



Potansiyel jeotermal kaynaklar için radyojenik ısı üretiminden sıcak kuru kayanın belirlenmesi ve Isparta-Yakaören örneği

Determination of the hot dry rock from radiogenic heat production for potential geothermal sources and example of Isparta-Yakaören

Nurten Ayten UYANIK¹ , Hatice Büşra KURT² , Osman UYANIK^{3*} 

¹Mülkiyet Koruma ve Güvenlik Bölümü, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniv., Isparta, Türkiye.
aytenuyanik@isparta.edu.tr

^{2,3}Jeofizik Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye.
h.busrakurt@gmail.com, osmanuyanik@sdu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 01.08.2019
Kabul Tarihi/Accepted: 28.11.2019

Düzeltilme Tarihi/Revision: 15.10.2019

doi: 10.5505/pajes.2019.03502
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Jeotermal sistem, enerji açısından önemli bir kaynaktır. Enerji ihtiyacı yüksek olan ülkelerde "sıcak kuru kaya" kavramı daha da önem kazanmaktadır. Bu çalışmada radyoaktif verilerden yararlanarak sıcak kuru kaya niteliği taşıyabilecek yapı araştırması yapılmıştır. Bu amaçla gama-ışın spektrometre cihazı ile Isparta-Yakaören civarında uzun ömürlü doğal radyoaktif elementler olan K, U ve Th konsantrasyon verileri elde edilmiştir. Çalışma alanında 362 farklı noktada yerinde spektrometrik ölçümler yapılmıştır. Bu ölçümler sonucunda elde edilen U, Th ve K konsantrasyon değerleri kullanılarak radyojenik ısı üretim değerleri hesaplanmıştır. Daha sonra çalışma alanı için U, Th, K konsantrasyon ve radyojenik ısı üretim haritaları oluşturulmuştur. Haritalar yorumlanarak çalışma alanı jeotermal potansiyeli açısından tartışılmıştır. Çalışma alanındaki trakiandezit, tüf ve alüvyona ait ortalama radyojenik ısı üretimi sırasıyla $6.5 \mu W/m^3$, $4.2 \mu W/m^3$ ve $3.8 \mu W/m^3$ olarak elde edilmiştir. Çalışma alanında özellikle trakiandezit kayasının yüksek ısı üretiminden ve bu kayacın geçirimsiz olması durumunda sıcak kuru kaya jeotermal kaynağı olarak geliştirmek için bir potansiyele sahip olabileceği düşünülmektedir.

Anahtar kelimeler: Uranyum, Toryum, Potasyum, Sıcak kuru kaya, Haritalar.

Abstract

The Geothermal system is an important source in terms of energy. In countries with high energy requirements, the term "hot dry rock" becomes even more important. In this study, in a place where it can be a hot dry rock, field survey was conducted by using radioactive data. For this purpose, the data of K, U and Th concentration, which is long term natural radioactive elements, were obtained with gamma-ray spectrometer device around Isparta-Yakaören. In the study area, in-situ spectrometric measurements were performed at 362 different points. Radiogenic Heat production values were calculated by using the values of U, Th and K concentration obtained as a result of these measurements. Then, maps to evaluate of the study area were generated by using U, Th, K concentration and radiogenic heat production values. The study area was discussed in terms of geothermal potential by interpreted maps. The average radiogenic heat production values of the trachyandesite tuff and alluvium units in the study area were obtained as $6.5 \mu W/m^3$, $4.2 \mu W/m^3$ and $3.8 \mu W/m^3$, respectively. It is thought that in the study area, especially from the high heat production of trachyandesite rock and this rock may have a potential to develop as a hot dry rock geothermal source if it is impermeable.

Keywords: Uranium, Thorium, Potassium, Hot dry rock, Maps.

1 Giriş

Radyoaktif elementlerin bozunma sürecinde açığa çıkan enerji kabuk ısısı açısından önemli kaynaklardan biridir. Dolayısıyla kabuk ısısının belirlenmesi insan sağlığı, endüstriyel, bilimsel ve teknolojik gelişmeler bakımından oldukça önemlidir. Bunlara ek olarak yerkürenin yaşamsal faaliyetlerini devam ettirebilmesi için de yerkürenin çekirdekten yeryüzüne kadar sahip olduğu reolojik ve ısıl yapısı ile litosferdeki ısı devamlılığı önem arz etmektedir. Yerküredeki ısının kaynakları; güneş, dünyanın oluşumundan bu güne kadar içerisinde meydana gelen kimyasal tepkimeler, tektonik olaylar ve sürtünme etkisi sonucu açığa çıkan enerji ve en önemlisi radyoaktif elementlerin bozunma süreçlerinde açığa çıkardıkları ısı enerjisidir ki tüm bu kaynaklar yerküredeki ısının devamlılığını sağlamaktadır. Kabuk içinde oluşan ısının kaynağı özellikle uzun ömürlü doğal radyoaktif elementler ve bunların izotoplarıdır. Bu elementler U-238, U-235, Th-232 ve K-40 ile bunların izotoplarıdır. Bunların yanı sıra Rubidyum-87

İndiyum-115, Lantan-138 ve Samaryum-147 gibi elementler de kabuk içinde ısı üreten elementlerdendir. Fakat yer kabuğunda çok az miktarda buldukları için ürettikleri ısı da önemsizdir. U-235, U-238 ve Th-232 ile K-40 elementlerinin yaydıkları alfa, beta ve gama ışınlarının enerjileri ve bu enerjilerin ısıya dönüşümleri [1]-[2] tarafından verilmiştir.

Yeryüzü kaynaklı radyoaktivite, dünyanın oluşumu sırasında meydana gelen ve jeolojik olaylar ile yer yeryüzüne çıkmaya devam eden kayaçların içerisinde radyoaktif çekirdeklerden ileri gelmektedir. Yeryüzünde 20'den fazla doğal radyoaktif element bulunmasına rağmen bunlardan Uranyum, Toryum ve Potasyum dönüşüm serileri oldukça önemlidir. Bu elementler yerkabuğunu meydana getiren pek çok kayaç ve mineral bileşiminde az veya çok miktarda mutlaka bulunması ve uzun yarı ömürlü olmaları sebebi ile spektrometrik ölçümlerde dikkate alınırlar.

