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K için, sırasıyla, 32-54; 43-79 ve 659-1056 Bq kg⁻¹ olarak bulunmuştur (Çizelge 4.6 ve Şekil 4.10). Bu değerler, UNSCEAR 2000'de normal topraklar için verilen doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonlarının tipik aralıkları [^{226}Ra : 35 (17-60) Bq kg⁻¹, ^{232}Th : 30 (11-64) Bq kg⁻¹ ve ^{40}K : 400 (140-850) Bq kg⁻¹] ile karşılaştırılabilir düzeydedir. Eğrigöz plutonundan alınan granit örnekleri üzerine yapılan jeokimyasal çalışmalarda, Akay (2009) uranyum konsantrasyonunun 2.1-30.8 ppm [(25.9-380.5 Bq/kg); 1ppmU= 12.353 Bqkg⁻¹] ve toryum konsantrasyonunun 12.7-51.0 ppm [(51.7-207.7 Bq/kg); 1ppmTh= 4.074 Bqkg⁻¹] arasında; Özgenç and İlbeyli (2008) ise uranyum konsantrasyonunun 3.6-7.9 ppm [(44.5-97.5 Bq/kg); 1ppmU= 12.353 Bqkg⁻¹] ve toryum konsantrasyonunun 17.3-41.5 ppm [(70.5-169.1 Bq/kg); 1ppmTh= 4.074 Bqkg⁻¹] arasında değiştiğini belirtmektedir (Akay, 2009; Özgenç and İlbeyli, 2008). Çalışma alanının genel jeolojik yapısı dikkate alındığında elde edilen doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonlarının beklentiler doğrultusunda geliştiği gözlenmektedir.

Frekans dağılımlarını belirlemek için uygulanan parametrik olmayan Kolmogorov-Smirnov normalite testi ve tanımlayıcı istatistik sonuçlarına göre Eğrigöz plutonuna ait kayaçlarda ve topraklarda ölçülen doğal radyonüklit aktivite konsantrasyon dağılımları normal dağılıma uymaktadır.



Şekil 4.9 Eğrigöz plutonu granitik kayaçlarında gözlenen doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonlarına ait kümülatif dağılım grafiği.

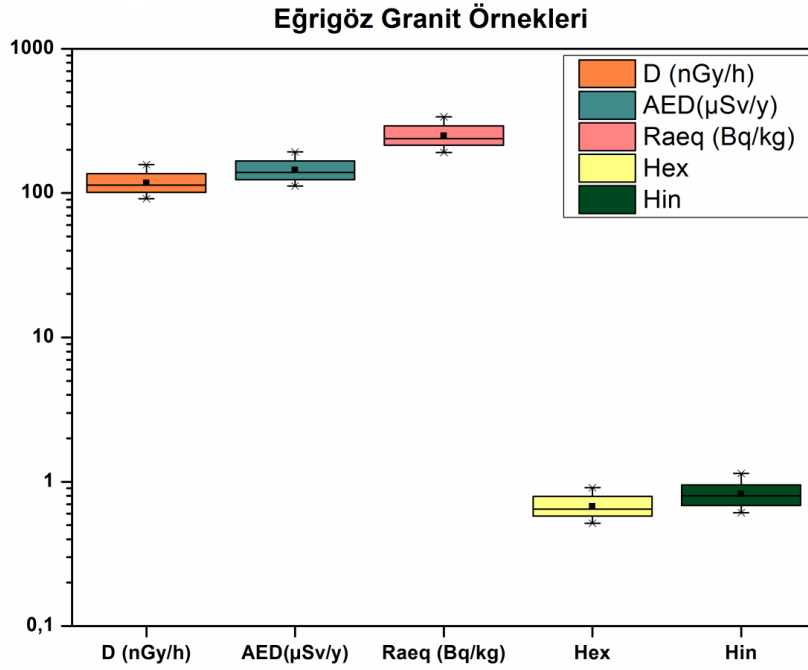


Şekil 4.10 Eğrigöz plutonu toprak örneklerinde gözlenen doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonlarına ait kümülatif dağılım grafiği (** Anomali gösteren E10/1 kodlu örnek istatistik dışı tutulmuştur).

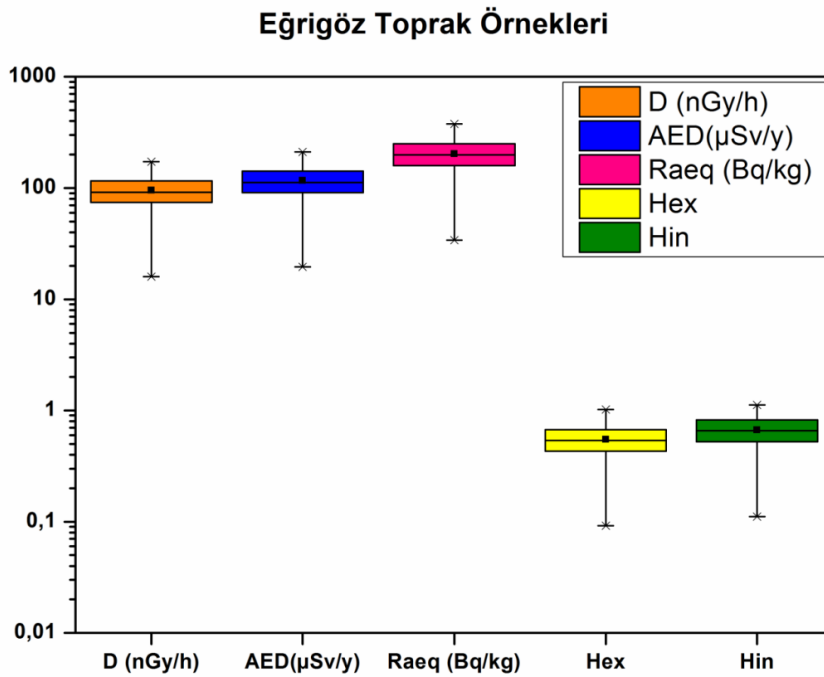
UNSCEAR Raporları doğrultusunda hesaplanan tüm dozimetrik hesaplara ilişkin tanımlayıcı istatistik kayaçlar ve topraklar için, sırasıyla, Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6'da; kutu grafikler ise Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'de verilmiştir. Çizelge 4.5 ve Şekil 4.11'de görüldüğü gibi, Eğrigöz plutonu granit örneklerinde karasal doğal radyasyondan kaynaklanan gama doz hızları $118 \pm 4 \text{ nGy h}^{-1}$ ortalama ile $91\text{-}158 \text{ nGy h}^{-1}$ arasında; yıllık etkin doz eşdeğeri ise $112\text{-}193 \text{ } \mu\text{Sv y}^{-1}$ aralığında ve ortalama $145 \pm 5 \text{ } \mu\text{Sv y}^{-1}$ olarak bulunmuştur. Bu değerler, UNSCEAR 1993'te normal granitler için verilen doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonlarına dayalı olarak hesaplanan doz hızları ($46\text{-}179 \text{ nGy h}^{-1}$) ve bu doz hızlarına karşılık gelen yıllık etkin doz eşdeğerleri ($57\text{-}219 \text{ } \mu\text{Sv y}^{-1}$) ile uyumludur. Diğer radyolojik risk parametreleri ise: $R_{\text{eq}} 250 \pm 9$ ($191\text{-}337$) Bq kg^{-1} , $H_{\text{ex}} 0.67 \pm 0.02$ ($0.52\text{-}0.91$) ve $H_{\text{in}} 0.82 \pm 0.03$ ($0.61\text{-}1.14$) olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu değerler UNSCEAR 1993'te normal granitler için hesaplanan [$R_{\text{eq}} (95\text{-}373 \text{ Bq kg}^{-1})$, $H_{\text{ex}} (0.26\text{-}1.01)$ ve $H_{\text{in}} (0.31\text{-}1.33)$] aralıklar içinde yer almaktadır. Ayrıca Çizelge 4.5'deki Kolmogorov-Smirnov normalite testi sonuçlarından, skewness ve kurtosis değerlerinden ve Şekil 4.11'teki kutu grafiklerden radyolojik risk parametrelerinin dağılımlarının normal dağılıma uyduğu görülmektedir (Canbaz Öztürk et al. 2015).

Eğrigöz plutonu toprak örneklerinde karasal doğal radyasyondan kaynaklanan gama doz hızları $95 \pm 5 \text{ nGy h}^{-1}$ ortalama ile $16\text{-}172 \text{ nGy h}^{-1}$ arasında değişmiştir. Yıllık etkin doz eşdeğeri ise $117 \pm 6 \text{ } \mu\text{Sv y}^{-1}$ ortalama ile $20\text{-}211 \text{ } \mu\text{Sv y}^{-1}$ aralığındadır. Normal alanlarda karasal gama doz hızları, UNSCEAR 2000 Raporunda 59 ($10\text{-}200$) nGy h^{-1} olarak tahmin edilmektedir. Buna bağlı olarak, havada soğurulmuş doz hızını etkin doz eşdeğerine dönüştürmek için 0.7 Sv Gy^{-1} katsayısının uygulanması ve insanların zamanlarının %20'sini bina dışı ortamda geçirdiği varsayımıyla maksimum yıllık etkin doz eşdeğeri yaklaşık $245 \text{ } \mu\text{Sv y}^{-1}$ olarak bulunmuştur. Bu öngörülen değerler ile kıyaslandığında, Eğrigöz plutonuna ait toprak örneklerinde doğal radyasyondan kaynaklanan karasal gama doz hızının ve yıllık etkin doz eşdeğerinin maksimum değerlerden daha küçük olduğu görülmektedir. Elde edilen R_{eq} değeri 203 ± 10 ($34\text{-}378$) Bq kg^{-1} olarak bulunmuş olup sadece E51 kodlu örnek ile istatistik dışı bırakılan E10/1 kodlu örnek UNSCEAR 1988'de müsaade edilen limit değer olan 370 Bq kg^{-1} 'den büyüktür. H_{ex} ve H_{in} parametrelerinin ortalama değerlerinin [sırasıyla, 0.55 ± 0.03 ve 0.67 ± 0.03] UNSCEAR 1982 raporunda tavsiye edilen limit değer olan 1'den küçük olduğu, maksimum değerlerinin ise [sırasıyla, ($0.10\text{-}1.00$) ve ($0.10\text{-}1.10$)] bu limit değerler ile karşılaştırılabilir düzeyde olduğu görülmektedir. Ayrıca, topraklar için radyolojik risk parametrelerinin dağılımlarının normal dağılıma

uyduğu tanımlayıcı istatistik sonuçlarından (Çizelge 4.6) ve kutu grafikten (Şekil 4.12) açıkça görülmektedir (Canbaz Öztürk et al., 2015).



Şekil 4.11 Eğrigöz plutonu granitik kayalara ait radyolojik risk parametrelerine ilişkin box plot grafiği.



Şekil 4.12 Eğrigöz plutonu toprak örneklerine ait radyolojik risk parametrelerine ilişkin box plot grafiği (** Anomali gösteren E10/1 kodlu örnek istatistik dışı tutulmuştur).

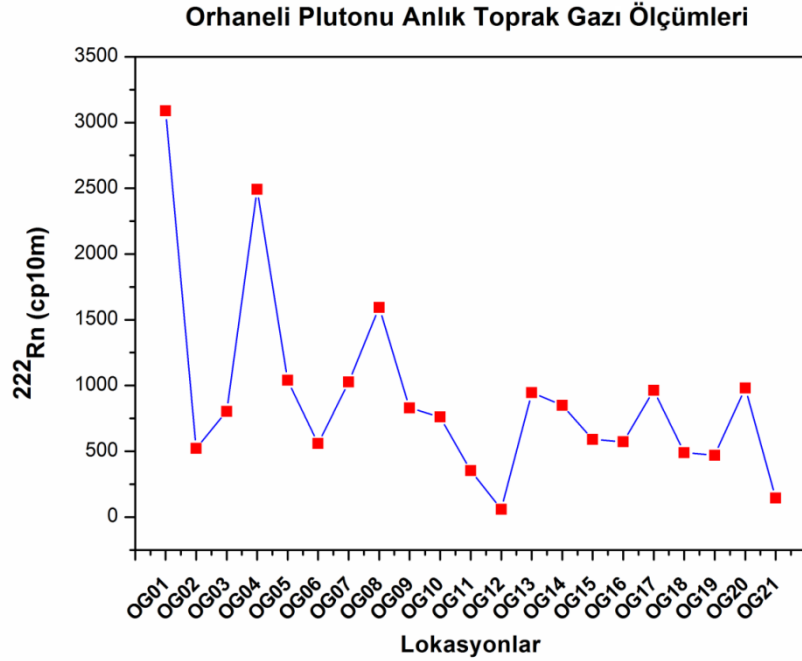
4.2 Radon Gözlem

4.2.1 Çalışma alanlarında yerinde toprak gazı ^{222}Rn ölçümü

Çalışma alanlarında yerinde toprak gazı radon ölçümleri radyasyon seviyelerine ilişkin ön incelemenin yanı sıra gerek duyulabilecek ek örneklemeler için bir rehber olması amacıyla gerçekleştirilmiştir. Orhaneli, Çataldağ ve Eğrigöz granit plutonlarında her bir lokasyondaki anlık toprak gazı ölçüm sonuçları sırasıyla Şekil 4.13, 4.14 ve 4.15'te çizgi grafikler yardımıyla sunulmuştur. Ayrıca Çizelge 4.7'de her bir plutona ilişkin sonuçlar ortalama, minimum ve maksimum değerleriyle birlikte özetlenmiştir.

Çizelge 4.7 Çalışma alanlarında anlık toprak gazı ölçüm sonuçları.

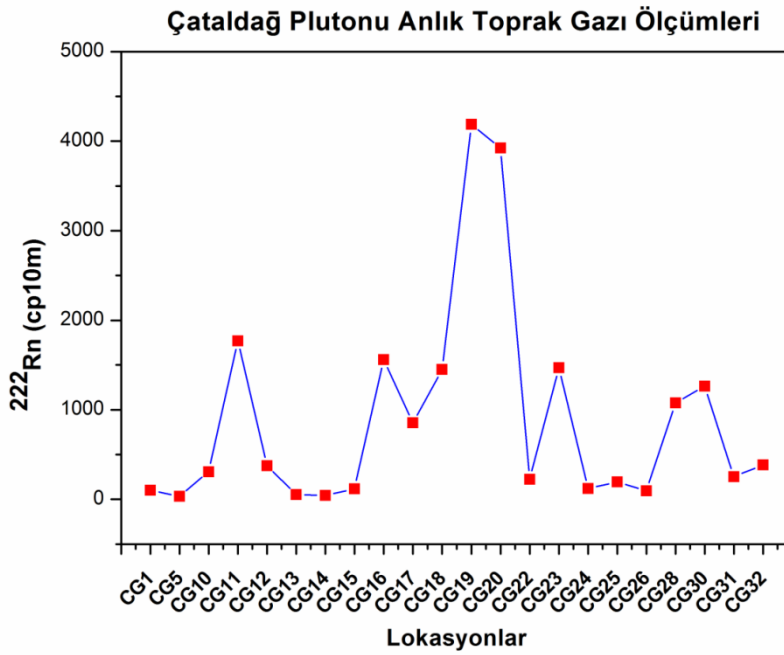
Çalışma Alanı	N	Toprak Gazı (cp10m)		
		Aritmetik Ortalama	Min.	Max.
Orhaneli Granit Plutonu	21	911	58	3089
Çataldağ Granit Plutonu	22	902	34	4187
Eğrigöz Granit Plutonu	18	393	14	2040



Şekil 4.13 Orhaneli plutonu anlık toprak gazı ölçümleri.

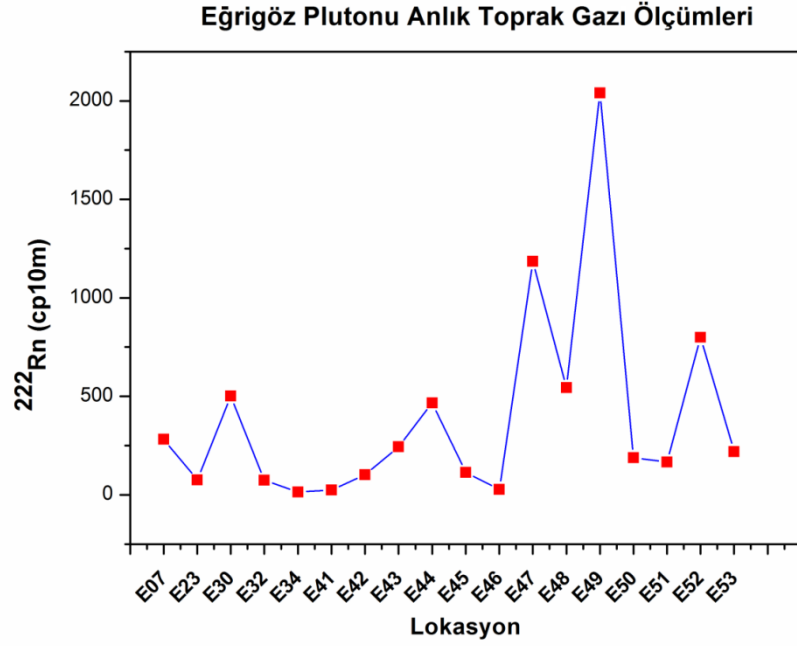
Orhaneli granit plutonunda anlık toprak gazı ölçümleri 911 cp10m ortalama ile 58-3089 cp10m arasında değişmiştir (Çizelge 4.7). Şekil 4.13'ten de görüldüğü gibi en yüksek değer OG01 kodlu granitin alındığı lokasyonda, en düşük değer ise OG12 kodlu granitin alındığı lokasyonda ölçülmüştür.

Çataldağ granit plutonunda anlık toprak gazı ölçümleri 902 cp10m ortalama ile 34-4187 cp10m arasında değişmiştir (Çizelge 4.7). En yüksek değer CG19 kodlu granitin örneklediği lokasyonda, en düşük değer ise CG5 kodlu granitin örneklediği lokasyonda ölçülmüştür (Şekil 4.14).



Şekil 4.14 Çataldağ plutonu anlık toprak gazı ölçümleri.

Eğrigöz granit plutonunda anlık toprak gazı ölçümleri 393 cp10m ortalama ile 14-2040 cp10m arasında değişmiştir (Çizelge 4.7). Şekil 4.15'ten de görüldüğü gibi en yüksek değer E49 kodlu örneğin alındığı lokasyonda, en düşük değer ise E34 kodlu örneğin alındığı lokasyonda ölçülmüştür.



Şekil 4.15 Eğrigöz plutonu anlık toprak gazı ölçümleri.

^{238}U bozunum serisinde ^{226}Ra 'nın bozunum ürünü olan ^{222}Rn , doğada kaya, toprak ve sudaki uranyumun radyoaktif bozunması sonucu oluşan bir gazdır. Başka bir deyişle ^{222}Rn 'nin toprak, su ve çeşitli jeolojik formasyonlardaki dağılımı ^{226}Ra 'nın bulunmasına bağlıdır. Çalışma alanlarında belirlenen ^{226}Ra aktivite konsantrasyonları ile anlık toprak gazı ^{222}Rn arasında istatistiksel olarak anlamlı bir ilişki bulunmamıştır. Bu durum, radonun yeryüzüne gaz olarak çıkışının toprağın litolojik yapısına yani geçirgenliğine bağlı olmasının yanında, meteorolojik ve mevsimsel değişimlerden etkilenmesinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonları ortalamaları bakımından, Eğrigöz granit plutonunun Orhaneli granit plutonuna göre daha yüksek aktivite konsantrasyonlarına sahip olduğu belirlenmiş iken, yerinde toprak gazı ölçüm ortalamaları bakımından Orhaneli granitinde Eğrigöz granitine göre daha yüksek anlık radon ölçümleri alınmıştır. Bu aykırı durum da mevsimsel koşullardan kaynaklanmaktadır. Eğrigöz granit plutonunda anlık radon ölçümleri yağışların olmadığı Temmuz ve Eylül 2011 aylarında; Çataldağ granit plutonunda yağışların olduğu Aralık 2012 ve Nisan 2013 döneminde; Orhaneli plutonunda ise yine yağışların olduğu Mayıs 2014 döneminde alınmıştır. Çizelge 4.7 ile de karşılaştırıldığında yağışlı dönemdeki konsantrasyonun daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum, yağışlı mevsim boyunca radonun toprak altında tuzaklanması ve kuru geçen aylarda ise toprak geçirgenliğinin artması ile açıklanabilir.

4.2.2 Toprakta ^{222}Rn salınım hızının tayini

Seçilen plutonlarda toprakta gözlenen ^{226}Ra aktivitesine dayalı olarak yer seviyesinde radon salınım hızı veya radon akısı (J_D) $\text{Bq m}^{-2} \text{s}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır. Bu verilere ilişkin tamamlayıcı istatistik Çizelge 4.8’de detaylandırılmıştır.

Çizelge 4.8 Çalışma alanlarında radon salınım hızına ilişkin tanımlayıcı istatistik.

Radon Akısı (J_D ; $\text{Bq m}^{-2} \text{s}^{-1}$)			
	Orhaneli	Çataldağ	Eğrigöz
	Granit Plutonu	Granit Plutonu	Granit Plutonu
Örnek Sayısı	43	57	53
Aritmetik Ortalama $\pm$ SH	0.022 $\pm$ 0.002	0.030 $\pm$ 0.002	0.030 $\pm$ 0.002
Standart Sapma (SD)	0.012	0.019	0.014
Geometrik Ortalama	0.019	0.024	0.027
Min.	0.005	0.003	0.004
25’nci Yüzdelik	0.015	0.017	0.020
Medyan	0.018	0.027	0.029
75’nci Yüzdelik	0.022	0.039	0.037
Max.	0.065	0.083	0.067
Skewness	2.110	1.175	0.757
Kurtosis	4.575	1.479	0.598
Kolmogorov-Smirnov Test Sig.	0.004	0.408	0.547
Frekans Dağılımı	Log-Normal	Normal	Normal

** Anomali gösteren E10_1 kodlu örnek istatistik dışı tutulmuştur.

Çizelge 4.8’e göre, hesaplanan radon akısı değerleri Orhaneli granit plutonunda 0.022 $\pm$ 0.002 $\text{Bq m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ortalama ile 0.005-0.065 $\text{Bq m}^{-2} \text{s}^{-1}$ arasında; Çataldağ granit plutonunda 0.030 $\pm$ 0.002 $\text{Bq m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ortalama ile 0.003-0.083 $\text{Bq m}^{-2} \text{s}^{-1}$ arasında ve Eğrigöz granit plutonunda 0.032 $\pm$ 0.003 $\text{Bq m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 0.004-0.138 $\text{Bq m}^{-2} \text{s}^{-1}$ arasında değişmiştir. Normal backgroundlu alanlarda topraklar için radon akısının dünya ortalaması; $J_D \approx 0.022 \text{ Bq m}^{-2} \text{s}^{-1}$ olarak 0.016-0.026 $\text{Bq m}^{-2} \text{s}^{-1}$ aralığında verilmektedir (UNSCEAR, 1993). Açıkça görüldüğü gibi, Orhaneli granit plutonu radon akısı UNSCEAR 1993’te verilen normal topraklar için radon akısı ile uyumlu iken, Çataldağ ve Eğrigöz plutonlarına ait radon akısı ortalamaları normal topraklara göre yüksektir. Beklentiler doğrultusunda,

Miyosen yaşı Çataldağ ve Eğrigöz plutonlarındaki radon akısı değerleri, jeolojik yaşa dayalı olarak Eosen yaşı Orhaneli plutonundan daha yüksektir.

