

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**SARIÇİÇEK VE SARIHAN GRANODİYORİTLERİNİN YERİNDE GAMA-IŞINI
SPEKTROMETRESİ VE MANYETİK SUSEPTİBİLİTE YÖNTEMLERİYLE
İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Jeofizik Yüksek Mühendisi Suna ALTUNDAŞ

**MAYIS 2016
TRABZON**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**SARIÇİÇEK VE SARIHAN GRANODİYORİTLERİNİN YERİNDE GAMA-IŞINI
SPEKTROMETRESİ VE MANYETİK SUSEPTİBİLİTE YÖNTEMLERİYLE
İNCELENMESİ**

Jeofizik Yüksek Mühendisi Suna ALTUNDAŞ

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"DOKTOR (JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 20/05/2016
Tezin Savunma Tarihi : 15/07/2016**

**Tez Danışmanı :Yrd. Doç. Dr. Hakan ÇINAR
İkinci Danışman :Doç. Dr. Necati ÇELİK**

Trabzon 2016

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalında
Suna ALTUNDAŞ Tarafından Hazırlanan**

**SARIÇİÇEK VE SARIHAN GRANODİYORİTLERİNİN YERİNDE GAMA-IŞINI
SPEKTROMETRESİ VE MANYETİK SUSEPTİBİLİTE YÖNTEMLERİYLE
İNCELENMESİ**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 31/05/2016 gün ve 1655 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
DOKTORA TEZİ
olarak kabul edilmiştir.**

Jüri Üyeleri

Başkan	: Prof. Dr. Aydın BÜYÜKSARAÇ	
Üye	: Prof. Dr. Yusuf BAYRAK	
Üye	: Prof. Dr. Yener EYÜBOĞLU	
Üye	: Doç. Dr. Nafiz MADEN	
Üye	: Yrd. Doç. Dr. Hakan ÇINAR	

**Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ
Enstitü Müdürü**

ÖNSÖZ

Çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora Tezi olarak hazırlanmıştır ve Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğünün (BAP) 9588 nolu projesi ile desteklenmiştir.

Lisans öğrenimimden bu yana her zaman güleryüzlü ve desteği ile yanımda olan, doktora tezimin her aşamasında bana destek veren, bilgi ve tecrübesiyle hep daha ileriye gitmem için beni yönlendiren, yardımlarını hiçbir zaman eksik etmeyen, katkı ve eleştirileri ile çalışmama yön veren çok değerli saygıdeğer danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Hakan ÇINAR'a, gerek laboratuvar gerekse veri değerlendirme aşamasında bilgilerinden ve desteğinden yararlandığım ikinci tez danışmanım Doç. Dr. Necati ÇELİK'e (Gümüşhane Üniversitesi, Fizik Mühendisliği) ve tez izleme komitesinde bulunan, bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım sayın hocalarım Prof. Dr. Yusuf BAYRAK ve Prof. Dr. Yener EYÜBOĞLU'na sonsuz saygı ve minnetlerimi sunarım.

Oldukça zor ve uzun arazi çalışmalarımnda her türlü zorluğa rağmen gösterdikleri özverili çabalarından ve anlayışlarından dolayı Jeofizik Mühendisi Metin YILMAZ, Jeofizik Mühendisi İnci GÖKÇELİK ve Jeofizik Mühendisi Ufuk ÇOBAN'a, laboratuvar çalışmaları aşamasında sergiledikleri üstün çaba ve desteklerinden dolayı Jeofizik Mühendisi Mustafa Ömer DEMİRKAN ve Jeofizik Mühendisi Hasan AKKUŞ'a teşekkür ederim.

Deneyisel çalışmalarımnda, yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. Gökhan APAYDIN, Prof. Dr. Uğur ÇEVİK, Yrd. Doç. Dr. Enver AKARYALI, Arş. Gör. Ahmet ÇELİK ve Doktora öğrencisi Ali ÇİRİŞ'e, arazi örneklerinin yoğunluk analizlerinin yapılmasındaki yardımlarından dolayı Arş. Gör. Murat KARAHAN'a, verilerin haritalandırılması aşamasında Jeofizik Mühendisi Rasim Taylan KARA ve tez yazımı sırasındaki desteğinden ötürü sevgili arkadaşım Arş. Gör. Sevda GÖREN'e teşekkür ederim.

Tez çalışmam süresince manevi desteklerini hiçbir zaman eksik etmeyen sevgili aileme gönülden ve sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Suna ALTUNDAŞ
Trabzon 2016

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Sarıçiçek ve Sarıhan Granodiyoritlerinin Yerinde Gama-Işını Spektrometresi ve Manyetik Suseptibilite Yöntemleriyle İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Yrd. Doç. Dr. Hakan ÇINAR’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/ örnekleri kendim topladığımı, deney ve analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 15/07/2016

Suna ALTUNDAŞ

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VIII
ABSTRACT	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ	X
TABLolar DİZİNİ.....	XIII
KISALTMALAR VE SEMBOLLER DİZİNİ	XIV
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Kaynak Özetleri.....	3
1.2.1. Jeolojik Çalışmalar	3
1.2.2. Jeofizik Çalışmalar	6
1.3. Çalışmanın Amacı	22
1.4. Granitik Kayaçların Genel Özellikleri	22
1.4.1. Granitik Kayaçların Oluşumu	22
1.4.2. Granitlerin Tektonik ve Jeokimyasal Olarak Sınıflandırılması.....	23
1.4.3. Granitik Kayaçların Mineralojik Bileşimi.....	24
1.4.4. Granitik Kayaçlar ve Doğal Radyasyon.....	25
2. ÇALIŞMA ALANI HAKKINDA GENEL BİLGİLER.....	27
2.1. Çalışma Alanlarının Tanıtımı	27
2.2. Çalışma Alanlarının Genel Jeolojisi.....	29
2.2.1. Doğu Pontid Orojenik Kuşağı'nın Genel Jeolojisi.....	29
2.2.2. Sarıhan Granodiyoriti	31
2.2.3. Sarıçiçek Granodiyoriti	35
3. MATERYAL VE YÖNTEM	38
3.1. Arazide Kullanılan Yöntemler	38
3.1.1. Radyometrik Yöntem	38
3.1.1.1. Radyometrik Yöntemin Tarihsel Gelişimi	38
3.1.1.2. Radyoaktif Bozunma Türleri.....	39

3.1.1.2.1.	Alfa Parçacığı	39
3.1.1.2.2.	Beta Parçacığı.....	39
3.1.1.2.3.	Gama Işınları	39
3.1.1.3.	Radyoaktivite ve Radyasyon Doz Birimleri.....	40
3.1.1.4.	Doğal Radyoaktif Elementler	41
3.1.1.4.1.	Uranyum.....	41
3.1.1.4.2.	Toryum	42
3.1.1.4.3.	Potasyum	42
3.1.1.5.	Mineral ve Kayaçlardaki Doğal Radyoaktivite	43
3.1.1.6.	Gama-ışını Spektrometresi	45
3.1.1.7.	Spektrometre Verileri Kullanılarak Hesaplanan Parametreler	47
3.1.1.7.1.	Havadaki Absorblanmış Doz Oranı	47
3.1.1.7.2.	Radyum Eşdeğer Aktivitesi.....	48
3.1.1.7.3.	Dış Tehlike İndeksi	48
3.1.1.7.4.	Yıllık Etkin Doz Eşdeğeri	48
3.1.1.7.5.	Yaşam Boyu Kanser Riski	49
3.1.1.8.	Jeokimyasal Radyonüklid Oranları ve Uranyum Göçü.....	49
3.1.1.8.1.	Jeokimyasal Radyonüklid Oranları	49
3.1.1.8.1.1.	eU/eTh Oranı.....	49
3.1.1.8.1.2.	K/eTh Oranı.....	50
3.1.1.8.1.3.	K/eU Oranı	50
3.1.1.8.1.4.	eU-(eTh/3.5) Oranı.....	50
3.1.1.8.2.	Uranyum Göçü	51
3.1.2.	Manyetik Suseptibilite (Duyarlılık)	53
3.1.2.1.	Manyetik Suseptibilite Ölçümleri	54
3.1.2.2.	Kayaç ve Minerallerin Manyetik Suseptibilitesi	56
3.1.3.	Kayaçlarda Radyojenik Isı Üretimi.....	58
3.2.	Laboratuvar Çalışmaları	61
3.2.1.	Toprak ve Kaya Örneklerinin Gama Spektrometrik Analizleri	61
3.2.1.1.	Örneklerin Toplanması.....	61
3.2.1.2.	Örneklerin Analize Hazırlanması.....	62
3.2.2.	HPGe Dedektörü ile Örneklerin Radyoaktivite Seviyesinin Belirlenmesi	63
3.2.3.	Saha Örneklerinin Yoğunluk Değerlerinin Belirlenmesi	65

4.	YAPILAN ÇALIŞMALAR	66
4.1.	Sarıçiçek Granodiyoriti ve Çevresi (Gümüşhane)	66
4.1.1.	Yerinde Gama-ışını Ölçümleri	66
4.1.2.	Radyojenik Isı Üretimi	76
4.1.3.	Manyetik Suseptibilite Ölçümleri	77
4.2.	Sarıhan Granodiyoriti ve Çevresi (Bayburt)	79
4.2.1.	Yerinde Gama-ışını Ölçümleri	79
4.2.2.	Radyojenik Isı Üretimi	88
4.2.3.	Yerinde Manyetik Suseptibilite Ölçümleri	89
5.	BULGULAR VE TARTIŞMA	91
5.1.	Sarıçiçek Granodiyoriti ve Çevresi	91
5.1.1.	Arazi Çalışmasından Elde Edilen Bulgular.....	91
5.1.2.	Laboratuvar Çalışmasından Elde Edilen Bulgular	99
5.2.	Sarıhan Granodiyoriti ve Çevresi	100
6.	SONUÇLAR	111
7.	KAYNAKLAR.....	116
ÖZGEÇMİŞ		

Doktora Tezi

ÖZET

SARIÇİÇEK VE SARIHAN GRANODİYORİTLERİNİN YERİNDE GAMA-IŞINI SPEKTROMETRESİ VE MANYETİK SUSEPTİBİLİTE YÖNTEMLERİYLE İNCELENMESİ

Suna ALTUNDAŞ

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Yrd. Doç. Dr. Hakan ÇINAR
2016, 129 Sayfa

Bu tez çalışmasında, Sarıçiçek (Gümüşhane) ve Sarıhan granodiyoritleri (Bayburt) ile yakın çevrelerindeki toprak ve kayalar üzerinde yerinde gama-ışını spektrometre ve manyetik suseptibilite ölçümleri yapılmış, çalışma alanları için radyojenik ısı üretim değerleri de hesaplanmıştır. Aynı zamanda, Sarıçiçek granodiyoriti ve çevresinden toplanan toprak ve kayalar örnekleri laboratuvarında analiz edilmiş ve yapılan jeofizik çalışmalarla bölgenin jeolojik yapısı arasındaki uyum ortaya konulmuştur.

Ortalama K, U ve Th değerleri; Sarıçiçek granodiyoriti için %2.98, 3.15 ppm, 12.45 ppm ve Sarıhan granodiyoriti için %1.83, 2.73 ppm ve 13.6 ppm olarak bulunmuştur. Granitik plütonlar, çevre kayalardan (bazaltik, tortul ya da metamorfik bileşimli kayalar) yüksek radyoaktivite göstermiştir. Radyonüklid konsantrasyonları ve oranlarına göre, çalışma alanlarındaki granitik kayalar üst manto ve kabuk karışımı sonucu oluşmuştur. Sarıçiçek ve Sarıhan granodiyoritleri için hesaplanan ortalama radyojenik ısı üretim değerleri ($1.9 \mu\text{Wm}^{-3}$ ve $2.03 \mu\text{Wm}^{-3}$), üst kıtasal kabuk değerleri ile uyumludur. Yapılan manyetik suseptibilite ölçümleri sonucunda, çalışma alanlarındaki kayaların türüne ve mineral içeriklerine göre farklı manyetik suseptibilite değişimleri gözlemlenmiştir. Manyetik suseptibilitedeki değişimler ile plütonlar ve çevre kayalar arasındaki sınır açık bir şekilde ortaya konulmuştur. Hesaplanan radyolojik tehlike parametrelerine göre, her iki çalışma alanı da çevre ve insan sağlığı açısından bir risk taşımamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Gama-ışın spektrometresi, manyetik suseptibilite, radyojenik ısı üretimi, Sarıçiçek ve Sarıhan granodiyoriti.

Ph.D. Thesis

ABSTRACT

INVESTIGATION OF SARIÇİÇEK AND SARIHAN GRANODIORITES USING IN-SITU GAMMA-RAY SPECTROMETER AND MAGNETIC SUSCEPTIBILITY METHODS

Suna ALTUNDAŞ

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Geophysical Engineering Graduate Program
Supervisor: Assistant Prof. Dr. Hakan ÇINAR
2016, 129 pages

In this thesis, Sariçiçek (Gümüşhane) and Sarihan granodiorites (Bayburt) and their surrounding formations are examined using in-situ gamma-ray spectrometer and magnetic susceptibility measurements. The radiogenic heat production values for those areas are calculated. All results obtained these two in-situ measurement methods and the laboratory analyses of the rock and soil samples collected from Sariçiçek granodiorite are jointly interpreted to reveal geological properties coherency with the geophysical measurements.

The average K, U and Th values for Sariçiçek granodiorite are 2.98%, 3.15 ppm, 12.45 ppm and Sarihan granodiorite are 1.83%, 2.73 ppm, 13.6 ppm, respectively. The granitic plutons have higher radioactivity than their surrounding formations, which are composed of basaltic, sedimentary or ultramafic rocks. Based on the concentrations of K, U, Th and their ratios, it is concluded that granitic rocks exposed in both area are formed as a mixture of the upper mantle and crustal materials. The average heat production for Sariçiçek and Sarihan granodiorites are estimated as $1.9 \mu\text{Wm}^{-3}$ and $2.03 \mu\text{Wm}^{-3}$, which are closer to the upper continental crustal value. In each studied area, different susceptibility variations are related to the rock and mineral types, exist in those areas. The boundary between plutons and surrounding formations are markedly revealed by the susceptibility variations. According to calculated radiological hazard parameters, there is no significant radiologic hazards for humans and environment in and around studied areas.

Key Words: Gamma-ray spectrometry, magnetic susceptibility, radiogenic heat production, Sariçiçek and Sarihan granodiorites.

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1. Çalışma alanlarının yer bulduru haritası.....	27
Şekil 2.2. Sarıçiçek granodiyoritinin topoğrafyası (Serin Tepe'sinden kuzeydoğusunda bulunan Sarıçiçek Köyü'ne bakış).....	28
Şekil 2.3. Bayburt'daki çalışma alanından bir görünüm.....	28
Şekil 2.4. Doğu Pontid Orojenik Kuşağı'nda yüzeyleyen ana litolojik birimler	29
Şekil 2.5. Sarihan granodiyoriti ve çevre kayalarla olan ilişkisini gösteren jeolojik harita.....	31
Şekil 2.6. Yüzeylenmiş Sarihan granodiyoritinden bir görünüm.....	32
Şekil 2.7. Sarihan granodiyoriti içerisinde bulunan (a) Mafik mikrogranüler anklav ve (b) Aplit dayk.....	33
Şekil 2.8. Granodiyorit içerisinde arenalaşma ve hidrotermal ayrışma sonucu oluşan toprak	33
Şekil 2.9. Sarihan granodiyoritinde bulunan (a) Özşekli turmalinler. Tu: Turmalin, Or: Ortoklas, K: Kuvars (b) Halkalı zonlu plajiyoklas. PI: Plajiyoklas, Hbl: Hornblend (c) Hornblendlere ait h' (100) ikizi. Bi: Biyotit, Or: Ortoklas (d) Biyotit kristali Bi: Biyotit.....	34
Şekil 2.10. Sarıçiçek granodiyoriti ve çevresinin yüzeylendiği alanının jeoloji haritası	35
Şekil 2.11. Sarıçiçek granodiyoriti ve çevresindeki formasyonlar (a) Sarıçiçek granodiyoriti ve (b) Alibaba Formasyonu	35
Şekil 2.12. Sarıçiçek granodiyoritindeki kayaların dokusal görünimleri (Or: Ortoklas, K: Kuvars, PI: Plajiyoklas, Af: Amfibol, Bi: Biyotit, Fe: Fe-Ti oksit).....	34
Şekil 3.1. Enerji spektrumu	40
Şekil 3.2. Uranyum ve toryum serileri ile potasyumun Megaelektron volt (MeV) birimindeki Gama-ışını enerjileri.	43
Şekil 3.3. Gama ışını spektrometresi.....	46
Şekil 3.4. KT-10 Plus S/C Suseptibilite ölçer ve ekipmanları	55
Şekil 3.5. Araziden toplanan kayaç ve toprak örnekleri.....	61
Şekil 3.6. Araziden toplanıp kurumaya bırakılan toprak örnekleri ve çeneli kırıcı yardımıyla boyutları küçültülen kayaç örnekleri	62

Şekil 3.7.	HPGe dedektörlü Gama spektrometre sisteminin genel görünüşü..	63
Şekil 3.8.	Kayaç örneğinin (Sarıçiçek granodiyoriti, Gümüşhane) sayım-enerji spektrumu	64
Şekil 4.1.	Sarıçiçek granodiyoritinde ve çevresinde alınan yerinde gama-ışını ve manyetik suseptibilite ölçüm noktalarının konumları.....	67
Şekil 4.2.	Sarıçiçek granodiyoriti ve çevresinde kayaç ve toprak üzerinde gama-ışını spektrometre ölçümü	68
Şekil 4.3.	Sarıçiçek granodiyoriti ve çevresindeki; A) K, b) U ve c) Th konsantrasyon dağılımı	69
Şekil 4.4.	Sarıçiçek granodiyoriti ve çevresindeki doğal doz oranı dağılımı ..	71
Şekil 4.5.	Sarıçiçek granodiyoriti (Gümüşhane) ve çevresinde a) eU/eTh, b) K/eU ve c) K/eTh oranlarının dağılımı	73
Şekil 4.6.	Sarıçiçek granodiyoriti (Gümüşhane) ve çevresinde a) U değişim oranı, b) Göç oranı ve c) F parametresi dağılımı	75
Şekil 4.7.	Sarıçiçek granodiyoriti (Gümüşhane) ve çevresinin radyojenik ısı üretimi haritası.....	76
Şekil 4.8.	Sarıçiçek granodiyoriti (Gümüşhane)'nde ayrıışmış kayaçtan oluşan toprak üzerinde manyetik suseptibilite ölçümü.....	77
Şekil 4.9.	Sarıçiçek granodiyoriti (Gümüşhane) ve çevresinin manyetik suseptibilite haritası.....	78
Şekil 4.10.	Sarıhan granodiyoriti ve çevresinde (Bayburt) alınan yerinde gama-ışını ve manyetik suseptibilite ölçüm noktalarının konumları	79
Şekil 4.11.	Sarıhan granodiyoriti ve çevresinde (Bayburt) a) K, b) U ve c) Th konsantrasyon dağılımı	82
Şekil 4.12.	Sarıhan granodiyoriti ve çevresinde (Bayburt) doğal doz oranı dağılımı.....	83
Şekil 4. 13.	Sarıhan granodiyoriti ve çevresinde (Bayburt) a) eU/eTh, b) K/eU ve c) K/eTh oranlarının dağılımı.....	85
Şekil 4.14.	Sarıhan granodiyoriti ve çevresinde (Bayburt) a) U göç değişimi, b) Göç oranı ve c) F parametresi dağılımı	87
Şekil 4.15.	Sarıhan granodiyoriti ve çevresinin (Bayburt) radyojenik ısı üretim haritası	88
Şekil 4.16.	Sarıhan granodiyoriti ve çevresinin (Bayburt) manyetik suseptibilite haritası	90

Şekil 5.1.	Sarıçiçek granodiyoriti ve çevresi için U, Th, K konsantrasyonları ile doğal doz oranı dağılımının üç boyutlu gösterimi	92
Şekil 5.2.	Sarıçiçek granodiyoriti ve çevresi (Gümüşhane) için toplam absorbe edilen doza ^{232}Th , ^{238}U ve ^{40}K ' ın katkıları.....	93
Şekil 5.3.	Sarıçiçek granodiyoriti ve çevresi için a) K-Th, b) K-U ve c) Th-U arasındaki ilişki	94
Şekil 5.4.	Sarıçiçek granodiyoriti ve çevresi için manyetik suseptibilite değişiminin üç boyutlu gösterimi	96
Şekil 5.5.	Sarıçiçek granodiyoriti ve çevresindeki doğal doz oranı, radyojenik ısı üretimi ve manyetik suseptibilite değişiminin üç boyutlu gösterimi.....	97
Şekil 5.6.	Sarıçiçek granodiyoriti ve çevresi için a) Radyojenik ısı üretimi-Doz oranı ve b) Manyetik suseptibilite-Doz oranı arasındaki ilişki	98
Şekil 5.7.	Sarıçiçek granodiyoriti ve çevresi için a) HPGe (Laboratuvar) ve b) NaI(Tl) (Arazi) dedektörlerinden elde edilen ^{232}Th , ^{238}U ve ^{40}K aktivite konsantrasyonlarının birlikte gösterimi.....	99
Şekil 5.8.	Sarıhan granodiyoriti ve çevresine (Bayburt) ait U, Th, K konsantrasyonları ile doğal doz oranı dağılımının üç boyutlu gösterimi.....	100
Şekil 5.9.	Sarıhan granodiyoriti ve çevresi (Bayburt) için toplam absorbe edilen doza Th, U ve K'ın katkıları.	102
Şekil 5.10.	Sarıhan granodiyoriti ve çevresi (Bayburt) için a) K-Th, b) K-U ve c) Th-U arasındaki ilişki.....	103
Şekil 5.11.	Sarıhan granodiyoriti ve çevresi (Bayburt) için manyetik suseptibilite değişiminin üç boyutlu gösterimi	105
Şekil 5.12.	Sarıhan granodiyoriti ve çevresi (Bayburt) için doğal doz oranı, radyojenik ısı üretimi ve manyetik suseptibilite değişiminin üç boyutlu gösterimi.....	106
Şekil 5.13.	Sarıhan granodiyoriti ve çevresi (Bayburt) için a) Radyojenik ısı üretimi-Doz oranı ve b) Manyetik suseptibilite-Doz oranı arasındaki ilişki.....	107

TABLOLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 3.1. Radyoaktivite büyüklükleri ve birimleri.	41
Tablo 3.2. Başlangıç (primordial) radyonüklidler.	42
Tablo 3.3. Bazı kayaç minerallerinin K, U ve Th içerikleri.	44
Tablo 3.4. Bazı kayaçlarda ortalama radyoaktif element konsantrasyonları....	45
Tablo 3.5. Radyonüklid konsantrasyonundan (% , ppm) spesifik aktiviteye (Bq/kg) dönüşüm faktörleri.	47
Tablo 3.6. Kayaç ve minerallerin ortalama manyetik suseptibiliteleri.....	57
Tablo 3.7. Magmatik kayaçlar için ortalama radyoaktif ısı üretim miktarları.	59
Tablo 3.8. Tortul kayaçlar için ortalama radyoaktif ısı üretim miktarları.	59
Tablo 3.9. Aktivite hesaplanmasında kullanılan radyoaktif elementler, enerjileri ve bozunma olasılıkları.	64
Tablo 3.10. Kayaç örneklerinin laboratuvarında belirlenen yoğunlukları.....	65
Tablo 5.1. Yerden 1 metre yüksekte homojen ve sonsuz bir düzlemde U ve Th dönüşüm serilerindeki birim radyoelement konsantrasyonu başına düşen gama doz oranları.....	93
Tablo 5.2. Sarıççek granodiyoriti ve çevresine ait min, max, ortalama radyonüklid konsantrasyon oranları ve U göç parametreleri ile radyolojik tehlike indisleri	95
Tablo 5.3. Sarıççek granodiyoriti ve çevresinde elde edilen radyoaktivite, radyojenik ısı ve suseptibilite parametrelerinin minimum, maksimum ve ortalama değerleri.....	95
Tablo 5.4. Sarıççek granodiyoriti ve çevresi için laboratuvar ve arazide ölçülen ²³⁸ U, ²³² Th ve ⁴⁰ K radyoaktif çekirdeklerinin ortalama aktivite konsantrasyonları	99
Tablo 5.5. Sarıhan granodiyoriti ve çevresine (Bayburt) ait min, max, ortalama radyonüklid konsantrasyon oranları ve uranyum göç parametreleri ile radyolojik tehlike indisleri	104
Tablo 5.6. Sarıhan granodiyoriti ve çevresinde (Bayburt) elde edilen radyoaktivite, radyojenik ısı ve suseptibilite parametrelerinin minimum, maksimum ve ortalama değerleri.....	105
Tablo 5.7. Çeşitli çalışmalarda hesaplanan radyojenik ısı ve manyetik suseptibilite değerleri	109
Tablo 5.8. Bu çalışmadan elde edilen ortalama radyonüklid konsantrasyonları ile Dünya’da benzer araştırmalardan elde edilen konsantrasyon değerlerinin karşılaştırılması.....	110

KISALTMALAR VE SEMBOLLER DİZİNİ

eU	Eşdeğer Uranyum
eTh	Eşdeğer Toryum
²³⁸ U (U)	Uranyum
²³² Th (Th)	Toryum
²²⁶ Ra	Radyum
⁴⁰ K(K)	Potasyum
F	Efimov parametresi
ρ	Yoğunluk
α	Alfa radyasyonu
β	Beta radyasyonu
γ	Gama radyasyonu
c _A	Aktivite konsantrasyonu
D	Havadaki absorblanmış doz
YEDE	Yıllık etkin doz eşdeğeri
H _{dış}	Dış tehlike indisi
Ra _{eq}	Radyum eşdeğer aktivitesi
KR	Kanser riski
RF	Risk faktörü
DL	Ortalama insan yaşam süresi
MeV	Megaelektron volt
keV	Kiloelektron volt
NaI(Tl)	Talyum ihtiva eden Sodyum Iyodür
HPGe	Yüksek Saflıkta Germanyum Detektörü
IAEA	International Atomic Energy Agency
ICRP	International Commission on Radiological Protection
ICRU	International Commission on Radiation Units
UNSCEAR	United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation
ICP-MS	İndüktif Olarak Eşleştirilmiş Plazma-Kütle Spektrometresi

1.GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Yeryüzünde var olan doğal radyoaktivite, dünyanın oluşumundan itibaren bütün canlıları doğrudan ya da dolaylı bir şekilde etkilemektedir. Bu doğal radyoaktivite; özellikle uzaydan gelen kozmik ışınlar ve çevremizdeki kaya, toprak, su ve hatta soluduğumuz havada bulunan doğal radyonüklidlerin bozunmaya uğraması sonucu yayınlanan ışınlardır. Bir yerin doğal radyoaktivite seviyesi, bölgenin jeolojik yapısı, coğrafik konumu ve radyokimyasal özelliklerine bağlı olarak değişiklik gösterir. Yağmur, kar, alçak basınç, yüksek basınç ve rüzgâr yönü gibi etkenler de doğal radyasyon seviyesinin büyüklüğünü belirler. İnsanlar, içinde yaşadıkları doğal çevrede bulunan bu kaynaklardan yayınlanan değişik tipteki radyasyonlara her zaman maruz kalmaktadır. Gözlenen en yaygın doğal radyasyon kaynakları ^{40}K , ^{238}U , ^{226}Ra ve ^{232}Th izotoplarıdır (Dizman, 2006).

Atmosferde kozmik ışınlardan kaynaklanan radyoaktif maddeler de bitkiler tarafından özümленerek organik yapıya geçerler ve bu yolla insanlara transfer olurlar. Ayrıca toprak kökenli yapı malzemelerinde de (kum, çimento, tuğla vb.) bir miktar radyasyon vardır. Bunların konsantrasyonlarının tespit edilmesi, bu çevrede yaşayan insanların aldıkları doz değerlerinin hesaplanması için önemlidir (Dyson, 1993).

Çevresel radyoaktiviteye katkı sağlayan bu doğal radyonüklidlerin (^{40}K , ^{238}U ve ^{232}Th) doğadaki miktarları toprak ve kaya türlerine göre değişiklik gösterebilmektedir. Toprak ve kayalardaki doğal radyoaktivite, çevresel Gama doz oranına en büyük katkırı sağlamaktadır. Örnek olarak, volkanik kayalarındaki doğal radyoaktivite tortul kayalarda var olan radyoaktiviteye oranla daha yüksektir. Tortul ve fosfat türü kayalarda da radyoaktivite seviyesi oldukça yüksektir (Valkovic, 2000; Kathren, 1984).

Özellikle granit gibi magmatik kayalarda yüksek radyoaktivite konsantrasyonları tespit edilmiştir. Bu tür kayalardaki U konsantrasyonu nadiren 30 ppm'i aşmaktadır (Ioannides vd., 2003). Granitler yüksek U ve Th içermelerine rağmen, silika yönünden fakir kayalar 0,1 ppm veya daha düşük U içerirler. U, Th ve bunların ürünleri, radyoaktif K ile birlikte kristalimsi kayalardaki büyük ısı üreticidirler (Chiozzi vd., 2002).

Granitler yeryüzünün büyük bölümünde oldukça yaygın plütonik kayalardır. Yerkabuğundaki oluşumlar kıyaslandığında granitlerde fazla miktarda U ve Th bulunmaktadır. Sert ve dayanıklıdır. Bu sebeple iç, dış zemin ve yer kaplamalarında kullanılırlar. Temel olarak kuvars, K feldispat ve sodyum feldispat tanecikleri içerirler. Bu kayalar doğa şartlarına bağlı olarak zamanla ufalanarak çok küçük parçalar halinde yağmur veya akıntı suları ile toprağa karışırlar. Böylece toprağın doğal radyoaktivitesini artırır. Dünyanın jeolojik yapısı incelendiğinde belli kalınlıktaki toprak tabakasının hemen altında kaya katmanları olduğu görülür. Bu kaya yatakları da radyoaktiviteye sebep olurlar (Tzortzis vd., 2003).

Yüksek oranlarda ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K içermeleri nedeniyle granitler radyolojik yönden ön plana çıkmaktadır. Birçok bölgede geniş alanlara yayılan granitik kayalar önemli oranlarda Th elementi içermektedir. Dünya ve Türkiye genelinde yapılan radyometrik çalışmalar sonucunda bu tür kayaların bulunduğu alanlarda gama radyasyonları ölçülmüş ve oldukça yüksek radyasyon değerleri elde edilmiştir (UNSCEAR, 2000). Elde edilen bu bilgiler ışığında, yüksek radyasyonlu bu bölgelerde yaşayan insanların doğal kaynaklardan aldıkları yıllık radyasyon dozları diğer bölgelerde yaşayan insanlara göre çok daha fazla olacaktır. Granitlerin, özellikle yapı malzemesi olarak bina içi ve bina dışı kullanılmasından kaynaklı olarak içerdikleri doğal radyonüklidlerin belirlenip, radyolojik açıdan incelenmeleri gerekmektedir. Bu bölgelerdeki, granitik kayalarda ve yüzey topraklarında doğal radyonüklid konsantrasyonları ile karasal gama doz hızlarının ölçülmesi, ölçülen bu değerlerin UNSCEAR ve IAEA gibi sağlık ve radyasyon korunma ve güvenliği alanında yetkili Uluslararası Organizasyonlar tarafından izin verilen radyasyon dozları ile karşılaştırılması bölgenin radyolojik risk açısından değerlendirilmesinde büyük önem taşımaktadır.

Çalışılan alanla ilgili jeolojik bir tanımlama yapabilmek için bir formasyona ait K, U ve Th içeriklerinin bilinmesi bazı koşullarda çok önemli olmaktadır. Spektrometrik etütler, özellikle geniş alanların çok daha küçük ölçekli olarak haritalandırılmasında büyük kolaylıklar sağlamaktadır. Buna ek olarak, her türlü jeolojik ve jeofizik bilgiye destek sağlaması ve konuya başka boyutlarda bakılabilmek fırsatı vermesi açısından bu etütler güvenilir bir şekilde uygulanmaktadır. Yine aynı şekilde, kayaçların manyetik özelliklerinden yararlanarak hem yüzey hem de yer altı jeolojisi incelenmektedir. Kayaç oluşturan minerallerin çoğu etkin bir şekilde manyetik özellik göstermese dahi, belirli kayaç türleri önemli düzeyde manyetik anomaliler ortaya çıkabilecek düzeyde manyetik mineraller içerebilmektedir. Bu yüzden bu ölçümlerle bölgesel jeolojik yapı incelenebilir. Ölçüm yapılan alan için manyetik suseptibilite değeri ölçülüp, bu değerden alandaki kayaç birimi ve içerisindeki mineral türleri kolaylıkla belirlenebilmektedir.

1.2. Kaynak Özetleri

Yapılan literatür taraması sonucunda, Dünya’da birçok ülkede doğal radyoaktivite ve manyetik suseptibilite ölçümlerinin yapıldığı görülmüştür. Kayaçın litolojisine bağlı olarak bu manyetik ya da radyoaktif elementlerin bulunma oranlarında farklılaşmalar olmaktadır. Bu farklılaşmanın temel olarak alınması ile radyoaktif konsantrasyon ve manyetik suseptibilite değerlerinin haritalanmasıyla çalışılan bölge jeolojik açıdan değerlendirilebilmektedir. Çünkü bu elementler farklı litolojik birimlerde farklı oranlarda bulunmaktadır. Yapılan ölçümler ile yüzeydeki radyoaktif konsantrasyon ve suseptibilite dağılımı jeolojik formasyonlarla ilişkilendirilerek, bu dağılımlarla jeolojik yapının ne derece uyumlu olduğu belirlenmektedir. Tez kapsamında yapılan çalışmalar ile ilgili olarak, daha önceden yapılmış olan jeolojik ve jeofizik araştırmalardan bazıları özetler halinde verilmiştir.

1.2.1. Jeolojik Çalışmalar

Ketin (1951, 1966); Aşkale, Bayburt ve Gümüşhane bölgesinin jeolojik özelliklerini incelemiştir. Çalışmasında, volkano-tortul karakterli Liyas birimlerinin Paleozoyik yaşlı metamorfik temel üzerinde transgresif olarak bulunduğunu ve yörede Liyas-Malm arasında Dogger gözlenmediğini belirterek, diğer kayaç birimlerinin çeşitli özelliklerine değinmiştir.

Sarıhan granitoyidi'ni, Haho graniti olarak adlandırmış ve yaşının Paleozoyik olduğunu vurgulamıştır. Bununla birlikte Saraycık granodiyoriti'nin de Paleozoyik yaşlı olduğu ve Sarıhan granitoyidi ile birlikte metamorfiklerin içinde olduğunu belirtmiştir.

Tokel (1988), "Anadoluda yitim ve çarpışma kökenli granodiyoritlerin kimyasal ve metallojenik açıdan karşılaştırılması" adlı çalışmasında, Pontid'ler boyunca uzanan Geç Hersiniyen yaşlı magmatik ark granodiyoritleri ve Pontid'lerin güneyinde Divriğ-Bolkardağı boyunca uzanan, Üst Kretase-Paleosen yaşlı ofiyolitik karmaşığı kesen çarpışma granodiyoritleri olmak üzere tektonik yerleşimlerine göre granitleri iki grupta sınıflamış, Saraycık granodiyoriti ve Sarıhan granitoyidi'ni ilk gruba dahil etmiştir.

M.T.A. (1989), çalışmada Saraycık granodiyoriti ile Sarıhan granitoyidi'nin yaşı Paleozoyik olarak belirtilmiştir ve ayrıca aynı özellikte, olduğu ileri sürülmüştür. Sarıhan granitoyidi'nin genellikle granodiyorit karakterli olmasına rağmen yer yer de kuvarslı diyorit ve granit özelliği gösterdiği ve Saraycık granodiyoriti'nin Sarıhan granitoyidi'ne göre daha fazla ayrıştığı belirtilmiştir. Metamorfitlerin üstüne uyumsuz olarak gelen Liyas yaşlı Hamurkesen Formasyonu'nun taban konglomerası ile başladığı ve daha üst seviyelerdeki tortul serinin ise kömürlü seviyeler içerdiği ve bunların diyabaz daykları tarafından kesildiği ifade edilmiştir. Çörtlü seviyeler içeren Hozbirikyayla Formasyonu üzerine, Otlukbeli melanjinin uyumlu geldiğini ve bunun kırmızı kireçtaşları ile başlayarak kumtaşı, radyolarit, serpantin ile bazaltik birimlerden oluştuğunu tespit etmişlerdir.

Güven (1993), Doğu Pontidlerin geniş bir kısmının 1/250000 ölçekli jeoloji haritasını yapmıştır. İnceleme sahasının da içinde bulunduğu alanda yaptığı çalışmasında, yörede yüzlek veren kayaçları, formasyon mertebesinde ayırarak isimlendirmiş, Dölek ve Sarıçiçek plütonlarını Kaçkar Batoliti'nin devamı olarak belirtmiştir.

Aliyazıcıoğlu (1999), inceleme sahasında Dölek ve Sarıçiçek Plütonlarının kesmiş olduğu volkanik kayaçların petrografik, mineralojik ve kimyasal özelliklerini ortaya koymuştur. Bu çalışma ile inceleme sahasında yüzeylenen volkanitlerin, kayaçların yitime bağlı olarak yay gerisinde gelişmiş kalk-alkalen karakterli kayaçlar olduğu belirlenmiştir.

Arslan vd. (1999), Doğu Anadolu Dağ Kuşağının Doğu kesiminin, Kuzey ve Güney zonlarında yüzlek veren granodiyoritlerin mineralojik ve kimyasal özelliklerini karşılaştırmalı olarak inceleyerek bu plütonlar arasındaki benzerlik ve farklılıkları açıklamıştır. Adı geçen çalışmada, Güney zondaki plütonlara örnek olarak bu çalışmaya konu olan plütonlar seçilmiş ve bu plütonları oluşturan granodiyoritik kayaçların kalk-alkalin, I-tipi metalumin karakteri yansıttığı vurgulanmıştır.

Arslan vd. (2000), çalışma sahasında yüzlek veren ve söz konusu Dölek ve Sarıçiçek plütonlarının kesmiş olduğu Eosen yaşlı volkanik kayaçlar ile Kuzey Zonda yüzlek veren Eosen ve Eosen sonrası yaşlı volkanitleri, mineralojik ve petrolojik açıdan karşılaştırmış ve bunlardan, inceleme sahasında yüzlek verenlerin, yay gerisinde oluşmuş kalk-alkalen yitim volkanizması ürünü olduğunu ileri sürmüştür.

Karslı (2002)'de Doğu Pontidler'in Güney Zonu'nda yüzeylenmiş olan Dölek ve Sarıçiçek plütonlarının oluşum modellerinin incelenmesine yönelik yaptığı bu çalışmada, plütonlardaki ana kayaç ve kapanım ilişkileri ve kapanımların kökenini petrografik, mineralojik ve kimyasal açıdan incelemiştir. Plütonların modal olarak; granit, granodiyorit, kuvarslı monzonit ve kuvarslı monzodiyorit bileşimli ana kayaçların yanı sıra, diyorit, kuvarslı diyorit, monzodiyorit ve kuvarslı monzodiyorit bileşimli kayaç kapanımları içerdiğini ortaya çıkarmıştır. Ayrıca yapılan analizlerle kayaçların çoğunlukla plajiyoklas, kuvars, ortoklas, biyotit, amfibol, Fe-Ti oksit, piroksen, sfen, apatit $\pm$ klorit ve epidot mineralleri içerdiği belirlenmiştir.

Karslı vd. (2007) Dölek ve Sarıçiçek plütonlarının jeodinamik evrimini ve petrojenezinin araştırılmasına yönelik yapmış oldukları bu çalışmada, plütonik kütlelerden topladıkları örnekler üzerinde Sr-Nd-Pb izotopları ile ana ve iz element analizleri yapmışlardır. Yapılan çalışma sonucunda elde edilen tüm jeokimyasal veriler, bazik magmanın zengin bir kıta altı litosferik magmadan türediğini ve derin kabuksal seviyelerdeki mafik alt kabuğun ergimesinden kaynaklı bir kabuksal ergimeyle de etkileşim içinde olduğunu göstermiştir. Sr-Nd izotoplarına bağlı olarak yapılan modelleme ile plütonların yaklaşık %77-83 oranında kıta altı litosferik manto içerdikleri ortaya çıkarılmıştır. Sonuç olarak, bu etkileşimlerin melez (hibrid) granitoid kütlelerin oluşumunda önemli bir rol oynadığı sonucuna varılmıştır.

Eyüboğlu vd. (2011a) yaptıkları çalışmada Doğu Pontid orojenik kuşağında yer alan adakitik kökenli Sarıhan granodiyoritini de içine alan bölgede şoşonitik magmatizmadan adakitik magmatizmaya geçişte etkili olan mekanizmayı araştırmışlardır. Geç Mezozoyik ve erken Senozoyik dönem süresince Doğu Pontid orojenik kuşağının güneyindeki magmatizmaya ilişkili olarak yeni jeolojik, petrolojik, jeokimyasal ve izotopik veriler elde edilmiştir. Elde edilen bu verilere dayalı olarak çalışma alanında bulunan kayaçların tektonomagmatik evrimlerini açıklamak için yeni bir jeodinamik model önermişlerdir.

1.2.2. Jeofizik Çalışmalar

Osmand (1964), tortul kayaçların içerdiği U ve Th konsantrasyon dağılımlarını araştırmış ve diğer kayaç türlerine göre bu kayaçlardaki radyoaktif element miktarlarının daha az olduğunu ortaya çıkarmıştır. Elde edilen sonuçlar ışığında kayaç türleri arasında hem yapısal hem de radyoaktif element içeriği açısından farklılıklar olduğu görülmüştür.

Collins vd. (1981), Tazmanya granitlerinin manyetik suseptibilite değerleri ile radyonüklid içeriklerini araştırmıştır. Parçalı ve kırıklı olan granodiyoritlerde U fazlalığından dolayı yüksek radyoaktivite gözlenmiştir. Doğu Tazmanya'daki biotit-muskovitli alkali granitlerde U/Th oranı 0.5'ten büyük olarak hesaplanmış içerisinde kolay cevherleşmesi olmayan alkali granitler ise U/Th oranı 0.33 olup düşük radyoaktivite göstermişlerdir (Kuzey batı Tazmanyadaki granitler).

Galbaith ve Saunders (1983), volkanik kayaç örneklerindeki gama-ışın spektrometrik verilerinden K, U ve Th konsantrasyonlarına dayalı analitik verileri, çeşitli litolojik tiplerin K, U ve Th içeriği ile karşılaştırmışlardır. Gama-ışın ölçümleriyle litolojik sınıflamanın başarı ile yapılabildiğini göstermişlerdir. Jeokimyasal olarak U zenginleşmesinin veya fakirleşmesinin derecesini tahmin etmede veya potansiyel U kaynağı kayaçların ve U'lu sahaların aranmasında gama-ışın verilerinin pratik bir şekilde kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Wallin (1984), Yozgat yöresinde helikopter ile yaptığı gama-ışın spektrometresi etüdü sonucunda yüzde olarak K konsantrasyon haritasını oluşturmuş ve elde ettiği konsantrasyon haritasını bölgenin jeolojik haritasıyla karşılaştırmıştır. Haritaların incelenmesinin ardından kuzeydeki ofiyolitik birimin K içeriğinin diğer birimlere göre oldukça düşük olduğu, haritanın ortasındaki granitlerin ise daha yüksek oranlarda K içerdiği ortaya çıkarılmıştır.

Rybach ve Buntebarth (1984)'e göre; kristalize olmuş kayaçlarda radyoaktif ısı üretimi, basınç dalgası hızı ve yoğunluk gibi petrofiziksel özellikler kayaç tipi ile ilişkilidir. Kayacı oluşturan minerallerin katyon kesitleri nicel ilişkileri belirlemek için kullanılır. Isı üretimi, kayaç tipleri kadar kayaçların jeolojik yaşlarıyla da önemli değişimler gösterirler. Bu yüzden kayaç tipi ve ısı üretimi arasındaki ilişki kullanılarak, Fanerozoik kayaçlar ve diğer Prekambriyen kayaçlar ayırt edilmiştir. Prekambriyen kayaçlar Fanerozoik kayaçlara göre 1/3 oranında daha düşük ısı üretimi sergilemişlerdir.

Aydın (1996), Bayburt-Sarıhan skarn zonu bölgesinde manyetik ve suseptibilite ölçümleri yaparak bölgenin yeraltı yapısını ortaya koymaya çalışmıştır. Bu amaçla hem laboratuvar da hem de arazide suseptibilite ölçümleri yapılmıştır. Çalışma alanında ölçülen manyetik toplam bileşen değerler haritalara işlenmiş ve haritalarda gözlenen anomaliler Talwani yöntemi kullanılarak değerlendirilmiştir. Talwani yöntemi için gerekli olan başlangıç suseptibilite değerleri için numunelerin laboratuvar da belirlenen suseptibilite değerleri kullanılmıştır. Yüzeyden yapılan suseptibilite ölçümleriyle bölgenin yanal doğrultularda suseptibilite değişimleri ortaya konulmuş ve elde edilen değerler laboratuvar da ki değerler ile karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonucunda, inceleme alanı içerisinde bulunan mostra vermemiş manyetit kütlelerinin varlığı, derinliği ve uzanımı ortaya çıkarılmıştır.

Verdoya vd. (1997), Korsika batolitinin güney kısmında yüzeylenmiş olan Variskan volkanik kayaçlarının ısı üretim değerlerini hesaplayabilmek için bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada laboratuvar ortamında kayaç örneklerinin radyonüklid (K, U, Th) içerikleri analiz edilmiştir. Bazaltlar için minimum değeri $0.2 \mu\text{W}/\text{m}^3$ olarak elde edilirken kalk-alkalin granitler için max değer $4.2 \mu\text{W}/\text{m}^3$ olarak belirlenmiştir. Variskan granitlerindeki Th/U oranı normal değerden biraz yüksek çıkmıştır. Elde edilen veriler Variskan masifinin üzerinde daha önce elde edilen verilerle birlikte değerlendirilerek kabuğun radyojenik ısı üretimi dağılımını gösteren bir modelin oluşturulmasında kullanılmıştır.

Kukkonen ve Lahtinen (2001), Finlandiya'da bulunan Fenoskandiye kalkanının merkezinde toplamda 1150 yüzeylenmiş kayaç örneği üzerinde jeokimyasal bir araştırma yapmışlardır. Çalışma alanında Arkeen granitleri ve yeşil şistler ile Proterozoik granodiyoritleri bulunmaktadır. Yapılan çalışmada tüm örneklerinin yoğunlukları ve radyonüklid analizlerinden elde edilen U, Th ve K değerleri kullanılarak ısı üretim oranları hesaplanmıştır.

Bu parametre ile birlikte kayaçların petrofiziksel özellikleri, temel bileşimleri, litoloji türleri ve temel tektonik yapılarla ısı üretim oranı değerleri arasındaki ilişkide ortaya çıkarılmıştır. Hesaplanan ısı üretim oranı kuyularda ölçülen ısı akısı değerleri ile de karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak ısı üretim oranının Arkeen'den Proterozoike'e doğru arttığı ve radyojenik ısı üretim değerlerinin dağılımında bir heterojenlik ve uzaysal değişimlerin olduğu da ortaya çıkarılmıştır.

Pasquale vd. (2001), tarafından İtalya'nın kuzey batısında yer alan Alp-Apenin sınır zonu üzerindeki yüzeylemiş kayaçların radyojenik ısı üretim değerlerinin belirlenmesi amacıyla yapılan çalışmada toplanan kayaç örnekleri gama-ışını spektrometresiyle laboratuvar ortamında analiz edilmiştir. Isı üretim oranları tortul kayaçlar için 1.05 (kireçtaşı)-2.52 $\mu\text{W}/\text{m}^3$ (şeyler) ve ofiyolitler için 0.04 (serpentin)-0.24 $\mu\text{W}/\text{m}^3$ (metobazalt) arasında değişirken en yüksek değer ortognayslarda 2.92 $\mu\text{W}/\text{m}^3$ olarak hesaplanmıştır. Çalışmada radyonüklidlerin ısı üretimine olan katkıları da belirlenmiş olup ortognayslarda K katkısı %17, sedimentlerde Th katkısı %43 ve dolomitlerde U'nun radyojenik ısı üretimine katkısı %97 olarak hesaplanmıştır. Kalk-şist, şeyl, radyolarit ve fillitlerdeki Th/U oranının 3-4 aralığında değiştiği ve bu değerlerin ortognayslar için hesaplanan değerlere çok yakın olduğu gözlenmiştir. Th/U oranı kireçtaşı, dolomit ve ofiyolitlerin çoğunda düşük olarak bulunmuştur. Kayaçlardaki K/Th oranının büyük çoğunlukta 2×10^3 - 4×10^3 aralığında değiştiği görülmüştür.

El-Shershaby (2002), Mısır'ın kuzey doğu çölünde yer alan granitlerin radyoaktivitelerini yüksek saflıktaki bir Germanyum spektrometresi kullanarak belirlemeye çalışmıştır. Çalışma alanından toplanan 50 örnek analiz edilmiş ve sonuçlar Bq/kg cinsinden sunulmuştur. Yapılan analizler sonucunda U ve Th radyonüklidlerinden elde edilen doz oranları 165-27851 Bq/kg, 71-274 Bq/kg arasında değişirken K'nın çok küçük değişimler gösterdiği görülmüştür. Ayrıca çalışılan granit alanı için radyolojik tehlike parametreleri de hesaplanarak alanın radyolojik tehlike haritası da oluşturulmuştur. Oluşturulan bu haritanın jeolojik oluşumlara bağlı olarak radyoaktivite seviyesinde meydana gelecek herhangi bir değişimin belirlenmesinde faydalı olabileceği de düşünülmüştür. Çalışma alanındaki granitlerde U içeriği çok yüksek olduğu için bu granitin yüksek ekonomik bir potansiyele sahip olduğu da ortaya çıkarılmıştır.

Chiozzi vd. (2002b), Güney İtalya'da Aeolian ada yayında farklı yaşlara sahip ve yüzeylenmiş olan üç temel volkanik kayaç için radyoaktif ısı üretimi değerlerini hesaplamışlardır. Th/U oranı tüm kayaç türleri için 3.3 civarında elde edilmiştir. Bazaltlar düşük izotop içeriğinden dolayı düşük radyoaktif ısı üretimi oranı ($0.6 \mu\text{W}/\text{m}^3$) gösterirken, trakitik ve riyolitik lavlar ise yüksek değerler ($6.6\text{-}7.1 \mu\text{W}/\text{m}^3$) göstermişlerdir.

Tzortis vd. (2002), Kıbrıs'ta baskın olarak bulunan jeolojik formasyonların karasal gama radyasyonlarını ölçmüşlerdir. Çalışma alanındaki her bir kayaç türünden toplanan örnekler laboratuvar ortamında 24 saatlik ölçümlere tabi tutulmuştur. Ölçülen gama-ışını spektrumlarından Th, U ve K aktivite konsantrasyonları sırasıyla $1.3\text{-}52.8 \text{ Bq/kg}$, $0.9\text{-}90.3 \text{ Bq/kg}$ ve $13\text{-}894 \text{ Bq/kg}$ olarak belirlenmiştir. Havada absorblanmış doz oranının ise bölgenin jeolojik yapısına bağlı olarak $0.1\text{-}50 \text{ nGy/h}$ arasında değiştiği görülmüştür.