Aydın, Orta Anadolu'daki volkanik ve plutonik kayaçlar topluluklarının petrokimyasal özelliklerinin belirlenmesinde havadan uygulanan spektrometrik çalışmaların verilerini

*Yazışılan yazar/Corresponding author

kullanılmışlardır [3]-[4]. Ayrıca volkanik ve plütonik kayaların radyoaktivite içeriklerinin belirlenmesi ile petrografik ayrımın yapılabileceğini, havadan gamma ışın spektrometri verilerinin radyoaktif mineral aramalarında ve kayaların petrokimyasal sınıflamasında gamma ışın spektrometre yönteminin kullanılabileceğini göstermişlerdir.

Gamma ışın spektrometri yöntemi kullanılarak değerli mineral araştırmaları [5]-[8], jeolojik birimlerin sınırlarının belirlenmesi [9]-[10], insan sağlığı açısından değerlendirmeler [11],[6],[12]-[18], ısı üretimi çalışmaları [1]-[2],[19]-[25] vb. birçok çalışmalar yapılabilmektedir.

Gamma ışın spektrometreleri yeryüzü kaynaklı partikül salınımlarını belirleyip, kaynağı olan yerdeki potasyum, uranyum ve toryum konsantrasyonlarını saptar. Bu konsantrasyonlar aracılığı ile ısı üretimi hesaplaması yapılmaktadır. Rybach, yüzey ısı üretimi için uranyum, toryum ve potasyum konsantrasyonlarından yararlanarak matematiksel ilişki geliştirmiştir [2]. Ayrıca Rybach ve Cermak, dünya yüzeyindeki ısı akısını yaklaşık 65 mW/m², kıtasal alanlardan mantodan gelen ısı akısının 20 mW/m² belirlemişlerdir [19]. Onlar kayalardaki ısı oluşumunun kaya türlerine göre farklılık gösterdiğini bu farklılıkları ise magmatik farklılaşma, sedimentasyon veya metamorfizmadan meydana geldiğini ortaya koymuşlardır.

Türkiye’de ısı akısının yüksek olduğu yerlerin pek çoğu hem volkanik hem tektonik geçmişi olan hem de jeotermal kaynakların yer aldığı alanlardır. Jeotermal alanlar %79 Batı Anadolu, %8.5 Orta Anadolu, %7.5 Marmara ve %0.5 diğer alanlarda dağılım göstermektedir [26]. Jeotermal alanlar ısının transfer edildiği alanlar olup, ısı akısı 0-125.7 mW/m² arasındaki alanlar normal alanlar, 125.7 mW/m² den fazla olan alanlar ise jeotermal alanlar olarak adlandırılmıştır [27]. Bunlara ek olarak sıcak kuru kayalarda jeotermal bir potansiyele sahip olabilirler. Bilindiği üzere sıcak kuru kaya genellikle 150°C den daha büyük olan sıcaklıklara sahip kayalar olarak tanımlanmaktadır [28]. Akın ve Çiftçi, Kirşehir masifinde uyguladıkları gamma ışın spektrometre çalışması sonucunda bölgedeki volkanik ve magmatik kayalarda radyojenik ısı üretiminin yüksek olduğunu belirtmişlerdir [22]. Wang ve diğ. Çin’in Guangdong ilinde sıcak kuru kaya jeotermal uygulamalarını geliştirmek için büyük bir potansiyele sahip olduğunu işaret etmişlerdir [29]. Sun ve diğ. güney Çinde granitlerin radyojenik ısı üretimini araştırmış ve jeotermal enerji olarak bir kaynak olabileceğini ifade etmişlerdir [30]. Veikkolainen ve diğ. da kuzey Avrupa’daki yüzey kayaların radyojenik ısı üretimini araştırdılar ve İsveç ile Finlandiya ısı üretimi açısından karşılaştırıldığında İsveç deki kayaların daha yüksek ısı üretimine sahip olduğunu belirtmişlerdir [25].

Çalışma alanında jeolojik olarak Isparta flishi yaygındır. Ancak çalışma alanı içerisindeki andezitler volkanizmaya bağlı bir sokulum olarak yüzeyleşmiştir. Bu andezitlerin sıcak kuru kaya potansiyelini araştırmak için çalışma alanında ilk ve detaylı olarak jeofizik yöntem bu çalışma ile yapılmıştır. Bu çalışmada Isparta-Yakaören civarında Gamma-ışın spektrometresi kullanılarak yüzeydeki kayalarda U (ppm), Th (ppm) ve K (%) konsantrasyonları ölçülmüştür. Ölçülen U, Th ve K konsantrasyonları ve birçok araştırmacının radyojenik ısı üretim bağıntıları kullanılarak çalışma alanındaki kayaların ısı üretim değerleri hesaplanmıştır. Sonuç olarak ölçülen radyoelement konsantrasyonları ve hesaplanan radyojenik ısı üretim değerleri haritalanarak yüksek radyoaktiviteye sahip alanlar belirlenmiş ve jeotermal amaçlı kullanılabilecek

potansiyel sıcak kuru kaya özelliği taşıyan kesimler işaret edilmiştir.

2 Uygulanan yöntemler

2.1 Gamma-ışın spektrometresi

Çevresel radyoaktivite yapay ve doğal olmak üzere iki ana kaynaktan meydana gelmektedir. Yerbilimler çevresel radyoaktivitenin daha çok yeryüzü ve doğal kaynaklı olanı ile ilgilenirler. Radyometrik yöntemin uygulama alanlarından biri olan gama-ışın spektrometresi yerin doğal radyoaktivitesinin belirlenmesinde de kullanılmaktadır. Gama-ışın spektrometreleri gama ışın algılayıcısı, sinyal analizcisi ve kaydediciden meydana gelirler. Algılayıcı da kristal ve foton şiddetlendirici tüpten meydana gelir. Günümüzde en çok kullanılan spektrometreler NaI(Tl) (Etkinliği talyumla artırılmış sodyum iyodür) kristalli olanlardır. Spektrometrenin kristaline çarpan farklı enerjili gama ışınları farklı şiddetlerde ışıma meydana getirirler. Bu ışımlar foton şiddetlendirici tarafından elektrik sinyaline dönüştürülür. Bu sinyaller alt ve üst enerji düzeyleri önceden belirlenmiş kanallara yönlendirilir. Her sinyal kendi enerjisine uygun kanaldan geçerek kayıt edicide kaydedilir. Kaydedilen nicelik, ilgili kanala gelen sinyal sayısı ve dolayısı ile kristale gelen ışın sayısıdır. Böylece belirlenmiş olan her bir kanaldaki net ışıma sayısı eşitlik (1) kullanılarak konsantrasyonlara dönüştürülür.

$$C_W = N_W S_W \quad (1)$$

Burada; C_W , W (K, U, Th) radyoelement konsantrasyonlarını,

N_W : W (K, U, Th) radyoelementlere ait her bir kanaldaki net ışıma sayısını,

S_W : Spektrometrenin W (K, U, Th) her bir radyoelemente ait kanaldaki duyarlılığı ifade etmektedir.