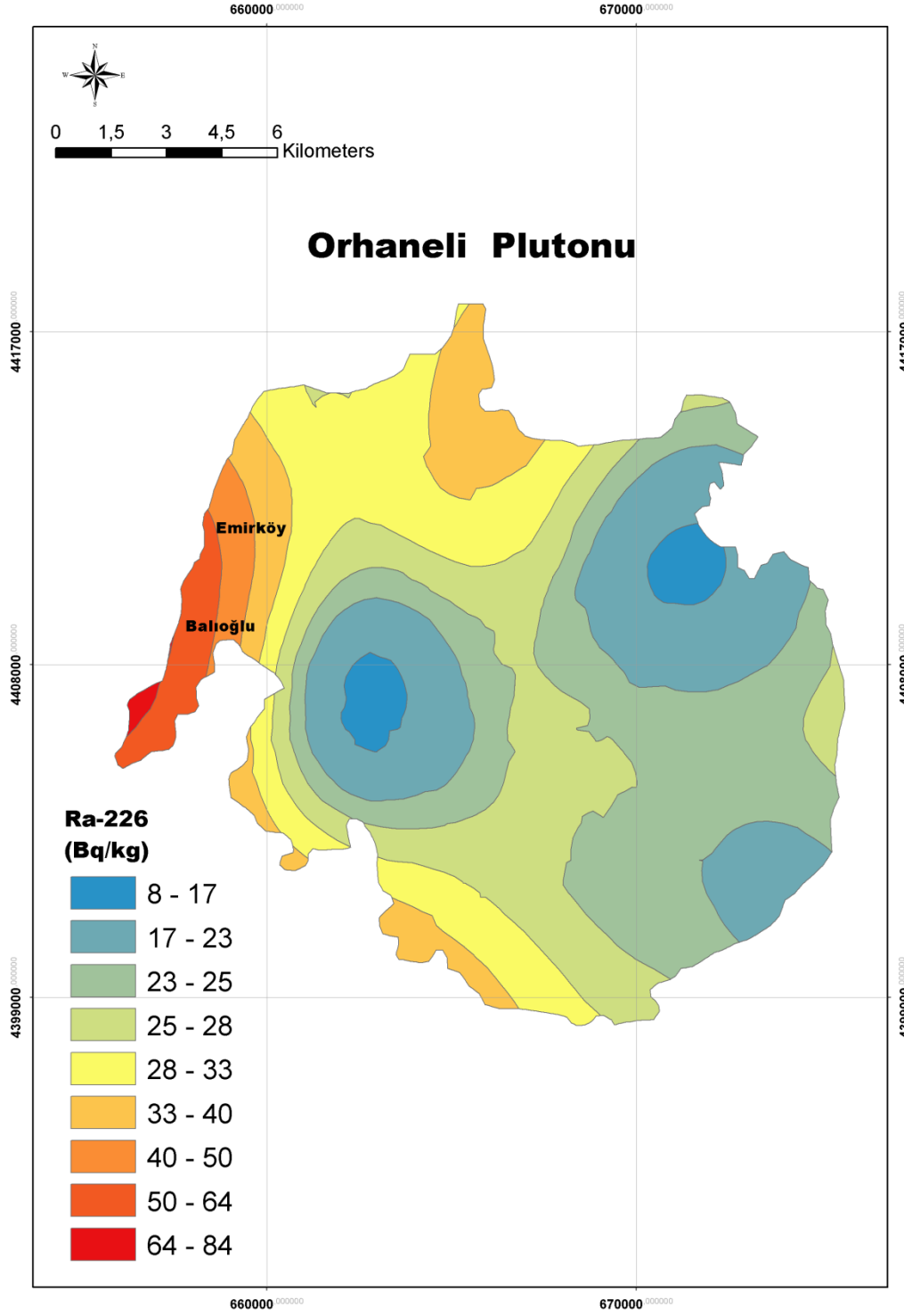
4.3 Dağılım Haritaları

Haritalar görsel araçlar olduklarından ilk bakışta algılanmaları ve yorumlanmaları daha kolaydır. Bu nedenle her bir plutona ait dağılım haritaları jeoistatistik yöntemlerle ArcGIS 10.1 yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur.

Jeoistatistik, klasik istatistik yöntemlerinden farklı olarak örnekler arası ilişkiyi, örneklerin alındıkları koordinatları da hesaba katarak ele alan ve temelleri fonksiyonlar teorisindeki durağan rastlantı teorisine dayanan istatistiksel bir hesaplama metodudur. Bu hesaplama yönteminin, yapılan hata miktarının belirli güven düzeylerinde belirlenebilmesi gibi çok önemli avantajları bulunmaktadır. Jeostatistik'te, bölgesel değişkenlerin (spatial variable) uzaklığa bağlı değişimleri variogram (veya semivariogram) fonksiyonu ile belirlenir ve bu fonksiyon birbirinden h kadar uzaklıktaki iki değişken arasındaki farkın varyansı olarak ifade edilir. Varyansın artması, aralarındaki ilişkinin azalması şeklinde yorumlanabilir. Bir başka deyişle iki nokta arasındaki farkın varyansının büyüklüğü noktalar arasındaki mesafenin büyüklüğüne bağlıdır (Yeşilkanat vd., 2014).

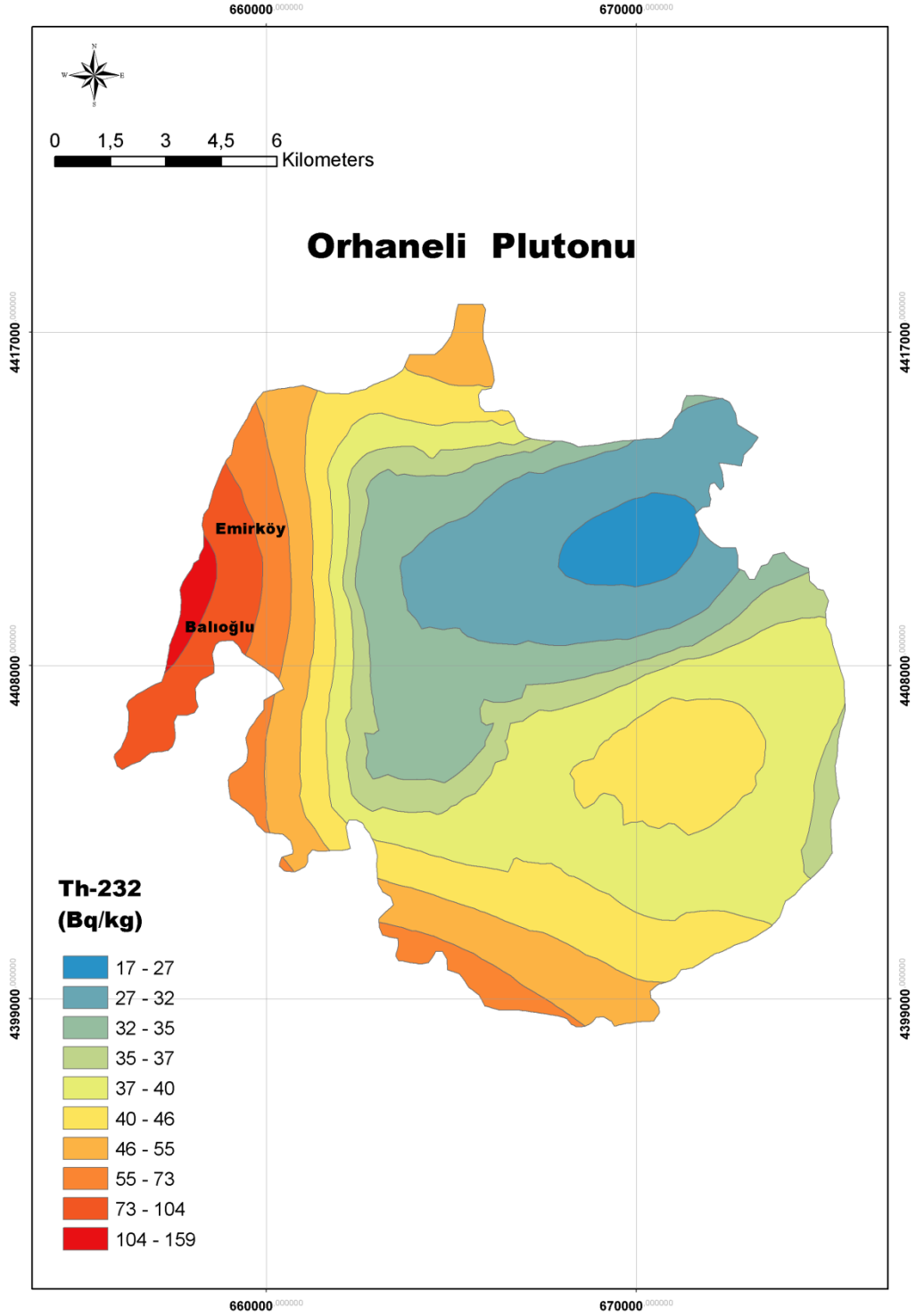
4.3.1 Orhaneli plutonu radyolojik haritalar

Orhaneli plutonu toprak örneklerinde doğal radyonüklit (^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K) aktivite konsantrasyonları ve bu konsantrasyonlara dayalı olarak hesaplanan karasal doğal radyasyondan kaynaklanan doz hızı (D) ile topraktan salınan ^{222}Rn hızına (J_D) ilişkin dağılım haritaları oluşturulmuş ve sırasıyla Şekil 4.16-4.20'de gösterilmiştir.



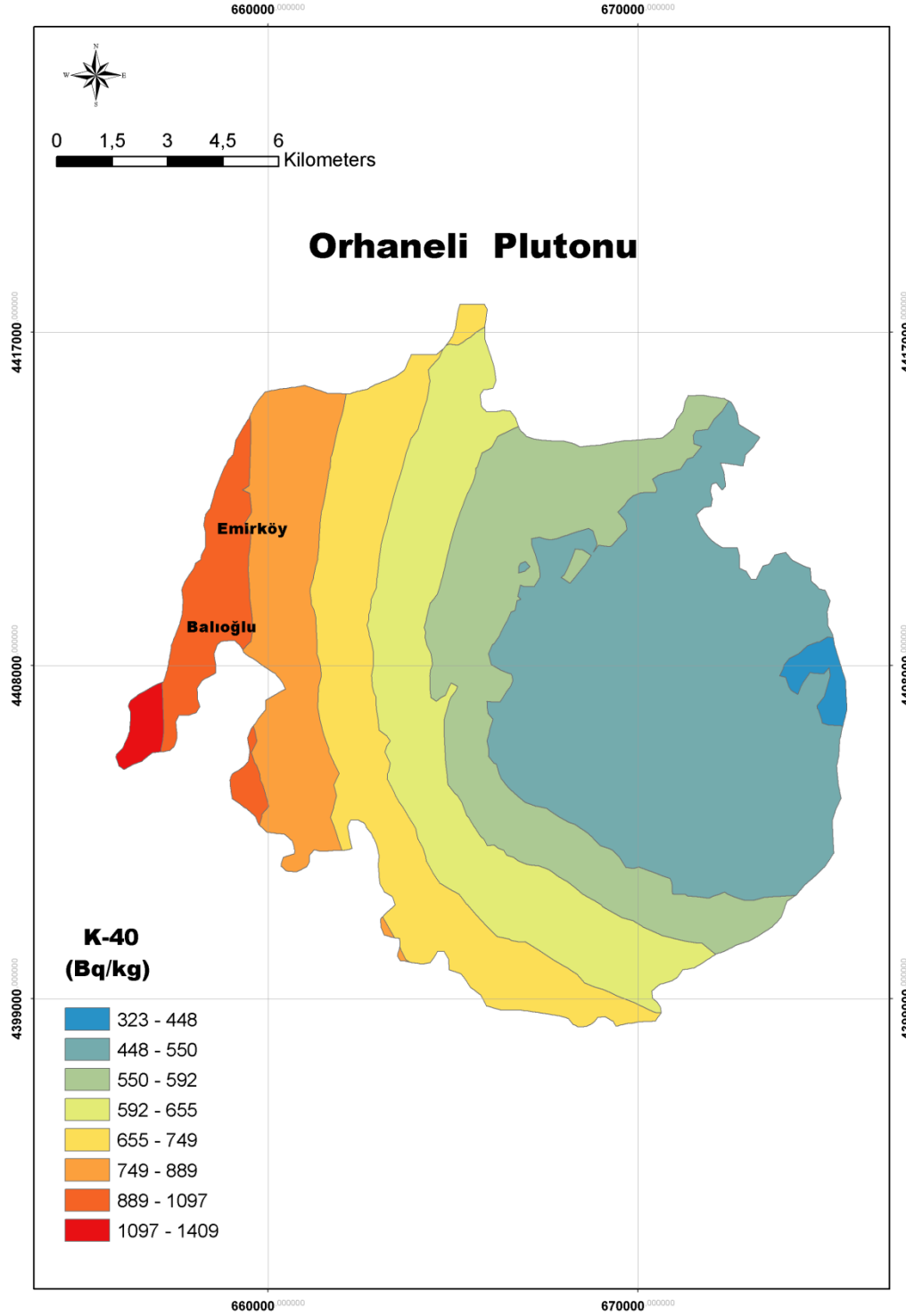
Şekil 4.16 Orhaneli plutonu yüzey topraklarında ^{226}Ra dağılımı.

Şekil 4.16’da görüldüğü gibi, ^{226}Ra aktivite konsantrasyonu dağılımı plutonun büyük bir kısmında 23-33 Bq kg⁻¹ arasında değişmektedir. 33 Bq kg⁻¹’dan 84 Bq kg⁻¹’e kadar olan daha yüksek seviyeler plutonun batı sınırı boyunca gözlenmektedir. En yüksek ^{226}Ra aktivite konsantrasyonu 84 Bq kg⁻¹ O18 kodlu örneğin alındığı Balıoğlu köyü yakınlarında ölçülmüştür.



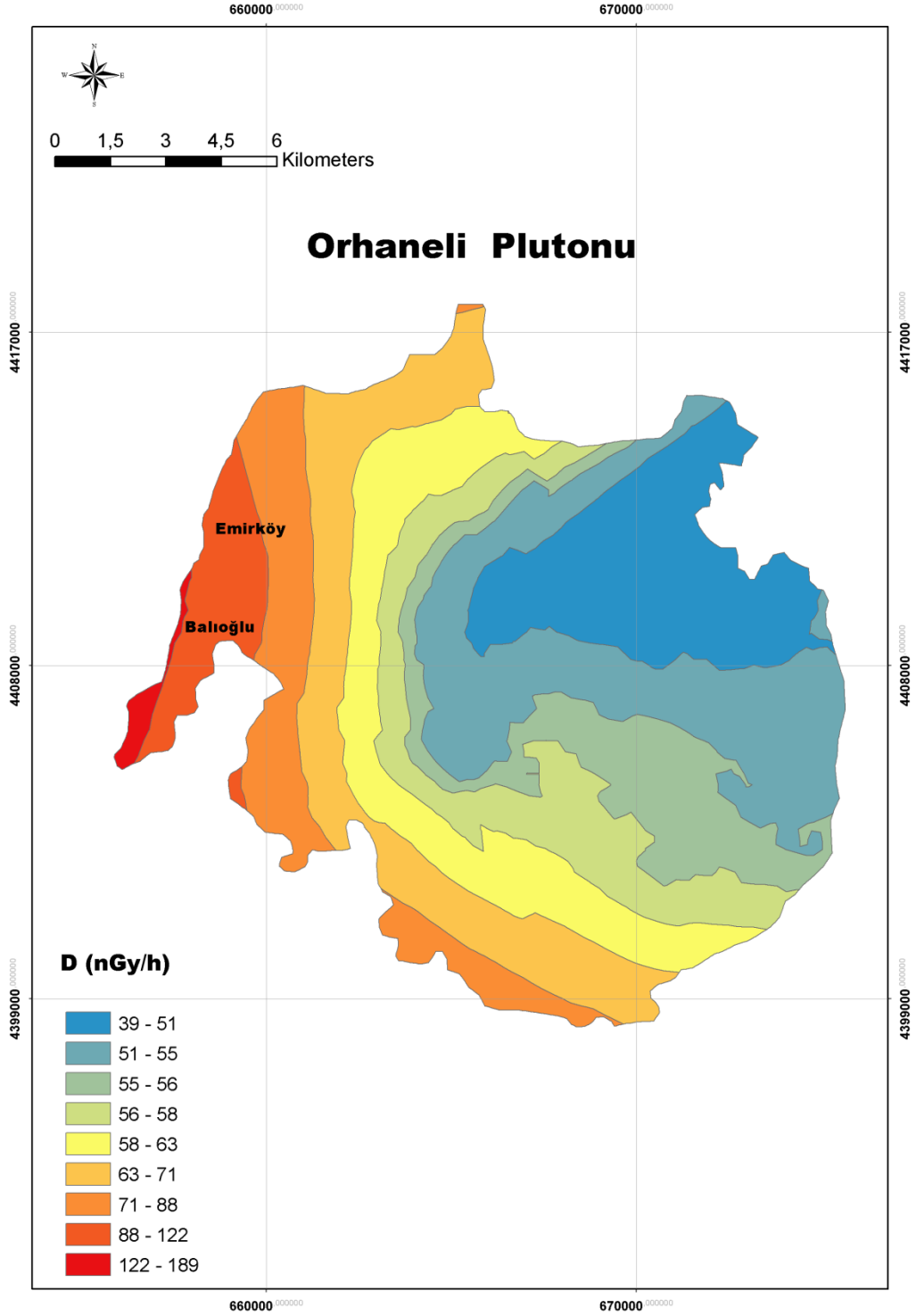
Şekil 4.17 Orhaneli plutonu yüzey topraklarında ^{232}Th dağılımı.

Şekil 4.17’de verilen ^{232}Th aktivite konsantrasyonu dağılımı plutonun büyük bir kısmında 35-55 Bq kg⁻¹ arasında değişirken 55 Bq kg⁻¹’dan 104 Bq kg⁻¹’a kadar daha yüksek seviyeler yine plutonun batı sınırında gözlenmektedir. 104-159 Bq kg⁻¹’ arası en yüksek dilimdeki değerler sadece iki noktada Emirköy (O21) ve Balıoğlu (O18) köyleri yakınlarında gözlenmiştir.



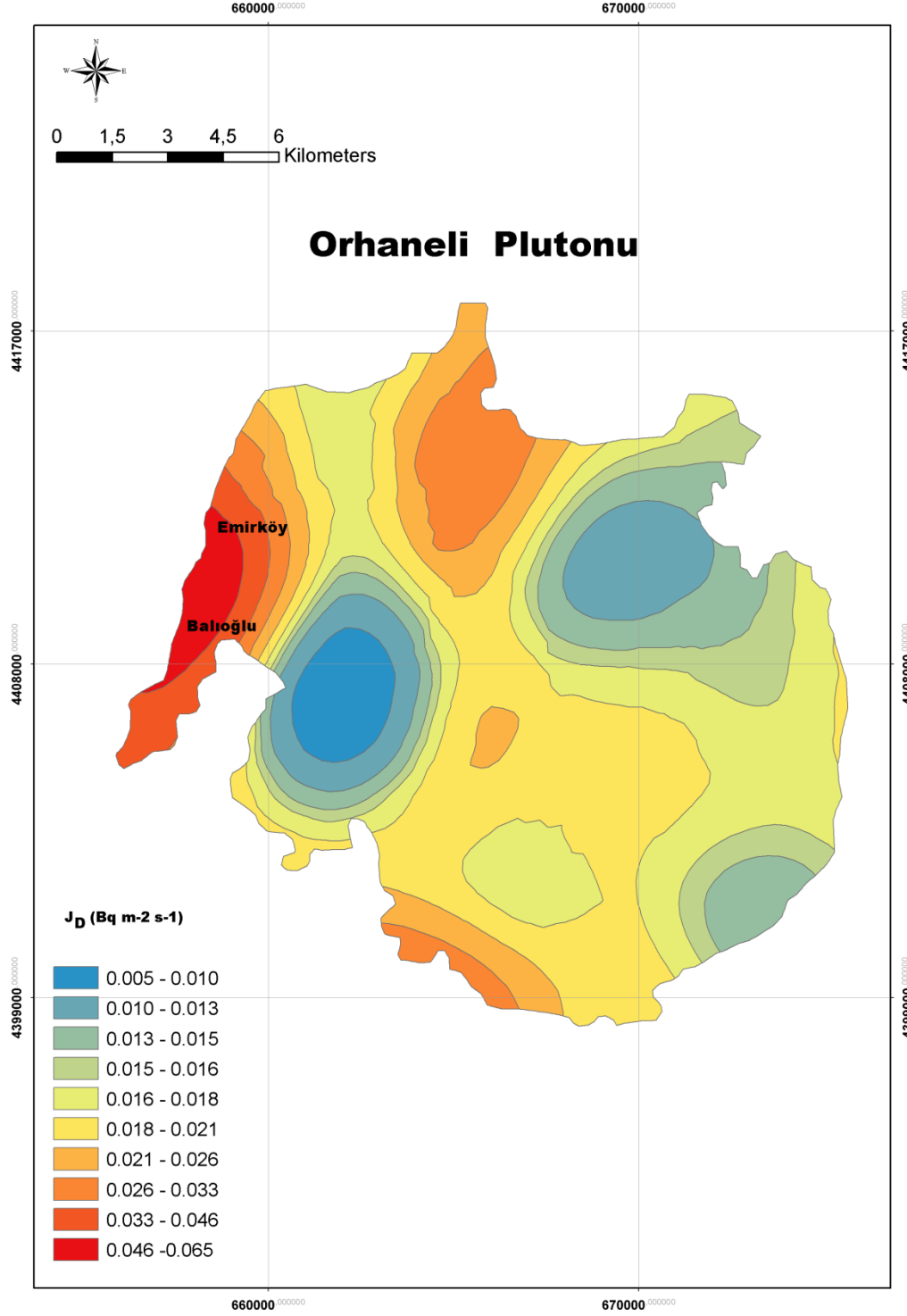
Şekil 4.18 Orhaneli plutonu yüzey topraklarında ^{40}K dağılımı.

^{40}K aktivite konsantrasyonu dağılımı plutonun büyük bir kısmında 448-749 Bq kg⁻¹ arasında değişmektedir. Daha yüksek ^{40}K değerleri 749 Bq kg⁻¹'dan 1111 Bq kg⁻¹'a kadar plutonun batı sınırında gözlenirken en yüksek değer 1409 Bq kg⁻¹ olarak O21 kodlu örneğin alındığı Emirköy yakınlarında gözlenmiştir (Şekil 4.18).



Şekil 4.19 Orhaneli plutonunda doğal radyasyondan kaynaklanan karasal gama doz dağılımı.

Doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonlarına dayalı olarak hesaplanan karasal doğal radyasyondan kaynaklanan doz hızı (D) dağılımı plutonun büyük bir kısmında $51-71 \text{ nGy h}^{-1}$ arasında değişmektedir. Daha yüksek doz değerleri en yüksek Emirköy (O21) civarında olmak üzere 71 nGy h^{-1} ile 189 nGy h^{-1} arasında birkaç noktada gözlenmektedir (Şekil 4.19).



Şekil 4.20 Orhaneli plutonunda yüzey topraklarından salınan radon akısı.

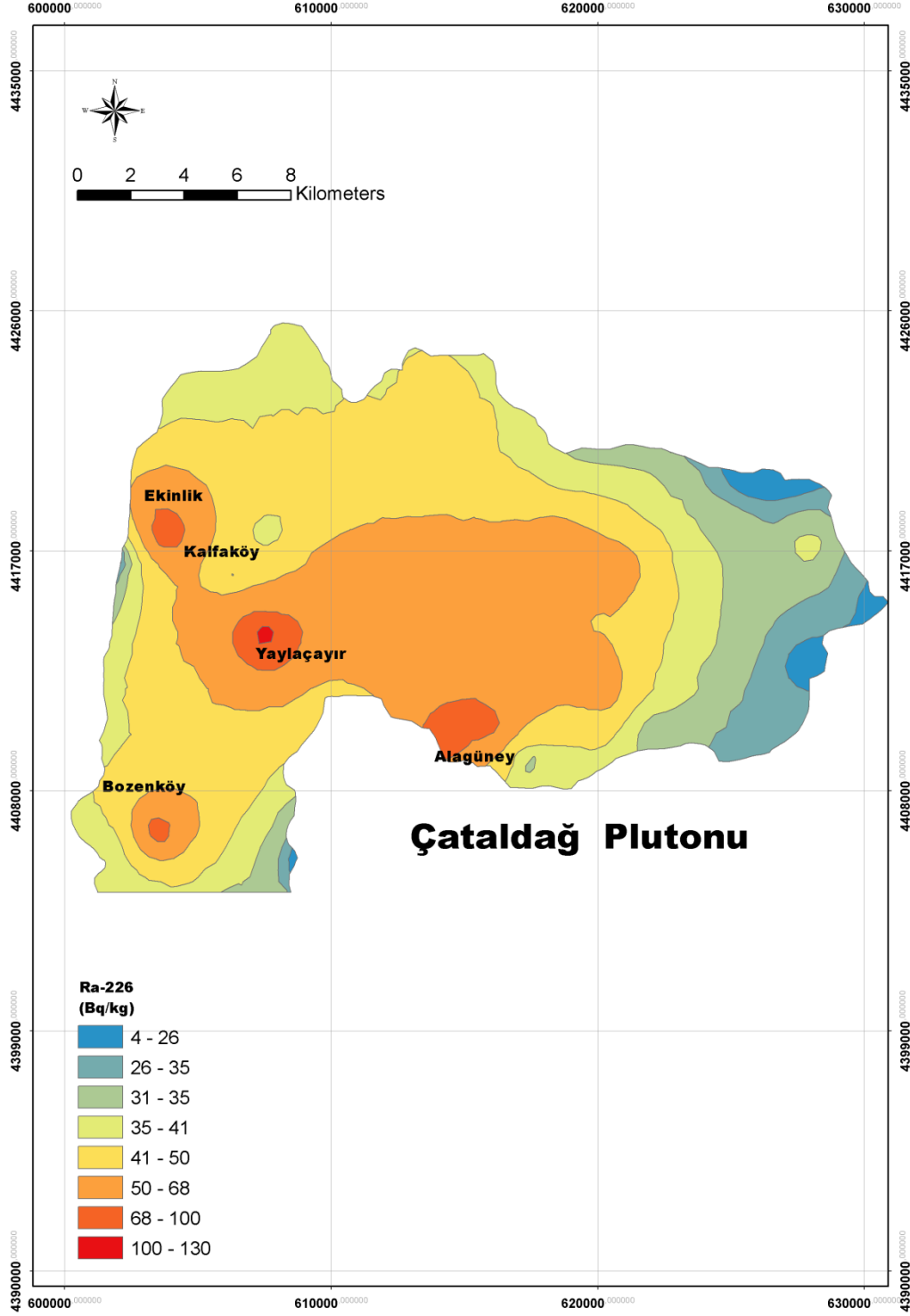
Şekil 4.20’de görüldüğü gibi, topraktan salınan radon akısı (J_D) plutonun büyük bir kısmında $0.015\text{--}0.021\text{ Bq m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ arasında değişmiştir. $0.021\text{ Bq m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ ’den $0.065\text{ Bq m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ ’a kadar daha yüksek seviyeler plutonun batı sınırı boyunca gözlenirken, en yüksek değer yine Emirköy (O21) civarında gözlenmiştir.

Dağılımların plutonun batı kısmında yoğunlaşmasının nedeni tezin 3. Bölümünde Orhaneli plutonunun genel jeolojik değerlendirilmesi kısmında anlatıldığı üzere, Orhaneli Plutonu'nun batı sınırı boyunca Miyosen volkanikleri ile örtülü olmasıdır. Yine tezin 2. Bölümünde vurgulandığı üzere plutonik kayalar gibi magmatik kayaç olan volkanik kayaçlar da yüksek doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonlarına sahiptirler (Çizelge 2.1) (Çam et al., 2013).

Son olarak, Orhaneli plutonuna ait haritalarda jeoistatistik yöntemlerle elde edilen ve plutonun büyük bir kısmında etkin olan aralıklar daha önce “4.1.1 Orhaneli plutonunun radyolojik karakteristikleri” başlığı altında verilen klasik istatistik sonuçlarındaki %25-%75 değer aralıkları (Çizelge 4.2) ve kümülatif grafiklerle (Şekil 4.2) karşılaştırıldığında jeoistatistik yöntemlerle elde edilen sonuçların klasik tanımlayıcı istatistik sonuçlarıyla uyumu açıkça görülmektedir.

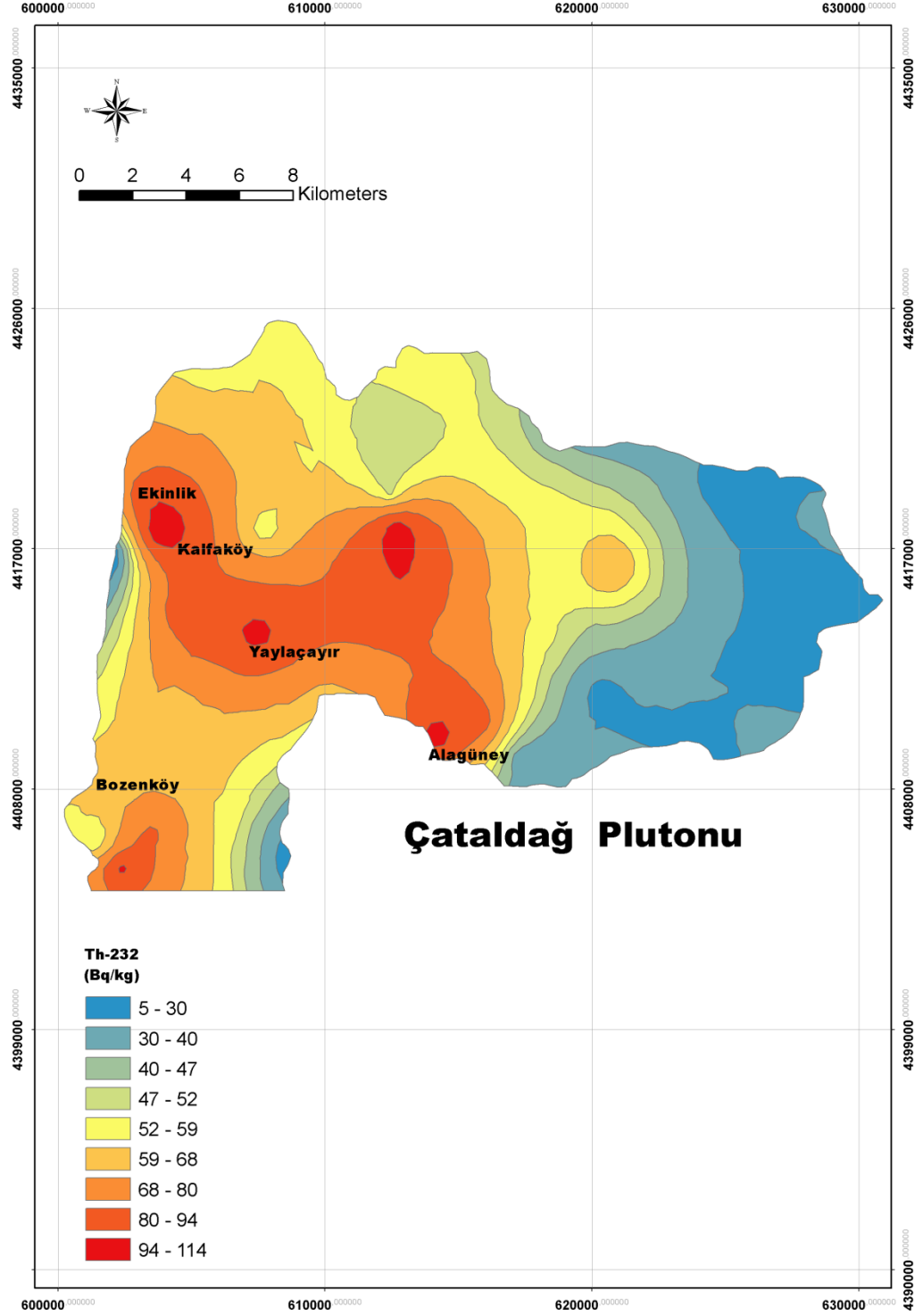
4.3.2 Çataldağ plutonu radyolojik haritalar

Çataldağ plutonu toprak örneklerinde ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktivite konsantrasyonları, karasal doğal radyasyondan kaynaklanan doz hızı (D) ve radon akısına (J_D) ilişkin dağılım haritaları oluşturulmuş ve sırasıyla Şekil 4.21-4.25'te gösterilmiştir.



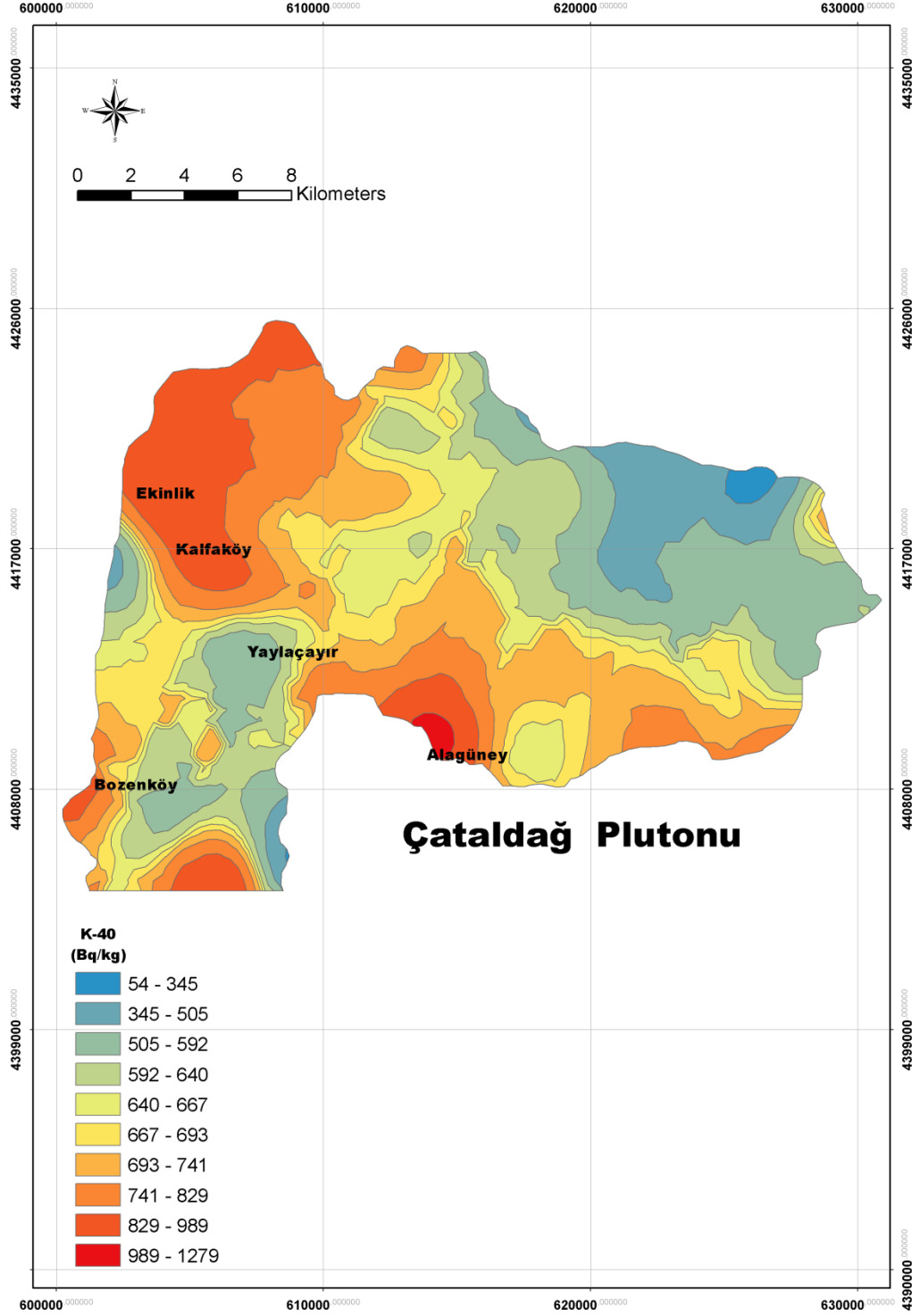
Şekil 4.21 Çataldağ plutonu yüzey topraklarında ^{226}Ra dağılımı.

Şekil 4.21’de verilen ^{226}Ra aktivite konsantrasyonu dağılımı plutonun büyük bir kısmında 26-68 Bq kg⁻¹ arasında değişmektedir. Daha yüksek seviyeler 68-130 Bq kg⁻¹ aralığında olmak üzere, en yüksek ^{226}Ra aktivite konsantrasyonu C19 kodlu örneğin alındığı Yaylaçayır köyü yakınlarında gözlenmiştir.



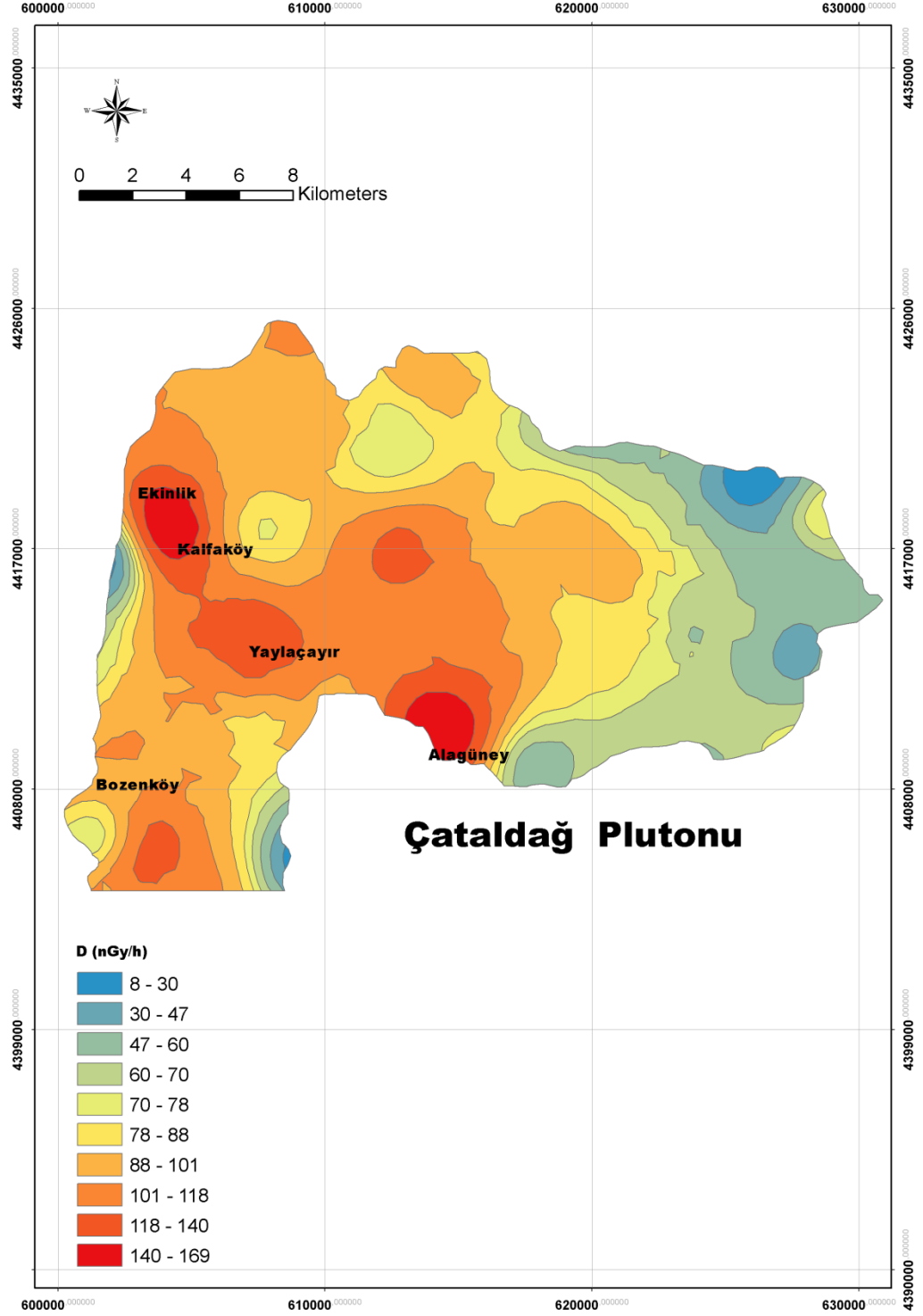
Şekil 4.22 Çataldağ plutonu yüzey topraklarında ^{232}Th dağılımı.

Şekil 4.22’de görüldüğü gibi, ^{232}Th aktivite konsantrasyonu dağılımı plutonun büyük bir kısmında $30\text{--}80\text{ Bq kg}^{-1}$ arasında değişirken 80 Bq kg^{-1} ’dan 114 Bq kg^{-1} ’a kadar daha yüksek seviyeler plutonun orta kısımlarında gözlenmektedir. En yüksek ^{232}Th aktivite konsantrasyonu C61 kodlu örneğin alındığı Ekinlik köyü ve Kalfaköy arasında gözlenmiştir.



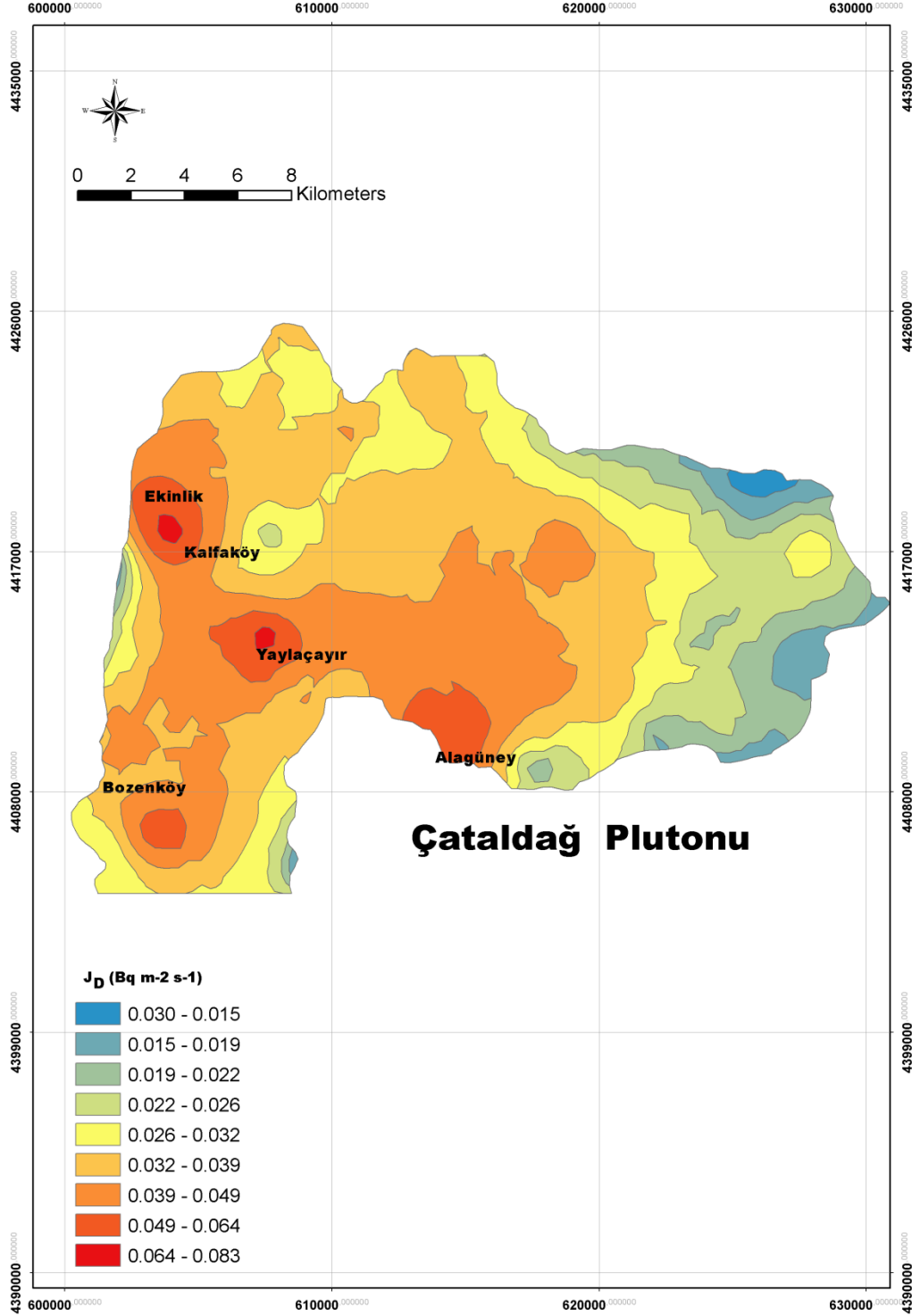
Şekil 4.23 Çataldağ plutonu yüzey topraklarında ^{40}K dağılımı.

^{40}K aktivite konsantrasyonu dağılımı plutonun büyük bir kısmında 505-829 Bq kg⁻¹ arasında değişmektedir. Daha yüksek ^{40}K değerleri 829 Bq kg⁻¹'dan 1279 Bq kg⁻¹'a kadar olmak üzere, en yüksek değer C39 kodlu örneğin alındığı Alagüney köyü yakınlarında gözlenmiştir (Şekil 4.23).



Şekil 4.24 Çataldağ plutonunda doğal radyasyondan kaynaklanan karasal gama doz dağılımı.

Doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonlarına dayalı olarak hesaplanan karasal doğal radyasyondan kaynaklanan doz hızı (D) dağılımı pluton genelinde 60-101 nGy h⁻¹ arasında değişmektedir. Daha yüksek doz değerleri en yüksek Alagüney köyü civarında olmak üzere 101 nGy h⁻¹ ile 169 nGy h⁻¹ arasında gözlenmiştir (Şekil 4.24).



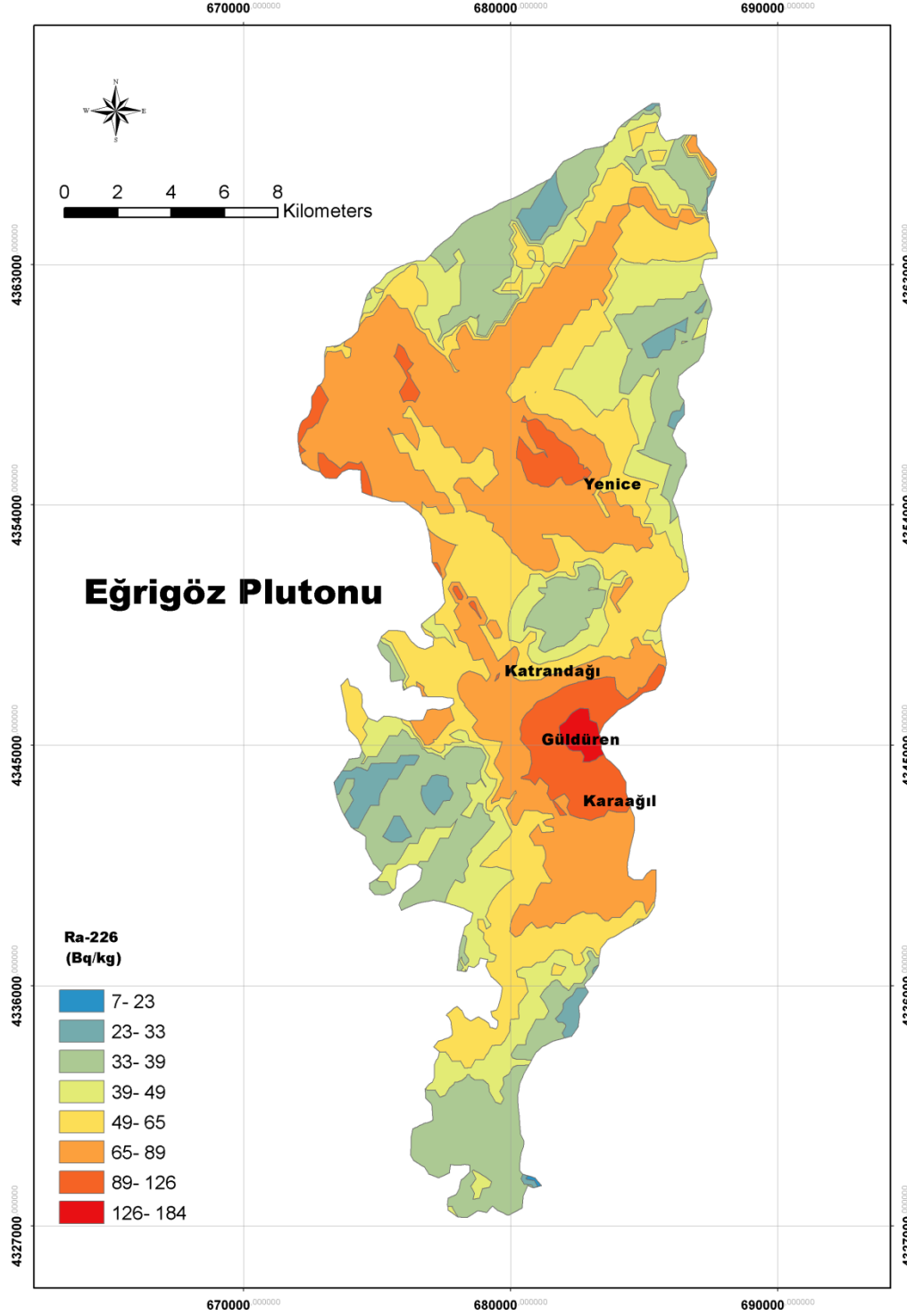
Şekil 4.25 Çataldağ plutonunda yüzey topraklarından salınan radon akısı.

Şekil 4.25'te görüldüğü gibi, topraktan salınan radon akısı (J_D) plutonun büyük bir kısmında $0.019-0.039 \text{ Bq m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ arasında değişmiştir. Daha yüksek akı değerleri $0.039 \text{ Bq m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 'den $0.083 \text{ Bq m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 'a kadar gözlenmiştir. En yüksek radon akısı, ^{226}Ra dağılımına benzer şekilde Yaylaçayır köyü yakınlarında gözlenmiştir.

Çataldağ plutonuna ait haritalarda da jeoistatistik yöntemlerle elde edilen ve plutonun büyük bir kısmında etkin olan aralıkların daha önce “4.1.2 *Çataldağ plutonunun radyolojik karakteristikleri*” başlığı altında verilen klasik istatistik sonuçlarındaki %25-%75 değer aralıkları (Çizelge 4.4) ve kümülatif grafiklerle (Şekil 4.6) karşılaştırıldığında jeoistatistik yöntemlerle elde edilen sonuçların klasik tanımlayıcı istatistik sonuçlarıyla uyumu açıkça görülmektedir.

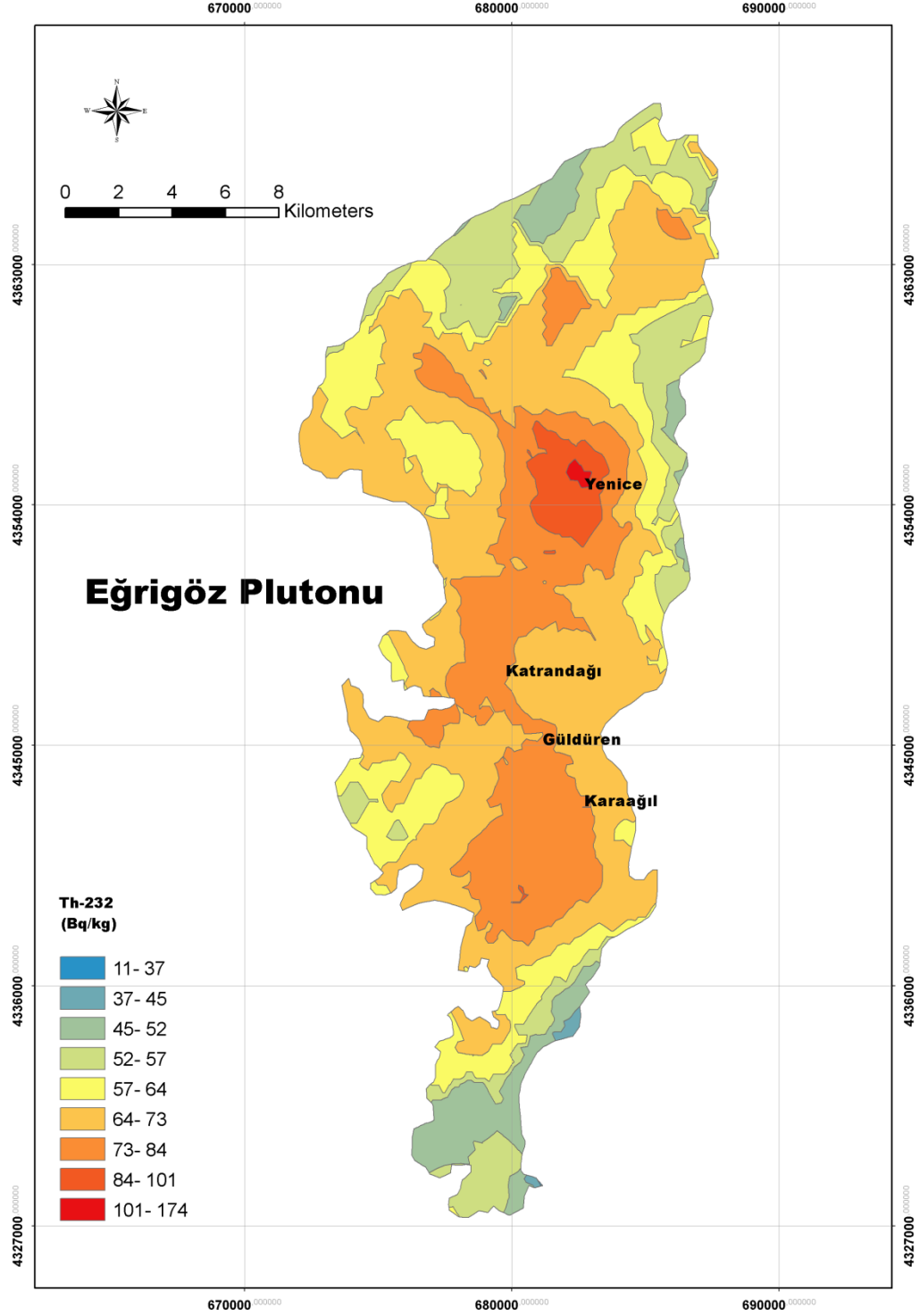
4.3.3 Eğrigöz plutonu radyolojik haritalar

Eğrigöz plutonu toprak örneklerinde doğal radyonüklit (^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K) aktivite konsantrasyonları, karasal doğal radyasyondan kaynaklanan doz hızı (D) ve topraktan salınan radon hızına (J_D) ilişkin dağılım haritaları oluşturulmuş ve sırasıyla Şekil 4.26-4.30’da gösterilmiştir (Canbaz Öztürk et al., 2015).



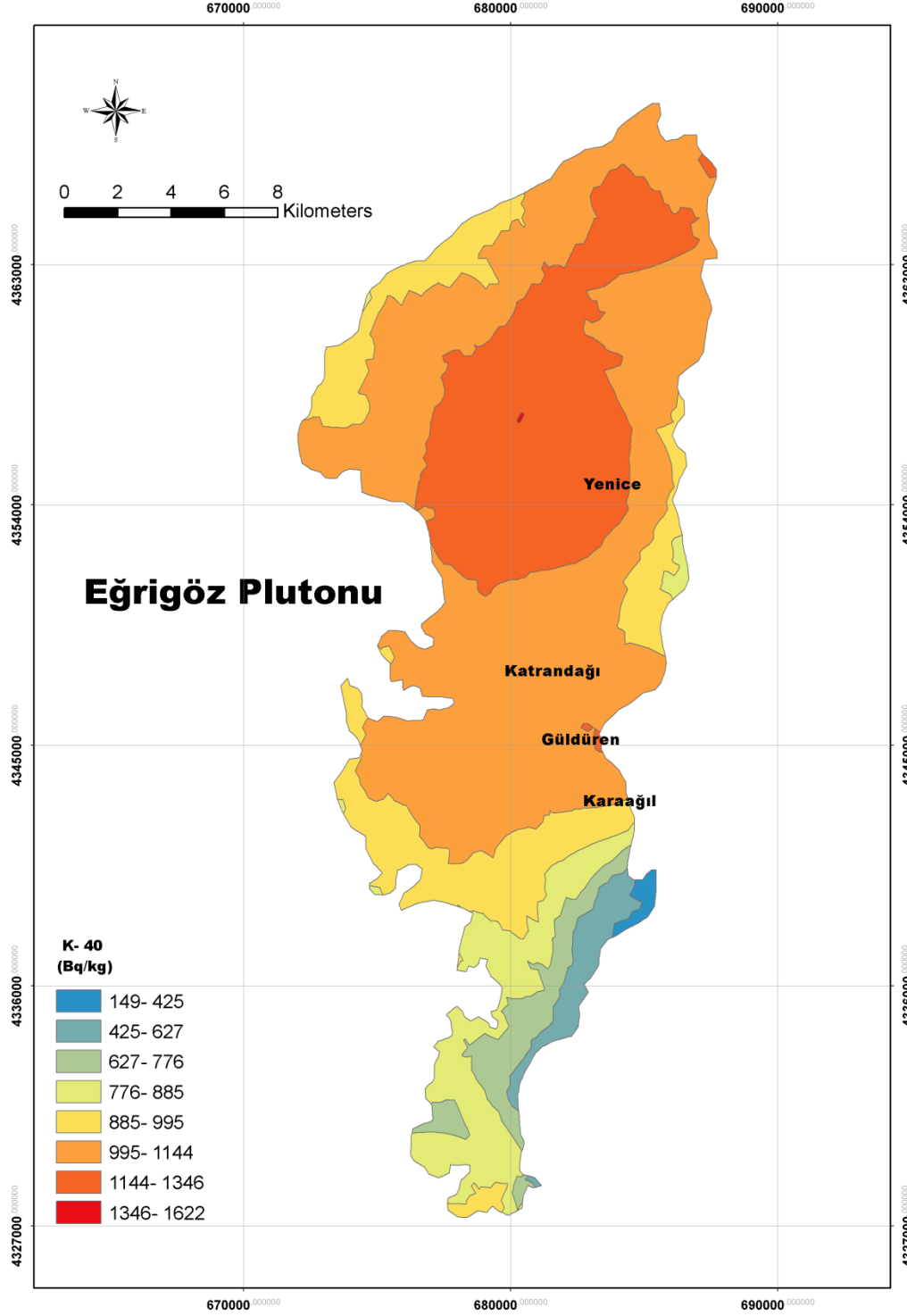
Şekil 4.26 Eğrigöz plutonu yüzey topraklarında ^{226}Ra dağılımı.

Şekil 4.26’da görüldüğü gibi, ^{226}Ra aktivite konsantrasyonu dağılımı plutonun büyük bir kısmında 33-65 Bq kg⁻¹ arasında değişmektedir. En yüksek ^{226}Ra aktivite konsantrasyonu 184 Bq kg⁻¹ olarak E10/1 kodlu örneğin alındığı Güldüren ve Katrandağı köyleri arasında ölçülmüştür.



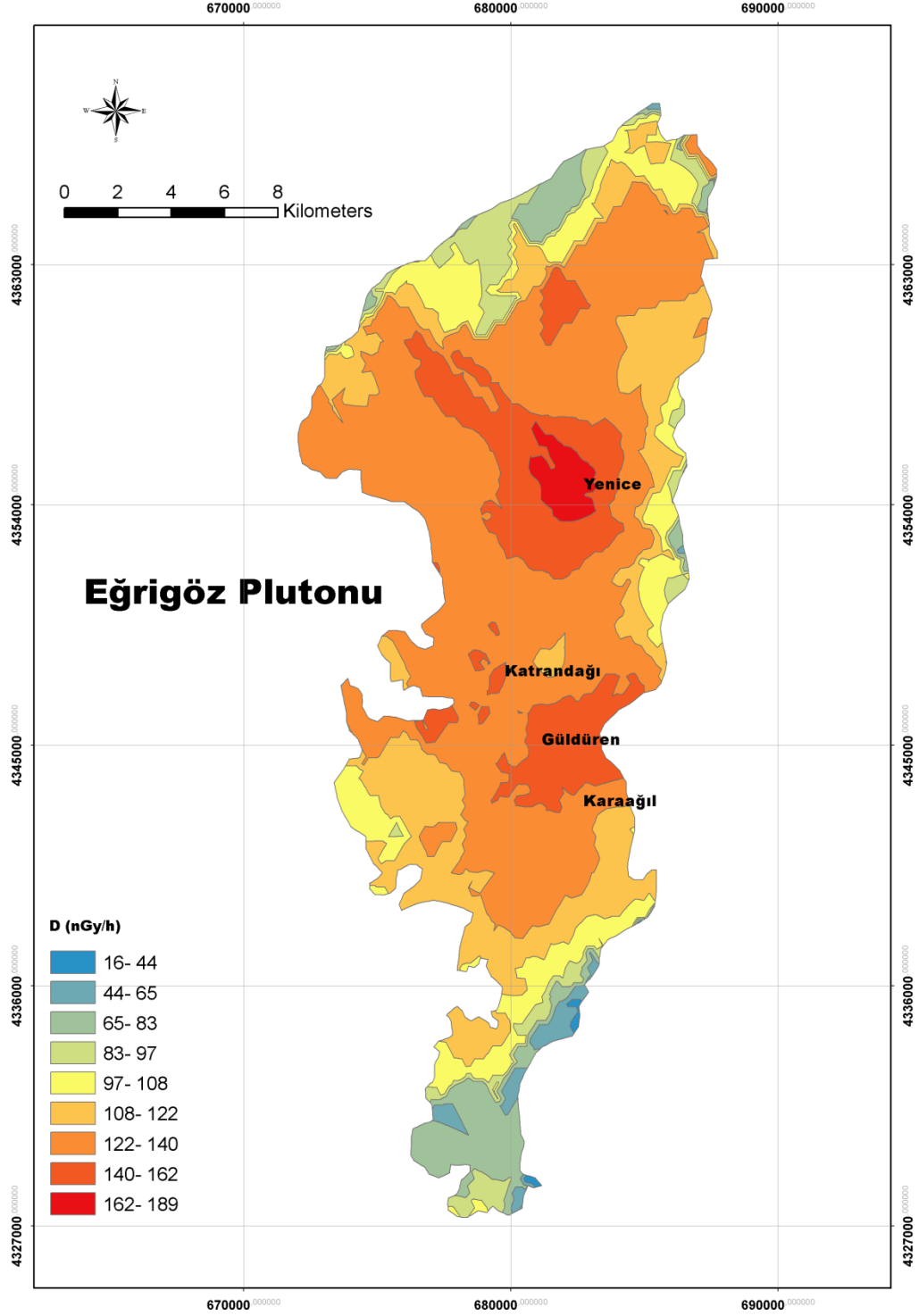
Şekil 4.27 Eğrigöz plutonu yüzey topraklarında ^{232}Th dağılımı.

Şekil 4.27’de verilen ^{232}Th aktivite konsantrasyonu dağılımı plutonun büyük bir kısmında 45-84 Bq kg⁻¹ arasında değişirken 84 Bq kg⁻¹’dan 174 Bq kg⁻¹’a kadar daha yüksek seviyeler plutonun orta kesimlerinde gözlenmektedir. En yüksek ^{232}Th aktivite konsantrasyonu E51 kodlu örneğin alındığı Yenice köyü yakınlarında gözlenmiştir.



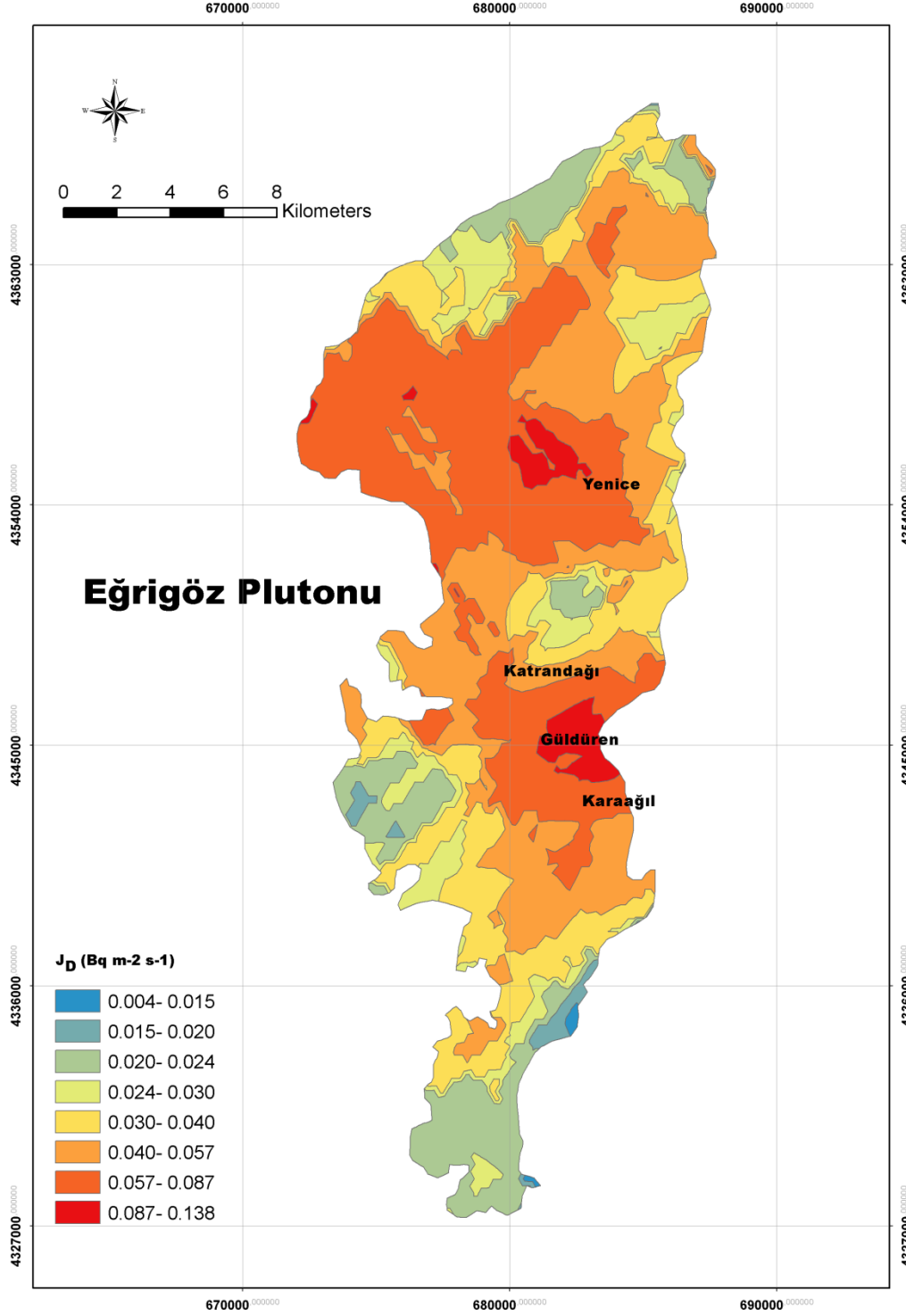
Şekil 4.28 Eğrigöz plutonu yüzey topraklarında ^{40}K dağılımı.

^{40}K aktivite konsantrasyonu dağılımı plutonun büyük bir kısmında 627-1144 Bq kg⁻¹ arasında değişmektedir. Daha yüksek ^{40}K değerleri 1144 Bq kg⁻¹'dan 1622 Bq kg⁻¹'a kadar plutonun kuzey kısımlarında gözlenirken en yüksek değer E9 kodlu örneğin alındığı Karaağıl köyü yakınlarında gözlenmiştir (Şekil 4.28).



Şekil 4.29 Eğrigöz plutonunda doğal radyasyondan kaynaklanan karasal gama doz dağılımı.

Karasal doğal radyasyondan kaynaklanan doz hızı (D) dağılımı plutonun büyük bir kısmında $83-122 \text{ nGy h}^{-1}$ arasında değişmektedir. Daha yüksek doz değerleri en yüksek Güldüren ve Katrandağı köyleri arasında (E10/1) olmak üzere 122 nGy h^{-1} ile 189 nGy h^{-1} arasında gözlenmektedir (Şekil 4.29).



Şekil 4.30 Eğrigöz plutonunda yüzey topraklarından salınan radon akısı.