Eccles ve Sutton (2003), Alberta Kimberlitleri ile onların ana kayaçları arasında bir karşılaştırma yapabilmek için Alberta ultramafikleri ile Devoniyen geç kretase tortulları üzerinde manyetik suseptibilite ölçümleri yapmışlardır. Yapılan ölçümler sonucunda kimberlitik kayaçların manyetik suseptibilite değerlerini $0.19\text{-}52.7 \times 10^{-3} \text{ SI}$, kimberlitli şeyl içeren orta geç Kretase tortullarının ise manyetik suseptibilite değerlerinin $<0.15 \times 10^{-3} \text{ SI}$ olduğu görülmüştür. Çalışma Alberta'da yapılacak olan bir elmas arama çalışması ile ilişkili olarak havadan yapılacak manyetik araştırmalar için bir ön bilgi oluşturulması amacıyla yapılmıştır. Kimberlitlerde manyetik suseptibilite değerlerinin düşük olduğu yerlerde elmas bulunan alanları göstermektedir.

Menon vd. (2003); granit, gnays ve Granodiyoritlerde bulunan ve ısı üretimine katkısı olan U, Th ve K elementlerinin miktarını belirlemek için yerinde radyoaktivite ölçümleri yapmışlardır. Yapılan çalışmada iri taneli granitlerde ısı üretim miktarı $5.5 \mu\text{W}/\text{m}^3$ olarak hesaplanırken tonalitik gnayslarda bu değer $1.4 \mu\text{W}/\text{m}^3$ olarak hesaplanmıştır. Çalışma alanının içinde yer alan ve katalostik biotitli gnaysların bulunduğu jeotermal alanda ise ortalama ısı üretim miktarı $7.4 \mu\text{W}/\text{m}^3$ olarak bulunmuştur.

Tzortzis ve Tsertos (2004), Kıbrıs'taki yüzey topraklarının U, K ve Th element konsantrasyonlarının belirlenmesi amacıyla yüksek çözünürlüğe sahip bir gama-ışını spektrometresi kullanılarak kapsamlı bir çalışma yapmıştır. Farklı litolojik birimlerin bir arada bulunduğu alandan 115 toprak örneği toplanmış ve gerekli laboratuvar aşamalarından geçirilerek her bir örneğe ait U, Th ve K radyonüklid konsantrasyonları ölçülmüştür.

Ölçülen gama-ışını spektrumlarından ortalama element konsantrasyonları Th için ($1.2 \pm 1.7 \mu\text{g.g}^{-1}$), U için ($0.6 \pm 0.7 \mu\text{g.g}^{-1}$) ve K için (0.4 ± 0.3) olarak hesaplanmıştır. Elde edilen ortalama değerlerin literatürde verilen ortalama değerlerden çok küçük olduğu görülmüştür. Çalışmada ölçülen radyonüklid konsantrasyonlarının birbirleri arasındaki ilişkide incelenmiştir. İnceleme sonucunda ilişki katsayısı Th-U arasında 0.93, K-U arasında 0.84 ve K-Th arasında 0.90 olarak hesaplanmıştır.

Örgün vd. (2005), Eskişehir'in güneydoğusundaki plütonların radyoaktivite seviyesini ve bu radyoaktivitenin yer altı sularına olan etkisini belirlemek için bir çalışma yapmışlardır. Kaymaz ve Sivrihisar Plütonlarından 14 granit örneği ile bu Plütonlara yakın alanlardan 11 yer altı suyu örneği toplanarak analiz edilmiştir. Analiz sonucunda kayalarındaki aktivite konsantrasyonlarının U için 43.59-651.80 Bq/kg, Th için 51.16-351.94 Bq/kg ve K için ise 418.5-1618.03 Bq/kg arasında değiştiği görülmüştür. Havada absorbe edilen doz değeri ise 87.14-531.81 mGy/h arasında ölçülmüştür. Elde edilen tüm sonuçlar değerlendirildiğinde Kaymaz plütonuna ait aktivite konsantrasyonlarının hem Sivrihisar plütonuna ait değerlerden hem de literatürde granitik bileşimli magmatik kayalar için belirlenen sınır değerlerden yüksek olduğu görülmüştür.

Tzortzis ve Tsertos (2005), yüksek çözünürlüğe sahip bir gama-ışını spektrometresiyle Troodos ofiyolitlerinin bulunduğu alanın doğal radyonüklid element içeriğini araştırmıştır. Çalışmada ilgilenilen alanın jeolojik yapısını tam olarak yansıtabilecek 69 örnek toplanmıştır. Örnekler üzerinde yapılan element analizi sonucunda Th (2.5×10^{-3} ppm), U (8.1×10^{-4} -0.6 ppm) ve K (1.3×10^{-4} -1) miktarları belirlenmiştir. Analiz edilen toprak örneklerindeki ortalama konsantrasyon değerlerinin kayaç örneklerindeki konsantrasyon değerlerinde düşük olduğu gözlemlenmiştir. Th/U oranı 2-4 arasında değişirken K/Th oranının 1.5×10^3 - 3×10^4 arasında değişmektedir. Kayaç ve toprak örnekleri arasındaki radyonüklid konsantrasyon farkının kayaların ayrışma süresince radyonüklidlerin orijinal miktarlarını koruyamamalarından kaynaklandığı düşünülmüştür.

Yang vd. (2005), tarafından Xiazhuang graniti üzerindeki toprakların doğal radyoaktivitesi belirlenmiştir. 55 örneğin radyonüklid analizi yüksek saflıktaki Germanyum dedektörü kullanılarak yapılmıştır. Çalışma alanında ^{232}Th 'ın radyoaktivite konsantrasyonu çok küçük değişimler gösterirken ^{238}U (40.2-442 Bq/kg) ve ^{40}K (442-913 Bq/kg) radyonüklid konsantrasyonunda oldukça yüksek değerler gözlemlenmiştir.

Granit alanlarındaki doğal radyoaktivitenin neden olduğu radyolojik tehlikenin belirlenmesi için tehlike parametreleri hesaplanarak uluslararası kabul gören değerlerle karşılaştırılmıştır. Çalışma alanı U madenine çok yakın olduğu için U ve K değerleri çok yüksek çıkmıştır. Elde edilen verilerin granit tipi U yataklarının aranmasında kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Aydın vd. (2006), radyo element konsantrasyonu bakımından zengin olan Orta Anadolu'daki volkanik ve magmatik kayalar üzerinde havadan yapılan etütlerin spektrometrik verilerini kullanmışlardır. Radyoaktif mineral aramalarında kullanılan havadan gama-ışın spektrometri verilerinin, volkanik ve magmatik kayaların petrokimyasal sınıflamasında ek bir yöntem olarak kullanılabileceğini göstermişlerdir. Granit, monzonit, siyenit gibi asidik sokulumlar üzerindeki araştırma verileri ile radyoelement konsantrasyonlarının geniş bir aralıkta olduğunu ortaya koymuşlardır (K için 2-6 %, U için 3-15 ppm ve Th için 10-52 ppm). Volkanik kayaların litolojik bileşimlerinin ve lokasyonlarının, radyoaktif madde konsantrasyonları üzerinde etkili olduğunu ve volkanik kayaların yüksek K (% 4), U (10 ppm) ve Th (35 ppm) konsantrasyonlarına sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Abbady vd. (2006), Mısır Doğu çölünden topladıkları 205 kayaç örneği (volkanik ve metamorfik) laboratuar ortamında Germanyum dedektörüyle analiz edildikten sonra element konsantrasyonları belirleyerek bu kayaların radyojenik ısı üretim miktarlarını hesaplamışlardır. Volkanik kayaların ısı üretim miktarları 0.11 (bazalt) - 9.53 $\mu\text{W}/\text{m}^3$ (granit) arasında değişirken metamorfik kayaların 0.28 (serpentin)-0.91 (metagobro) $\mu\text{W}/\text{m}^3$ arasında değiştiği görülmüştür. Metamorfik kayalarda U, Th ve K'nın ısı üretimine katkısı %51, %31 ve %18 iken volkanik kayalarda bu oran %76, %19 ve %5 olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak elde edilen değerlerin literatürde kabul edilen ortalama değerlerle uyumlu olduğu görülmüştür.

Matolin ve Stranik (2006), tarafından Çek Cumhuriyeti'ndeki Zdanice hidrokarbon alanının üzerinde bulunan kayaların petrofiziksel ve jeokimyasal değişimleri araştırılmak istenmiş ve bu amaçla 2 profil boyunca gama-ışın spektrometresi ölçümleri yapılmıştır. Yapılan ölçümlerle elde edilen veriler haritalanmıştır. Haritada Th, K ve U'nun önemli bir oranda azalım gösterdiği yerler ele alınmış ve bu alanların petrol üreten kayaların bulunduğu yere karşılık geldiği sonucuna ulaşılmıştır.

Merdanoğlu ve Altınsoy (2006), tarafından yüksek radyonüklid konsantrasyonuna sahip granit gibi magmatik kayaların bulunduğu Kestanbol (Çanakkale) bölgesinde yapılan çalışmada, ilk 10 cm derinlikten alınan toprak örneklerinde U, Th, K ve Cs aktiviteleri bulunmuştur. Çalışmada ayrıca havada soğrulan gama doz değerleri, radyum eşdeğer aktivite değeri, dış kaynaklı tehlike indisi hesaplanmıştır. Bölgeden alınan toprak örneklerinde yapılan ölçüm sonuçlarına göre U, Th ve K ortalama aktiviteleri sırasıyla 115, 192 ve 1207 Bq/kg, Cs' nin ise 0,37 ile 36,03 Bq/kg aralığında değiştiği bulunmuştur. Radyonüklid aktivitelerinin ve soğrulan doz oranlarının, bölgenin granit olması nedeniyle dünya ortalamalarının üzerinde olduğu gözlenmiştir.

Al-Saleh ve Al-Berzan (2007), Riyad bölgesindeki farklı fabrikalardan topladıkları mermer ve granit örneklerinin doğal radyonüklid içeriklerini incelemiştir. Granitlerde ^{238}U konsantrasyonu 0.03-314.4 Bq/kg, ^{232}Th konsantrasyonu 0.02-186.4 Bq/kg ve ^{40}K konsantrasyonu 0.28 -1531.7 Bq/kg arasında ölçülmüştür. Çalışmada ayrıca tüm örnekler için absorblanmış doz oranı, radyum eşdeğer aktivitesi ve radyasyon tehlike indisleri de hesaplanmıştır.

Lundin ve Bastani (2007), İsveç'te iki bölgede de farklı yüzeylenme dağılımı gösteren bazı Granodiyoritlerin incelenmesi amacıyla havadan manyetik ve spektrometrik ölçümler ile yerden gravite ölçümleri yaparak değişimleri belirlenmeye çalışmışlardır. Granodiyoritli alanların petrofiziksel özelliklerindeki değişimlerin detaylı olarak incelenmesinde kayaç örneklerinin manyetik duyarlılıkları ve yoğunlukları kadar yer gama-ışını spektrometre verileri de kullanılmıştır. Havadan yapılan spektrometre ve yerden yapılan gravite ölçümleri sonucu elde edilen verilerle K, U ve Th konsantrasyonlarının yüksek, Bouguer anomalisinin düşük olduğu yerlerin granitik bileşimin çok daha fazla olduğu yerlere karşılık geldiği ortaya çıkarılmıştır.

Asfahani vd. (2008), U göç derecesini değerlendirmek ve radyonüklid değişimlerini tanımlamak için önceden belirlenen 11 litolojik birimin eU, eTh, K ve bunların radyoelement oranları arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Bu çalışmada; farklı litolojik birimlerin ayırt edilebilmesi, birimlerdeki radyoelement dağılımlarının ortaya çıkarılması ve bu birimlerin sahip oldukları U potansiyellerine göre uygunluk derecelerinin belirlenebilmesi için U uygunluk indeksi (U_I) ve alterasyon göstergesi (F) kullanılmıştır. Tüm litolojik birimlerde farklı derecelerde U taşınımı olduğu görülmüştür.

Zayıf olarak nitelendirilen bu taşınım, çalışma alanında sınırlı bir U taşınımı göstermektedir. Çalışmanın sonucunda Abou Qila bölgesindeki U birikiminden dolayı bu alan U aramaları için en uygun jeolojik model olarak önerilmiştir.

El-Glay vd. (2008), Mısır'da GD Sina'da Wadi Naseib bölgesindeki tortul kayaçların doğal radyoaktivitesini ve bunların çevresel etkilerini incelemişlerdir. Bölgedeki kayaçlar erken-geç paleozoik yaşlı olup, bir kısmında mineralleşmeler gözlenirken, bir kısmında da mineralleşmeler gözlenmemiştir. Bölgedeki radyometrik incelemeler, mineralize olmuş kayaçlarda U ve Th içeriğinin sırasıyla 710 ve 520 ppm'e kadar yükseldiğini göstermiştir. Bu artış, bazı ikincil U minerallerinin varlığına dayandırılmıştır. Mineralleşmemiş tortullarda, maruz kalma ve doz oranları halk sağlığı açısından güvenlik sınırlar içinde bulunmuştur. Beklenen düşük çevresel etkiler sınırlı U mineralizasyona dayandırılmıştır.

Joshua ve Alabi (2012), NaI detektörüyle kayaç örnekleri ve topraktaki radyoaktif element konsantrasyonlarını ölçerek radyojenik ısı üretim miktarını hesaplamışlardır. Çalışmanın sonucunda, çalışma alanının ortalama toplam ısı üretiminin jeolojik kayaç türlerini tam olarak yansıttığı sonucuna varmışlardır. Granit, metamorfik alanlarda ısı üretiminin fazla sedimentli alanlarda düşük olduğu ortaya çıkarılırken ısı üretimine en çok Th elementinin katkıda bulunduğu belirtilmiştir.

Oniku vd. (2008), tarafından yapılan çalışmada Zaria graniti üzerinde manyetik suseptibilite ölçümleri alınmış ve değerlerin $29-3506 \times 10^{-6}$ SI arasında değiştiği görülmüştür. Ölçülen suseptibilite değerlerindeki büyük değişimin; ölçüm alanındaki kayaç türlerinin farklılığından ve yüzeylemiş kayaçlardaki manyetik mineral içeriğinin büyük oranda değişim göstermesinden kaynaklandığı düşünülmüştür. Bazı kayaçlarda magnetit, ilmenit ve hemotit gibi ana mineraller, bazı kayaçlarda ise feldispat, kuvars ve biotit gibi iz mineralleri gözlemlenmiştir. Elde edilen verilerin frekans dağılımlarında ise bimodel bir dağılım göze çarpmıştır. Bunun nedeninin granitlerdeki paramanyetik minerallerin bulunduğu örneklerin düşük pik, magnetit-hemotit gibi minerallerin baskın olarak bulunduğu örneklerin yüksek pik vermesidir. Ayrıca granitlerde bulunan hemotit ve ilmenit minerallerinin magnetit minerallerinin alterasyona uğramasından dolayı oluşmuş olabilecekleri sonucuna varılmıştır.

Uyanık ve Akkurt (2009), bu çalışmada Isparta volkanitleri içinde yer alan ve Traki-andezitlerle örtülü Çünür Tepesi ve civarının radyoaktif element içeriği (K, U ve Th) gama Işın Spektrometresi ile ölçülmüştür. Ölçümler 16 km²'lik bir alanda Çünür Tepesi ve tepenin doğusundaki kireç taşlarını kapsayacak şekilde yapılmıştır. Ölçüm sonuçları radyoelement konsantrasyonu olarak haritalandırılmıştır. Bu haritalar incelendiğinde Çünürtepe'nin radyoelement konsantrasyonları literatürde Traki-andezit ve kireç taşı için verilen değerlerle uyumlu olduğu görülmüştür.

Bastos ve Appoloni (2009), yaptıkları çalışmada kayaçlardaki Th, K ve U içeriğini belirlemek için yüksek çözünürlüğe sahip gama-ışın spektrometresi kullanmışlardır. Bu kayaçların bulunduğu bölge, Paleozoyik ve Mesozoyik döneme ait tortul havzalarla kesilmiştir. Bölgeden 14 farklı formasyona ait 87 kayaç numunesi üzerinde gama doz oranı ölçümleri yapılmış ve bu değerlerin yüksek olduğu bölgelerin riyoalit ve granit gibi felsik kayaçlara karşılık geldiği ortaya çıkarılmıştır.

Din (2009), Mısır'daki fosfatlı kayaçların radyojenik ısı üretim miktarlarını belirlemek için Doğu Çölü, Batı Çölü ve Nil Vadisi olmak üzere üç farklı alandan özellikle kayaçların mostra vermiş kısımları üzerinde radyoaktif ölçümler yaparak bu alanlardaki radyoaktif U, Th ve K konsantrasyonlarını belirlemiştir. Daha sonra bu konsantrasyon değerlerini Rybach (1982)'in radyojenik ısı üretim formülünde yerine koyarak her bir örneğe ait ısı üretim miktarı belirlenmiştir. Mısır'daki fosfatlı kayaçlar U ve Th'ca zengin olduğu için U'nun ısı üretimine % 80'lik bir katkı sağladığı görülmüştür. Bölgede daha önce metamorfik ve volkanik kayaçlar üzerinde yapılan çalışmalara göre daha yüksek değerler elde edilmiştir. Çalışma sonucunda U'ca zengin olan Batı çölünde değerlerin yüksek, diğer bölgelerde daha düşük olduğunu gözlemlemiştir.

Posquale vd. (2009), Antartika'da bulunan Mt. Melbourne volkanik alanındaki mafik lavların termal, radyoaktif ve manyetik özelliklerini araştırmışlardır. Yaptıkları çalışmada radyoaktif K, Th ve U izotoplarının konsantrasyonu gama ışını spektrometresiyle ölçülmüştür. Alınan trakit örnekleri üzerinde yapılan çalışmanın sonucunda; termal iletkenliğin poroziteye bağlı olmadığı, ısı kapasitesinin ve termal yayılımının çok az değişkenlik gösterdiği, lavların radyojenik ısı üretim oranlarının düşük ancak içlerinde bol miktarda ısı üreten elementin bulunduğunu göstermişlerdir. Manyetik suseptibilite değerleri diğer fiziksel özelliklere göre daha çok değişim göstermiştir.

Abbady (2010), Mısır'daki Nil vadisi ve Doğu çölünde yüzeylenmeler gösteren sediment kayalar üzerinde bir çalışma yapmıştır. Çalışmada toplam 103 kayaç örneği toplanmış ve gama-ışını ölçümleri yapılarak (K, U ve Th) bozunmalarından kaynaklanan U, Th ve K konsantrasyonları ölçülmüştür. Bu verilerle bu kayaların ısı üretim miktarları hesaplanmıştır. Çalışmanın sonucuna göre, Doğu çölündeki ısı üretimi $0.94-5.22 \mu\text{W}/\text{m}^3$, Nil vadisindeki değer $0.82-7 \mu\text{W}/\text{m}^3$ 'dür. Çalışmada Doğu Çölü için, ısı üretimine U'nun %62'lik, Th'nin %24'lük ve K'nın %4'lük bir katkısı olduğunu ortaya çıkarmıştır. Nil'deki ise sırasıyla %69, %26.9 ve %3.5 olarak bulunmuştur. Ayrıca çalışmada ısı üretim miktarının sediment derinliğine bağlı olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Asfahani vd. (2010a), yaptıkları çalışmada Suriye'de bulunan Froqlos-Jabal Abou Rabah bölgesindeki U oluşumlarının şekillenmesi için gerekli olan uygun jeolojik ve hidrojeolojik şartların belirlenmesi için spektrometrik gama-ışını yöntemini kullanarak 80 kayaç örneğindeki eU, eTh ve K konsantrasyonlarını belirlemişlerdir. Buna ek olarak sığ ve derin yer altı sularındaki U konsantrasyonları da ölçülmüştür. Çalışma alanı fosfatlı kayalardan dolayı yüksek U konsantrasyonları elde edilmiştir. eU, eTh konsantrasyonları ile eU/eTh oranı kullanılarak U göç eğilimi ve U taşınımı analiz edilmiştir. Farklı yaşlara sahip jeolojik formasyonlardaki eU ve eU/eTh arasındaki pozitif ilişkiyle eTh ve eU/eTh arasındaki negatif ilişki ikincil U taşınımını desteklemektedir. Yeraltı suyunun, U cevherinin depolanma ve taşınmasındaki rolü de araştırılmıştır. Araştırma sonucunda derinlerdeki suların yüzeye yakın sulardan daha az oksijen içerdiği ve buna bağlı olarak da U taşınmasında yeraltındaki suların çok önemli bir role sahip olmadıkları ortaya çıkarılmıştır. Elde edilen sonuçların birleştirilmesiyle oluşturulan radyoaktif ve jeolojik kesitlerden 4 radyoaktif anomali zonu gözükümüştür. Kuzey Froqlos'daki yüksek U konsantrasyonuna yüzeylenmiş fosfatlı kayaların neden olduğu düşünülürken diğer 3 alandaki yüksek U konsantrasyonuna ise bölgedeki evaporitlerin neden olduğu ileri sürülmüştür.

Ramasomy vd. (2010), Hindistan'da yaptığı çalışmada Ponnaiyar nehrinden 40 sediment örneği toplanmış ve bu örneklerin radyoaktivite, manyetik suseptibilite ve mineralojik bileşimleri belirlenmeye çalışılmıştır. Nehrin son 100km'lik kısmında yüksek suseptibilite değerleri gözlenmiştir. Manyetik tanelerdeki değişimin anlaşılması için bu hesaplamalar yapılmıştır.

U, Th ve K elementlerinin konsantrasyon değerlerinin bazı yerlerde aşırı değerlere çıktığının belirlenmesinin yanı sıra, Hindistan'daki bu değerler dünyadaki ortalama konsantrasyon değerlerinin altında kalmıştır. Çalışma sonucunda alanın manyetik duyarlılık ve konsantrasyon değerlerinin alanın kil içeriğiyle kontrol edildiği sonucuna varılmıştır.

Papadopoulos vd. (2010), gama-ışını spektrometresini kullanarak Yunanistan'ın güneyindeki Plütonların ^{40}K , ^{226}Ra ve ^{232}Th aktivite konsantrasyonlarını belirlemek için bir çalışma yapmışlardır. Örneklerin büyük çoğunluğundaki K, Ra ve Th aktivitelerinin toprak ve bina malzemelerinde bulunan ortalama radyonüklid seviyesini aştığı görülmüştür. Asidik kayalar K, Ra, Th ve bozunma ürünleri açısından daha zenginken, bazik bileşimli örnekler çok düşük konsantrasyon değerleri sergilemiştir. Çalışma alanındaki kayaların radyolojik açıdan değerlendirilebilmesi için tehlike parametreleri belirlenmiştir. Aktivite konsantrasyonları ve tehlike indisleri tüm dünyadaki plütonik kayaların aktivite değerleriyle karşılaştırılmıştır. Yunanistan granitlerindeki ortalama tehlike indisleri ortalama değerlerinin altında bulunmuştur. Elde edilen sonuçlarla çalışılan granitlerin yapı malzemesi olarak kullanılabileceği ortaya çıkarılmıştır.

Akın ve Çiftçi (2011) tarafından yapılan bu çalışmada, Kırşehir Masifi'nin ısı akısı ve radyojenik ısı üretimi ve bunun jeolojik kaynakları araştırılmıştır. Sahadan alınmış kayaç örneklerinin ısı iletim değerleri kullanılarak bölgenin ısı akısı hesaplanmış ve bu değerler çalışma alanı için $53 \mu\text{W}/\text{m}^2$ ile $108 \mu\text{W}/\text{m}^2$ değerleri arasında değişim gösterdiği saptanmıştır. Ayrıca, Kırşehir Masifi üzerinde önceden derlenmiş olan havadan spektral gama-ışını verileri kullanılarak radyojenik ısı üretimi haritası oluşturularak çalışma alanının radyojenik ısı üretimi hesaplanmış ve bu değerler $0.62 \mu\text{W}/\text{m}^3$ ile $5.68 \mu\text{W}/\text{m}^3$ arasında kaldığı saptanmıştır. Isı akısı ve radyojenik ısı üretim haritalarının birlikte değerlendirilmesi sonucunda bölgenin ortalama ısı akısı değerlerinin %60-92'sinin manto kaynaklı, %8-38'sinin ise radyojenik kaynaklı olduğu hesaplanmıştır. Çalışma alanındaki radyojenik ısı üretimi, beklenildiği üzere, genel olarak bölgedeki genç Granodiyoritlerde yüksek anomali değerleri gösterdiği ortaya çıkarılmıştır.

Vallinayagam ve Singh (2011), Hindistan'ın batısında bulunan Diniran'daki volkanik-plütonik kayaların radyoaktif element içeriklerini (U, Th, K) belirleyerek radyojenik ısı üretim miktarlarını hesaplamış ve kayalar arasında radyojenik ısı üretim miktarlarına göre bir sınıflama yapmışlardır. Sınıflamaya göre; Lökokratik (açık renkli) granitlerin ısı üretim miktarı, pembe granitlerin ve riyolitlerin ısı üretim değerleri olarak hesaplanmıştır. Analiz edilen tüm kayaç türlerinin ortalama ısı üretim değerlerinin kıtasal kabuk için kabul edilen ortalama değerden oldukça yüksek olduğu görülmüştür. Elde edilen bilgiler ışığında bu bölgedeki yüzey ısı akısı ile kabuksal ısı üretimi arasında doğrusal bir ilişki olduğu sonucuna varılmıştır.

Gautom vd. (2011), Nepalese Lesser Himalaya'da karayolları boyunca yüzeylenmiş olan kayalar üzerinde manyetik suseptibilite ölçümleri yapmış ve bu ölçümler için küçük portatif bir suseptibilite ölçer kullanmışlardır. Yüzeylenmiş her bir kayaç üzerinde 15 ölçüm alınarak ortalama hesaplamıştır. Manyetik suseptibilite değerleri baskın olarak diamagnetik mineral içeren dolomit, kireçtaşı ve kuvarslı kumtaşında en küçük ($<0.1 \times 10^{-3}$ SI), şeyl ve şiştili kayalarda ($0.1-1.0 \times 10^{-3}$ SI) ve hematitçe zengin tortullarda traki-andezitler ile volkanik kökenli kum taşları amfibolit şiştlerde ($1-5.1 \times 10^{-3}$ SI) en yüksek olarak ölçülmüştür. Elde edilen veriler ışığında manyetik suseptibilite jeolojik formasyonların ayırt edilmesinde etkili bir parametre olduğu sonucuna varılmıştır.

Girault vd. (2011), Nepal'den toplanan 129 toprak örneği üzerinde ölçümler yaparak her bir örneğe ait manyetik suseptibilite ve etkin Radyum konsantrasyon değerlerini belirlemişlerdir. Eğimli bir alandan yatay profiller boyunca toplanan örneklerle ait manyetik suseptibilite ve etkin radyum konsantrasyon değerleri oldukça homojen bir dağılım göstermektedir. Nehir yakınındaki taraçalardan toplanan örneklerde etkin radyum konsantrasyonunun gençten yaşlıya doğru yavaşça bir artış göstermiştir. Buna karşın manyetik suseptibilite değerleri homojen bir dağılım sergilemiştir. Kathmandu tortullarında ise kum tabakasından kile tabakasına geçerken etkin radyum konsantrasyon değerlerinde büyük bir artış gözlemlenirken manyetik suseptibilite değerlerinin değişken bir şekilde arttığı görülmüştür.

Ali vd. (2012), granit alanlarında ölçülen U ve Th radyonüklid konsantrasyonlarının küçük ölçekli U yataklarının aranmasında uygun bir kaynak olup olmadığını araştırmıştır. Çalışmada Nagar Parkar (Pakistan) ve Malani (Hindistan) granitleri karşılaştırılmıştır. Malani granitlerindeki yüksek U ve Th konsantrasyonları bölgedeki hidrotermal aktiviteyle ilişkilendirilirken Nagar Parkar granitlerindeki yüksek U değerlerinin kaolin zonlarından kaynaklandığı düşünülmüştür. Malani granitlerindeki U/Th oranının 0.11-4.5 arasında değiştiği ve radyojenik ısı üretiminin de artan U ve Th içeriğiyle arttığı görülmüştür. U içeriğinin doğudan batıya doğru arttığı Malani granitlerindeki U zenginleşmesi açık bir şekilde ortaya çıkarılmıştır.

Assron vd. (2012), tarafından yapılan çalışmada paleozoik kayaçlarla örtülü uyumsuzlukların olduğu prekambriyen yaşlı temel kayaçların bulunduğu Moreid-Elsahu bölgesinin U potansiyeli araştırılmıştır. Alandaki paleozoik silsile yedi farklı formasyondan oluşmuştur. İnceleme alanında yerinde gama-ışını ölçümler doğu-batı yönlü ve birbirine paralel hatlardan oluşan bir alan üzerinde yapılmıştır. Oluşturulan gama-ışını spektrometre haritalarında alanın güney batısında ve bazı kısımlarında saçınmış halde bulunan ve oldukça yüksek olan radyoaktivite değişimleri gözlenmiştir. Bu alanlar Um Bogma formasyonu ve gibsit oluşumlarıyla ilişkilendirilmiştir. Bu nedenle Um Bogma formasyonu U aramalarının yapılacağı alan olarak belirlenmiştir. Çalışma alanında K konsantrasyonu % 0.1-6, eşdeğer U 0.3-208 ppm ve eşdeğer Th'ın ise 0.37-71.3 ppm arasında değiştiği görülmüştür. Yapılan çalışmalara ek olarak alanın tamamı radyolojik risk açısından da değerlendirilmiş olup alanın büyük bir kısmının radyasyon seviyesinin kabul edilebilir değerlerden düşük olduğu sonucuna varılmıştır.

Çetin vd. (2012), Türkiye’de yaygın olarak kullanılan 30 granit örneğinin doğal radyoaktivitesini araştırmıştır. Tüm örneklerdeki doğal radyonüklid konsantrasyonları germanyum dedektörlü bir gama-ışını spektrometresiyle belirlenmiştir. Ölçülen aktivite konsantrasyonları incelendiğinde ^{226}Ra ’un 0.7-186 Bq/kg, ^{232}Th ’un 0.5-249 Bq/kg ve ^{40}K radyonüklidinin aktivite konsantrasyonunun 0.4-1935 Bq/kg arasında değiştiği görülmüştür. Granit örnekleri için Radium eşdeğer aktivite, absorbe olmuş doz oranı, dış tehlike indisi ve yıllık efektif doz eşdeğeri de hesaplanarak uluslararası kabul gören değerlerle karşılaştırılmıştır. Mineralojik olarak da analiz edilen örneklerde büyük miktarda ortoklaz ve radyojenik minerallerin bulunması, aktivite konsantrasyonlarının yüksek çıkmasına neden olmuştur.

Heikal vd. (2012), yaptıkları çalışmada Sharm El Sheikh bölgesinde bulunan dere çökelleri ile birlikte bölgenin temel kayaç birimi olan granitlerin doğal radyoaktivite seviyelerini incelemişlerdir. Yapılan analizler sonucunda her bir kayaç örneğine ait eU, eTh, Ra ve K radyonüklidleri belirlenmiş olup alana ait eTh/eU ve eU/Ra oranları da hesaplanmıştır. Sonuçlara göre en yüksek radyoaktivite seviyesi feldspatlı granitler ve felsik dayklarda gözlenirken en düşük değer ise mafik dayklarda gözlenmiştir. Yapılan verilerde bu çalışmaya ek olarak granitlerde U göçünün olup olmadığı da araştırılmıştır. eTh-eU/eTh arasında çıkan negatif ilişki U ve Th dağılımında magmatik farklılaşmanın çok az etken olduğunu gösterirken, eU-eU/eTh arasındaki pozitif ilişki ise U zenginleşmesinin magmatik süreçlerden sonra olduğunu göstermektedir.

Okeyode (2012) Nijerya da ki Ogun nehirinde bulunan sedimentlerin element konsantrasyonlarını belirleyerek radyojenik ısı üretim oranlarını hesaplamıştır. Alandan alınan 32 sediment örneği gama-ışını spektrometresi ile analiz edilerek U, Th ve K miktarları belirlenmiştir. Sediment örneklerinin radyojenik ısı üretim oranları $0.48 \pm 0.1 \mu\text{W}/\text{m}^3$ ortalamayla $0.28-0.91 \mu\text{W}/\text{m}^3$ arasında değişmektedir. Radyonüklidlerin radyojenik ısı üretimine katkısı sırasıyla Th için %40.44, U için %31,57 ve K için %27.99 olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak çalışmada incelenen sedimentlerin radyojenik ısı üretim değerlerinin düşük olduğu görülmüştür.

Attia ve Shendi (2013), yaptıkları çalışmada önceden kaydedilmiş gama-ışını spektrometre verilerine 3 farklı analitik yöntem uygulayarak bölgenin radyoelement içeriğini ortaya çıkarmışlardır. Bu yöntemler; U göçü (içeri ve dışarı), U uygunluk indeksi ile birincil ve ikincil temel bileşenler ve faktör puanını içeren çok-değişkenli istatistiksel analizden oluşmaktadır. Elde edilen sonuçlarla El-Sheikh graniti kadar Umm granitinin de düşük uygunluk indeksli U kaynaklı kayaç olduğu ortaya çıkarılmıştır. Orijinal U içeriği, U göç oranı ve U uygunluk indeksi bir arada değerlendirildiğinde U göçünün doğudan batıya doğru olduğu ve U'nun çalışma alanının batı ve kuzey kısımlarında toplandığı görülmüştür. Oluşturulan haritalar incelendiğinde ise topografik olarak U'nun, yüksek dağlık alanlardan vadilerin ayrıldığı drenaj hatlarına doğru göç ettiği açık bir şekilde gözlenmiştir.

Aboelkhair vd. (2014), havadan gama-ışını spektrometre verileriyle uzaktan algılama verilerini birleştirerek Kadobora plütunda bulunan U'lu alterasyon zonlarını tanımlayarak haritalandırılmışlardır. Elde edilen veriler, cevherleşmenin olduğu radyoaktif alanlar ile cevherleşme türleri arasındaki farklılıklarının ve göç yollarının tanımlanmasında da kullanılmıştır. Gama-ışını spektrometre verilerine göre plütunun kuzey kısmında, ikincil U cevherleşmesine bağlı yüksek konsantrasyonlar izlenmiştir. Plütodaki max U konsantrasyonu 10 ppm Th konsantrasyonu ise 20 ppm olarak ölçülmüştür. Kadobora plütunu radyometrik olarak 3 kısma ayrılmıştır. Granitin güney kısmı U'ca fakirken, orta kısmı kısmen U'ca zengin ve kuzeyinde ise oldukça geniş bir alanda U'ca zenginleşme söz konusudur. U'nun yataklığı zonları araştırmak için temel bileşen analizi uygulanmış ve potansiyel alterasyon zonlarının haritalanmasında etkili bir teknik olduğu ortaya konulmuştur. Sonuç olarak uygulanan her iki yöntemin bir arada değerlendirilmesi ile ikincil U cevherleşmelerinin pegmatitlerle ilişkili alanlarda olduğu görülmüştür.

Gaafar ve Aboelkhair (2014), Kab amiri plütundaki farklı granit kütlelerinin radyoelement konsantrasyon dağılımlarını ve cevherleşme zonlarını kontrol eden yapısal değişimlerini incelemiştir. Jeolojik çalışmalarla biotitli granit, muskovitli granit, mikalı granit ve episyenit olmak üzere 4 farklı granit türü belirlenmiştir. Jeolojik ve jeofiziksel verilerle KB ve KD yönlü iki fayda ortaya çıkarılmıştır. Radyometrik analizler sonucunda alanın güney kısmında radyoaktif anomalilerin yoğunlaştığı ve aynı yönde U içeriğinde artış gösterdiği görülmüştür. Güneydeki bu artışın yüksek orandaki episyenitleşme ve U taşınımı ile ilgili olduğu düşünülmüştür. Artışın olduğu bu alanda U konsantrasyonu 370 ppm'lere ulaşırken eU/eTh oranı 4.5 olarak hesaplanmış ve alan KD yönünde eğilimi olan bir oval şekille karakterize edilmiştir.

Al-Hilal ve Aissa (2014), Sabkhat al Jabboul bölgesindeki ana jeolojik birimlerin doğal radyoaktivite seviyesini tanımlamak için eU, eTh ve K konsantrasyonlarının yanı sıra topraktaki radon gazının miktarını da belirlemişlerdir. Her bir jeolojik birimdeki farklı litofasiyelerden toplanan 45 kayaç ve toprak örneği gama-ışını spektrometre tekniği kullanılarak analiz edilmiş ve temel radyoelement konsantrasyon değerleri ölçülmüştür. Çalışma alanında farklı radyoaktif anomaliler olmamasına rağmen, radyometrik profillerde normal seviyeden yüksek değerlere çıkan küçük değişimler gözlenmiştir.

Araştırma alanından elde edilen konsantrasyon değerleri ve bu konsantrasyonlar arasındaki oranlar kullanılarak kuvaterner, neojen ve paleojen yaşlı formasyonlardaki U dağılımı ve taşınımı da belirlenmiştir. Çalışma sonucunda bölgenin radyoaktivite seviyesinin düşük ancak ülke genelindeki normal seviye aralığında olduğu ortaya çıkarılmıştır.

Gaafar (2014), Mısır Doğu Çölünde bulunan orta ve iri taneli albitli granitler üzerinde yaptığı mineralojik çalışmalara ek olarak yerin spektrometrik araştırma ile havadan manyetik haritalandırma yapmıştır. İri taneli granitlerdeki ortalama K, U ve Th konsantrasyonları sırasıyla % 4.5, 13 ppm ve 27 ppm olarak bulunurken, orta taneli granitlerdeki ortalama konsantrasyonlar % 4.5, 10 ppm ve 35 ppm olarak bulunmuştur. İri taneli granitlerdeki eU/eTh oranı yüksek magma farklılaşmasını bağlı olarak artmış ve 0.63 olarak hesaplanmıştır.

Maden ve Akaryalı (2015) Doğu Pontid orojenik kuşağında yer alan Gümüşhane plütonunun doğal radyonüklid içeriğini ve çalışma alanındaki kayaçların ısı üretimine olan katkısını belirlemiştir. Çalışmada; granitler için ortalama K, U ve Th değerleri 4.35 ± 0.71 , 5.85 ± 2.74 ppm, 22.13 ± 5.55 ppm, mikrogranitler için 4.3 ± 1.37 , 7.12 ± 2.23 ppm, 24.11 ± 9.59 ppm; metagranitler için 3.93 ± 0.68 , 6.24 ± 2.75 ppm, 12.87 ± 3.92 ppm ve andezit/bazalt için 1.75 ± 0.74 , 3.22 ± 1.07 ppm, 9.01 ± 5.14 ppm olarak bulunmuştur. Çalışma alanındaki granit, mikrogranit, metagranit ve andezit/bazaltik kayaçlar için ortalama radyojenik ısı üretimi ise $3.52 \pm 1.03 \mu\text{Wm}^{-3}$, $3.86 \pm 1.31 \mu\text{Wm}^{-3}$, $2.93 \pm 0.89 \mu\text{Wm}^{-3}$ ve $1.68 \pm 0.63 \mu\text{Wm}^{-3}$ olarak hesaplanmış olup alan için ortalama radyojenik ısı üretimi ($2.83 \pm 1.39 \mu\text{Wm}^{-3}$) üst kıtasal kabuk değerine çok yakın olarak hesaplanmıştır.

1.3. Çalışmanın Amacı

Bu tez çalışması, Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğünün (BAP) 9588 nolu proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada, Sarıçiçek granodiyoriti (Gümüşhane) ve Sarıhan granodiyoriti (Bayburt) ile bu kütlelerle sınır halinde bulunan formasyonların; doğal radyonüklid içerikleri, manyetik suseptibilite, radyojenik ısı üretim değerleri ve yoğunlukları gibi petrofiziksel özellikleri belirlenmiştir. Elde edilen bu petrofiziksel özellikler ile çalışma alanlarının jeolojileri ilişkilendirilmeye çalışılmıştır. Arazide yapılan ölçümlerle elde edilen petrofiziksel parametrelerin yanısıra kayaçların oluşum kökeni hakkında bilgi veren jeokimyasal element oranları ve kayaçlardaki doğal radyonüklidlerden özellikle U'nun göç eğilimi de belirlenmiştir.

Ayrıca yapılan radyoaktivite ölçümleriyle her iki çalışma alanında yaşayanların maruz kaldıkları radyasyon miktarı ve bu miktarın tehlike derecelerini gösteren parametreler de hesaplanmış olup çalışma alanları insan ve çevre sağlığı açısından da değerlendirilmiştir. Bu açıdan bakıldığında, bu çalışma insan sağlığı ve çevre açısından da literatüre önemli bilgiler sağlayacaktır. Yapılan çalışma, incelen alanların radyoaktif madde içeriği ve bölgedeki radyoaktivite seviyesi belirlendiği için bölgede daha sonra yapılacak olan diğer çalışmalar için de bir temel oluşturacaktır. Ayrıca bütün ölçümler yüzeyden yapıldığı için tamamen tahribatsız olan yöntemler kullanılmıştır.

1.4. Granitik Kayaçların Genel Özellikleri

1.4.1. Granitik Kayaçların Oluşumu

Gerek bulunuşları, gerek oluşum şekilleri, gerekse de birlikte bulundukları maden yatakları bakımından granitik kayaçlar yerbilimcilerin her zaman ilgisini çeken, önemli bir magmatik kayaç topluluğudur. Magmatik kayaçlar, kendi kendine hareket yeteneğine sahip karmaşık bileşimli doğal ergiyikler olan magmalardan meydana gelirler. Yer kabuğunun derin zonlarında, yüksek sıcaklık ve basınç altında bulunan magmalar, yüksek sıcaklıkları (yaklaşık 750°C–2000°C) ve bünyelerinde elementler ile bileşenler (silikatlar, oksitler, sülfürler, uçucu elemanlar, H₂O vb.) içeren doğal ergiyiklerdir.

Magma, magma odalarındaki konveksiyon akımlar, depremler, çok derin zonlara kadar inen fay zonları gibi jeolojik olaylar neticesi basınç azalırsa yer kabuğunun üst seviyelerine doğru yükselirler. Magmanın yer kabuğu içinde ve yüzeyindeki faaliyetlerinin tümüne magmatizma denir (Çoğulu, 1972; Erler, 1986).

Bir kısım magma yeryüzüne kadar ulaşma imkânını bularak volkanları oluştururlar ve lavlar halinde akarlar. Fakat yeryüzüne kadar çıkamayan büyük magma kütleleri yer kabuğunun çeşitli seviyelerine yerleşerek, yavaş yavaş soğurlar, kristalleşirler ve derinlik, intrüsif, sokulum ya da plütonik kayaçlar olarak adlandırılan magmatik kayaçları oluştururlar. Bu güne kadar yapılan arazi gözlemleri ve laboratuvar araştırmaları kökenlerine göre üç tür magmanın varlığını ortaya koymuştur. Bunlar; asidik magmalar, ultrabazik-bazik magmalar ile asidik ve bazik magmaların değişik oranlarda karışmasıyla oluşan Hibrid magmalardır (Çetin, 2011).

Granitik kayaçların kaynağı olan asidik magmaların kimyasal bileşimi geniş bir aralıkta değişir. K, Na ve Al açısından bazik magmalara göre daha zengin, buna karşın Fe, Mn, Mg ve Ca bakımından fakirdirler. Asidik magmalar ayrıca W, Mo, Sn, U, Th, Pb, Zn, As, Sb, F, REE (Nadir Toprak Elementler) açısından da bazik magmalara göre çok daha zenginleşmiştir. Bazik magmalar ise Silis tenörü (SiO_2) genelde % 50'nin altında olan, buna karşın Fe, Mg, Ca, Cr, Ni, Pt, Co, V ve Ti açısından zengin, viskozitesi düşük magmalardır (Çetin, 2011).

1.4.2. Granitlerin Tektonik ve Jeokimyasal Olarak Sınıflandırılması

I tipi Granitler: Normal alüminyum içerikli (meta alüminyum) kalk-alkali granitleri karakterize ederler. Birbirine yaklaşan ve böylece bir levhanın diğerinin altına daldığı bölgelerde magmatik kayaçların veya magmatik kayaçlardan türeyen sedimanların erimesi ve katılaşması ile oluşurlar. I takısı köken kayaçlarının magmatik bileşime sahip olduğunu göstermektedir. Kıvrım kuşaklarında görülen bu granitleri oluşturan magmalar, bazaltik bileşimdeki kayaçlardan türeyebileceği gibi, daha uygun olarak ortalama %60 SiO_2 içeriğine sahip magmatik kayaktan yani tipik andezitik kayaçlardan da türeyebilir. Mineralojik bileşimlerinde, ana mafik (çoğunlukla apatit kapanımları içeren hornblend ve biyotit) ve tali mineraller (manyetit, sfen ve apatit) içerirler. Genellikle granodiyorit, tonalit ve monzonitik granit ile temsil edilirler (url-1).

S tipi Granitler: Alüminyumca çok zengin (peralüminyum) granitik kayalardır. S takısı köken kayacın sedimanter olduğunu gösterir. Mineralojik bileşiminde; ana mafik mineral olarak biyotit ve muskovit, tali mineral olarak apatit, ilmenit, granat ve kordiyerit içerirler. Kıtasal çarpışma alanlarında yer alırlar. Granit ve lökomonzogranitler ile temsil edilirler (url-1).

A tipi Granitler: Çoğunlukla alkali karaktere sahip granitlerdir. Rift zonlarında ve duraylı kıtasal bölgelerde bulunurlar. A takısı anorojenik özellikle ilişkilerini gösterir. I ve S tiplerine göre daha az, ancak daha yaygın bulunurlar. Yüksek Fe/Mg oranına sahiptirler. Mineralojik olarak kuvars, alkali feldspat, az plajiyoklas ve Fe bakımından zengin mika, amfibol ve piroksen mineralleri ile peralkali bileşimde olan ribekit gibi alkali amfiboller içerir (url-1).

M tipi Granitler: Genellikle plajiyogranitlerle temsil edilirler. Bazı kıtasal levha kenarlarında bulunan ve kimyasal bileşimleri ada yaylarında bulunan volkanik kayaların kimyasal ve izotopik bileşimlerine benzeyen granitik kayalardır. I tipi granitlerin bir alt türü gibi düşünülebilirler. Muhtemelen dalan okyanus kabuğun erimesi ile ilişkili olarak mantodan türeyen çözeltilerden oluşurlar. M takısı manto kökenini işaret etmektedir. Bileşimlerindeki baskın mafik mineraller hornblend, biyotit ve piroksendir. Bazı bileşimli magmatik ksenolitler de içerirler. Ofiyolit dizilerinde ve nadir olarak okyanusal ada yaylarında gelişirler (url-1).

1.4.3. Granitik Kayaların Mineralojik Bileşimi

Granitik kayaların içerdiği ana (birincil), tali (ikincil) ve opak kayaç yapıcı mineraller ana hatlarıyla aşağıdaki gibidir:

Ana mineraller: Feldspat grubu mineraller (alkali feldspatlar ve plajiyoklaslar), kuvars, biyotit, amfibol grubu mineraller (hornblend, tremolit, diyopsit, vb.), piroksen grubu mineraller (ojit, diyopsit vb.)

Tali mineraller: Zirkon, sfen, apatit, turmalin, vb.

Opak mineraller: Manyetit, pirit, titan, ilmenit, vb.

Çalışma kapsamında incelenen ve granitik kayaç ana başlığı altında tanımlanan kayaç örnekleri çoğunlukla sınıflamalarda “granit, granodiyorit, kuvars monzodiyorit, kuvars diyorit, diyorit” olarak adlandırılan alt birimlere karşılık gelmektedir.

Diyagramlarda kuvars ve alkali feldispat oranlarının azalıp plajiyoklaz oranının artmasıyla granit alanından önce granodiyorit alanına, sonrada tonalit alanına geçilir. Kimyasal olarak da SiO_2 oranı granitten granodiyorit ve tonalite doğru geçtikçe hafifçe azalır, buna karşın Ca, Fe ve Mg oranı hafifçe artar.

Sınıflama diyagramlarında granit alanına düşen kayaçlar kimyasal olarak silis ve alkalilerce çok zengin, buna karşın kalsiyum, demir ve magnezyumca fakir kayaçlardır. Kimyasal bileşimlerdeki SiO_2 miktarı genellikle % 66'dan fazladır. Granit magmasında alkali feldispatlar, plajiyoklazlar, biyotit, hornblend gibi silikatlı minerallerin oluşumundan arta kalan Si, SiO_2 şeklinde serbest halde kristalleşerek kuvars mineralini oluşturur. Dolayısıyla granitin ana kayaç yapıcı mineralleri kuvars, alkali feldispatlar (ortoz veya mikroklin) asit plajiyoklaz ve biyotittir (Çetin, 2011).

1.4.4. Granitik Kayaçlar ve Doğal Radyasyon

Karasal radyoaktivite esas olarak yerel jeolojik ve coğrafik koşullara, özellikle kayaç tiplerine, bağlıdır. Kayaç ve topraklarda bulunan U, Th ve bu iki elementin bozunum ürünleri ile ^{40}K karasal radyasyonun temel kaynaklarıdır. K, kayaçlarda ve toprakta ağırlıkça, U ve Th' un 10000 katı kadardır. Doğadaki K'nın ancak %0,0118'i ^{40}K 'tır ve bunun da sadece %11'i gama ışınları yayınlar.

U, Th ve K jeokimyasal döngüde en kararsız elementler arasında bulunurlar; bu nedenle de bu elementlerin miktarları genellikle magmatik işlemlerin son evresinde, diferansiyasyon, fraksiyonel kristallenme, kısmi ergime vb. olaylar sırasında SiO_2 ve alkali miktarıyla birlikte artar ve asidik bileşimli kayaçlarda zenginleşirler (Wilson, 1989; Rollinson, 1993). Ancak, genellikle hem SiO_2 ve hem de alkalilerle birlikte kayaçların U içeriğindeki artışı Th'un artışından çok daha belirgindir (Örgün vd., 2005; Örgün vd., 2007; Yılmaz vd., 2010). U ve Th'un bozunum serileri, ana kayaç yapıcı mineraller olan kuvars, olivin ve piroksenlerde uyumsuz davranırken, bazı iz ve aksesuar fazlarda daha uyumludur yani bu minerallerde (örneğin zirkon ve sfen gibi) zenginleşebilir (Blundy ve Wood, 1999). Bu yüzden U ve Th; allanit, monazit, zirkon, apatit, sfen, thorit vb. radyojenik aksesuar mineral fazlarında zenginleşir (Finch ve Murakami, 1999).

K ise çoğunlukla alkali feldispatları, asidik plajiyoklazları ve mika grubu mineralleri tercih eder. U ve Th'lı bütün bu mineraller de, bazik-ultrabazik kayalardan çok, silise doygun asidik magmaların ürünü granitik kayalar (granit, granodiyorit, siyenit, vs) ve bunların yüzey kayalarında (riyolit, riyodasit, trakit vb.) zenginleşir (McDonough vd., 1992; Plant ve Saunders, 1996; Valkovic, 2000; Örgün vd., 2007).

Doğal radyoaktivite bakımından granitik bileşimli kayaların U ortalaması 5 ppm, Th ortalaması ise 15 ppm. Bu oranlar bazik ve ultrabazik kayalarda U için <1 ppm, Th için < 2 ppm'dir (Mason ve Moore, 1982; Van Schmus, 1995; Rudnick ve Gao, 2003). U'nun çözünmesine ve çökmesine neden olan ikincil hidrojeolojik işlemler ve hidrotermal alterasyon, yüzey bozunumu (weathering) ve faylanmalar gibi jeolojik olaylar granitik arazilerde lokal radyonüklid zenginleşmelerine neden olabilir (Tzortzis ve Tsertos, 2004; Örgün vd., 2005; Örgün vd., 2007). Bu yüzden daha yüksek radyasyon seviyeleri de bu kayalarla kaplı alanlarda ve bu kayalardan kaynaklanan sedimanter kayalarda, toprak ve plaj kumlarında ölçülür (Örgün vd., 2008).