2.2 Radyojenik ısı üretimi

Isı; termodinamikte bir işlem sırasında, sistem ile çevresindeki sıcaklık farklılıkları sebebi ile sistemin çevresinden geçen enerji olarak tanımlanmaktadır [31]. Fiziksel olarak ısı transferleri iletim, taşınım ve radyasyon olmak üzere üç mekanizmada gerçekleşir [32]. Yerkabuğundaki ısı enerjisinin iki bileşeni vardır. Bu bileşenlerden birincisi mantodan kabuğa iletilen ısı enerjisi, diğeri ise radyoaktif elementlerin bozunması sonucu oluşan ısı enerjisidir. Blich’e göre, kabuk içinde oluşan ısının kaynağı doğal radyoaktif elementler ve bunların izotoplarıdır [1]. Rybach ²³⁵U, ²³⁸U, ²³²Th ve ⁴⁰K elementlerinin yaydıkları α ve β partikülleri ile gama ışınlarının enerjilerinin hesaplanması ve bu enerjilerin ısıya dönüşüm bağıntılarını vermiştir [2]. Radyoaktif bozunma esnasında var olan kütle enerjiye dönüşür. Bu bozunma sürecinde oluşan elektron yakalama veya β (+ ve -) bozunmasında üretilen nötron veya antinötronlarla ilişkili küçük bir miktar dışında enerjinin tümü ısıya dönüşmektedir. Bozunma sürecinin tümünde atılan enerji, farklı bozunma süreçleri ile ilişkili gama radyasyonunu ve yayınan parçacıkların kinetik enerjilerini içermektedir. Bu enerji kayalar tarafından soğrulur ve ısıya dönüşür [23]. Dolayısıyla radyojenik ısı üretimi, kararsız radyojenik izotopların bozunmasıyla kayacın birim hacmindeki birim zamanda serbest bırakılan ısının miktarını tanımlayan fiziksel özellik olarak tanımlanabilir.

Bir kayacın ısı üretimi genelde A ile ifade edilir ve uranyum, toryum ve potasyum tarafından üretilen (A_U , A_{Th} ve A_K) ısıların toplamıdır ve aşağıdaki gibi ifade edilmektedir [23].

$$A = \rho(C_K A_K + C_U A_U + C_{Th} A_{Th}) \quad (2)$$

C_U (ppm), C_{Th} (ppm) ve K (%) ilgili elementlerin konsantrasyonları ρ (kg.m^{-3}) yoğunluğu ifade etmektedir. Buna ek olarak [1] tarafından verilen, [33]-[35] tarafından yeniden gözden geçirilerek düzenlenen ısı üretim bağıntısı eşitlik (3) deki gibidir.

$$A(\mu\text{Wm}^{-3}) = 10^{-3}\rho(0.036 C_K + 0.097 C_U + 0.026 C_{Th}) \quad (3)$$

Çeşitli araştırmacılar tarafından ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K için kg başına ürettikleri ısı miktarları hesaplanmıştır (Tablo 1). Tablo 1 deki katsayılar Eşitlik 2'de yerine konur ise (4)-(7) eşitlikleri bulunur. Bu eşitliklerde yoğunluk kg/m^3 , U ve Th konsantrasyonları ppm (10^{-6} kg/kg) K konsantrasyonu ise % olarak kullanıldığında ısı üretimi A ise $\mu\text{W/m}^3$ olarak elde edilir.

Tablo 1. ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K için kütle başına düşen ısı üretimleri [36].

Table 1. Heat generations per mass for ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K [36].

A_U $\mu\text{W/kg}$	A_{Th} $\mu\text{W/kg}$	A_K $\mu\text{W/kg}$	Kaynaklar
97	27	0.0036	[1]
97.7	26.3	0.0034	[37]
96.7	26.3	0.0035	[38]
95.2	25.6	0.00348	[2]

$$A = 10^{-5}\rho(9.7 C_U + 2.7 C_{Th} + 3.6 C_K) \quad (4)$$

$$A = 10^{-5}\rho(9.77 C_U + 2.63 C_{Th} + 3.4 C_K) \quad (5)$$

$$A = 10^{-5}\rho(9.67 C_U + 2.63 C_{Th} + 3.5 C_K) \quad (6)$$

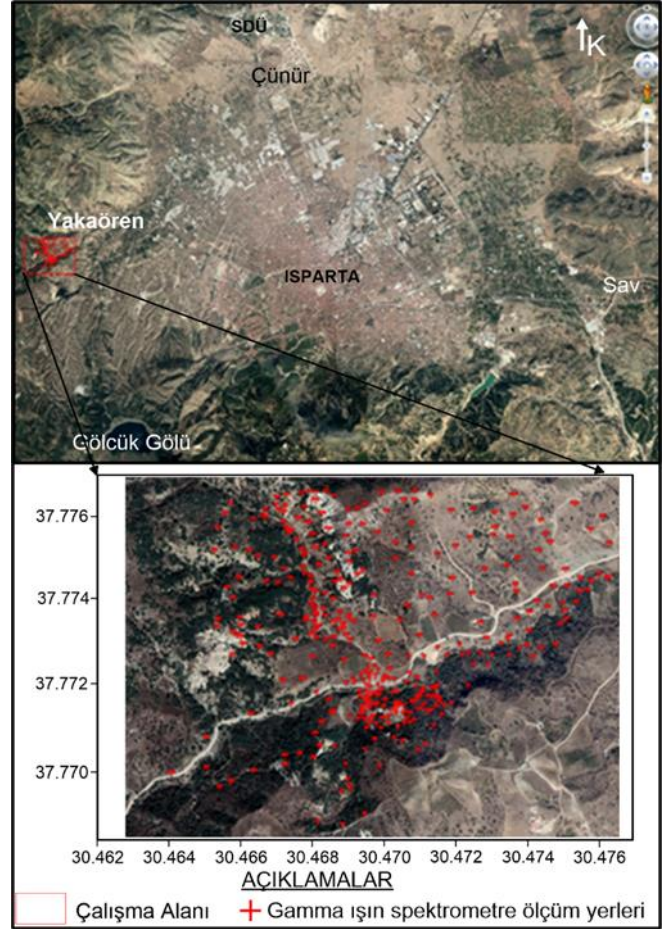
$$A = 10^{-5}\rho(9.52 C_U + 2.56 C_{Th} + 3.48 C_K) \quad (7)$$

