

Sarıççek ve Sarihan plütonlarının petrofiziksel karakterleri: Yerinde jeofiziksel ölçümlerle manyetik suseptibilite ve radyojenik ısı üretimi ilişkisinin irdelenmesi

Petrophysical characteristics of Sarıççek and Sarihan plutons: Investigation of the relationship between magnetic susceptibility and radiogenic heat production with in-situ geophysical measurements

Suna ALTUNDAŞ^{*1} , Hakan ÇINAR² 

¹Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, 29100, Gümüşhane

²Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon

• Geliş tarihi / Received: 05.02.2024

• Kabul tarihi / Accepted: 02.05.2024

Öz

Granit kökenli farklı litolojik birimler içeren Eosen yaşlı Sarıççek (Gümüşhane) ve Sarihan (Bayburt) Plütonları üzerinde 532 noktada yerinde radyoaktivite ve manyetik suseptibilite ölçümleri yapılmıştır. Her iki plüton ve çevresindeki kayalardan numuneler alınarak laboratuvar ortamında bu kayaların yoğunlukları belirlenmiştir. Yapılan çalışmada hem granitik kayaların ısı üretimine olan katkıları ile ısı değerine bağlı kabuk sınıflaması hem de kayaların radyojenik ısı üretimi ve manyetik suseptibilite arasında bir ilişkinin olup olmadığı araştırılmıştır. Radyojenik ısı üretim değerine göre yapılan kabuk sınıflamasında; üst-alt kıtasal kabuk kökenli kayalardan oluşan Eosen yaşlı Sarihan Plütonunun ortalama radyojenik ısı değeri ($2.03 \mu\text{W}/\text{m}^3$), üst-orta kıtasal kabuk kökenli kayalardan oluşan Eosen yaşlı Sarıççek Plütonunun değerinden ($1.9 \mu\text{W}/\text{m}^3$) yüksektir. Plüton, Melanj kuşağı ve Hozbirikyayla formasyonları için ortalama suseptibilite değerleri sırasıyla 1.08×10^{-3} SI, 0.132×10^{-3} SI ve 0.059×10^{-3} SI olarak hesaplanmıştır. Ortalama suseptibilite değerleri Sarıççek Plütonu için 1.518×10^{-3} SI ve Alibaba formasyonu için 2.5012×10^{-3} SI olarak belirlenmiştir. Çalışma alanındaki radyoaktif ölçümlere göre Sarıççek Plütonunda radyojenik ısı üretimine en büyük katkı potasyumdan (K) gelirken, Sarihan Plütonunda ise en büyük katkıyı toryum (Th) radyonüklidi sağlamıştır. Sarıççek ve Sarihan Plütonunları ve çevre formasyonların radyojenik ısı üretim değerleri ile manyetik suseptibilite değerleri arasında genel olarak bir uyum söz konusu iken, kayaların içerdiği mineral ve element içeriklerine bağlı olarak uyumsuzluklar da gözlenmiştir. Uyumsuzluklar, magmatizma ve sonrasındaki süreçlerden dolayı radyonüklid miktarlarında ve mineral içeriklerinde meydana gelen düzensiz değişimlerle ilişkilendirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Plüton, Kabuksal sınıflama, Manyetik suseptibilite, Radyojenik ısı

Abstract

In-situ radioactivity and magnetic susceptibility measurements were made at 532 points on the Eocene Sarıççek (Gümüşhane) and Sarihan (Bayburt) plutons. Samples were taken from plutons and its surrounding rocks and their densities were determined. In this study, both the contributions of granitic rocks to heat production and whether there is a relationship between these two petrophysical properties of the rocks (radiogenic heat production and magnetic susceptibility) were investigated. In addition, crustal classifications of rocks were made in terms of their radiogenic heat values. In the crust classification based on radiogenic heat production value; the average radiogenic heat production value ($2.03 \mu\text{W}/\text{m}^3$) of the Eocene aged Sarihan Pluton, consisting of rocks of upper-lower continental crust origin, was obtained to be higher than the value of the Eocene aged Sarıççek Pluton ($1.9 \mu\text{W}/\text{m}^3$), consisting of rocks upper-middle continental crust origin. Average susceptibility values for Pluton, Melange belt, and Hozbirikyayla formations were calculated as 1.08×10^{-3} SI, 0.132×10^{-3} SI, and 0.059×10^{-3} SI, respectively. Average susceptibility were determined as 1.518×10^{-3} SI for Sarıççek Pluton and 2.5012×10^{-3} SI for Alibaba formation. The highest contribution to radiogenic heat in Sarıççek and Sarihan Pluton came from K and Th. While there is general in good agreement with radiogenic heat and magnetic susceptibility of the Sarıççek and Sarihan Plutons and formations surrounding, incompatibilities have also been observed in some places depending on the mineral and element contents of rocks. Unconformities have been associated with irregular changes in radionuclide amounts and mineral contents due to magmatism and subsequent processes.

Keywords: Pluton, Crustal classification, Magnetic susceptibility, Radiogenic heat

*Suna ALTUNDAŞ; suna.altundas@gumushane.edu.tr

1. Giriş

1. Introduction

Granit kökenli kayalar; bulunma şekilleri, oluşum türleri ve çoğu zaman maden oluşumlarıyla bir arada bulunmalarından dolayı yerbilimcilerin yakından ilgilendiği ve çalışmalarda önemli bir yeri olan magmatik kayalar topluluğudur. Bu kayalar grubunu önemli kılan karmaşık bir bileşime sahip doğal ergiyiklerden oluşan magmanın varlığıdır. Yer kabuğunun derinliklerinde yüksek basınç ve sıcaklık koşulları altındaki magma içerisinde oksit, silikat, uçucu elementler, sülfür ve su gibi değişik element ve bileşikler bulundurmaktadır. Bünyelerinde bulundurdıkları element ve bileşikler nedeniyle; yaygın kayalar türleri arasında sadece granitik kayalar ısı üretimine katkıda bulunan radyoaktif elementleri (Uranyum (U), Toryum (Th) ve Potasyum (K)) yüksek konsantrasyonlarda içerirler (Jaupart & Mareschal, 2003). Isı üreten ve diğer büyük iyonlu litofil (LIL) elementleri açısından zengin malzemelerin orta ve üst kabuk seviyelerine taşınması, yüksek dereceli metamorfizma, metasomatizm, kısmi erime ve sıvı-eriyik göçü ile ilişkili farklı süreçlerle gerçekleşebilir (Taylor & McLennan, 1985). Potasyum, LIL elementlerinden biridir ve flogopit, muskovit ve biyotit gibi kayalar oluşum minerallerinin temel bir elementi olarak granitlerde yoğunlaşma eğilimine sahiptir. Granitik kayalarındaki K konsantrasyonu silis içeriği ile artar. LIL elementlerinden olan ve çoğunlukla kayalarda iz minerallerinde bulunan U ve Th (Van Schmus, 1995) silika içeriği ile zayıf korelasyon (ilişki) göstermektedir. Ancak ısı üretimi bir dereceye kadar SiO₂ içeriği ile ilişkilidir (Artemieva, 2011). Daha da önemlisi radyoaktif bozunma nedeniyle, ısı üretimi yaşla birlikte ve farklı kayalar türleri için farklı bir şekilde azalım göstermektedir. Çünkü kabuksal kayalarda bulunan ana radyoaktif izotoplar (U, Th ve K) farklı konsantrasyonlar, farklı bozunma sabitleri ve farklı miktarlara sahiptir (Van Schmus, 1995; Jaupart & Mareschal, 2003). Granitlerdeki ısı üretiminin sistematik olarak analiz edilmesi özellikle hem kabuk evrim modelleri hem de termal modelleme için önemlidir. Çünkü granitik üst kabuk ²³²Th, ²³⁵U, ²³⁸U ve ⁴⁰K izotoplarının radyojenik bozunmasıyla üretilen ısıdan dolayı yüzey ısı akışına en yüksek katkıyı sağlar. Bu katkı granitik plütonlarda bölgesel olarak yaklaşık %30 ile %80–90 arasında değişmektedir (Artemieva & Mooney, 2001).

Granit kökenli kayalar, içerisindeki elementlere ve türlerine bağlı olmak üzere önemli ölçüde manyetik özellik göstermektedirler. Granitik kayalarındaki manyetit ile ilmenit serisi granitleri birbirinden ayırt etmede, manyetik suseptibilite (duyarlılık) parametresi petrografik bir araç olarak kullanılmıştır (Ishihara, 1977; Takahashi vd., 1980; Ellwood & Wenner, 1981; Ishihara vd., 2000). Manyetik duyarlılığın ana kaynağı sırasıyla manyetit serisi granitlerdeki titanomagnetit ve ilmenit serisi granitlerdeki ferromagnezyen silikatlar ve ilmenittir. Bu parametre esas olarak kayalar oluşturan minerallerin bolluğunu, doğasını (manyetit vs silikatlar) ve kimyasal bileşimini (demir/magnezyum oranı) yansıtmaktadır. Bu nedenle manyetik duyarlılık yalnızca petrografik değil, aynı zamanda granitik plütonlar arasındaki jeokimyasal değişimlerin de izlenmesine olanak sağlamaktadır.

Manyetik suseptibilite ve doğal gamma radyoaktivitesi, kayaların mineralojik bileşimleri ile doğrudan ilişkili olan fiziksel özellikler arasındadır (Brimhal & Adams, 1969; Clark, 1997; Harenayama vd., 2006). Radyoaktivite, kayaların mineralojik bileşimi ile ilişkililikten (Dickson & Scott, 1997), manyetik suseptibilite ise esas olarak kayaların içinde var olan manyetik minerallerin karakteri, içeriği, türü ve dağılımı ile ilişkilidir (Clark, 1997). Jeolojik sokulumların oluşumu ve yerleşmesiyle ilgili süreçler mineralojik bileşimleri ile dolayısıyla suseptibilite ve radyoaktivite değerleri kullanılarak belirlenmektedir (Dickson & Scott, 1997; Aydın vd., 2007; Oliveira vd., 2008; Maulana vd., 2013). Volkanik kayalarda ve granitik plütonlarda radyonüklid konsantrasyonlarının araştırılarak radyojenik ısı üretim miktarlarının ve kayaların manyetik suseptibiliteleri belirlenmesi ile ilgili birçok bilimsel çalışma bulunmaktadır (Wollenberg & Smith, 1987; Aydın vd., 2007; Huang vd., 2013; Rodriguez vd., 2017; Artemieva vd., 2017; Hasterok & Webb, 2017; Porquet vd., 2017; Podugu vd., 2017; Batista-Rodriguez vd., 2017b; Abbady & Al-Ghamdi, 2018; Aisabokhae & Tampul, 2020; Batista-Rodriguez vd., 2020; Akingboye vd., 2021; Chopra vd., 2020; Asfahani, 2022; Pueyo vd., 2022; Batista-Rodriguez vd., 2023).

Çalışma için Türkiye'nin kuzeydoğusunda Alp-Himalaya orojenik kuşağındaki Doğu Pontidlerin güney zonunda yüzeyleyen Eosen yaşlı ve farklı litolojik birimlerden oluşan Sarıççek ve Sarıhan Plütonları seçilmiştir (Okay vd., 1997; Aslan, 2005; Topuz & Okay, 2006). Yapılan bu çalışmada, Sarıççek ve Sarıhan Plütonlarının yerinde ölçümlerle manyetik suseptibilite, radyoaktivite ve radyojenik ısı üretim değerleri belirlenmiş ve bu fiziksel özellikler her iki plütonun ana özelliklerini tanımlamada bir araç olarak kullanılmıştır.