Şekil 4.30’da görüldüğü gibi, topraktan salınan radon akısı (J_D) plutonun büyük bir kısmında $0.020\text{--}0.057\text{ Bq m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ arasında değişmiştir. $0.057\text{ Bq m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ ’den $0.138\text{ Bq m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ ’a kadar daha yüksek seviyeler plutonun orta ve kuzey kısımlarında gözlenirken, en yüksek değer ^{226}Ra dağılımına benzer şekilde Güldüren ve Katrandağı köyleri arasında (E10/1) gözlenmiştir.

Eğrigöz plutonuna ait haritalar, doğal radyonüklitlerin ve gama doz hızı dağılımlarının altta yatan jeoloji ile uyumlu olarak nispeten homojen olduğunu ortaya koymaktadır. Diğer plutonlar gibi, Eğrigöz plutonuna ait jeostatistik veriler de tanımlayıcı istatistik sonuçlarını destekler niteliktedir.

4.4 Sonuçların Çok Değişkenli İstatistik Analiz Yöntemleri İle Değerlendirilmesi

4.4.1 Korelasyon analizi

Korelasyon analizi, iki değişken arasındaki doğrusal ilişkiyi veya bir değişkenin iki ya da daha çok değişken ile olan ilişkisini test etmek, varsa bu ilişkinin yönünü ve derecesini ölçmek için kullanılan istatistiksel bir yöntemdir. Ancak korelasyon, neden-sonuç ilişkisinin göstergesi değildir. İki değişken arasındaki ilişkinin düzeyi korelasyon katsayısı r ile hesaplanır. Korelasyon katsayısı r , $-1 \leq r \leq +1$ aralığında değişim gösterir. Eksi değerler negatif ilişkiyi, + değerler pozitif ilişkiyi gösterir. Korelasyon katsayısının karesi, r^2 , değişkenlerin değişiminin yüzde kaçını açıkladığını belirtir ve belirleme katsayısı olarak isimlendirilir. Parametrik olmayan veriler için Spearman Korelasyon Analizi; parametrik veriler için ise Pearson Korelasyon Analizi uygulanmalıdır.

Verilerin parametrik olup olmadığını belirlemede ilk kriter örneklem büyüklüğüdür. Eğer örneklem büyüklüğü 30'dan az ise parametrik olmayan yöntemler kullanılmalıdır. Bu durumda veri setinin diğer kriterleri karşılayıp karşılamadığının incelenmesine gerek kalmaz. Eğer veri seti 30'dan büyük ise her bir faktörün normal dağılıma sahip olup olmadığı ve verilerin homojen dağılıp dağılmadığı incelenmelidir. Veriler normal ve homojen ise parametrik yöntemler kullanılabilir.

Buna göre, korelasyon analizinde hangi istatistiğin uygulanacağını belirlenmesinde *4.1 Radyolojik Gözlem* başlığı altında verilen doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonlarına ilişkin tanımlayıcı istatistik ve Kolmogorov-Smirnov normalite testi sonuçlarından yararlanılmış ve Çizelge 4.9 oluşturulmuştur.

Çizelge 4.9 Kayaç ve toprak örnekleri için uygulanacak korelasyon analizleri.

		N	Sağlanan Kriter	Korelasyon Analizi
Granit	Orhaneli Plutonu	22	N<30	Spearman korelasyonu
	Çataldağ Plutonu	28	N<30	Spearman korelasyonu
	Eğrigöz Plutonu	23	N<30	Spearman korelasyonu
Toprak	Orhaneli Plutonu	43	²²⁶ Ra, ²³² Th ve ⁴⁰ K dağılımları Log-Normal	Spearman korelasyonu
	Çataldağ Plutonu	57	²²⁶ Ra, ²³² Th ve ⁴⁰ K dağılımları Normal ve Homojen	Pearson Korelasyonu
	Eğrigöz Plutonu	53	²²⁶ Ra, ²³² Th ve ⁴⁰ K dağılımları Normal ve Homojen	Pearson Korelasyonu

(** Anomali gösteren E10/1 kodlu örnek istatistik dışı tutulmuştur.)

Öncelikle hipotezi kuracak olursak;

H₀: Değişkenler arasında ilişki yoktur.

H₁: Değişkenler arasında ilişki vardır.

Korelasyon analizine göre, (*) ile işaretlenen rakamlar %5 önem seviyesinde korelasyon olduğunu gösterir. Anlamlılık değeri 0.05'ten küçük ise (p<0.05) H₀ hipotezi reddedilir, yani değişkenler arasında ilişki vardır. (**) ile işaretlenen rakamlar değişkenler arasında %1 önem seviyesinde korelasyon olduğunu gösterir. Anlamlılık değeri p<0.01 ise H₀ hipotezi reddedilir, H₁ hipotezi kabul edilir yani değişkenler arasında ilişki vardır denilir.

İki değişken arasındaki korelasyon katsayısının yorumları aşağıdaki şekilde yapılır:

r	Korelasyon
0.00-0.25	Çok Zayıf
0.26-0.49	Zayıf
0.50-0.69	Orta
0.70-0.89	Yüksek
0.90-1.00	Çok Yüksek

4.4.1.1 Orhaneli plutonu ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktivite konsantrasyonları arasındaki korelasyon

Korelasyon analizi sonucunda Orhaneli plutonu kayaç ve toprak örneklerinde elde edilen doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonları arasındaki ilişki belirlenmiş ve Çizelge 4.10'daki korelasyon matrisi oluşturulmuştur.

Çizelge 4.10 Orhaneli plutonu kayaç ve toprak örnekleri için doğal radyonüklitler arasındaki korelasyon.

Orhaneli Plutonu Korelasyon Analizi				
Granit Kayaç N=22		^{232}Th (Bq/kg)	^{226}Ra (Bq/kg)	^{40}K (Bq/kg)
Spearman Korelasyonu	^{232}Th (Bq/kg) r	1.000	0.792**	0.628**
	Sig.	.	0.000	0.002
	^{226}Ra (Bq/kg) r	0.792**	1.000	0.527*
	Sig.	0.000	.	0.012
	^{40}K (Bq/kg) r	0.628**	0.527*	1.000
	Sig.	0.002	0.012	.
Toprak N=43		^{232}Th (Bq/kg)	^{226}Ra (Bq/kg)	^{40}K (Bq/kg)
Spearman Korelasyonu	^{232}Th (Bq/kg) r	1.000	0.722**	0.639**
	Sig.	.	0.000	0.000
	^{226}Ra (Bq/kg) r	0.722**	1.000	0.665**
	Sig.	0.000	.	0.000
	^{40}K (Bq/kg) r	0.639**	0.665**	1.000
	Sig.	0.000	0.000	.

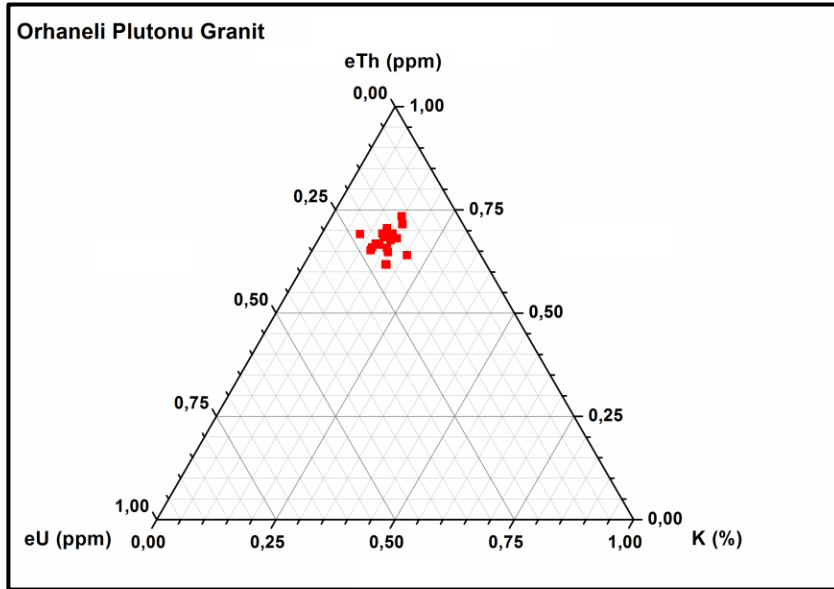
* Korelasyon 0.05 seviyesinde anlamlı

** Korelasyon 0.01 seviyesinde anlamlı

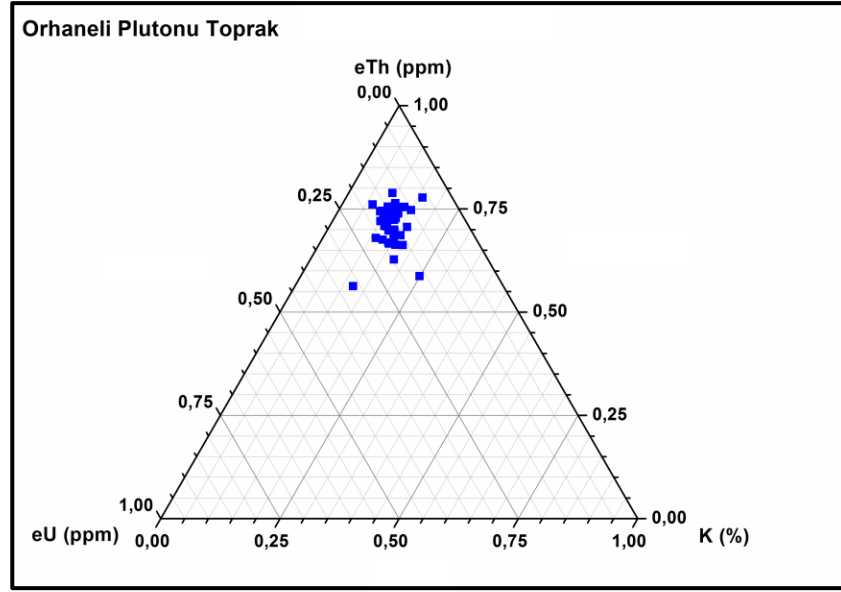
Orhaneli granit plutonuna ait 22 adet granitik kayaç örneğinde elde edilen verilere uygulanan Spearman Korelasyon Analizi sonucunda ^{232}Th ile ^{226}Ra için $r = 0.792$, $p < 0.01$ elde edilmiştir. Bu sonuç ^{232}Th ile ^{226}Ra arasında pozitif yüksek düzeyde ilişkinin olduğunu gösterir. Belirtme katsayısı $r^2 = 0.792^2 = 0.63$ ^{232}Th ile ^{226}Ra 'nın %63 ilişkili olduğunu ifade eder. ^{232}Th ile ^{40}K için elde edilen Spearman Korelasyon katsayısı $r = 0.628$, $p < 0.01$ ^{232}Th ile ^{40}K arasında pozitif orta düzeyde ilişkinin olduğunu gösterir. $r^2 = 0.628^2 = 0.39$ ^{232}Th ile ^{40}K %39 ilişkilidir de denilebilir.

Orhaneli granit plutonuna ait 43 adet toprak örneğinde elde edilen verilere uygulanan Spearman Korelasyon Analizi sonucunda ^{232}Th ile ^{226}Ra için $r=0.722$, $p<0.01$ elde edilmiştir. ^{232}Th ile ^{226}Ra yüksek düzeyde ($r^2=0.722^2$) %52 ilişkilidir ve ilişkinin yönü pozitiftir. ^{232}Th ile ^{40}K için elde edilen Spearman Korelasyon katsayısı $r=0.639$, $p<0.01$ ^{232}Th ile ^{40}K arasında pozitif orta düzeyde ilişkinin olduğunu gösterir. Belirtme katsayısı $r^2=0.639^2=0.41$ 'e göre, ^{232}Th ile ^{40}K %41 ilişkilidir de denilebilir.

Ek olarak, Orhaneli plutonu kayaç ve toprak örneklerinde Th/U ve Th/K konsantrasyon oranları arasındaki ilişkiyi incelemek için Şekil 4.31 ve Şekil 4.32'de gösterilen üçgen grafikler çizilmiştir. Şekil 4.31'de görüldüğü gibi, granitik kayaç örnekleri için Th/U oranı 3.88 ortalama ile 2.90-6.20 arasında; Th/K oranı ise 4.86 ortalama ile 3.13-8.57 arasında değişmiştir. Clark et al., granitik kayaçlarda Th/U oranını 4; Th/K oranını ise 4.5 olarak belirtmiştir (Clark et al., 1966). Toprak örnekleri için Th/U oranı 4.84 (1.79-12.48) ve Th/K oranı 5.94 (2.36-11.86)'dır (Şekil 4.32). Orhaneli plutonunda toprak ve granit kayaçlar için bulunan bu oranların birbirine yakın olması, ana kayaç-toprak arasındaki litolojik ilişkiyi belirtirken, toryumun zenginleştiğini ve toryumun gama radyasyonunun baskın kaynağı olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.31 Orhaneli plutonu granit kayaçlarda eU, eTh ve K ilişkisini gösteren üçgen grafik.



Şekil 4.32 Orhaneli plutonu toprak örneklerinde eU, eTh ve K ilişkisini gösteren üçgen grafik.

4.4.1.2 Çataldağ plutonu ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktivite konsantrasyonları arasındaki korelasyon

Çataldağ plutonu kayaç ve toprak örneklerinde elde edilen doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonları arasındaki ilişkiyi ortaya koymak üzere yapılan Korelasyon analizi sonucu oluşturulan korelasyon matrisi Çizelge 4.11’de verilmiştir.

Çataldağ granit plutonuna ait 28 adet granitik kayaç örneğinde elde edilen doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonlarına uygulanan Spearman Korelasyon Analizi sonucunda ^{232}Th ile ^{226}Ra için Korelasyon katsayısı $r = 0.550$, $p < 0.01$ ve belirtme katsayısı $r^2 = 0.550^2 = 0.30$ elde edilmiştir. Buna göre, ^{232}Th ile ^{226}Ra arasında %30 pozitif orta düzeyde ilişki vardır. ^{232}Th ile ^{40}K için elde edilen anlamlılık değeri $p > 0.01$ olduğundan ^{232}Th ile ^{40}K arasında önemli bir korelasyon yoktur.

Çizelge 4.11 Çataldağ plutonu kayaç ve toprak örnekleri için doğal radyonüklitler arasındaki korelasyon.

Çataldağ Plutonu Korelasyon Analizi				
Granit Kayaç N= 28		²³² Th (Bq/kg)	²²⁶ Ra (Bq/kg)	⁴⁰ K (Bq/kg)
Spearman Korelasyonu	²³² Th (Bq/kg) r	1.000	0.550**	-0.232
	Sig.	.	0.002	0.235
	²²⁶ Ra (Bq/kg) r	0.550**	1.000	-0.291
	Sig.	0.002	.	0.134
	⁴⁰ K (Bq/kg) r	-0.232	-0.291	1.000
	Sig.	0.235	0.134	.
Toprak N= 57		²³² Th (Bq/kg)	²²⁶ Ra (Bq/kg)	⁴⁰ K (Bq/kg)
Pearson Korelasyonu	²³² Th (Bq/kg) r	1.000	0.799**	0.485**
	Sig.	.	0.000	0.000
	²²⁶ Ra (Bq/kg) r	0.799**	1.000	0.336*
	Sig.	0.000	.	0.011
	⁴⁰ K (Bq/kg) r	0.485**	0.336*	1.000
	Sig.	0.000	0.011	.

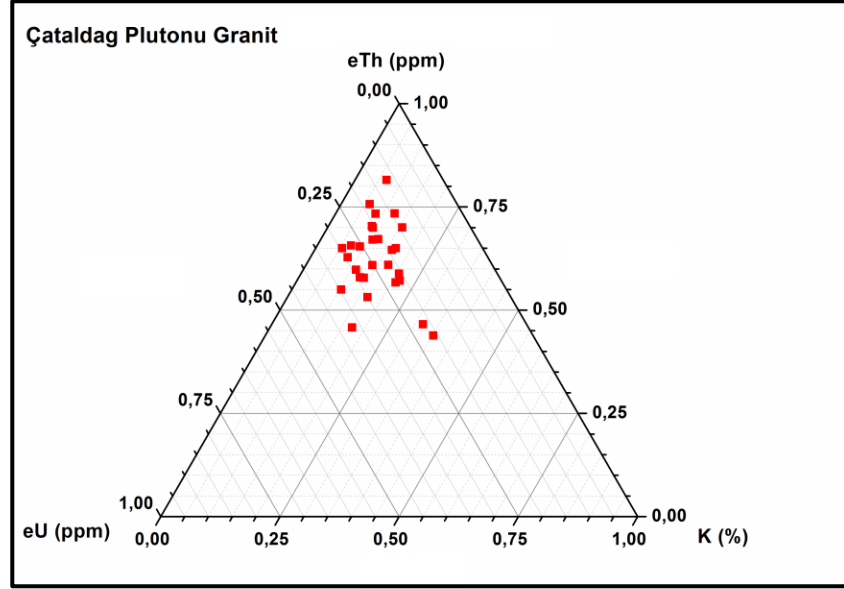
* Korelasyon 0.05 seviyesinde anlamlı

** Korelasyon 0.01 seviyesinde anlamlı

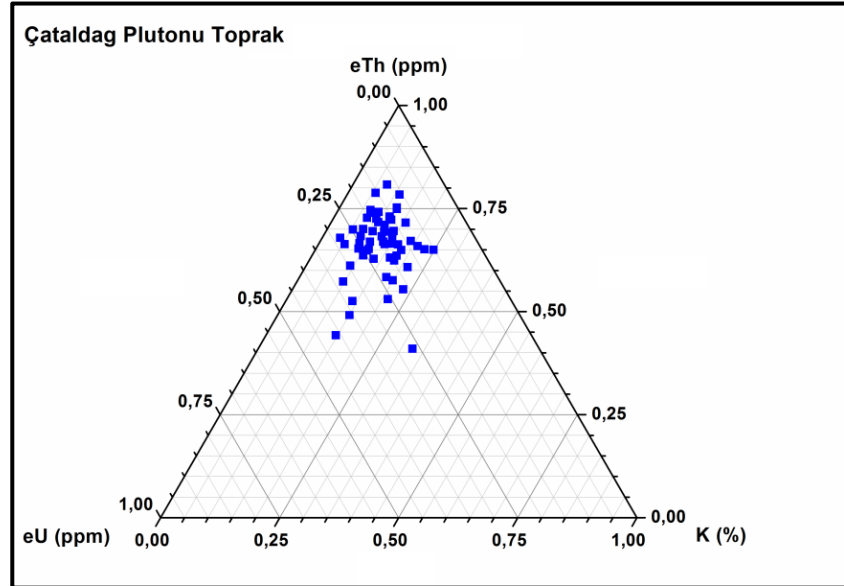
Çataldağ granit plutonuna ait 57 adet toprak örneğinde ise ²³²Th ile ²²⁶Ra arasında $r=0,799$, $p<0.01$ korelasyon katsayısı ile %64 düzeyinde güçlü pozitif doğrusal bir ilişki olduğu görülmektedir. ²³²Th ile ⁴⁰K arasında ise $r=0.485$, $p<0.01$ korelasyon katsayısı ile %24 düzeyinde zayıf bir ilişki olduğu görülmektedir.

Ayrıca, Şekil 4.33 ve 4.34'te, Çataldağ plutonu kayaç ve toprak örneklerinde Th/U ve Th/K konsantrasyon oranları arasındaki ilişkiyi gösteren üçgen grafikler verilmiştir. Şekil 4.33'te görüldüğü gibi, granitik kayaç örnekleri için Th/U oranı 2.95 ortalama ile 1.24-6.89 arasında; Th/K oranı ise 5.68 ortalama ile 1.24-12.58 arasında değişmiştir. Clark et al., granitik kayaçlarda Th/U oranını 4; Th/K oranını ise 4.5 olarak belirtmiştir (Clark et al., 1966). Clark değerine göre Çataldağ granit örneklerinde elde edilen Th/K oranının yüksek olması toryumun zenginleştiğini, Th/U oranının düşük olması ise toryumun yanında uranyumun da zenginleştiğini göstermektedir. Toprak örnekleri için Th/U oranı 3.61 (1.08-7.40) ve Th/K oranı 6.11 (1.27-17.87)'dir (Şekil 4.34). Toprak ve granit kayaçlar için, bu oranların birbirine yakın olması ana kayaç ile ondan türeyen toprak arasındaki

litolojik ilişkiyi ve bunun yanı sıra Çataldağ plutonunda toryum ve uranyumun birlikte kısmen zenginleşerek gama radyasyonunun baskın kaynağı olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 4.33 Çataldağ plutonu granit kayalarda eU, eTh ve K ilişkisini gösteren üçgen grafik.



Şekil 4.34 Çataldağ plutonu toprak örneklerinde eU, eTh ve K ilişkisini gösteren üçgen grafik.

4.4.1.3 Eğrigöz plutonu ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktivite konsantrasyonları arasındaki korelasyon

Çizelge 4.12’de Eğrigöz plutonu kayaç ve toprak örneklerinde elde edilen doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonları arasındaki ilişkiyi belirten Korelasyon matrisi verilmiştir.

Çizelge 4.12 Eğrigöz plutonu kayaç ve toprak örnekleri için doğal radyonüklitler arasındaki korelasyon.

Eğrigöz Plutonu Korelasyon Analizi				
Granit Kayaç N= 23		^{232}Th (Bq/kg)	^{226}Ra (Bq/kg)	^{40}K (Bq/kg)
Spearman Korelasyonu	^{232}Th (Bq/kg) r	1.000	0.200*	0.654**
	Sig.	.	0.361	0.001
	^{226}Ra (Bq/kg) r	0.200*	1.000	-0.048*
	Sig.	0.361	.	0.826
	^{40}K (Bq/kg) r	0.654**	-0.048*	1.000
	Sig.	0.001	0.826	.
Toprak N= 53		^{232}Th (Bq/kg)	^{226}Ra (Bq/kg)	^{40}K (Bq/kg)
Pearson Korelasyonu	^{232}Th (Bq/kg) r	1.000	,529**	,439**
	Sig.	.	,000	,001
	^{226}Ra (Bq/kg) r	,529**	1.000	,466**
	Sig.	,000	.	,000
	^{40}K (Bq/kg) r	,439**	,466**	1.000
	Sig.	,001	,000	.

* Korelasyon 0.05 seviyesinde anlamlı

** Korelasyon 0.01 seviyesinde anlamlı

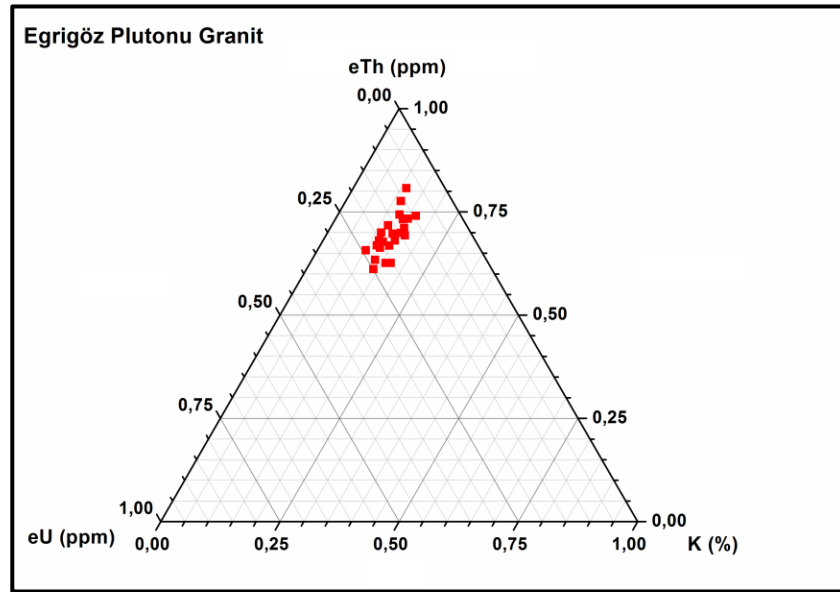
(Anomali gösteren E10/1 kodlu örnek istatistik dışı tutulmuştur.)