Sıcak kuru kaya kavramı ilk kez, 1970'li yıllarda ilk petrol krizi sırasında enerji tartışmalarında Los Alamos Bilim Laboratuvarından (New Mexico) atom fizikçileri tarafından ortaya atılmıştır. Sıcak kuru kaya jeotermal akışkan haznesinin olmadığı, ancak su enjekte edilerek yapay bir hazne oluşturulması ve bu haznedeki ısıyı çeşitli yollarla yeryüzüne transfer edilmesi ve buradan elde edilecek jeotermal akışkan (su ve/veya buhar) kullanılarak elektrik enerjisi üretilmesinde kullanılmaktadır. Sıcak kuru kaya ülkemizdeki karbon kaynaklarının haricinde alternatif bir enerji kaynağı olarak ortaya çıkmakta ve enerji sektörünün de yoğun ilgisini çekmektedir. Bu çalışmada radyojenik ısı üretimi değerlerinden yola çıkarak potansiyel sıcak kuru kaya ön değerlendirmesinin yapılabileceği ortaya konulmaktadır.

3 Çalışma alanı ve jeolojisi

3.1 Çalışma alanı

Çalışma alanı, Isparta ili içerisinde 37.768-37.778 enlemleri ve 30.462-30.477 boylamları arasındadır (Şekil 1). Şekil 1 de Isparta ili sınırları içerisindeki çalışma alanı ve spektrometre ölçüm noktalarının Google earth görüntüsü üzerindeki lokasyonları gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 1 de verilen enlem ve boylamlar çalışmada elde edilen tüm haritalara işlenmiş ve haritaların daha kolay yorumlanması sağlanmıştır.

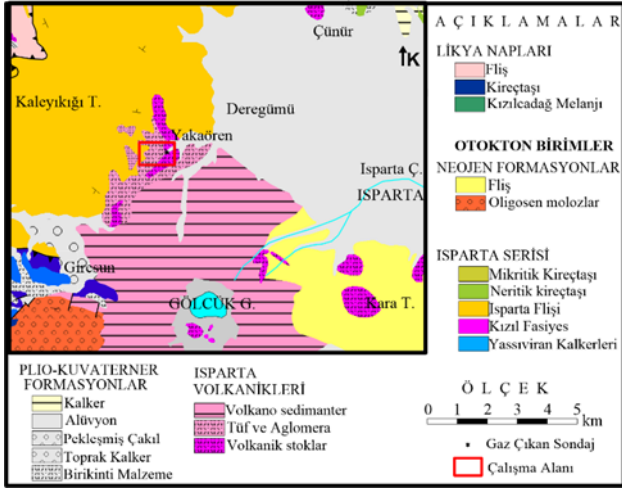


Şekil 1. Çalışma alanı ve civarının Google Earth görüntüsü ve lokasyon haritası.

Figure 1. Google Earth view and location map of the study area and its surroundings.

3.2 Jeoloji

Çalışma alanında jeolojik birimler otokton ve allohton olmak üzere ikiye ayrılmış olup, çalışma alanı ve yakın çevresinde Isparta serisi, Isparta volkanikleri, Plio-Kuvaterner formasyonlar ve otokton birimler yer almaktadır. Çalışma alanının jeoloji haritası [39]'dan düzenlenmiş ve Şekil 2'de sunulmuştur. Çalışma alanının kuzeyinde yer alan ve Isparta Flişi olarak adlandırılan kiltası, silttaşı, kumtaşı ve konglomera ardalanması şeklinde görülmektedir. Çalışma alanı ve civarındaki volkanik ürünler Isparta Flişini açısız bir uyumsuzluk ile örtmektedir. Poisson tarafından tanımlanan Isparta volkanikleri ya da Gölcük volkanikleri olarak da bilinen birim çalışma alanında geniş bir yayılım göstermektedir [40]. Bu volkanikler Gölcük volkanizmasının farklı evrelerinde oluşmuştur. Volkanik kayalar lavlar ile şekillenmiş dayk ve domlardan ve volkanik bomba, lapilli, pomza, ignimbrit, aglomera ve konsolide olmayan tüf gibi piroklastiklerden oluşmaktadır [41]. Bu piroklastikler Gölcük kalderası çevresinde yaygın olarak görülmektedir. Çalışma alanında kirli beyaz renkte tüfler, trakiandezitik ve andezitik bileşimli volkanik lavlar, subvolkanik stoklar ve dayklar şeklinde birçok volkanik yapı gözlenmektedir. Alüvyonlar ise çalışma alanının güneybatısı ve kuzeydoğusunda yer alır. Alüvyon yelpaze dane boyu 0.002-0.75 mm arasındaki volkanitlerden oluşmuştur.



Şekil 2. Çalışma alanı ve civarının jeolojik haritası ([39]'dan düzenlenmiştir).

Figure 2. Geological map of the study area and its surroundings (modified from [39]).