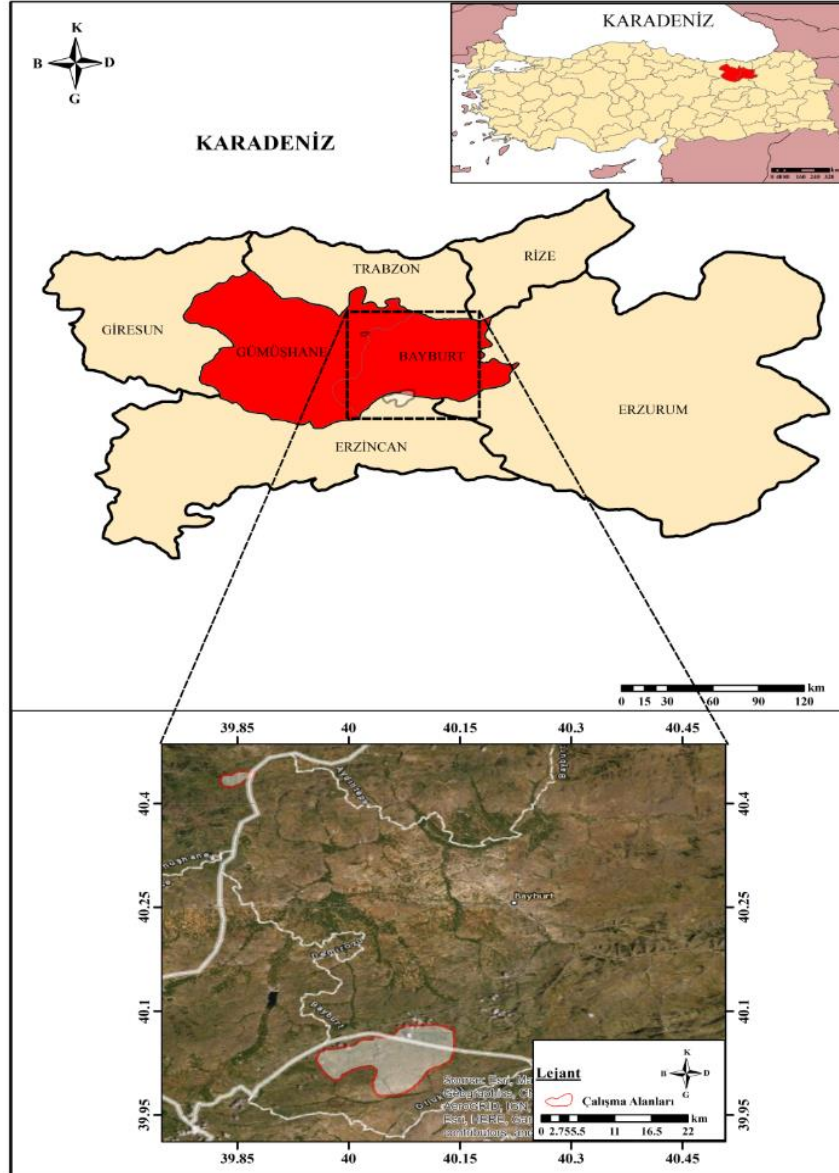
2. Çalışma alanı

2. Study area

2.1. Genel bilgiler

2.1. General informations

Bu çalışma; Gümüşhane ili merkezinden 30 km doğuda yer alan ve Doğu Pontid Kuşağının Güney Zon kesiminde yüzeyleme veren Sarıçiçek Plütону ile bir kısmı Bayburt ilinin yaklaşık 40 km güneyinde bir kısmı ise Erzincan il sınırları içerisinde bulunan Sarıhan Plütону ve çevresinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 1). Elipsoidal şekilli ve uzun eksenli KD-GB yönlü olan Sarıçiçek Plütону yaklaşık olarak 7x2.3 km boyutlarında iken Sarıhan Plütону ise ortalama 40 km²'lik bir alanda yüzlek vermektedir.



Şekil 1. Çalışma alanlarına ait yer bulduru haritası

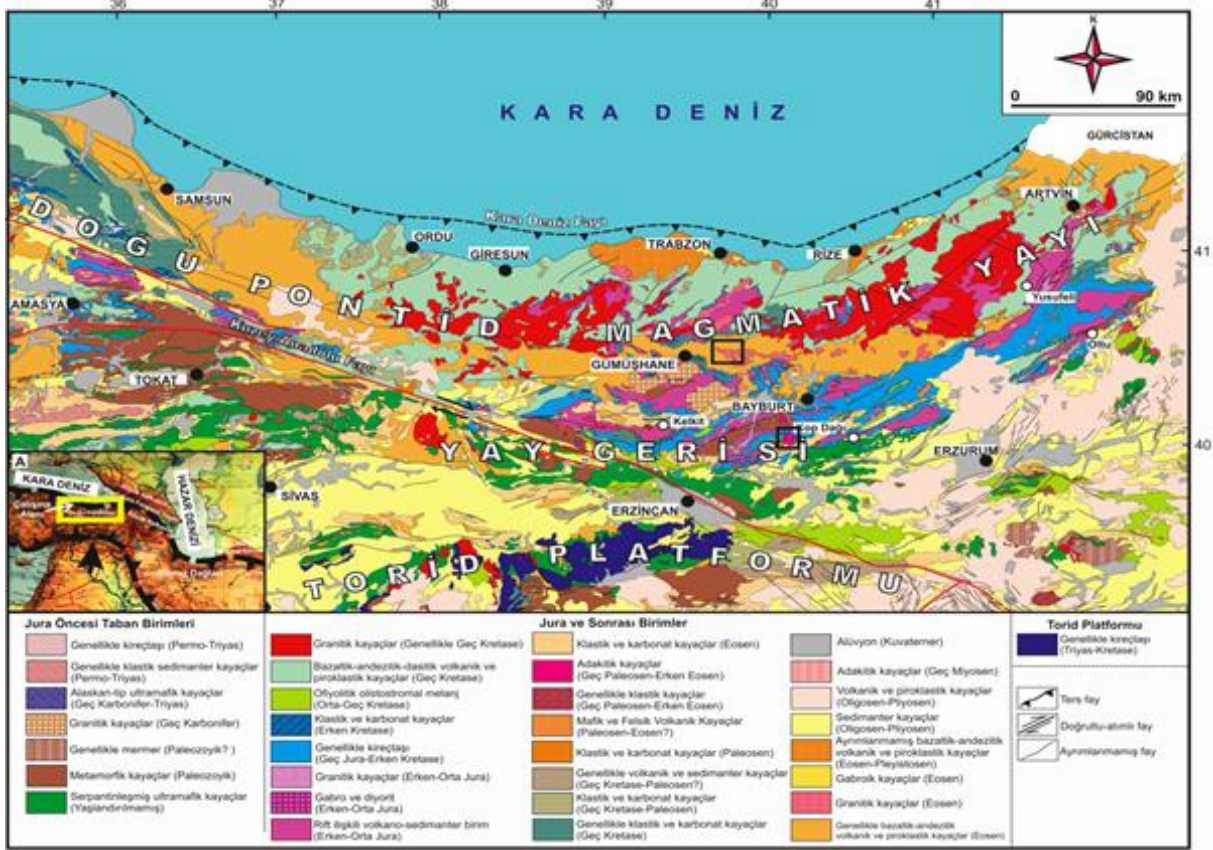
Figure 1. Location map of study areas

2.2. Çalışılan alanların genel jeolojisi

2.2. General geology of studied areas

Alp-Himalaya sisteminin önemli bir parçası olan Doğu Pontid Orojenik Kuşağı, coğrafi olarak Türkiye'nin Karadeniz ve Trakya bölgelerine karşılık gelmektedir (Ketin, 1966). Türkiye'nin kuzeyinde yer alan Pontidler Ketin (1966) ve Canitez (1972) tarafından Kuzey ve Güney Zon olmak üzere iki birime ayrılmıştır. Daha sonra

yapılan çalışmalarda ise Doğu Pontidler Kuzey, Güney ve Eksen Zonu olmak üzere üçe ayrılmıştır (Bektaş vd., 1995; 1999). Her iki ayırmda da inceleme alanları Doğu Pontidlerin Güney Zonu'nda yer almaktadır. Kuzey Zon'da magmatik kayalar çoğunlukta iken Güney Zon'da volkano-tortul özelliğindeki kayalar ağırlık kazanmıştır. Kırmızı renkli kireçtaşları Güney Zon'da tabanda ve tek seviye halinde bulunurken Kuzey Zon'da ortada başlayıp üç seviye halinde bulunmaktadır.

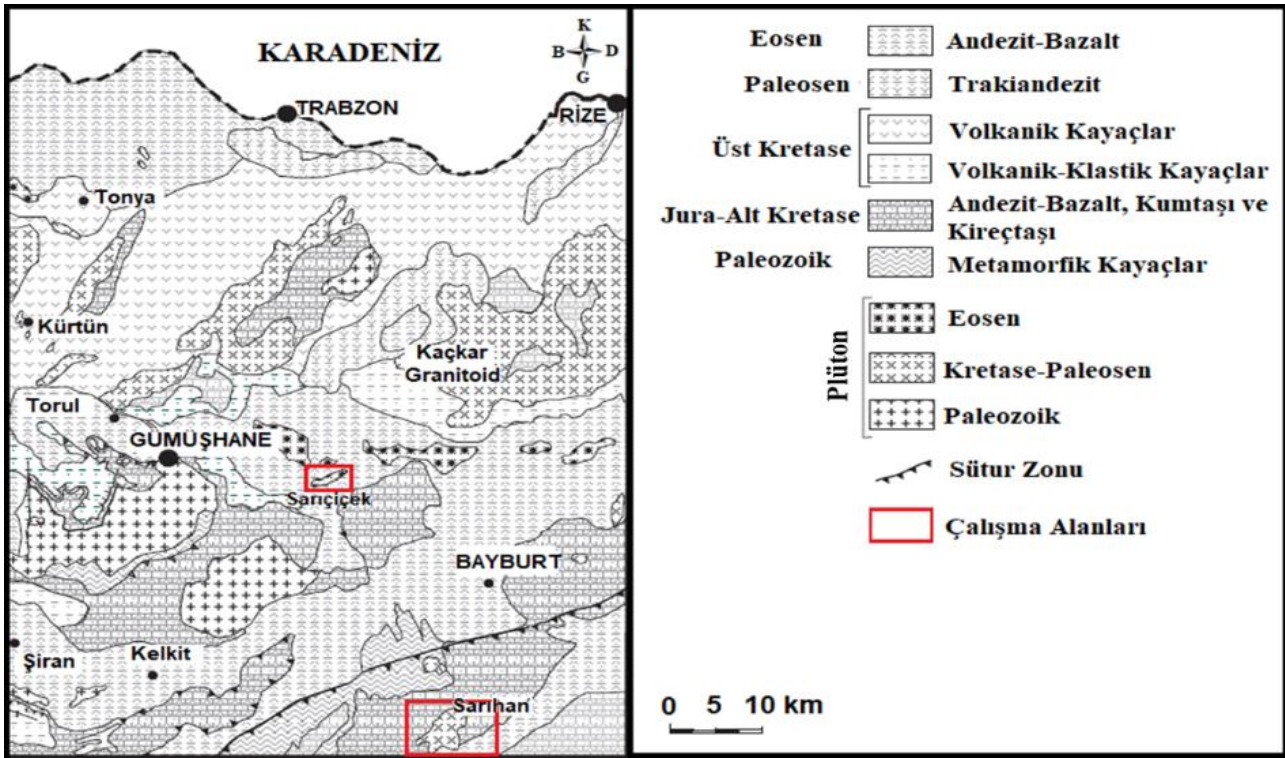


Şekil 2. Çalışma sahaları ve çevresindeki ana tektonik yapılar ile jeolojik birimler (Eyüboğlu vd., 2016a tarafından düzenlenmiştir.)

Figure 2. Main tectonic structures and geological units in and around the study areas (compiled by Eyüboğlu et al., 2016a)

Çalışılan iki kütlede güneyde olanı temsil eden ve kuvarslı monzodiyorit, granodiyorit ile kuvarslı diyoritlerden oluşan Sarıhan Plütönu, Otlukbeli Melanj kuşağı (Orta Kretase) ve kireçtaşından oluşan Hozbirikyayla formasyonu (Geç Jura-Erken Kretase) dokanak halindedir (Şekil 3). Bu dokanak sınırı boyunca kontakt metamorfizma izleri ve skarn mineralizasyonları görülmüştür. Plütönu bol miktarda çapları yer yer 40 cm'ye ulaşan mafik mikrogranüler anklavlar içermekte olup, apilit dayk damarları tarafından kesilmiştir (Aslan, 2005). Masif yapıda ve adakitik bileşimli dolgunuz kırık sistemli kütle; I-tipi, kalk-alkali ve genellikle metalümin karakterlidir. Sarıhan Plütönünün yaşı, kayaktan alınan numunelerdeki zirkonların değerlendirilmesiyle yaşlandırma yöntemlerinden U-Pb yöntemi kullanılarak belirlenmiş ve Sarıhan Plütönünün yaşı Erken Eosen (yaklaşık 53 milyon yıl) olarak elde edilmiştir (Eyüboğlu vd., 2011a).