Eğrigöz granit plutonuna ait 23 adet granitik kayaç örneğinde elde edilen verilere uygulanan Spearman Korelasyon Analizi sonucunda ^{232}Th ile ^{226}Ra için anlamlılık değeri $p>0.05$ olduğundan ^{232}Th ile ^{226}Ra arasında anlamlı bir ilişki yoktur. ^{232}Th ile ^{40}K için elde edilen Spearman Korelasyon katsayısı $r=0.654$, $p<0.01$ ise ^{232}Th ile ^{40}K arasında pozitif orta düzeyde ilişkinin olduğunu gösterir. Bir başka deyişle, $r^2=0.654^2=0.43$ ^{232}Th ile ^{40}K %43 ilişkilidir de denilebilir.

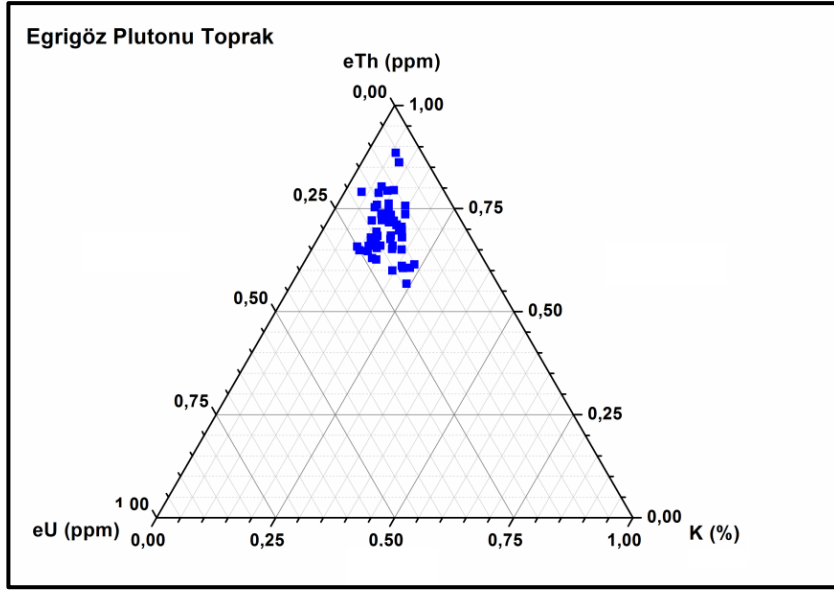
Eğrigöz plutonuna ait E10/1 kodlu toprak örneği anomali gösterdiği için istatistik dışında tutulmuştur. Geri kalan 53 toprak örneğinde elde edilen doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonları arasındaki ilişki Pearson Korelasyonu ile

incelenmiştir. Buna göre, ^{232}Th ile ^{226}Ra arasında bulunan Pearson Korelasyon katsayısı $r=0.529$, $p<0.01$ ^{232}Th ile ^{226}Ra arasında %28 pozitif orta düzeyde ilişki olduğunu gösterir. ^{232}Th ile ^{40}K için ise elde edilen Pearson Korelasyon katsayısı $r=0.439$, $p<0.01$ ^{232}Th ile ^{40}K arasında %19 pozitif zayıf bir ilişkinin olduğunu gösterir.

Ayrıca, Eğrigöz plutonu kayaç ve toprak örneklerinde Th/U ve Th/K konsantrasyon oranları arasındaki ilişkiyi gösteren üçgen grafikler Şekil 4.35 ve Şekil 4.36'da verilmiştir. Şekil 4.35'te görüldüğü gibi, granitik kayaç örnekleri için Th/U oranı 4.56 ortalama ile 2.46-9.94 arasında; Th/K oranı ise 5.18 ortalama ile 3.70-7.24 arasında değişmiştir. Clark et al., granitik kayaçlarda Th/U oranını 4; Th/K oranını ise 4.5 olarak belirtmiştir (Clark et al., 1966). Toprak örnekleri için Th/U oranı 4.80 (2.60-16.12) ve Th/K oranı 6.16 (2.36-22.38)'dir (Şekil 4.36). Bu sonuçlar, Eğrigöz plutonunda toprak-ana kayaç arasındaki litolojik ilişkiyi açıklarken toryumun zenginleştiğini ve gama radyasyonunun baskın kaynağı olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 4.35 Eğrigöz plutonu granit kayaçlarda eU, eTh ve K ilişkisini gösteren üçgen grafik.



Şekil 4.36 Eğrigöz plutonu toprak örneklerinde eU, eTh ve K ilişkisini gösteren üçgen grafik
(** Anomali gösteren E10/1 kodlu örnek istatistik dışı tutulmuştur).

4.4.2 Varyans analizi (ANOVA-MANOVA)

Varyans analizi iki ya da daha fazla ortalama arasında fark olup olmadığı ile ilgili hipotezi test etmek için kullanılır.

Varyans analizinde H_0 hipotezi, bütün popülasyonların (doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonları) ortalamalarının eşit olduğu şeklindedir.

$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots = \mu_n$ Yani ortalamalar arasında fark yoktur.

H_1 : Ortalamalardan en az ikisi arasında anlamlı fark vardır.

İki ve daha fazla ($g \geq 2$) bağımsız gruplarda çok değişkenli normal dağılım gösteren popülasyonlara ilişkin kurulan hipotezlerin test edilmesinde Tek Yönlü Çok Değişkenli Varyans Analizi (TYMANOVA) kullanılır (Özdamar, 2004). Tek yönlü MANOVA bağımlı değişkenleri beraber değerlendirerek bağımsız değişkendeki gruplar arasında fark olup olmadığını test eder.

Tek Yönlü Çok Değişkenli Varyans Analizi'nin (TYMANOVA) temel varsayımları şunlardır:

- Her bir grup normal dağılımdan gelir.
- Grupların varyansları homojendir.
- Gruplardaki bağımlı değişkenlerin kovaryans matrisleri eşittir.

Orhaneli, Çataldağ ve Eğrigöz granit plutonlarına ait granitik kayalar örneklerinin ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktiviteleri belirlenmiştir. Bu temel varsayımlar dikkate alındığında, plutonlara göre ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktivitelerinin ortalama vektörleri arasında önemli bir fark olup olmadığı incelendiğinde:

H_0 : ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K ortalama vektörleri arasında fark yoktur.

H_1 : ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K ortalama vektörleri arasında fark vardır.

Orhaneli, Çataldağ ve Eğrigöz granit plutonlarına ait granitik kayalar için elde edilen ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktivite konsantrasyonlarına ait frekans dağılımlarının normal dağılıma uyduğu 4.1 *Radyolojik Gözlem* başlığı altında verilen tanımlayıcı istatistik ve Kolmogorov-Smirnov normalite testi sonuçları ile belirtilmiştir.

Kovaryans matrislerinin eşitliği testinde anlamlılık değeri $p=0.000$ bulunmuştur ve $p<0.05$ olduğundan grup kovaryans matrisleri eşit değildir. Tek yönlü MANOVA sonuçları plutonlara göre ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K ortalamalarının önemliliği analizi için kullanılamaz. Bu nedenle, bağımlı değişkenlerin birlikte değerlendirildiği tek yönlü MANOVA yerine bağımlı değişkenlerin tek tek ele alındığı tek yönlü varyans analizi (TYANOVA) kullanmak daha uygundur. Bu analizde kurulan hipotez yukarıdaki ile aynı olmakla beraber, ANOVA'nın temel varsayımları şunlardır:

- Her bir grup normal dağılımdan gelir.
- Grupların varyansları homojendir.

Her bir grubun normal dağılımdan geldiği yani birinci varsayımın sağlandığı yukarıda belirtilmişti. Grup varyanslarının homojenliği varsayımı için homojenlik testi yapılmış ve Çizelge 4.13'te verilmiştir. Bu çizelgeye göre, doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonlarına ilişkin hata varyansları (^{226}Ra için $p=0.000$, ^{232}Th için $p=0.000$ ve ^{40}K için $p=0.001$) 0.05'ten küçük olduğundan değişkenlerin hata varyansları homojen değildir. Analiz yapılırken eşit varyansların sağlandığı durumlarda kullanmak üzere Tukey testi, eşit varyansların sağlanmadığı durumlarda kullanmak için ise Tamhane's T^2 testi seçilir. O halde analiz yapılırken varyansların eşitliği şartı sağlanmadığından Tamhane's T^2 sonuçları kullanılmalıdır.

Çizelge 4.13 Varyansların homojenliği testi.

	Levene İstatistik	df1	df2	Sig.
²³² Th (Bq/kg)	11.462	2	70	.000
²²⁶ Ra (Bq/kg)	10.511	2	70	.000
⁴⁰ K (Bq/kg)	7.369	2	70	.001

ANOVA tablosu plutonlar arasında doğal radyonüklit konsantrasyonları bakımından bir farklılığın olup olmadığını test etmektedir (Çizelge 4.14). Buradaki p değeri (Sig.) 0.05'ten küçükse H_0 hipotezi reddedilir. ²²⁶Ra, ²³²Th ve ⁴⁰K için p değerleri <0.05'tir. Yani, ²²⁶Ra, ²³²Th ve ⁴⁰K aktivitelerine göre gruplar arasında bir farklılık vardır. Hangi gruplar arasında farklılığın olduğu çoklu karşılaştırma tabloları ile belirlenebilir (Çizelge 4.15).

Çizelge 4.14 Varyans analizi tablosu.

ANOVA						
		Kareler toplamı	df	Ortalamanın karesi	F	Sig.
²³² Th (Bq/kg)	Gruplar arasında	21639.702	2	10819.851	34.585	.000
	Gruplar içinde	21899.392	70	312.848		
	Toplam	43539.094	72			
²²⁶ Ra (Bq/kg)	Gruplar arasında	14672.817	2	7336.408	22.849	.000
	Gruplar içinde	22475.467	70	321.078		
	Toplam	37148.284	72			
⁴⁰ K (Bq/kg)	Gruplar arasında	4017867.896	2	2008933.948	90.836	.000
	Gruplar içinde	1548125.690	70	22116.081		
	Toplam	5565993.586	72			

Çoklu karşılaştırma tablosunda, ²³²Th ve ⁴⁰K için anlamlılık değerleri tüm plutonlar için $p < 0.05$ olduğundan, plutonların ²³²Th ve ⁴⁰K aktiviteleri bakımından farkları anlamlıdır. Çizelge 4.15'te ortalamalar arasındaki fark sütunundan detaylı bir şekilde incelenebilir.

Çizelge 4.15 Çoklu karşılaştırma tablosu.

Çoklu Karşılaştırma							
Bağımlı Değişken	(I)	(J)	(I-J)	Standart	Sig.	95% Güven Aralığı	
	Plutonlar	Plutonlar	Ortalama Farkları	Hata		Alt Sınır	Üst Sınır
²³² Th (Bq/kg)	Orhaneli	Çataldağ	-21.2739*	4.3113	.000	-32.161	-10.387
		Eğrigöz	-43.8463*	4.1731	.000	-54.516	-33.177
	Çataldağ	Orhaneli	21.2739*	4.3113	.000	10.387	32.161
		Eğrigöz	-22.5724*	5.7958	.001	-36.902	-8.242
	Eğrigöz	Orhaneli	43.8463*	4.1731	.000	33.177	54.516
		Çataldağ	22.5724*	5.7958	.001	8.242	36.902
²²⁶ Ra (Bq/kg)	Orhaneli	Çataldağ	-31.9987*	4.5954	.000	-43.579	-20.419
		Eğrigöz	-29.3495*	3.9589	.000	-39.413	-19.286
	Çataldağ	Orhaneli	31.9987*	4.5954	.000	20.419	43.579
		Eğrigöz	2.6492	5.7654	.956	-11.605	16.904
	Eğrigöz	Orhaneli	29.3495*	3.9589	.000	19.286	39.413
		Çataldağ	-2.6492	5.7654	.956	-16.904	11.605
⁴⁰ K (Bq/kg)	Orhaneli	Çataldağ	-258.3403*	38.1571	.000	-353.202	-163.479
		Eğrigöz	-595.0630*	38.3440	.000	-691.188	-498.938
	Çataldağ	Orhaneli	258.3403*	38.1571	.000	163.479	353.202
		Eğrigöz	-336.7227*	46.7428	.000	-452.324	-221.121
	Eğrigöz	Orhaneli	595.0630*	38.3440	.000	498.938	691.188
		Çataldağ	336.7227*	46.7428	.000	221.121	452.324

* Ortalama farkları 0.05 düzeyinde anlamlıdır.

²²⁶Ra için ise Çataldağ ve Eğrigöz plutonları için $p=0.956$ yani $p>0.05$ 'tir. Yani bu iki pluton için ²²⁶Ra aktiviteleri bakımından önemli bir fark yoktur. Bu sonuç, Orhaneli plutonunun Eosen yaşlı, Çataldağ ve Eğrigöz plutonlarının Miyosen yaşlı oldukları göz önüne alındığında, jeolojik öngörümüzle uyuşan, radyometrik ölçümlerimizi destekleyen bir sonuçtur.

²³²Th ve ⁴⁰K için, her iki bağımlı değişkende, pluton faktörünün ²³²Th ve ⁴⁰K aktivitelerine göre ortalama farklılıkları olduğu için, her iki değişkende de oluşturulan alt gruplar bağımsız değişkendeki grup sayısı kadar olmuştur. ²²⁶Ra için ise, Çataldağ ve Eğrigöz plutonları arasındaki fark anlamlı olmadığından ikisi bir alt grup, Orhaneli ise tek başına bir alt grup olmuştur (Çizelge 4.16).

Çizelge 4.16 Bağımlı değişkenlere göre oluşturulmuş alt gruplar.

	Plutonlar	N	Alt Gruplar		
			1	2	3
²³² Th (Bq/kg)	Orhaneli	22	32.119		
	Çataldağ	28		53.393	
	Eğrigöz	23			75.965
²²⁶ Ra (Bq/kg)	Orhaneli	22	26.055		
	Çataldağ	28		58.054	
	Eğrigöz	23		55.404	
⁴⁰ K (Bq/kg)	Orhaneli	22	515.424		
	Çataldağ	28		773.764	
	Eğrigöz	23			1110.487

4.4.3 Kümeleme analizi

Kümeleme Analizi, bir veri matrisinde yer alan ve doğal gruplamaları kesin olarak bilinmeyen birimleri, değişkenleri ya da birim ve değişkenleri birbirleri ile benzer olan alt kümelere (grup, sınıf) ayırmaya yardımcı olan yöntemler topluluğudur (Özdamar, 2004).

Kümeleme analizi; birimleri, değişkenler arası benzerlik ya da farklılıklara dayalı olarak hesaplanan bazı ölçülerden yararlanarak homojen gruplara bölmek, belirli prototipler tanımlamak amacıyla kullanılır (Özdamar, 2004).

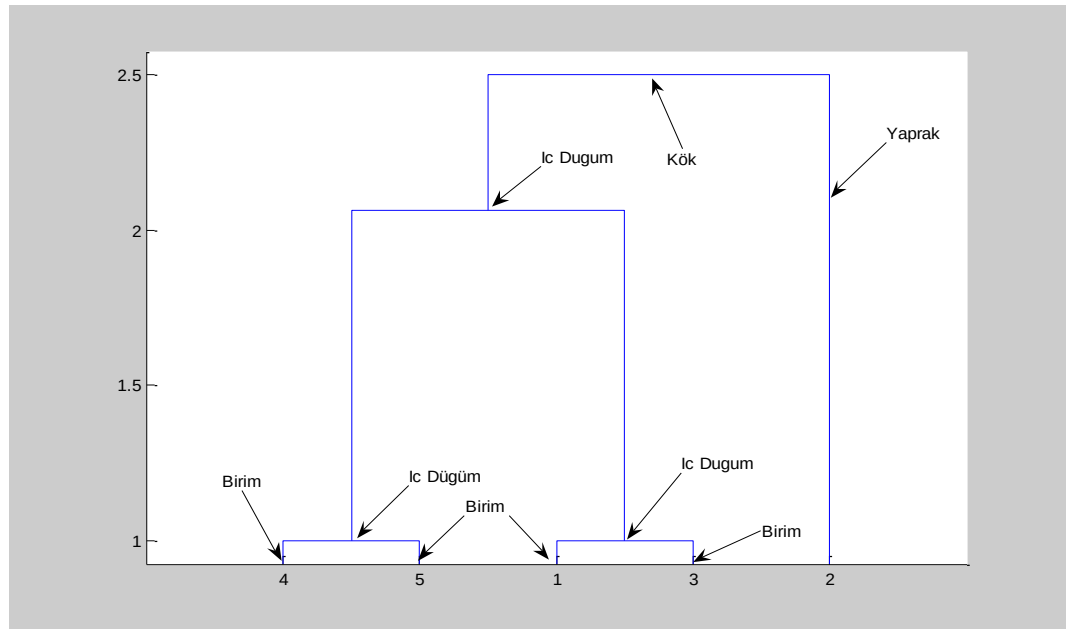
Kümeleme yöntemleri; uzaklık matrisi ya da benzerlik matrisinden yararlanarak birimler ya da değişkenleri kendi içinde homojen ve kendi aralarında heterojen uygun gruplara ayırırken, grupları belirlemede izledikleri yaklaşıma göre iki temel gruba ayrılırlar. Bunlar;

1. Aşamalı kümeleme yöntemleri (Hierarchical Cluster Analysis Methods)
2. Aşamalı olmayan kümeleme yöntemleri (Nonhierarchical Cluster Analysis Methods)

Veri matrisindeki birimlerin, ya da değişkenlerin başlangıç aşamasında kaç küme oluşturduğuna ve küme elemanlarını belirlemede başlangıçta hangi kriterin seçildiğine göre aşamalı yöntemler iki ana gruba ayrılır.

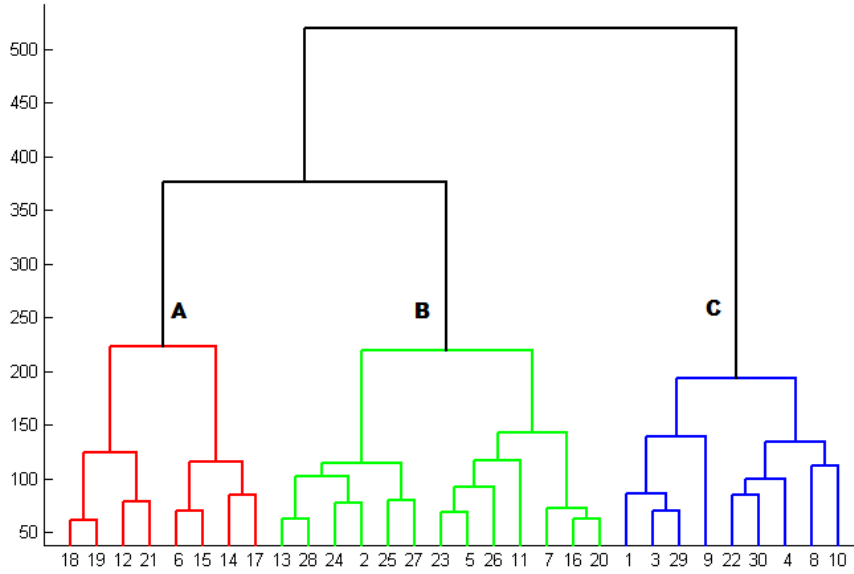
1. Ayırıcı aşamalı kümeleme yöntemleri
2. Birleştirici aşamalı kümeleme yöntemleri

Birleştirici aşamalı kümeleme yönteminde, her birim başlangıçta tek başına birer küme kabul edilir. Daha sonra birbirleri ile yüksek derecede benzerlik gösteren iki birim bir küme oluşturur ve bu kümeye değişik benzerlik düzeylerinde diğer birimler eklenerek birimlerin tümü bir kümede toplanacak biçimde birbirleri ile birleştirilirler. Bağlantılar, uzaklıklar ve birimlerin bağlanma düzeyleri *dendrogram* adı verilen *ağaç grafiği* ile gösterilir. Bir dendrogramın yapısı kök, iç düğüm ve yapraklardan oluşur (Şekil 4.37). Dendrogram kökü tüm birimlerin bir araya gelmesiyle oluşan ana kümeyi içerir. Dendrogramın yapraklarıysa bir araya getirilmeyen tek bir birimden oluşan kümeleri içerir. Dendrogramın iç düğümleri (küme) ise, birimlerin bir araya gelerek oluşturdukları kümeyi gösterir.



Şekil 4.37 Bir dendrogramın yapısı (İ. Yıldız Teknik Ü. Ders notu, 2013).

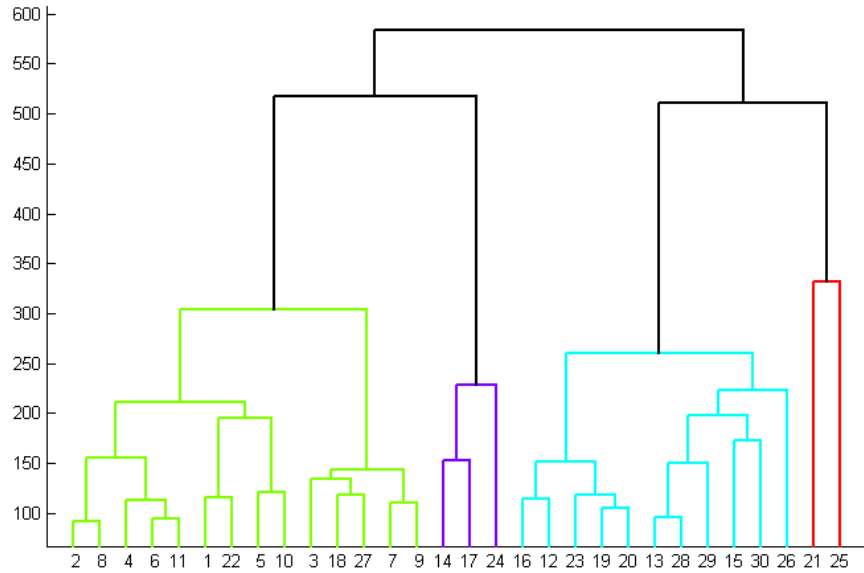
Bu tez kapsamında toplam 73 granitik kayaç örneğinin (^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K) doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonları belirlenmiştir. Bu örneklerin kaç kümeye ayrılacağı Şekil 4.38’de verilen dendrogram grafik ile incelenmiştir.



Şekil 4.38 Granit örneklerinin ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktivite konsantrasyonlarına göre kümelenmesini gösteren dendrogram.