4 Veriler ve değerlendirmeler

Gamma ışın spektrometri ölçümleri 362 farklı noktada yapılmıştır. Bu cihaz ile ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K elementleri tarafından üretilen gamma ışınları enerji düzeylerine göre ayırt edilmektedir. Saha çalışmasında yapılan tüm ölçümler 5 dakikalık süreler boyunca ve yerden yapılmıştır. Çalışma alanı yaklaşık 1.325 km^2 lik bir alanı kapsamaktadır. Bu alan içerisinde bulunan jeolojik birimlerde yapılan gamma ışın spektrometre ölçümlerinin 86 adeti alüvyon, 82 adet

trakiandezit, 80 adet tüf ve 114 adet kökürt kokusu yoğun olan tüf üzerinde yapılmıştır. Trakiandezit, tüf ve alüvyon üzerinde yapılan gamma ışın spektrometre ölçüm sonuçları ve hesaplanan radyojenik ısı üretim değerleri Tablo 2'de sunulmuştur. Tablo 2 incelendiğinde en yüksek radyoaktif element konsantrasyon değerleri sırasıyla tüf, trakiandezit ve alüvyonlarda elde edilmiştir. Ayrıca farklı araştırmacıların kullandığı eşitliklerinden elde edilen radyojenik ısı üretim değerleri incelendiğinde en yüksek ısı üretimi trakiandezitler üzerinde alınan ölçümlerden hesaplanmıştır. Isı üretimindeki değişimi daha net gösterebilmek için çalışma alanında ölçülen ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K konsantrasyon ve radyojenik ısı üretim haritaları sırasıyla Şekil 3-8'de verilmiştir. [42]'de ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K radyo element konsantrasyonlarının ortalama değerleri yaklaşık olarak sırasıyla 35 Bq/kg (2.83 ppm), 30 Bq/kg (7.39 ppm) ve 400 Bq/kg ($\%1.28$) olarak verilmiştir. Bu değerler de çalışma alanı için göz önüne alınarak haritalar oluşturulmuştur (Şekil 3-5).

Haritalar ara değer hesaplama tekniği olan kriging tekniği ve Surfer-13 paket programı kullanılarak elde edilmiştir. Haritalar (Şekil 3, 4, 5) renklendirilirken dünya ortalama değerleri de dikkate alınmış ve elde edilen veriler sarı, açık mavi, koyu mavi, yeşil ve kırmızı ile renklendirilmiştir. Sarı renk ve açık mavi arası dünya ortalama değerlerinden daha küçük değerlere sahip alanlar olarak sınıflandırılmıştır. Koyu mavi, yeşil ve kırmızı renkli alanlar dünya ortalama değerlerinden daha büyük değere sahip alanları işaret etmektedir. Ayrıca çalışma alanında elde edilen ^{238}U ve ^{232}Th elementleri için ortalama değerler sırası ile 20 ve 14 ppm'dir. Şekil 3 ve 4 de koyu maviden yeşil renk geçişi ^{238}U ve ^{232}Th için ortalama değeri ifade etmektedir. Çalışma alanı ^{238}U ve ^{232}Th konsantrasyonu açısından dünya ortalama değerlerinin çok çok üstündedir (Şekil 3 ve 4).

Tablo 2. Gamma ışın spektrometre ölçüm sonuçlarının ve radyojenik ısı üretim değerlerinin istatistik sonuçları.

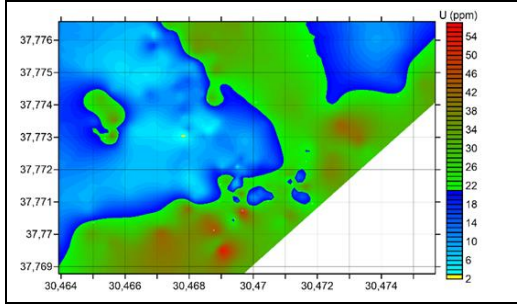
Table 2. Statistical results of gamma ray spectrometer measurement results and radiogenic heat generation values.

N	U			Th			K			A			Jeolojik Birim
	ppm			ppm			%			$\mu\text{W}/\text{m}^3$			
	EB	EK	Ort.	EB	EK	Ort.	EB	EK	Ort.	EB	EK	Ort.	
80	45.22	6.10	23.90	39.46	1.90	17.94	2.01	0.01	0.80	12.3	1.50	6.50	Trakiandezit
194	58.40	1.38	18.40	48.47	0	12.90	2.33	0	0.63	9.16	0.21	2.94	Tüf
86	36.03	3.20	17.59	35.81	1.18	11.85	1.49	0	0.57	8.32	0.7	3.80	Alüvyon

N: Veri sayısı. EB: En büyük. EK: En küçük. Ort.: Ortalama.

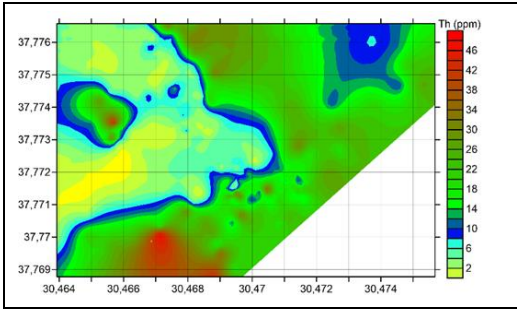
N	A ₁			A ₂			A ₃			A ₄			Jeolojik Birim
	[1]			[37]			[38]			[2]			
	$\mu\text{W}/\text{m}^3$			$\mu\text{W}/\text{m}^3$			$\mu\text{W}/\text{m}^3$			$\mu\text{W}/\text{m}^3$			
	EB	EK	Ort.	EB	EK	Ort.	EB	EK	Ort.	EB	EK	Ort.	
80	12.59	1.51	6.67	12.58	1.52	6.66	12.48	1.50	6.61	12.27	1.48	6.49	Trakiandezit
194	9.40	0.21	3.02	9.40	0.21	3.02	9.32	0.21	3.00	9.16	0.21	2.94	Tüf
86	8.56	0.72	3.90	8.55	0.72	3.90	8.48	0.71	3.86	8.33	0.70	3.80	Alüvyon

N: Veri sayısı. EB: En büyük. EK: En küçük. Ort.: Ortalama.



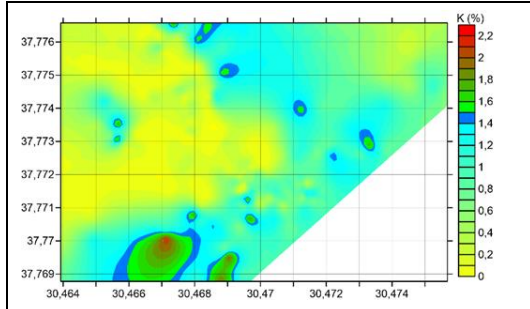
Şekil 3. Çalışma alanının Uranyum (U) haritası.

Figure 3. Uranium (U) map of the study area.



Şekil 4. Çalışma alanının Toryum (Th) haritası.

Figure 4. Thorium (Th) map of the study area.