İncelenen kütlelerden diğeri olan ve Gümüşhane il merkezinin yaklaşık 30 km doğusunda yüzeyleyen Sarıçiçek Plütönu (Şekil 3), güney zonun kuzeyine yakın bir yerde Eosen yaşlı volkanik kayalarla çevrilidir. Plütönu elipsoidale biçimde ve KD-GB yönlü yüzeylenmesi Doğu Pontid kuşağındaki büyük ölçekli derin faylardan kaynaklanmıştır. Plütönu temelde granodiyorit, granit, kuvarslı monzodiyorit ve kuvarslı monzonit bileşimine sahip kayalardan oluşmaktadır. Kütlede yüzeyleyen kayaç grubu I-tipi plütönik kayaç özelliğine sahip olup, bileşimi kalk-alkali'den yüksek potasyumlu kalk-alkali'ye doğru geçiş göstermektedir (Karlı, 2002). Kütledeki yaşı, zirkonlara uygulanan U-Pb yaşlandırması (Eyüboğlu vd., 2013) ve mafik mineraller üzerinde yapılan Ar/Ar yaş tayini sonucunda (Karlı vd., 2007) Lütésiyen olarak bulunmuştur. Sarıhan Plütönu ile karşılaştırıldığında daha az anklav içeren kütle, iyi gelişmiş kırık sistemlerine sahiptir.



Şekil 3. Çalışılan alanların jeoloji haritası (Güven, 1993'ten değiştirilmiştir.)

Figure 3. The geology map of the studied area (modified from Güven, 1993)

3. Yöntem ve veri toplama

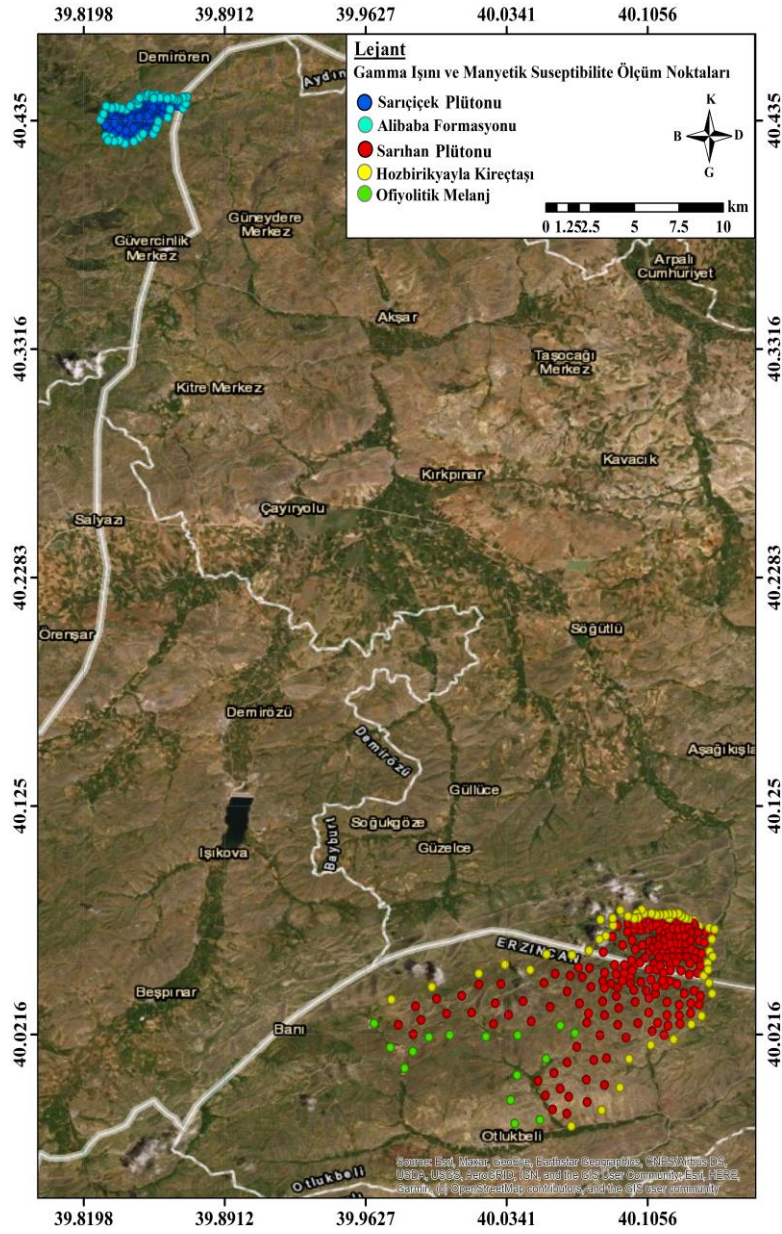
3. Method and data collection

3.1. Yerinde radyoaktivite ölçümleri

3.1. In-situ radioactivity measurements

Radyoaktivite yöntemi, özellikle yer kabuğunda doğal olarak bulunan radyoaktif element içeriklerinin (Potasyum (K), Uranyum (U) ve Toryum (Th)) yüzeydeki dağılımlarının doğrudan belirlenerek yüzey jeolojisinin haritalanmasında etkili olmasının yanı sıra hızlı ölçüm alınması ve ekonomik olması nedeniyle sıklıkla tercih edilmektedir. Çalışma sahasında doğrudan kayaç ya da toprak yüzeyi üzerinde olmak üzere Sarıççek (Gümüşhane) ve Sarıhan (Bayburt) Plütonları ve çevre formasyonlarda sırasıyla 265 ve 267 noktada radyoaktivite ölçümleri yapılmıştır (Şekil 4). Ölçüm sırasında GF marka 512 kanallı, NaI(Tl) kristalli ve 4 pencereci portatif gama-ışını spektrometresi kullanılmıştır. Ölçümlerde kullanılan spektrometre bu üç radyonüklidi toryum için 2.62 MeV (^{208}Tl), uranyum için 1.76 MeV (^{214}Bi) ve potasyum için 1.46 MeV (^{40}K) enerji aralıklarını kullanarak hesaplamaktadır. Uranyum ve toryum tayinleri, yavru nüklidlerin ana nüklidlerle dengede olduğu varsayımına dayanmaktadır ve bu nedenle gama ışını analizlerinin sonuçları “eşdeğer uranyum (eU)” ve “eşdeğer toryum (eTh)” olarak ifade edilmektedir (Killeen & Cameron, 1977).

Spektrometre kullanılarak yerinde yapılan radyoaktivite ölçümleriyle toprak ve kayaçlar içerisinde radyoaktif element miktarları (eU (ppm), K (%), eTh (ppm)) ile doz oranı (D, nGy/h) değerleri ölçülmüştür (Şekil 5). Çalışma alanında her bir formasyon üzerinde alınan ölçümler Şekil 4'te verilen haritada farklı renklerle temsil edilmiştir. Ölçüm sırasında spektrometrenin yerleştirileceği yüzeydeki bitki kökleri ve çöpler temizlenmiştir. Her bir nokta için ölçüm süresi 300 sn olarak belirlenmiş olup, noktalara ait koordinatlar bir GPS yardımıyla kaydedilmiştir.



Şekil 4. Çalışma alanlarındaki yerinde radyoaktivite ve manyetik suseptibilite ölçüm noktaları
Figure 4. In-situ radioactivity and magnetic susceptibility measurement points in the study areas



Şekil 5. Kayaç üzerinde gama ışını spektrometre ve manyetik suseptibilite ölçümleri
Figure 5. Gamma-ray spectrometry and magnetic susceptibility measurements on the rock

3.2. Manyetik suseptibilite ölçümleri

3.2. Magnetic susceptibility measurements

Yapılan birçok jeofizik çalışma için kayaların manyetik suseptibilite (duyarlılık) değeri oldukça önemli bir parametredir. Kayaların bileşimlerinde bulunan ve manyetik özellik sergileyen minerallerin miktarlarına ve türlerine bağlı olarak kayalar farklı oranlarda manyetik suseptibilite özelliği göstermektedir. Manyetik suseptibilite parametresi 'k' sembolü ile temsil edilmektedir. Yapılan suseptibilite ölçümlerindeki amaç; bir örnek içerisindeki mineralin tanımlanması, bunların konsantrasyon ya da toplam hacimlerinin hesaplanması, formasyonun ya da taşınımın süreçlerinin belirlenmesi şeklinde tanımlanabilir (Canbay & Kurtuluş, 2008). Suseptibilite ölçümleriyle oldukça geniş bir alanda yayılım gösteren jeolojik formasyonlar ya da yüzeyleme vermiş kütlelerin içerdiği manyetik özellik gösteren minerallerdeki en küçük değişimler belirlenebilmektedir. Minerallerin manyetik özelliklerindeki değişimlerinin belirlenmesinin yanı sıra yeraltında gömülü halde bulunan manyetik özellik gösteren ya da göstermeyen katmanlar, kapanım alanları ve litolojik birimler de kolay bir şekilde ayırt edilebilmektedir. Manyetik suseptibilite gerek arazide gerekse laboratuvar ortamındaki kayalar üzerinde oldukça kolay bir şekilde ölçülebilen petro-fiziksel bir parametredir. Özellikle arazi çalışmalarında yüzeylemiş kayalar üzerinde suseptibilite ölçümlerinin yapılabilmesi için birçok portatif suseptibilite ölçerler geliştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında Gümüşhane'de 265 ve Bayburt'ta 267 olmak üzere toplamda 532 noktada suseptibilite ölçümü yapılmıştır. Çalışmada ölçümler Terraplus marka KT-10 Plus S/C Suseptibilite ölçer ile alınmıştır. Cihaz hem suseptibilite hem de iletkenlik ölçümü yapma özelliğine sahiptir. Boyutunun küçük ve ölçümlerin kısa sürede alınabilmesi avantajından dolayı saha ölçümlerinde sıklıkla tercih edilmektedir. Yaklaşık olarak 500'den fazla ölçümü hafızasına depolayabilen bu cihazın hassasiyet değeri 1×10^{-6} SI'dır. Yapılan çalışma kapsamında cihazın kullanma prosedürüne bağlı olarak her bir noktada 3 adet ölçüm yapılmış ve ortalamaları kaydedilmiştir.

3.3. Radyojenik ısı üretimi

3.3. Radiogenic heat production

Yüzeysel ısı akısını kabukta var olan ve radyoaktif özellik gösteren elementlerin bozuluşu sonucu meydana gelen ısı ile alt kabuk-üst manto arasındaki etkileşim sonucu ortaya çıkan ısı oluşturmaktadır. Radyojenik ısının kaynağını, yer kabuğunda bulunan uzun ve kısa yarı-ömürlü radyoaktif izotoplar oluşturmaktadır. ^{26}Al , ^{26}Cl ve ^{60}Fe gibi kısa yarı ömürlü radyoaktif izotoplar yer kürenin ilk dönemlerindeki ısı üretiminde etkili olurken, ^{235}U , ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K gibi uzun ömürlü izotoplar ise yer kürenin ilk oluşumundan günümüze kadar radyojenik ısı üretiminde aktif olarak rol almaktadır. Bu radyoaktif izotoplar arasında K'nın bu ısı üretimine olan etkisi Th ve U izotoplarının ısıya olan katkısından çok daha azdır. Magmatik kayalarda (granit gibi) bu izotoplar yüksek miktarlarda bulunduğu için bu kayalar yüksek iç ısı üretimine sahiptir. Çünkü radyoaktif özellik gösteren bu elementlerin bozunurken ortamda beta, alfa ve gama partiküllerinin salınımı sonucunda bir elektromanyetik dalga yayılımı meydana gelmektedir. Bu dalgalar, bir yandan ortamda bulunan farklı atomlar tarafından emilirken, diğer taraftan da salınım halindeki partiküllerle çarpışır ve bu atomların kinetik enerjilerinde bir artış oluşur. Bu durum ortamdaki kinetik enerjinin artmasına dolayısıyla sıcaklığın artmasına neden olur (Göktürkler, 2002). Üst kabukta oluşan ve radyojenik ısı olarak adlandırılan bu enerjinin litosferdeki ısı akısı ile eklenmesi ısı değerinde artışa neden olur. Kıtasal kısmın en üst katmanından yayılan toplam ısının %50-70'ini kabuktan kaynaklanan radyojenik ısı oluşturmaktadır (Waples, 2002; Rudnick & Fountain, 1995). Yer kabuğunun radyojenik ısı üretim değeri ile ilgili yapılan çalışmada bu değer $21-34 \mu\text{W}/\text{m}^3$ arasında bulunmuştur (McLennan & Taylor, 1996).