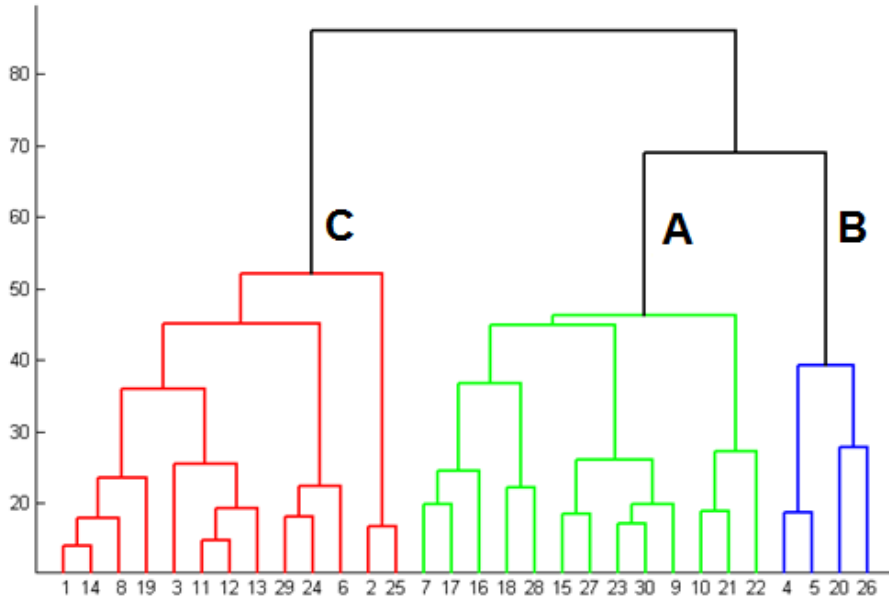
Şekil 4.38’den görüldüğü gibi granit örnekleri ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktivite konsantrasyonlarına göre 3 ayrı kümeye ayrılmışlardır. A kümesinin Eğrigöz, B kümesinin Çataldağ ve C kümesinin Orhaneli plutonlarını temsil ettiği göz önüne alındığında bu kümelerden A ve B kümelerinin kendi arasında ilişkili olduğu görülmektedir. Bu ilişki varyans analizi ile elde edilen sonuçları destekleyecek şekilde Eğrigöz ve Çataldağ granit plutonlarının aynı döneme (miyosen) ait olduğunu göstermektedir. Farklı bir yaprak olarak diğerlerinden ayrılan C kümesi (Orhaneli granit plutonu) ise daha farklı bir döneme (eosen dönem) aittir. Ulaşılan bu sonuç jeolojik öngörü, radyometrik sonuçları ve diğer istatistiksel analizleri desteklemektedir.

Bu tez kapsamında toplam 154 toprak örneğinin (^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K) doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonları belirlenmiştir. Bu örneklerin kaç kümeye ayrılabilceği Şekil 4.39’de verilen dendrogram grafik ile incelenmiştir.



Şekil 4.39 Toprak örneklerinin ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktivite konsantrasyonlarına göre kümelenmesini gösteren dendrogram.

Şekil 4.39’de verilen dendrogram grafiği ve kümeleme analizi sonuçlarına göre tüm örnekleri içeren iki farklı ana kümeden söz etmek mümkündür. Ancak 21, 25 gibi tek katılımlar doğru gruplamayı engellemektedir. Bunun nedeni topraktaki U ve Th konsantrasyonunun orijini granitik kayalar iken K konsantrasyonunun tarımsal çalışmalar ve topraktaki verimi artırmak için kullanılan suni gübrelerin potasyum ve azot içermesi nedeniyle topraktaki K konsantrasyonunun değişmesidir. Bu nedenle K değişkeninin analiz dışı bırakılıp dendrogramın Th ve Ra için yeniden değerlendirilmesi uygundur (Şekil 4.40).



Şekil 4.40 Toprak örneklerinin ^{226}Ra ve ^{232}Th aktivite konsantrasyonlarına göre kümelenmesini gösteren dendrogram.

Şekil 4.40’da görüldüğü gibi toprak örnekleri 2 ayrı ana grupta kümelenmiştir. A kümesinin Eğrigöz, B kümesinin Çataldağ ve C kümesinin Orhaneli plutonlarını temsil ettiği göz önüne alındığında A ve B kümelerinin kendi aralarında birbiriyle ilişkili olduğu açıktır. Orhaneli eocene yaşlı granit pluton iken diğer iki pluton miocene yaşlı granit plutonlardır. Bu sonuç granitik kayalar için yapılan kümeleme analizi sonuçlarını desteklenmektedir.

Sonuç olarak, granit ve toprak örnekleri için kümeleme analizi ile elde edilen sonuçlar jeolojik öngörüyü, radyometrik sonuçları ve diğer istatistiksel analizleri desteklemektedir.

5. SONUÇLAR

Çevresel radyoaktivite gözlem programı, halkı çevredeki radyoaktivite seviyeleri ve insanlar üzerindeki etkileri hakkında bilinçlendirmek ve gelecekte var olabilecek radyoaktif kontaminasyonu belirleyebilmek amacıyla rutin olarak yürütülmesi gereken sistematik çalışmalar bütünüdür. Bu program Avrupa ülkelerinde JRC'ye bağlı olarak REM grubu tarafından yürütülmektedir. Bu grup, Çernobil kazasından sonra Avrupa ^{137}Cs depozisyonu atlasının yayınlanmasının ardından, *Avrupa Doğal Radyasyon Atlası* oluşturmayı planlamaya başlamıştır. Avrupa Doğal Radyasyon Atlası'nın temel hedefi halka çevresindeki doğal radyoaktiviteyi tanıtmak, yüksek seviyeli doğal radyasyon alanlarını vurgulamak ve bilimsel bir veri tabanı sağlamaktır.

Radyolojik açıdan bakıldığında, karasal çevrede en önemli doğal radyonüklitler ^{232}Th , ^{238}U ve onu bozunum ürünü olan ^{222}Rn 'dir. Teknik olarak, karasal doğal radyonüklitleri haritalamanın en iyi yolu jeolojik kökenli radyasyonu kontrol eden temel faktörler olan bölgenin jeolojik/jeokimyasal yapısını ve tektonik özelliklerini dikkate alarak disiplinler arası bir çalışma ortaya çıkarmaktır.

Bu bağlamda, Batı Anadolu granit alanlarında jeolojik yapıya dayalı olarak yürütülen bu radyolojik gözlem programı çerçevesinde Orhaneli, Çataldağ ve Eğrigöz plutonlarında granit kayaçlarda ve yüzey topraklarında doğal radyonüklit (^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K) aktivite konsantrasyonları ve bu konsantrasyonlara dayalı olarak radyolojik risk parametreleri hesaplanmıştır. Jeojenik radon potansiyelini de değerlendirebilmek için yerinde anlık toprak gazı radon ölçülmüş ve topraktan ^{222}Rn salınım hızı hesaplanmıştır. Doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonları, doz dağılımları ve radon akısı jeostatistiksel yöntemlerle haritalanmış ve son olarak elde edilen veriler çok değişkenli istatistik analiz yöntemleri ile değerlendirilmiştir. Yerel jeolojik malzemenin bina materyali olarak kullanılması durumunda oluşabilecek radyolojik riski değerlendirmek üzere radyolojik zarar indeksleri (Ra_{eq} , H_{ex} ve H_{in}) ve diğer radyometrik sonuçlar UNSCEAR'de öngörülen referans değerler ile birlikte Çizelge 5.1'de özetlenmiştir.

Çizelge 5. 1 Plutonlara göre granit ve toprak örneklerinin radyometrik özellikleri.

		²²⁶ Ra (Bq kg ⁻¹)	²³² Th (Bq kg ⁻¹)	⁴⁰ K (Bq kg ⁻¹)	D (nGy h ⁻¹)	AED (μSv y ⁻¹)	Ra _(eq) (Bq kg ⁻¹)	H _(ex)	H _(in)	J _D (Bq m ⁻² s ⁻¹)
GRANİT	Orhaneli Granit Plutonu	15-38 (26)	23-42 (32)	217-748 (515)	35-65 (53)	43-79 (65)	76-137 (112)	0.21-0.37 (0.30)	0.27-0.46 (0.37)	-
	Çataldağ Granit Plutonu	21-115 (58)	14-103 (53)	450-1194 (774)	43-127 (91)	53-155 (112)	88-277 (194)	0.24-0.75 (0.52)	0.29-1.06 (0.68)	-
	Eğrigöz Granit Plutonu	28-95 (55)	50-122 (76)	782-1365 (1111)	91-158 (118)	112-193 (145)	191-337 (250)	0.52-0.91 (0.67)	0.61-1.14 (0.82)	-
	UNSCEAR 1993 (Normal granit)	20-120	20-80	600-1800	46-179	57-219	95-373	0.26-1.01	0.31-1.33	-
	UNSCEAR 1993 (Uranyum ve toryumca zengin granit)	100-500	40-350	1200-1800	120-517	148-635	250-1139	0.67-3.08	0.94-4.43	-
TOPRAK	Orhaneli Granit Plutonu	8-84 (33)	17-159 (50)	323-1409 (619)	39-189 (71)	48-232 (87)	81-410 (151)	0.20-1.11 (0.41)	0.30-1.30 (0.50)	0.005-0.065 (0.022)
	Çataldağ Granit Plutonu	4-130 (48)	5-114 (52)	54-1279 (667)	8-169 (81)	10-207 (99)	17-362 (173)	0.05-0.98 (0.47)	0.06-1.27 (0.60)	0.003-0.083 (0.030)
	Eğrigöz Granit Plutonu	7-84 (43)	11-174 (66)	149-1622 (853)	16-172 (95)	20-211 (117)	34-378 (203)	0.10-1.00 (0.55)	0.10-1.10 (0.67)	0.004-0.067 (0.030)
	UNSCEAR 2000 (Normal toprak)	17-60 (35)	11-64 (30)	140-850 (400)	10-200 (59)	(70)	< 370 ^a	< 1 ^b	< 1 ^b	0.016-0.026 (0.022) ^c

* Parantez içindeki değerler ortalama değerlerdir

^a UNSCEAR 1988^b UNSCEAR 1982^c UNSCEAR 1993

Granit kayaçlarda elde edilen doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonu ortalamaları ve tipik aralıkları sırasıyla, Orhaneli plutonu için ^{226}Ra 26 ± 1 (15-38) Bq kg⁻¹, ^{232}Th 32 ± 1 (23-42) Bq kg⁻¹ ve ^{40}K 515 ± 19 (217-748) Bq kg⁻¹; Çataldağ plutonu için ^{226}Ra 58 ± 4 (21-115) Bq kg⁻¹, ^{232}Th 53 ± 4 (14-103) Bq kg⁻¹ ve ^{40}K 774 ± 33 (450-1194) ve Eğrigöz plutonu için ^{226}Ra 55 ± 4 (28-95) Bq kg⁻¹; ^{232}Th 76 ± 4 (50-122) Bq kg⁻¹ ve ^{40}K 1111 ± 33 (782-1365) Bq kg⁻¹'dir. Bu doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonlarına dayalı olarak hesaplanan, bina dışı ortamda karasal gama radyasyonuna dışsal maruz kalma sonucu tahmin edilen doz hızı ortalamaları Orhaneli plutonunda 53 ± 2 nGy h⁻¹, Çataldağ plutonunda 91 ± 4 nGy h⁻¹ ve Eğrigöz plutonunda 118 ± 4 nGy h⁻¹ olarak hesaplanmıştır. Havada soğurulmuş toplam doz hızına doğal radyonüklitlerin katkıları ise Orhaneli plutonunda %23 ^{226}Ra , %36 ^{232}Th ve %41 ^{40}K ; Çataldağ plutonunda %30 ^{226}Ra , %35 ^{232}Th ve %35 ^{40}K ve Eğrigöz plutonunda %22 ^{226}Ra , %39 ^{232}Th ve %39 ^{40}K 'dir. Granit kayaçlar için elde edilen karasal gama doz hızları UNSCEAR tarafından önerilen maksimum dozlardan daha düşüktür (UNSCEAR, 1993).

Çizelge 5.1'den, granit kayaçlar için yıllık etkin doz eşdeğerinin Orhaneli plutonunda 65 ± 2 µSv y⁻¹ ortalama ile 43-79 µSv y⁻¹ aralığında; Çataldağ plutonunda 112 ± 5 µSv y⁻¹ ortalama ile 53-155 µSv y⁻¹ aralığında ve Eğrigöz plutonunda 145 ± 5 µSv y⁻¹ ortalama ile 112-193 µSv y⁻¹ aralığında olduğu görülmektedir. Diğer radyolojik risk parametreleri R_{eq} , H_{ex} ve H_{in} ise, sırasıyla, Orhaneli plutonu için 112 ± 3 (76-137) Bq kg⁻¹, 0.30 ± 0.01 (0.21-0.37) ve 0.37 ± 0.01 (0.27-0.46); Çataldağ plutonu için 194 ± 9 (88-277) Bq kg⁻¹, 0.52 ± 0.02 (0.24-0.75) ve 0.68 ± 0.03 (0.29-1.06) ve Eğrigöz plutonu için 250 ± 9 (191-337) Bq kg⁻¹, 0.67 ± 0.02 (0.52-0.91) ve 0.82 ± 0.03 (0.61-1.14) olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu değerler UNSCEAR 1993'te normal granitler için hesaplanan [R_{eq} (95-373 Bq kg⁻¹), H_{ex} (0.26-1.01) ve H_{in} (0.31-1.33)] aralıklar içinde yer almaktadır (UNSCEAR, 1993).

Toprak örnekleri için, Orhaneli plutonunda ^{226}Ra aktivite konsantrasyonu 33 ± 3 Bq kg⁻¹ ortalama ile 8-84 Bq kg⁻¹ arasında; ^{232}Th 50 ± 4 Bq kg⁻¹ ortalama ile 17-159 Bq kg⁻¹ arasında ve ^{40}K 619 ± 36 Bq kg⁻¹ ortalama ile 323-1409 Bq kg⁻¹ arasında; Çataldağ plutonunda ^{226}Ra aktivite konsantrasyonu 48 ± 4 Bq kg⁻¹ ortalama ile 4-130 Bq kg⁻¹ arasında; ^{232}Th 52 ± 4 Bq kg⁻¹ ortalama ile 5-114 Bq kg⁻¹ arasında ve ^{40}K 667 ± 33 Bq kg⁻¹ ortalama ile 54-1279 Bq kg⁻¹ arasında ve Eğrigöz plutonunda ^{226}Ra aktivite konsantrasyonu 43 ± 2 Bq kg⁻¹ ortalama ile 7-84 Bq kg⁻¹ arasında; ^{232}Th 66 ± 5 Bq kg⁻¹ ortalama ile 11-174 Bq kg⁻¹ arasında ve ^{40}K 853 ± 40 Bq kg⁻¹ ortalama ile 149-1622 Bq kg⁻¹ arasında değişmektedir. Topraklar

için elde edilen bu doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonlarına dayalı olarak, bina dışı ortamda karasal gama radyasyonuna dışsal maruz kalma sonucu tahmin edilen doz hızı ortalamaları Orhaneli plutonunda 71 ± 5 nGy h⁻¹, Çataldağ plutonunda 81 ± 5 nGy h⁻¹ ve Eğrigöz plutonunda 95 ± 5 nGy h⁻¹'tir. Bu doz hızlarına ²²⁶Ra, ²³²Th ve ⁴⁰K'nın katkıları, sırasıyla, Orhaneli plutonunda %21, %42 ve %37; Çataldağ plutonunda %27, %38 ve %35; Eğrigöz plutonunda ise %22, %41 ve %37 'dir. Çizelge 5.1'den de görüldüğü gibi, topraklar için elde edilen karasal gama doz hızları UNSCEAR tarafından önerilen maksimum dozlardan daha düşüktür (UNSCEAR, 2000).

Topraklar için hesaplanan yıllık etkin doz eşdeğerleri, Orhaneli, Çataldağ ve Eğrigöz plutonları için sırasıyla 87 ± 6 (48-232) μ Sv y⁻¹, 99 ± 6 (10-207) μ Sv y⁻¹ ve 117 ± 6 (20-211) μ Sv y⁻¹'dir. Diğer radyolojik risk parametreleri ise Orhaneli plutonu için R_{eq} 151 ± 11 (81-410) Bq kg⁻¹, H_{ex} 0.41 ± 0.03 (0.20-1.11) ve H_{in} 0.50 ± 0.04 (0.30-1.30); Çataldağ plutonu için R_{eq} 173 ± 10 (17-362) Bq kg⁻¹, H_{ex} 0.47 ± 0.03 (0.05-0.98) ve H_{in} 0.60 ± 0.04 (0.06-1.27) ve Eğrigöz plutonu için R_{eq} 203 ± 10 (34-378) Bq kg⁻¹, H_{ex} 0.55 ± 0.03 (0.10-1.10) ve H_{in} 0.67 ± 0.03 (0.10-1.10) olarak bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar UNSCEAR raporlarında tavsiye edilen değerler ile karşılaştırılabilir düzeydedir (UNSCEAR, 1982; UNSCEAR, 1988).

Çalışma alanlarında yerinde toprak gazı radon ölçümleri radyasyon seviyelerine ilişkin ön incelemenin yanı sıra gerek duyulabilecek ek örneklemeler için bir rehber olması amacıyla gerçekleştirilmiştir. Yerinde toprak gazı ortalamaları Orhaneli plutonunda 911 cp10m, Çataldağ plutonunda 902 cp10m ve Eğrigöz plutonunda 393 cp10m olarak ölçülmüştür. Çizelge 5.1'den görüldüğü gibi, doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonları ortalamaları bakımından Eğrigöz granit plutonunun Orhaneli granit plutonuna göre daha yüksek aktivite konsantrasyonlarına sahip olduğu belirlenmiş iken, yerinde toprak gazı ölçüm ortalamaları bakımından Orhaneli plutonunda Eğrigöz plutonuna göre daha yüksek anlık radon ölçümleri alınmıştır. Bu durum, toprak gazı radon konsantrasyonunun toprağın litolojik/jeolojik yapısının yanı sıra pedolojik parametrelere (toprağın geçirgenliği, nem içeriği, partikül boyutu vb.) bağlı olduğunun bir göstergesidir.

Topraklarda gözlenen ²²⁶Ra aktivitesine dayalı olarak yer seviyesinde radon salınımları (J_D) Bq m⁻² s⁻¹ olarak hesaplanmıştır. Elde edilen radon akısı ortalamaları Orhaneli plutonunda 0.022 Bq m⁻² s⁻¹; Çataldağ ve Eğrigöz

plutonlarında $0.030 \text{ Bq m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 'dir (Bkz. Çizelge 5.1). Normal backgroundlu alanlarda topraklar için radon akısı $J_D \approx 0.022 \text{ Bq m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ortalama ile $0.016\text{-}0.026 \text{ Bq m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ aralığında verilmektedir (UNSCEAR, 1993). Eosen yaşlı Orhaneli granit plutonu için hesaplanan radon akısı UNSCEAR 1993'te normal topraklar için verilen değerler ile uyumlu iken, beklenildiği gibi, daha genç yaşlı Miyosen döneme ait olan Çataldağ ve Eğrigöz plutonlarına ait radon akısı ortalamaları ise normal topraklara göre daha yüksektir.

İnceleme altındaki plutonlara ait doğal radyonüklit konsantrasyonu, karasal doğal radyasyondan kaynaklanan doz hızı ve radon salınım hızı dağılım haritaları jeoistatistik yöntemlerle ArcGIS 10.1 yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Geoistatistik, klasik istatistik yöntemlerinden farklı olarak örnekler arası ilişkiyi, örneklerin alındıkları koordinatları da hesaba katarak ele alan ve temelleri fonksiyonlar teorisindeki durağan rastlantı teorisine dayanan istatistiksel bir hesaplama metodudur. Bu yöntemle yorumlanmaları daha kolay olan her bir dağılım haritası tanımlayıcı istatistik sonuçlarıyla oldukça uyumlu bir şekilde görsel olarak elde edilmiştir.

Deneysel bir çalışmada elde edilen sonuçların doğru bir şekilde ortaya konulması elde verilerin uygun yöntemlerle analiz edilerek yorumlanmasına dayanmaktadır. Çok değişkenli (multivariate) istatistiksel analiz, incelenen olay ve çevresindeki çok sayıda içsel ve dışsal faktörleri dikkate alarak, problemi doğasındaki yapısına ilişkin bilgilere göre (gerçek oluşumuna göre) incelemek ve çözümlere ulaşmak için geliştirilmiş yöntemler bütünüdür (Özdamar, 2004). Bu doğrultuda, tez çalışması kapsamındaki bölge topraklarında ve kayaçlarında elde edilen radyometrik verilerin çok değişkenli istatistiksel analizleri Korelasyon Analizi (Pearson Korelasyonu ve Spearman Korelasyonu), Varyans Analizi (Tek Yönlü ANOVA) ve Kümeleme Analizi yöntemleri ile SPSS 13.0 ve/veya MATLAB yazılımları kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Korelasyon analizi ile elde edilen doğal radyonüklit konsantrasyonları arasında anlamlı bir ilişki olup olmadığı, varsa ilişkinin yönü ve büyüklüğü test edilerek Çizelge 5.2'de verilmiştir. Orhaneli plutonu toprak ve kayaç örneklerinde ^{232}Th ile ^{226}Ra arasında yüksek düzeyde, ^{232}Th ile ^{40}K arasında ise orta düzeyde ilişki gözlenirken, Çataldağ plutonunda ^{232}Th ile ^{226}Ra arasında granit kayaçlarda orta düzeyde topraklarda ise yüksek düzeyde ilişki bulunmuştur. Eğrigöz plutonunda ise granit kayaçlarda ^{232}Th ile ^{226}Ra arasında anlamlı bir korelasyon yok iken, topraklarda orta düzeyde korelasyon vardır. Topraklarda granit

kayaçlara göre daha yüksek düzeyde ilişkinin olması toryum ve uranyumun toprakta zenginleşmesiyle açıklanabilir. Çataldağ plutonu granit kayaçlarda ^{232}Th ile ^{40}K arasında anlamlı bir ilişki gözlenmezken topraklarda zayıf düzeyde ilişki bulunmuştur. Eğrigöz plutonunda ^{232}Th ile ^{40}K arasındaki korelasyon granit kayaçlarda orta düzeyde, topraklarda ise zayıf düzeydedir.

Çizelge 5.2 Korelasyon analizi sonuçları.