2.1. Çalışma Alanlarının Tanıtımı

Şekil 2.1. Çalışma alanlarının yer bulduru haritası

Sarıççek granodiyoritinin bulunduğu inceleme alanı Gümüşhane il merkezinin yaklaşık olarak 30 km batısında (H43 bl-b2 paftaları arasında) ve Doğu Karadeniz Dağları'nın (Pontidler) yaklaşık güneydoğu kesiminde yer almakta olup yaklaşık olarak 7x2.3 km boyutunda elipsoidal bir şekle sahip olan granodiyoritin uzun eksenini KD-GB yönlüdür (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Sarıççek granodiyoritinin topoğrafyası (Serin Tepe'sinden kuzeydoğusunda bulunan Sarıççek Köyü'ne bakış)

Sarıhan granodiyoriti Bayburt'un yaklaşık 40 km güneyinde olup Trabzon H44 d1-d4 paftalarında içinde yer almaktadır. İnceleme alanının büyük kısmı Bayburt il sınırları içindeyken melanj kuşağının bulunduğu kısım ise Erzincan il sınırları içersindedir. Bu plüton ise yaklaşık 40 km²'lik bir alanda yüzlek vermektedir (Şekil 2.3).

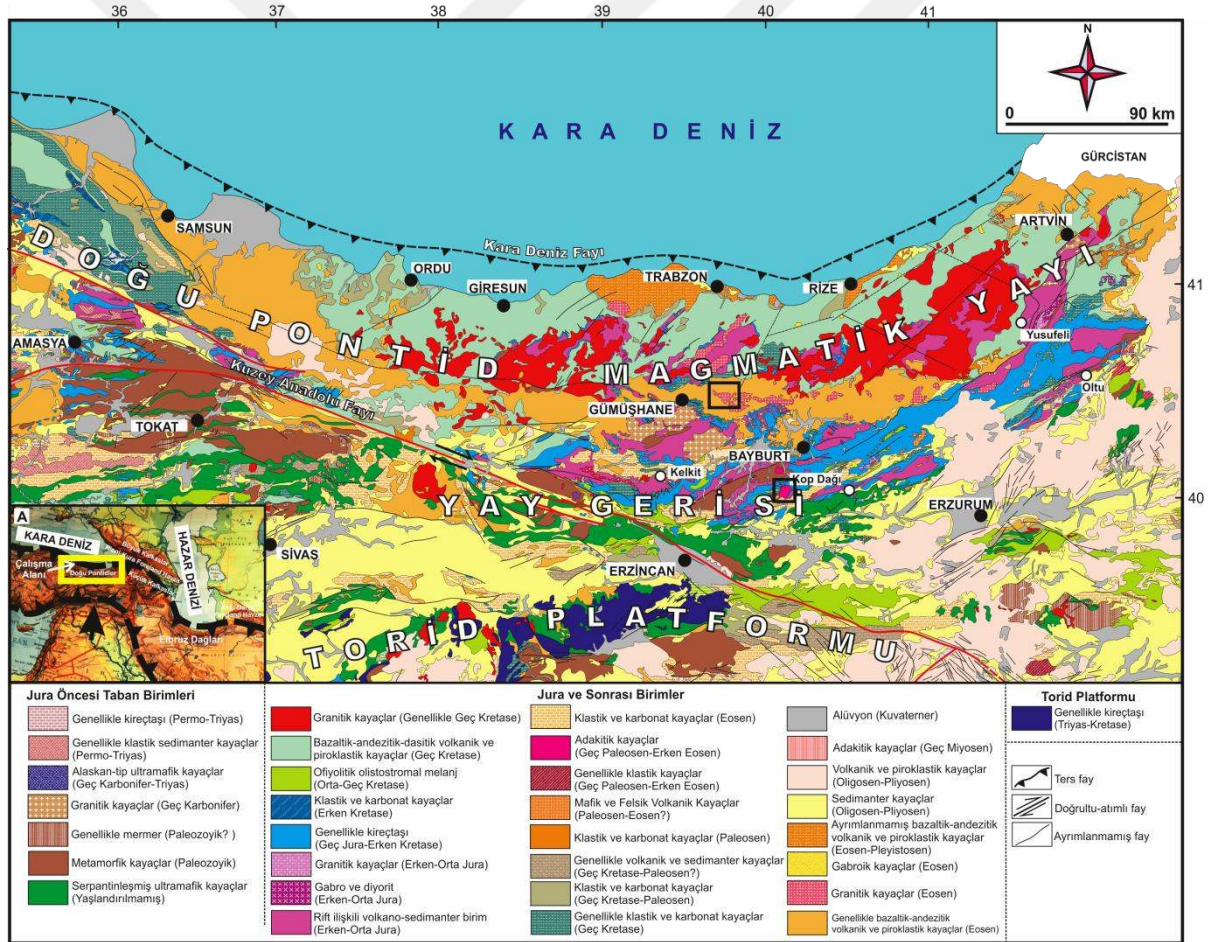


Şekil 2.3. Bayburt'daki çalışma alanından bir görünüm (Sarıhan Köyü'nden güneye doğru bakış)

2.2. Çalışma Alanlarının Genel Jeolojisi

2.2.1. Doğu Pontid Orojenik Kuşağı'nın Genel Jeolojisi

Alp-Himalaya sisteminin önemli bir parçasını teşkil eden ve coğrafik olarak yaklaşık Türkiye'nin Karadeniz ve Trakya Bölgelerine karşılık gelen Pontid Orojenik Kuşağı ilk kez Ketin (1966) tarafından isimlendirilmiştir. Günümüzde geleneksel olarak Doğu ve Batı Pontidler olmak üzere iki farklı alt birliğe ayrılan bu tektonik birimin jeodinamik gelişimi üzerine tartışmalar hala devam etmektedir. Çalışma tez sahasını da içine alan Doğu Pontid Orojenik Kuşağı (Şekil 2.4), farklı litolojik özellikler ve fasiyes değişimleri dikate alınarak Bektaş vd. (1995 ve 1999) tarafından kuzeyden güneye doğru Kuzey, Güney ve Eksen Zonları şeklinde üç alt birliğe ayrılmıştır.



Şekil 2.4. Doğu Pontid Orojenik Kuşağı'nda yüzeyleyen ana litolojik birimler (MTA'nın 1/500000 ölçekli jeolojik haritaları kullanılarak Eyüboğlu vd., 2016a tarafından derlenmiştir.).

Kuzey Zon'da genel olarak Geç Mesozoyik ve Senozoyik yaşlı granitik kayaçlar ve volkanik kayaçlar baskın litolojiyi oluşturmaktadır. Aynı zamanda özellikle Geç Kretase yaşlı felsik volkanik kayaçlar içerisinde bulunan masif sülfat mineralizasyonları bu zonun diğer zonlardan belirgin farklılıklar ortaya çıkmaktadır. Bununla birlikte sahil boyunca yüzeyleyen Eosen yaşlı gabrolar (Eyüboğlu vd., 2016a), Dereli civarında yüzeyleyen metamorfik kayaçlar, Özdil ve Tonya civarında bulunan Karbonifer yaşlı granitik kayaçlar (Kaygusuz vd., 2016) bu zonda karşılaşılan diğer litolojik birimlerdir.

Güneye doğru gidildikçe kuzeydeki magmatik kayaç ağırlıklı istif yerini sedimanter kayaçların baskın olduğu bir istife bırakır. Güney Zon olarak isimlendirilmiş olan bu kuşakta bölgenin taban kayaçlarını temsil eden Pulur, Tokat ve Ağvanis masifleri gibi büyük metamorfik kütleler yüzlekmekte olup (Topuz vd., 2004), bu kütleler Karbonifer yaşlı Gümüşhane ve Köse granitoidleri (Topuz vd., 2010; Dokuz, 2011) ve Karbonifer'den Triyas'a kadar değişen yaşlar sunan Alaskan tip mafik-ultramafik kayaç kütleleri tarafından kesilmektedir (Eyüboğlu vd., 2010). Bu taban kayaçlar tüm bölgede yaygın bir yüzlek alanına sahip olan Erken-Orta Jura yaşlı volkano-torul seri tarafından uyumsuz olarak örtülmekte veya Jura yaşlı intrüzyonlar tarafından kesilmektedir (Ağar, 1977; Eren, 1983; Eyüboğlu vd., 2016b).

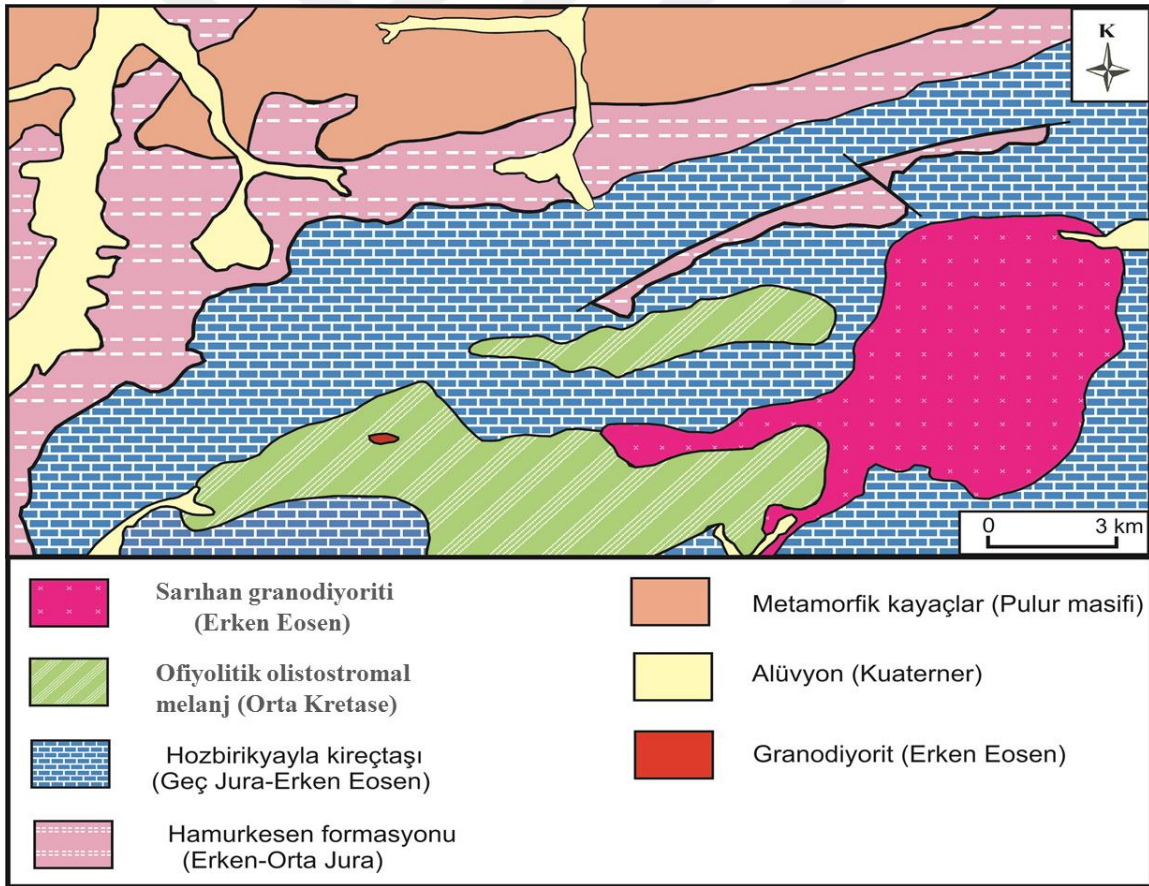
Geç Jura-Erken Kretase dönemi tüm bölgede tektonik ve magmatik açıdan duraylılık dönemine karşılık gelmekte olup, bu dönemde karbonat çökelimi gerçekleşmiştir. Volkano tortul seriyi örten ve ilk kez Pelin (1977) tarafından Alucra yöresinde Berdiga Formasyonu olarak isimlendirilen bu kireçtaşları Geç Kretase döneminde gelişen, genellikle kırıntılı kayaçlardan oluşan ve ilk kez Tokel (1972) tarafından Kermutdere Formasyonu olarak isimlendirilen birim tarafından örtülür (Eyüboğlu, 2015).

Paleosen dönemine ait kayıtlar bu zonda bugüne kadar tanımlanmamış olup, Erken Eosen dönemi çalışma kapsamında irdelenen Sarıhan Granodiyoritini de oluşturan adakitik magmatizma ile karakteristiktir (Topuz vd., 2005; Karşlı vd., 2010; Eyüboğlu vd., 2011a, 2011b, 2013). Tüm bu birimler Eosen yaşlı volkanik ve piroklastik ağırlıklı bir istiftten oluşan Alibaba Formasyonu (Tokel, 1972) tarafından örtülür ve Eosen yaşlı adakitik olmayan granitik kayaçlar tarafından kesilir (Arslan ve Aslan, 2006; Karşlı vd., 2007; Eyüboğlu vd., 2013).

Eksen Zonu'nda ise genellikle serpantinleşmiş olan ultramafik kütleler ve Miyosen yaşlı volkanik-sedimanter kayaçlar baskın kayaç litolojileridir (Eyüboğlu vd., 2016b). Çalışma kapsamında incelenen kütleler, Doğu Pontid Orojenik Kuşağı'nın Güney Zonu içerisinde yüzeyler. Aşağıda bu kütleler ve çevre kayaçları hakkında detay jeolojik bilgiler sunulmuştur.

2.2.2. Sarıhan Granodiyoriti

Güney Zon içerisinde yer alan ve çalışılan iki kütlede güneyde olanını temsil eden Sarıhan granodiyoriti, Doğu Pontidler'de adakitik bileşime sahip en büyük intrüziv kütlelerden biridir (Eyüboğlu vd., 2011a). Çalışılan bu kütleli içine alan bölge ilk kez MTA tarafından haritalanmış ve bu harita Aslan (1998) tarafından yapılan doktora tez çalışmasında ise kısmen revize edilmiştir (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. Sarıhan granodiyoriti ve çevre kayaçlarla olan ilişkisini gösteren jeolojik harita (Aslan, 2005; Eyüboğlu vd., 2011a).

İnceleme alanının en yaşlı birimi Permiyen dönemindeki düşük dereceli metamorfizma koşullarında metamorfize olmuş kayalardan oluşan Pulur Masifi'dir. Birim alan içinde kalan kesimde, fillat, fillit, şist ve kuvarsit gibi kayalardan oluşur (Topuz vd., 2004). Bu birim Erken-Orta Jura yaşlı olan ve alanda kalan kesimde genellikle kırıntılı sedimanter kayalar ile temsil edilen Hamurkesen Formasyonu tarafından uyumsuz olarak örtülür. İstif üste doğru Geç Jura-Erken Kretase yaşlı kireçtaşlarından oluşan Hozbirikyayla Kireçtaşı'na (Ağar, 1977) geçer, mafik-ultramafik bloklar da içeren Orta Kretase yaşlı Otlukbeli ofiyolitik olistostromal melanji ile devam eder ve Sarıhan granodiyoriti tarafından kesilir (Aslan, 2005; Eyüboğlu vd., 2011a).

Çalışma konusunu oluşturan Sarıhan granodiyoriti (Şekil 2.6) inceleme alanının güneydoğu köşesinde yuvarlağımsı şekilli bir kütle olarak yüzlek vermekte olup, Orta Kretase yaşlı Otlukbeli melanji ve Geç Jura-Erken Kretase yaşlı Hozbirikyayla Kireçtaşı ile dokanak oluşturmaktadır. Özellikle kireçtaşları ile olan dokanağı boyunca kontakt metamorfizma izleri ve skarn mineralizasyonları olağandır (Aslan, 2005).



Şekil 2.6. Yüzeylenmiş Sarıhan granodiyoritinden bir görünüm

Oldukça masif bir görünüm sunan kütle çok iyi gelişmiş ve dolgusuz olan kırık sistemleriyle karakteristiktir. Ayrıca kütle içerisinde yaygın olarak magma karışımını işaret eden mafik mikrogranüler anklavlar görülmekte olup, yer yer anklavların çapları 40 cm ye kadar ulaşmaktadır (Şekil 2.7). El örneğinde genellikle beyazımsı gri bir renge sahip olan kayaç içerisinde plajiyoklas ve amfibol minerallerini makroskopik olarak gözlemek mümkündür. Saha gözlemlerinde sağlam bir görünüme sahip olan Plüton içerisinde özellikle güney kısımlarda arenalaşma ve hidrotermal ayrışmaya bağlı olarak kayaçlar oldukça kolay bir şekilde parçalara ayrılmakta ve toprak şeklinde görülmektedir (Şekil 2.8).

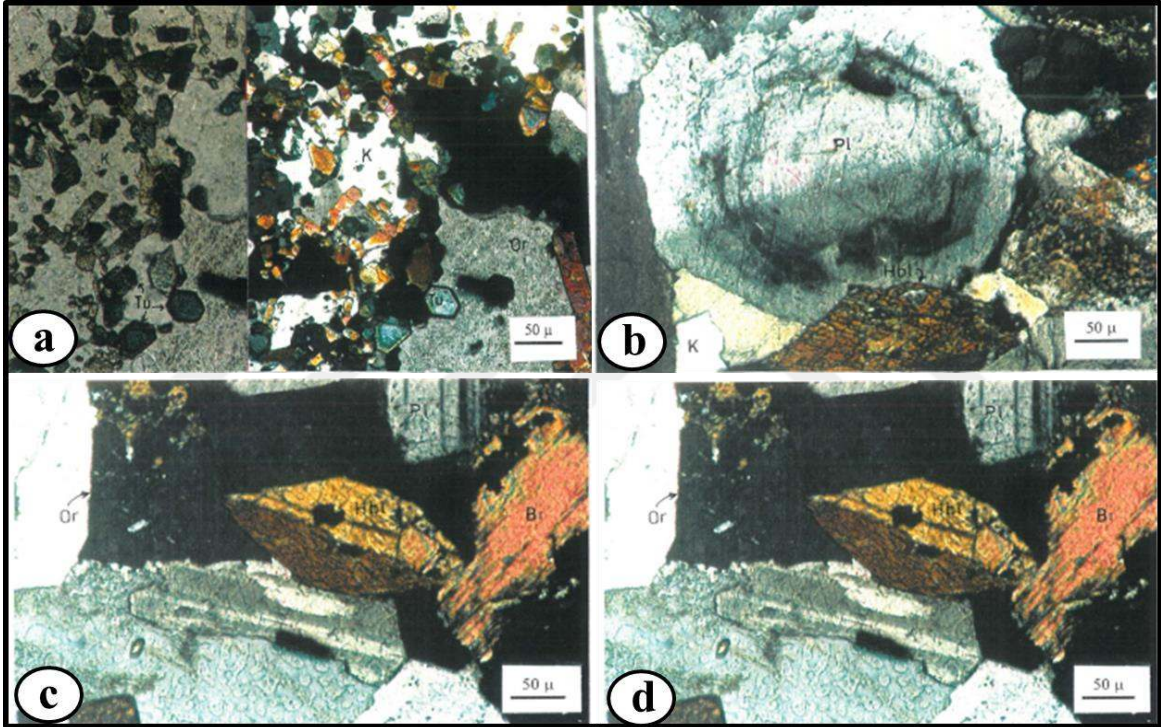


Şekil 2.7. Sarıhan granodioriti içerisinde bulunan a) Mafik mikrogranüler anklav ve b) Aplit dayk



Şekil 2.8. Granodiorit içerisinde arenalaşma ve hidrotermal ayrışma sonucu oluşan toprak

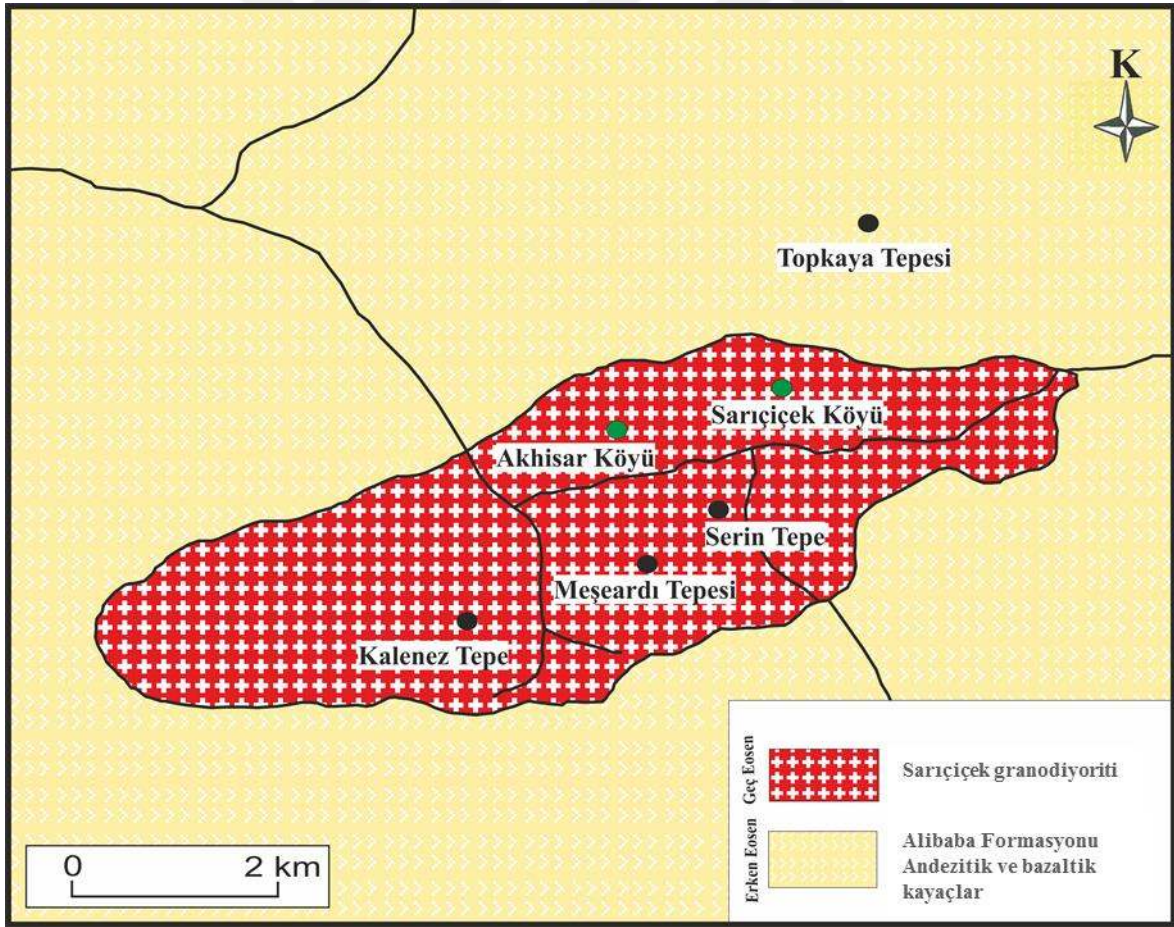
Sarıhan granodiyoritinin yaşı saha gözlemlerine bağlı olarak Aslan (1998) ve izotop verilerine bağlı olarak Aslan (2005) tarafından Geç Kretase olarak verilmiştir. Eyüboğlu vd. (2011a) tarafından Pulur masifi içinde yüzeyleyen felsik intrüzyonlara yönelik çalışmada, bu kütleden alınan örneklerden seçilen zirkonlar U-Pb yaşlandırma metodu ile yaşlandırılmış ve yaklaşık 53 milyon yıl ile Erken Eosen yaşı elde edilmiş ve bu kayaç kütlesinin adakitik bir bileşime sahip olduğu ilk kez vurgulanmıştır. Sarıhan granodiyoriti; metalumin bazlı, kalk-alkalen karakterli ve I tipinde bir granitoyittir (Aslan, 1998). Aslan (1998) tarafından Sarıhan granodiyoritinden alınan örneklerin ince kesitleri mikroskopta incelenmiş ve içerdikleri mineraller belirlenmiştir (Şekil 2.9).



Şekil 2.9. Sarıhan granodiyoritinde bulunan (a) Özşekli turmalinler. Tu: Turmalin, Or: Ortoklas, K: Kuvars (b) Halkalı zonlu plajiyoklas. Pl: Plajiyoklas, Hbl: Hornblend (c) Hornblendlere ait h' (100) ikizi. Bi: Biotit, Or: Ortoklas (d) Granodiyoritteki biyotit kristali Bi: Biotit (Arslan, 1998).

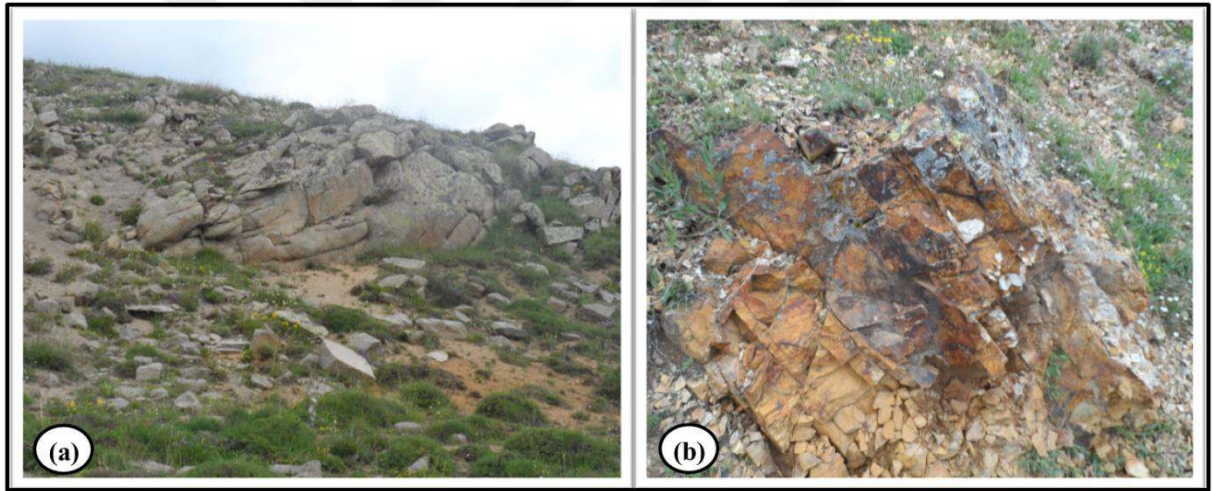
2.2.3. Sarıççek Granodiyoriti

Çalışılan kütlelerden ikincisi olan ve Güney Zonun kuzey kesimine yakın bir yerde, Gümüşhane il merkezinin yaklaşık olarak 30 km batısında yüzlek veren elipsoidal şekilli bir kütle olan Sarıççek granodiyoriti, Eosen yaşlı volkanik kayalar ile çevrelenmiştir (Şekil 2.10, Karşı vd., 2007). Güney Zonun tipik özelliklerini yansıtan bu alanda Eosen yaşlı Alibaba Formasyonu tabanda konglomeratik bir seviye üzerine gelen nummulitli kireçtaşlarının çökelişini takiben gelişen kalın bir volkanik ve piroklastik istif ile temsil edilir. Volkanik istif içerisinde baskın olan birim aglomeralar olup, yer yer blok çapları 1 metreye kadar ulaşabilmektedir. Tabakalı bir görünüm arz eden tüfler istifin diğer baskın litolojisini oluşturur ve genellikle andezitik karakterlidir. Volkanik kayalar ise yaygın olarak andezit ve bazaltik andezitlerle ve daha az oranda da bazaltlar tarafından temsil edilmektedir. İstif içindeki bir andezit örneğinden Eyüboğlu vd. (2013) tarafından yapılan U-Pb yaşlandırması ile yaklaşık 47 milyon yıllık bir yaş verisi elde edilmiştir.



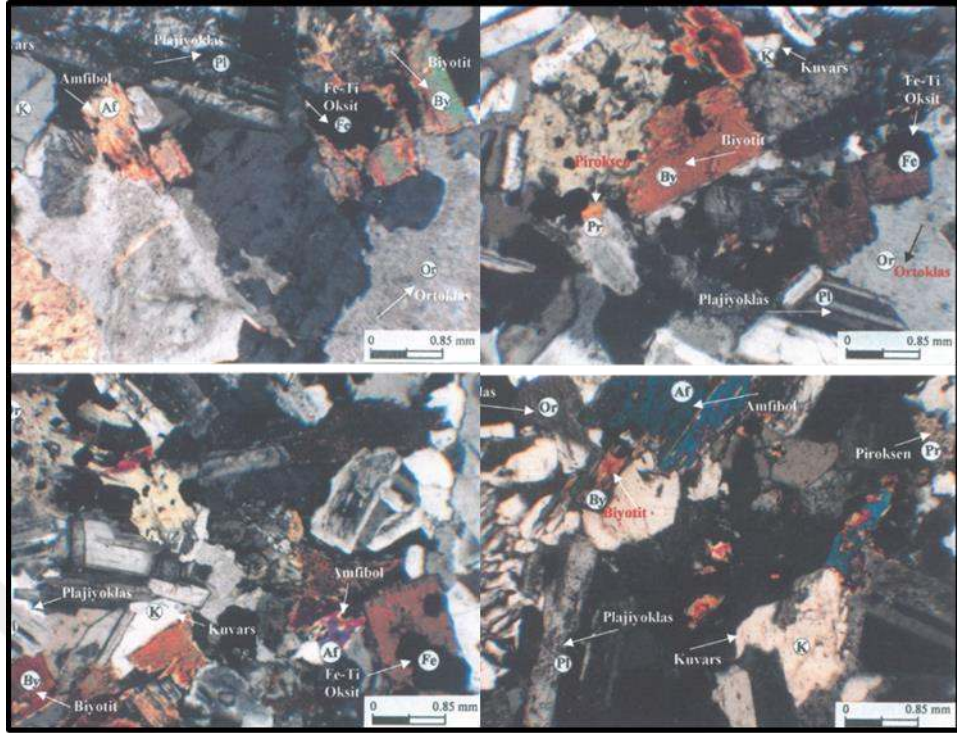
Şekil 2.10. Sarıççek granodiyoriti ve çevresinin yüzeylendiği alanının 1/25.000 ölçekli jeoloji haritası (Karşı, 2002).

Çalışma konusunu oluşturan Sarıçiçek granodiyoriti Eosen volkaniklerini keserek yerleşmiştir. Arazide genellikle beyazımsı gri veya bej renklerde gözlenen Sarıçiçek granodiyoriti iyi gelişmiş kırık sistemleri içerir. Güneydeki Sarıhan granodiyoriti ile kıyaslandığında daha az anklav içeren bu kütleyi oluşturan kayalarda plajiyoklas, amfibol ve biyotit kristalelleri makroskopik olarak el örneği üzerinde gözlenebilir. Sarıçiçek granodiyoritinde yüzeylenen kayalar I-tipi granodiyorit kayalar olup, genellikle kalk-alkalin bileşimden yüksek K kalk-alkalin bileşime doğru değişirler (Karşlı, 2002). Ender olarak apatit daykları, sık olarak da kuvars damarları gözlenebilir. Kütlenin yaşı mafik minerallerden yapılan Ar/Ar yaşlandırma metodu ile Karşlı vd. (2007) ve zirkonlardan yapılan U-Pb yaşlandırma metodu ile (Eyüboğlu vd. 2013) tarafından Lütésiyan olarak belirlenmiştir. Şekil 2.11’de Sarıçiçek granodiyoriti ve çevre formasyona ait kayalar gösterilmektedir.



Şekil 2.11. Sarıçiçek granodiyoriti ve çevresindeki formasyonlar (a) Sarıçiçek granodiyoriti ve (b) Alibaba formasyonu

Karşlı (2002) tarafından yapılan laboratuvar analizleri ile bu bileşimlerdeki kayaların, birincil olarak kuvars, plajiyoklas, ortoklas, amfibol, biyotit, piroksen (klinopiroksen), Fe-Ti oksit, sfen ve ikincil olarak da klorit ve epidot minerallerini içerdiği saptanmıştır (Şekil 2.12, Karşlı, 2002).



Şekil 2.12. Sarıçiçek granodiyoritindeki kayaçların dokusal görünümleri (Or: Ortoklas, Pl: Plajiyoklas, K: Kuvars, Af: Amfibol, By: Biyotit, Fe: Fe-Ti oksit) (Karşı, 2002).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Arazide Kullanılan Yöntemler

3.1.1. Radyometrik Yöntem

3.1.1.1. Radyometrik Yöntemin Tarihsel Gelişimi

Doğada bulunan kayaçların birçoğu önemli miktarlarda radyoaktif element içermektedir. Elementlerde, buna bağlı olarak mineral ve kayaçlarda fiziksel bir özellik olan radyoaktivite, en basit şekilde; atomun yapısındaki değişim olayı olarak tanımlanabilir.

Radyoaktivitenin keşfi ilk olarak 1985 yılında Röntgen tarafından x ışınlarının belirlenmesi ve hemen ardından 1986'da Becquerel tarafından yapıldığı bilinmektedir. Becquerel, U tuzlarında olduğu gibi U içeren minerallerin radyasyon yaydığını, bu radyasyonun sıradan ışık gibi şeffaf materyalden geçebildiğini ve fotoğraf filmlerini x ışınlarına benzer bir şekilde etkilediğini bulmuştur.

Radyoaktif özelliğe sahip ve yerkabuğunda önemli miktarlarda bulunan doğal radyonüklidler (U, Th ve K) ile bunların izotopları jeolojik ve jeofizik çalışmalar için oldukça önemlidir. Bu doğal elementlerin yanı sıra, radyoaktif özelliği daha az olan Rubidyum elementi ise jeolojik yaş tayininde kullanılan başka bir radyoaktif elementtir.

Türkiye'de ilk radyometrik çalışmalar, Geiger-Müller cihazları da kullanılarak U aramalarına yönelik 1956-1957 yıllarında Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü (MTA) tarafından yapılmıştır. 1960-1961 yıllarında Canadian Aero Service isimli bir şirket, Türkiye'de havadan yaptığı çalışmalarda, uçakta manyetometreye ek olarak sintilometre de kullanılmıştır. Bu araştırmalar; Ege, Orta Anadolu ve Doğu Toros'larda yapılmış ve ölçümler sonucunda uçuş yüksekliği ile ilgili indirgemelerin yapılamamasından dolayı nicelden çok nitel değerlendirmeler için kullanılmıştır (Hutchison vd., 1962). Daha sonra MTA, 1973-1975 yıllarında Afyonkarahisar, Salihli ve Yalova, 1983'de Yozgat ve Bayburt'da küçük kristalli gama-ışın spektrometreleriyle havadan radyometrik ölçümler yapmıştır (Wallin, 1984). MTA'nın 1987-1988 yıllarında Orta Anadolu'da yaptığı havadan çalışmalarda büyük kristalli spektrometre kullanılan ve teknik olarak en kapsamlı çalışma olmuştur (Aydın, 1990).

3.1.1.2. Radyoaktif Bozunma Türleri

Radyoaktivitenin keşfinden sonra bilim adamları bu ışınların tabiatını anlamak, yani yüklü parçacıklar mı yoksa elektromanyetik ışınlar mı olduklarını anlamak için çeşitli metotlarla incelemeler yapmışlardır. Yapılan incelemeler neticesinde radyoaktif ışınların tatbik edilen manyetik alan içerisindeki davranışlarına göre üç çeşit oldukları sonucuna varmışlardır.

3.1.1.2.1. Alfa Parçacığı

Alfa parçacığı, iki proton ve iki nötrondan oluşmuş pozitif yüklü helyum atomunun çekirdeğidir. Çekirdeğin, alfa parçacığı salması olayına atom numarası büyük izotoplarda ve genellikle doğal radyoaktif atomlarda rastlanır. Alfa parçacıklarını sahip oldukları nispeten büyük elektrik yükleri dolayısıyla çok küçük kalınlıklardaki maddelerle durdurmak mümkündür. Bu yüzden de normal olarak dış radyasyon tehlikesi yaratmazlar. Ancak, yeme, solunum ve yaralar vasıtasıyla vücuda girdiklerinde tehlikeli olabilirler (Togay, 2002; Büyüksu, 2007).

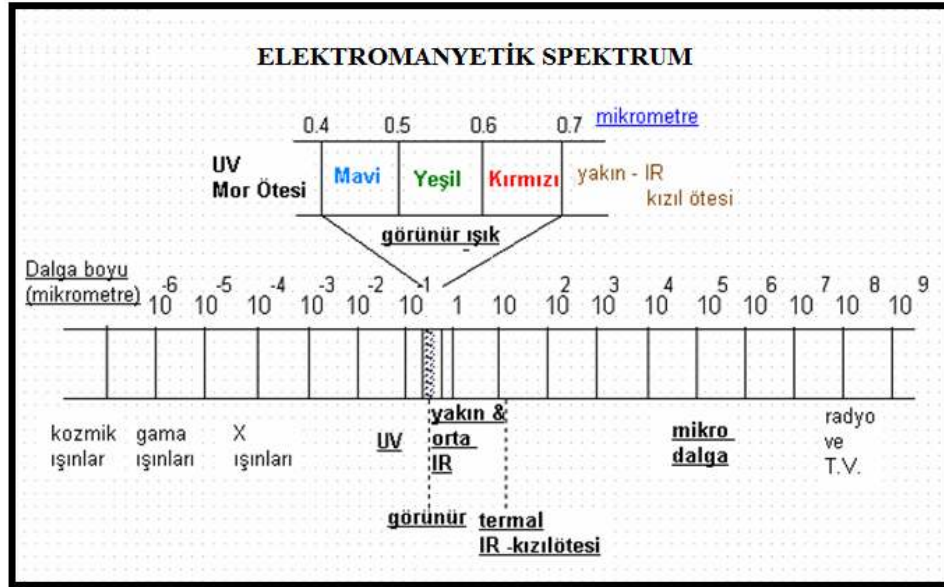
3.1.1.2.2. Beta Parçacığı

Beta parçacıkları, belli bir yük ve kütleye sahip olduklarından, madde içerisinden geçerken yolları üzerinde iyonlaşmaya sebep olurlar. Ancak bu iyonlaşma, alfa parçacıklarının oluşturduğu iyonlaşmadan daha azdır. Beta parçacıklarının katılar içindeki erişme uzaklıkları çok fazla olmamakla birlikte hava içerisinde oldukça uzun mesafelere kadar yayılabilirler. Bu nedenle sırf beta parçacıkları yayınlayan radyoizotoplar dahi insanlar için bir dış radyasyon tehlikesi yaratabilirler (Togay, 2002; Büyüksu, 2007).

3.1.1.2.3. Gama Işınları

Gama ışınları atom çekirdeği kaynaklı ışınlardır. Çekirdek bir alfa veya bir beta bozunumuna uğradıktan sonra genellikle kararlı bir duruma geçemez. Çekirdeğin fazla kalan enerjisi bir elektromanyetik dalga şeklinde salınır. Gama ışınlarının enerji aralığı 0.1-10 MeV olup çekirdek durumları arasındaki enerji farkı mertebesinde ve bu 100 ile 10^4 fm dalga boyu aralığına karşılık gelir.

Gama ışınları nükleer radyoaktif bozunmaya uğrayan çekirdeklerde ve reaksiyonlar sonucu oluşan uyarılmış durumda bulunan çekirdeklerin taban enerji durumlarına geçmesi sırasında, çift oluşumu ile meydana gelen pozitronun bir elektronla birleşip yok olması sonucunda, yüklü parçacıkların (e^-) ani hızlandırılması veya durdurulması sonucunda oluşabilmektedir. Gama ve X-ışınlarının, alfa ve beta parçacıklarına göre madde içine nüfuz etme kabiliyetleri çok daha fazla, iyonlaşmaya sebep olma etkileri ise çok daha azdır. Gama ışınları Şekil 3.1’de gösterilen elektromanyetik spektrumun en kısa dalga boylu ve en fazla enerjili olanlarıdır, kütleleri yoktur ve yüksüzdürler dolayısı ile elektrik ve manyetik alanda saptırılamazlar, yüksek enerjilerinden dolayı madde içerisinde yol alabilirler, ışık hızı ile yayılırlar ve gazları iyonlaştırıcı özellikleri vardır (Togay, 2002; Büyüksu, 2007).



Şekil 3.1. Enerji spektrumu (Değerlier, 2007).

3.1.1.3. Radyoaktivite ve Radyasyon Doz Birimleri

Uluslararası Radyasyon Birimleri Komisyonu (ICRU) yaptığı çalışmalar sonucunda, aktivite için Curie, ışınlama için Röntgen, absorblanan doz için Rad ve eşdeğer doz için Rem’i radyasyon birimleri olarak tanımlamıştır. MKS sistemini esas alan Uluslararası Birimler Sistemi (International System of Unit, SI)’nın kabul edilmesiyle birlikte, ICRU 1971 yılında SI birimlerini tanımlamıştır.

Bu kabule göre eski birimlerin yerine yenilerinin kullanılması önerilmiştir (Önen, 1997). Tablo 3.1’de radyoaktivite ve radyasyon doz birimleri ile birim dönüşümleri gösterilmektedir.

Tablo 3.1. Radyoaktivite büyüklükleri ve birimleri (IAEA, 2003).

Büyüklük	Birim	Tanımlama
Spesifik aktivite	Kilogramdaki Becquerel (Bq/kg)	Birim kütlenin radyoaktivitesi
Maruz kalma	Kilogramdaki Coulomb (C/kg)	Havadaki Gama ve X ışınlarının iyonlaştırma etkisi
Doz oranı	Saatteki Gray (Gy/h)	Havadaki Gama radyasyonu
Etkin doz	Sievert (Sv)	Radyasyonun insan üzerindeki biyolojik etkileri

3.1.1.4. Doğal Radyoaktif Elementler

3.1.1.4.1. Uranyum

U radyoaktif bozunma serisinin ana elemanı U-238’dir. U saf formunda doğal, her yerde bulunabilen ve radyoaktif, gümüş renkli, ağır bir metaldir. Küçük miktarlarda bütün kaya ve toprakta, yerkabuğunun doğal maddelerinden yapılan materyallerde bulunur. Doğal olarak oluşan U üç farklı izotopa sahiptir. Bunlar ^{234}U , ^{235}U , ^{238}U ’dir ve ağırlığının % 99,2745’ini ^{238}U , % 0,7200’ini ^{235}U ve % 0,0055’ini ^{234}U oluşturur. Çok uzun yarı ömre sahip olan ve doğada en çok bolluğa sahip olan ^{238}U , U’nun her bir birim kütlesinde çok düşük bozunma oranına sahiptir. Düşük bozunumu nedeniyle aslında doğal olarak oluşan U, gezegen üzerindeki kararsız izotoplar arasındaki en az radyoaktif olan maddelerden biridir. Tüm U izotopları temel olarak alfa parçacıkları yayınlamalıdır. Bu alfa parçacıkları yumuşak doku içerisinde sadece 30 μm ilerleyebilir (Değerlier, 2007).

U çekirdeklerin büyük bir bölümü bozunduklarında farklı enerjili gama radyasyonları üretirler. U serisinin elemanları (kolları) büyük sıklıkla kararsızlık halinde bulunmakla birlikte sabit bolluk oranını muhafaza etmişlerdir. U serisinin gama spektrumu, farklı enerjilerde birçok gama ışını içermesinden dolayı karmaşıktır. Fakat sayısal ölçümler yapabilmek için karakteristik bir piki yoktur.

U'nun kendisinin karakteristik gaması olmamasına karşılık, sayısal analizler yapabilmek için Bizmut-214'ün 1,76 MeV enerjili piki kullanılır (Kahveci, 1993). Tablo 3.2'de doğal radyonüklidler ve doğada bulunma miktarları verilmiştir.

Tablo 3.2. Başlangıç (primordial) radyonüklidler (Değerlier, 2007).

Nüklid	Yarı ömür	Doğal Aktivite
Uranyum-235	7.04×10^8 yıl	Tüm doğal U'nun % 0.72'si
Uranyum-238	4.47×10^9 yıl	Tüm doğal U'nun % 99.2745'i. Yaygın kaya çeşitlerindeki toplam U 0.5-4.7 ppm
Toryum-232	1.41×10^{10} yıl	Yaygın kaya çeşitlerindeki toplam U 1.6-20 ppm
Radyum-226	1.60×10^3 yıl	Asal gaz
Radon-222	3.82 gün	
Potasyum-40	1.28×10^9 yıl	Toprakta 0.037-1.1 Bq/g

3.1.1.4.2. Toryum

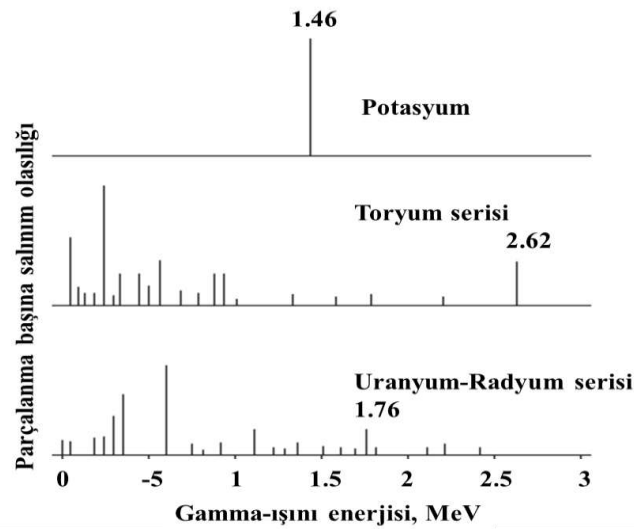
Bir diğer doğal radyoaktif bozunum serisinin ana elemanı Th-232' dir. Th serisi 11 ürün nüklidi içerir. Kompleks bir gama spektrumu verir ve hemen hemen hepsi daima kararsızdırlar. Ürün nüklidler sırasıyla Th-232, Radyum-228, Aktinyum-228, Th-228, Radyum-224, Radon-220, Polonyum-216, Kurşun-212, Bizmut-212, Polonyum-212, Talyum-208 ve son olarak kararlı Kurşun-208 izotopudur.

^{232}Th ve ^{238}U serileri güçlü benzerlikler gösterirler; onlar aynı elementin (radyum, radon, kurşun, bizmut, polonyum) izotoplarını ve büyük oranda α yayıcılarını içerir. İki seri arasındaki temel fark, ^{232}Th 'nin zincirdeki çok uzun ömürlü tek radyonüklit olmasıdır. Th serisi içinde en uygun karakteristik gama piki, Talyum-208'e ait olan 2.615 MeV enerjili piktir. Ayrıca Th-232, doğal Th'ın en önemli radyo izotopudur. Th-232' nin yarı ömrü 1.39×10^{10} yıl, spesifik aktivitesi ise 4.1 Bq/mg'dır (Kahveci, 1993).

3.1.1.4.3. Potasyum

K, temel bir elementtir ve vücutta yaşamsal bir öneme sahiptir. Doğal K'nın küçük bir kısmı (% 0.12) radyoaktif K-40'dır. K-40'ın bozunması, 1.461 MeV' lik gama çıkışına neden olur. K-40'ın bozunumu sonucunda oluşan ürün çekirdek karardır. Yer kabuğunun %2.6'sını oluşturması nedeni ile K önemli bir elementtir.

Doğal olarak bulunan K'nın üç izotopundan sadece ^{40}K kararsız olup, yarı ömrü 1.26×10^9 yıl ve spesifik aktivitesi 3.3 Bq/g'dır. Bunun anlamı K-40'ın her türlü koşulda konsantrasyonu sabittir ve gram başına saniyede 3.3 gama ışınımı yayınlar. K-40 kararlı elementinin içinde 120 ppm oranında bulunur ve yeryüzü kabuğunun ağırlık olarak %2.4'ünü oluşturur. Doğal K'nın %0.0118'ini, ^{40}K izotopu oluşturmaktadır. Doğal K, toprakta çok bol bulunduğu için doğal gama radyasyon dozunun önemli bir kesrini meydana getirmektedir (Kahveci, 1993). Laboratuvar ortamında yapılan analizlerde karakteristik üç gama enerjisi 1.461 MeV (K), 1.764 MeV (U) ve 2.615 MeV (Th) kullanılmaktadır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. U ve Th serileri ile K'nın Megaelektron volt (MeV) birimindeki gama-ışını enerjileri (Düşey çizgilerin yüksekliği gama ışınlarının göreceli şiddetiyle orantılıdır.) (Ellis ve Singer, 2007).

3.1.1.5. Mineral ve Kayaçlardaki Doğal Radyoaktivite

U ve Th miktarları genellikle ppm olarak verilirken (1 kg'lık kayaç kütlesi için 1ppm= 10^{-6} kg U ve Th), K miktarı ise % olarak (1 kg'lık kayaç kütlesi için %1= 10^{-2} kg K) verilmektedir. K; kil minerallerinin içinde, kimyasal bir şekilde silvit ve karnalit gibi tuzlar olarak evaporitlerde ya da diğer bir adıyla tuz kayaçlarının içinde, kayaç yapıcı minerallerin (feldispat, ortoklaz, mikroklin, mika, biyotit ve muskovit gibi) içinde bulunur ve burada silikatlı yapılarla birleşir. Killerdeki K miktarı değişmektedir. Örneğin; kaolinit çok düşük miktarlarda K içerirken, illit ise çok yüksek miktarlarda (%3.5-8.1) K içermektedir. Kayacı şekillendiren minerallerin çoğunda çok düşük oranlarda U ve Th bulunur.

U minerallerinde (U içeriği %76) ve U taşıyan minerallerdeki (U içeriği %56) U konsantrasyonu ise oldukça yüksektir. Büyük miktarlardaki Th ise Tablo 3.3'te gösterilen bazı kayaç minerallerinde yoğun bir şekilde bulunmaktadır. Ayrıca bu minerallerdeki U içeriği de fazladır (Schlumberger, 1982).

Tablo 3.3. Bazı kayaç minerallerinin K, U ve Th içerikleri (Schlumberger, 1982; Atlas, 1985).

Mineral	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)
Silvit	52,4	---	---
Montmorillonit	0-4.9	2-5	10-24
Muskovit	7.9	2-8	10-25
Biyotit	6.2-10.1	1-40	0.5-50
İllit	3.5-8.3	1.5	10-25
Kaolinit	0-0.6	1.5-9	6-42
Ortoklas	11.8	0.2-3	3-7
Plajiyoklas	0.54	0.2-5	0.5-3
Monazit	---	500-3000	$2.5-20 \times 10^4$
Zirkon	---	300-3000	100-2500
Apatit	---	5-150	20-150
Sfen	---	100-700	100-600

Genellikle volkanik kayaçlardaki bu üç elementin konsantrasyonları asidik kayaçlarda ultra bazik kayaçlardan çok daha yüksek olarak bulunmaktadır (yaklaşık olarak 10 kat kadar). Çünkü bu kayaçların SiO₂ içerikleri farklıdır ve bu tür kayaçlarda Th ve U konsantrasyonlarının 100 ppm değerini aşması olağan değildir. Buna rağmen bu kayaç türü kabuksal volkanik kayaçların küçük kısımlarını temsil etmektedir (Hearst ve Nelson, 1985). Magmatik kayaçlardaki yüksek radyoaktivite, U mineralleri ve yataklanmış Th minerallerinin varlığı ile ilişkilendirilmiştir. Bu durum kısmen U-Th oluşum mineralleri ve küçük de olsa katkısı olan kayaç oluşum minerallerinden kaynaklanmaktadır (Kobranova, 1989). Yerkabuğunda doğal olarak bulunan radyoaktif elementlerden K, Th ve U magmatik kayaçlar içerisinde bol miktarlarda bulunmaktadır. Magmatik kayaçlar üzerinde yapılan çalışmalar sonucunda, granit içerisinde yüksek oranda Th elementi ölçülmüştür (Phair ve Gotterfield, 1964).