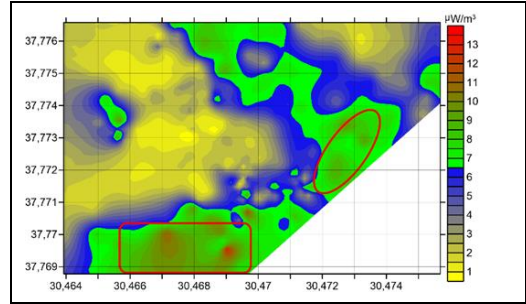
Şekil 5. Çalışma alanının Potasyum (K) haritası.

Figure 5. Potassium (K) map of the study area.

Ancak, ^{40}K değerleri açısından değerlendirildiğinde dünya ortalamasının (yaklaşık %1.3) altında (yaklaşık %0,67) olduğu belirlenmiştir (Tablo 2). Şekil 5'te koyu mavi, yeşil ve kırmızı renk geçişleri çalışma alanındaki % K konsantrasyonlarının dünya ortalamasından daha yüksek olduğu bölümleri göstermektedir. Jeoloji ve konsantrasyon haritaları karşılaştırıldığında çalışma alanında konsantrasyon değerlerindeki farklılıkların jeolojik birimleri temsil ettiği açıkça görülmektedir. Şekil 3 ve 4'te sarı ve koyu mavi arasındaki alanlar genel olarak tuf ve alüvyon birimlerini temsil etmektedir. Yeşil renkli alanlar yoğun olarak Tüfleri temsil etmektedir. Kırmızı renkli alanlar ise en yüksek konsantrasyonların elde edildiği trakiandezit stoklarını temsil etmektedir. Şekil 5'te trakiandezit stokları koyu mavi, yeşil ve kırmızı renkli alanlarla eşleşmektedir. Şekil 3, 4 ve 5 incelendiğinde kırmızılı alanlarda yüksek radyoaktif değerler elde edildiği ve bu değerlerin çoğunlukla trakiandezit stoklarından kaynaklandığı anlaşılmaktadır. Özellikle çalışma alanının güney batı kısmında 37.769-37.77 enlemleri ve 30.466-30.470 boylamları arasında kalan alanda en yüksek

konsantrasyonlar elde edilmiştir. Bu yüksek değerler çalışma alanında mostra vermiş trakiandezitlerden kaynaklanmaktadır.

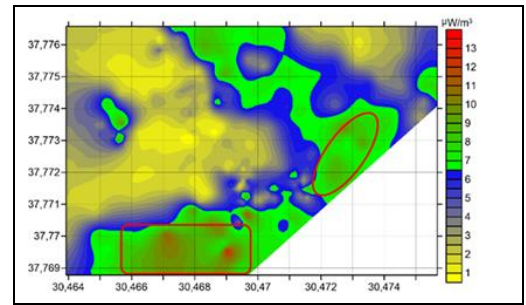
Sıcak kuru kaya teknolojik bir gelişme ve ulusal bir ısı enerji stratejisinin potansiyel olarak en önemli bileşenidir. Dünyada birçok araştırmacı ([23],[25],[29]-[30]) tarafından $6.5 \mu\text{W}/\text{m}^3$ civarında radyojenik ısı üretim değerleri uygun sıcak kuru kaya olarak değerlendirilmiştir. Bu çalışmanın temel amacı, çalışma alanında uygun sıcak kuru kaya varlığının araştırılmasıdır. Bu amaçla, ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K konsantrasyon değerleri, jeolojik birime göre sınıflandırılmış, Eşitlik 2 ile Tablo 1 deki katsayılar kullanılarak radyojenik ısı üretim değerleri farklı araştırmacılara göre hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarda alüvyon, tuf ve trakiandezit için yoğunluklar sırasıyla 1.9, 1.4 ve $2.35 \text{ gr}/\text{cm}^3$ kabul edilmiştir. Sonuç olarak farklı araştırmacıların bağıntılarından elde edilen ısı üretim haritaları Şekil 6, 7, 8 ve 9'da sunulmuştur. Tüm ısı üretim haritalarında $6.5 \mu\text{W}/\text{m}^3$ bir sınır değer olarak kullanılmıştır. [1]'e göre oluşturulan radyojenik ısı üretim haritası Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Çalışma alanının [1]'göre Radyojenik ısı üretim haritası.

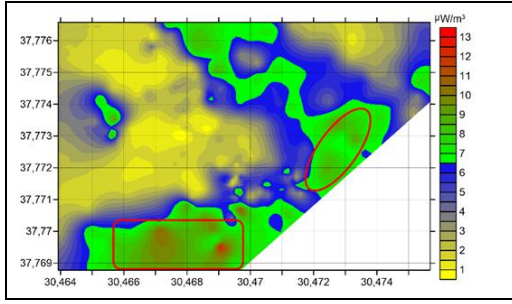
Figure 6. Radiogenic heat production map of the study area according to [1].

Şekil 6 incelendiğinde sarıdan maviye geçişin olduğu alanlar $6.5 \mu\text{W}/\text{m}^3$ den küçük olan alanları, yeşilden kırmızıya geçiş alanları ise $6.5 \mu\text{W}/\text{m}^3$ den büyük olan alanları işaret etmektedir. Şekil 6'da kırmızı renkli dikdörtgen ve oval şekiller çalışma alanında en yüksek ısı üretiminin olduğu alanları göstermektedir. Şekil 7, 8 ve 9 diğer araştırmacıların eşitliklerine göre elde edilen haritalar olup, [1]'in eşitliğinden elde edilene benzer sonuçlar elde edilmiştir. Bu durumda farklı araştırmacıların oluşturduğu ısı üretim bağıntılarından herhangi birisi radyojenik ısı üretimi hesaplanmasında kullanılabilir.



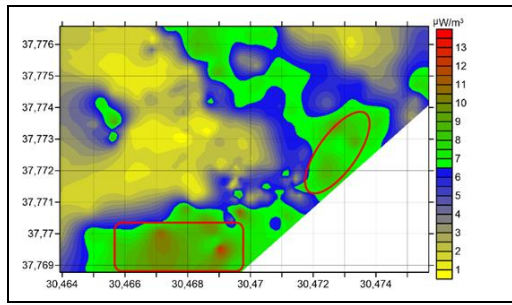
Şekil 7. Çalışma alanının [37]'göre Radyojenik ısı üretim haritası.

Figure 7. Radiogenic heat production map of the study area according to [37].



Şekil 8. Çalışma alanının [2]'göre Radyojenik ısı üretim haritası.

Figure 8. Radiogenic heat production map of the study area according to [2].