	Th/U		Th/K	
	Granit	Toprak	Granit	Toprak
Orhaneli	Yüksek (%63)	Yüksek (%52)	Orta (%39)	Orta (%41)
Çataldağ	Orta (%30)	Yüksek (%64)	Yok	Zayıf (%24)
Eğrigöz	Yok	Orta (%28)	Orta (%43)	Zayıf (%19)

Bu tez çalışması kapsamında Orhaneli, Çataldağ ve Eğrigöz plutonlarına ait granit kayaç ve topraklar için Th/U ve Th/K oranları Çizelge 5.3'te listelenmiştir. Asidik magmatik kayaçlar için Th/U oranı 4; Th/K oranı 4.5 olarak verilmiştir (Clark et al., 1966). Clark değerleri olarak anılan bu referans değerler ile bu çalışmada elde edilen sonuçlar (Th/U ve Th/K oranları, sırasıyla, Orhaneli plutonu için 3.88 ve 4.86; Çataldağ için 2.95 ve 5.68; Eğrigöz için 4.56 ve 5.18) karşılaştırıldığında her üç plutonda da toryumun kısmen zenginleşerek gama radyasyonunun baskın kaynağı olduğu görülmektedir. Bunun yanı sıra, diğer plutonlara göre Th/U oranının daha düşük, Th/K oranının daha yüksek olduğu Çataldağ plutonunda ise toryumun yanında uranyum da zenginleşmiştir. Ayrıca topraklar için bulunan korelasyonlar, toprağın jeolojik yapıyı oluşturan ana kayaçlardan türemiş olduğunu açıkça göstermektedir.

Çizelge 5.3 Granit ve topraklar için Th/U ve Th/K oranları.

	Th/U		Th/K	
	Granit	Toprak	Granit	Toprak
Orhaneli	3.88	4.84	4.86	5.94
Çataldağ	2.95	3.61	5.68	6.11
Eğrigöz	4.56	4.80	5.18	6.16

Çok değişkenli istatistik analiz yöntemlerinden varyans analizi plutonlarda elde edilen doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonları ortalamaları arasında anlamlı bir fark olup olmadığını test etmek için uygulanmıştır. Bu testin ilk

varsayımı her bir gruptaki verilerin normal dağılımdan geliyor olmasıdır. Orhaneli plutonu toprak örneklerinde elde edilen doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonu frekans dağılımları normal dağılıma uymamaktadır. Bu nedenle, varyans analizi sadece Orhaneli, Çataldağ ve Eğrigöz plutonlar granit örnekleri için gerçekleştirilmiş, plutonlara göre granit kayaçlardaki ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktivite konsantrasyonları arasında anlamlı bir fark olup olmadığı irdelenmiştir. Tek yönlü ANOVA testi sonucunda, ^{232}Th ve ^{40}K aktiviteleri açısından her bir plutonda anlamlı bir fark bulunurken, ^{226}Ra aktivitesi bakımından Çataldağ ve Eğrigöz plutonlarında anlamlı bir fark bulunmamıştır. Bu sonuç, bu çalışmada ^{226}Ra 'nın plutonları ayırt eden önemli bir radyometrik işaret olduğunu göstermektedir. Bu bulgunun mineralojik analizle desteklenmesi benzer çalışmalar için önerilir.

Uygulanan son istatistiksel yöntem olan kümeleme analizi ile elde edilen tüm verilerin doğal radyonüklit konsantrasyonlarına göre kaç anlamlı alt gruba ayrılabilceği incelenmiştir. Granit kayaçlar için elde edilen dendrogram grafikler ikisi kendi arasında yüksek ilişkili olan toplam üç gruba ayrılmıştır (Bkz. Şekil 4.38). Kendi arasında yüksek ilişkili gruplar Çataldağ ve Eğrigöz plutonlarına ait veriler bunlardan ayrılan diğer grup ise Orhaneli plutonuna ait verilerdir. Bu sonuç da hem yukarıdaki tek yönlü ANOVA sonuçlarını hem de jeolojik öngörüğü destekler niteliktedir. Tarımsal çalışmalar ve topraktaki verimi artırmak için kullanılan suni gübreler ^{40}K konsantrasyonunu etkilediğinden, toprak örnekleri için kümeleme analizi sadece ^{226}Ra ve ^{232}Th sonuçları için yapılmış ve granit kayaçlar ile uyumlu bulunmuştur (Bkz. Şekil 4.40). Jeolojik öngörüğü, radyometrik verileri ve diğer istatistiksel analizleri destekleyen bu sonuç ana materyal ve toprak arasındaki ilişkiyi açık bir şekilde ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, elde edilen radyometrik verilerle, Batı Anadolu'da yer alan granitoid alanların (Orhaneli, Çataldağ ve Eğrigöz Plutonları) doğal radyasyon seviyeleri ve karasal doz dağılımları haritalanmış ve bu plutonların radyolojik karakteristikleri çok değişkenli istatistik yöntemlerle incelenmiştir. Bu anlamda, bu doktora tez çalışması Türkiye Doğal Radyasyon haritası oluşturulmasında önemli bir radyometrik veri tabanı sağlamaktadır.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Agar, O., Boztosun, I. and Korkmaz, M.E.,** 2014, Measurement of radioactivity levels and assessment of radioactivity hazards of soil, *Radiation Protection Dosimetry*, 162(4), pp.630–637.
- Akay, E.,** 2009, Geology and petrology of the Simav Magmatic Complex (NW Anatolia) and its comparison with the Oligo-Miocene granitoids in NW Anatolia: Implications on tertiary tectonic evolution of the region, *International Journal of Earth Sciences*, 98(7), pp.1655–1675.
- Akgündüz, S., Duru, O. ve Elmas, A.,** 2015, KB Anadolu’da Eosen-Oligosen çarpışma sonrası magmatizma: Biga Yarımadası’ndaki Asartepe granitik ve Sarıkaya volkanik kayalarından jeokimyasal ve jeokronolojik veriler, *İstanbul Yerbilimleri Dergisi*, basım aşamasında.
- Albayrak, Ö.,** 2003, Eğrigöz Masifi kuzey ve batı kesimi (Tavşanlı / Kütahya) polimetalik cevherleşmelerinin jenetik incelemesi ve jeodinamik ortam koşullarının tanımlanması, Yüksek Lisans Tezi, DEÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Alnour, I. A., Wagiran, H., Ibrahim, N., Laili, Z., Omar, M., Hamzah, S. and Bello.Y. Idi,** 2012, Natural radioactivity measurements in the granite rock of quarry sites, Johor, Malaysia. *Radiation Physics and Chemistry*, 81(12), pp.1842–1847.
- Altunkaynak, Ş., Sunal, G., Aldanmaz, E., Genç, C. Ş., Dilek, Y., Furnes, H., Foland, K., Yang, J. and Yıldız, M.,** 2012a, Eocene Granitic Magmatism in NW Anatolia (Turkey) revisited: New implications from comparative zircon SHRIMP U–Pb and ⁴⁰Ar–³⁹Ar geochronology and isotope geochemistry on magma genesis and emplacement, *Lithos*, 155, pp.289–309.
- Altunkaynak, Ş., Dilek, Y., Genç, C. Ş., Sunal, G., Gertisser, R., Furnes, H., Foland, K. and Yang, J.,** 2012b, Spatial, temporal and geochemical evolution of Oligo–Miocene granitoid magmatism in western Anatolia, Turkey, *Gondwana Research*, 21(4), pp.961–986.
- Arafa, W.,** 2004, Specific activity and hazards of granite samples collected from the Eastern Desert of Egypt, *Journal of Environmental Radioactivity*, 75(3), pp.315–27.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Blagoeva, R. and Zikovsky, L.**, 1995, Geographic and vertical distribution of Cs-137 in soils in Canada, *Journal of Environmental Radioactivity*, 27(3), pp.269–274.
- Bossew, P., Cinelli, G., Hernández-Ceballos, M.A., Tollefsen, T., Tognoli, P.V., Nishev, A. and De Cort, M.**, 2015, Estimation of the terrestrial gamma ray component in Europe, *Third International Conference on Radiation and Applications in Various Fields of Research*, Book of abstract, in press.
- Boztuğ, D., Harlavan, Y., Jonckheere, R., Can, İ. and Sarı, R.**, 2009, Geochemistry and K-Ar cooling ages of the Ilıca, Çataldağ (Balıkesir) and Kozak (İzmir) granitoids, west Anatolia, Turkey, *Geological Journal*, 44(1), pp.79–103.
- Camgöz, Y.I. ve Yaprak, G.**, 2009, Küçük Menderes Havzası tarım topraklarında doğal radyonüklit seviyesinin belirlenmesi. *Ekoloji*, 19(70), pp.74–80.
- Canbaz, B.**, 2007, Ezine/Çanakkale granit alanının radyolojik risk açısından değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Canbaz, B., Çam, F., Yaprak, G. and Candan, O.**, 2010, Natural radioactivity (^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K) and assessment of radiological hazards in the Kestanbol Granitoid, Turkey, *Radiation Protection Dosimetry*, 141(2), pp.192–198.
- Canbaz Öztürk, B., Çam, N.F. and Yaprak, G.**, 2013, Reference levels of natural radioactivity and ^{137}Cs in and around the surface soils of Kestanbol pluton in Ezine region of Çanakkale province, Turkey, *Journal of Environmental Science and Health. Part A, Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering*, 48(12), pp.1522–32.
- Canbaz Öztürk, B., Yaprak, G., Çam, N.F. and Candan, O.**, 2015, A radiological survey of the Eğrigöz Granitoid, Western Anatolia/Turkey, *Radiation Protection Dosimetry*, 164(4), pp.510-518.
- Candan, O., Çetinkaplan, M., Oberhänsli, R., Rimmelé, G. and Akal, C.**, 2005, Alpine high-P/low-T metamorphism of the Afyon Zone and implications for the metamorphic evolution of Western Anatolia, Turkey. *Lithos*, 84(1-2), pp.102–124.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Clark, S.P., Peterman, Z.K. and Heier, K.S.,** 1966, Abundances of uranium, thorium and potassium, In: Handbook of Physical Constants, Clark, S.P., Ed. *Geol. Soc. Amer. Mem.*, pp. 521–541.
- Currie, L.A.,** 1968, Limits for qualitative detection and quantitative determination, *Anal. Chem.*, 40(3), pp.586–593.
- Çam, N.F., Özken, İ. and Yaprak, G.,** 2013, A survey of natural radiation levels in soils and rocks from Aliaga-Foça region in Izmir, Turkey, *Radiation Protection Dosimetry*, 155(2), pp.169–180.
- Delibaş, O., Parlak, O., Pekdemir, F. ve Baran, C.,** 2012, Pınarbaşı Granitoidi (Gediz-Kütahya) Mo-Cu , Pb-Zn ve Sb ± Ag cevherleşmeleri: Polimetallik cevherleşmelere Orta-Batı Anadolu'dan bir örnek, *Yerbilimleri*, 33(2), pp.151–176.
- DEÜ, Jeofizik Bilgi Bankası,** 2015, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, <http://www.deu.edu.tr/DEUWeb/Icerik/Icerik.php?KOD=2184>
(Erişim Tarihi: 01.01.2015)
- Dubois, G., Bossew, P., Tollefsen, T. and De Cort, M.,** 2010, First steps towards a European atlas of natural radiation: Status of the European indoor radon map, *Journal of Environmental Radioactivity*, 101(10), pp.786–798.
- Dursun, G.,** 2014, Yüksek seviyeli doğal radyasyon alanlarında atmosferik ²¹⁰Po depozisyonunun likenlerle izlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- El-Arabi, A.M.,** 2007, ²²⁶Ra, ²³²Th and ⁴⁰K concentrations in igneous rocks from eastern desert, Egypt and its radiological implications, *Radiation Measurements*, 42(1), pp.94–100.
- Ercan, T., Ergül, E., Akçören, F., Çetin, A., Granit, S. ve Asutay, J.,** 1990, Balıkesir-Bandırma arasının jeolojisi, tersiyer volkanizmasının petrolojisi ve bölgesel yayılımı, *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, 110, pp.113–130.
- Erginal, A.E. ve Ertek, A.,** 2008, Orhaneli Plütonunun bazı jeomorfolojik özellikleri: Denüdasyon tarihi konusunda göstergeler, *MTA Dergisi*, 137, pp.79–89.
- Genç, Ş.C. ve Altunkaynak, Ş.,** 2007, Eybek graniti (Biga yarımadası, KB Anadolu) üzerine: Yeni jeokimya verileri ışığında yeni bir değerlendirme, *Yerbilimleri*, 28(2), pp.75–98.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Gruber, V., Tollefsen, T. and De Cort, M.,** 2012, On the way to a European Atlas of Natural Radiation, *III. Terrestrial Radioisotopes in Environment International Conference on Environmental Protection*, Available at: <http://rri.vein.hu/conferences/terrestrial/2012/index.html>. (Accessed May 19, 2015)
- Harb, S., Abbady, A. E., El-Kamel, A., Saleh, I. I. and El-Mageed, A. I. A.,** 2012, Natural radioactivity and their radiological effects for different types of rocks from Egypt, *Radiation Physics and Chemistry*, 81(3), pp.221–225.
- Harris, N.B.W., Kelley, S. and Okay, A.I.,** 1994, Post-collision magmatism and tectonics in northwest Anatolia, *Contrib Mineral Petrol*, 117, pp.241–252.
- Hasözbek, A., Akay, E., Erdoğan, B., Satır, M. and Siebel, W.,** 2010, Early Miocene granite formation by detachment tectonics or not? A case study from the northern Menderes Massif (Western Turkey), *Journal of Geodynamics*, 50(2), pp.67–80.
- IAEA,** 1979, Gamma-Ray surveys in uranium exploration, *Technical Report Series*, No.186 (IAEA, 1979, Vienna).
- Isik, V., Tekeli, O. and Seyitoglu, G.,** 2004, The $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age of extensional ductile deformation and granitoid intrusion in the northern Menderes core complex: Implications for the initiation of extensional tectonics in western Turkey, *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(4), pp.555–566.
- İstanbul Yıldız Teknik Üniversitesi,** 2013, www.ist.yildiz.edu.tr/dersler/dersnotu/Kum-Analiz.doc (Erişim tarihi: 08.11.2013).
- JRC/REM,** 2015, Joint Research Centre. Institute for Transuranium Elements. Available at: <http://rem.jrc.ec.europa.eu/RemWeb/activities/Remdb.aspx> (Accessed May 19, 2015).
- Kam, E., Yazar, Y. and Bozkurt, A.,** 2010, A study of background radioactivity level for Tekirdağ, Turkey, *Radiation Protection Dosimetry*, 138(1), pp.40–44.
- Karacık, Z., Yılmaz, Y., Pearce, J. and Ece, Ö.I.,** 2008, Petrochemistry of the south Marmara granitoids, northwest Anatolia, Turkey. *International Journal of Earth Sciences*, 97(6), pp.1181–1200.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Karadeniz, Ö., Çıyrak, N., Yaprak, G. and Akal, C.,** 2011, Terrestrial gamma exposure in the granodiorite area of Bergama (Pergamon)–Kozak, Turkey. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 288(3), pp.919–926.
- Kolay, E.,** 1998, Topuk Köyü (Orhaneli-Bursa) Çevresindeki Cevherleşmenin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi fen Bilimleri Enstitüsü.
- Köprübaşı, N. and Aldanmaz, E.,** 2004, Geochemical constraints on the petrogenesis of Cenozoic I-type granitoids in Northwest Anatolia, Turkey: Evidence for magma generation by lithospheric delamination in a post-collisional setting, *International Geology Review*, 46(8), pp.705–729.
- MTA,** 2015, Jeoloji Haritaları, <http://www.mta.gov.tr/v2.0/daire-baskanliklari/jed/index.php?id=jeoloji> (Erişim Tarihi: 26.05.2015).
- NCRP,** 1975, External Natural Background Radiation in the United States, NCRP Report No. 45, National Council on Radiation Protection and Measurements, 7910 Woodmont Ave., Bethesda, Maryland.
- Okay, A.I., Demirbağ, E., Kurt, H., Okay, N. and Kuşçu, İ.,** 1999, An active, deep marine strike-slip basin along the North Anatolian fault in Turkey, *Tectonics*, 18(1), pp.129–147.
- Okay, A., Harris, N. and Kelley, S.,** 1998, Exhumation of blueschists along a Tethyan suture in northwest Turkey, *Tectonophysics*, 285, pp.275–299.
- Okay, A. and Satır, M.,** 2006, Geochronology of Eocene plutonism and metamorphism in northwest Turkey: Evidence for a possible magmatic arc, *Goedinitica Acta*, 19(5), pp.251–265.
- Okay, A. and Tüysüz, O.,** 1999, Tethyan sutures of northern Turkey, *Geological Society, London, Special Publications*, 156(1), pp.475–515.
- Orhan, A. ve Mutlu, H.,** 2009, Susurluk (Balıkesir) skarn yatağının mineralojik ve petrografik özellikleri, *Eskişehir OGU Müh. Mim. Fak. Dergisi*, 22(2), pp.65–90.
- Osmanhoğlu, A.E.,** 2006, Natural radioactivity and evaluation of effective dose equivalent of granites in Turkey, *Radiation Protection Dosimetry*, 121(3), pp.325–9.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Otansev, P., Karahan, G., Kam, E., Barut, I. and Taskin, H.,** 2012, Assessment of natural radioactivity concentrations and gamma dose rate levels in Kayseri, Turkey, *Radiation Protection Dosimetry*, 148(2), pp.227–236.
- Örgün, Y., Altınsoy, N., Gültekin, H., Karahan, G. and Çelebi, N.,** 2005, Natural radioactivity levels in granitic plutons and groundwaters in Southeast part of Eskisehir, Turkey, *Applied radiation and isotope: including data, instrumentation and methods for use in agriculture, industry and medicine*, 63(2), pp.267–75.
- Örgün, Y., Şahin, S.Y., Altınsoy, N., Güngör, Y. Balcı, N.Ç. ve Erarslan, C.,** 2009, 62. Türkiye Jeoloji Kurultayı, 13–17 Nisan 2009, MTA – Ankara.
- Özdamar, K.,** 2004, Paket programlar ile istatistiksel veri analizi (Çok değişkenli analizler) 25. Baskı, Kaan Kitabevi, Eskişehir.
- Özgenç, I. and İlbeyli, N.,** 2008, Petrogenesis of the late cenozoic Egrigöz Pluton in Western Anatolia, Turkey: Implications for magma genesis and crustal processes, *International Geology Review*, 50(4), pp.375–391.
- Özken, İ.,** 2011, Aliğa-İzmir çevresinde doğal radyoaktivite düzeyinin belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Özmen, S.F., Boztosun, I., Yavuz, M. and Tunc, M.R.,** 2014, Determination of gamma radioactivity levels and associated dose rates of soil samples of the Akkuyu/Mersin using high-resolution gamma-ray, *Radiation Protection Dosimetry*, 158(4), pp.461–465.
- Papadopoulos, A., Christofides, G., Koroneos, A., Papadopoulou, L., Papastefanou, C. and Stoulos, S.,** 2013, Natural radioactivity and radiation index of the major plutonic bodies in Greece, *Journal of Environmental Radioactivity*, 124, pp.227–38.
- Ring, U. and Collins, A.S.,** 2005, U–Pb SIMS dating of synkinematic granites: timing of core-complex formation in the northern Anatolide belt of western Turkey, *Journal of the Geological Society*, 162, pp.289–298.
- Sapancı, Ö., Çelebi, D. ve Köprübaşı, N.,** 2012, Çataldağ (Balıkesir) granitoidinin petrografik ve jeokimyasal özellikleri, *Uygulamalı Yer Bilimleri*, 1-2, pp.10–29.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Sohrabi, M.**, 1998, The state-of-the-art on worldwide studies in some environments with elevated naturally occurring radioactive materials (NORM), *Applied Radiation and isotopes*, 49(3).
- Tufan, M.Ç. and Bostancı, S.**, 2012, Radioactivity concentrations in soil and dose assessment for Samsun city centre , Turkey, *Radiation Protection Dosimetry*, 151(3), pp.532–536.
- UNSCEAR**, 1982, Ionizing Radiation: Sources and Biological Effects, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, United Nations, New York.
- UNSCEAR**, 1988, Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, United Nations, New York.
- UNSCEAR**, 1993, Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, United Nations, New York.
- UNSCEAR**, 2000, Exposures from natural radiation sources, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, United Nations, New York.
- U.S. Geological Survey**, 2015, United States geological survey webpage, <http://pubs.usgs.gov/of/2004/1050/PalosVerdesRn.htm#uranium.htm>, (Erişim tarihi: 01.06.2015)
- Yaprak, G.**, 1995, Radyoaktif mineral içeren örneklerin gama spektroskopik analizlerinde matris etkisi ve self absorpsiyon için bir düzeltme yönteminin geliştirilmesi, Doktora Tezi, E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Yaprak, G. and Aslani, M.A.A.**, 2010, External dose-rates for natural gamma emitters in soils from an agricultural land in West Anatolia, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 283(2), pp.279–287.
- Yeşilkanat, C.M., Kobya, Y., Taşkin, H. ve Çevik, U.**, 2014, Jeostatistik tahmin ve simulasyon yöntemleri ile Artvin ilindeki doğal kaynak suları için toplam alfa ve toplam betanın ara değer modellenmesi ve haritalanması. Cumhuriyet Üniversitesi Fen Fakültesi Fen Bilimleri Dergisi (CFD), 35(4), pp.11–35.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- YILMAZ, Y.**, 1995, Ege Bölgesinde genç magmatizmanın oluşumu ile Litosferin evrimi arasındaki ilişki üzerine düşünceler, *Jeofizik*, 9-10, pp.107–110.
- Yüksel, F.A.**, 2005, Batı Anadolu bouguer gravite anomalilerinin süzgeçlenmesi ve yerkabuğu kalınlık dağılımının incelenmesi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 11(1), pp.1–13.

ÖZGEÇMİŞ

14.09.1981 tarihinde Polatlı'da doğmuştur. T.C. vatandaşıdır. İlköğrenimini Sakarya İlkokulu'nda, orta öğrenimini Cumhuriyet Orta Okulu'nda, lise öğrenimini ise Polatlı Yabancı Dil Ağırlıklı Lisesi'nde tamamlamıştır. 1999-2004 yıllarında Ege Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü'nde lisans, 2004-2007 yıllarında Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Nükleer Fizik Bilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimi alarak mezun olmuştur. 09.11.2005 tarihinden beri Ege Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.

EKLER

Ek 1 Jeolojik Zaman Çizelgesi

Ek 1 Jeolojik Zaman Çizelgesi (DEU, Jeofizik Bilgi Bankası, 2015).

ÜST ZAMAN	ZAMAN	DEVİR	DEVRE	MİLYON YIL		
FANEREZÖYİK	SENOZÖYİK	KUVATERNER	HOLOSEN	0.8		
			PLEYİSTOSEN	1.8		
		TERSİYER	NEOJEN	PLİYÖSEN	5	
			PALAÖJEN	MİYÖSEN	25	
				OLİGÖSEN	40	
		EOSEN		55		
		PALEÖSEN		65		
		MESOZÖYİK	KRETASE	ÜST	100	
	ALT			140		
	JURA		MALM	160		
			DOGGER	180		
			LİYAS	200		
	TRİAS		ÜST			
			ORTA			
			ALT	230		
	PALEOZÖYİK	PERMİYEN	ÜST			
			ALT	280		
		KARBONİFER	ÜST			
			ALT	350		
		DEVONİYEN	ÜST			
			ORTA			
			ALT	400		
		SİLÜRİYEN	ÜST			
			ALT	430		
		ORDOVİSYEN	ÜST			
			ALT	500		
		KAMBRİYEN	ÜST			
			ORTA			
			ALT	570		
		PRETEREZÖYİK	PREKAMBRİYEN	ALGONKİYEN	2 600	
		KRİPTOZÖYİK ARKEOZÖYİK AZÖYİK		ARKEEN	2 600 den önce	