Tortul ve metamorfik kayaçlara nazaran magmatik kayaçlarda U ve Th miktarları fazla olup Th'ın U'ya oranı kayaç cinsine göre değişiklik gösterir ve genellikle Th miktarı, U'dan yüksektir (Hemond vd., 1994). Tablo 3.4'de çeşitli kayalardaki doğal radyonüklid konsantrasyonları gösterilmiştir.

Tablo 3.4. Bazı kayaçlarda ortalama radyoaktif element konsantrasyonları (Aydın, 2004).

Kaya Tipleri	U (ppm)	Th (ppm)	K (%)
Kumtaşı	1.4	3.8	1.8
Kireçtaşı	1.9	1.2	0.6
Riyolit	5.0	-	4.2
Granit	3.6	19.0	2.8
Gabro	0.8	3.8	0.6
Andezit	0.8	1.9	1.7
Alkali bazalt	1.0	4.6	0,6

Radyoaktif elementler metamorfizmanın artmasıyla azalmaktadır. Rybach ve Cermak (1982) bunun en önemli kanıtının, ilerleyen metamorfizmanın granülitli fasiyes kayaçlarda meydana getirdiği U ve Th azalması olduğunu ortaya çıkarmıştır. Kabuk tabanındaki kısmi ergime ve reaksiyondan dolayı Th ve U yerkabuğundan yukarıya doğru göç etme eğilimi gösterirken, K ise bu durumlardan daha az ya da hiç etkilenmemiş gibi gözükmiştir.

3.1.1.6. Gama-ışını Spektrometresi

Jeofizik yöntemlerden biri olan radyometrik yöntemin özel bir uygulama biçimi olan gama-ışın spektrometresi, enerji hammaddesi olan U aramalarından, doğal ve yapay kirlilik araştırmalarına, jeolojik haritalama çalışmalarından, deprem izleme çalışmalarına kadar pek çok yerbilimi disiplini içinde yer almaktadır (Aydın, 2004). Evrenin var oluşundan beri, yerkabuğunun yaklaşık 10-12 km derinliğine kadar olan bir zon içindeki kayaçlarda K, U ve Th radyonüklidleri az veya çok miktarda mutlaka bulunurlar. Bu elementlerin yerkabuğundaki ortalama konsantrasyonları K için %2.33, U için 3 ppm ve Th için 12 ppm'dir (IAEA, 2003).

Çalışmada kullanılan gama-ışını spektrometresi; arazide ve laboratuvarlarda sondaj ile alınan karotlar veya araziden toplanan kayaç-toprak örnekleri üzerinde, doğal ve yapay radyoizotop ölçümleri için tasarlanmış bir alettir (Şekil 3.3). Bu aletler grubu, çeşitli prob ve dedektör türlerini kullanarak zemin, sondaj ve karbon araştırmaları gibi genel amaçlar için kullanılan radyoaktif ışıma ölçerden kompakt el aletlerine kadar birçok aleti kapsamaktadır.

Bu alet; radyasyon kaynaklarının araştırılmasında, doz hızı ve gama-ışını spektrum ölçümlerinde, radyoaktif elementlerin konsantrasyonlarının belirlenmesinde (özellikle K, eU, eTh) ve diğer radyasyon görüntüleme uygulamalarında, jeofiziksel haritalama (radyasyon şiddet haritaları vb.), maden araştırmaları ve benzer laboratuvar analizleri gibi çalışmaların yapılmasında kullanılan yararlı bir araçtır.



Şekil 3.3. Gama-ışını spektrometresi (Kontrol ünitesi ve el probu)

Gama-ışını spektrometresi için 3 temel ölçüm modu vardır. Bunlar; gama ışını kaynakları için hızlı ve seçici arama, Hassas radyometrik ölçümler ve K, eU, eTh konsantrasyonlarının belirlenmesi için kullanılan spektral ölçümlerdir. Ölçüm sistemi, harici olarak GPS verilerinin kullanımı ile nokta, profil ve sürekli ölçümlerin yapılmasına izin verir.

Doğada bulunan kayaçlar farklı oranlarda radyoaktif element içerirler. Kayaçların farklı oranlarda, farklı radyoaktif element içermeleri ve bazı minerallerin bünyelerinde farklı radyoaktif elementleri farklı oranlarda bulundurmaları nedeni ile yaydıkları gama ışınları bir fiziki özellik olarak ölçülebilmektedir. Bu radyoaktif özelliğe sahip ve yer kabuğunda önemli oranlarda bulunan U, Th ve K elementleri ile bunların izotopları jeolojik ve jeofizik araştırmalarda büyük önem taşımaktadırlar. Adı geçen elementlerin izotopları belli enerji seviyelerinde gama-ışını yaymaktadırlar. Gama-ışın spektrometresi ile bu gama ışınının belli enerji aralıklarında ölçülmektedir. Bu nedenle de gama-ışın spektrometresi, yerküre ilgili pek çok konunun araştırılmasında uygulanan önemli bir radyometri tekniğidir. Toprak ya da kayaçlar üzerinde yapılan radyoaktivite ölçümleri ile radyoaktif elementlerin her bir noktadaki ağırlıkça bulunma miktarları (K(%), eTh(ppm), eU(ppm)) ölçülmektedir.

Ölçülen konsantrasyon değerleri kullanılarak çalışılan alandaki radyolojik risk seviyesi belirlenebilmektedir. Bu nedenle; K, eTh ve eU konsantrasyon değerleri aşağıdaki dönüşüm faktörleri kullanılarak Bq/kg (aktivite birimi)'a dönüştürülüp tehlike parametreleri kolay bir şekilde hesaplanmaktadır (Tablo 3.5).

Tablo 3.5. Radyoelement konsantrasyonundan (%, ppm) spesifik aktiviteye (Bq/kg) dönüşüm faktörleri (IAEA, 1989).

% 1 K	313 Bq/kg	⁴⁰ K
eU (1ppm)	12,35 Bq/kg	²³⁸ U veya ²²⁶ Ra
eTh (1ppm)	4,06 Bq/kg	²³² Th

Radyometrik araştırmalar ve haritalamalar birçok bilim dalında uygulanabilmektedir. Mineral aramalarında, yapısal jeoloji ve jeokimyasal haritalamalarda, kayaçların jeolojik özelliklerinin karşılaştırılmasında, kayıp radyoaktif kaynakların yerinin belirlenmesinde, radyoaktif sızıntı ve kirliliğin belirlenmesi gibi birçok alanda kullanılabilmektedir. Radyoaktif özelliğe sahip ve yer kabuğunda önemli oranlarda bulunan U, Th ve K elementleri ile bunların izotopları jeolojik ve jeofizik araştırmalarda büyük önem taşımaktadırlar (Aydın, 2004).

3.1.1.7. Spektrometre Verileri Kullanılarak Hesaplanan Parametreler

3.1.1.7.1. Havadaki Absorblanmış Doz Oranı

Havadaki soğurulan doza doğal radyonüklidlerin katkısı ²³⁸U, ²³²Th ve ⁴⁰K'nın doğal spesifik aktivite konsantrasyonuna bağlıdır. Gama radyasyonuna en büyük katkı, karasal radyonüklidlerden gelir. Karasal gama radyasyonu ve radyonüklid konsantrasyonu arasında doğrudan bir bağlantı vardır. Eğer radyonüklid aktivitesi bilinirse, Beck (1972) ve UNSCEAR (1988) tarafından önerilen formül kullanılarak, yerden 1 metre yukarıda maruz kalınan havadaki doz hızı hesaplanabilir.

$$D(\text{nGy/h}) = 0,427 A_U + 0,662 A_{Th} + 0,0432 A_K \quad (1)$$

Burada; D yerden 1 metre yukarıda soğurulan doz hızı, A_U , A_{Th} ve A_K sırasıyla ²³⁸U, ²³²Th ve ⁴⁰K'nın aktivite konsantrasyonlarıdır. ²³⁸U, ²³²Th ve ⁴⁰K'nın dönüşüm faktörleri her Bq/kg için sırasıyla 0.427, 0.662 ve 0.042 nGy/saat'dir (Beck, 1972; Kurnaz vd., 2007).

3.1.1.7.2. Radyum Eşdeğer Aktivitesi

Radyum eşdeğer aktivitesi (Ra_{eq}), risk indeksinde geniş bir şekilde kullanır. Beretka ve Mathew (1985) tarafından verilen bağıntı aracılığıyla hesaplanmaktadır.

$$Ra_{eq}=A_U+1,43A_{Th}+0,077A_K \quad (2)$$

Bağıntıda verilen A_U , A_{Th} ve A_K sırasıyla toprak örneklerinde bulunan ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K 'nin aktivite konsantrasyonlarıdır (Babai vd., 2012).

3.1.1.7.3. Dış Tehlike İndeksi

Krieger (1981) ile Amrani ve Tahtat (2001) yaptıkları çalışmalarda, kalın duvarlar içeren kapı ve penceresi bulunmayan açık hava ile temas eden yerlerde, yapı malzemelerinden kaynaklanan radyasyon tehlikesini modellemişlerdir. Bu modelleme kriteri dış tehlike indeksi (H_{ex}) olarak adlandırılır ve aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$H_{dış}=C_U/370+C_{Th}/259+C_K/4.810 \quad (3)$$

formülü ile gösterilir. Dünyada kabul gören $H_{dış}$ değeri; ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K (Bq/kg) doğal radyonüklidleri içeren malzemelerde, 1 den küçük olmalıdır.

3.1.1.7.4. Yıllık Etkin Doz Eşdeğeri

Yıllık etkin doz eşdeğeri, insanların farklı radyasyon kaynaklarından yayınlanan ışınlarla gerek dışarıdan maruz kalmak sureti ile gerekse yediği ve içtiği gıdalar veya soluduğu havada bulunan değişik radyonüklidlerden yayınlanan ışınlarla içeriden maruz kalmak sureti ile bir yıl süresince alacağı radyasyon dozu olarak tanımlanır. Eşdeğer doz birimi sievert'tir. Soğurulan doz için dönüşüm (0,7 Sv/Gy) ve dış ortamda (0,2) ve iç ortamda (0,8) maruz kalma faktörü (0,2) dikkate alınarak hem iç hem de dış ortamlardaki etkin doz aşağıdaki ifade ile hesaplanabilir (UNSCEAR, 2000).

$$YEDE \text{ (mSv/y)} = \text{Doz Oranı(nGy/sa)} \times 8760 \times 0,2 \times 0,7 \text{ (Sv/Gy)} \times 10^{-6} \text{ (dış ortam)} \quad (4)$$

$$YEDE \text{ (mSv/y)} = \text{Doz Oranı(nGy/sa)} \times 8760 \times 0,8 \times 0,7 \text{ (Sv/Gy)} \times 10^{-6} \text{ (iç ortam)} \quad (5)$$

3.1.1.7.5. Yaşam Boyu Kanser Riski

Yıllık etkin doz eşdeğeri değerlerine bağlı olan yaşam boyu kanser riski aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$KR = YEDE \times RF \times DL \quad (6)$$

Burada; DL ortalama insan yaşam süresi (70 yıl) ve RF (Sievert) ise ölümcül risk faktörüdür. Stokastik etkenlerden dolayı bu değer, ICRP 60 raporuna göre 0.05 olarak belirlenmiştir (ICRP, 1990).

3.1.1.8. Jeokimyasal Radyonüklid Oranları ve Uranyum Göçü

3.1.1.8.1. Jeokimyasal Radyonüklid Oranları

Farklı ya da homojen jeolojik birimler arasında, bütün radyonüklid konsantrasyonlarındaki fark oldukça değişken olabilmektedir. Topografya, toprak nemliliği ve bitkiler gibi çevresel faktörler ile ölçüm hatları arasındaki yatay ve düşey yöndeki uzaklıklarda kayaç ve topraklardaki konsantrasyon miktarlarının değişmesine neden olmaktadır. Gözlemlenen radyonüklid konsantrasyon oranları yukarıda bahsedilen faktörlerden çok daha az etkilenmektedir (Boyle, 1982). Jeolojik birimleri birbiriyle karşılaştırmada bu oranlar sıklıkla kullanılmaktadır. Radyonüklid konsantrasyonları arasında iyi bir ilişki olduğu için, bazı durumlarda konsantrasyon miktarını gösteren haritalarda göze çarpmayan özellikler konsantrasyon oranlarında açık bir şekilde gözlenebilmektedir.

3.1.1.8.1.1. eU/eTh Oranı

Clark vd.'ne (1966) göre granitik kayaçlarda eU/eTh oranı yaklaşık olarak 0.33'e eşittir. Bu oran U gibi mobil elementlere bağlı olarak değişmektedir. U'ca zengin olanlar bu oranla kolay bir şekilde belirlenebildiği için eU/eTh değeri U aramaları için çok önemlidir. Örneğin granitik kayaçlarda bu oranın 0.33'den büyük olması kayacın U'ca zengin olduğunu gösterirken, 0.3'den küçük olması ise kayacın U'ca fakir (U göçü) olduğunu göstermektedir. U göçünde eU/eTh oranı çok önemli bir jeokimyasal parametredir. Bu oran U göçüne neden olan oksidasyon süreçleriyle önemli bir derecede etkilenmektedir. Ayrıca bu oran U'nun taşındığı oksitlenme ortamlarının belirlenmesinde de kullanılmaktadır.

3.1.1.8.1.2. K/eTh Oranı

K/eTh oranı ile alterasyon zonları hızlı bir şekilde belirlenebilmektedir. Th durağan bir element olduğu için kayacın alterasyon öncesindeki orijinal bileşimini yansıtmaktadır. Th konsantrasyonu, yanlışlıkla tek tür olarak haritalandırılmış farklı granitik birimlerin kolaylıkla ayırt edilebilmesine olanak sağlamaktadır. Ayrıca spektrometreyle temel ve değerli metallerin yerleri doğrudan belirlenemezken, epitermal bir sistemle ilgili alterasyonlar K değeri ile ortaya çıkarılıp hem yerel hem de bölgesel ölçekte haritalanarak değerlendirilebilir.

3.1.1.8.1.3. eU/K Oranı

eU, K/eU ve eU/eTh oranlarının düşük olduğu bölgeler, Th ve K radyonüklidlerine nazaran bir U zenginleşmesini göstermektedir. Ciddi anlamda ekonomik potansiyele sahip U elementinin bulunduğu alanlar K/eU ve eU/eTh değerlerine bağlı olarak yüksek bir U içeriğine sahiptir (Saunders ve Potts, 1976). K ile U arasındaki bu oran, ekonomik potansiyele sahip U'nun ortaya çıkarılmasında önemli bir tanımlayıcı olduğu için, U'ca zengin alanların belirlenmesinde kullanılmaktadır (IAEA, 1989).

3.1.1.8.1.4. eU-(eTh/3.5) Oranı

U mobil (hareketli) bir element olduğu için oksidasyonlu U^{+4} den U^{+6} ya dönüşebilir. U bir yerden başka bir yere göç edip oradaki elementlerle reaksiyona girme yeteneğine sahiptir. U migrasyon değeri, ölçülen mevcut U içeriğinden (eU) orijinal U içeriğinin (eTh/3.5) çıkarılmasıyla elde edilebilir. Orijinal U içeriği ise eTh içeriğinin asidik volkaniklerde 3 ile 4 arasında değişen eTh/eU oranına bölünmesiyle teorik olarak hesaplanabilmektedir (Wenrich, 1985). [eU-(eTh)/3.5] değeri U göçündeki değişimlerin tanımlanmasında oldukça yararlıdır. [eU-(eTh)/3.5] değerleri haritalandığında negatif konturlu alanlar U'ca fakir alanları gösterirken pozitif konturlu alanların ise U zenginleşmesinin olduğu yerleri gösterdiği kabul edilmiştir.

eTh, eU ve K haritaları inceleme alanının verdiği spektral cevaba göre petrografik farklılaşma analizlerinin daha iyi yapılmasına olanak sağlamaktadır. Bu element konsantrasyonlarından hesaplanan radyoelement oranları (eU/eTh, eU/K ve eTh/K) kayaçların radyoaktif karakterini yansıtmaktadır.

Yapılan çalışmalarla; Th'ca zengin kayaçta $eTh/K \geq 0.2$, K'ca zengin kayaçta $eTh/K \leq 0.1$ ve U'ca zengin kayaçta $eU/eTh > 1$ ve $eU/K > 0.1$ olduğu ortaya çıkarılmıştır. U/Th oranı oksidasyon sürecinden oldukça fazla etkilenmektedir ve bu süreç U göçüne neden olmaktadır. Bu oran U'nun taşıdığı oksidasyon alanının belirlenmesinde oldukça önemli bir parametredir (Naumov, 1959).

3.1.1.8.2. Uranyum Göçü

U ve Th iyonik yarıçapların benzerliğinden dolayı jeokimyasal ortamların çoğunda genellikle birlikte bulunurlar. Ancak U oksidasyon koşullarında (özellikle asit ya da karbonatça zengin sulara) oldukça hareketli bir yapıya sahiptir. U indirgeyici jeokimyasal ortamlarda hareketsiz olduğu için, ortamdaki demiroksit (FeO), kil partikülleri ve organik maddeler tarafından absorbe edilir. Ayrışma ve diğer aşınma süreçleri boyunca yer altı suyunda oldukça hareketli ve çözünabilir olan U^{+4} , U^{+6} durumunda kolay bir şekilde oksitlenmektedir. Th genellikle alterasyon süreçlerine karşı direndiği için oksidasyon bölgesinde çözünmeden kalır. Th'n hareketliliği oldukça düşük olduğu için farklı jeokimyasal ve jeolojik ortamlarda orijinal U konsantrasyonunun araştırılmasında bu element bir referans olarak kullanılabilir.

eU/eTh ve eTh arasındaki ters ilişkiyle eU/eTh ve eU arasındaki güçlü pozitif ilişki U dağılımının ve taşınımının potansiyel bir kanıtıdır (Fouad vd., 1998). eU/eTh ve eU değerleri arasındaki küçük ya da değişken artışlar U'nun önemli bir ölçüde taşınmadığını göstermektedir. Bu durumun nedeni ise ya U'nun çözünmesi için gerekli olan çözeltilerin yetersiz olması ya da U'nun dirençli litolojik birimlerin içinde bulunması olabilir (Asfahani vd., 2010b; Fouad vd., 1998).

eU/eTh oranı U göçü olup olmadığını gösteren iyi bir göstergedir. Benzer türdeki kayaçlarda bu oranın yaklaşık olarak sabit kalması, kayaçta U göçünün meydana gelmediğini göstermektedir. U ve Th'n yarı ömürleri kayaçlardaki orijinal oranın belirlenmesi için ölçülen eU/eTh oranı değerlendirilecek kadar uzundur. Belirli bir kayaç için U göç değeri (U_m), var olan U içeriğinden (U_p) orijinal U içeriğinin (U_o) çıkarılmasıyla hesaplanabilir (NMA, 1999).

$$U_m = U_p - U_o \quad (7)$$

Aşağıda verilen eşitlik orijinal U (U_o) konsantrasyonunun teorik olarak hesaplanmasında kullanılmaktadır.

$$U_o = eTh \times (\text{bölgesel } eU/eTh) \quad (8)$$

Burada, eTh (ppm) belirli bir kayaç içerisindeki ortalama Th içeriğidir. Bölgesel eU/eTh ise farklı kayaç birimlerindeki ortalama bölgesel eU/eTh oranıdır (Abu-Deif vd., 2001; Asfahani vd., 2007). U göç oranı miktarını gösteren U_{me} parametresi, U_o ve U_p değerlerinin bilinmesi halinde aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanabilir.

$$\%U_{me} = (U_m/U_p) \times 100 \quad (9)$$

Migrasyon derecesinin belirlenmesinde iyi bir gösterge olan bu değer $\% U_{me}$ sembolü ile gösterilmektedir. $\% U_{me}$ değerinin pozitif olması durumunda göçün birim içine, negatif olması halinde ise göçün birim dışına doğru olduğu kabul edilmiştir. $U_m > 2$ U 'nun geç evrim boyunca jeolojik kütleden kaybolduğunu ve $U_m > -2$ kayacın içine doğru önemli ölçüde U göçünün olduğunu gösterirken, $-2 < U_m < 2$ arasında değişmesi ise migrasyonun yüksek olasılıkla kayaç içinde ve kayaç dışında eşit oranda olduğunu göstermektedir.

U ve Th konsantrasyonları ve eU/eTh oranı kullanılarak U taşınma derecesi ile bu taşınmadan dolayı etkilenen alanın belirlenmesi mümkündür. Fuad vd. (1998)'ne göre artan eU konsantrasyonu ile eU/eTh oranının artması U 'nun yeniden dağılımını yansıtmaktadır ve bu durum U taşınımının iyi bir göstergesi olarak kabul edilmektedir. Kabuktaki U miktarı arttığında, jeokimyasal süreçler boyunca U 'nun bir kısmı cevher olarak konsantre olacağı için U ekonomik açıdan önemli olan bir tortul olarak konsantre olur. U 'nun kayaçtaki bu hareketi ve Th ile K 'dan ayrılması eU/eTh ile eU/K oranlarının azalmasına neden olur. Bu duruma bağlı olarak da bu süreçler boyunca hem eU/eTh hem de eU 'nun standart sapmaları artmış olacaktır. U içeriğinin artması, ortamda yeterli miktarda U bulunması anlamına gelmektedir. Gerekli konsantrasyon ise muhtemelen jeokimyasal süreçler boyunca meydana gelmiştir. Hem eU/eTh hem de eU/K oranlarındaki düşük içerik bu oluşumun açık bir şekilde bu süreçler boyunca meydana geldiğini göstermektedir.

eU ve eU/Th oranı arasındaki ilişki derecesinin yüksek olması, U taşınımında yüksek bir dereceye sahip olduğunu gösterir. Farklı litolojik birimlerdeki eU/eTh oranı ile eTh arasındaki ters orantı ise radyoaktif elementlerin yeniden dağılımlarını gösteren ek bir bilgidir. Efimov (1978) tarafından önerilen ve alterasyon göstergesi olarak adlandırılan F parametresi aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$F = \frac{K}{eTh/eU} = \frac{eU}{eTh/K} = K \times \frac{eU}{eTh} \quad (10)$$

Kayaçtaki alterasyon hakkında bilgi veren bu parametre kayaç ortamı ile ilgili iki önemli özellik içerdiği için çok önemlidir. Bunlardan ilki eTh/eU oranına göre K miktarı, diğeri ise eTh/K oranına göre U miktarıdır. Bazı özel ortamlarda bu değer 10'a kadar ulaşmaktadır. F parametresi, havadan yapılan araştırmalarda U cevherleşmesi ile ilişkili olan K'lı alterasyon zonlarının yerlerinin belirlenmesinde kullanılan yararlı bir analiz yöntemi gibi görünmektedir.

3.1.2. Manyetik Suseptibilite (Duyarlılık)

Malzemelerin bir dış alan etkisinde kazandığı mıknatıslanma değerinin katsayısı olan manyetik suseptibilite, günümüzde çok değişik amaçlar için kullanılabilir. Manyetik cismin oluşturduğu manyetik alan şiddetinin ölçülen değere katkısı, bu cisimden alınacak örneklerin manyetik suseptibilitelerini ölçmekle belirlenir. Manyetik suseptibilite “k” simgesi ile gösterilir ve maddenin, bir dış alan içinde mıknatıslanma kazanabilme yeteneğinin bir ölçüsüdür. Bir kütlenin birim hacmi içinde bulunan dipoller, şiddeti yavaş yavaş arttırılan dış alan yönüne ne kadar çok sayıda ve çabuk yönelebilirse kütlenin manyetik duyarlılığı o ölçüde büyük olur. Manyetik suseptibilite, H dış alan ve J mıknatıslanma şiddeti olmak üzere aşağıda gösterilmektedir.

$$k = -J/H \quad (11)$$

Manyetik suseptibilite boyutsuz bir büyüklüktür. Manyetik suseptibilite, manyetik prospeksiyon yönteminde yer içinde yanal ve düşey doğrultuda değişimini araştırdığımız temel fiziksel parametredir. Yeraltında bulunan ve farklı büyüklükte manyetik duyarlılığa sahip kütleler yeryüzünde ölçtüğümüz manyetik anomalilere neden olur. Bu anomalilerin nedeni, kütlelerin sahip olduğu kalıcı mıknatıslanma ile kütlelerin yer manyetik alanı içinde bulunmaları nedeniyle kazandıkları endüksiyon mıknatıslanmasıdır.

Ancak manyetik histerisisin incelenmesinden anlaşılabacağı gibi, aynı bir madde için uygulanan alan şiddeti değıştikçe farklı mıknatıslanma şiddetleri ölçüleceğinden farklı manyetik suseptibilite değeri elde edilecektir. Jeofizik çalışmaları için maddenin yer manyetik alanına yakın şiddetteki dış alanda sahip olduğu manyetik suseptibilite önemlidir. En düşük manyetik duyarlığa sahip kayalar sedimanter kayalar olup onları büyüklük sırasına göre metamorfik kayalar, asidik ve bazik bileşimli magmatik kayalar izlemektedir.

Ölçümler; bir örnek içinde bulunan mineralleri tanımak, bu minerallerin konsantrasyonunu ya da toplam hacmini hesaplamak, malzemenin farklı tiplerini sınıflandırarak malzemeye özgü farklar yaratmak, formasyonun ya da taşınmanın süreçlerini tanımlamak şeklinde sınıflandırılabilir. Kullanılan alet ile ölçümler çok hızlı bir şekilde kısa sürede alınmaktadır. Ölçümler hemen hemen her materyal üzerinde hem arazide hem de laboratuvar ortamında yapılabilir (Canbay ve Kurtuluş, 2008).

3.1.2.1. Manyetik Suseptibilite Ölçümleri

Manyetik suseptibilite çok kolay bir şekilde ölçülebilen petrofiziksel bir parametredir. Bu parametre, hem laboratuvar ortamında kayalar örnekleri üzerinde hem de arazide yüzeylenmiş kayalar üzerinde ölçülebilir. Arazide yüzeylenmiş kayalar üzerinde manyetik suseptibilite ölçümlerinin yapılabilmesi için son zamanlarda çeşitli aletler geliştirilmiştir. Yapılan tez çalışmasında, KT-10 Plus S/C Suseptibilite Ölçer kullanılmıştır (Şekil 3.4). Öncelikli olarak cihaz hafif ve cep boyutunda olduğu için saha ölçümlerinde sıklıkla tercih edilmektedir. Bu özelliğiyle jeolojik haritalamalar içinde oldukça yararlı bir cihazdır. Ölçüm hassasiyeti 1×10^{-6} SI olan bu cihaz ile suseptibilite ölçümleri birkaç saniyede olmak üzere hızlı bir şekilde alınmaktadır. Yaklaşık 500'den fazla ölçümü hafızasına depolayan cihazın, bluetooth bağlantısıyla GPS ve suseptibilite verilerini birleştirme özelliği bulunmaktadır. USB bağlantısı ile ölçülen veriler kolaylıkla bilgisayara aktarılabilir.



Şekil 3.4. KT-10 Plus S/C Suseptibilite ölçer ve ekipmanları

Portatif manyetik suseptibilite ölçerin arazide sağladığı bazı avantajlar aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- ✓ Yüzeylemiş kayaçlarda duyarlılık ölçümü oldukça hızlı bir şekilde yapılabilmektedir. Her bir ölçüm yalnızca birkaç saniye süreceğinden makul bir süre içerisinde detaylı olarak birçok ölçüm yapılabilmektedir. Laboratuvar ortamında ise arazide alınan ölçüm miktarı kadar ölçüm yapılması mümkün olmayacaktır.
- ✓ Kappameter ölçümleri, makroskopik olarak gözlemlenemeyen jeolojik kütle ya da mostralarda manyetik mineral içeriklerindeki en küçük değişimlerin bile ortaya çıkarılmasına olanak sağlar. Böylelikle manyetik minerallerin içeriğindeki değişimlerin yanı sıra örtülü manyetik ve manyetik olmayan tabakalar, kapanımlar (anklav) ve diğer jeolojik kütlelerde tanımlanabilmektedir.

3.1.2.2. Kayaç ve Minerallerin Manyetik Suseptibilitesi

Kayaçların manyetik suseptibilitesi kayacın içinde bulunan manyetik minerallerin miktarına ve türüne bağlı olarak değişmektedir. Kayaçlarda baskın olarak paramagnetik mineraller (turmalin, mika, amfibol, piroksen ve olivin gibi mafik silikatlar), sıklıkla ferromagnetik mineraller (demir oksit ya da sülfür) ve çok az da diamagnetik mineraller (kalsit ve kuvars) bulunmaktadır. Ferromagnetik mineraller çoğunlukla aksesuar mineralleri ile bağlantılı olduğundan bu mineraller jeolojik oluşumların hassas birer göstergesidir. Bu nedenle manyetik suseptibilite bazı petrolojik problemlerin çözülmesinde yararlı bir parametredir.

Granitik kayaçların suseptibiliteleri çok değişkendir (Açık renkli granitlerde 10^{-6} SI bazı granitoid ya da tonalitlerde 10^{-2} SI). Literatürde granitlerin oluşum evresinde manyetik ya da ferromanyetik, daha sonraki evrede ise zayıf bir şekilde manyetik ya da paramanyetik olduklarından bahsedilmektedir (Dortmon, 1984). Granitik kayaçlar bileşimleri açısından homojen olarak oluşmadıkları için farklı türlere ayrılmışlardır. Genellikle çok zayıf manyetik özelliğe sahip granitler S tipine karşılık gelirken I ve A tipi granitler iyi manyetik özellik gösterirler. Buna bağlı olarak suseptibilite granitin kaynağının belirlenmesindeki ilk yaklaşım olarak kullanılabilir (Ellwood ve Wenner, 1981). Ayrıca, manyetik mineral topluluğu sadece granitin oluşum koşullarını değil aynı zamanda kayacın manyetik mineralojisindeki değişimler vasıtasıyla sonraki evrim sürecini de yansıtır (Kopf, 1966). Bazı kayaç ve minerallerin manyetik suseptibilite değerleri Tablo 3.6 'da verilmiştir.

Tablo 3.6. Kayaç ve minerallerin ortalama manyetik suseptibiliteleri (Clark ve Emerson 1991, Hunt vd. 1995).

Kayaç Türleri	Suseptibilite ($\times 10^{-3}$ SI)
MAGMATİK KAYAÇLAR	
Andezit	0,17
Bazalt	0.18
Diyorit	0.13
Gabro	0.09
Dasit	0.05
Granit	0.05
Granodiyorit/tonalit	0.062
Peridotit	0.2
Kuvarslı ve kuvarslı feldispatlı porfirikler	0.00063
Riyolit	0.038
Monzonit	0.1
Ortalama	0.27
TORTUL KAYAÇLAR	
Kil	0.00025
Kömür	0.000025
Sil/Karbonat	0.0012
Dolomit	0.00094
Kireçtaşı	0.025
Kumtaşı	0.0209
Şeyl	0.0186
Tüf	0.0012
Ortalama	0.05
METAMORFİK KAYAÇLAR	
Gnays	0.025
Granülit	0.03
Kuvarsit	0.0044
Şist	0.003
Mermer	0.025
Migmatit	0.025
Magnetit skarn	1.2
Ortalama	0.073
MİNERALLER	
Biyotit	0.0029
Garnet	0.0027
Ortopiroksen	0.0018
Grafit	0.0002
Olivin	0.0016
Magnetit	5.7

3.1.3. Kayaçlarda Radyojenik Isı Üretimi

Isı; iletim, konveksiyon ve radyasyon ile hareket etmektedir. İletim, bir maddenin içindeki atomik ya da moleküler etkileşim ile ısının madde içerisine taşınmasıdır. Konveksiyonda ise moleküller madde içinde kendi kendilerine bir yerden başka bir yere hareket edebildikleri için ısı transferi meydana gelir. Bu olay sıvı ve gazlarda çok önemlidir. Bir odada ateş yakıldığını düşünelim. Bu durumda hava akımları ışığa doğru hareket ederken yoğun olan soğuk hava ateşten uzağa hareket eder ve sıcak hava ise yükselir. Konveksiyon, ısı transferinde iletimden çok daha hızlı bir yoldur. Radyasyon, elektromanyetik radyasyon ile doğrudan ısı transferini kapsamaktadır. Fakat yerkürede ısı, katı iç çekirdek ve litosferin içine iletim yoluyla taşınır. Katı kütlelerde konveksiyon oluşmamasına rağmen, jeolojik zamanlar boyunca yerküre mantosu çok yüksek akışkanlığa sahip bir sıvı gibi davranmıştır. Bu durumda mantoda yavaş da olsa bir konveksiyon olduğu anlamına gelir. Aslında genellikle sıvı dış çekirdeğin içine olduğu gibi mantonun da büyük bir kısmına ısının konveksiyon yoluyla taşındığı düşünülmektedir.

Kıta içi mantodan gelen ısı akısı ile radyojenik ısı oluşumu bileşenlerini birbirlerinden ayırmak genel olarak kolay değildir. Yüzey ısı akısı iki bileşenden oluşur. Birincisi, üst kabuktaki radyojenik ısı kaynakları, ikincisi ise üst manto ve alt kabuk kaynaklı ısı akısıdır. Yer kabuğunda var olan ısı, manto kökenli ısı ile radyojenik elementlerin bozunmasından oluşur. Radyojenik kaynaklı ısı yer kabuğundaki kısa ve uzun yarı ömürlü izotoplar tarafından oluşturulmaktadır. Kısa yarı ömürlü radyojenik izotoplar (^{26}Al , ^{26}Cl ve ^{60}Fe) yerkürenin ilk dönemlerin ısı üretiminde etkili olurken uzun ömürlü izotoplar (^{235}U , ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K) yerkürenin ilk dönemlerinden günümüze kadar radyojenik ısı üretiminde yer alırlar (Göktürkler, 2002).

Kabukta ısı üretiminde bulunan radyoaktif izotop ürünleri ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th ve ^{40}K 'dir. ^{238}U ve ^{235}U izotoplarının günümüzde bulunma miktarları ise %99.28 ve %0.72'dir. K ise sadece toplam K'yı gösteren bir seviyede bulunmaktadır. Tablo 3.7'de magmatik kayaçlar için, Tablo 3.8'de ise tortul kayaçlar için ortalama radyoaktif ısı üretim miktarları verilmiştir. Tabloya bakıldığında U ve Th'ın ısı üretimine katkısı, K'nın katkısından çok daha fazladır. Granit ise mafik volkanik kayaçlardan çok daha fazla iç ısı üretimine sahiptir. Tükenmemiş mantodaki ısı üretimi ise çok azdır.

Tablo 3.7. Magmatik kayalar için ortalama radyoaktif ısı üretim miktarları (Rybach ve Cermak, 1982).

Derinlik kayaları	A (μWm^{-3})		Volkanik kayalar	A (μWm^{-3})	
	min-max	ortalama		min-max	ortalama
Granit	0.7-7.65	3.00	Andezit		1.13
Siyenit	1.1-5.9	2.84	Bazalt	0.2-0.95	0.63
Diyorit	0.2-2.45	1.15	Riyolit	1.9-4.0	3.58
Gabro	0.1-0.73	0.33	Dasit	0.8-2.9	1.21
Piroksenit	0.1-0.5	0.23	Porfirik	0.7-1.7	0.94

Tablo 3.8. Tortul kayalar için ortalama radyoaktif ısı üretim miktarları (Rybach, 1976; Yalcin vd. 1977).

Kayaç türü	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)	Yoğunluk (g/cm^3)	A ($\mu\text{W/m}^3$)
Kireçtaşı	0.3	2.0	1.5	2.6	0.62
Dolomit	0.7	1.0	0.8	2.6	0.66
Tuz	0.1	0.02	0.01	2.2	0.012
Anhidrit	0.4	0.1	0.3	2.9	0.090
Şeyl-silttaşı	2.7	3.7	12.0	2.4	1.8
Siyah şeyl	2.6	20.2	10.9	2.4	5.5
Kuvarsit	0.9	0.6	1.8	2.4	0.32
Arkoz	2.3	1.5	5.0	2.4	0.84
Gri kumtaşı	1.3	2.0	7.0	2.4	0.99

Birch (1947)'e göre, yer kabuğunun üst bölümünde yer alan radyojenik ısı üretimi, radyoaktif elementlerin oluşturduğu ısı enerjisinin dağılımı ve büyük tektonik süreçlerle ilişkilidir. Turcotte ve Schubert (1982), kıtasal kabuğun termal yapısında radyojenik ısı üretiminin önemli bir faktör olduğunu ortaya koymuşlardır. Isı üretiminde, metamorfizma, magmatizma ve deformasyonlar gibi kabuk süreçlere bağlı sıcaklık değişimlerinin önemli olduğu da değişik çalışmalar ile açıklanmıştır. Ayrıca, Jaupart ve Mareschal (2003), yüzeydeki radyojenik ısı üretimi ile kabuğun derinliklerindeki ısı akısı çalışmalarını ilişkilendirmişlerdir.

Gama-ışını spektrometresi ile yüzeyden yapılan ölçümlerle belirlenen radyoaktif element konsantrasyon değerleri (U, Th ve K) ve kayaca ait yoğunluk değerinin kullanılmasıyla radyoaktif elementlerin ısı üretimine ne kadarlık bir katkı sağladıkları kolaylıkla belirlenebilmektedir. Yer kabuğundaki U, Th ve K gibi radyoaktif elementlerin doğal bozuşmasından radyojenik ısı oluşur.

Radyoaktif elementlerin bozunması ile birlikte ortamda alfa, beta ve gama partikülleri salınımı ve elektromanyetik dalga yayınıcı meydana gelir. Gerek elektromanyetik dalgaların ortamdaki diğer atomlar tarafından emilmesi, gerekse ortamdaki diğer atomların alfa, beta ve gama partikülleri ile çarpışması sonucu bu atomların kinetik enerjilerinde bir artış meydana gelir. Böylelikle ortamın ortalama kinetik enerjisi, yani sıcaklığı artar (Göktürkler, 2002). Ortaya çıkan enerji, üst kabuktaki radyojenik ısıyı oluşturur ve bu enerji, litosferin ısı akısına eklenerek ısı akısı değerinin yükselmesini sağlar. Kabuk kaynaklı radyojenik ısı genellikle kıtasal temelin en üst kesiminden yayılan toplam ısıнын %50-70'ini oluşturur (Rudnick ve Fountain, 1995; Waples, 2002). McLennan ve Taylor (1996)'a göre yer kabuğunun radyojenik ısı değeri 21-34 mW/m³ arasında kalmaktadır.

Radyojenik ısı üretimi A simgesi ile gösterilmektedir ve birimi (μW/m³)'tür. Radyojenik ısı üretiminin hesaplanmasında Rybach'ın formülü kullanılmaktadır (Rybach, 1976). Bu formülden radyojenik ısı üretim miktarının belirlenebilmesi için kayaçların yoğunluk değerleri ile U, Th ve K konsantrasyon değerlerinin bilinmesi gerekmektedir.

$$A(\mu\text{W}/\text{m}^3)=\rho(0.0957C_U+0.0256C_{Th}+0.0348C_K) \quad (12)$$

Rybach'ın radyojenik ısı üretim formülünde; C_U U'nun konsantrasyon değerini (ppm), C_{Th} Th'nin konsantrasyon değerini (ppm), C_K K'nin konsantrasyon değerini (%) ve ρ ise kayaçların yoğunluk değerini (gr/cm³) göstermektedir.

3.2. Laboratuvar Çalışmaları

3.2.1. Toprak ve Kaya Örneklerinin Gama Spektrometrik Analizleri

3.2.1.1. Örneklerin Toplanması

Genel jeolojik yapıya bağlı olarak granitik kütleleri ve bu kütleleri çevreleyen formasyonları kapsayan alanlarda, çalışma alanını en iyi şekilde temsil edecek şekilde kayaç ve toprak örnekleri alınmıştır (Şekil 3.5). Özellikle toprak örnekleri için ölçüm noktaları belirlenirken çalışma alanının homojen bir dağılım göstermesine ve ayrıca yerleşim alanlarına yakın, ekim yapılmamış, otsuz, açık ve düz alanlar olmasına dikkat edilmiştir. Daha sonra belirlenmiş olan bu ölçüm noktalarından (yüzeyden 30 cm kadar bir derinlikten) içerisinde taş, ot, odun parçaları, ağaç kabukları gibi yabancı cisimler ayıklanarak her biri yaklaşık 2 kg olan toprak örnekleri alınıp naylon poşetlere konulmuş ve her bir örneğin üzerine alındığı noktaya ait bilgileri içeren etiketler yapıştırılmıştır.



Şekil 3.5. Araziden toplanan kayaç ve toprak örnekleri

Alınan kayaç örneklerinin ayrışmamış ve bölgeyi en iyi temsil edebilecek şekilde olmasına dikkat edilmiştir. Bunun için balyoz yardımıyla kayaçlar kırılarak örnekler kayaç kütlelerinin iç kısımlardan alınmıştır. Alınan kayaç örnekleri küçük parçalar haline getirilerek poşetlenmiş ve toprak örneklerindeki gibi poşetlerin üzerine alındığı noktaya ait bilgileri içeren bir etiket yapıştırılmıştır. Her bir örnekleme noktasına ait koordinatlar hassasiyeti ± 3 m olan Garmin marka bir el GPS (Global Position System)'i ile belirlenmiştir.

40° 25' 30.61" ve 40° 26' 33.94" kuzey enlemleri ile 39° 49' 28.70" ve 39° 52' 3.69" doğu boylamları arasında bulunan ilk çalışma alanı olan Sarıçiçek granodiyoriti ve çevresinden (Gümüşhane) 195 kayaç ve 70 toprak örneği olmak üzere toplamda 265 adet, 39° 58' 52.87" ve 40° 04' 56.03" kuzey enlemleri ile 39° 57' 28.81" ve 40° 08' 56.87" doğu boylamları arasında bulunan ikinci çalışma alanı olan Sarıhan granodiyoriti ve çevresinden (Bayburt) 224 kayaç ve 43 toprak örneği olmak üzere toplamda 267 adet örnek toplanmıştır.

3.2.1.2. Örneklerin Analize Hazırlanması

Araziden alınan tüm toprak numuneleri laboratuvar ortamında 15–20 gün arasında kurumaya bırakılmıştır. Şekil 3.6'da kurumaya bırakılan toprak örnekleri görülmektedir. Kuruyan toprak numuneleri homojen olmaları için 2 mm'lik elekten geçirildikten sonra deney geometrisine uygun biçimde hazırlanan çapı 55 mm ve yüksekliği 65 mm olan 100 ml'lik plastik ölçüm kaplarına doldurulmuş ve kapların ağızları sıkı bir şekilde kapatıldıktan sonra 1 ay süreyle bekletilmiştir. Ayrıca tamamen doldurulan kaplar tartılarak kap içerisindeki toprağın net kütlesi tespit edilmiştir.



Şekil 3.6. Araziden toplanıp kurumaya bırakılan toprak örnekleri ve çeneli kırıcı yardımıyla boyutları küçültülen kayaç örnekleri

Toplanan kayaç örnekleri Karadeniz Teknik Üniversitesi Jeoloji Mühendisliğinde bulunan örnek hazırlama laboratuvarına getirilmiştir. Kayaç numuneleri öncelikli olarak mineralojik inceleme için gerekli olan parçalar ayrıldıktan sonra, Çeneli Kırıcı yardımıyla 25-30 mm boyutuna getirilmiştir, bir sonraki aşamada ise Çeneli Kırıcıdan elde edilen örnekler Halkalı Öğütücü yardımıyla tane boyutu 2 mm'nin altında olacak şekilde öğütülmüştür.

Daha sonra toprak numunelerinde olduğu gibi darası alınmış plastik numune kaplarına (hassas terazide darası alınmış 55×65 mm geometriye sahip) doldurulmuştur. Etiketlenen ve hava alması engellenecek şekilde kapatılan numune kapları hassas terazide tartıldıktan sonra Radium (^{226}Ra) ve Radon (^{222}Rn) arasındaki radyoaktif dengenin oluşması için 4 hafta beklemeye bırakılmıştır. Böylece tüm kayaç ve toprak numuneleri radyoaktivite ölçme işlemine hazır hâle getirilmiştir.

3.2.2. HPGe Dedektörü ile Örneklerin Radyoaktivite Seviyesinin Belirlenmesi

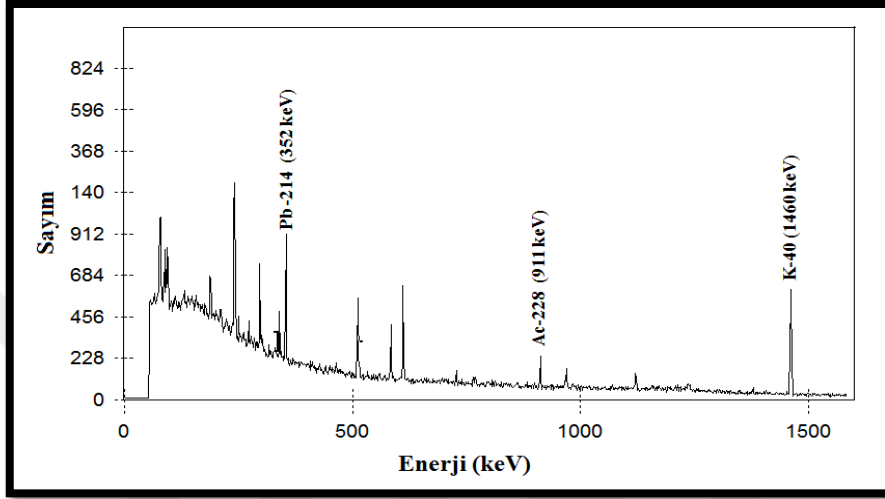
Kurutulup toz hale getirilen numuneler radyoaktivite ölçümü için çapı 55 mm, yüksekliği 65 mm olan plastik kutulara konulup ağızları kapatılarak ölçüme hazır hale getirilmiştir. Laboratuvar ortamında yapılan spektrometrik analizde, toplanan numune sayısının fazla ve ölçüm süresinin de yaklaşık 1 gün olmasından dolayı sadece Sarıççek granodiyoriti ve çevresinden toplanan örneklerden yalnızca 84 örnek kullanılmıştır. Bu örnekler tüm çalışma alanını temsil edecek noktalardan seçilmiştir.

Ölçümler, K.T.Ü. Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Laboratuvarında bulunan çok kanallı gama spektroskopisi ile yapılmıştır. Numunelerin radyoaktivite ölçümleri için 1332,5 keV'de 1,9 keV rezolüsyona ve % 15'lik relatif verime sahip olan Canberra, GC 1519 model HPGe dedektörü kullanılmıştır (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. HPGe dedektörlü Gama spektrometre sisteminin genel görünüşü

Numune, dedektörün hemen önündeki kurşunla kaplı numune odasına konulduktan sonra dedektör sistemi çalıştırılarak yüksek voltaj kaynağı +3600 V'a çıkartılmıştır. Numune sayım süresi 80000 s olarak belirlenmiştir. Sayıma hazırlanan numune, seçilen süre kadar sayılarak spektrumlar elde edilmiş ve Şekil 3.8'de bir kayaç örneğine ait sayım-enerji spektrumu gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Kayaç örneğinin (Sarıçiçek granodiyoriti, Gümüşhane) sayım-enerji spektrumu

Tablo 3.9'da verilen her bir izotop için, spektrumdaki pikler belirlendi. Belirlenen her bir pik için ilgili alan bölgeleri seçilerek en küçük hataya sahip net alanı verecek şekilde pik alanı işaretlenerek her bir pik için net alan ve belirsizlik değerleri hesaplandı.

Tablo 3.9. Aktivite hesaplanmasında kullanılan radyoaktif elementler, enerjileri ve bozunma olasılıkları

İzotop		Gama ışını enerji (keV)	Bozunma olasılıkları (%)
^{238}U	^{214}Pb	295.2	18.28
	^{214}Pb	352.0	35.34
	^{214}Bi	609.4	45.16
^{232}Th	^{212}Pb	238.6	43.6
	^{208}Tl	583.1	85
	^{228}Ac	911.1	25.8
^{40}K		1460.8	10.7

Ölçümler sonucu elde edilen radyonüklidlerin aktivitelerini hesaplamak için aşağıdaki bağıntı kullanılmaktadır.

$$\text{Aktivite} = \frac{\text{Net alan}}{\text{Sayım süresi} \times \text{Numune miktarı} \times \text{Bozunma olasılığı} \times \text{Verim}} \quad (13)$$

Piklerin altındaki net alanlar, toplam alandan background (hesaplanan her bir element için boş ölçümden elde edilen pik alanlar) çıkarılarak elde edilmiştir.

3.2.3. Saha Örneklerinin Yoğunluk Değerlerinin Belirlenmesi

Çalışma alanlarındaki kayaçların radyojenik ısı üretim miktarlarının hesaplanabilmesi için kayaçların U, Th ve K konsantrasyon değerlerinin yanı sıra yoğunluk değerlerinin de bilinmesi gerekmektedir. Her bir kayaç farklı yoğunluk değerine sahiptir. Bu amaçla Sarıçiçek ve Sarıhan'daki formasyonları temsil eden örneklerin yoğunluk değerleri hesaplanmıştır. Araziden toplanan kayaç örnekleri kırıklı ve çatlaklı bir sahip olduğu için numuneler belirli bir geometride kesilememiştir. Bu nedenle su taşıma yöntemiyle yoğunluk belirleme yoluna gidilmiştir.

Deneyde; düzgün bir geometriye sahip olmayan kayaç numuneleri, kullanılacak olan dereceli silindire göre uygun bir boyuta getirilmiştir. Kayaç örnekleri hassas terazide tartılarak kütleleri belirlenmiştir. Dereceli silindire bir miktar su konulup hacmi okunmuştur. Kütlesi bilinen numune dereceli silindirin içine yavaş bir şekilde bırakılmış ve tekrar hacim okunmuştur. Ölçülen son hacimden ilk hacim çıkarılarak düzgün bir geometriye sahip olmayan kayaç numunelerinin katı hacimleri hesaplanmıştır. Kütlesi ve hacmi belirlenen numunelerin yoğunlukları $\rho=m/V$ formülü kullanılarak hesaplanmıştır (Tablo 3.10).