A ile temsil edilen radyojenik ısı üretim değerinin birimi $\mu\text{W}/\text{m}^3$ olup, Rybach (1976) tarafından geliştirilen radyojenik ısı üretim bağıntısı kullanılarak hesaplanmaktadır. Yüzeysel yapılan gamma ışını ölçümleri ile belirlenen radyoaktif elementler ve kayaç yoğunluk değerleri kullanılarak kayaların radyojenik ısı üretim miktarları kolay bir şekilde hesaplanmaktadır. Yapılan çalışmada her iki plüton ve çevre formasyonlarını oluşturan kayaların radyojenik ısı üretim miktarları (1) nolu bağıntı ile hesaplanmıştır.

$$A(\mu\text{W}/\text{m}^3) = \rho(0.0957C_U + 0.0256C_{Th} + 0.0348C_K) \quad (1)$$

Bağıntıda; C_U ve C_{Th} ppm olarak uranyum ve toryum konsantrasyon değerlerini, C_K % olarak potasyum konsantrasyonunu ve ρ ise kayaç yoğunluğunu (gr/cm^3) göstermektedir.

3.4. Kayaç yoğunluklarının belirlenmesi

3.4. Determination of rock densities

Kayaçların radyojenik ısı üretimine olan katkıları içerdikleri radyoaktif element miktarları ve yoğunluk değerleri kullanılarak hesaplanmaktadır. Yoğunluk değerleri kayacın türüne göre farklılık göstermektedir. Çalışma sahasından her iki plüton ve çevresindeki kayaçlardan bu formasyonları en iyi temsil edecek şekilde örnekler alınmıştır. Herbir formasyon için ayrı ayrı kayaç yoğunlukları belirlenmiş olup, hesaplamalarda kullanılmak üzere herbir formasyonu temsil edecek ortalama yoğunluk değeri alınmıştır. Yoğunluk belirleme deneyleri Karadeniz Teknik Üniversitesi Jeoloji Mühendisliğinde bulunan Uygulamalı Jeoloji Laboratuvarında yapılmıştır. Araziden alınan kayaç numuneleri bozuşmuş ve altere olmuş yapılarından dolayı yoğunluk belirleme deneylerinde kullanılan belirli geometrik şekillerde kesilememiştir. Bu nedenden dolayı yoğunluk değerleri su taşırma tekniği ile belirlenmiştir. Öncelikli olarak kayaç örnekleri hassas terazide tartılarak kütleleri belirlenmiştir. Yapılan bu deneyde, belirli bir geometriye sahip olmayan bu örnekler kullanılan dereceli silindire uygun boyutlara getirilmiştir. Dereceli silindire su konulup hacmi okunmuş, daha sonra kütlesi bilinen örnekte içine konularak tekrar hacim okunup örneğin hacmi belirlenmiştir. Kütle (m) ve hacmi (V) belirlenen her bir formasyon için yoğunluklar ($\rho=m/V$) hesaplanmıştır (Tablo 1).

Tablo 1. Kayaç örneklerinin laboratuvarında belirlenen yoğunlukları (Altundaş, 2016)

Table 1. Densities of rock samples determined in the laboratory (Altundaş, 2016)

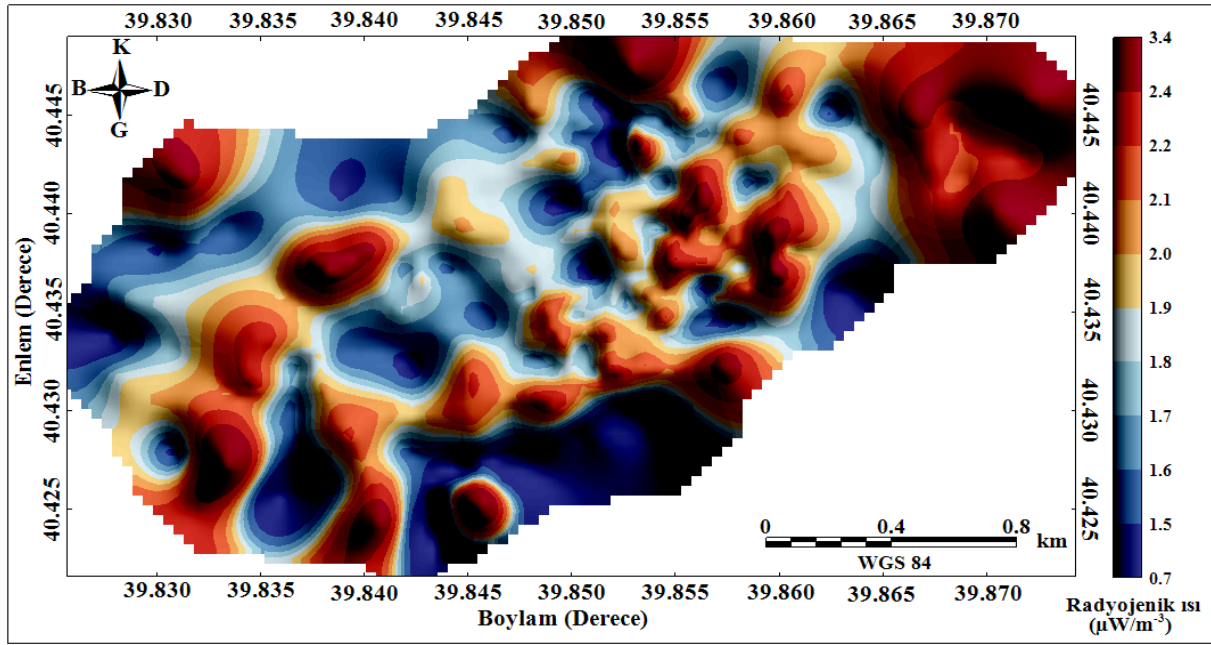
Kayaç Örneği	V (cm ³)	m (gr)	ρ (gr/cm ³)
Alibaba formasyonu	12.5	35.83	2.8664
Sarıçiçek Plütonu	28	70.96	2.5342
Sarihan Plütonu	15	39.47	2.6313
Ofiyolitik melanj	20	43.52	2.176
Hozbirikyayla formasyonu	20	56.56	2.828

4. Bulgular ve tartışma

4. Results and discussion

Yapılan çalışmada, Gümüşhane ilinde bulunan Sarıçiçek ve Bayburt ilinde bulunan Sarihan Plütonları ve çevre kayaçları da içeren bir alan içerisinde toplamda 532 noktada olmak üzere doğrudan kayaç ve toprak yüzeyi üzerinde manyetik suseptibilite ve radyoaktivite ölçümleri yapılmıştır. Arazi çalışması sonucunda elde edilen eU, eTh ve K konsantrasyonları ve laboratuvarında belirlenen yoğunluk değerleri kullanılarak her iki çalışma alanına ait radyojenik ısı üretim değerleri hesaplanmıştır. Yerinde yapılan manyetik suseptibilite ölçümleri ve radyojenik ısı üretim değişimlerini gösteren haritalar hazırlanmış ve çalışma alanlarının jeolojisi de göz önünde bulundurularak değerlendirilmiştir.

Sarıçiçek Plütonu ve bu kütleyi çevreleyen Alibaba formasyonundaki kayaçların bileşimlerine ve mineral türüne göre farklı oranlarda içerdikleri radyonüklid konsantrasyonları ve yoğunluk değerlerine bağlı olarak (1) nolu bağıntı (Rybach, 1976) kullanılarak bu kayaçların ısı üretimine olan katkısı belirlenmiştir. Çalışılan alan için radyojenik ısı üretim değişimini gösteren harita Şekil 6'da verilmiştir. Şekil 6'da ısı değerlerinin yaklaşık olarak 0.89-3.4 $\mu\text{W}/\text{m}^3$ aralığında değiştiği açık bir şekilde görülmektedir (Tablo 2). En düşük radyojenik ısı değerleri, kütleyi çevreleyen ve yer yer altere olmuş andezitler ve bazaltik kayaçlardan oluşan Alibaba formasyonu üzerinde gözlenmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi plütonun iç ve kenar kesimlerinde de yer yer düşük değerler gösteren kapanımlar bulunmaktadır. Sarıçiçek plütonunun orta kısımlarındaki ısı değerleri ortalama değer üzerinde bir değişim sergilemekte olup, bu değerlerin değişim aralığı 1.8-2.15 $\mu\text{W}/\text{m}^3$ olarak belirlenmiştir. Çalışma alanında yapılan radyoaktivite ölçüm sonuçlarına göre alandaki kayaçlarda K ve eTh radyonüklidlerinin bulunma miktarı eU miktarından daha fazla olduğu için K ve eTh ısı üretimine daha fazla katkı sağlamaktadır.



Şekil 6. Sarıçiçek Plütunu ile çevresindeki radyojenik ısı dağılımı

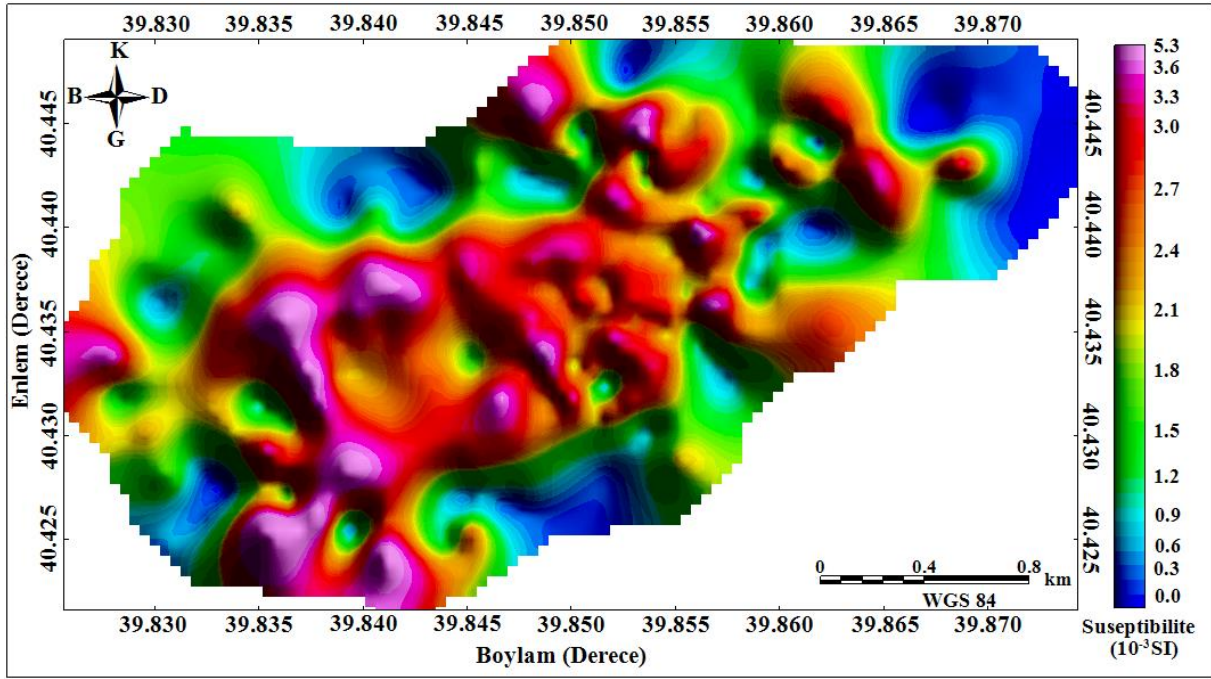
Figure 6. Radiogenic heat distribution in Sarıçiçek Pluton and its surroundings