Şekil 9. Çalışma alanının [38]'göre Radyojenik ısı üretim haritası.

Figure 9. Radiogenic heat production map of the study area according to [38].

Çalışma alanında jeolojik birim olarak Tüfler fazla bir kalınlığa sahip değildir ve Isparta filizi üzerinde bir örtü görevi görürler. Fakat, Trakiandezitler volkanizmaya bağlı derinlerden yüzeye çıkarak soğumuş birimlerdir. Bu yüzden trakiandezit birimi radyojenik ısı üretimi açısından uygun bir kaya olabilir. Ancak sıcak kuru kaya kavramında derinlerde sıcaklık olmasının yanı sıra geçirimsiz bir kaya olma zorunluluğu da vardır. Bu yüzden, trakiandezit kayasının sıcak kuru kaya olarak değerlendirilmesi durumunda geçirimsizlik deneyleri yapılması gereklidir.

5 Sonuçlar ve öneriler

Çalışma sahasında elde edilen ortalama radyoaktif konsantrasyon değerleri büyükten küçüğe doğru trakiandezit, tuf ve alüvyon olarak sıralanmaktadır.

Çalışma alanında dünya ortalamalarına göre, radyoaktif element konsantrasyonları ^{40}K hariç yüksek elde edilmiştir.

Çalışma alanında radyojenik ısı üretiminin yüksek değerleri trakiandezit ve tüflerde elde edilmiştir. Tuf örtü olması nedeni ile sıcak kuru kaya olarak değerlendirilemez. Ancak trakiandezitler dayk şeklinde derinlere kadar uzandığı ve derinlerde geçirimsizlik elde edilmesi durumunda sıcak kuru kaya olarak değerlendirilebilir.

Isparta ve civarındaki derinlik kayaları ile bağlantılı volkanik kayaların radyojenik ısı üretimi çalışması yapılarak ek enerji kaynağı olabilecek alanların belirlenmesi önerilmektedir. Bu kayaların derine doğru yayılımını belirlemek için gerekli jeofizik yöntemler uygulanmalıdır.

Sıcak kuru kaya belirlenmeleri ve kullanımı kurumsal uygulamalar için ekonomik hale gelebilir, bir enerji kaynağı

seçeneği ve uzun vadeli planlamanın bir parçası olarak kabul edilmesi gerektiği önerilmektedir.

Sıcak kuru kaya olarak belirlenen alanların yakınlarında su araştırmaları için hidrojeoloji ve jeofizik çalışmaların yapılması önerilmektedir.

6 Conclusions

The average radioactive concentration values obtained in the study area are listed as trachyandesite, tuff and alluvium in descending order.

Compared to world averages in the study area, concentration values of radioactive elements were obtained high, except ^{40}K .

High values of radiogenic heat production in the study area were obtained in trachyandesite and tuffs. It cannot be considered as a hot dry rock because tuff is a cover. However, trachyandesites can be considered as hot dry rocks if they extend deep into dyke shaped and if impermeability is obtained at depths.

It is recommended to identify areas that can be an additional energy source by conducting radiogenic heat generation studies of volcanic rocks connected with depth rocks in Isparta and its surrounding. The necessary Geophysical methods should be applied to determine how these rocks spread deep.

It is suggested that the determinations and use of hot dry rock may become economical for enterprise applications, should be considered an energy source option and part of long-term planning.

Hydrogeology and geophysical studies are recommended for water research near areas designated as hot dry rock.

7 Teşekkür

Yazarlar, değerli hakemlere ve Editöre katkılarından dolayı teşekkür ederler.

8 Kaynaklar

- [1] Birch F. *Heat from Radioactivity*, in *Nuclear Geology*. 1st ed. New York, USA, Wiley, 1954.
- [2] Raybach L. "Radioactive heat production in rocks and its Relation to other petrophysical parameters". *Pure and Applied Geophysics*, 114(2), 309-317, 1976.
- [3] Aydın I, Karat HI, Kocak A. "Curie point depth map of Turkey". *Geophysical Journal International*, 162, 633-640, 2005.
- [4] Aydın İ, Aydoğan MS, Oksum E, Koçak A. "An attempt to use aerial gamma-ray spectrometry results in petrochemical of the volcanic and plutonic associations of central anatolia (Turkey)". *Geophysical Journal International*, 167, 1044-1052, 2006.
- [5] Aydın İ. "Orta Anadolu Uranyum Aramaları Havadan Gamma Ray Spektrometre Etüdü Raporu". Maden Tetkik ve Arama, Ankara, Türkiye, Bilimsel Rapor, 9146, 1990.
- [6] Uyanık NA, Uyanık O, Gür F, Aydın İ. "Natural radioactivity of bricks and brick material in the Salihli-Turgutlu area of Turkey". *Environmental Earth Sciences*, 68(2), 499-506, 2013a.
- [7] Uyanık NA, Öncü Z, Uyanık O, Bozcu M, Akkurt I, Günoglu K, Yagmurlu F. "Distribution of natural radioactivity from ^{40}K radioelement in volcanics of Sandıklı-Suhut (Afyon) area". *Acta Physica Polonica A*, 128(2-B), B438-440, 2015a.