Tablo 3.10. Kayaç örneklerinin laboratuvarında belirlenen yoğunlukları

Kayaç Örnekleri	Hacim (cm ³)	Kütle (gr)	Yoğunluk (gr/cm ³)
Alibaba Formasyonu	12.5	35.83	2.8664
Sarıçiçek Granodiyoriti	28	70.96	2.5342
Sarıhan Granodiyoriti	15	39.47	2.6313
Ofiyolitik Melanj	20	43.52	2.176
Hozbirikyayla Formasyonu	20	56.56	2.828

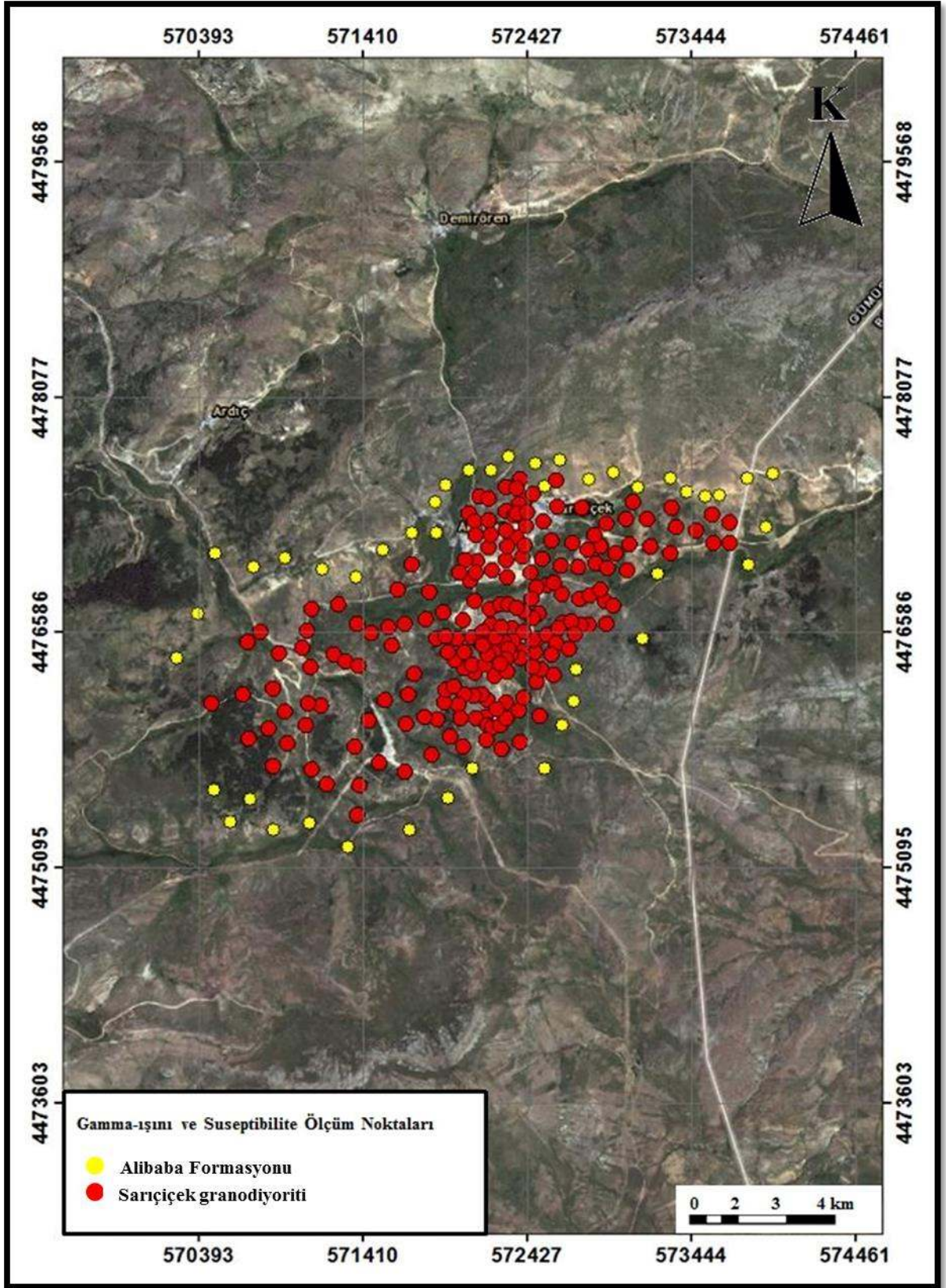
4. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Yapılan çalışma kapsamında; Sarıçiçek granodiyoriti (Gümüşhane) ve Sarıhan granodiyoriti (Bayburt) ile bu kütleleri çevreleyen formasyonlar üzerinde yerinde gama-ışını ve manyetik suseptibilite ölçümleri yapılmıştır. Çalışma, arazi ölçümlerinin yanı sıra laboratuvar ölçümlerini de içermektedir. Her iki çalışma alanının da, radyoaktif açıdan incelenmesi amacıyla Th, K ve U konsantrasyonlarının ölçülmesi, elde edilen radyoaktif element konsantrasyon değerleri kullanılarak yüzeydeki radyojenik ısı üretim değişiminin belirlenmesi, manyetik suseptibilite ölçümleri ile bölgenin manyetik açıdan incelenmesi ve tüm ölçümler sonucunda; radyoaktif konsantrasyon dağılımları, kayaçların ısı üretimleri ve manyetik suseptibilite değerleriyle, jeolojik yapının ne derece uyumlu olduğu belirlenmiştir.

4.1. Sarıçiçek Granodiyoriti ve Çevresi (Gümüşhane)

4.1.1. Yerinde Gama-ışını Ölçümleri

Yerinde gama ışını spektrometre ölçümleri yüzey jeolojisini haritalamada kullanılan Jeofizik yöntemlerden biridir. Haritalama işlemi doğal olarak oluşan ve litolojiye bağlı olarak önemli oranda değişim gösteren radyoaktif elementlerin (U, Th ve K) yüzeydeki konsantrasyon değişimine bağlı olarak yapılmaktadır. Yerinde radyoaktivite ölçümleri Sarıçiçek granodiyoriti ve çevresinde (Gümüşhane) toplamda 265 noktada yapılmıştır (Şekil 4.1). Ölçümler, çalışma alanının büyüklüğü ve topoğrafyası da göz önüne alınarak formasyonları en iyi temsil edecek şekilde düzensiz bir biçimde yapılmıştır. Ölçümlerde Jeofizik Mühendisliği Bölümü Yer Fiziği Laboratuvarında bulunan GF marka 512 kanallı portatif gama-ışını Spektrometresi kullanılmıştır (Şekil 4.2).



Şekil 4.1. Sarıççek granodioriti ve çevresinde alınan yerinde gama-ışını ve manyetik suseptibilite ölçüm noktalarının konumları

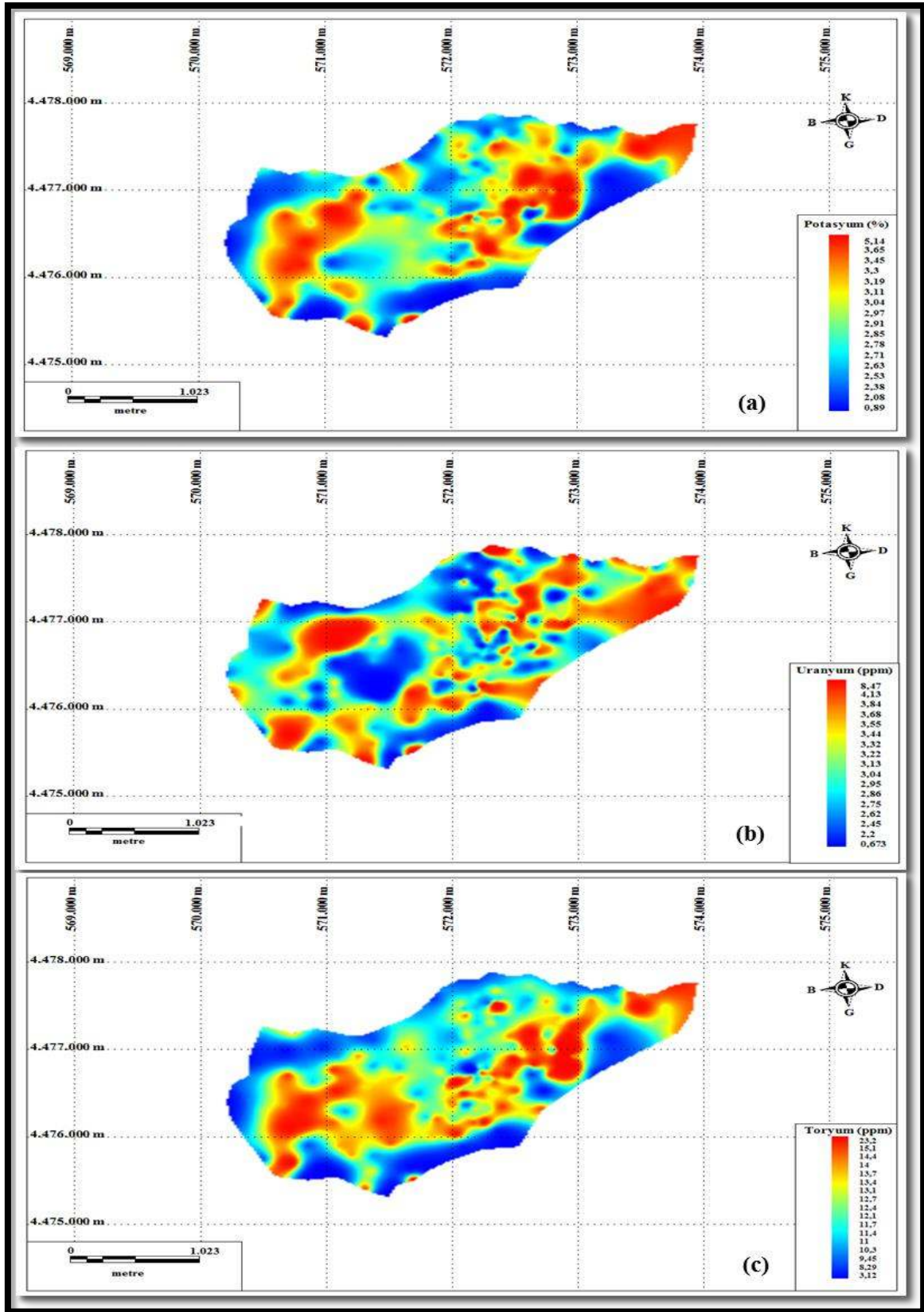


Şekil 4.2. Sarıçiçek granodiyoriti ve çevresindeki kayaç ve toprak üzerinde gama-ışını spektrometre ölçümü

Çalışmada spektrometre ölçüm süresi 300 sn olarak belirlenmiştir. Ölçüm noktalarının koordinatları hassasiyeti ± 3 m olan Garmin marka bir el GPS'i kullanılarak belirlenmiştir. Yapılan ölçümler sonucunda her bir ölçüm noktasına ait K (%), eTh (ppm), eU (ppm) ve doz oranı (nGy/h) değerleri elde edilmiştir. Çalışma alanındaki radyolojik tehlike seviyesinin belirlenebilmesi için K, eTh ve eU konsantrasyon değerlerinin Tablo 3.5'deki dönüşüm faktörleri kullanılarak Bq/kg (aktivite birimi)'a dönüştürülmüştür ve bölge radyolojik risk açısından da değerlendirilmiştir.

Radyonüklidlerin aktivite konsantrasyonları belirlendikten sonra çalışma alanı için absorbe doz oranı, radyum eşdeğer aktivite, yıllık etkin doz eşdeğeri, yaşam boyu kanser riski ve dış tehlike indisleri hesaplanmıştır. Sarıçiçek Granodiyoriti ve kütleyi çevreleyen formasyonlarda konsantrasyon dağılımlarına bağlı olarak jeokimyasal radyonüklid oranları hesaplanmış olup (9) ve (10) nolu bağıntılar kullanılarak birimlerde bir U göçünün olup olmadığı incelenmiştir.

Çalışma alanına ait ^{40}K radyonüklid konsantrasyon dağılımı Şekil 4.3a'da gösterilmiştir. Andezit ve piroklastlarını içeren Alibaba Formasyonu üzerinde K konsantrasyonu en düşük değerde (%0.8) ölçülürken; Sarıçiçek granodiyoriti üzerinde K yüksek konsantrasyonda (%5.22) ölçülmüştür. K dağılım haritasında görüldüğü gibi plütonik kütle üzerinde de konsantrasyon dağılımı oldukça değişkendir.



Şekil 4.3. Sarıçiçek granodiyoriti ve çevresindeki; a) K, b) U ve c) Th konsantrasyon dağılımı

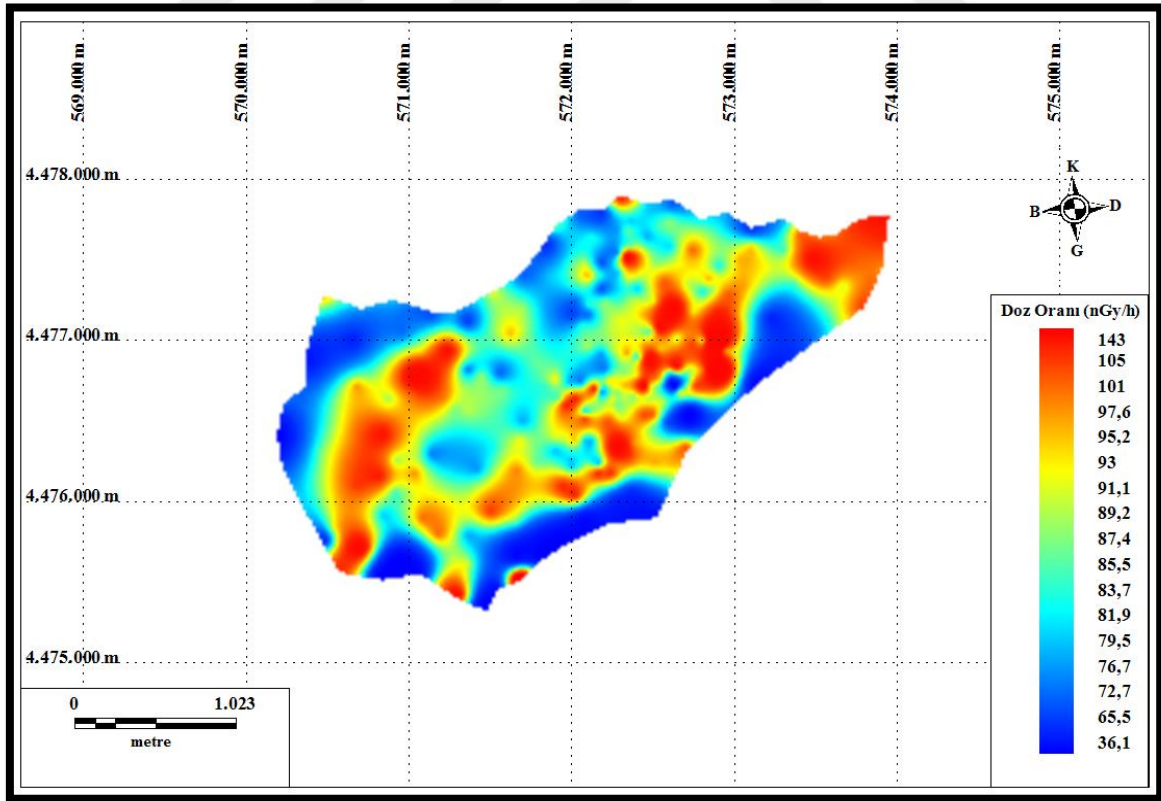
Sarıçiçek granodiyoriti üzerinde yüksek konsantrasyonlu alanlar bünyesinde bol miktarda K'lı feldispatlar (ortoklas, plajiyoklas) gibi kayaç oluşum mineralleri bulunduran granitik kayaçlarla ilişkilendirilmiştir. Karşlı (2002) yaptığı çalışmada, alanda bulunan kuvarslı monzodiyoritlerin diğer kayaçlara göre K'ca fakir mineralleri içerdiğini ortaya çıkarmıştır. Bu sonuca bağlı olarak, düşük konsantrasyonlu bu alanların kuvarslı monzodiyorit olduğu düşünülmektedir. Çalışma alanındaki yüksek değerler K'nın U ve Th ile birlikte konsantre olduğunu gösterirken, K konsantrasyonundaki bu yükselim ortamda altere olmuş kayaçların varlığına da işaret etmektedir. Sarıçiçek granodiyoritinde K konsantrasyonu % 3.13 ortalama ile % 2.15-5.22 arasında, Alibaba Formasyonunda % 2.5 ortalama ile % 0.8-4.88 arasında ve tüm alan için K radyonüklid konsantrasyonu ise % 2.98 ortalama ile % 0.8-5.22 arasında ölçülmüştür.

²³⁸U radyonüklid konsantrasyon dağılımı Şekil 4.3b'de verilmiştir. Tüm çalışma alanı için ortalama U konsantrasyonu 3.15 ppm olarak hesaplanırken, minimum ve maksimum konsantrasyon değerleri 0.5-8.9 ppm arasındadır. Sarıçiçek granodiyoritinin yüzeylendiği alanda yüksek konsantrasyona sahip alanlar olmasına rağmen en yüksek konsantrasyon değeri içerdiği minarallere bağlı olarak andezitik kayaçlar üzerinde ölçülmüştür. Buna karşılık U konsantrasyonu en düşük plütonik kütle üzerinde ölçülürken, granodiyoriti çevreleyen Alibaba Formasyonunun bulunduğu bazı yerlerde de U düşük konsantrasyon dağılımı göstermiştir. Alana genel olarak bakıldığında, yüzeysel ayrışmanın bir sonucu olarak oldukça düzensiz bir değişim sergileyen U'nun güneybatıdan kuzeydoğuya doğru bir artış eğilimi gösterdiği söylenebilir. Konsantrasyon değerlerinin düşük olmasının nedeni, U'nun çözünebilen ve aynı zamanda hareketli bir yapıya sahip olması sonucunda bulunduğu ortamda çökmesi veya sular yardımıyla ortamdaki uzaklaşması ile açıklanabilir. Plütonik kütle üzerindeki yüksek konsantrasyonlu alanlar, içerisinde bolca kuvars bulunan açık renkli ve dolayısıyla SiO₂ içerikli yüksek kayaçlarla ilişkilendirilebilir.

Th radyonüklidine ait konsantrasyon dağılım haritası (Şekil 4.3c) incelendiğinde yüksek Th konsantrasyonuna sahip alanların granodiyoriti üzerinde, düşük konsantrasyonlu alanların ise andezit ve piroklastlarını içeren Alibaba Formasyonu üzerinde olduğu görülmektedir.

Bu radyonüklid bulunduğu ortamda kalarak konsantre olabilir ve böylece bu elementi bünyesinde bulunduran kayaçların olduğu alanlarda da ölçülen radyoaktivite miktarı diğerlerine göre yüksek olur. Ayrışma ve alterasyondan U kadar etkilenmeyen Th, genellikle U'dan fazla artış gösterir. Th plütonik kütle üzerinde bazı noktalarda düşük konsantrasyonlar da sergilemiştir ve bu alanlar ayrışma sonucu asidik özelliklerini bir nevi kaybeden volkanik malzemeli toprak ve kayaçların bulunduğu alanlar olarak yorumlanmıştır. Tüm çalışma alanı için ortalama Th konsantrasyonu 12.45 ppm olarak hesaplanırken, minimum ve maksimum değerler 2.9-23.6 ppm arasında ölçülmüştür.

Sarıçiçek granodiyoriti ve çevresinde; doğal radyonüklidlerin (K, U ve Th) katkıları ile ölçülen çevresel gama doz oranı 88.78 nGy/h'lık bir ortalama ile 31.1-154.5 nGy/h aralığında değişmektedir (Şekil 4.4). Maksimum gama doz oranı değeri (154.5 nGy/h) plütonik kütle üzerinde ölçülürken, en düşük değer (31.1 nGy/h) Alibaba Formasyonu üzerinde ölçülmüştür. Çalışma alanındaki jeolojik birimlere göre ortalama çevresel gama doz oranı değerleri sırasıyla; Alibaba Formasyonu için 75.58 nGy/h ve Sarıçiçek granodiyoriti için 92.56 nGy/h olarak hesaplanmıştır.

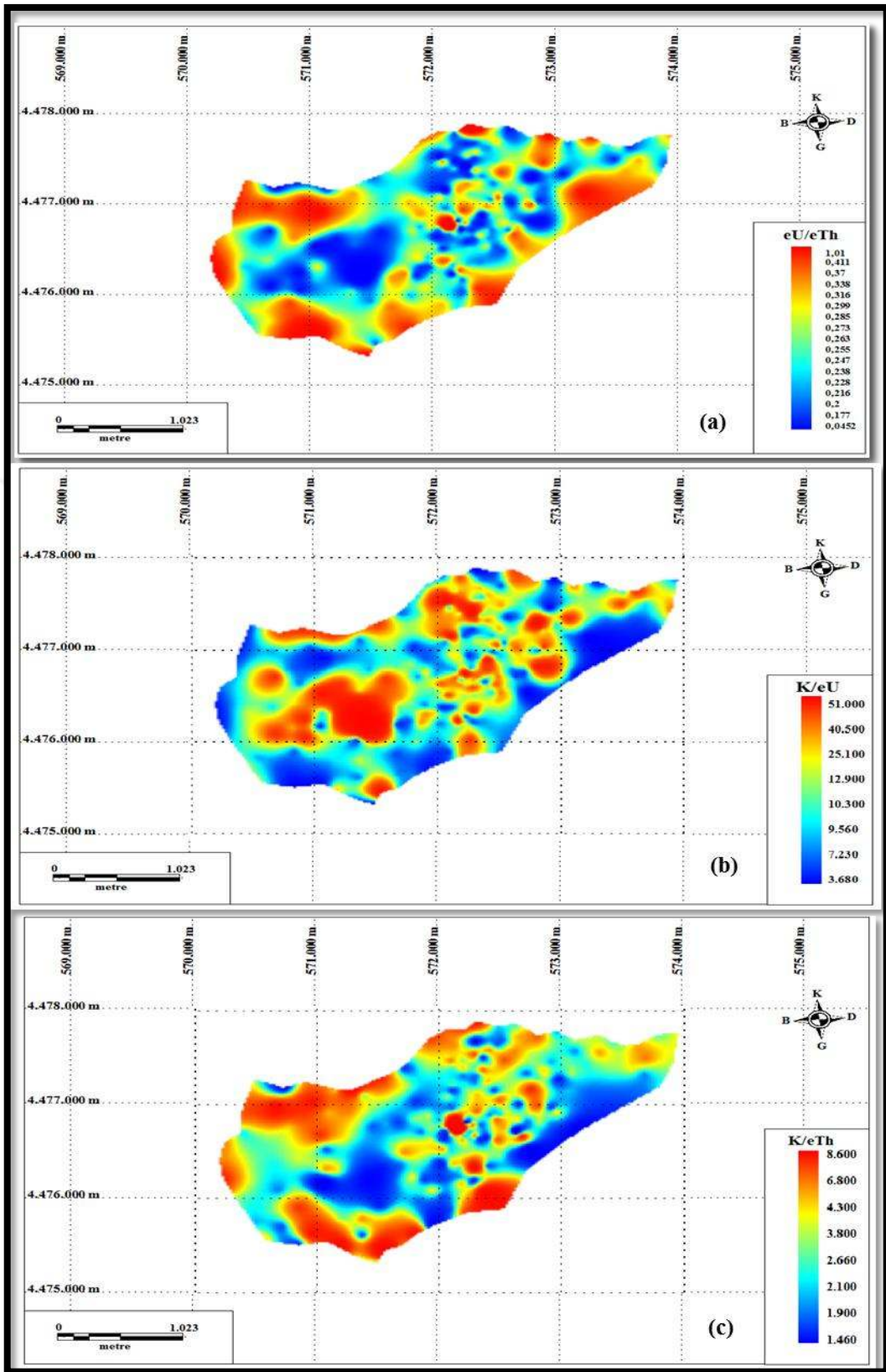


Şekil 4.4. Sarıçiçek granodiyoriti ve çevresindeki doğal doz oranı dağılımı

İnceleme alanının tamamı için eU/eTh oranı 0.268'lik bir ortalama ile 0.031 ile 1.034 arasında değişmektedir (Şekil 4.5a). Sarıçiçek granodiyoritinin kenar ve orta kısımlarında yer yer yüksek değerler gözlenmesine rağmen kütlenin genelinde düşük olarak gözlenmektedir. Alibaba Formasyonu ise oldukça yüksek eU/eTh değerlerine sahiptir. Kıtasal kabuğun eU/eTh oranı (0.25) (Rudnick ve Fountain, 1995) tüketilmiş üst mantonun eU/eTh oranından (0.39) (Sun ve McDonough, 1989) daha düşüktür. Ada yayı magmasındaki yüksek Th içerikli düşük eU/eTh oranları okyanus ada bazaltlarının yerine dalan slabdaki sedimanların katkısını göstermektedir (Maden ve Akaryalı, 2015). Alan için elde edilen ortalama eU/eTh verilerine dayanarak, çalışma alanındaki kayaçların tamamen kabuk orjinli olmadığı, üst manto ve kıtasal kabuk karışımı olduğu yorumunu yapabiliriz. Yüksek eU/eTh oranına (0.4-1) sahip alanlar kıtasal kabuk, ortalama değerlerin olduğu yerlerin manto kaynaklı olduğu düşünülmektedir.

En düşük K/eU oran dağılımı, plütonik kütleyi çevreleyen formasyonda elde edilmiştir. Dağılım haritasında yüksek oranlı alanlar Sarıçiçek granodiyoriti ile karakterize edilmiştir (Şekil 4.5b). Ölçülen konsantrasyon değerleri kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda çalışma alanı için K/eU oranı 3280.9-53600 aralığında değişmekte olup ortalaması 10303.21 olarak bulunmuştur. Farklı manto rezervuarlarındaki eriyiklerin ortalama K/eU oranlarındaki değişim magma kaynak bileşimlerindeki çeşitliği göstermektedir. Taylor ve McLennan (1985) ortalama K/eU değerlerini üst, orta, alt ve toplam kabuk için sırasıyla 9475, 15607, 27245 ve 12367 olarak vermiştir. Çalışma alanı içinde ortalama K/eU oranına sahip alanlar (10303.21) Taylor ve McLennan (1985) tarafından üst kabuk için verilen değerlere oldukça yakın olduğundan kıtasal üst kabuk ile ilişkilendirilmiştir.

Çalışma alanındaki tüm kayaç ve toprak örnekleri için hesaplanan K/eTh oranı 2452.6'lık bir ortalama ile 1121.95-8620.69 arasında değişmektedir (Şekil 4.5c). eU/eTh oran dağılımında olduğu gibi granodiyoriti çevreleyen ve aynı zamanda çalışma alanının sınırlarını oluşturan andezitli formasyonun büyük bir kısmında bu oran yüksek iken, alanın sadece kuzeydoğu ve güneydoğudaki kısımlarında değerde azalma gözlenmiştir. Harita detaylı olarak incelendiğinde, Sarıçiçek granodiyoritinde bu oranın düşük olduğu, kenar kısımlarda ve orta kısımlarda yer yer yüksek değerlere sahip alanların olduğu görülmektedir. Plüton içindeki K/eTh oranının yüksek olduğu alanlar yüksek K içeriğine sahip granitlerle ilişkilendirilmiştir.

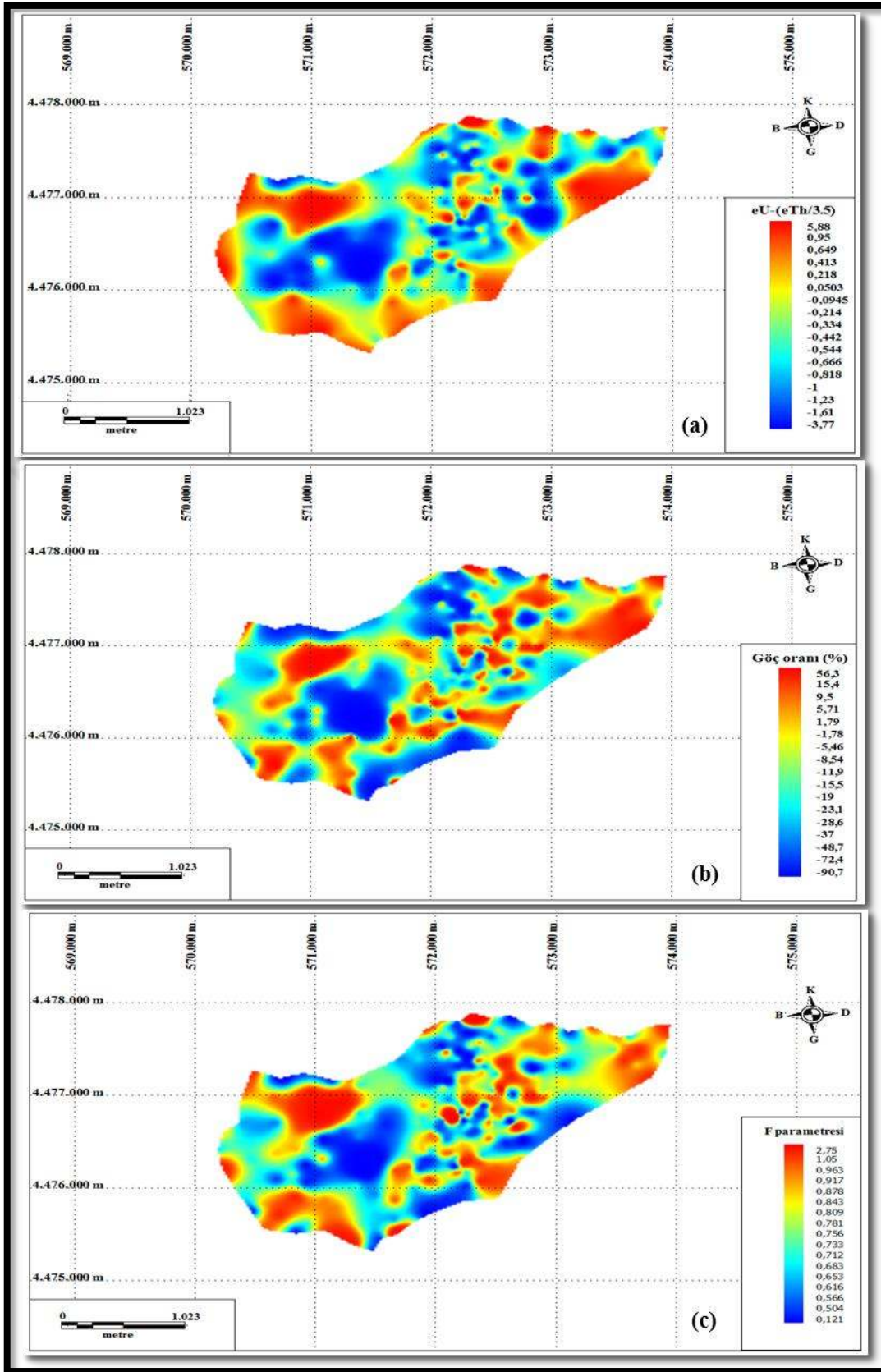


Şekil 4.5. Sarıççek granodiyoriti (Gümüşhane) ve çevresinde a) eU/eTh, b) K/eU ve c) K/eTh oranlarının dağılımı

Sarıçiçek granodiyoritinin büyük çoğunluğunda U göçündeki değişimleri tanımlayan U değişim oranı $(eU-(eTh)/3.5)$ küçük değerlere sahipken kütlenin iç ve kenar kısımlarına doğru küçüğe olsa yüksek değerlere sahip değişimler göstermektedir (Şekil 4.6a). U konsantrasyon haritasında olduğu gibi plütonik kütlenin özellikle kenar kısımlarında bu değişim oranı yüksek değerlere sahip bir dağılım göstermiştir. Çalışma alanı için bu oran -3.98 ile 6.357 arasında değişmekte olup ortalama değeri -0.402'dir. Alandaki negatif değerler U'ca fakir alanları gösterirken, pozitif değerler ise U'ca zengin bölgeleri işaret etmektedir. Şekil 4.6a'da verilen oran değişimi ile U haritası (Şekil 4.3b) birarada değerlendirildiğinde negatif değerler gösteren alanlarda (değişim oranının çok düşük) U radyonüklid konsantrasyonu oldukça az ölçülmüştür. Diğer yandan U radyonüklid konsantrasyonunun yüksek olduğu alanlarda bu değişim oranı pozitif olup oldukça yüksektir. Özellikle negatif değerlerin olduğu kısımlarda başlangıçtaki U içeriğinin bozulduğu ve radyonüklidinin göç ettiği anlamına gelmektedir.

Sarıçiçek granodiyoriti ve çevresi için hesaplanan U göç yüzdesi -14.70 ortalama ile -123.3 ve 62.36 arasında değişmektedir (Şekil 4.6b). Çalışma alanında granodiyorit kenarlarında ve kuzeydoğusunda elde edilen pozitif göç değerleri göçün birimin içine doğru olduğunu göstermektedir. Alibaba Formasyonu için hesaplanan göç yüzdesinin negatif olması ise U göçünün birimin dışına olduğunu işaret etmektedir. Kayaçlarda K, U ve Th radyonüklidlerinin dağılımı; ayrışma, alterasyon, magmatik farklılaşma, sedimantasyon ve metamorfizma gibi jeokimyasal davranışlar ile kontrol edilmektedir (Din, 2009). Bu durumlara bağlı olarak ortamdaki radyonüklidler, özellikle U radyonüklidi yerüstü ve yeraltı sularında düşük sıcaklıklarda çözünüp hareket edebilme yeteneğine sahiptir. Bu süreçler sonucunda bulunduğu ortamdan başka bir ortama taşınarak, ortamda bir artış ve azalışa neden olurlar. Göç dağılım haritasında, özellikle çalışma alanının KB'sındaki alanda çevre kayaçlara doğru bir U göçü göze çarpmaktadır.

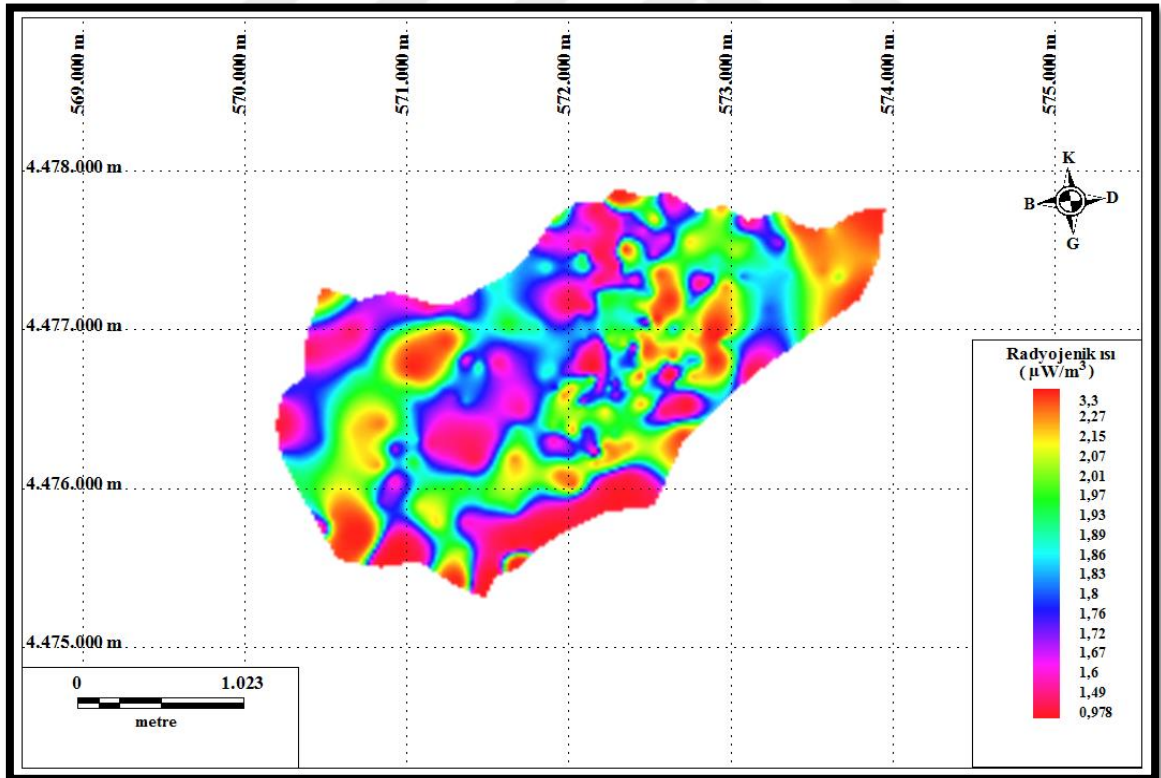
U göç dağılım haritasına oldukça benzer bir dağılım sergileyen alterasyon parametresi (F) Sarıçiçek granodiyoritinde yüksek olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.6c). Bu durum Plüton içerisindeki U ve K konsantrasyonlarının yer yer yüksek olması ve buna bağlı olarak alanda küçüğe olsa bir U zenginleşmesini göstermektedir. Tüm çalışma alanı için ortalama F parametresi 0.77 olarak hesaplanırken, minimum ve maksimum değerleri 0.085-2.92 arasında değişmektedir. Bu parametrenin yüksek olarak gözlendiği alanlar metalik maden aramaları açısından potansiyel sahalardır.



Şekil 4.6. Sarıçiçek granodiyoriti (Gümüşhane) ve çevresinde a) U değişim oranı, b) Göç oranı c) F parametresi dağılımı

4.1.2. Radyojenik Isı Üretimi

Sarıçiçek granodiyoriti ve çevresindeki kayaların içerdikleri doğal radyonüklid miktarlarına ve yoğunluklarına bağlı olarak ısı üretimine olan katkıları Rybach'ın (1976) radyojenik ısı üretim formülü (14 nolu bağıntı) kullanılarak hesaplanmıştır. Çalışılan tüm alan için ortalama radyojenik ısı üretimi $1.884 \mu\text{W}/\text{m}^3$ olup, ısı üretim değerleri $0.885-3.385 \mu\text{W}/\text{m}^3$ arasında değişmektedir. Andezitik kayalardan oluşan Alibaba Formasyonu üzerinde oldukça düşük radyojenik ısı üretim değerleri ölçülmüştür. Granodiyoritin kuzeydoğusunda ve iç kısımlarında yer yer düşük değerlere sahip küçük kapanımlar bulunmaktadır (Şekil 4.7). Ayrıca Sarıçiçek granodiyoritinin orta kısımlarındaki ısı üretim değerleri $1.8 \mu\text{W}/\text{m}^3$ ile $2.15 \mu\text{W}/\text{m}^3$ arasında değişmekte olup bu alanlar ortalama değer üzerinde bir değişim sergilemektedir. Çalışma alanında K ve Th miktarı U miktarına göre daha fazladır. Bu durumda, radyojenik ısı üretimine en fazla katkıyı Th ve K sağlamıştır. Alibaba Formasyonu ve Sarıçiçek granodiyoritinin ortalama radyojenik ısı üretimleri sırasıyla $1.83 \mu\text{W}/\text{m}^3$ ve $1.897 \mu\text{W}/\text{m}^3$ olarak bulunmuştur.



Şekil 4.7. Sarıçiçek granodiyoriti (Gümüşhane) ve çevresinin radyojenik ısı üretimi haritası

Ortalama radyojenik ısı üretim değerlerini Taylor ve McLennan (1985) üst, orta, alt ve toplam kabuk için sırasıyla 1.65, 1, 0.19 ve 0.89 $\mu\text{W}/\text{m}^3$ olarak; He vd. (2009) 1.10, 0.83, 0.37 ve 0.24 $\mu\text{W}/\text{m}^3$; Jokinen ve Kukkonen (1999) ise üst, orta, alt kabuk ve litosferik manto için bu değerleri 1.8, 0.6, 0.2 ve 0.002 $\mu\text{W}/\text{m}^3$ olarak hesaplamışlardır. Çalışma alanının tamamı için elde edilen ortalama değer üst kabuğu gösterirken, radyojenik ısı üretim değerlerindeki değişime göre Sarıçiçek granodiyoriti orta ve üst kıtasal kabuk kökenli kayalardan oluşmaktadır.

4.1.3. Manyetik Suseptibilite Ölçümleri

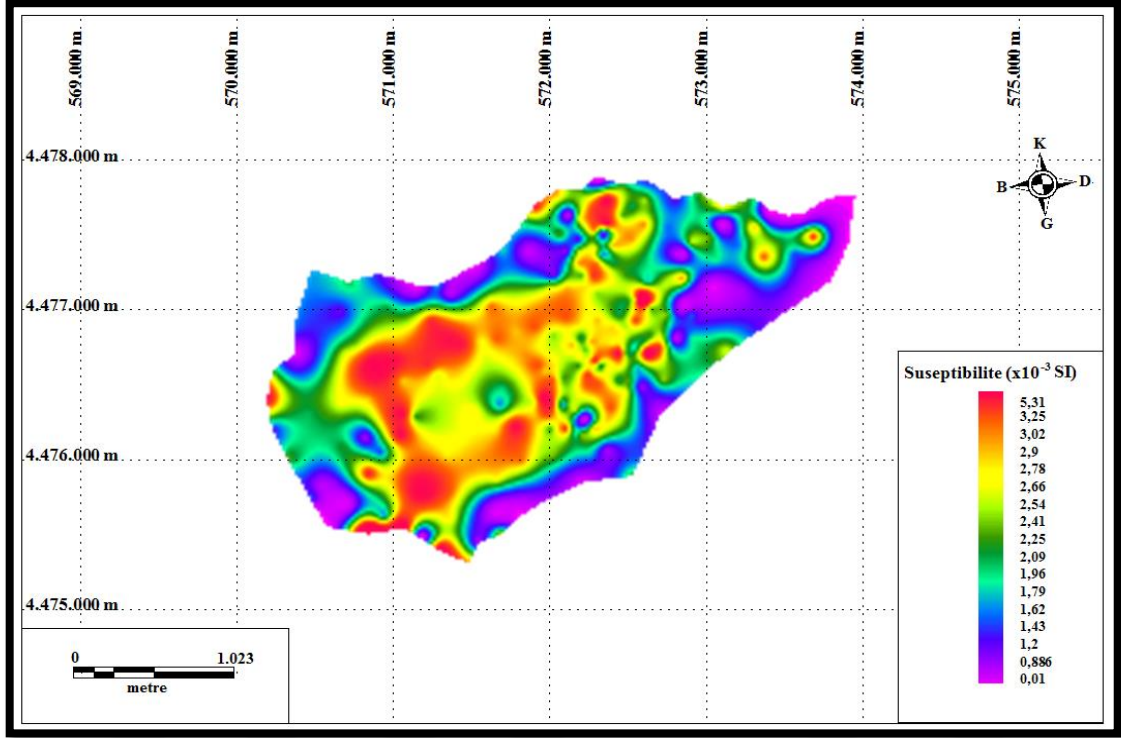
Sarıçiçek granodiyoriti ve kütleyi çevreleyen formasyonlarda yapılacak olan manyetik suseptibilite ölçümleri için KT-10 Plus S/C marka portatif bir suseptibilite ölçer kullanılmıştır (Şekil 4.8). Gama ölçümlerinin yapıldığı her noktada aynı zamanda manyetik suseptibilite ölçümleri de yapılmıştır. Bu ölçümler hem toprak hem de kaya örnekleri üzerinde olmak üzere 265 noktada yapılmıştır. Ölçüm sonunda elde edilen suseptibilite değerleri değerlendirilmiş bölgenin manyetik suseptibilite değişim haritası elde edilmiştir.



Şekil 4.8. Sarıçiçek granodiyoritinde (Gümüşhane) ayrılmış kayaktan oluşan toprak üzerinde manyetik suseptibilite ölçümü

Çalışma alanının manyetik suseptibilite haritası incelendiğinde (Şekil 4.9), oldukça geniş bir değer aralığında ($0.004-5.32 \times 10^{-3}$) değişim gözlenmektedir. Granitik kütle ve etrafını çevreleyen formasyonlarla arasındaki sınır açık bir şekilde görülmektedir.

Alibaba Formasyonu ve Sarıçiçek granodiyoritinin ortalama manyetik suseptibilite değerleri 1.518×10^{-3} SI ve 2.5012×10^{-3} SI olarak belirlenmiş olup tüm alan için ortalama değer 2.282×10^{-3} SI olarak hesaplanmıştır.



şekil 4.9. Sarıçiçek granodiyoriti (Gümüşhane) ve çevresinin manyetik suseptibilite haritası

Granodiyoritin kuzeydoğusu ile evre kayaç olan andezitler düşük suseptibilite değerleri sergilerken, granodiyoritinin büyük çoğunluğunda yüksek suseptibilite değerleri llmştır. Sarıçiçek granodiyoriti içerisindeki yüksek alanlar bünyesinde bolca biyotit minerali bulunduran kayaçlarla ilişkilendirilirken, düşük suseptibiliteli alanlar biyotit içermeyen granitik kayaçlara karşılık gelmektedir.

Elitok vd. (2010) alışmalarında volkanik kayaçların manyetik suseptibilite değerlerinin SiO_2 ve NaO_2 ile negatif, Fe_2O_3 , CaO ve MgO ile pozitif ilişki gösterdiklerini bulmuşlardır. Manyetik suseptibilite dağılım haritasında özellikle SiO_2 içeriği yüksek ve manyetik özellik gösteren mineral içeriği çok az olan granitlerde suseptibilite değeri düşük olarak gözlenmiştir. Ayrıca potasik magmanın farklılaşması ile suseptibilite ters yönde değişim göstermektedir (Elitok vd., 2010). Çalışma alanında K'nın yüksek olduğu bazı alanlarda düşük suseptibilite değerlerinin llmesi bu sonucu desteklemektedir.

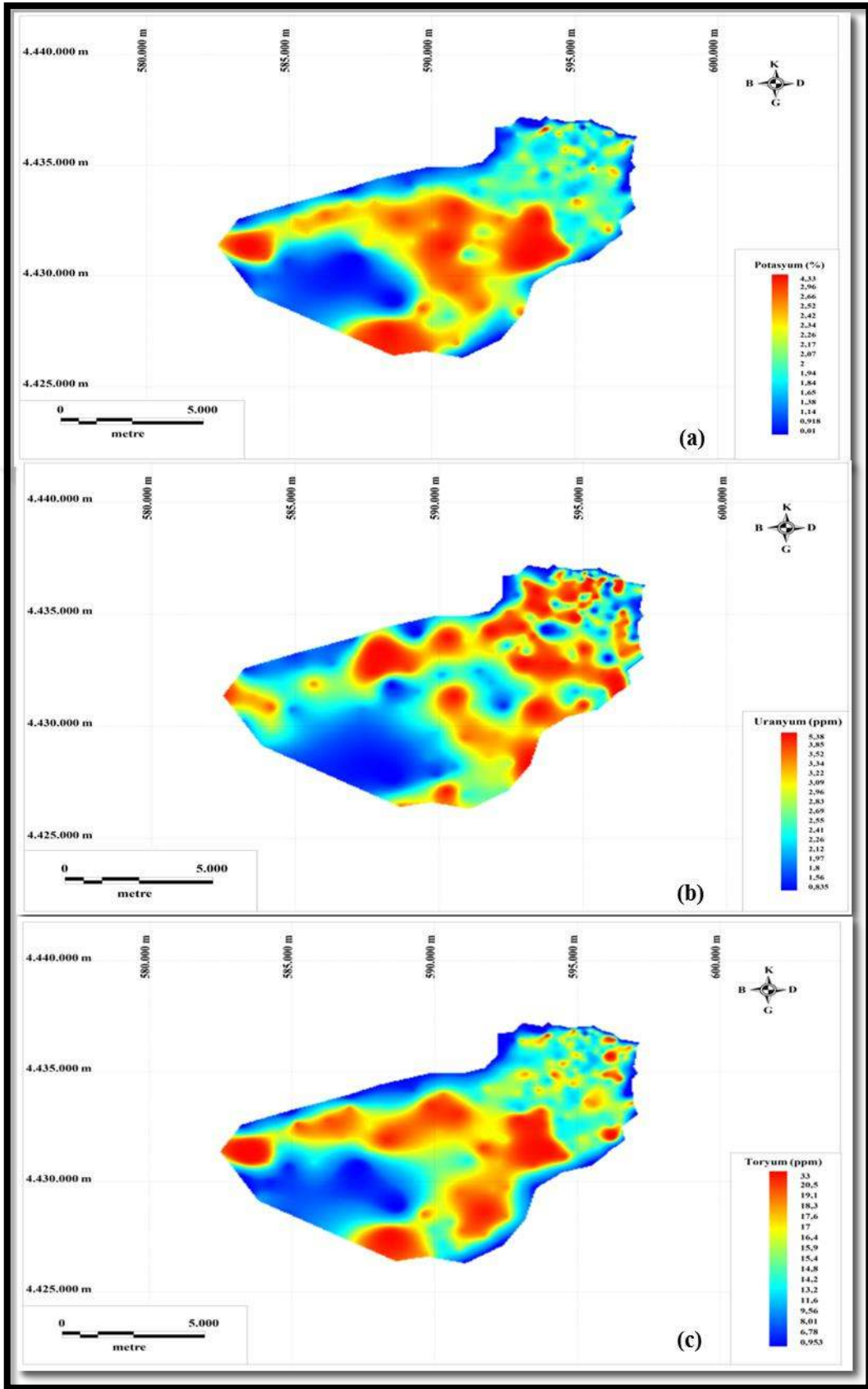
Şekil 4.11a'da gösterilen K konsantrasyon haritası incelendiğinde keskin değişimler açık bir şekilde göze çarpmaktadır. Çalışma alanında en yüksek K konsantrasyonu (%1.29-4.41) Sarıhan granodiyoriti üzerinde ölçülürken, en düşük ^{40}K konsantrasyonu Hozbirikyayla Formasyonunda (kireçtaşı ve kumlu kireçtaşı) ve ofiyolitik olistostromal melanjda (bazalt) ölçülmüştür. K, kayaç yapıcı minerallerden özellikle K'lı feldispatlarda (ortoklaz, mikroklin ve mikada (biyotit) bolca bulunmaktadır. Aslan (2005), Sarıhan granodiyoriti üzerinde yaptığı çalışmada plütonik kayacın % 6-18 Ortoklaz ve % 1-85 oranında Biotit içerdiğini ortaya çıkarmıştır. Buna bağlı olarak yüksek K konsantrasyon dağılımı gösteren alanlar bu mineralleri içeren kayaç ve topraklarla ilişkilendirilmiştir.

Hozbirikyayla formasyonunda, K konsantrasyonun oldukça düşük çıkmasının nedeni kireçtaşlarının içeriğinde bulunan karbonatların varlığı ile ilişkilendirilmiştir. Yapılan ölçümler neticesinde; Sarıhan granodiyoriti'nde K'nın % 2.13 ortalama ile % 1.29-4.41 arasında, ofiyolitik melanj kuşağında (bazaltlar üzerinde) % 1.84 ortalama ile % 0.09-3.63 arasında ve K'nın en düşük değerinde ölçüldüğü Hozbirikyayla kireçtaşında ise % 0.676 ortalama ile % 0.01-2.741 arasında ölçülmüştür.

Eşdeğer U konsantrasyonu da farklı toprak ve kayaç türlerine göre değişiklik göstermiştir. Tüm çalışma alanı için ortalama U konsantrasyonu 2.74 ppm olarak hesaplanırken, minimum ve maksimum değerler 0.8-5.4 ppm arasında ölçülmüştür (Şekil 4.11b). Sarıhan granodiyoritinin yüzeylendiği noktalarda U konsantrasyonu en yüksek değerlerde ölçülürken, melanj kuşağının bazı noktalarında ve kireçtaşı ile kumlu kireçtaşının bulunduğu yerlerde U düşük konsantrasyon dağılımı göstermiştir.