Isı üretimine katkıda bulunan kayaların kökeninin belirlenmesi için farklı araştırmacılar tarafından (Taylor & McLennan, 1985; Jokinen & Kukkonen, 1999; He vd., 2009) yapılan çalışmalar sonucu elde edilen verilerle Sarıçiçek Plütunu ve çevre kayalar için hesaplanan ortalama radyojenik ısı üretim değerleri karşılaştırılmıştır. He vd. (2009) ortalama radyojenik ısı değerlerini toplam kabuk, alt kabuk, orta ve üst kabuk için sırasıyla 0.24, 0.37, 0.83 ve 1.10 $\mu\text{W}/\text{m}^3$ olarak tanımlarken, Taylor ve McLennan (1985) tarafından bu değerler 0.89, 0.19, 1.0 ve 1.65 $\mu\text{W}/\text{m}^3$ olarak hesaplanmıştır. Bunun yanısıra Jokinen ve Kukkonen (1999) yaptıkları çalışmada litosferik manto, alt kabuk, orta kabuk ve üst kabuk için ortalama radyojenik ısı değerlerini 0.002, 0.2, 0.6 ve 1.8 $\mu\text{W}/\text{m}^3$ olarak elde etmişlerdir. Sarıçiçek Plütunu ve çevresi için elde edilen ortalama değer üst kıtasal kabuk kökenli kayalara karşılık gelmektedir.

Tablo 2. Sarıçiçek Plütunu ile çevresinin radyonüklid, suseptibilite ve radyojenik ısı değerleri (Altundaş, 2016)
Table 2. Radionuclide, susceptibility and radiogenic heat values of Sarıçiçek Pluton and its surroundings (Altundaş, 2016)

	K (%)	eU (ppm)	eTh (ppm)	D (nGy/h)	A ($\mu\text{W}/\text{m}^3$)	k ($\times 10^{-3}$ SI)
Minimum	0.8	0.5	2.9	30.435	0.885	0.004
Maksimum	5.22	8.9	23.6	153.12	3.385	5.32
Ortalama	2.98	3.15	12.45	87.54	1.884	2.282
Kabuk ort. (IAEA, 2003)	2-2.5	2-3	8-12	---	---	---
Kabuk ort. (Sharma, 1997)	---	---	---	---	1.1	---

Şekil 7’de Sarıçiçek Plütunu ve Alibaba formasyonu üzerinde portatif bir suseptibilite ölçer kullanılarak alınan manyetik suseptibilite ölçülerinin değişimini gösteren harita verilmiştir. Tüm çalışma alanı için ortalama suseptibilite değeri 2.282×10^{-3} SI olarak hesaplanmıştır. Ortalama suseptibilite değerleri Sarıçiçek Plütunu için 1.518×10^{-3} SI ve Alibaba formasyonu için 2.5012×10^{-3} SI olarak belirlenmiştir. Çalışma alanına ait manyetik suseptibilite değişim haritası incelendiğinde, özellikle plütunun kuzeydoğu kesimi ile andezit ve bazaltlardan oluşan çevre kayalarda düşük değerlere sahip alanlar göze çarpmaktadır.

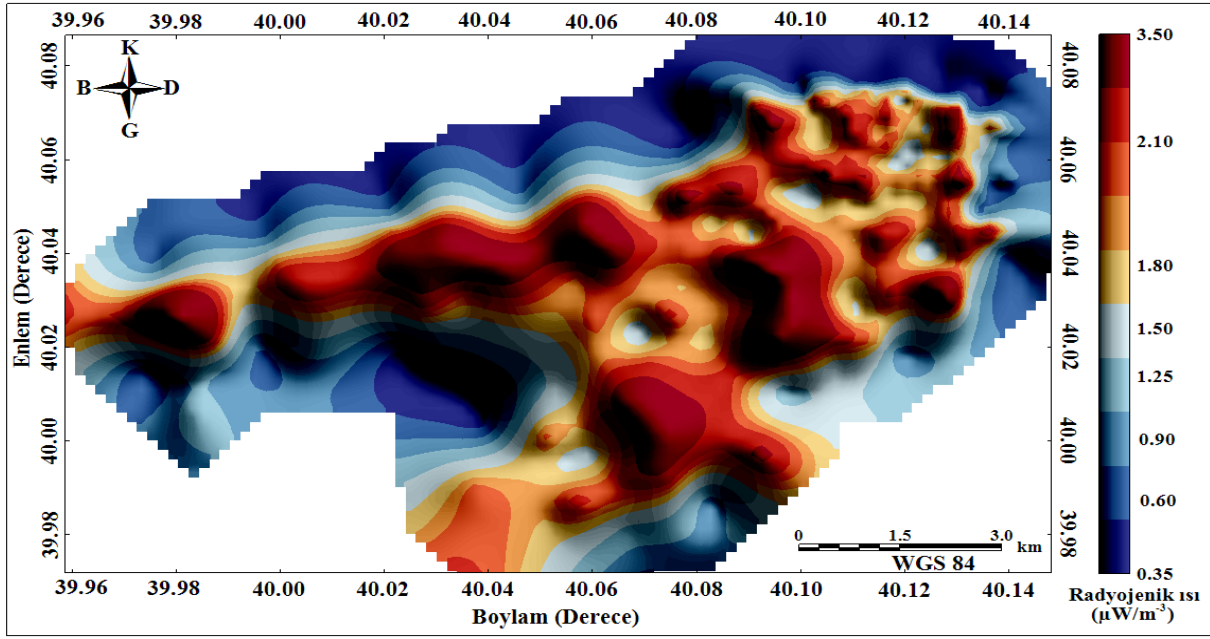


Şekil 7. Sarıçiçek Plütunu ve çevresinin manyetik suseptibilite haritası

Figure 7. Magnetic susceptibility of Sarıçiçek Pluton and its surroundings

Karlı (2002) tarafından yapılan çalışmada; Sarıçiçek Plütununun taze görünümlü grimsi ve pembemsi granit, kuvarslı monzodiyorit, kuvarslı monzonit ve granodiyoritten oluşan kayaçlar ile kuvarslı diyorit, diyorit, kuvarslı monzodiyorit ve monzodiyorit karışımı içeren kapanımlarından oluştuğu tespit edilmiştir. Sarıçiçek Plütunu; kuvars, ortoklas, plajiyoklas, piroksen, biyotit, amfibol, sfen ve Fe-Ti oksit (ilmenit ve magnetit) minerallerinden oluşurken, ikincil mineral olarak yer yer, epidot ve kloritler gözlenmiştir (Karlı, 2002). Bu farklı kayaç gruplarının manyetik özellik gösteren mineralleri farklı tür ve miktarlarda içermelerinden kaynaklı olarak plütunun büyük çoğunluğunda yüksek suseptibilite değerleri ölçülürken yer yer orta ve düşük değerlerde görülmüştür. Sarıçiçek Plütundaki yüksek suseptibilite değerlerine sahip kapanımlar içerisinde bol miktarda biyotit minerali içeren kayaçlar ile ilişkilendirilirken, düşük değerli kapanımlar ise biyotit içermeyen granitik kayaçlara karşılık gelmektedir.

Volkanik kayaçların manyetik suseptibilite değerleri Fe_2O_3 , CaO ve MgO ile pozitif ilişki gösterirken, SiO_2 ve NaO_2 ile negatif ilişki göstermektedir. Bunun yanı sıra potasik magmanın farklılaşması suseptibilite değerlerinde ters yönde bir değişimin olmasına neden olmaktadır (Elitok vd., 2010). Sarıçiçek Plütunda; MgO değeri 11.9-18.2, SiO_2 değeri ana kayaçlarda % 58-75 kapanımlarda %53-58 ve K_2O ise oldukça yüksek olup ana kayaçlarda % 2-4.5 kapanımlarda %1-2.5 arasında değişmektedir (Karlı, 2002). Suseptibilite değerinin düşük olarak gözlemlendiği alanlar manyetik özellik gösteren mineral içeriği az, SiO_2 içeriği ise yüksek olan granitlerle ilişkilendirilmiştir. Bunun yanı sıra ölçülen potasyum konsantrasyonlarının yüksek olduğu bazı alanlarda suseptibilite değerlerinin düşük olması potasik magma farklılaşmasının suseptibilite değerlerini ters yönde etkilemesi sonucu desteklemektedir.



Şekil 8. Sarihan Plütünü ve çevresinin radyojenik ısı üretimi haritası

Figure 8. Radiogenic heat production map of Sarihan Pluton and its surroundings

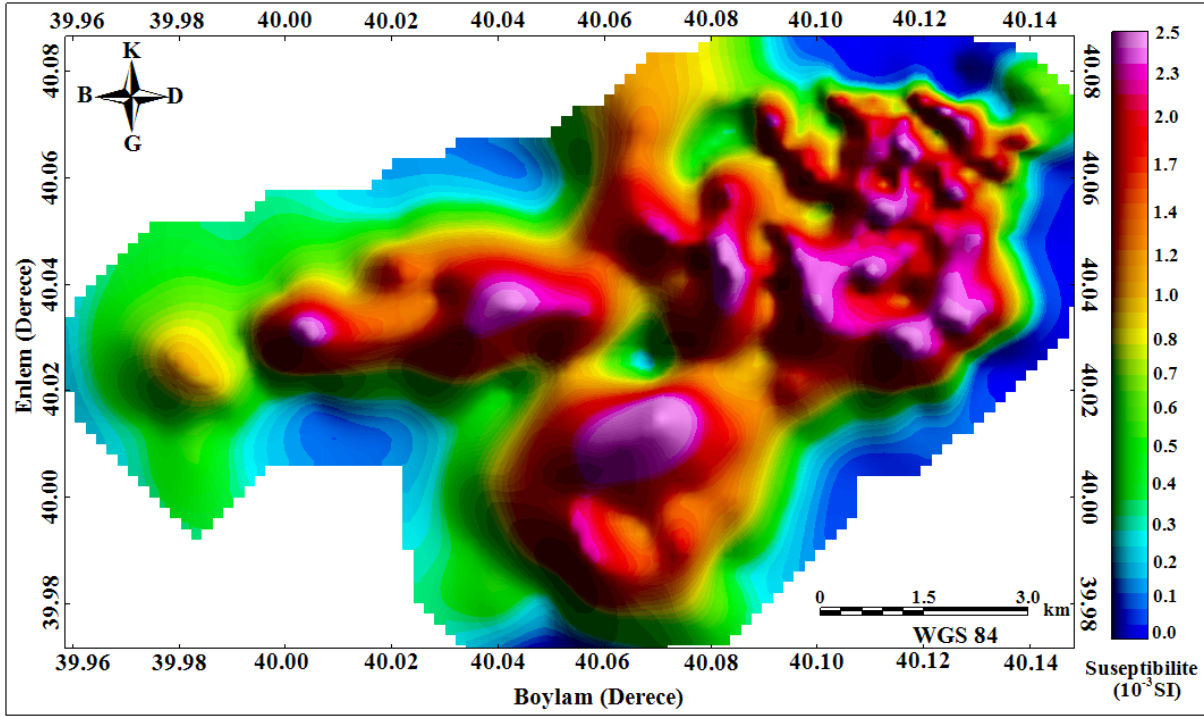
Sarihan Plütünü ve çevresi için radyojenik ısı üretim haritası Şekil 8’de verilmiştir. Çalışma alanındaki radyojenik ısı değerleri $0.367\text{-}3.498 \mu\text{W}/\text{m}^3$ arasında değişmekte olup, ortalama değer ise $1.772 \mu\text{W}/\text{m}^3$ olarak hesaplanmıştır (Tablo 3). Ofiyolitik Melanj kuşağı (kireçtaşı, kumtaşı, radyolarit, bazalt, andezit ve piroklastları) ile Hozbirikyayla formasyonunda (fosilli kireçtaşı) ısı üretim değerleri oldukça düşük ölçülürken, Sarihan Plütünüde ise orta ve yüksek radyojenik ısı değerleri elde edilmiştir. Radyojenik ısının hesaplanması için yapılan radyoaktivite ölçümlerinde eTh konsantrasyonu yüksek değerlerde ölçülmüştür ve bu alanda ısı üretimine en büyük katkıyı eTh radyonüklidi vermiştir. Sarihan Plütünü, Ofiyolitik Melanj ve Hozbirikyayla formasyonunun ortalama radyojenik ısı değerleri $2.03 \mu\text{W}/\text{m}^3$, $1.354 \mu\text{W}/\text{m}^3$ ve $0.89 \mu\text{W}/\text{m}^3$ olarak bulunmuştur.