- [8] Uyanık NA, Öncü Z, Uyanık O, Akkurt İ. "Determination of Natural Radioactivity from 232Th with Gamma-Ray Spectrometer in Dereköy-Yazır (Southwestern Anatolia)". *Acta Physica Polonica A*, 128(2-B), B441-442, 2015b.
- [9] Uyanık NA, Akkurt İ, Uyanık O. "A ground radiometric study of uranium, thorium and potassium in Isparta, Turkey". *Annals of Geophysics*, 53(5-6), 25-30, 2010.
- [10] Uyanık NA. Isparta Alkali Volkanitlerinin Radyometrik ve Manyetik Yöntemlerle İncelenmesi. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye, 2011.
- [11] Akkurt İ, Uyanık NA, Uyanık O, Gunoglu K, Mavi B. "Natural Radioactivity in some geological samples in Isparta (Turkey)". *Arab Journal of Nuclear Sciences and Applications*, special issue, 353-358, 2011.
- [12] Uyanık NA, Uyanık O, Akkurt İ. "Micro-zoning of the natural radioactivity levels and seismic velocities of potential residential areas in volcanic fields: the case of Isparta (Turkey)". *Journal of Applied Geophysics*, 98, 191-204, 2013b.
- [13] Coşkun A, Çetin B. "Determination of the natural radioactivity level of Amasya Şeyhçui region". *Acta Physica Polonica A*, 130, 309-310, 2016.
- [14] Bolat B, Öner F, Çetin B. "Assessments of natural radioactivity concentration and radiological hazard indices in surface soils from the Gözlek Thermal SPA (Amasya-Turkey)". *Acta Physica Polonica A*, 132(3-II), 1200-1202, 2017.
- [15] Yıldız-Yorgun N, Gür-Filiz F, Özdemir OF. "Determining radiological hazards due to the natural radioactivity in building materials used in Van Turkey". *Fresenius Environmental Bulletin*, 27(6), 4448-445, 2018.
- [16] Akingboye AS, Ademila O. "In situ natural radioactivity and radiological hazard assessments of granite gneiss outcrops in parts of the southwestern basement complex of Nigeria". *Journal of Natural Hazards and Environment*, 5(2), 1-11, 2019.
- [17] Günay O, Aközcan S, Kulalı F. "Measurement of indoor radon concentration and annual effective dose estimation for a university campus in Istanbul". *Arabian Journal of Geosciences*, 12(5), 171-178, 2019.
- [18] Günay O, Abamor E. "Environmental radiation dose rate arising from patients of PET/CT". *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16, 5177-5184, 2019.
- [19] Rybach L, Cermak V. *Radioactive Heat Generation in Rocks, Numerical Data and Functional Relationships in Sciences and Technology*. New Series Berlin-Heidelberg-NewYork, USA, Springer-Verlag, 1982.
- [20] Rybach L, Buntebarth G. "The variation of heat generation, density and seismic velocity with rock type in the continental lithosphere". *Tectonophysics*, 103, 335-344, 1984.
- [21] Taylor SR, McLennan SM. *The Continental Crust; Its Composition and Evolution; An Examination of the Geochemical Record Preserved in Sedimentary Rocks*. London, England, Blackwell, Oxford, 1985.
- [22] Akın U, Çiftçi Y. "Kırşehir masifi'nin ısı akışı ve radyojenik ısı üretiminin jeolojik kaynakları". *MTA Dergisi*, 143, 53-73, 2011.
- [23] Clauser C. *Radiogenic Heat Production of Rocks*. 2nd Ed. Dordrecht, Holland, Springer, 2011.
- [24] Cirmık A. "Examining the crustal structures of eastern Anatolia, using thermal gradient, heat flow, radiogenic heat production and seismic velocities (Vp and Vs) derived from Curie Point depth". *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 59(2), 117-134, 2018.
- [25] Veikkolainen T, Kukkonen IT, Näslund J-O. "Radiogenic heat production analysis of fennoscandian shield and adjacent areas in Sweden". *Geophysical Journal International*, 218(1), 640-654, 2019.
- [26] Akın U, Ulugergerli EU, Kutlu S. "Türkiye jeotermal potansiyelinin ısı akışı hesaplamasıyla değerlendirilmesi". *MTA Dergisi*, 149, 205-214, 2014.
- [27] Şimşek Ş, Mertoğlu O, Bakır N, Akkuş İ, Aydoğdu Ö. "Geothermal energy utilization development and projections-country update report 2000-2004 of Turkey". *Proceedings World Geothermal Congress*, Antalya, Türkiye, 24-29 April, 2015.
- [28] Robinson ES, Potter RM, McInterr BB. "A Preliminary Study of The Nuclear Subterrene". Los Alamos National Laboratory Report, LA-4547, Los Alamos, New Mexico, 1971.
- [29] Wang AD, Sun ZX, Hu BQ, Liu JH, Liu CD. "Guangdong, a potential province for developing hot dry rock geothermal resource". *Applied Mechanics and Materials*, 492, 583-585, 2014.
- [30] Sun Z, Wang A, Liu J, Hu B, Chen G. "Radiogenic heat production of granites and potential for hot dry rock geothermal resource in guangdong province, Southern China". *Proceedings World Geothermal Congress Melbourne, Australia*, 19-25 April 2015.
- [31] Yüncü H, Kakaç S. *Temel Isı Transferi*. Ankara, Türkiye, Bilim Yayıncılık, 1999.
- [32] Göktürkler G. "Yerbilimlerinde, ısı transferi modellemesi: kararlı-hal kondüktif ısı iletimi". *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 4(3), 67-80, 2002.
- [33] Ashwal LD, Morgan P, Kelley SA, Percival JA. "Heat production in an archean crustal profile and implications for heat flow and mobilization of heat-producing elements". *Earth and Planetary Science Letters*, 85, 439-174, 1987.
- [34] Rybach L, Buntebarth G. "Relationships between the petrophysical properties density, seismic velocity, heat generation, and mineralogical constitution". *Earth and Planetary Science Letters*, 57, 367-376, 1982.
- [35] Rybach L. *Determination of Heat Production Rate*. Editors: Hanel R, Stegena L. Handbook of Heat Flow Density Determination, 125-142, Dordrecht, Holland, Kluwer, 1988.
- [36] Clauser C. "Heat transport processes in the earth's crust". *Surveys in Geophysics*, 30, 163-191, 2009.
- [37] Hazma VM, Beck AE. "Terrestrial heat flow, the neutrino problem, and a possible energy source in the core". *Nature*, 240(5380), 343-344, 1972.
- [38] Emsley J. *The Elements*. London, England, Oxford Clarendon Press, 1989.
- [39] Gutnic M, Monod O, Poisson A, Dumont JF. *Geologie des Taurides Occidentales (Turquie)*. Memoires de la Societe Geologique de France, Nouvelle Serie: 58, 2, 137, Paris, France, 1979.

- [40] Poisson A. "Evolution paleogeographique des massifs des Beydağları at du Susuz da". *VI. Colloquium on Geology of Aegean Region*, İzmir, Turkey, 19 September-4 October 1977.
- [41] Yılmaz K. "Geochemistry of ultramafic, mafic, and felsic xenoliths from the Gölcük (Isparta, SW Turkey) alkali rocks: genetic relationship with arc magmas". *Arabian Journal of Geosciences*, 12 (306), 1-16, 2019.
- [42] UNSCEAR United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. "Sources, effects and risks of ionizing radiation. Report to the General Assembly with Annex B: Exposures from Natural Sources of Radiation". United Nations, New York, USA, Scientific Report, 2000.