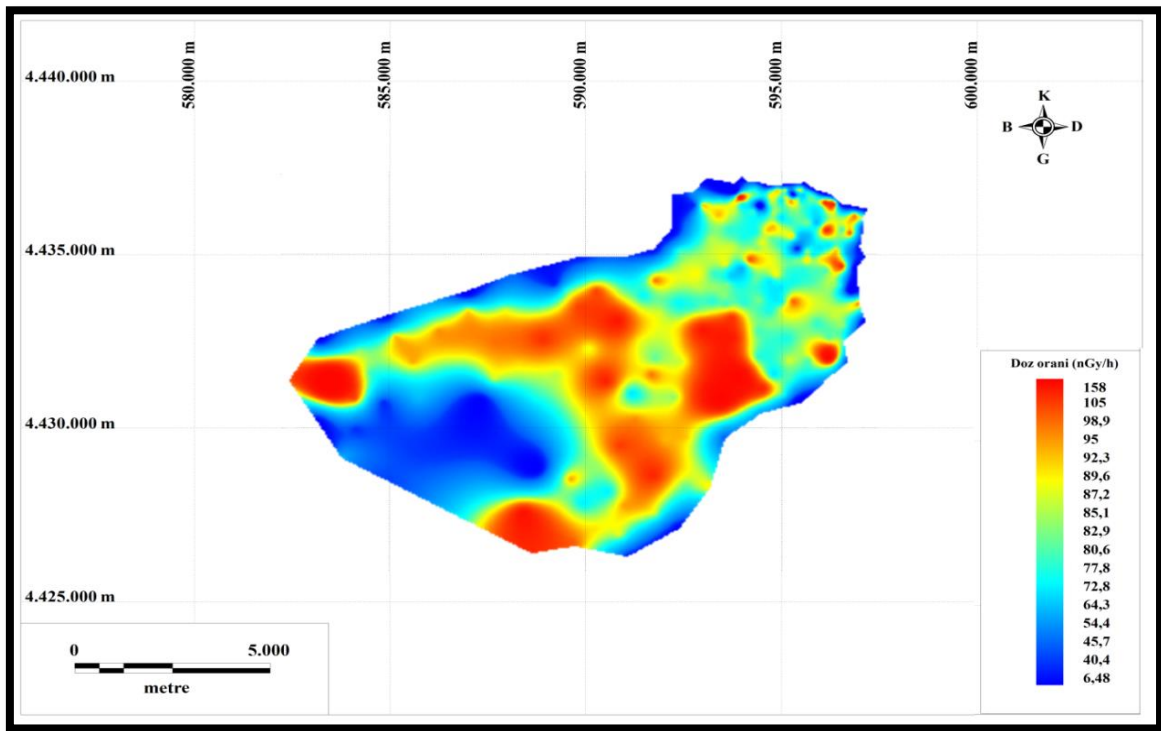
Çalışma alanında ölçülen konsantrasyon değerlerinin düşük olması, U'nun kayaç ve topraklarda var olan organik maddeler içinde çökmesi ya da U minerallerinin yüzey ve yeraltı suları ile daha derinlere taşınması ile açıklanabilir. Çalışma alanının Doğu'sundaki U konsantrasyon dağılımı, Batı kısmındakinden daha fazladır. Konsantrasyon dağılımındaki bu durum U elementinin batıdan doğuya doğru göç etmiş olabileceğini işaret etmektedir. Çalışma alanındaki ortalama U konsantrasyonu; Sarıhan granodiyoriti için 2.98 ppm, ofiyolitik melanj (bazalt) için 2.56 ppm ve Hozbirikyayla Formasyonu (kireçtaşı) için 1.85 ppm olarak hesaplanmıştır.

Çalışma alanında ölçülen ortalama Th konsantrasyonu 13.65 ppm olup, konsantrasyon değerleri geniş bir aralıkta (0.2-33.6 ppm) değişmektedir. Th dağılım haritası Şekil 4.11c’de görülmektedir. Maksimum eşdeğer Th konsantrasyonu (33.6 ppm); incelenen alanda, U ve K dağılımında da olduğu gibi Sarıhan granodiyoriti üzerinde ölçülmüştür. Th eriyebilen ve kolaylıkla hidrolize olabilen bir mineral olmadığından bulunduğu ortamda konsantre olur. Bu yüzden kayalar Th’ı içinde barındırır ve yüksek değerler gösterir. Bu tür kayaların bulunduğu alanlarda Th’ın yüksek olmasından dolayı ölçülen gama radyasyon miktarı da yüksektir. Kireçtaşlarından oluşan Hozbirikyayla Formasyonu üzerinde en düşük Th konsantrasyonu (0.2 ppm) ölçülmüştür. Granodiyorit, ofiyolitik melanj ve kireçtaşlarının ortalama eşdeğer Th konsantrasyonları sırasıyla 16.15 ppm, 12.23 ppm ve 4.43 ppm olarak bulunmuştur.



Şekil 4.5. Sarıhan granodiyoriti ve çevresinde (Bayburt) a) K, b) U ve c) Th konsantrasyon dağılımı

Sarıhan granodiyoriti ve çevresinde; U, Th ve K radyonüklidlerinin katkıları ile ölçülen çevresel gama doz oranı 73,63 nGy/h'lik bir ortalama ile 8.3-160.7 nGy/h aralığında değişmektedir (Şekil 4.12). Üç radyonüklid de olduğu gibi, maksimum gama doz oranı değeri (160.7 nGy/h) granodiyorit üzerinde ölçülürken, en düşük değerler ise ofiyolitik melanj (14.7 nGy/h) ve kireçtaşları (8.3 nGy/h) üzerinde ölçülmüştür. Çalışma alanındaki jeolojik birimlere göre ortalama çevresel gama doz oranı değerleri sırasıyla; kireçtaşları için 30.8 nGy/h, melanj kuşağı için 69.06 nGy/h ve granodiyorit için 85.11 nGy/h olarak hesaplanmıştır.



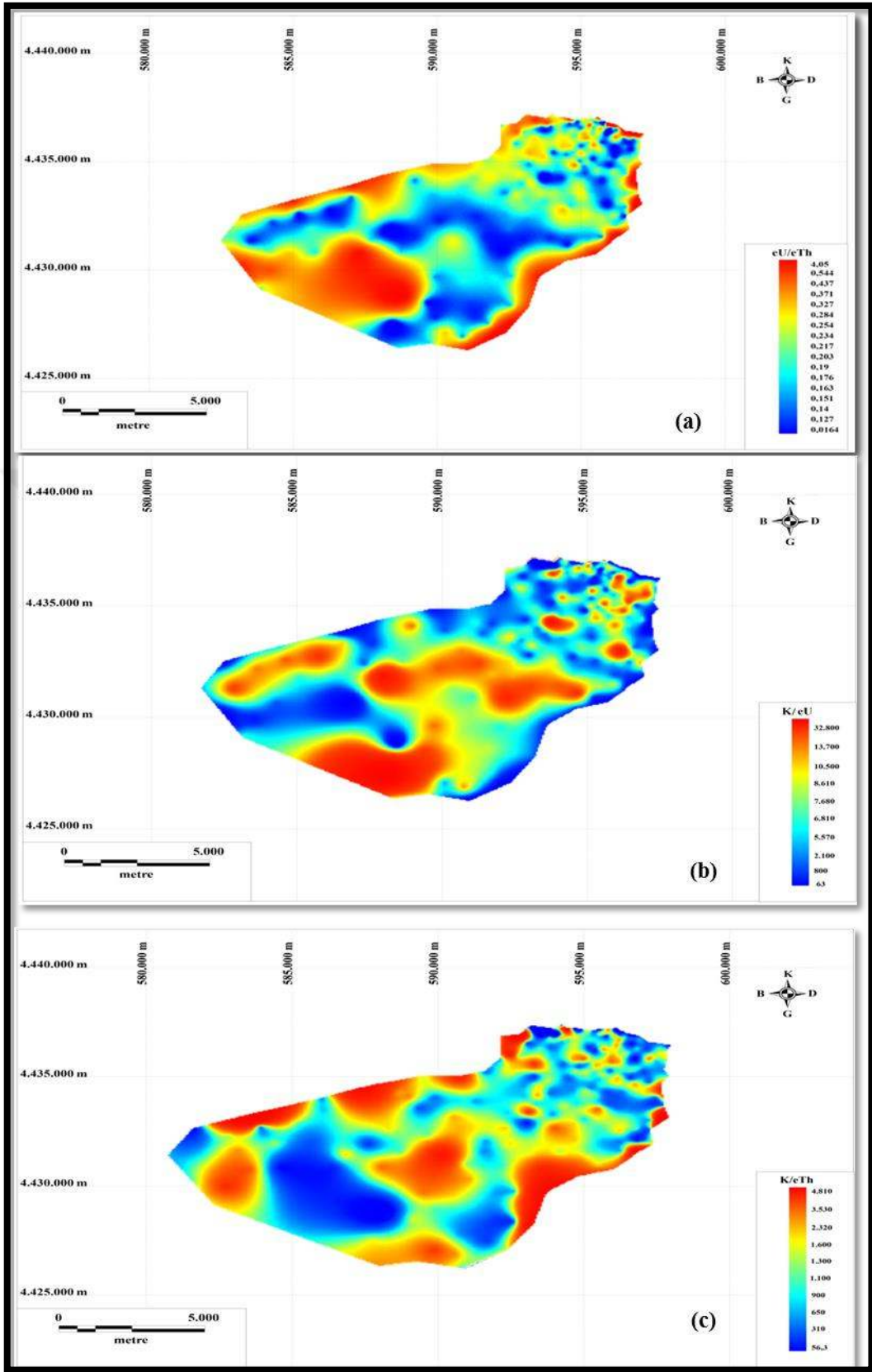
Şekil 4.16. Sarıhan granodiyoriti ve çevresinde (Bayburt) doğal doz oranı dağılımı

İnceleme alanının tamamı için eU/eTh oranı 0.284'lik bir ortalama ile 0.043 ile 5.91 arasında değişmektedir (Şekil 4.13a). Bu oran, U'ca zengin alanların kolay bir şekilde belirlenmesinde kullanılmaktadır. eU/K oranında olduğu gibi kireçtaşları ve melanj kuşağında yüksek olan bu oran, plütonik kütle üzerinde yer yer düşük değerler sergilemektedir. eU/eTh oranının düşük olduğu bu yerler U'ca fakir alanlar olarak tanımlanabilir. Çalışma alanındaki kayaçların kökeni Rudnick ve Fountain (1995) ile Sun ve McDonough (1989) tarafından verilen eU/eTh değerlerine göre değerlendirilmiştir. Sarıhan granodiyoriti ve çevresinde yer alan kayaçlar ortalama eU/eTh değerlerine göre kıtasal kabuk kökenli kayaçlar sınıfına girmektedir.

Tüm alan için hesaplanan eU/eTh oran değişimine göre alanda hem kıtasal kabuk hem de tüketilmiş üst manto kökenli kayaçlar yer almaktadır. Çalışma alanının merkezinde yer alan düşük değerli (<0.3) bölge kıtasal kabuk kökenli kayaçlara karşılık gelirken 0.3-0.5 arasındaki değerlerin olduğu bölgeler tüketilmiş üst manto kökenli kayaçları temsil etmektedir. eU/eTh oranının yüksek olduğu yerler ise özellikle kireçtaşlarının bulunduğu formasyon sınırlarına karşılık gelmektedir.

En düşük K/eU oranı, plütonik kütlelerin güneybatısında yer alan bazaltları içeren melanj kuşağında elde edilmiştir. Dağılım haritasında yüksek oranlı alanlar Sarıhan granodiyoriti ile karakterize edilirken, granodiyoritin etrafını kuzeybatıdan güneydoğuya doğru çevreleyen kireçtaşı ve kumlu kireçtaşı içeren Hozbirikyayla Formasyonu da ortalamanın altında değerlere sahiptir (Şekil 4.13b). Ölçülen konsantrasyon değerleri kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda çalışma alanı için K/eU oranı 62.5-33000 aralığında değişmekte olup ortalama 7111.88 olarak bulunmuştur. Taylor ve McLennan (1985) tarafından verilen K/eU oranı değerlerine göre, çalışma alanı içinde elde edilen ortalama K/eU değerleri üst kabuk için verilen değerlerle uyum içinde olup kayaçların kıtasal üst kabuk kökenli olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca alan için hesaplanan ortalama K/eU oranı Davies (1999) tarafından hesaplanan K/U oranı (7000) değerleri ile de uyumludur.

Çalışma alanındaki tüm kayaç ve toprak örnekleri için hesaplanan ortalama K/eTh oranı 1376.15 olup 35.71 ile 5000 arasında değişmektedir (Şekil 4.13c). Harita dikkatli olarak incelendiğinde, K/eTh oranının 564.97-833.3 arasında olduğu alanlar plütonik kütlelerin güneybatısındaki melanj kuşağına, K/eTh oranının 909,1-1428.57 arasında değiştiği alanların yüksek K içeriğine sahip Sarıhan granodiyoritine ve oranın yüksek olduğu yerlerin ($K/eTh=2500-5000$) ise kireçtaşlarına karşılık geldiği açık bir şekilde görülmektedir. K/eTh oranı mika ve feldspatların yapısı hakkında bilgi vermektedir ve bu orandaki artış kil oranının göstergesi olarak kabul edilmektedir. Ortamda bulunan kil minerallerinin ve organik maddelerin U cevherleşmesini hızlandıran bir etmen olduğu düşünülmektedir.

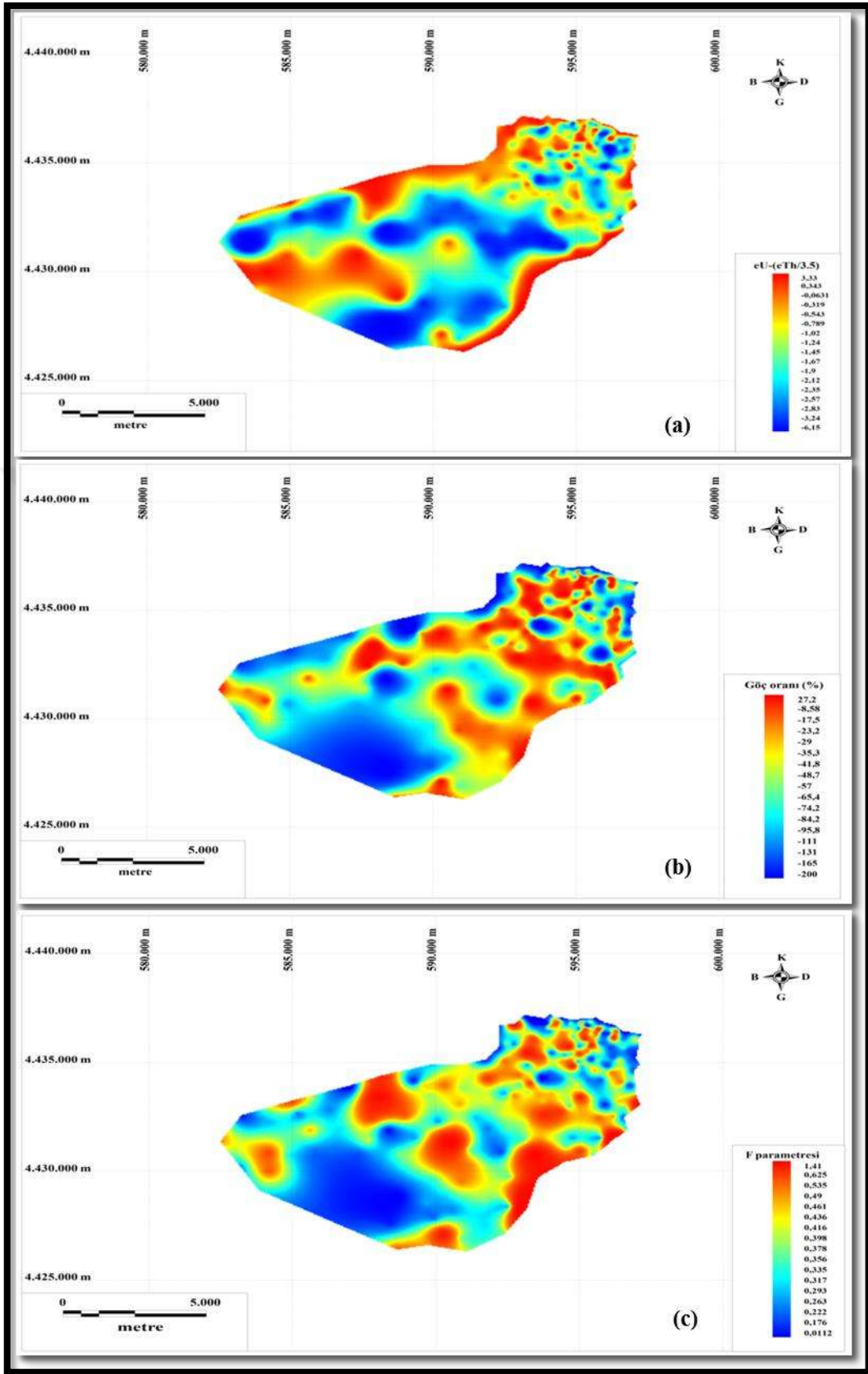


Şekil 4.13. Sarıhan granodiyoriti ve çevresinde (Bayburt) a) eU/eTh , b) K/eU ve c) K/eTh oranlarının dağılımı

U değişim oranı, incelenen alandaki U konsantrasyonundaki değişimlerin tanımlanmasında kullanılmaktadır. Çalışma alanında, diğer jeokimyasal radyonüklid oranlarında olduğu gibi kireçtaşı ve ofiyolitik melanjda yüksek değerler elde edilmiştir (Şekil 4.14a). Buna karşılık Sarıhan granodiyoritinin kuzey kısmında yer yer yüksek ve orta değerler gözlemlenirken, plütonik kütlelerin orta ve güney kesimlerinde oldukça düşük değerler göze çarpmaktadır. Çalışma alanı için bu oran -6.3 ile 3.828 arasında değişmekte olup ortalama değeri -1.164'tür. Alandaki negatif değerler U'ca fakir alanları gösterirken, pozitif değerler ise U'ca zengin bölgeleri işaret etmektedir. Bu oran ortamda konsantre olup kalan ve hareket etmeyen Th radyonüklidine bağlı olarak ortamda varolan orijinal U içeriği de temsil etmektedir. Zamanla formasyon içerisinde ayrışma ve alterasyon gibi olaylara maruz kalan U radyonüklidi orijinal konsantrasyonunu koruyamaz ve değişim gösterir.

Sarıhan granodiyoriti ve çevresi için hesaplanan U göç yüzdesi -48.43 ortalamaya sahipken bu değerler -160.47 ile 27.645 arasında değişmektedir (Şekil 4.14b). Çalışma alanında Sarıhan granodiyoriti üzerinde elde edilen pozitif göç değerleri göçün birimin içine doğru olduğunu göstermektedir. Melanj ve Hozbirikyayla Formasyonu için hesaplanan göç yüzdesinin negatif olması ise U göçünün birimin dışına olduğunu işaret etmektedir. Formasyon içinde bulunan U bileşikleri düşük sıcaklıklarda oksitlenme durumunda suda çözünerek taşınma eğilimi gösterirler ve U radyonüklidi içinde olduğu malzemede tekrar çökelemeyen akıntılarla başka yerlere taşınır. Bulunduğu ortamda taşınma sonucu U konsantrasyonunda bir azalma meydana gelirken, taşındığı ortamda var olan U radyonüklidine eklenerek konsantrasyonda bir artışa neden olur.

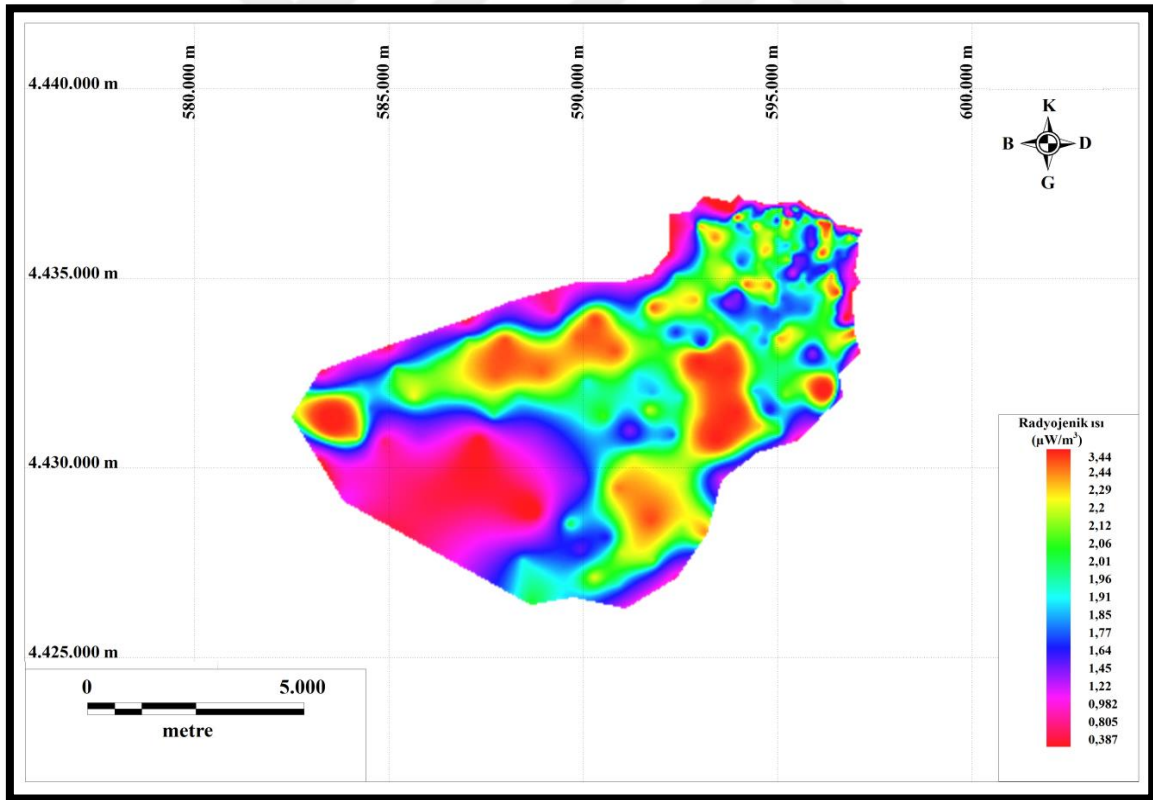
Kayaçtaki alterasyon derecesinin bir göstergesi olan efimov parametresi (F) Sarıhan granodiyoritinde yüksek olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.14c). Bu durum granodiyorit içerisindeki U ve K konsantrasyonlarının yüksek olması ve buna bağlı olarak alanda bir U zenginleşmesini göstermektedir. Tüm çalışma alanı için ortalama F parametresi 0.381 olarak hesaplanırken, minimum ve maksimum değerleri 0.0057-1.473 arasında değişmektedir. Sarıçiçek granodiyoritinde olduğu gibi yüksek F değerine sahip alanlar metalik madenler için muhtemel alanları göstermektedir. Bu parametrenin yüksek olduğu yerler yüksek dereceli alterasyon zonları ile ilişkilidir ve potasik alterasyon süresince kayaçlardaki mafik minerallerin alterasyonu ile ilişkili K zenginleşmesi olan alanları işaret etmektedir (Akaryalı, 2010).



Şekil 4.14. Sarıhan granodiyoriti ve çevresinde (Bayburt) a) U göç değişimi b) Göç oranı ve c) F parametresi dağılımı

4.2.2. Radyojenik Isı Üretimi

Çalışılan alandaki jeolojik formasyonları temsil eden kayaç örneklerinin yoğunluklarının belirlenmesi ve ölçülen konsantrasyon değerlerinin kullanılmasıyla hesaplanan radyojenik ısı üretimi çalışılan tüm alan için $1.772 \mu\text{W}/\text{m}^3$ 'lük bir ortalama ile $0.367\text{-}3.498 \mu\text{W}/\text{m}^3$ arasında değişmektedir (Şekil 4.15). Kireçtaşıyla Formasyonu ve ofiyolitik melanj kuşağında radyojenik ısı üretimi oldukça düşük olarak hesaplanmıştır. Sarıhan granodiyoritinde ise genellikle orta seviyede değerler gözlemlenirken, granodiyoritin içerisinde yer yer yüksek değerler gösteren alanlar da göze çarpmaktadır. Yapılan radyoaktivite ölçümleri sonucunda alanda yüksek Th konsantrasyonu ölçülmüştür. Buna bağlı olarak da radyojenik ısı üretimine en fazla katkısı Th radyonüklidi sağlamıştır. Kireçtaşı, ofiyolitik melanj ve Sarıhan granodiyoritinin ortalama radyojenik ısı üretimleri sırasıyla $0.89 \mu\text{W}/\text{m}^3$, $1.354 \mu\text{W}/\text{m}^3$ ve $2.03 \mu\text{W}/\text{m}^3$ olarak bulunmuştur.



Şekil 4.15. Sarıhan granodiyoriti ve çevresinin (Bayburt) radyojenik ısı üretim haritası

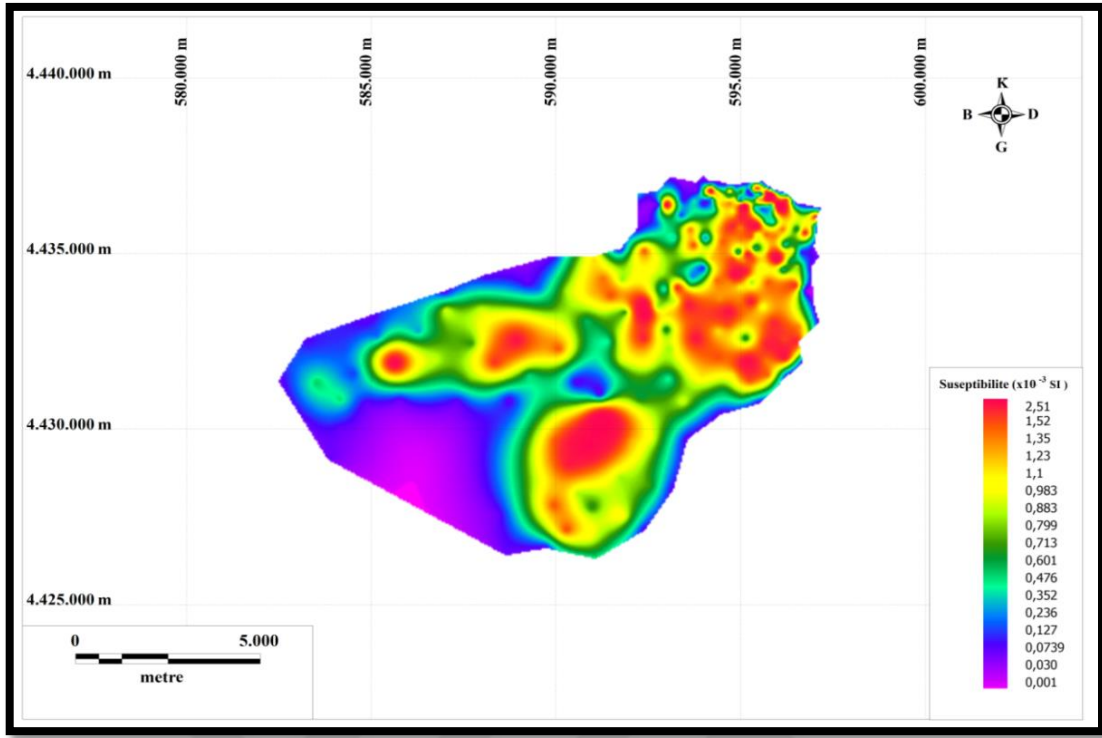
Çalışma alanı için hesaplanan ortalama radyojenik ısı üretim miktarı; Taylor ve McLennan (1985), He vd. (2009) ile Jokinen ve Kukkonen (1999) tarafından verilen değerlere göre üst kabuğu gösterirmektedir. Radyojenik ısı üretim değerlerindeki değişim aralığına göre çalışma alanı alt ve üst kıtasal kabuk kökenli kayalardan oluşmaktadır. Kireçtaşı, ofiyolitik melanj ve Sarıhan granodiyoritinin ortalama radyojenik ısı üretimleri bu sınıflamalara göre ayrı ayrı değerlendirildiğinde ise tüm sınıflamalarda melanj ve granodiyorit üst kıtasal kabuk kayalarına, kireçtaşı ise orta ve toplam kabuk kökenli kayalar (He vd., 2009; Jokinen ve Kukkonen, 1999) sınıfına girmektedir.

4.2.3. Yerinde Manyetik Suseptibilite Ölçümleri

Bayburt ilinde yer alan çalışma alanında toplamda 267 noktada yüzeyden manyetik suseptibilite ölçümü yapılmıştır. Portatif bir suseptibilite ölçer ile her noktada 3 ölçüm yapılarak bu ölçümlerin ortalaması alınmış ve çalışılan bölgenin manyetik suseptibilite haritası elde edilmiştir.

Çalışma alanının manyetik suseptibilite haritası (Şekil 4.16) incelendiğinde, Sarıhan granodiyoriti'nin çevreleyen formasyonlara göre oldukça yüksek değerler gösterdiği açık bir şekilde görülmektedir. Hozbirikyayla kireçtaşı, melanj kuşağı ve granodiyorit ortalama manyetik suseptibilite değerleri 0.059×10^{-3} SI, 0.132×10^{-3} SI ve 1.08×10^{-3} SI olarak belirlenmiş olup tüm alan için ortalama değer 0.83×10^{-3} SI olarak hesaplanmıştır. Granodiyorit içinde oldukça yüksek değerler gösteren alanlar sağlam ve altere olmamış kayalara karşılık gelirken, granodiyorit orta kısmında düşük suseptibilite gösteren alan ise bu üç birimin dokanağında bulunan bozunmuş ya da altere olmuş volkanik kayalara karşılık gelmektedir.

Yüzeyden yapılan suseptibilite ölçümleri ile granodiyoriti diğer formasyonlardan ayıran sınır kolay bir şekilde çizilebilmektedir. Elde edilen değerlerden de görüldüğü gibi Sedimanter kayaların (kireçtaşı ve kumlu kireçtaşı) ortalama suseptibilite değerleri düşük granodiyorit gibi magmatik kayaların ki ise yüksektir. Yapılan arazi ölçümlerinde kireçtaşları üzerindeki bazı noktalarda çok küçük suseptibilite değerler ölçülmüştür ve bu durum bazı kireçtaşlarında mıknatıslanma özelliğinin yok denecek kadar az olduğunun bir göstergesidir. Ayrıca suseptibilite değeri kayacın içerisindeki mineral (manyetit, biyotit gibi) miktarına da bağlıdır. Granodiyorit içerisinde bu mineraller bulunmaktadır.



Şekil 4.16. Sarıhan granodiyoriti ve çevresinin (Bayburt) manyetik suseptibilite haritası

Sarıhan granodiyoritinin kireçtaşını kesmesi ile gelişen skarn zonunda, manyetit, oluşmuştur. Manyetitin ayrışma ürünü olan martit, müşketovit, hematit, götit ve lepidokrositin yanı sıra sıvama şeklinde malakit oksidasyon zonunda gelişmiştir. Skarn, sokulumun doğu, güney ve güneybatı sınırları boyunca geniş bir alanda yüzlek vermektedir. Kireçtaşları mermer veya yan kristalize kireçtaşlarına dönerken bol miktarda manyetit cevheri de oluşmuştur (Aslan, 1998; Aydın vd., 2007). Bu alanda yapılan jeolojik çalışmalara ek olarak bir jeofizik çalışması da yapılmıştır. Skarn zonundaki cevherin derinliğe göre değişimi ve yaklaşık rezervini hesaplamak için manyetik suseptibilite yöntemi kullanılmıştır. Aydın vd. (2007) yaptıkları çalışmada plütonik kütle üzerinde ölçtükleri manyetik suseptibilite değerleri 1.19×10^{-3} SI'lık bir ortalama ile $0.142-2.55 \times 10^{-3}$ SI arasında değişmekte olup, bu çalışmada granodiyorit için hesaplanan ortalama manyetik suseptibilite değeriyle (1.08×10^{-3} SI) uyumludur.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, Gümüşhane ilindeki Sarıçiçek granodiyoriti ve Bayburt ilinde yeralan Sarıhan granodiyoriti ile bu alanların çevresinde radyoaktivite ve manyetik suseptibilite ölçümleri yapılmış olup alanlardaki kayaç ve toprakların doğal radyonüklid içerikleri, insan ve çevre sağlığı açısından bölgelerin radyolojik risk seviyeleri ve inceleme bölgesi içerisinde yer alan jeolojik formasyonların mıkmatıslanma özellikleri ve kayaçların içerdikleri radyonüklid miktarlarına bağılı olarak ısı üretimine olan katkıları belirlenmiştir. Elde edilen bütün bulgular bu bölümde dünyada yapılan diğerk çalışmlar ve dünya ortalaması ile karşılaştırılarak yorumlanmıştır.

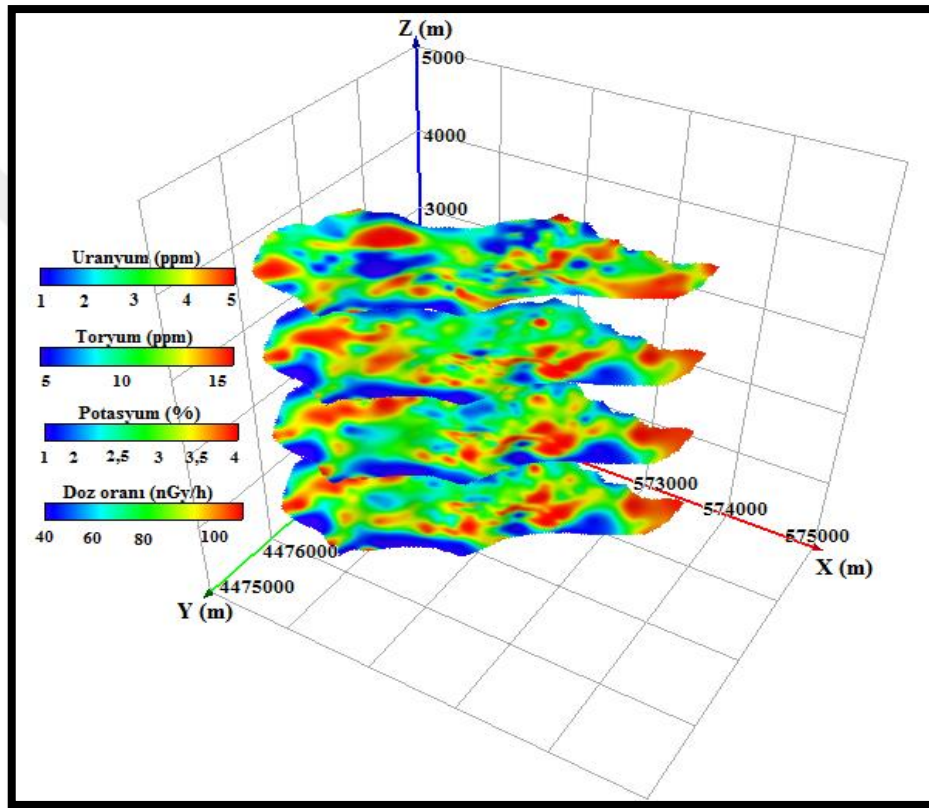
5.1. Sarıçiçek Granodiyoriti ve Çevresi

5.1.1. Arazi Çalışmasından Elde Edilen Bulgular

Bir bölgenin doğal radyoaktivite seviyesi, hem bölgede bulunan toprak ve kayaçlardaki radyonüklid konsantrasyonlarına ve alanın denizden olan uzaklığına bağılı olarak değişmektedir. Gümüşhane'deki ölçüm alanının denizden olan yükseklik 1900-2200 m arasında değişirken ikinci çalışma alanı olan Sarıhan granodiyoritinin denizden olan yüksekliği 1800 m ile 2300 m arasında değişmektedir. Bu durum bölgelerde gama doz oranı değerlerinin yüksek çıkmasının nedenlerinden biridir. Çünkü denizden olan yüksekliğin artmasıyla kozmik radyasyon miktarı artacağından gama radyasyon miktarı da buna bağılı olarak artış gösterir. Bölgenin jeolojik yapısına bakıldığında Sarıçiçek granodiyoriti ve civarında temelde granit, granodiyorit, kuvarslı monzonit ve kuvarslı monzodiyorit bileşimli kayaçlar yüzeyleirken, bu birim Alibaba Formasyonu ile çevrelenmiştir ve kayaç türleri farklı oranlarda kendiliğinden var olan U, Th ve K içermektedir.

Bu jeolojik formasyonlarda yapılan gama-ışını ölçümleri sonucu elde edilen K, U ve Th konsantrasyon haritaları bir arada incelendiğinde, genellikle Sarıçiçek granonodiyoriti üzerinde yüksek ve orta seviyede değerlere sahip kapanımlar, kütleyi çevreleyen Alibaba Formasyonunda ise bu üç radyonüklid için de düşük konsantrasyonlu alanlar açık bir şekilde görülmektedir (Şekil 5.1).

Doz oranı ve bu üç radyonüklidin de yüksek olarak gözlemlendiği alanlar K'lı feldispat ile bol miktarda kuvars içeren ve buna bağlı olarak SiO_2 içeriği yüksek olan granitik kütleler ile ilişkilendirilmiştir. Plüton içerisinde U konsantrasyonunun düşük olarak gözlemlendiği alanlar ayrışma sonucu U'nun ortamda yer altı ya da yüzey suları ile başka yerlere taşınması ile açıklanabilir. Ayrıca Th konsantrasyonu da kütle üzerinde küçüğe olsa düşük değerlerde ölçülmüştür ve bu durumun ise ayrışma sonucu bir nevi asidik özelliğini kaybeden magmatik kayaç ya da topraklardan kaynaklandığı söylenebilir.



Şekil 5.1. Sarıçiçek granodiyoriti ve çevresi için U, Th, K konsantrasyonları ile doğal doz oranı dağılımının üç boyutlu gösterimi

Karslı (2002) yapmış olduğu çalışmada ICR-MS yöntemi ile Sarıçiçek granodiyoritindeki kayaçların ana oksit ve iz element içeriklerini belirlemiştir. Kayaçlardaki K_2O içeriği %2-4.5 arasında, SiO_2 miktarları %58-75 arasında ve ortalama Th konsantrasyonunun 12 ppm olarak ölçülürken, Th ile SiO_2 arasında doğrusal bir ilişki olduğu görülmüştür. Maden ve Akaryalı (2015), gama-ışını spektrometresi ile bazalt ve andezitlerden oluşan Alibaba Formasyonunun radyonüklid içeriğini belirlemiş ve ortalama K, U, Th konsantrasyonlarını %1.75, 3.22 ppm ve 9.01 ppm olarak hesaplamıştır.

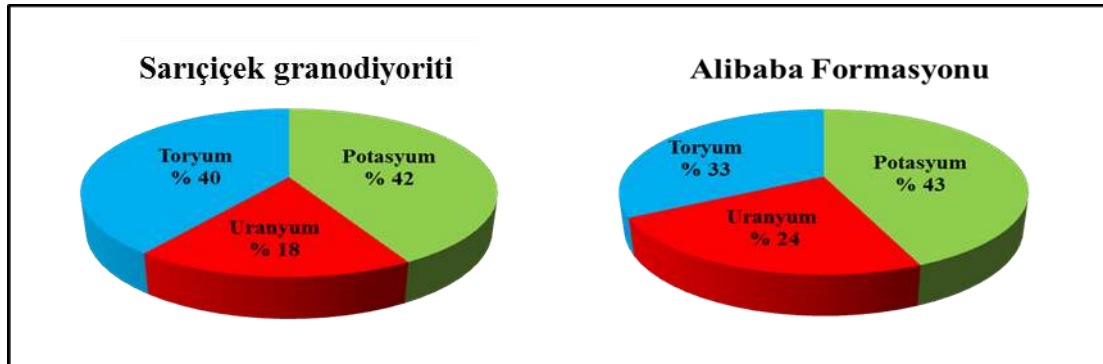
Yapılan bu çalışmada; Sarıçiçek granodiyoritinde K konsantrasyonu % 2.15-5.22 arasında, ortalama U 3.16 ppm ve ortalama Th 13.19 ppm, Alibaba Formasyonunda ise ortalama K, U ve Th konsantrasyonları % 2.5, 3.14 ppm ve 9.88 ppm olarak hesaplanmıştır. Bu çalışmadan elde edilen ortalama konsantrasyon değerleri her iki çalışmadan da elde edilen değerler ile büyük bir uyum göstermektedir.

Sarıçiçek granodiyoriti ve çevresinde doğrudan gama-ışını spektrometresi ile doz oranına ^{40}K , ^{238}U , ^{232}Th ve radyonüklidlerinin etkisinin belirlenmesi için aşağıdaki tabloda verilen değerler kullanılmış (Tablo 5.1) ve bu radyonüklidlerin doz oranına olan katkıları yüzde olarak belirlenip grafiklendirilmiştir.

Tablo 5.1. Yerden 1 metre yüksekte homojen ve sonsuz bir düzlemde U ve Th dönüşüm serilerindeki birim radyonüklid konsantrasyonu başına düşen gama doz oranları (IAEA, 2003).

Radyonüklid konsantrasyonu	Doz oranı (nGy/h)
% 1 K	13,078
eU (1ppm)	5,675
eTh (1ppm)	2,494

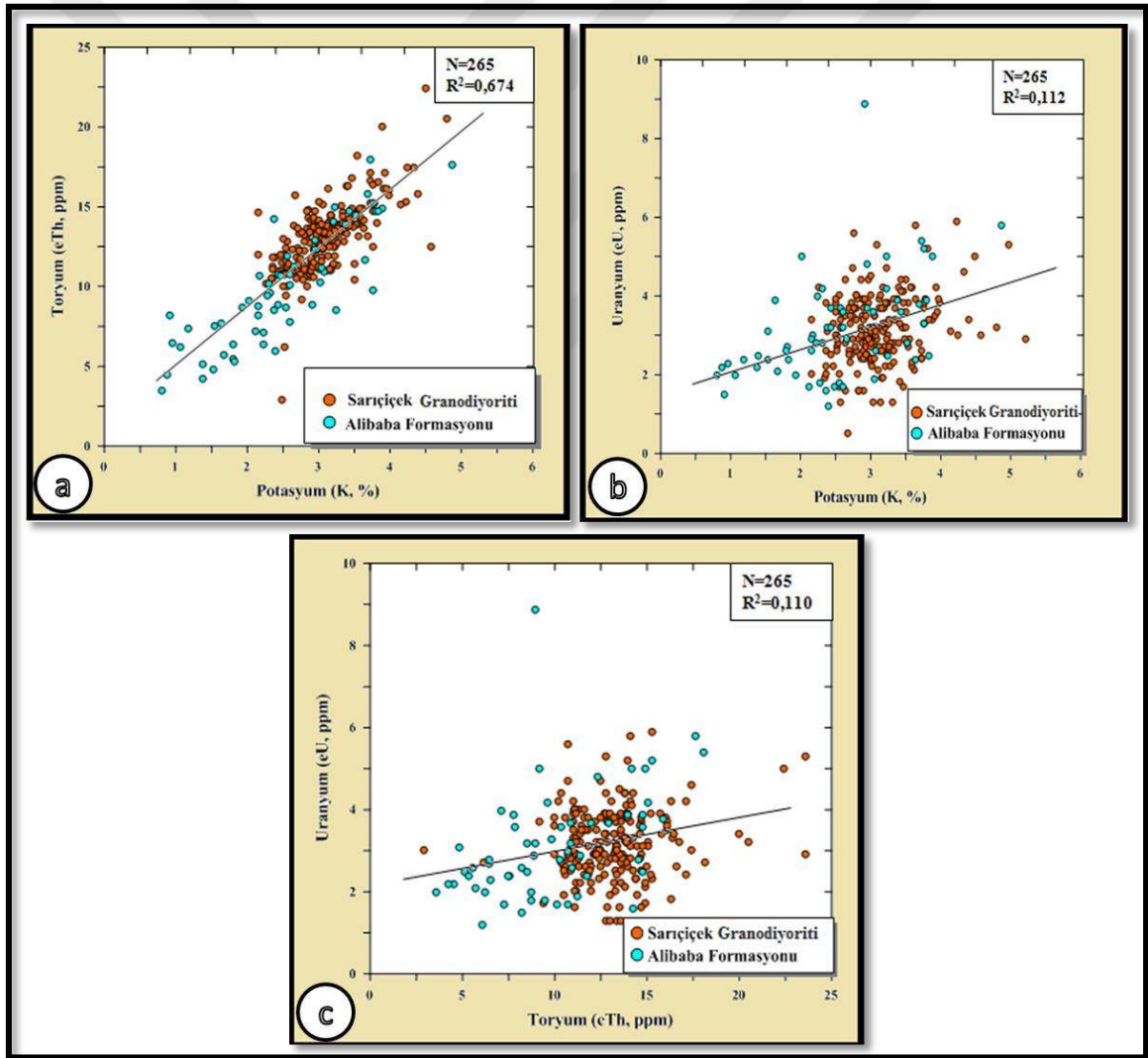
Şekil 5.2’de çalışma alanındaki jeolojik formasyonlara göre; U, Th ve K konsantrasyonlarının doz oranına olan katkısının yüzdelik dağılımı verilmiştir.



Şekil 5.2. Sarıçiçek granodiyoriti ve çevresi (Gümüşhane) için toplam absorbe edilen doza ^{232}Th , ^{238}U ve ^{40}K ' in katkıları

Formasyonların karasal gama doz oranı dağılımı incelendiğinde, gerek Sarıçiçek granodiyoritinde gerekse Alibaba Formasyonunda en büyük katkıyı K radyonüklidi sağlarken en küçük katkının ise U elementinden geldiği görülmektedir.

Çalışma alanında (Sarıçiçek granodiyoriti ve çevresi) toplamda 265 nokta üzerinde yapılan radyoaktivite ölçümleri sonucu elde edilen radyonüklid konsantrasyonları arasında bir ilişki olup olmadığının belirlenmesi amacıyla istatistiksel değerlendirmeler yapılmış olup elde edilen sonuçlar aşağıda detaylı olarak sunulmuştur. Sarıçiçek granodiyoriti ve Alibaba Formasyonu ile tüm alan için K-Th, K-U ve Th-U arasındaki ilişkileri gösteren grafikler çizilmiştir (Şekil 5.3). Şekil 5.3'ten de görüldüğü gibi K ile Th arasındaki ilişki katsayısı 0.67 olup bu iki radyonüklid arasında güvenilir ve doğrusal bir ilişki olmasına rağmen K-U ile Th-U arasında çalışma alandaki jeolojik birimlerin bu radyonüklidleri farklı oranlarda içermelerinden dolayı oldukça fazla saçınma söz konusu olup aralarında iyi bir ilişki ($R^2=0.11$) yoktur.



Şekil 5.3. Sarıçiçek granodiyoriti ve çevresi için a) K-Th, b) K-U ve c) Th-U arasındaki ilişki

Sorensen (1970)'e göre magmatik kayalarda Th radyonüklidi, K ile genellikle U ile çoğu kez pozitif (güvenilir ve doğrusal) bir ilişki göstermektedir. Kısacası bu tür kayalarda U ve Th konsantrasyonu K miktarı ile artış göstermektedir. Ancak kayalardaki mineral içeriğine bağlı olarak yalnızca K ve Th arasında iyi bir ilişki gözlenmiştir.

Çalışma alanı, insan ve çevre sağlığı açısından da değerlendirilmiş olup bölgenin radyolojik risk seviyesini gösteren tehlike parametreleri hesaplanmıştır. Çalışmada yapılan ölçümler sonucunda elde edilen radyonüklid aktiviteleri kullanılarak hesaplanan; havada absorblanmış doz oranı (nGy/h), radyum eşdeğer aktivitesi (Bq/kg), dış tehlike indisi, yıllık efektif doz eşdeğeri (mSv/y) ve yaşam boyu kanser risk parametrelerinin ortalama değerleri Tablo 5.2'de verilmektedir. U göçünün olup olmadığını gösteren parametreler ve jeokimyasal radyonüklid oranları da hesaplanmış Tablo 5.2'de bu verilere ait ortalama değerler de verilmiştir.

Tablo 5.2. Sarıçiçek granodiyoriti ve çevresine ait min, max, ortalama radyonüklid konsantrasyon oranları ve U göç parametreleri ile radyolojik tehlike indisleri

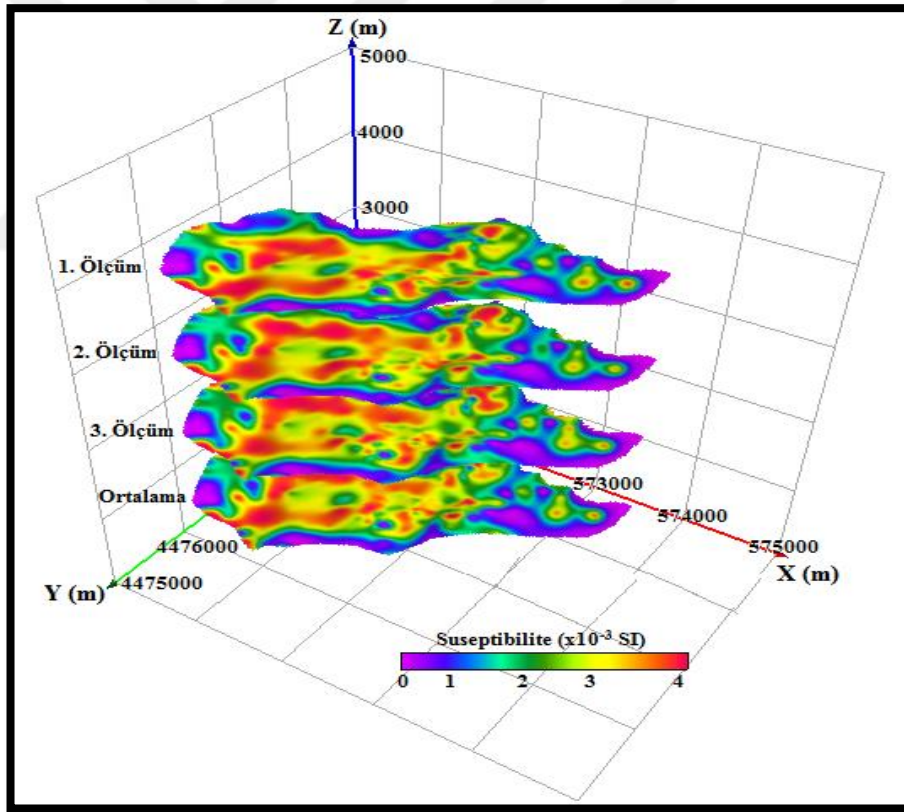
	eTh/K	eU/eTh	eU/K	F	U _{me} (%)	eU- (eTh/3,5)	Ra _{eq} (Bq/kg)	H _{dış}	YEDE (mSv/y)	KR (×10 ⁻³)
Min	1,16	0,031	0,186	0,08	-123,3	-3,98	45,02	0,173	0,0373	0,130
Max	8,91	1,034	3,047	2,92	62,36	6,357	267,303	0,8706	0,187	0,657
Ortalama	4,20	0,268	1,09	0,77	-14,70	-0,402	176,83	0,4949	0,107	0,375
Dünya ort. UNSCEAR 2000	---	---	---	---	---	---	370	≤1	0,080	0.29

Çalışma alanında ölçülen manyetik suseptibilite, radyonüklid konsantrasyonları ve bu konsantrasyon değerleri kullanılarak hesaplanan radyojenik ısı üretim oranlarının ortalama değerleri Tablo 5.3'te verilmiştir.