Bu kütle ve çevresi için hesaplanan ortalama değerler; Taylor ve McLennan (1985), Jokinen ve Kukkonen (1999) ve He vd. (2009) tarafından verilen değerler ile karşılaştırılmış ve verilere göre kayaçların alt ve üst kıtasal kabuk kökenli olduğu görülmüştür. Literatürde verilen bu ortalama değerler her bir formasyona göre değerlendirilmesi halinde; plütünü ve melanj kuşağını oluşturan kayaçların üst kıtasal kabuk kayaçlarından, hozbirikyayla formasyonunun ise orta ve toplam kabuk kayaçlarından (Jokinen & Kukkonen, 1999; He vd., 2009) oluştuğu görülmektedir. Bu formasyonlar ayrıca Sharma (1997) tarafından verilen ortalama kabuk değerine göre de değerlendirilmiş ve hozbirikyayla formasyonu dışındaki melanj kuşağı ve plütünü ortalama radyojenik ısı değerinin dünya ortalamasının ($1.1 \mu\text{W}/\text{m}^3$) üzerinde olduğu görülmüştür.

Tablo 3. Sarihan Plütünü ile çevresinin radyonüklid, süseptibilite ve radyojenik ısı değerleri (Altundaş, 2016)
Table 3. Radionuclide, susceptibility and radiogenic heat values of Sarihan Pluton and its surroundings (Altundaş, 2016)

	K (%)	eU (ppm)	eTh (ppm)	D (nGy/h)	A ($\mu\text{W}/\text{m}^3$)	k ($\times 10^{-3}$ SI)
Minimum	0.01	0.8	0.2	8.038	0.367	0.003
Maksimum	4.41	5.4	33.6	158.78	3.498	2.65
Ortalama	1.83	2.73	13.6	73.03	1.772	0.83
Kabuk ort. (IAEA, 2003)	2-2.5	2-3	8-12	---	---	---
Kabuk ort. (Sharma, 1997)	---	---	---	---	1.1	---

Yüzeiden yapılan ölçümlerle Sarıhan Plütunu ve çevresi için oluşturulan manyetik suseptibilite haritasında; Plütun, Hozbirikyayla ve Melanj kuşağı arasındaki suseptibilite farkı açık bir şekilde gözlenmektedir (Şekil 9). Plütun (1.08×10^{-3} SI), Melanj (0.132×10^{-3} SI), Hozbirikyayla (0.059×10^{-3} SI) formasyonları ile tüm alan (0.83×10^{-3} SI) için ortalama suseptibilite değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 9. Sarıhan Plütunu ve çevresinin manyetik suseptibilite haritası

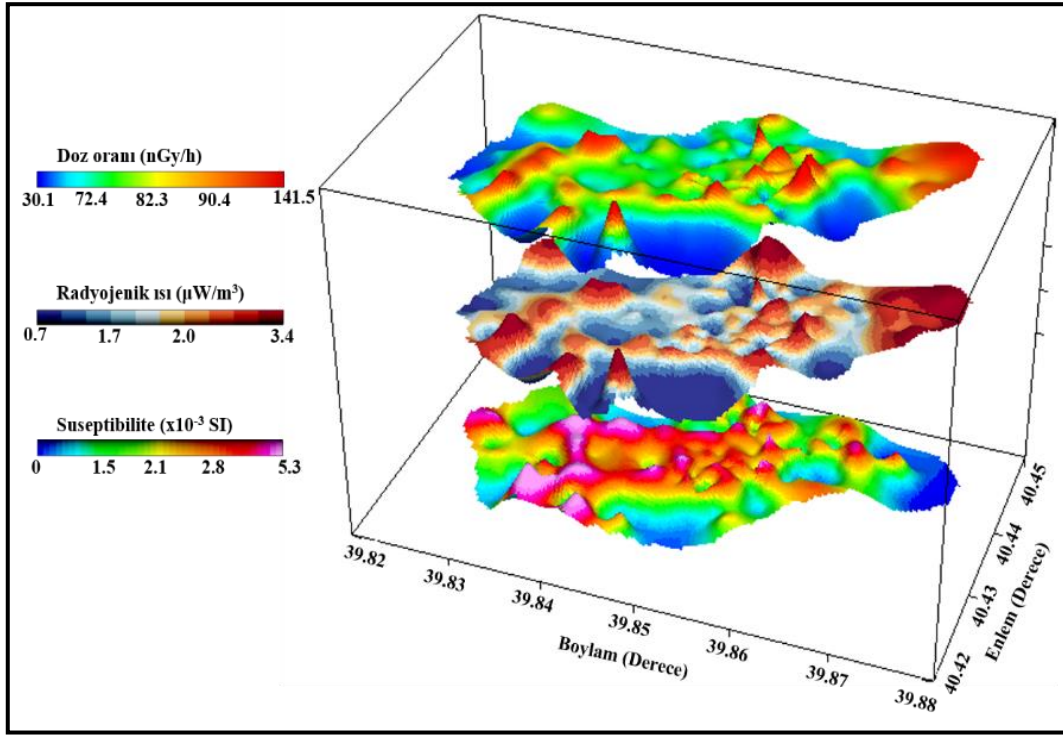
Figure 9. Magnetic susceptibility of Sarıhan Pluton and its surroundings

Magmatik kökenli plütonda yüksek değerler elde edilirken, Hozbirikyayla formasyonunun üyesi olan kireçtaşı ve kumlu kireçtaşı gibi sedimanter kayalarda düşük değerler ölçülmüştür. Plütun içerisinde kuvars ve feldispat gibi diyamanyetik mineralleri, hornblend ve biyotit gibi paramanyetik mineralleri ve manyetit olan bir ferrimanyetik minerali barındırdığı için yüksek değerler ölçülmüştür. Sarıhan Plütununda SiO_2 %65-67 arasında değişirken, Mg % 1.48-3.04, Fe_2O_3 % 0.46-2.10, Fe % 1.47-2.34 ve Na_2O %4.10-5.15 arasında değişmektedir (Aslan, 2005). Ayrıca plütun üzerindeki yüksek değerli kapanımlar sağlam ve altere olmamış kayalarla ilişkilendirilirken, orta kısımdaki düşük değerli kısım plütun ve çevre kayaları oluşturan formasyonların dokanak sınırında bulunan ayrılmış, bozunmuş ve toprağımsı bir görünüm sunan volkanik kayalar olarak değerlendirilmiştir. Saha çalışmaları sırasında bazı kireçtaşları üzerinde yapılan ölçümlerin neredeyse sıfıra yakın değerlerden oluşması bu alandaki kireçtaşlarının miktatsızlanma özelliklerinin çok az ya da hiç olmadığını işaret etmektedir.

Sarıhan Plütununun Hozbirikyayla formasyonunu kesmesi ile gelişen skarn zonunda manyetit minerali oluşurken, bu mineralin ayrışma ürünleri olan lepidokrositin, götit, martit ve hematit haricinde bir de malakitten oluşan ve plütunun güney, güneybatı ve doğu sınırları boyunca oldukça geniş bir alanda yüzeyleme veren bir oksidasyon zonu oluşumu söz konusudur. Bu oluşum esnasında ayrıca kireçtaşlarının mermer ya da yan kristalize kireçtaşlarına dönüşmesi sonucunda fazla miktarda manyetit cevheri oluşumu da gözlenmiştir (Aslan, 1998; Aydın vd., 2007). Çalışma alanında, Aydın vd. (2007) tarafından manyetik suseptibilite ölçümleri alınarak olası cevher kütlelerinin yaklaşık rezervi ve derinliğe bağlı değişimi belirlenmeye çalışılmıştır. Çalışma sonucunda plütun üzerinde suseptibilite değerleri $0.142-2.55 \times 10^{-3}$ SI arasında değişmekte olup, ortalaması 1.19×10^{-3} SI olarak hesaplanmıştır. Yapılan bu çalışma kapsamında Sarıhan Plütunu için elde edilen ortalama suseptibilite değeri (1.08×10^{-3} SI), Aydın vd. (2007) tarafından bulunan ortalama değer ile uyumludur.

Sarıççek ve Sarıhan plütunları üzerinde yapılan yerinde ölçümler ve bu ölçümler kullanılarak hesaplanan parametreler arasında herhangi bir ilişki varlığının ortaya çıkarılması amacıyla radyoaktivite, radyojenik ısı ve suseptibilite değişim haritaları bir arada çizilerek incelenmiştir (Şekil 10 ve Şekil 11). Çalışma alanında yapılan

radyoaktivite ölçümleri sonucu eU, eTh ve K radyonüklidlerinin katkıları ile ölçülen ve ortamdaki radyoaktivite seviyesini gösteren doz oranı haritasında plütonik kütle içerisinde SiO₂ içeriği yüksek olan (kuvars ve potasyumlu feldispat içeriği yüksek) granitik kayalarda yüksek değerler gözlenmektedir.



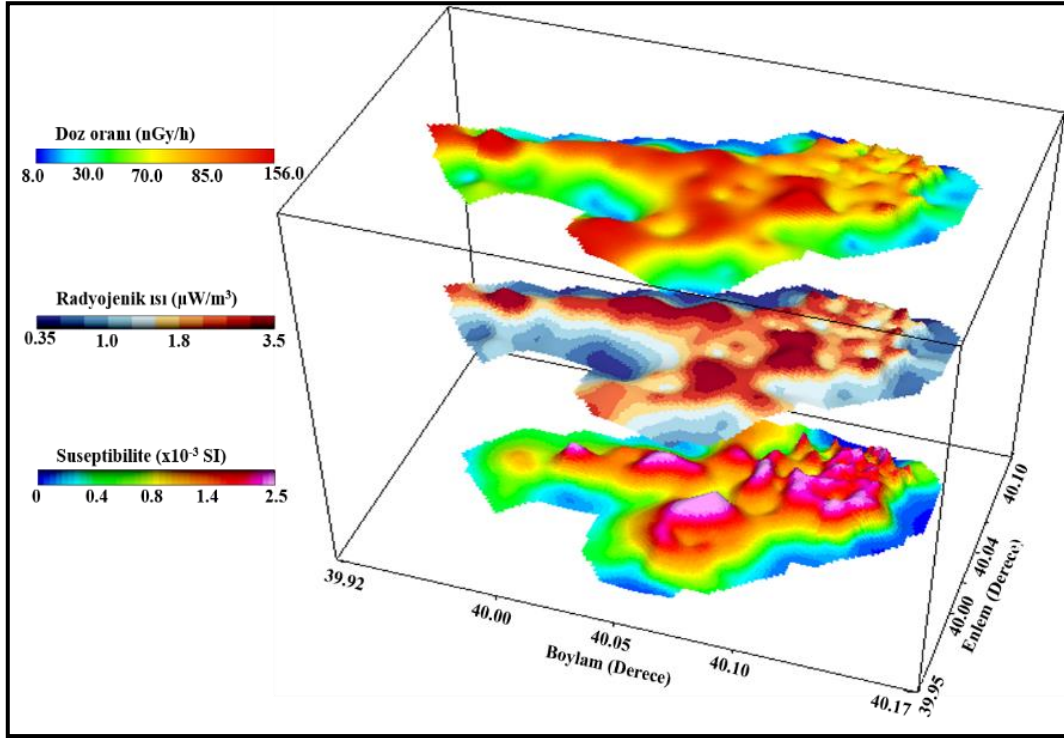
Şekil 10. Sarıççek Plütunu ve çevresi için doz oranı, radyojenik ısı üretim ve suseptibilite haritası

Figure 10. The dose rate, radiogenic heat, and susceptibility map for Sarıççek Pluton and its surroundings

Radyojenik ısı üretim değerleri, doğrudan kayaların yoğunluğu ve radyonüklid konsantrasyonları (K, eU ve eTh) ile ilişkili olduğu için ısı üretim ve toplam radyonüklid anomali haritalarındaki değişimler birbiriyle uyum içerisindedir. Gerek plütonik kütlelerin gerekse çevre formasyonun manyetik ve radyoaktif özelliğe sahip element ve mineralleri farklı oranlarda içermesi nedeniyle yüksek suseptibilite, radyojenik ısı üretim ve doz oranı değerleri plüton üzerinde elde edilirken, andezit ve bazaltlardan oluşan Alibaba formasyonu üzerinde düşük değerler ölçülmüştür (Şekil 10). Kütle üzerinde bazı alanlarda ise radyoaktivite ve manyetik suseptibilite değerleri arasında uyumsuzluklar göze çarpmaktadır. Bu durum ise magmatizma ve sonrasındaki süreçlerle ilişkilidir. Süreç sonucunda radyonüklid miktarlarında ve mineral içeriklerinde düzensiz değişimler oluşmakta ve dolayısıyla kayalar radyoaktif element ve manyetik mineralleri farklı oranlarda bulundurmaktadır.