Tablo 5.3. Sarıçiçek granodiyoriti ve çevresinde elde edilen radyoaktivite, radyojenik ısı ve suseptibilite parametrelerinin minimum, maksimum ve ortalama değerleri

	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)	K (Bq/kg)	U (Bq/kg)	Th (Bq/kg)	D (nGy/h)	A (μW/m ³)	K (×10 ⁻³ SI)
Min	0,8	0,5	2,9	250,4	6,175	11,77	30,435	0,885	0,004
Max	5,22	8,9	23,6	1633,86	109,915	95,81	153,12	3,385	5,32
Ortalama	2,98	3,15	12,45	935,27	38,97	50,56	87,54	1,884	2,282
Dünya ort. UNSCEAR 2000	---	---	---	400	35	30	60	---	---
Kabuk ort. IAEA 2003	2-2.5	2-3	8-12	---	---	---	---	1.1 Sharma 1997	---

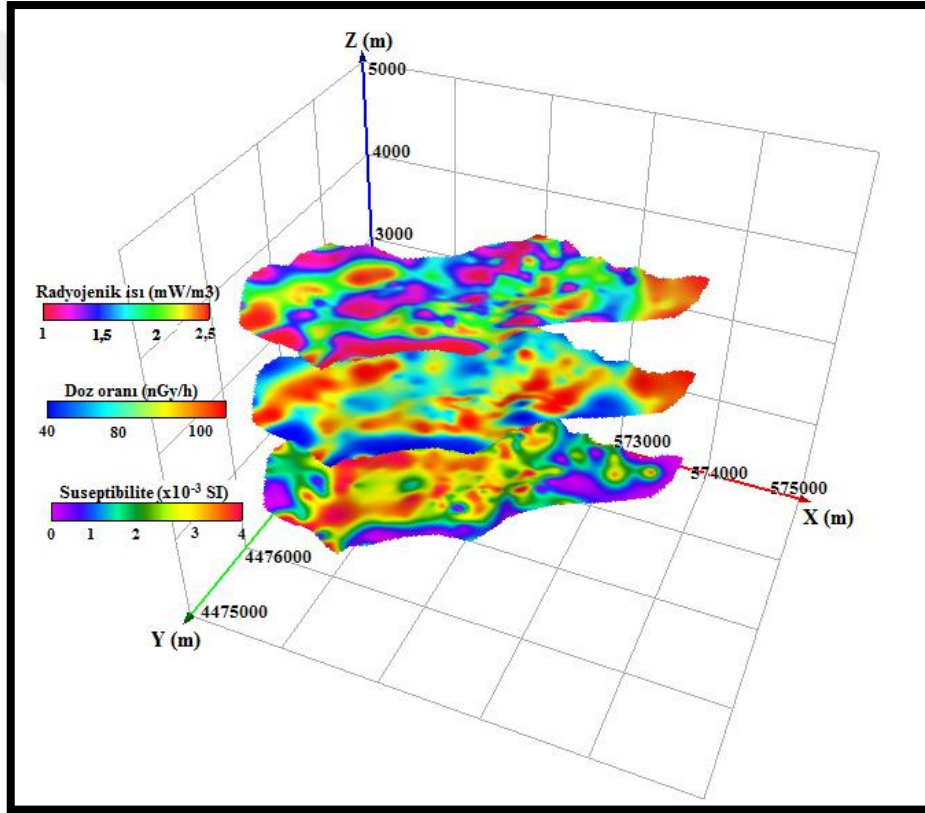
İncelenen alanda yapılan manyetik suseptibilite ölçümlerinde elde edilen verilerin daha güvenilir olması amacıyla her bir ölçüm noktasında 3 okuma yapılarak ortalamaları alınmıştır (Şekil 5.4). Yapılan üç okumada da birbirine yakın değerler elde edilmiştir. Sarıçiçek granodiyoritini oluşturan kayaçlar farklı miktarlarda plajiyoklas, ortoklas, kuvars, amfibol, biyotit, piroksen, Fe-Ti oksit (magnetit ve ilmenit) ve sfen mineralleri içermektedir (Karlı, 2002). İçerdikleri farklı oranlardaki minerallere göre de farklı manyetik suseptibilite değerleri sergilenmiştir. Alandaki yüksek suseptibilite değerleri (Granodiyoritin KD'su hariç geri kalan kısımlarında) bozuşmanın daha az olduğu masif kayaç yapılarını ve mıknatıslanma özelliği gösteren ilmenit ve manyetitce zengin kısımları göstermektedir. Granodiyoritle sınır halinde olan andezit ve bazaltlar düşük suseptibilite değerleriyle dikkat çekerken bu kısımların bozuşmuş ya da demir içeren minerallerden yoksun olduğu söylenebilir.



Şekil 5.4. Sarıçiçek granodiyoriti ve çevresi için manyetik suseptibilite değişiminin üç boyutlu gösterimi

Şekil 5.4'den de görüldüğü gibi alanda yüksek ve düşük suseptibiliteye sahip alanlar belirgin bir şekilde ayırt edilebilmekte ve buna bağlı olarak mineralizasyon ve alterasyon zonları da net bir şekilde gözlenebilmektedir.

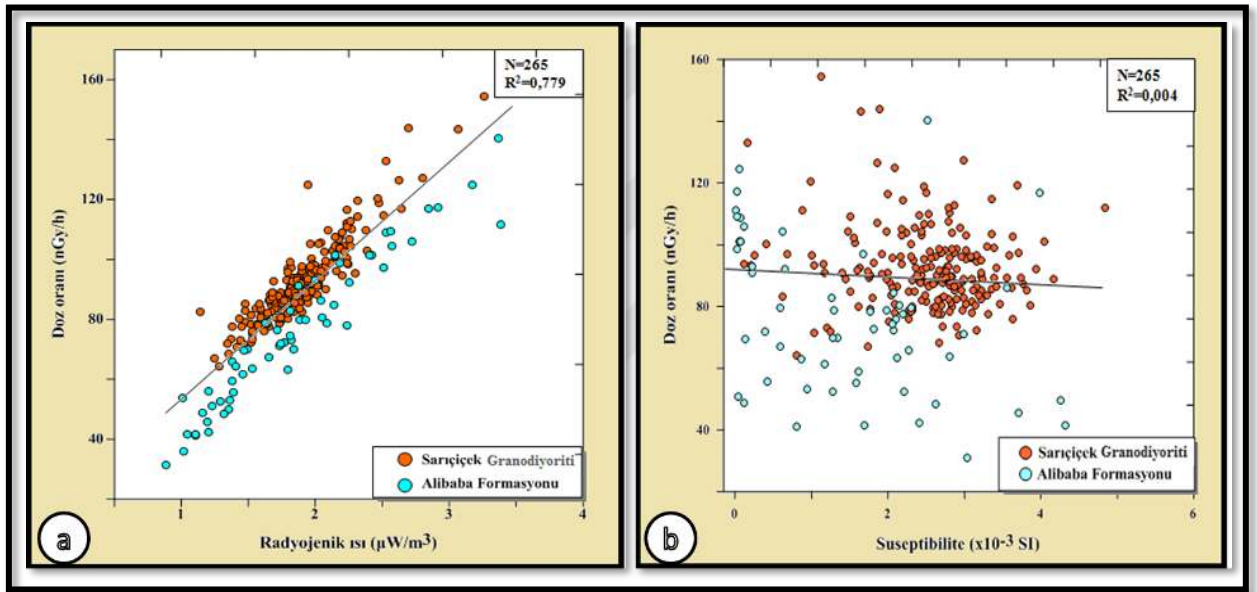
Sarıçiçek granodiyoriti ve çevresinde yapılan bütün ölçümler arasında bir ilişkinin var olup olmadığının belirlenmesi amacı ile elde edilen radyojenik ısı üretimi, doz oranı ve manyetik suseptibilite haritaları bir arada çizilerek birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Radyojenik ısı üretimi; U, Th ve K konsantrasyonları ile doğrudan ilişkili olduğu için radyojenik ısı üretim haritasında görülen değişimler radyoaktif element anomalileri ile belli bir uyum içindedir. Alandaki gerek plütonik kütlelerin gerekse etrafını çevreleyen formasyonun içerdiği farklı oranlardaki radyonüklid konsantrasyonlarına ve manyetik özellik taşıyan minerallerine bağlı olarak plütonik kütle üzerinde radyojenik ısı, doz oranı ve suseptibilite yüksek değerler sergilerken, çevre formasyon üzerinde oldukça düşük değerler ölçülmüştür (Şekil 5.5).



Şekil 5.5. Sarıçiçek granodiyoriti ve çevresindeki doğal doz oranı, radyojenik ısı üretimi ve manyetik suseptibilite değişiminin üç boyutlu gösterimi

Şekil 5.5’de gösterilen değişim haritalarında bölgenin radyoaktivitesi ile suseptibilite değişimleri arasında bir uyum gözlenmesine rağmen bu iki parametre için yapılan istatistik çalışma sonucunda manyetik suseptibilite değerleri ile radyonüklid konsantrasyonlarının katkısıyla hesaplanan doz oranı arasındaki ilişki yok denecek kadar azdır (Şekil 5.6a).

Bu durum, alandaki formasyonların içerdikleri radyonüklid miktarları ile manyetik özelliğe sahip mineralleri aynı oranda içermemelerinden kaynaklanmaktadır. Radyoaktif element dağılımı ve manyetik suseptibilite değişimleri magmatizma ve sonrasındaki süreçle ilişkilidir. Düşük suseptibilite magmatizma sonrası oksidasyonu işaret ettiği için oksidasyon nedeniyle manyetit kayıktan uzaklaşır (Uyanık, 2011). Böyle bir süreç sonunda gerek radyonüklid miktarlarında gerekse mineral içeriklerinde düzensiz değişimler meydana gelir. Doz oranı ve suseptibilite arasında bir uyum gözlenmezken ($R^2=0.004$), radyojenik ısı ile doz oranı arasındaki ilişkinin oldukça iyi ve güvenilir bir ilişki ($R^2=0.779$) olduğu söylenebilir (Şekil 5.6b).



Şekil 5.6. Sarıççek granodiyoriti ve çevresi için a) Radyojenik ısı üretimi-Doz oranı ve b) Manyetik suseptibilite-Doz oranı arasındaki ilişki

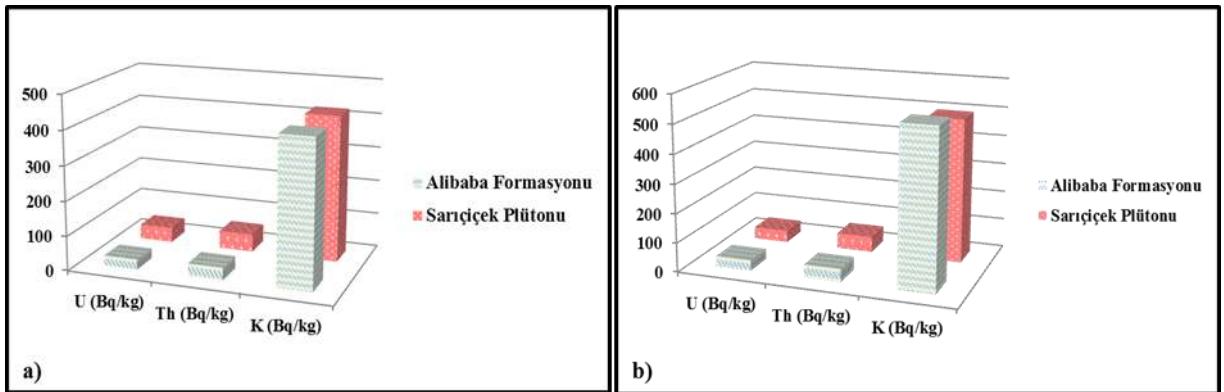
5.1.2. Laboratuvar Çalışmasından Elde Edilen Bulgular

Arazide ölçülen veriler ile laboratuvar da daha yüksek hassasiyete sahip sistemle (HPGe dedektörlü) ölçülen veriler arasındaki ilişki belirlenmiştir. Tablo 5.4’de laboratuvar ve arazi ölçümlerinden elde edilen ortalama aktivite konsantrasyonları verilmektedir.

Tablo 5.4. Sarıçiçek granodiyoriti ve çevresi için laboratuvar ve arazide ölçülen ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K radyoaktif çekirdeklerinin ortalama aktivite konsantrasyonları

Formasyon	Laboratuvar Ölçümleri (HPGe dedektörü)			Arazi ölçümleri (NaI(Tl) dedektörü)		
	U (Bq/kg)	Th (Bq/kg)	K (Bq/kg)	U (Bq/kg)	Th (Bq/kg)	K (Bq/kg)
Alibaba Formasyonu	29.2	37.05	422.436	35.72	45.12	543.71
Sarıçiçek Granodiyoriti	42.93	51.68	422.81	40.91	54.35	495.71

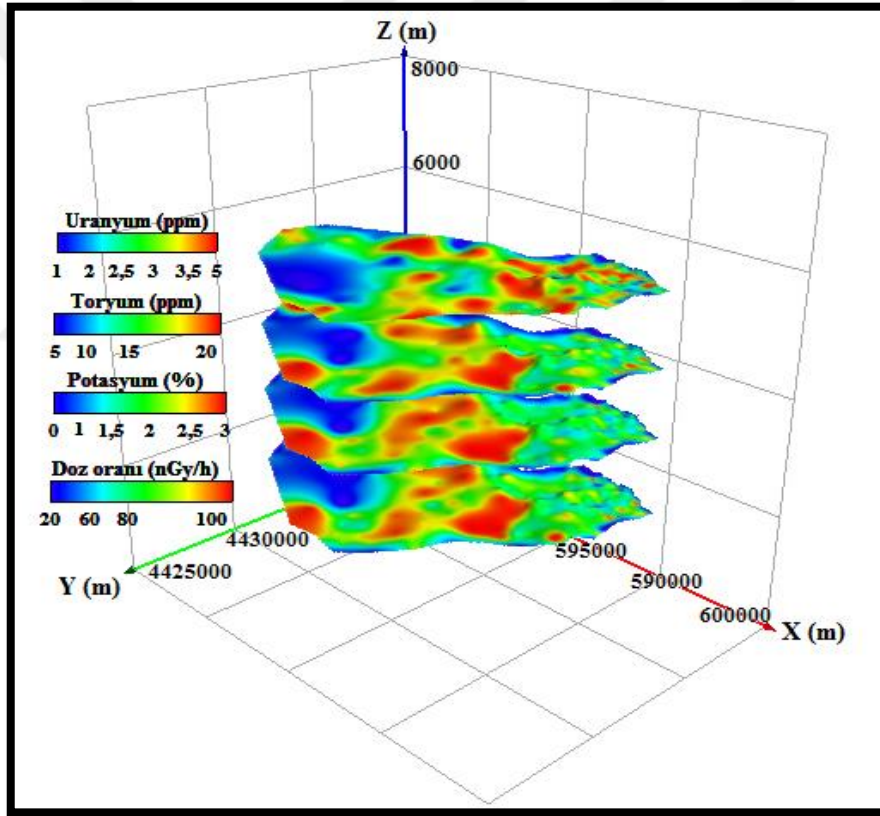
Her iki dedektörde analiz edilen örnekler için elde edilen ^{232}Th , ^{238}U ve ^{40}K radyoaktif çekirdeklerinin aktivite konsantrasyonları Şekil 5.7’de gösterilmektedir. Şekil 5.7 ve Tablo 5.4 birlikte incelendiğinde ^{232}Th , ^{238}U ve ^{40}K ’ın aktivite değerleri için, NaI(Tl) dedektörü ile yerinde yapılan ölçüm sonuçlarının, laboratuvar da HPGe dedektörü ile yapılan analiz sonuçlarıyla uyumlu olduğu görülmüştür.



Şekil 5.7. Sarıçiçek granodiyoriti ve çevresi için a) HPGe (Laboratuvar) ve b) NaI(Tl) (Arazi) dedektörlerinden elde edilen ^{232}Th , ^{238}U ve ^{40}K aktivite konsantrasyonlarının birlikte gösterimi

5.2. Sarıhan Granodiyoriti ve Çevresi

Sağlam bir görünüşe sahip olan granodiyorit içerisinde özellikle güney kısımlarda arenalaşma ve hidrotermal ayrışmaya bağlı olarak kayaçlar oldukça kolay bir şekilde parçalara ayrılmakta ve toprak şeklinde görülmektedir (Şekil 2.8). Sarıhan granodiyoriti içindeki bu duruma bağlı olarak da radyoaktif element içeriklerinde de değişimler meydana gelmiştir. Granodiyorit ve etrafındaki Hozbirikyayla kireçtaşı ile ofiyolitik melanj üzerinde yapılan gama-ışını ölçümleri sonucu elde edilen K, U ve Th konsantrasyon ve doz oranı haritaları bir arada incelendiğinde, genellikle granodiyoritik kütle üzerinde her üç radyonüklid için de yüksek ve orta seviyede değerlere sahip kapanımlar görülmektedir (Şekil 5.8).

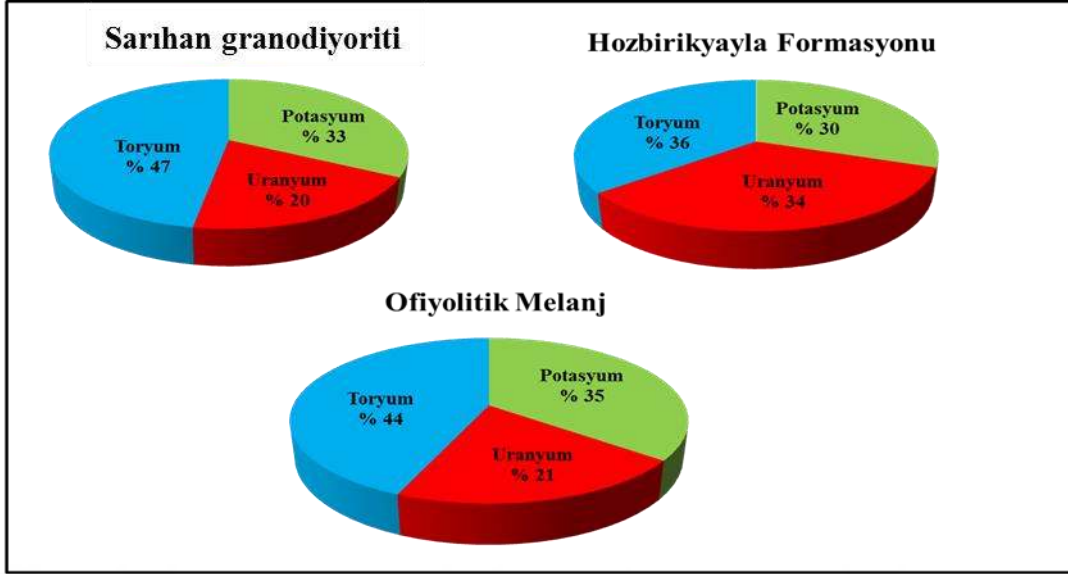


Şekil 5.8. Sarıhan granodiyoriti ve çevresine (Bayburt) ait U, Th, K konsantrasyonları ile doğal doz oranı dağılımının üç boyutlu gösterimi

Th ve K radyonüklidleri, plütonik kütlenin orta kısımlarında ve ofiyolitik melanja yakın olan yerlerde yüksek konsantrasyonlarda bulunurken, kuzeydoğu kesiminde ise yer yer orta yüksek değerler içeren küçük alanlar bulunmaktadır. Bu iki radyonüklid de olduğu gibi U radyonüklidi alanın orta kısmında yüksek değerli değişimler gösterirken bunun yanı sıra özellikle çalışma alanının kuzeydoğusunda da oldukça yüksek konsantrasyonlu değişimler göstermiştir. Doz oranı ve bu üç radyonüklidin de yüksek olarak gözlendiği alanlar K'lı feldispat ile bol miktarda kuvars içeren ve buna bağlı olarak SiO₂ içeriği yüksek olan plüton ilişkilendirilmiştir. Sarıhan granodiyoritinin etrafını kuzeybatıdan güneydoğuya doğru çevreleyen kireçtaşı ve kumlu kireçtaşı içeren Hozbirikyayla formasyonu da bu üç radyonüklid konsantrasyonu ve bu konsantrasyonlara bağlı olarak da doz oranı değerleri düşüktür.

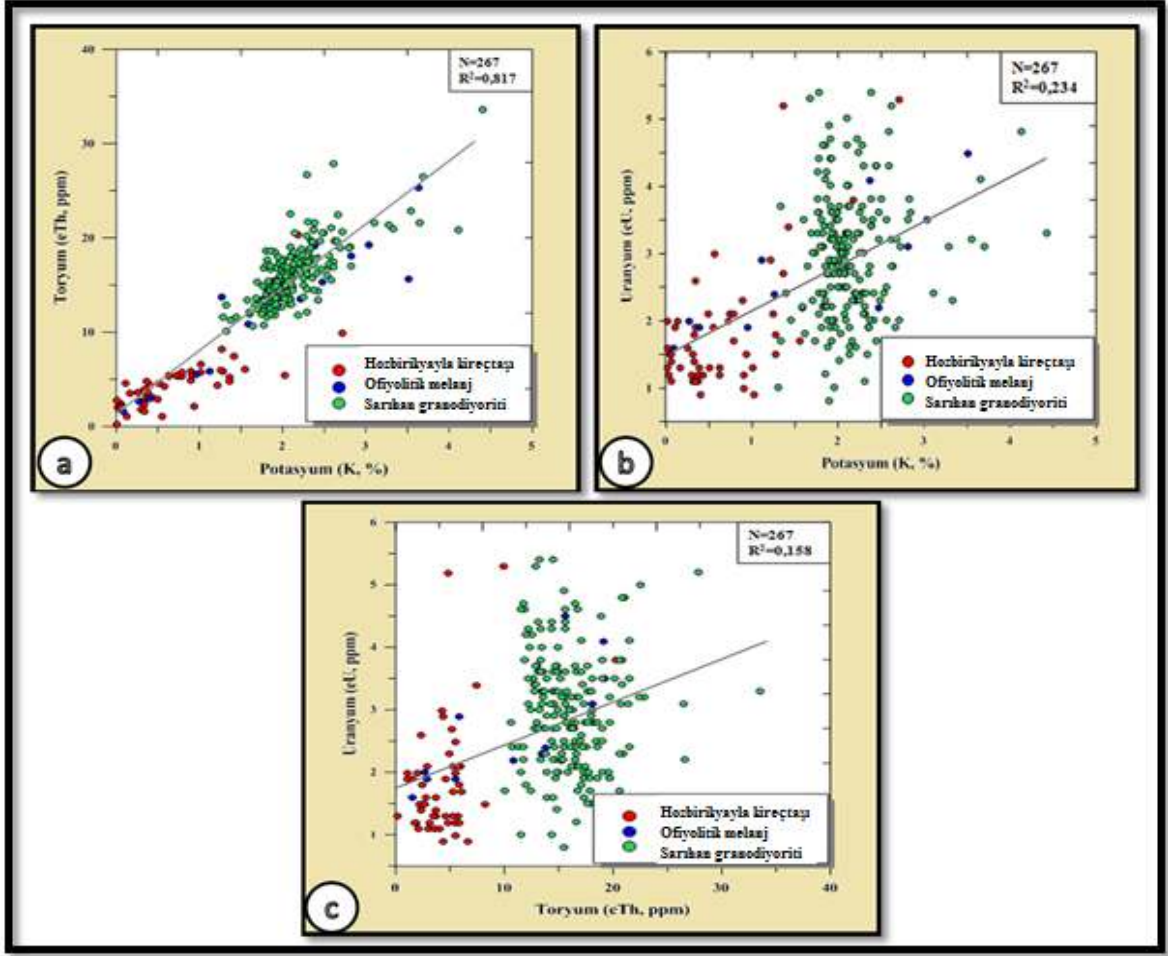
Eyüboğlu vd. (2011), Doğu Pontid orojenik kuşağında yer alan adakitik kütlelerden olan Sarıhan granodiyoriti'nden alınan 15 örnek için SiO₂, K₂O, U ve Th miktarlarını sırasıyla anklavlarda (3 örnek) %54.4-56.13, %1.18-2.65, 2.6-3.9 ppm ve 11-14.7 ppm; aplitlerde (2 örnek) %76.8-76.98, %5.37-5.72, 5.8-7.8 ppm ve 29.5-35.1 ppm ve granodiyoritte (10 örnek) %61.16-65.29, %2.16-2.76, 1.5-2.7 ppm ve 12.2-23.5 ppm olarak belirlemiştir. Aslan (1998) Sarıhan granodiyoritinde K₂O, SiO₂ ve Th miktarları %2.16-5.12, % 65.58-74.87 ve Th'ı 11-33 ppm arasında bulunmuştur. Yapılan bu çalışmada Sarıhan granodiyoriti için ortalama K, U ve Th konsantrasyonları %2.14, 2.98 ppm ve 16.15 ppm olarak hesaplanmış olup, bu alanda daha önce yapılmış çalışmalarda elde edilen değerlerle uyumlu olduğu açık bir şekilde görülmektedir.

⁴⁰K, ²³⁸U ve ²³²Th radyonüklidlerinin doz oranına olan katkıları yüzde olarak hesaplanarak her bir formasyon içindeki bu radyonüklidlerin doz katkıları yüzdelik dağılım şeklinde dairesel grafikte verilmiştir (Şekil 5.9). Elde edilen grafikte, Sarıhan granodiyoriti ve çevresindeki toplam karasal gama doz oranına en büyük katkıyı ²³²Th sağlarken, en az katkıyı ²³⁸U radyonüklidinin sağladığı açık bir şekilde görülmektedir.



Şekil 5.9. Sarıhan granodioriti ve çevresi (Bayburt) için toplam absorbe edilen doza Th, U ve K'nın katkıları.

Sarıhan granodioriti ve çevresi için de Sarıçiçek granodioritinde olduğu gibi radyoaktivite ölçümleri sonucu elde edilen radyonüklid konsantrasyonları arasında bir ilişki olup olmadığının belirlenmesi amacıyla istatistiksel değerlendirmeler yapılmış ve değerlendirilmiştir. Çalışma alanı için K-Th, K-U ve Th-U arasındaki ilişki grafikleri çizilmiştir (Şekil 5.10). Şekil 5.10'dan da görüldüğü gibi K-Th arasında doğrusal bir ilişki ($R^2=0.817$) olmasına rağmen K-U ($R^2=0.234$) ile Th-U ($R^2=0.158$) arasında neredeyse bir ilişki söz konusu değildir. U radyonüklidi ile bu iki radyonüklid arasında bir ilişki gözlenememesinin bir nedeni de kayalarda meydana gelen yüzeysel ayrışma gibi olaylardan U radyonüklidinin oldukça fazla etkilenmesi ve bu duruma bağlı olarak düzensiz değişimler göstermesi de olabilir. Alanda bulunan jeolojik formasyonlar kendi içlerinde değerlendirildiğinde; en iyi K-Th ilişkisi Hozbirikyayla kireçtaşında gözlemlenirken Sarıhan granodioritinde Th ve U arasında bir ilişki gözlemlenememiştir.



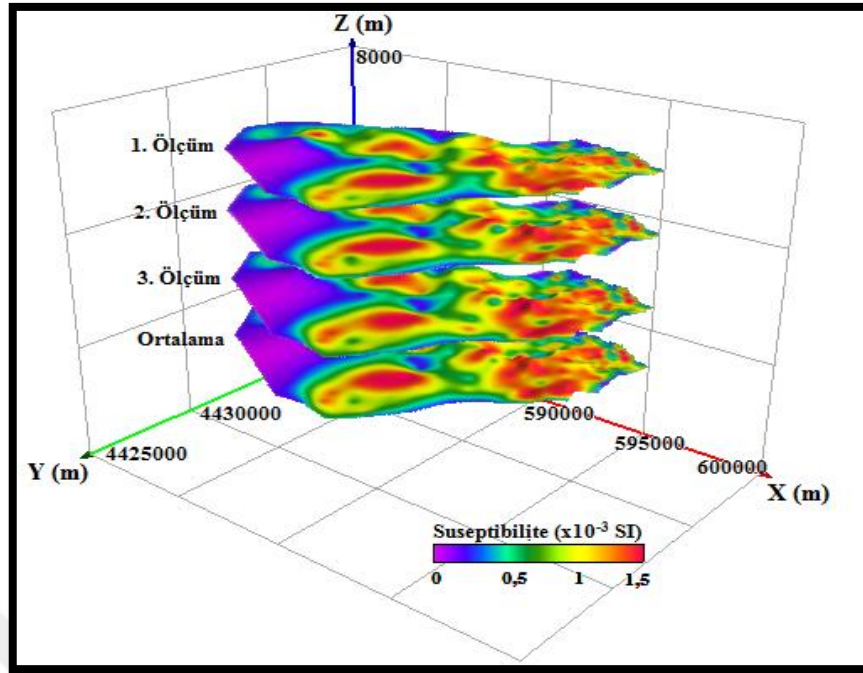
Şekil 5.10. Sarıhan granodioriti ve çevresi (Bayburt) için a) K-Th, b) K-U ve c) Th-U arasındaki ilişki

Sarıhan granodioriti ve etrafını çevreleyen formasyonlar insan ve çevre sağlığı açısından da değerlendirilmiş, bölgenin radyolojik risk seviyesini gösteren tehlike parametreleri hesaplanmıştır. Yapılan radyoaktivite ölçümleri sonucunda elde edilen radyonüklid aktiviteleri kullanılarak hesaplanan; havada absorblanmış doz oranı (nGy/h), radyum eşdeğer aktivitesi (Bq/kg), dış tehlike indisi, yıllık efektif doz eşdeğeri (mSv/y) ve yaşam boyu kanser risk parametrelerinin ortalama değerleri Tablo 5.5’de verilmektedir. Bu verilere ek olarak alanda bir U göçünün olup olmadığını gösteren parametreler ve jeokimyasal radyonüklid oranları da hesaplanarak ortalama değerleri Tablo 5.5’de verilmiştir.

Tablo 5.5. Sarıhan granodiyoriti ve çevresine (Bayburt) ait min, max, ortalama radyonüklid konsantrasyon oranları ve U göç parametreleri ile radyolojik tehlike indisleri

	eTh/K	eU/eTh	eU/K	F	U _{me} (%)	eU- (eTh/3,5)	Ra _{eq} (Bq/kg)	H _{dış}	YEDE (mSv/y)	KR (×10 ⁻³)
Min	2	0,043	0,303	0,06	- 160,47	-6,3	17,457	0,047	0,01	0,034
Max	17,77	5,91	17,77	1,47	27,65	3,828	342,115	0,923	0,194	0,681
Ortalama	7,47	0,284	1,92	0,38	-48,44	-1,164	157,258	0,424	0,089	0,313
Dünya ort. UNSCEAR 2000	---	---	---	---	---	---	370	≤1	0,080	0.29

Sarıhan granodiyoriti yüksek manyetik suseptibilite değerlerine sahipken, melanj ve kireçtaşındaki düşük değerler ölçülmüştür (Şekil 5.11). Bu formasyonlar üzerinde ölçülen değerlerin düşük çıkması manyetik özellik gösteren minerallerin bu formasyonlarda ya çok az miktarlarda ya da hiç bulunmamasından kaynaklanmaktadır. Bazı durumlarda yüzeye yakın kısımlardaki su ile kayaç arasındaki etkileşim hematit ya da götit içerisindeki manyetitin oksidasyonuna neden olabilmekte ve buna bağlı olarak da suseptibilite değerlerinde bir azalım gözlenebilmektedir (Ata, 2005). Ayrıca daha önceden yapılan çalışmalar (Karşlı, 2002; Aydın vd., 2007) ile granodiyorit ile kireçtaşı dokanağında meydana gelen bir skarn zonu ortaya çıkarılmıştır. Yüksek suseptibilite değişimleri gösteren bu kısımlar suseptibilite değişim haritasında açık bir şekilde görülmektedir. Granodiyoritin orta kısmında düşük suseptibilite gösteren alan ise bozunmuş ya da altere olmuş volkanik kayaçlara karşılık gelmektedir. Magmatik ya da hidrotermal akışkanların neden olduğu alterasyon birincil magmatik mineralleri etkiler ve buda daha fazla oksitlenmiş demir oluşumuyla sonuçlanır (Aydın vd., 2007)



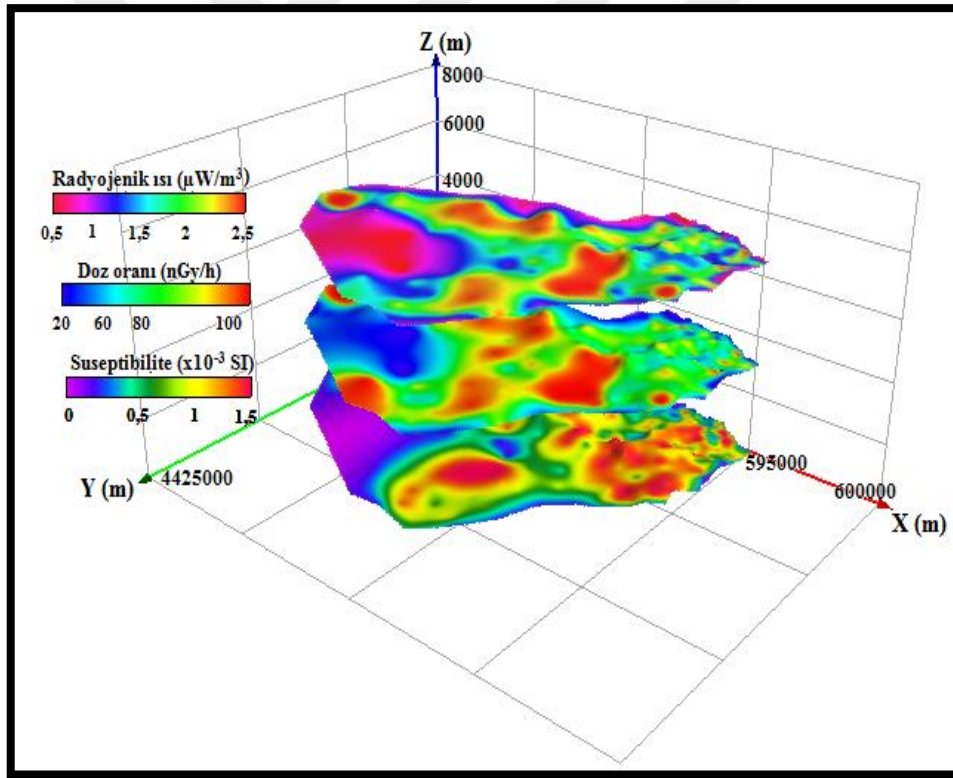
Şekil 5.11. Sarıhan granodiyoriti ve çevresi (Bayburt) için manyetik suseptibilite değişiminin üç boyutlu gösterimi

Çalışma alanında ölçülen manyetik suseptibilite, radyonüklid konsantrasyonları ve bu konsantrasyon değerleri kullanılarak hesaplanan radyojenik ısı üretim oranlarının ortalama değerleri Tablo 5.6’da verilmiştir.

Tablo 5.6. Sarıhan granodiyoriti ve çevresinde (Bayburt) elde edilen radyoaktivite, radyojenik ısı ve suseptibilite parametrelerinin minimum, maksimum ve ortalama değerleri

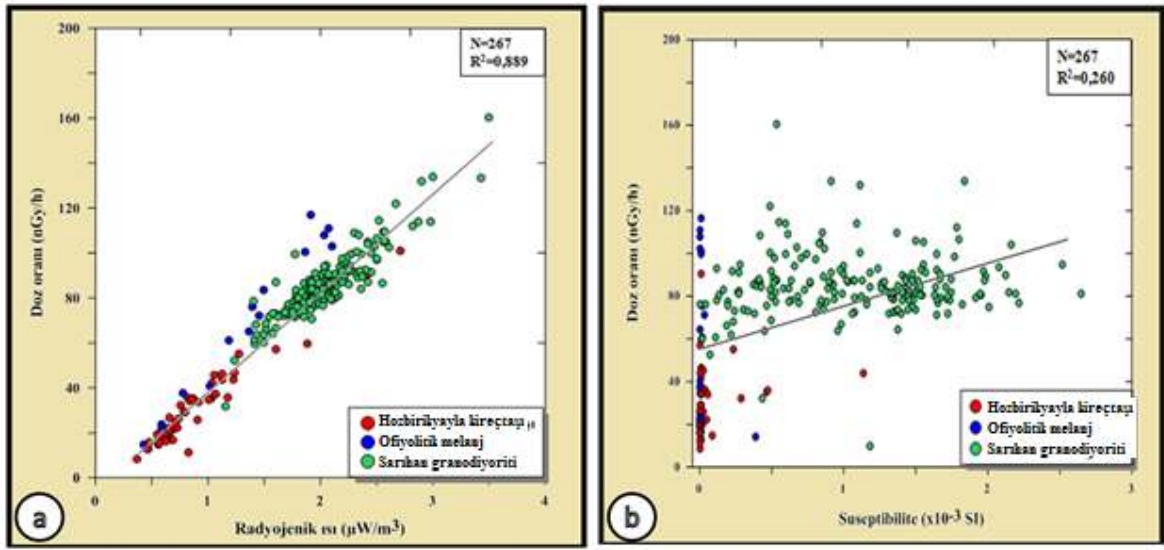
	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)	K (Bq/kg)	U (Bq/kg)	Th (Bq/kg)	D (nGy/h)	A ($\mu\text{W}/\text{m}^3$)	K ($\times 10^{-3}\text{SI}$)
Min	0,01	0,8	0,2	3,13	9,88	0,812	8,038	0,367	0,003
Max	4,41	5,4	33,6	1380,33	66,69	136,41	158,78	3,498	2,65
Ortalama	1,83	2,73	13,6	574,24	33,79	55,42	73,03	1,772	0,83
Dünya ort. UNSCEAR 2000	---	---	---	400	35	30	60	---	---
Kabuk ort. IAEA 2003	2-2.5	2-3	8-12	---	---	---	---	1.1 Sharma 1997	---

Sarıçiçek granodiyoritinin bulunduğu alanda olduğu gibi radyojenik ısı üretim haritasında görülen gerek yüksek gerekse düşük değerli alanlar radyonüklid konsantrasyonlarının toplam etkisini gösteren çevresel doz değerleri ile oldukça uyumludur (Şekil 5.12). Her iki parametre de granodiyorit içinde ve özellikle orta kesiminde yüksek, çevre formasyonlarda ise düşük değerler sergilemektedir. Radyojenik ısı ve çevresel doz değişimlerinin aksine manyetik suseptibilite haritasında granodiyorit tamamında, bu granodiyoriti oluşturan granodiyoritlere, kuvarslı monzodiyorit ve kuvarslı diyoritlere ve içerdikleri manyetik minerallere bağlı olarak oldukça yüksek değerlere sahip suseptibilite değişimleri gözlenmektedir. Tüm parametrelere ait haritalar dikkatli bir şekilde incelendiğinde yüksek ısı ve radyoaktivite içeren alanlarda manyetik suseptibilite değerleri de yüksek olmakla beraber alanın doğusunda ısı ve radyoaktivite değerleri orta seviyelerde, suseptibilite ise oldukça yüksek seviyelerde değişim göstermiştir.



Şekil 5.12. Sarıhan granodiyoriti ve çevresi (Bayburt) için doğal doz oranı, radyojenik ısı üretimi ve manyetik suseptibilite değişiminin üç boyutlu gösterimi

Son olarak çalışma alanı için doz oranı ile suseptibilite ve radyojenik ısı ile de doz oranı arasındaki ilişki istatistiksel olarak belirlenmeye çalışılmıştır. Şekil 5.12’de verilen haritalarda bu üç parametre arasında bir uyum söz konusu iken dağılım grafiğinden de görüldüğü gibi, manyetik suseptibilite değerleri ile radyonüklid konsantrasyonlarının katkısıyla hesaplanan doz oranı arasındaki ilişki ($R^2=0.26$) çok küçüktür (Şekil 5.13b). Doz oranı ve suseptibilite arasında iyi bir uyum olmamasına karşın, radyojenik ısı ile doz oranı arasındaki uyum ($R^2\sim 0.9$) oldukça yüksek olup bu iki parametre arasında güvenilir bir ilişki söz konusudur (Şekil 5.13b).



Şekil 5.13. Sarıhan granodiyorit ve çevresi (Bayburt) için a) Radyojenik ısı üretimi-Doz oranı ve b) Manyetik suseptibilite-Doz oranı arasındaki ilişki

Bu çalışmada, Sarıçiçek ve Sarıhan granodiyoritleri ile bu kütleleri çevreleyen formasyonlar üzerinde yapılan manyetik suseptibilite ve radyoaktivite ölçümleri çalışma alanlarına ait radyonüklid konsantrasyonları, suseptibilite değişimleri, bölgenin radyolojik risk seviyesi ve alanda var olan kayaçların ısı üretimine olan katkısı belirlenmiştir. Yapılan ölçümler ve hesaplamalar ile elde edilen tüm bulgular Dünya’da yapılan diğer çalışmalar ile karşılaştırılarak yorumlanmaya çalışılmıştır.

Adakitik karakterde olmayan Sarıçiçek granodiyoritini oluşturan kayaçlarda K_2O ve SiO_2 içerikleri sırasıyla %2-4.5, %58-75 arasında (Karşlı, 2002) iken adakitik Sarıhan granodiyoriti için K_2O ve SiO_2 miktarları %2.16-2.76 ile %61.16-65.29 arasında (Eyüboğlu vd., 2011) değişmektedir. İçerdikleri silis oranına göre hem Sarıçiçek granodiyoriti hem de Sarıhan granodiyoriti, felsik ve mafik magma arasında bir geçiş bileşimine (ortaç magma, %Si 53-65 arasında) sahip kayaçlardan oluşmaktadır. Silisçe (Si) zengin olan bu felsik magma bileşimli kayaçlar önemli oranda sodyum, potasyum ve alüminyum ile az miktarda kalsiyum, demir ve magnezyum içerir (url 2). Silis oranı oldukça yüksek ve felsik magma bileşimli adakitik kayaçlar düşük U ve yüksek Th içeriğine bağlı olarak yüksek eTh/eU oranlarıyla ilişkilendirilmiştir (Rollinson ve Tarney, 2005). Birçok araştırmacı tarafından bu durum kısmi ergime süresince alt kabukta bulunan U, Th ve Rb gibi elementlerin ortamdaki eriyik ile taşınıp uzaklaşması (özellikle U radyonüklidi) ile açıklanmıştır (Tarney ve Weaver, 1987; Cartwright, 1995; Rudnick ve Fountain, 1995).

Yapılan çalışmada, adakitik olmayan Sarıçiçek granodiyoriti için ortalama eTh/eU oranı 5.5 ve adakitik karakterde olan Sarıhan granodiyoriti için 4.16 olarak hesaplanmıştır. Dünya’da adakitik kayaçlar üzerinde yapılan çalışmalar sonucunda ortalama eTh/eU oranları; Panama adakitlerinde (Defant vd., 1991, 1992) 2.7, Pulur adakitlerinde (Eyüboğlu vd., 2013) 3.33, Kamçatka adakitinde (Kepezhinskas vd., 1997) 2.8, Arkeen Wawa kuşağındaki adakitlerde (Polat ve Kerrich, 2001) 4.5, volkanik yay kayaçlarında (McDermott ve Hawkesworth, 1991) 1-9 arasında ve Şili’deki volkanik zonlarda bulunan adakitlerde ise bu oran (Sigmarsson vd., 1998) 3.4-6 arasında bulunmuştur. Bu çalışmada, adakitik karakterdeki Sarıhan granodiyoriti için elde edilen ortalama eTh/eU değeri ortalama kabuk değerine ($eTh/eU=4.0$) yakın olup (Galer ve O’Nions, 1985), adakitik kayaçlar genellikle yüksek eTh/eU değerleriyle temsil edilmektedir.

Dünya’da ve Türkiye’de yapılan radyojenik ısı, manyetik suseptibilite ve radyoaktivite çalışmaları ile ilgili sonuçlar sırasıyla verilmektedir. Dünya’da yapılan çalışmalarla (Tablo 5.7 ve Tablo 5.8) bu tez çalışmasındaki sonuçlar karşılaştırıldığında, her iki çalışma alanı içinde bulunan formasyon türlerine göre elde edilen ortalama radyonüklid konsantrasyon değerlerinin Isparta alkali volkanitleri üzerinde yapılan çalışma (Uyanık, 2011) haricinde yapılan birçok çalışmadaki ortalama değerlere yakın olduğu görülmektedir.

Bu durumda alkali volkanitlerinde U, Th ve K element konsantrasyonlarının oldukça yüksek oranlarda bulunması ve kayaçların mineral bileşimlerinin farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Uyanık (2011) tarafından yapılan bu çalışmada radyojenik ısı üretim değerleri de yüksek radyonüklid konsantrasyonuna bağlı olarak, yapılan çalışmada hesaplanan radyojenik ısı değerlerinden oldukça yüksek ısı değerleri elde edilmiştir. Çalışma alanlarında ölçülen ortalama manyetik suseptibilite değerleri ise formasyonların içerdikleri minerallere bağlı olarak diğer çalışmalardan elde edilen ortalama değerler ile uyumludur.

Tablo 5.7. Çeşitli çalışmalarda hesaplanan radyojenik ısı ve manyetik suseptibilite değerleri

Kayaç türü	Radyojenik ısı üretimi ($\mu\text{W}/\text{m}^3$)	Manyetik Suseptibilite ($\times 10^{-3}$ SI)	Referans
Tortul kayaç	< 0.37	---	Roque ve Riberio (1996)
Bazalt	0.2	---	Verdoya vd.(1997)
Kalk-alkali granit	4.2	---	
Tortul Kayaçlar	1.05	---	Pasquale vd.(2001)
Şeyl-Ofiyolit	0.04	---	
Serpantin- Ortognays	0.24-2.92	---	
Bazalt	0.6	---	Chiozzi vd.(2002)
Riyolitik lavlar	6.6-71	---	
İri taneli granit	5.5	---	Menon vd.(2003)
Tonalitik granit	1.4	---	
Gnays	7.4	---	
Kumtaşı	---	0.11	King(1997)
Alberta Kimbelitleri (şeyl-tortul)	---	<0.15	Eccles ve Sutton (2003)
Gönen volkaniti	8.82	1.73	Uyanık (2011)
Çünür volkaniti	7.16	1.51	
Gölcük volkaniti	7.99	2.43	
Direkli volkaniti	8.77	2.01	
Granit	3.52	---	Maden ve Akaryalı (2015)
Andezit-Bazalt	1.68	---	
Sarıhan granodiyoriti	2.03	1.08	Bu çalışma
Hozbirikyayla Formasyonu	0.89	0.059	
Ofiyolitik olistostromal melanj	1.35	0.132	
Sarıçiçek granodiyoriti	1.90	2.5	
Alibaba Formasyonu	1.83	1.51	

Tablo 5.8. Bu çalışmadan elde edilen ortalama radyonüklid konsantrasyonları ile Dünya’da benzer araştırmalardan elde edilen konsantrasyon değerlerinin karşılaştırılması

Kayaç türü	Ortalama konsantrasyon			Referans
	U (ppm)	Th (ppm)	K (%)	
Kuvarslı Monzodiyorit Granit (pembe aplit dayklı) Kuvarslı monzodiyorit ve Granodiyorit	4.4 6.1 4.8	18.3 48.9 11.2	3.6 5.6 3.3	Mattsson vd. (2003)
Granit	7.1	23.6		Pagel (1982)
Kuvarslı monzonit, Kuvarslı monzodiyorit, Granit	3.3	16.0	3.6	İlbeyli vd. (2004)
Granodiyorit (Batolit)	3.4	11.0	2.8	Tilling ve Gottfried (1969)
Kireçtaşı	4.5	11.0	0.5	Uyanık ve Akkurt (2009)
Kuvarslı diyorit	2.0	4.0	1.6	İbrahim ve Ali (2003)
Granit (Oliverian Plütunu) Granodiyorit Kuvarslı diyorit	5.7 2.2 2.0	19.3 14.6 7.6	--- --- ---	Lyons (1964)
Melanj	1.29	13.00	1.25	Tzortzis vd. (2003)
Biyotitli Muskovitli Granit	6.2	4.6	4.7	El-Arabi vd. (2007)
Granit	24.8	61	4.2	Örgün vd.(2005)
Orta Anadolu Volkanikleri Granit, Monzonit, Siyenit	10 3-15	35 10-52	4 2-6	Aydın vd. (2006)
Granit	6.5	21.6	4.15	Cermak vd.(1982)
Troodos Ofiyolitleri	0.1	0.24	0.21	Tzortzis ve Tsertos (2005)
Granodiyorit	3.7	10.3	3.6	Abbadly vd.(2006)
Xiazhuang graniti	3.25-35.7	---	1.41- 2.91	Yang vd. (2005)
Granodiyorit	2.1	8.3	2.3	Dortman (1976)
Granit Andezit-Bazalt (Alibaba Formasyonu)	5.85 3.22	22.13 9.01	4.35 1.75	Maden ve Akaryalı (2015)
Gönen volkaniti Çünür volkaniti Gölcük volkaniti Direkli volkaniti	17.71 14.64 18.81 19.45	75.98 58.61 57.32 60.09	5.02 3.81 4.64 5.66	Uyanık (2011)
Alkali bazalt	0.99	4.6	0.61	Atlas (1985), Schlumberger (1982)
Andezit	1.2	4.0	1.7	Dobrynin vd. (2004)
Kireçtaşı	2.0	1.5	0.3	Rybach (1976)
Kumtaşı	0.5	1.7	1.1	Atlas (1985)
Granit	5.42	20.94	---	Almour vd. (2012)
Sarıhan granodiyoriti	2.98	16.15	2.14	
Hozbirikyayla Formasyonu (kireçtaşı ve kumlu kireçtaşları)	1.85	4.43	0.67	
Ofiyolitik olistostromal melanj (bazalt)	2.56	12.23	1.84	Bu çalışma
Sarıççek granodiyoriti	3.16	13.19	3.13	
Alibaba Formasyonu (andezit ve piroklastikler)	3.14	9.88	2.5	

6. SONUÇLAR

Bu çalışmanın amacı, hem arazide hem de laboratuvarında yapılan ölçümlerle granitik kayalardan oluşan Sarıçiçek granodiyoriti (Gümüşhane) ve Sarıhan granodiyoritinin (Bayburt) petrofiziksel özelliklerini (radyonüklid konsantrasyonları, radyojenik ısı üretimi, manyetik suseptibilite ve yoğunluk) belirlemek ve bu özelliklere göre çalışma alanının jeolojisini değerlendirmektir. Çalışmada, yapılan radyometrik ve manyetik ölçümler sonucunda her iki çalışma alanına ait radyoelement, ısı üretimi ve manyetik suseptibilite gibi fiziksel parametrelerin yanısıra kayaların oluşum kökeni hakkında bilgi veren jeokimyasal element oranları ve kayalardaki radyonüklidlerden U'nun göç eğilimi belirlenmiştir. Son olarak çalışılan alanlardaki radyolojik risk seviyesinin insan ve çevre sağlığını tehdit edici boyutta olup olmadığının belirlenmesi amacıyla her bir alana ait; havadaki soğurulan doz oranı (D), radyum eşdeğeri (Ra_{eq}), dış tehlike indisi ($H_{dış}$), yaşam boyu kanser riski (KR) ve yıllık etkin doz eşdeğeri (YEDE) hesaplanmış ve hesaplanan indislere ait ortalamalar çalışmada sunulmuştur. Bu çalışma ile Sarıçiçek granodiyoriti, Sarıhan granodiyoriti ve çevresindeki formasyonların ayrıntılı petrofiziksel araştırması yapılmıştır.

Yapılan arazi, teorik ve deneysel çalışmalardan elde edilen sonuç ve öneriler aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir:

1. Hem Sarıçiçek granodiyoriti hem de Sarıhan granodiyoritinde her üç radyonüklid de düzensiz değişimler sergilemiştir. K ve Th benzer yerlerde artış ve azalış gösterirken U yer yer bu iki radyonüklidin aksine farklı değişimler göstermiştir. Her iki formasyonunun K, U ve Th konsantrasyonları içerdikleri kuvars, muskovit, sfen, biyotit ve K'lı feldispatlara (ortoklas, plajiyoklas) bağlı olarak çevre kayalardan yüksek olarak ölçülmüştür.