Şekil 11'den de görüldüğü gibi en yüksek radyoelement konsantrasyonları, radyojenik ısı ve manyetik suseptibilite değerleri esas olarak kuvarslı monzodiyorit, granodiyorit, kuvarslı diyoritten oluşan Sarıhan Plütunu üzerinde elde edilirken, en düşük değerler plütunu KB'dan GD'ye doğru çevreleyen Hozbirikyayla formasyonu (kireçtaşı ve kumlu kalkerler) ve Ofiyolitik melanaj üzerinde ölçülmüştür. Jeokimyasal döngü içerisinde U ve Th en kararsız elementlerdir. Bu nedenle, bu elementlerin miktarları genellikle farklılaşma, fraksiyonel kristalleşme, kısmi erime vb. gibi magmatik süreçlerin son aşamasında artar ve bu da kayalarda SiO₂ ve alkali miktarının artmasına neden olur. Böylece bu elementler asidik kayalarda zenginleşir (Wilson, 1989; Rollinson, 1993). Dolayısıyla bu kayaların yüksek oranda radyoaktif element içermesine bağlı olarak radyojenik ısı üretimine katkısı da fazla olmaktadır. Sarıhan Plütununun kireçtaşlarına olan etkisiyle oluşan skarn zonundaki cevher örneklerinde yoğun manyetit mineralinin bulunması da (Aslan, 1998) plütonik kütle üzerindeki yüksek suseptibilite değişimlerini açıklamaktadır. Sonuç olarak Sarıhan plütunu üzerinde elde edilen bütün parametre değişimleri birbiri ile uyum içerindedir.

Yapılan çalışma sonucunda elde edilen manyetik suseptibilite ve radyojenik ısı üretim değerleri, literatürde yer alan benzer çalışmalarla karşılaştırılarak Tablo 4'te verilmiştir. Dünya'da yapılan çalışmalarla bu çalışma kapsamında elde edilen veriler kıyaslandığında hem Sarıççek hem de Sarıhan Plütunlarını oluşturan jeolojik birimler için elde edilen değerlerin yapılan birçok çalışmadaki ortalama değerlerle uyumlu olduğu görülmüştür.



Şekil 11. Sarihan Plütunu ve çevresi için doz oranı, radyojenik ısı üretim ve suseptibilite haritası
Figure 11. The dose rate, radiogenic heat, and susceptibility map for Sarihan Pluton and its surroundings

Tablo 4. Çalışmada elde edilen radyojenik ısı ve manyetik suseptibilite değerlerinin benzer araştırmalarla karşılaştırılması

Table 4. Comparison of radiogenic heat and magnetic susceptibility values obtained in this study with similar studies

Kayacın türü	Referanslar	A ($\mu\text{W}/\text{m}^3$)	k ($\times 10^{-3}$ SI)
Tortul kayalar	(Roque & Riberio, 1997)	< 0.37	---
Bazalt	(Verdoya vd., 1997)	0.2	---
Kalk-alkali granit		4.2	---
Tortul kayalar		1.05	
Şeyl-Ofiyolit	(Pasquale vd., 2001)	0.04	---
Serpantin-Ortogneys		0.24-2.92	
Bazaltik kayalar		0.6	
Riyolit lavları	(Chiozzi vd., 2002b)	6.6-71	---
İri taneli granitler		5.5	
Tonalit granitler	(Menon, vd., 2003)	1.4	---
Gnayslar		7.4	
Kumtaşları	(King, 1997)	---	0.11
Şeyl ve tortul içeren Kimbelitler	(Eccles & Sutton, 2004)	---	<0.15
Volkanitler			
Gönen	(Uyanık, 2011)	8.82	1.73
Çünür		7.16	1.51
Gölcük		7.99	2.43
Granitler		3.52	
Andezitler ve bazaltlar	(Maden & Akaryalı, 2015)	1.68	---
Sarihan Plütunu		2.03	1.08
Hozbirikyayla formasyonu		0.89	0.059
Ofiyolitik melanj kuşağı	(Altundaş, 2016)	1.35	0.132
Sarıççek Plütunu		1.90	2.5
Alibaba formasyonu		1.83	1.51

5. Sonuçlar

5. Conclusions

Gümüşhane ve Bayburt'da bulunan plütonlar ile bu plütonlarla sınır olan litolojik birimler üzerinde yerinde radyoaktivite ve manyetik duyarlılık (suseptibilite) ölçümleri yapılarak, plütonlar ve çevre kayaların ısı üretimine olan katkıları ile kayaların manyetik özelliklerini yansıtan parametreler elde edilmiştir. Yapılan radyoaktivite ölçümlerinde özellikle plütonik kütleler üzerinde yüksek radyoaktif element konsantrasyonları ölçülmüş olup, buna bağlı olarak bu kütleler için hesaplanan radyojenik ısı üretim değerleri de çevre formasyonlara göre çok daha yüksek değerlerde elde edilmiştir. Hesaplanan radyojenik ısı üretim değerleri; kayaların oluşum kökenlerine, yaşlarına ve SiO₂ içeriklerine göre değerlendirilmiştir. SiO₂ içeriği %65-69 aralığında değişen ve kabuk sınıflamasına göre üst-alt kıtasal kabuk kökenli kayalardan oluşan Eosen yaşlı Sarıhan Plütonunun ortalama radyojenik ısı üretim değeri (2.03 $\mu\text{W}/\text{m}^3$), üst-orta kıtasal kabuk kökenli kayalardan oluşan ve %58-75 oranında SiO₂ içeren Eosen yaşlı Sarıçiçek Plütonunun değerinden (1.9 $\mu\text{W}/\text{m}^3$) yüksek olarak elde edilmiştir.

Granodiyorit, kuvarslı diyorit ve kuvarslı monzodiyorit bileşimindeki kayalardan oluşan Sarıhan Plütonu, bileşimindeki kayaların içermiş olduğu manyetik minerallere bağlı olarak kütleli çevreleyen Hozbirikyayla ve Melanj kuşağına göre yüksek suseptibilite değerleri sergilemiştir. Plüton üzerinde yer yer düşük suseptibilite değerleri de gözlenmiş ve bu alanlar altere olmuş volkanik kayalarla ya da oksidasyon zonu ile ilişkilendirilmiştir. Ayrıca kireçtaşından oluşan Hozbirikyayla formasyonu ile dokanaklarında gelişen skarn zonunda bir cevher (manyetit) oluşumu gözlenmiştir. Sarıhan Plütonu da yüksek suseptibilite değerleri (altere olmamış ve biyotit gibi miktatsızlaşma özelliğine sahip minerallerce zengin sağlam kayaç yapıları) sergilerken, kütleli çevreleyen andezit ve bazaltlardan oluşan Alibaba formasyonu üzerinde düşük suseptibilite değerleri elde edilmiştir.

Teşekkür

Acknowledgement

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon birimi tarafından BTAP-9588 numaralı proje ile desteklenmiştir. Destekleri için K.T.Ü. bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon birimine teşekkür ederiz.

Yazar katkısı

Author contribution

Bu makale KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Doç. Dr. Hakan ÇINAR danışmanlığında Suna ALTUNDAŞ tarafından yapılan "Sarıçiçek ve Sarıhan Granodiyoritlerinin yerinde Gama-ışını Spektrometresi ve Manyetik Suseptibilite yöntemleriyle incelenmesi" başlıklı Doktora tezinin bir parçasıdır.

Etik beyanı

Declaration of ethical code

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedirler.

Çıkar çatışması beyanı

Conflicts of interest

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Kaynaklar

References

Abbadly, A.G.E., & Al-Ghamdi, A.H. (2018). Heat production rate from radioactive elements of granite rocks in north and southeastern Arabian Shield Kingdom of Saudi Arabia. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 11, 281-290. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2018.03.002>

- Aisabokhae, J., & Tampul, H. (2020). Statistical variability of radiation exposures from Precambrian basement rocks, NW Nigeria: implication on radiogenic heat production. *Scientific African*, 10, e00577. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00577>
- Akingboye, A.S., Ogunyele, A.C., Jimoh, A.T., Adaramoye, O.B., Adeola, A.O., & Ajayi, T. (2021). Radioactivity, radiogenic heat production and environmental radiation risk of the basement complex rocks of Akungba-Akoko, southwestern Nigeria: insights from in situ gamma-ray spectrometry. *Environmental Earth Science*, 80, 228. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09516-7>
- Altundaş, S. (2016). *Sarıçiçek ve Sarıhan granodiyoritlerinin yerinde gama-ışını spektrometresi ve manyetik suseptibilite yöntemleriyle incelenmesi* [Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Artemieva, I.M., & Mooney, W.D. (2001). Thermal thickness and evolution of Precambrian lithosphere: a global study. *Journal Geophysical Research*, 106, 16387–16414. <https://doi.org/10.1029/2000JB900439>
- Artemieva, I.M. (2011). *The Lithosphere: an interdisciplinary approach*. Cambridge University Press. <http://dx.doi.org/10.1017/CBO9780511975417>
- Artemieva, I.M., Thybo, H., Jakobsen, K., Rensen, N.K., & Nielsen, L.S.K. (2017). Heat production in granitic rocks: global analysis based on a new data compilation granite. *Earth Science Reviews*, 172 pp. 1-26. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.07.003>
- Asfahani, J. (2022). Radioactive heat production characterization of ar-rassafeh badyieh area (area-2), Syria using aerial gamma ray spectrometric and fractal modeling techniques. *Geofisica Internacional*, 61(1), 20-39. <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2022.61.1.2120>
- 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].
- 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
- Aydın, A., Ferr'e, E.C., & Aslan, Z. (2007). The magnetic susceptibility of granitic rocks as a proxy for geochemical composition: example from the Saruhan granitoids, NE Turkey. *Tectonophysics*, 441(1), 85-95. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2007.04.009>
- Bektaş, O., Yılmaz, C., Taşlı, K., Akdağ, K., & 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., & 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. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1034\(199901/06\)34:1/2<95::AID-GJ816>3.0.CO;2-J](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1034(199901/06)34:1/2<95::AID-GJ816>3.0.CO;2-J)
- Brimhal, W.H., & Adams, J.A.S. (1969). Concentration changes of thorium, uranium and metals in hydrothermally altered Conway Granite, New Hampshire. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 33(10), 130-131. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(69\)90050-7](https://doi.org/10.1016/0016-7037(69)90050-7)
- Canbay, M., & Kurtuluş, C. (2008). Armutlu Yarımadası'nda manyetik duyarlılık çalışmaları. *Uygulamalı Yerbilimleri*, 1, 60-64
- Canitez, N. (1972). Source mechanism and rupture propagation in the Mudurnu Valley Turkey: Earthquake of July 22,1967. *Pure and Applied Geophysics*, 93, 116-124
- Chiozzi, P., Pasquale, V., & Verdoya, M. (2002b). Heat from radioactive elements in young volcanics by gamma ray spectrometry. *Journal of Volcanology and Geothermal Search*, 119, 205-214. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(02\)00354-2](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(02)00354-2)
- Chopra, N., Ray, L., Dey, S., & Mitra, A. (2020). Thermal conductivity, density, petrological and geochemical characteristics of granitoids from Singhbhum Craton, eastern India. *Geothermics*, 87, 101855, <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.101855>

- Clark, D.A. (1997). Magnetic petrophysics and magnetic petrology: aids to geological interpretation of magnetic surveys. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, 17 (2), 83-103
- Dickson, B.L., & Scott, K.M. (1997). Interpretation of aerial gamma ray surveys adding the geochemical factors. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, 17, 187-200
- Eccles, D.R., & Sutton, R. (2004). Magnetic susceptibility measurements on kimberlite and sedimentary rocks in Alberta. EUB/AGS Geo-Note.
- 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. *International Geology Review*, 52, 4-6, 454-504. <https://doi.org/10.1080/00206810902951411>
- Ellwood, B.B., & Wenner, D.B. (1981). Correlation of magnetic susceptibility with 18O:16O data in late orogenic granites of the southern Appalachian Piedmont. *Earth and Planetary Science Letters*, 54, 200-202. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(81\)90003-0](https://doi.org/10.1016/0012-821X(81)90003-0)
- Eyüboğlu, Y., Chung, S.L., Dudas, F.O., Santosh, M., & 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. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2010.07.006>
- Eyüboğlu, Y., Dudas, F.O., Santosh, M., Zhu, D.C., Yi, K., Chatterjee, N., Akaryali, E. & 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*, <https://doi.org/10.1016/j.gr.2015.07.006>
- Göktürkler, G. (2002). Yerbilimlerinde ısı transferi modellemesi: kararlı-hal kondüktif ısı iletimi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 43, 67-80
- Güven, İ.H. (1993). Doğu Pontidlerin 1/25000 ölçekli jeolojisi ve komplikasyonu. Maden Tetkik Arama, Ankara (Yayımlanmamış)
- Harenayama, M., Tsuchiya, N., Takeba, M., & Chida, T. (2006). Two dimensional measurement of radioactivity of granite rocks by photostimulated luminescence technique. *Geochemical Journal*, 34, 1-9. <https://doi.org/10.2343/geochemj.34.1>
- Hasterok, D., & Webb, J. (2017). On the radiogenic heat production of igneous rocks. *Geoscience Frontiers*, 8(5), 919-940. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2017.03.000>
- He, L., Hu, S., Yang, W., & Wang, J. (2009). Radiogenic heat production in the lithosphere of Sulu ultrahigh-pressure metamorphic belt. *Earth Planetary Science Letter*, 277, 525-538. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.11.022>
- Huang, Y., Chubakov, V., Mantovani, F., Rudnick, R.L., & McDonough, W.F. (2013). A reference Earth model for the heat producing elements and associated flux. *Geochemistry-Geophysics-Geosystems*, 14, 2003-2029. <https://doi.org/10.1002/ggge.20129>
- IAEA, 2003. *Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data*. IAEA/Tecdoc-1363, Vienna. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1363_web.pdf
- Ishihara, S. (1977). The magnetite-series and ilmenite-series granitic rocks. *Mining Geology*, 27, 293-305
- Ishihara, S., Hashimoto, M., & Machida, M. (2000). Magnetite/ilmenite series classification and magnetic susceptibility of the mesozoic-cenozoic batholiths in Peru. *Resource Geology*, 50, 123-129. <https://doi.org/10.1111/j.1751-3928.2000.tb00062.x>
- Jaupart, C., & Mareschal, J.C. (2003). Constraints on crustal heat production from heat flow data. In: Rudnick, R.L. (Ed.), *The Crust*, Vol. 3 Treatise on Geochemistry (Eds. H.D. Holland and K.K. Turekian). *Elsevier-Pergamon Oxford*, 6-84. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043751-6/03017-6>
- Jokinen, J., & Kukkonen, I. (1999). Random modelling of the lithospheric thermal regime: forward simulations [Mh1] applied in uncertainty analysis. *Tectonophysics*, 306, 277-292. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(99\)00061-X](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(99)00061-X)

- Karslı, O. (2002). *Granitoid kayaçlarda magma etkileşimleri için petrografik, mineralojik ve kimyasal bulgular: Dölek ve Sarıççek plütonları (Gümüşhane, KD-Türkiye)* [Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Karslı, O., Chen, B., Aydın, F., & Şen, C. (2007). Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of the eocene Dölek and Sarıççek 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. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.03.005>
- Ketin, İ. (1966). Anadolu'nun Tektonik Birlikleri. *Maden Tetkik Arama Dergisi*, 66, 20-4
- Killeen, P.G., & Cameron, G.W. (1977). Computation of in situ potassium, uranium and thorium concentration from portable gamma-ray spectrometer data; in Report of Activities Part A. *Geological Survey of Canada*, 77-1A, 91-92
- King, M.S. (1997). Magnetic susceptibility mapping: applications for the Meguma Group, Central Nova Scotia. *Atlantic Geology*. <https://doi.org/10.4138/2063>
- Maden, N., & 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. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2015.09.023>
- Maulana, A., Watanabe, K., Imai, A., & Yonezu, K. (2013). Origin of magnetite- and ilmenite-series granitic rocks in Sulawesi, Indonesia: magma genesis and regional metallogenic constraint. *Procedia Earth and Planetary Science*, 6, 50-57. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2013.01.007>
- McLennan, S.M., & Taylor, S.R. (1996). Heat Flow and the Chemical Composition of Continental Crust. *The Journal of Geology*, 104(4), 369-377. <http://www.jstor.org/stable/30067380>
- Menon, R., Kumar, P.S., Reddy, G.K., & Srinivasan, R. (2003). Radiogenic heat production of Late Archaean Bundelkhand granite and some Proterozoic gneisses and granitoids of central India. *Current Science*, 85(5)
- Okay, A.İ., Şahintürk, Ö., & Yakar, H. (1997). Stratigraphy and tectonics of the Pular (Bayburt) region in the eastern Pontides. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration Institute (MTA) of Turkey*, 119, 1-22
- Pasquale, V., Verdoya, M., & Chiozzi, P. (2001). Radioactive heat generation and its thermal effects in the Alp-Apennines boundary zone. *Tectonophysics*, 331, 269-283 [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(00\)00294-8](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(00)00294-8)
- Podugu, N., Ray, L., Singh, S.P., & Roy, S. (2017). Heat flow, heat production, and crustal temperatures in the Archaean Bundelkhand craton, north-central India: implications for thermal regime beneath the Indian shield. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122, 5766-5788.
- Porquet, M., Pueyo, E.L., Román-Berdiel, T., Olivier, P., Longares, L.A., Cuevas, J., Ramajo, J., Antolín, B., Aranguren, A., & Auréjac, J.B. (2017). Anisotropy of magnetic susceptibility of the Pyrenean granites. *Journal of Maps*, 13(2), 438-448. <https://doi.org/>
- Pueyo, E.L., Román-Berdiel, T., Calvin, P., Bouchez, J.L., Beamud, E., Ayala, C., Loi, F., Soto, R., Clariana, P., & Margalef, A. (2022). Petrophysical characterization of non-magnetic granites; density and magnetic susceptibility relationships. *Geosciences*, 12, 240. <https://doi.org/10.3390/geosciences12060240>
- Rodriguez, J.A.B., Proenza-Fernandez, J.A., Rodriguez-Vega, A., Lopez-Saucedo, F., & Cazares-Carreón, K.I. (2017b). Magnetic susceptibility and natural gamma radioactivity as indirect proxies for characterization of sandstones and limestones of Sabinas Basin. *Geofizika*, 34(1), 19-43. <https://doi.org/10.15233/gefz.2017.34.6>
- Rodriguez, J.A.B., Fernandez, J.A.P., Pulido, G.I.D., Garcia, M.G., & Medellin, I.Y.Z. (2017). Magnetic susceptibility and natural gamma radioactivity as indirect indicators of impurities in limestones of the Sabinas Basin: possible relationships with the sedimentation environment. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 5, 77-91. <https://doi.org/10.4236/gep.2017.510007>
- Rodriguez, J.A.B., Nino-Rodriguez, E., Rodriguez-Riojas, P.A., Diaz-Martinez, R., Rodriguez-Vega, A., & Lopez-Saucedo, F. (2020). In situ magnetic susceptibility and gamma radiation data in the Candela-Monclova intrusive belt, Northeast Mexico: case studies of the Cerro Colorado and Cerro Marcelinos pluton. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 29, 579-595. <https://doi.org/10.3906/yer-1905-21>

- Rodríguez, J.A.B., Tolentino-Álvarez, J., Batista-Cruz, R.Y., Almaguer-Carmenates Y., & Lopez-Saucedo, F.J. (2023). Radiogenic heat production in rocks from the Sabinas Basin (northeastern Mexico) determined by in situ gamma radiation measurements. *Environmental Earth Sciences*, 82, 458. <https://doi.org/10.1007/s12665-023-11157-x>
- Roque, A., & Riberio, F.B. (1997). Radioactivity and Radiogenic Heat Production in the Sediments of the Silo Francisco Sedimentary Basin, Central Brazil. *Applied Radiation and Isotopes*, 48, 3413-422
- Rollinson, H.R. (1993). *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation*. Longman.
- Rudnick, R.L., & Fountain, D.M. (1995). Nature and composition of the continental crust: A lower crustal perspective. *Reviews of Geophysics*, 33(3), 267-309. <https://doi.org/10.1029/95RG01302>
- 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.
- Sharma, P.V. (1997). *Environmental and Engineering Geophysics*. Cambridge University Press, 474, United Kingdom.
- Takahashi, M., Aramaki, S., & Ishihara, S. (1980). Magnetite series/ ilmenite series vs. I-type/ S-type granitoids. In: Ishihara, I., Takenouchi, S. (Eds.), *Granitic magmatism and related mineralization*. *Mining Geology*, Nihon Shigen Chishitsu Gakkai- Society of Resource Geologists of Japan, Tokyo, 13-28
- Taylor, S.R., & McLennan, S.M. (1985). *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Blackwell, Oxford.
- Topuz, G., & Okay, A.İ. (2006). Comment on “petrography and petrology of the calc-alkaline Sarıhan Granitoid (NE Turkey): an example of magma mingling and mixing”. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 15(3), 373-377. <https://journals.tubitak.gov.tr/earth/vol15/iss3/5>
- Uyanık, N.A. (2011). *Isparta Alkali Volkanitlerinin radyometrik ve manyetik yöntemlerle incelenmesi* [Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Van Schmus, W.R. (1995). Natural radioactivity of the crust and mantle. In: *Global Earth Physics. A Handbook of Physical Constants* (AGU Reference Shelf 1). <https://doi.org/10.1029/RF001p0283>
- Verdoya, M., Pasquale, V., Chiozzi, P., & Kukkonen, I.T. (1997). Radiogenic in the Variscan crust: new determinations and distribution models in Corsica (Northwestern Mediterranean). *Tectonophysics*, 291, 63-75. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(98\)00031-6](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(98)00031-6)
- Waples, D.W. (2002). A new model for heat flow in Extensional Basins: Estimating radiogenic heat production. *Natural Resources Research*, 11. <https://doi.org/10.1023/A:101556811999>
- Wilson, M. (1989). Igneous Petrogenesis: A Global Tectonic Approach. *Geological Magazine*, 126, 4
- Wollenberg, H.A., & Smith, A.R. (1987). Radiogenic heat production of crustal rocks: an assessment based on geochemical data. *Geophysical Research Letters*, 14, 295-298. <https://doi.org/10.1029/GL014i003p00295>