2. Ortalama eU/eTh , K/eU ve K/eTh verilerine dayanarak, çalışma alanındaki kayaların tamamen kabuk orjinli olmadığı, üst manto ve kıtasal kabuk karışımı sonucu oluştukları söylenebilir. Elde edilen bu sonuçlar, Karlı (2002) ve Aslan (1998) tarafından yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlarla desteklenmektedir.

Kayaçların ana, iz ve nadir toprak elementlerindeki düzensiz değişimlerde, kayaçların oluşumu sırasında kristallenmeyle farklılaşmanın (fraksiyonel kristallenme) çok etkin, kısmi ergime olaylarının da kısmen etkili ve bütün bu olaylara kayaçların oluşumu sırasında iki magmanın melezleşmesi (hibritleşmesi) katkıda bulunduğu sonucuna varılmıştır.

3. Hem Sarıçiçek granodiyoriti hem de Sarıhan granodiyoritinde, etrafını çevreleyen formasyonlardan çok daha yüksek ısı üretim değerleri ölçülmüştür. Taylor ve McLennan (1985), He vd. (2009) ve Jokinen ve Kukkonen (1999)'ın radyojenik ısı üretim değerlerine göre yapmış oldukları kabuk sınıflaması kullanılmıştır. Bu sınıflamaya göre; her iki çalışma alanı için elde edilen ortalama değerler üst kabuğu gösterirken, radyojenik ısı üretim değerlerindeki değişim aralığına göre değerlendirildiğinde Sarıçiçek granodiyoriti orta ve üst kıtasal kabuk, Sarıhan granodiyoriti ise alt ve üst kıtasal kabuk kökenli kayaçlardan oluşmuştur.

4. Radyojenik ısı üretimi, kayaç türü kadar kayacın jeolojik yaşı ile de önemli değişimler göstermektedir. Kayaçların yaşı gençleştikçe ısı üretim değerleri de buna bağlı olarak artış göstermektedir (Rybach ve Bunterbarth, 1984). Sarıçiçek granodiyoriti Geç Eosen yaşlı (Eyüboğlu vd., 2013; Karslı vd., 2007), Sarıhan granodiyoriti ise Erken Eosen yaşlı (Eyüboğlu vd., 2011a) olup Sarıhan granodiyoritinin ortalama radyojenik ısı üretim değeri ($2.03 \mu\text{W}/\text{m}^3$) Sarıçiçek granodiyoritinin ortalama ısı değerinden ($1.9 \mu\text{W}/\text{m}^3$) yüksektir.

5. Formasyonların kendi içerisindeki radyojenik ısı üretim değişiminde, kayaçların köken farklılığından dolayı SiO_2 içeriğinin düşük veya yüksek olması ve radyoaktif element içeriğinin fazlalığı veya azlığı etken rol oynamaktadır (Uyanık, 2011). Sarıçiçek granodiyoritindeki SiO_2 miktarları %58-75 (Karslı, 2002) ve Sarıhan granodiyoritinde %65-69'dur (Aslan, 2005). Çalışma alanındaki kayaçlar birde bu açıdan ele alındığında SiO_2 içeriğinin artması ile radyojenik ısı üretim miktarında da içeriğe bağlı olarak yer yer bir artışın meydana geldiğini söyleyebiliriz.

6. Sarıçiçek granodiyoritini oluşturan kayalar içerdikleri farklı oranlardaki minerallere göre de farklı manyetik suseptibilite değerleri sergilenmiştir. Manyetik suseptibilite değişimleri ile granodiyorit ile çevre formasyon arasındaki sınır açık bir şekilde görülmektedir. Çalışma alanındaki yüksek suseptibilite değerleri altere olmamış masif kayaç yapılarını ve mıknatıslanma özelliği olan minerallerce zengin kayaçları temsil etmektedir. Düşük suseptibilite değerleri sergileyen çevre formasyonun (andezit ve bazaltlar) bozuşmuş ya da demir vb. serileri içeren minerallerden yoksun olduğu söylenebilir.

7. Kuvarslı monzodiyorit, granodiyorit ve kuvarslı diyoritlerden oluşan Sarihan granodiyoriti içeriğindeki manyetik özellik gösteren minerallere bağlı olarak etrafını çevreleyen jeolojik birimlere göre oldukça yüksek suseptibilite değerleri göstermiştir. Özellikle kireçtaşı ile olan dokanak sınırlarında bir skarn zonu meydana gelmiş ve buralarda manyetit cevheri oluşmuştur (Karslı, 2002; Aydın vd., 2007). Yüksek suseptibilite değişimleri gösteren bu kısımlar suseptibilite değişim haritasında açık bir şekilde görülmektedir. Granodiyorit içerisindeki düşük suseptibilite değerleri gösteren alan altere olmuş volkanik kayalar ya da bir oksidasyon zonuna karşılık gelmektedir.

8. Zaman içerisinde ayrışma ve alterasyon gibi olaylara maruz kalan U radyonüklidi orijinal miktarını koruyamayarak, değişim gösterir. Bulunduğu ortamda taşınma sonucu U konsantrasyonunda bir azalma meydana gelirken, taşındığı ortamda var olan U radyonüklidine eklenerek konsantrasyonda bir artışa neden olur. Gerek Sarıçiçek granodiyoriti gerekse Sarihan granodiyoritinde çevre kayalardan bu kütlelere doğru bir U göçü söz konusu olup kütleler U açısından zenginleşmişlerdir.

9. Sarıçiçek granodiyoriti ve Sarihan granodiyoriti için alterasyon alanlarını gösteren Efimov (F) parametresi hesaplanarak haritalanmıştır. Çalışma alanlarındaki yüksek F değerleri; alterasyon zonları ve buna bağlı olarak potasik alterasyon süresince kayalardaki mafik minerallerin alterasyonu ile ilişkili K zenginleşmesi ve metalik madenler için muhtemel alanlar ile ilişkilendirilmiştir.

10. Sarıçiçek granodiyoriti ve çevresi için arazi (Gama-ışını spektrometresi) ve laboratuvar (HPGe dedektörü) yapılan radyoaktif ölçümler sonucunda, arazide yapılan ölçümlerden elde edilen aktivite konsantrasyonlarının laboratuvardaki spektrometrik analiz sonucu elde edilen konsantrasyonlarla uyumlu olduğu görülmüş ve ölçülen konsantrasyonların doğruluğu teyit edilmiştir.

11. Her iki çalışma alanı içinde gerek kabukta ağırlıkça bulunma miktarı gerekse aktivite konsantrasyonları açısından ortalama değerlerin üstünde değerler elde edilmiş olup yalnızca Sarıhan granitoyindeki K miktarı kabuk ortalamasının biraz altında bulunmuştur. Çalışılan alanlardaki gama radyasyon tehlikesini belirlemek için hesaplanan tehlike indislerinin de verilen sınır değerlerinin altındadır. Sonuç olarak, çalışma alanlarının radyolojik risk değerlerinin literatürdeki sınır değerlerle uyumlu olduğu gözlenmiştir. Her üç radyonüklidin aktivite değerlerinin sınır değerlerin üzerinde olmasına rağmen alanların genel radyolojik risk seviyesi insan ve çevre sağlığını tehdit edici boyutta olmadığı sonucuna varılmıştır.

12. ICP-MS yöntemi ile başta metalik elementler olmak üzere periyodik tabloda bulunan birçok elementin analizi yapılmakta ve çok düşük miktarlarda bulunan elementler dahi belirlenebilmektedir. Ancak bu analizler oldukça pahalı ve zaman alıcıdır. Gama-ışını spektrometresi ölçümleri ile yalnızca doğal radyonüklidler (K, U ve Th) belirlenebilmektedir. Ölçümler gerek arazi gerekse laboratuvar ortamında oldukça hızlı bir şekilde yapılarak alanın radyoaktivite değişimi kolaylıkla belirlenebilir ve bu ölçümlerin maliyeti çok fazla değildir. Her iki çalışma alanında daha önceden yapılan çalışmalarda (Aslan, 1998; Karşı, 2002; Eyüboğlu vd., 2011) kayaçların ana oksit, iz ve nadir element içeriklerini ICP-MS ve ICP-ES yöntemlerini kullanarak analiz edilmiştir. Bu analizlerden elde edilen K, U ve Th miktarları ile bu çalışmada kullanılan gama-ışını spektrometresi ile ölçülen K, U ve Th miktarları büyük oranda benzerlik göstermiştir. Yalnızca çalışılan alanın doğal radyoaktivite seviyesinin ve kayaçların içerdiği K, U ve Th miktarlarının hızlı bir şekilde belirlenmesinde bu yöntem üstünlük gösterirken, yaş tayini ya da kayaçların ana oksit ve iz elementlerine göre sınıflandırılmasında ICP-MS yöntemi kullanılmaktadır.

13. Yapılan çalışmayla hem Sarıçiçek granodiyoriti hem de Sarıhan granodiyoriti ile çevre formasyonlarının doğal gama radyasyon seviyeleri, manyetik suseptibilite değişimi (Yüzeyden portatif bir cihaz ile yerinde ölçümler yapılarak) ve radyojenik ısı üretim haritaları ilk kez oluşturulmuştur. Elde edilen bu veriler, ileride bu alanlarda yapılacak olan çalışmalar için referans bir veri tabanı niteliğindedir.

14. Çalışılan alanların jeolojisi ile radyoaktivite verilerinin karşılaştırılması genellikle bu verilerin petrolojik birimlerle ya da jeolojik özelliklerle ne kadar yakından ilişkili olduğunu göstermektedir. Bu ilişkiye bağlı olarak jeolojik birimler radyometrik verilere göre oldukça kolay ve hızlı bir şekilde haritalanabilmektedir.

15. Granitik alanlardaki petrolojik ve kimyasal değişimlerin hızlı bir şekilde araştırılmasında yerinde radyoaktivite (yalnızca K, U ve Th içeriklerinin belirlenmesinde) ve manyetik suseptibilite ölçümleri önem kazanmaktadır. Bu yöntemler ile ölçülen parametrelere bağlı olarak değişimler kolaylıkla belirlenebilir ve bu değişimler ile element ve mineralojik farklılaşmalar kolaylıkla ortaya çıkarılabilir.

7. KAYNAKLAR

- Abbady, A.G.E., 2010. Evaluation of heat generation by radioactive decay of sedimentary rocks in Eastern Desert and Nile Valley, Egypt, Applied Radiation and Isotopes, 68, 2020–2024.
- Abbady, A.G.E., El-Arabi, A.M., ve Abbady, A., 2006. Heat production rate from radioactive elements in igneous and metamorphic rock in Eastern Desert, Egypt, Applied Radiation and Isotopes, 64, 131-137.
- Aboelkhair, H., Hasan, E., ve Sehsah, H., 2014. Mapping of structurally controlled uranium mineralization in Kadabora granite, Central Eastern Desert, Egypt using remote sensing and gamma ray spectrometry data, The Open Geology Journal, 8, 54-68.
- Abu-Deif, A., Abouelnage, S.O., ve Hassanein, I.E., 2001. Distribution of radioelement and its relation to uranium migration, El-Erediya exploration tunnels, central eastern desert, Egypt: Journal of King Abdul Aziz University, Earth Science, 13, 19–40.
- Ağar, Ü., 1977. Demirozü (Bayburt)-Köse (Kelkit) bölgesinin jeolojisi, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Fakültesi, İstanbul.
- Akaryalı, E., 2010. Arzular (Gümüşhane Kuzeydoğu-Türkiye) altın yatağının jeolojik, mineralojik, jeokimyasal ve kökensel incelenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Akın, U., ve Çiftçi, Y., 2011. Heat flow of the Kırşehir massif and geological sources of the radiogenic heat production, Mineral Res. Expl. Bull., 143, 53-73.
- Al-Hilal, M., ve Aissa, M., 2014. Characterizing the natural radiation levels throughout the main geological units of Sabkhat Al Jabboul Area, Northern Syria, Journal of Environmental Radioactivity, 140, 1-10.
- Ali, M., Shariff, A.A., Qamar, N.A., ve Laghari, A., 2012. Comparison of the Nagar Parkar (Pakistan) and Malani (India) granites with reference to uranium and thorium abundances, Journal of Himalayan Earth Sciences, 45, 67-76.
- Aliyazıcıoğlu, İ., 1999. Kale (Gümüşhane) Yöresi Volkanik Kayaçlarının Petrografik, Jeokimyasal ve Petrolojik incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Al-Saleh, F.S., ve Al-Berzan, B., 2007. Measurements of natural radioactivity in some kinds of marble and granite used in riyadh region, Journal of Nuclear and Radiation Physics, 2, 25-36.
- Amrani, D. ve Tahtat, M., 2001. Natural radioactivity in Algerian building materials, Applied Radiation Isotopes, 54, 687-689.

- Arslan, M., Aslan Z., 2006. Mineralogy, petrography and whole-rock geochemistry of the Tertiary Granitic Intrusions in the Eastern Pontides, Turkey, Journal of Asian Earth Sciences, 27, 177-193.
- Arslan, M., Şen, C., Aliyazıcıoğlu, İ., Kaygusuz, A. ve Aslan, Z., 2000. Trabzon ve Gümüşhane Yörelerinde (KD, Türkiye) Yüzeyleyen Eosen (?) Volkanitlerinin Karşılaştırmalı Jeolojisi, Mineralojisi ve Petrolojisi, Cumhuriyetin 75. Yıldönümü Yerbilimleri ve Madencilik Kongresi Bildirileri Kitabı, Cilt I, 39-53.
- Asfahani, J., Aissa, M. ve Al-Hent, R., 2007. Uranium migration in sedimentological phosphatic environment in northern Palmyrides, Al-Awabed Area, Syria, Applied Radiation and Isotopes, 65, 1078-1086.
- Asfahani, J., Al-Hent, R., ve Aissa, M., 2008. Aerial gamma spectrometric survey as a tool for evaluating the uranium remobilization degree: Case study from Al-Awabed Area, Northern Palmyrides, Syria, Applied Radiation and Isotopes, 66, 1262-1274.
- Asfahani, J., Aissa, M. ve Al-Hent, R., 2010a. Aerial Spectrometric Survey for Localization of Favorable Structures for Uranium Occurrences in Al-Awabed Area and its Surrounding (Area-3), Northern Palmyrides-Syria; Applied Radiation and Isotopes, 68, 219-228.
- Asfahani, J., Al-Hent, R., ve Aissa, M., 2010b. Geological and hydrogeological conditions for forming uranium occurrences in The Froqlas-Jabal Abou Rabah Region, Palmyrides, Syria, Exploration and Mining Geology, 19, 1-12.
- Aslan, Z., 1998. Saraycık-Sarıhan Granitoyitleri (Bayburt) ve çevre kayaçlarının petrolojisi, jeokimyası ve Sarıhan granitoidinin jeokronolojik incelenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Aslan, Z., Arslan, M. ve Şen, C., 1999. Doğu Pontidlerin Kuzey ve Güney Zonlarında Yüzeyleyen Eosen Yaşlı Granitik Sokulumlarının Karşılaştırmalı Jeolojik, Petrografik, ve Jeokimyasal Özellikleri, 52. Türkiye Jeoloji Kurultayı Bildiriler Kitabı, 10-12 Mayıs, Ankara, Cilt I, 223-230.
- Aslan, Z., 2005. Petrography and petrology of the calcalkaline Sarıhan granitoid (NE Turkey): an example of magma mingling and mixing, Turkish Journal Earth Science, 14, 185-207.
- Ata, E. 2005. Divriği - Pınargözü (Sivas), Hekimhan (Malatya), Attepe (Kayseri) ve Feke (Adana) demir cevherleşmelerindeki hematitlerin karşılaştırmalı jeokimyasal incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Atlas, B., 1985. Log Interpretation Charts. Baker Hughes Inc., Houston, TX.
- Attia, T.E. ve Shendi, E.H., 2013. Uranium migration history in the igneous and metamorphic rocks of Solaf-Umm Takha Area, based on multi-variate statistical analysis and favorability indices, Central South Sinai, Egypt, IOSR Journal of Applied Geology and Geophysics, 1, 9-20.
- Aydın, İ. 1990. Orta Anadolu uranyum aramaları havadan gamma ray spektrometre etüdü raporu, MTA derleme no 9146, Ankara.

- Aydın, İ. ve Gelişli, K., 1996. Sarihan-Bayburt skarn zonunda manyetik çalışmalar, *Jeofizik*, 10, 41-49.
- Aydın, İ., 2004. Jeofizikte Radyometrik Yöntem ve Gama-ışın Spektrometresi.
- Aydın, İ., Aydoğan, M.S., Oksum, E., ve Koçak A., 2006. An attempt to use aerial gamma-ray spevtrometry results in petrochemical assessments of the volcanic and plutonic associantions of Central Anstolia (Turkey), *Geophysics Journal International*, 167, 1044-1052.
- Aydın, A., Ferre, E.C. ve Aslan, Z., 2007. The magnetic susceptibility of granitic rocks as a proxy for geochemical composition: Example from the Sarihan granitoids, NE Turkey, *Tectonophysics*, 441, 85-95.
- Babai, K. S., Poongothai, S. ve Punniyakotti, J., 2012. Determination of environmental radioactivity (^{238}U , ^{232}Th and ^{40}K) and indoor natural background radiation level in Chennai city (Tamilnadu State), India, *Radiation Protection Dosimetry*, 1-10.
- Bastos, R.O. ve Appoloni, C.R., 2009. Radioactivity of Rocks from the Geological Formations Belonging to the Tibagi River Hydrographic Basin, 2009 International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2009 Rio De Janeiro, RJ, Brazil.
- Beck, H.L., 1972. The physics of environmental radiation fields. Natural radiation environment II, CONF-720805 P2. Proceedings of the Second International Symposium on the Natural Radiation Environment.
- Bektaş, O., Yılmaz, C., Taşlı, K., Akdağ, K. ve Özgür, S., 1995. Cretaceous rifting of the eastern Pontide carbonate platform (NE Turkey): the formation of carbonates breccias and turbidites as evidences of a drowned platform, *Geologia*, 57, 233-244.
- Bektaş, O., Şen, C., Atıcı, Y. ve Köprübaşı, N., 1999. Migration of the Upper Cretaceous subduction-related volcanism toward the back-arc basin of the eastern Pontide magmatic arc (NE Turkey), *Geological Journal*, 34, 95-106.
- Beretka, J. ve Mathew, P.J., 1985. Natural radioactivity of Australian building materials, industrial wastes and by-product, *Health Phys.*, 48, 87-95.
- Birch, F., 1947. Crustal structure and surface heat flow near the Colorado Front Range, Trans, Am, *Geophys. Union*, 28, 792-797.
- Blundy, J. ve Wood, B., 1999. Mineral-melt partitioning of uranium, thorium and their daughters. In: Uranium-Series Geochemistry. Eds., Bourdon, B., Henderson, G. M., Lundstrom, C. C., Turner, S.P., *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 52.
- Boyle, R.W., 1982. Geochemical Prospecting for Thorium and Uranium Deposits, *Elsevier*, Amsterdam & New York, 498.
- Büyüksulu, H., 2007. Isparta'nın Yalvaç İlçesi ve Çevresinin Doğal fon (Background) Radyasyon Düzeylerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.

- Canbay, M., ve Kurtuluş, C., 2008. Armutlu Yarımadası'nda Manyetik Duyarlık Çalışmaları, Uygulamalı Yerbilimleri, 1, 60-64.
- Cartwright, I., 1995. Origin of felsic sheets in the Scourian granulites: new evidence from rare earth elements, Discussion, Scott. J. Geol., 31, 91-92.
- Cermak, V., Huckenholz, H.G., Rybach, L. ve Schmid, R., 1982. Radioactive heat generation in rocks; In: Landolt-Börnstein Numerical Data and Functional Relationships in science and Technology (K.-Hellwege, Ed.), New Series; Group V. Geophysics and space research, Physical properties of rocks, supvolume b, Springer-verlagBerline, Heidelberg, New York, 433-481.
- Cermak, V. ve Rybach, L., 1982. Thermal conductivity and specific heat of minerals and rocks. In: Angenheister, G. (Ed.), Physical Properties of Rocks, Sub Vol., Geophysics and Space Research, Group V. Springer, Berlin, pp. 305-343.
- Chiozzi, P., Pasquale, V. ve Verdoya, M., 2002a. Naturally Occuring Radioactivity at the Alps-Appennines, Radiation Measurements, 35, 147-154.
- Chiozzi, P., Pasquale, V. ve Verdoya, M., 2002b. Heat From Radioactive Elements in Youngs Volcanics by gamma ray spectrometry, Journal of Volcanology and Geothermal Search, 119, 205-214.
- Clark, S.P., Peterman, Z.E. ve Heier, K.S. 1966. Abundance of U, Th and K, In Handbook of Physical constants, Geology Society of America, 97, 521-541.
- Clark, D.A., ve Emerson D.W., 1991. Notes on rock magnetisation characteristics in applied geophysical studies, Exploration Geophysics, 22, 547-555.
- Collins, P.L.F., Wyatt, B.W., ve Yeates, A.N., 1981. A gamma-ray spectrometer and magnetic susceptibility survey of Tasmaian granitoids, Unpublished report.
- Çetin, E., 2011. Granitik kayaçların radyolojik ve mineralojik yönden değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- Çetin, E., Altınsoy, N., ve Örgün, Y., 2012. Natural radioactivity levels of granites used in Turkey, Radiation Protection Dosimetry, 151, 299-305.
- Çoğulu, H.E., 1972. Petrografi ve Petroloji, Magmatizma. Cilt 1, İstanbul Teknik Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Yayınları, 111, İstanbul.
- Davies, G.F., 1999. Geophysically constrained mantle mass flows and the ^{40}Ar budget: a degassed lower mantle, Earth Planet. Sci. Lett., 166, 149-162.
- Defant, M.J., Richerson, P.M., De Boer, J.Z., Stewart, R.H., Maury, R.C., Bellon, H., Drummond, M.S., Feigenson, M.D. ve Jackson, T.E., 1991. Dacite genesis via both slab melting and differentiation: petrogenesis of La Yeguada volcanic complex, Panama, J. Petrol., 32, 1101-1142.

- Defant, M.J., Jackson, T.E., Drummond, M.S., de Boer, J.Z., Bellon, H., Feigenson, M.D., Maury, R.C. ve Stewart, R.H., 1992. The geochemistry of young volcanism throughout western Panama and southeastern Costa Rica: an overview, J. Geol. Soc. (Lond.), 149, 569– 579.
- Değerlier, M., 2007. Adana ili ve çevresinin çevresel doğal radyoaktivitesinin saptanması ve doğal radyasyonların yıllık etkin doz eşdeğerinin bulunması, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Din, K.S., 2009. Estimation of heat generation by radioactive decay of some phosphate rocks in Egypt, Applied Radiation and Isotopes, 67, 2033-2036.
- Dizman, S., 2006. Rize ili ve ilçelerindeki doğal gama radyoaktivite düzeyinin belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Dobrynin, W.M., Vendelstejn, B.J. ve Koshevnikov, D.A., 2004. Petrofizika, Izdatelstvo NeftiGaz, Moscow.
- Dokuz, A., 2011. A slab detachment and delamination model for the generation of Carboniferous high-potassium I-type magmatism in the Eastern Pontides, NE Turkey: The Kose composite pluton, Gondwana Research, 19, 926-944.
- Dortman, N.B., 1976. Fizicheskiye svoystvagornyykh porod ipoleznykh skopayemykh (petrofizika); spravochnik geofizika, IzdatNedra, Moscow, USSR, 527.
- Dortman, N.B. (Ed.), 1984. Physical Properties of Rocks and Mineral Deposits (in Russian). Nedra, Moscow, 455.
- Dyson, N., 1993. Radiation Physics With Applications in Medicine And Biology, Ellis Horwood Limited, 121, 23, 11876.
- Eccles, D.R. ve Sutton, R., 2004. Magnetic susceptibility measurements on kimberlite and sedimentary rocks in Alberta, EUB/AGS Geo-Note.
- Efimov, A.N., 1978. Multiplikativnyi pokazatel dlja vydelenija endogennykh rud po aerogamma-spektriceskim dannym. In: Metody rudnoj geofiziki (Ed.), Naucno-proizvodatvennoje objedinenie “Geofizeka” Leningrad.
- El-Arabi, A.M., Abbady, A.G.E. ve Khalif, I.H., 2007. Geochemistry and Radioactive Characteristics of the Garnetiferous Granite of Um Sleimat Area, Egypt, Journal of Earth sciences, 1, 9-20.
- Elitok, Ö., Özgür, N., Drüppel, K., Dilek, Y., Platevoet, B., Guillou, H., Poisson, A., Scaillet, S., Satır, M., Siebel, W., Bardintzeff, J-M., Deniel, C., Yılmaz, K. 2010. Origin and Geodynamic Evolution of Late Cenozoic Potassium-rich Volcanism in the Isparta Area, Southwestern Turkey, Internat. Geol. Rev., 52, 4-6, 454–504.
- Ellis, D.V. ve Singer, J.M., 2007. Well Logging for Earth Scientists. Springer-Verlag, Dordrecht.

- Ellwood, B.B. ve Wenner, D.B., 1981. Correlation of magnetic susceptibility with ^{18}O , ^{16}O data in orogenic granites of the southern Appalachian Piedmont, *Earth Planet Sciences Letter*, 59, 200-202.
- El-Shershaby, A., 2002. Study of radioactivity levels in granite of Gable Gattar II in the North eastern desert of Egypt, *Applied Radiation and Isotopes*, 57, 131-135.
- Eren, M., 1983. Gümüşhane-Kale Arasının Jeolojisi ve Mikrofasiyes incelemesi, Yüksek Lisans Tezi, K.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Eyüboğlu, Y., Dilek, Y., Bozkurt, E., Bektaş, O., Rojay, B. ve Şen, C., 2010. Geochemistry and Geochronology of a Reversely-Zoned, Alaskan-type Ultramafic–Mafic Complex in the Eastern Pontides, NE Turkey. In: Santosh, M., Maruyama, S. (Eds.), A tribute to Akiho Miyashiro, *Gondwana Research*, 18, 230-252.
- Eyüboğlu, Y., Santosh, M. ve Chung, S.L., 2011. Petrochemistry and U-Pb zircon ages of adakitic intrusions from the Pulur massif (Eastern Pontides, NE Turkey): Implications for slab rollback and ridge subduction associated with cenozoic convergent tectonics in the Eastern Mediterranean, *The Journal of Geology*, 119, 394-417.
- Eyüboğlu, Y., Chung, S.L., Dudas, F.O., Santosh, M. ve Akaryali, E., 2011a. Transition from shoshonitic to adakitic magmatism in the Eastern Pontides, NE Turkey: Implications for slab window melting, *Gondwana Research*, 19, 413-429.
- Eyüboğlu, Y., Santosh, M. ve Chung, S.L., 2011b. Crystal fractionation of adakitic magmas in the crust–mantle transition zone: petrology, geochemistry and U-Pb zircon chronology of the Seme adakites, Eastern Pontides, NE Turkey, *Lithos* 121, 151–166.
- Eyüboğlu, Y., Santosh, M., Dudas, F.O., Akaryali, E., Chung, S.L., Akdag, K. ve Bektaş, O., 2013a. The nature of transition from adakitic to non-adakitic magmatism in a slab-window setting: A synthesis from the eastern Pontides, NE Turkey, *Geoscience Frontiers*, 4, 353-375.
- Eyüboğlu, Y., 2015. Petrogenesis and U-Pb zircon chronology of felsic tuffs interbedded with turbidites (Eastern Pontides Orogenic Belt, NE Turkey): Implications for Mesozoic geodynamic evolution of the eastern Mediterranean region and accumulation rates of turbidite sequences, *Lithos*, 212-215, 74-92.
- Eyüboğlu, Y., Dudas, F.O, Santosh, M., Zhu, D.C., Yi, K., Chatterjee, N., Akaryali, E. ve Liu, Z., 2016a. Cenozoic forearc gabbros from the northern zone of the Eastern Pontides Orogenic Belt, NE Turkey: Implications for slab window magmatism and convergent margin tectonics, *Gondwana Research*, doi: 10.1016/j.gr.2015.07.006
- Eyüboğlu, Y., Dudas, F.O., Santosh, M., Xiao, Y., Yi, K., Chatterjee, N., Wu, F.Y. ve Bektaş, O., 2016b. Where are the remnants of a Jurassic Ocean in the Eastern Mediterranean Region, *Gondwana Research*, doi: 10.1016/j.gr.2015.08.017

- Finch, R.J. ve Murakami, T., 1999. Systematics and Paragenesis of Uranium Minerals. In: Burns PC, Ewing RC (eds) Uranium: Mineralogy, Geochemistry and the Environment., Rev. Mineral, 38, 91-179.
- Fuad, K.M., Rabie, S.I. ve Khalil, A.F., 1998. Recognition of the degree of remobilization of uranium from airborne gamma-ray spectrometric survey data: Proceeding of the Fourth Arab Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy, Volume III (Scientific Presentations B), April, 14–18 /11/1998, 45–68.
- Gaafar, İ., 2014. Geophysical mapping, geochemical evidence and mineralogy for nuweibi rare metal albite granite, Eastern Desert, Egypt, The Open Geology Journal, 4, 108-136.
- Gaafar, İ., ve Aboelkhair, H., 2014. Analysis of geological and geophysical datasets for radioelement exploration in Kab Amiri Area, Central Eastern Desert, Egypt, The Open Geology Journal, 8, 34-53.
- Galer, S.J.G. ve O’Nions, R.K., 1985. Residence time for thorium, uranium and lead in the mantle with implications for mantle convection, Nature, 316, 778–782.
- Girault, F., Poitou, C., Perrier, F., Koirala, B.P., ve Bhattarai, M., 2011. Soil characterization using patterns of magnetic susceptibility versus effective Radium concentration, Natural Hazards and Earth System Sciences, 11, 2285-2293.
- Göktürkler, G., 2002. Yerbilimlerinde Isı Transferi Modellemesi: Kararlı-Hal Kondüktif Isı İletimi, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Fen ve Mühendislik Dergisi, 43, 67-80.
- Güven, İ.H., 1993. Geological and Metallogenic Map of the Eastern Black Sea Region; 1:250000 Map, MTA, Trabzon.
- Hearst, J.R. ve Nelson, P.H., 1985. Well Logging for Physical Properties. McGraw-Hill, New York, NY.
- He, L., Hu, S., Yang, W. ve Wang, J., 2009. Radiogenic heat production in the lithosphere of Sulu ultrahigh-pressure metamorphic belt, Earth Planet. Sci. Lett., 277, 525–538.
- Heikal, M. Th. S., El-Dosuky, B. T. Ghoneim, M. F. ve Sherif, M. I., 2012. Natural radioactivity in basement rocks and stream sediments, Sharm El Sheikh Area, South Sinai, Egypt: Radiometric levels and their significant contributions, Arabian Journal of Geosciences.
- Hemond, C., Hofman, A.W., Heusser, G., Condomines, M. ve Rhodes, J.M., 1994. U, Th, Ra Systematic in Kilauea and Mauna Loa Basalts in Hawaai, Chemical Geology, 116, 163-180.
- Hunt, C.P., Moskowitz, B.M. ve Banerjee, S.K., 1995. Magnetic properties of rocks and minerals, rock physics and phase relations a handbook of physical constants, AGU Reference Shelf 3, American Geophysical Union.

- Hutchison, R. D., Lucarelli, L. B. ve Hartman, R. R. 1962. Türkiye'nin m ntehap saharında maden kaynaklarının kıymetlendirilmesi hakkında istikşaf programı, MTA raporu, 3 cilt, Ankara.
- IAEA, 1989. Construction and Use of Calibration Facilities for Radiometric Field Equipment, Technical Reports Series No. 309, Vienna.
- IAEA, 2003. Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data, IAEATecdoc- 1363, Vienna.
- ICRP,1990. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Publication 60. Ann. Pergamon Press, Oxford International Commission on Radiation Protection.
- ICRU, 1971. International Commission on Radiation Units and Measurements. Radiation Quantities and Units, ICRU Report 19 (International Commission on Radiation Units and Measurements, Washington, DC).
- İlbe li, N., Pearce, J.A., Thirlwall, M.F. ve Mitchell, J.G. 2004. Petrogenesis of collision-related plutonics in Central Anatolia, Turkey, Lithos, 72, 163–182.
- Ioannides, K., Papachristodoulou, C. ve Stamoulis, V., 2003. Soil Gas Radon; A Tool for Exploring Active Fault Zones, Applied Radiation Isotopes, 59, 205-213.
- Jaupart, C., ve Mareschal, J.C. 2003. Constraints on crustal heat production from heat flow data, Treatise of Geochemistry, Volume 3: The Crust. edited by R.L. Rudnick, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 65-84.
- Jokinen, J. ve Kukkonen, I., 1999. Random modelling of the lithospheric thermal regime: forward simulations applied in uncertainty analysis, Tectonophysics, 306, 277–292.
- Joshua, E.O. ve Alabi, O.O. 2012. Pattern of Radiogenic Heat Production in Rock Samples of Southwestern Nigeria, Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering, 2, 25-38.
- Kahveci, M., 1993. İzmir çevresinde yetiştirilen patateslerde radyoaktivite tayini, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Nükleer Bilimler Enstitüsü, İzmir.
- Karslı, O., 2002. Granitoyid kayaçlarda magma etkileşimleri için petrografik, mineralojik ve kimyasal bulgular: Dölek ve Sarı ek plütonları (Gümüşhane, KD-Türkiye), Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Karslı, O., Chen, B., Aydın, F. ve Şen, C., 2007. Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of the Eocene Dölek and Sarı ek Plutons, Eastern Turkey: implications for magma interaction in the genesis of high-K calc-alkaline granitoids in a post-collision extensional setting, Lithos, 98, 67-96.
- Karslı, O., Dokuz, A., Uysal, İ., Aydın, F., Kandemir, R. ve Wijbrans, R.J., 2010. Generation of the early Cenozoic adakitic volcanism by partial melting of mafic lower crust, Eastern Turkey: implications for crustal thickening to delamination, Lithos, 114, 109-120.

- Kathren, R. L., 1984. Radioactivity in the Environment: Sources, Distribution and Surveillance, Harwood Academic Publishers, New York.
- Kaygusuz, A., Arslan, M., Sipahi, F. ve Temizel, İ., 2016. U–Pb zircon chronology and petrogenesis of Carboniferous plutons in the northern part of the Eastern Pontides, NE Turkey: Constraints for Paleozoic magmatism and geodynamic evolution, Gondwana Research, doi:10.1016/j.gr.2016.01.011
- Kepezhinskas, P., McDermott, F., Defant, M., Hochstaedter, A., Drummond, M.S., Hawkesworth, C.J., Koloskov, A., Maury, R.C. ve Bellon, H., 1997. Trace element and Sr–Nd–Pb isotopic constraints on a three component model of Kamchatka arc petrogenesis, Geochim. Cosmochim. Acta, 60, 1217–1229.
- Ketin, i., 1951. Bayburt Bölgesinin Jeolojisi, İÜ Fen Fakültesi Mecmuası, cilt 16, Ankara.
- Ketin, İ., 1966. Anadolu'nun Tektonik Birlikleri, MTA Dergisi, 66, 20-43.
- King, M.S., 1997. Magnetic susceptibility mapping: applications for the Meguma Group, Central Nova Scotia, Atlantic Geology.
- Kobranova, V. N., 1989. Petrophysics, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, Hong Kong: Springer-Verlag, Geological Magazine, 128, 06, 375.
- Kopf, M., 1966. Die Untersuchung physikalischer Eigenschaften von granitoiden Gesteinen als neue Methode der Granitforschung, Geologie (Beiheft), 55, 1–135.
- Krieger, R., 1981. Radioactivity of construction materials, Betonwerk Fertigteil Technol., 47, 468.
- Kukkonen, I.T., ve Lahtinen, R., 2001. Variation of radiogenic heat production rate in 2.8-1.8 Ga old rocks in the central Fennoscandian shield, Physics of The Earth and planetary Interiors, 126, 279-294
- Kurnaz, A., Küçükömeroğlu, B., Keser, R., Okumusoglu, N.T., Korkmaz, F., Karahan, G. ve Çevik, U., 2007. Determination of radioactivity levels and hazards of soil and sediment samples in Fırtına Valley (Rize, Turkey), Applied Radiation and Isotopes, 65, 1281–1289.
- Lundin, I.A., ve Bastani, M., 2007. Analysis of petrophysical properties of some granitoids in Sweden, Journal of Applied Geophysics, 62, 74-87.
- Lyons, J.B., 1964. Distribution of Thorium and Uranium in Three Early Paleozoic Plutonic Series of New Hampshire, Geological Survey Bulletin 1144-F, United States Government Printing Office, Washington.
- M.T.A., 1989. Bayburt Dolayının Jeolojisi (Keskin, İ., Korkmaz, S., Gedik, İ., Ateş, M., Gök, L., Küçümen, Ö., Erkal, T.) MTA Genel Müdürlüğü Jeoloji Etüdları Dairesi, Derleme, Ankara.
- Maden, N. ve Akaryalı, E., 2015. A review for genesis of continental arc magmas: U, Th, K and radiogenic heat production data from the Gümüşhane Pluton in the Eastern Pontides (NE Türkiye), Tectonophysics, 664, 225–243.

- Mason, B. ve Moore, C.B., 1982. Principles of Geochemistry. 4th ed., John Wiley & Sons, New York.
- Matolin, M. ve Stranik, Z., 2006. Radioactivity Of Sedimentary Rocks Over The Zdanice Hydrocarbon Field, Geophys. J. Int., 167, 1491–1500.
- Mattsson, H., Thunehed, H. ve Triumf, C., 2003. Oskarshamn site investigation Compilation of petrophysical data from rock samples and in situ gamma-ray spectrometry measurements. ISSN 1651-4416.
- McDermott, F., Hawkesworth, C., 1991. Th, Pb and Sr isotope variations in young island arc volcanics and oceanic sediments, Earth Planet. Sci. Lett., 104, 1–15.
- McDonough, W.F., Sun, S., Ringwood, E.A., Jagoutz, E. ve Hofmann, A., 1992. Potassium, Rubidium and Cesium in the Earth and Moon and the Evolution of the Mantle of the Earth, Geochimica and Cosmochimica Acta, 56, 1001-1012.
- McLennan, S.M. ve Taylor, S.R., 1996. Heat Flow and the chemical composition of continental crust, Jour. Geol., 104, 4, 369-377.
- Menon, R., Kumar, P.S., Reddy, G.K., ve Srinivasan, R., 2003. Radiogenic heat production of Late Archaean Bundelkhand granite and some Proterozoic gneisses and granitoids of central India, National Geophysical Research Institute.
- Merdanoğlu, B. ve Altınsoy, N., 2006. Radioactivity concentrations and dose assessment for soil samples from Kestanbol Granite Area, Radiation Protection Dosimetry, 121, 4, 399–405.
- Naumov, G.B., 1959. Transportation of uranium in hydrothermal solution as a carbonate, Geochemistry, 1, 5-20.
- Okeyode, I.C., 2012. Radiogenic heat production due to Natural Radionuclides in the Sediments of Ogun River, Nigeria, Journal of Environment and Earth Science, 2, 2224-3216.
- Oniku, S.A., Osazuwa, I.B., ve Meludu, O.C., 2008. Preliminary report on magnetic susceptibility measurements on rocks within the Zaria granite Batholith, Nigeria, Geofizika, 25.
- Osmand, J.K., 1964. The distribution of the Heavy Radio Elements in the Rocks and Water of Florida. The Natural Radiation Environment, William March Rice Uni, Colorado USA.
- Önen, S., 1997. Radyasyon Biyofiziği, 2.Baskı, Dilek Ofset, İstanbul, 4-23.
- Örgün, Y., Altınsoy, N., Gültekin, A.H., Karahan, G., ve Çelebi, N., 2005. Natural radioactivity levels in granitic plutons and groundwaters in Southeast part of Eskisehir, Turkey, Applied Radiation and Isotopes, 63, 267-275.

- Örgün, Y., Altınsoy, N., Şahin, S.Y., Güngör, Y., Gültekin A.H., Karahan, G. ve Karacık, Z., 2007. Natural and Anthropogenic Radionuclides in Rocks and beach Sands From Ezine Region (Çanakkale), Western Anatolia, Turkey, Applied Radiation and Isotopes, 65, 739-747.
- Örgün, Y., Altınsoy, N., Şahin, S.Y., Ataksor, B. ve Çelebi, N., 2008. A Study Of Indoor Radon Levels In Rural Dwellings Of Ezine (Çanakkale, Turkey) Using Solid-State Nuclear Track Detectors, Radiat. Prot. Dosimetry, 131, 379-384.
- Pagel, M., 1982. The mineralogy and geochemistry of uranium, thorium, and rare-earth elements in two radioactive granites of the Vosges, France, Mineralogical Magazine, 46, 339.
- Papadopoulos, A., Christofides, G., Papastefanou, C., Koroneos, A. ve Stoulos, S., 2010. Radioactivity of granitic rocks from northern Greece, Bulletin of the Geological Society of Greece, Proceedings of the 12th International Congress, Patras.
- Pasquale, V., Verdoya, M., ve Chiozzi, P., 2001. Radioactive heat generation and its thermal effects in the Alp-Apennines boundary zone, Tectonophysics, 331, 269-283
- Pasquale, V., Verdoya, M., Chiozzi, P. ve Armadillo, E., 2009. Thermal, radioactive and magnetic properties of the lavas of the Mt Melbourne Volcanic Field (Victoria Land, Antarctica), Annals of Geophysics, 52, 2.
- Pelin, S., 1977. Alucra (Giresun) Güneydoğu Yöresinin Petrol Olanakları Bakımından İncelenmesi, Doçentlik Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- Phair, O. ve Gottfried, D., 1964. The Colorado Front range as a Uranium and Thorium Province, Natural Radiation Environment, William March Rice Uni., Colorado USA.
- Plant, J.A. ve Saunders, A.D., 1996. The Radioactive Earth, Radiation Protection Dosimetry, 68, 25-36.
- Polat, A. ve Kerrich, R., 2001. Magnesian andesites, Nb-enriched basalts and adakites from late-Archaean 2.7 Ga Wawa greenstone belts, superior Province, Canada. Implications for late Archaean subduction zone petrogenetic processes, Contrib. Mineral. Petrol., 141, 36– 52.
- Rollinson, H.R., 1993. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation. Longman.
- Rollinson, H.R. ve Tarney, J., 2005. Adakites-the key to understanding LILE depletion in granulites, Lithos, 79, 61-81.
- Roque, A. ve Riberio, F.B., 1997. Radioactivity and Radiogenic Heat Production in the Sediments of the Silo Francisco Sedimentary Basin, Central Brazil, Appl. Radiat. Isot., 48, 3413-422.
- Rudnick, R.L. ve Fountain, D.M., 1995. Nature and composition of the continental crust: A lower crustal perspective, Reviews of Geophysics, 33, 3, 267-309.

- Rudnick, R.I. ve Gao, S., 2003. Composition of the continental crust, In: *Treatise on Geochemistry*, Amsterdam, Elsevier, 3, 1–64.
- Rybach, L., 1976. Radioactive heat production: A physical property determined by the chemistry of rocks. In *The Physics and Chemistry of Minerals and Rocks*; Stems, Wiley-Interscience: New York, USA, 309–318.
- Rybach, L. ve Buntebarth, G., 1984. The Variation of Heat Generation, Density and Seismic Velocity With Rock Type in the Continental Lithosphere, Tectonophysics, 103, 335–344.
- Saunders, D.F. ve Potts, M.J. 1976. Interpretation and Application of High Sensitivity Airborne Gamma Ray Spectrometric Data. In: *Exploration for Uranium Ore Deposits*. Proceedings Series, International Atomic Energy Agency, Vienna, 107–124.
- Schlumberger, 1982. Natural Gamma Ray Spectrometry, Essentials of N.G.S. Interpretation.
- Sharma, P.V., 1997. Environmental and Engineering Geophysics. Cambridge University Press, 474, United Kingdom.
- Sigmarsson, O., Martin, H., Knowles, J., 1998. Melting of subducting oceanic crust from U–Th disequilibria in austral Andean lavas, Nature, 394, 566–569.
- Sorensen, H. (1970). In *Uranium Exploration Geology*, Int. Atomic Energy Agency, Vienna, 161.
- Sun, S.S. ve McDonough, W.F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: Saunders, A.D., Norry, M.J (Eds.), *Magmatism in the Oceanic Basins*. Geological Society of London Special Publication, 42, 313–345.
- Tarney, J. ve Weaver, B.L., 1987. Geochemistry of the Scourian Complex: petrogenesis and tectonic models, Spec. Publ. Geol. Soc. Lond., 27, 45– 56.
- Taylor, S.R., McLennan, S.M., 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Blackwell, Oxford.
- Tilling, R.I., ve Gottfried, D., 1979. Distribution of Thorium, uranium, and Potassium in igneous rocks of the boulder Batholith region, montana, and its bearing on radiogenic heat production and heat flow, *Shorter Contributions to General Geology*.
- Togay, Y.E., 2002. Radyasyon ve Biz, Türkiye Atom Enerjisi Kurumu Yayınları, 37, Ankara.
- Tokel, S., 1972. Stratigraphical and Volcanic History of the Gümüşhane Region, Doktora Tezi, University College, London.

- Tokel, S., 1988. Comparison of Subduction and Syn-Collision Granitoids in Anatolia According to Their Chemical and Metallogenetic Characteristics, Abstracts, Sym. for the 20th Anni. of Earth Sci. at Hacettepe University, 57.
- Topuz, G., Altherr, R., Satir, M. ve Schwarz, W.H., 2004. Low-grade metamorphic rocks from the Pular complex, NE Turkey: implications for the pre-Liassic evolution of the Eastern Pontides, International Journal of Earth Sciences, 93, 72-91.
- Topuz, G., Altherr, R., Schwarz, W.H., Siebel, W., Satir, M. ve Dokuz, A., 2005. Post-collisional plutonism with adakite-like signatures: the Eocene Saraycik granodiorite (Eastern Pontides, Turkey), Contributions to Mineralogy and Petrology, 150, 441-455.
- Topuz, G., Altherr, R., Siebel, W., Schwarz, W.H. Zack, T., Hasozbek, A., Barth, M., Satir, M. ve Sen, C., 2010. Carboniferous high-potassium I-type granitoid magmatism in the Eastern Pontides: The Gumushane pluton (NE Turkey), Lithos, 116, 92-110.
- Turcotte, D. ve Schubert, G., 1982. Geodynamics; Application of Continuum Physics to Geological Problems, John Wiley and Sons Inc., New York, 464.
- Tzortzis, M. ve Tsertos, 2002. Gamma-ray measurements of naturally occurring radioactive samples from Cyprus characteristic geological rocks, Radiation Measurements, 37, 3, 221-229.
- Tzortzis, M., Tsertos, H., Christofides, S. ve Christodoulides, G., 2003. Gamma radiation measurements and dose rates in commercially-used natural tiling rocks (granites), Journal of Environmental Radioactivity, 70, 223-235.
- Tzortzis, M., ve Tsertos, H., 2004. Determination of thorium, uranium and Potassium elemental concentrations in surface soils in Cyprus, Journal of Environmental Radioactivity, 77, 325-338.
- Tzortzis, M. ve Tsertos, H., 2005. Natural radioelement concentration in the Troodos Ophiolite Complex of Cyprus, Journal of Geochemical Exploration, 85, 47-54.
- UNSCEAR, 1988. United Nations Scientific Committee on The Effects of Atomic Radiation. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiations, New York.
- UNSCEAR, 2000. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation Sources and Effects of Ionizing Radiation, Sources, United Nations, New York.
- Uyanık, N.A. ve Akkurt, İ., 2009. Alkali Volkanitler yönünden zengin olan Isparta-çünür tepesinde doğal radyoaktivite tayini, AKÜ Fen Bilimleri Dergisi, 35-42.
- Uyanık, N.A., 2011. Isparta Alkali Volkanitlerinin radyometrik ve manyetik yöntemlerle incelenmesi, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Valkovic, V., 2000. Radioactivity in the Environment, Elsevier Science B. V., Netherlands.

- Vallinayagam, G., ve Singh, L.G., 2011. Radioactive Heat Producing felsic to intermediate volcano-plutonic rocks of Dhiran Area, Malani Igneous Suite, Western India, Earth Science India, 4, 68-79.
- Van Schmus, W.R., 1995. Natural Radioactivity of the Crust and Mantle. In: Ahrens, T.J. (Ed.), *Global Earth Physics: A Handbook of Physical Constants*. American Geophysical Union, AGU Reference Shelf, 1, 283-291.
- Verdoya, M., Pasquale, V., Chiozzi, P., ve Kukkonen, I.T., 1997. Radiogenic in the Variscan crust: new determinations and distribution models in Corsica (Northwestern Mediterranean), Tectonophysics, 291, 63-75.
- Wallin, B., 1984. A Pilot Airborne Gamma-Ray Survey in Yozgat and Bayburt Area, Anatolia, Turkey, Riso, DK-4000, Roskilde, Denmark.
- Waples, D.W., 2002. A new model for heat flow in Extensional Basins: Estimating radiogenic heat production, Natural Resources Research, 11.
- Wenrich, K.J., 1985. Geochemical characteristics of uranium-enriched volcanic rocks. IAEA-TC-490/1, 29-51.
- Wilson, M., 1989. Igneous Petrogenesis. A Global Tectonic Approach, Geological Magazine, 126, 4.
- Yalcin, M.N., Littke, R. ve Sachsenhofer, R.F., 1977. Thermal history of sedimentary basins. In: Welte, D.H., Horsfield, B., Baker, D. (Eds.), *Petroleum and Basin Evolution*. Springer- Verlag, Berlin.
- Yang, Y., Wu, X., Jiang, Z., Wang, W., Lu, J., Lin, J., Wang, L., ve Hsia, Y., 2005. Radioactivity concentrations in soils of the Xiazhuang granite area, China, Applied Radiation and Isotopes, 63, 255-259.
- Yılmaz S. Ş., Örgün Y., Güngör Y., Göker A. F., Gültekin A. H. ve Karacık Z., 2010. Mineral and Whole-rock Geochemistry of the Kestanbol Granitoid (Ezine-Çanakkale) and its Mafic Microgranular Enclaves in Northwestern Anatolia: Evidence of Felsic and Mafic Magma Interaction, Turkish J. Earth Sci., 19, 101-122.
- URL-1, <https://www.frmtr.com/jeoloji-jeofizik/2375365-granitik-kayaclarin-kokensel-jenetik-siniflandirilmesi.html>, 29/07/2016.
- URL-2, http://yunus.hacettepe.edu.tr/kdirik/FJ_3_Magmatizma.pdf, 08/08/2016.

ÖZGEÇMİŞ

1982 yılında Trabzon’da doğdu. İlk ve orta öğreniminin ardından lise öğrenimini Trabzon Lisesinde tamamladıktan sonra 2002 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Jeofizik Mühendisliği bölümüne girmeye hak kazandı. 2006 yılında dönem üçüncüsü olarak mezun oldu. 2007 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeofizik Mühendisliği Anabilim dalında yüksek lisans eğitime başladı. 2010 yılında ‘Beton Dayanımının Tahmininde Kullanılan Jeofizik Yöntemler’ konulu tez ile yüksek lisansını tamamlayarak, aynı yıl doktora eğitime başlayan Suna ALTUNDAŞ, 2010 yılından itibaren Karadeniz Teknik Üniversitesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü’nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır ve iyi derecede İngilizce bilmektedir.

