	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	e-ISSN: 2147-835X Dergi sayfası: http://dergipark.gov.tr/saufenbilder		
	Geliş/Received 12-04-2017 Kabul/Accepted 12-09-2017	Doi 10.16984/saufenbilder.305792	

Bazı ticari tuz örneklerinde doğal ve yapay radyonüklitlerin aktivite konsantrasyonlarının belirlenmesi

Canel Eke*¹

ÖZ

Bu çalışmanın amacı bazı ticari tuz örnekleri içindeki doğal ve yapay radyonüklitlerin aktivite konsantrasyonlarını HpGe gama spektrometre sistemi kullanarak belirlemektir. Çalışmada 5-rafine edilmiş, 5-rafine edilmemiş, 1-bulaşık makinesi tuzu olmak üzere toplamda 11 adet ticari tuz örneği incelenmiştir. Tuz örnekleri içindeki ²²⁶Ra, ²³²Th, ⁴⁰K and ¹³⁷Cs radyonüklitlerinin aktivite konsantrasyonları, radyum eşdeğer aktivitesi, soğurulan gama doz oranı, yıllık etkin doz eşdeğeri, ²²⁶Ra, ²³²Th ve ⁴⁰K doğal radyonüklitlerin tuz örneklerinin yetişkinlerde yıllık tüketimden gelen etkin doz değeri, iç tehlike indeksi ve dış tehlike indeksi değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen radyum eşdeğer aktivitesi, soğurulan gama doz oranı, yıllık etkin doz eşdeğeri uluslararası raporlarda verilen ortalama değerler ile karşılaştırılmış ve tuz örnekleri için elde edilen değerlerin, uluslararası raporlarda belirtilen ortalama değerlerden düşük olduğu sonucuna ulaşılmıştır. ²²⁶Ra, ²³²Th ve ⁴⁰K doğal radyonüklitlerin tuz örneklerinin yetişkinlerde yıllık tüketimden gelen etkin doz değeri, uluslararası raporda belirtilen değerden daha yüksektir.

Anahtar Kelimeler: Doğal ve yapay radyonüklitler, HpGe gama spektrometre sistemi, Ticari tuz örnekleri

Determination of activity concentrations of natural and artificial radionuclides in some commercial salt samples

ABSTRACT

The aim of this study is to determine activity concentrations of natural and artificial radionuclides in some commercial salt samples using HpGe gamma spectrometry system. In this study, a total of 11 commercial salt samples which were 5-refined, 5-unrefined and 1-dishwasher salt samples were examined. The activity levels of ²²⁶Ra, ²³²Th, ⁴⁰K and ¹³⁷Cs radionuclides, radium equivalent activity, absorbed dose rate, annual effective dose equivalent, annual effective dose values of ²²⁶Ra, ²³²Th and ⁴⁰K from ingestion of salt samples for adults, internal hazard index and external hazard index were calculated in salt samples. The obtained radium equivalent activity, absorbed gamma dose rate, annual effective dose equivalent were compared with the average values given in the international reports and it was concluded that the values of the salt samples were lower than the average values stated in the international reports. Annual effective dose values of ²²⁶Ra, ²³²Th and ⁴⁰K from ingestion of salt samples for adults are higher than average values given in the international report.

Keywords: Natural and artificial radionuclides, HpGe gamma spectrometry, Commercial salt samples

* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

¹ Akdeniz Üniversitesi, Eğitim Fakültesi, Matematik ve Fen Bilimleri Eğitimi Bölümü, Fizik Eğitimi Anabilim Dalı, 07058, Antalya, Türkiye

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Doğal ve yapay radyonüklitler sonucunda iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalınmaktadır. İyonlaştırıcı radyasyon, kozmik ışınlardan, havadan, yiyeceklerden ve binaların yapı malzemeleri gibi birçok şekilde ortaya çıkarak insanları etkilemektedir [1]. ^{238}U ve bozunum ürünleri, ^{232}Th ve bozunum ürünleri ve ^{40}K doğal radyonüklitler olup; havada, toprakta ve suda değişik seviyelerde bulunarak çevresel radyoaktivitenin temel kaynaklarını oluştururlar [2]. Toprakta bulunan doğal radyonüklitlerin bozunumu sırasında insanları etkileyecek olan gama-beta radyasyon alanı oluşur. İnsan vücudu karasal ortamda bulunan doğal radyonüklitlerden gelen radyasyona maruz kalmakta olup, bu radyonüklitler insan vücudu içinde de bulunarak çeşitli organları alfa, beta ve gama ışınları ile radyasyona maruz bırakmaktadır. Karasal radyonüklitler toprakta iz miktarda bulunur ve aktivite konsantrasyonları toprağın yapısına ve kökenine göre farklılık göstermektedir [2]. Doğal radyonüklitlerin yarı ömürleri ^{238}U ($t_{1/2}=4.468 \times 10^9$ yıl), ^{232}Th ($t_{1/2}=1.4 \times 10^{10}$ yıl), ^{40}K ($t_{1/2}=1.248 \times 10^9$ yıl) [3], Dünya'nın yaşı ile karşılaştırıldığında, bozunum ürünleri hala yeryüzünde bulunabilir [6].

Uranyum ve Toryum bozunum serisindeki bozunum ürünleri ile radyoaktif dengede olduğu varsayılmaz. ^{238}U ile ^{234}U nüklitleri daha küçük yarı ömürlü ^{234}Th ve ^{234}Pa nüklitlerine bozunumundan dolayı ^{238}U ile ^{234}U nüklitlerinin radyoaktif dengede olduğu varsayılır. Bozunum sürecinde bozunan radyonüklitlerin bazıları kaynak malzemedan çevreye yayılabilir. Bu durumda toprakta bulunan ^{238}U miktarı azalırken, nehirlerde ve denizlerde ^{234}U miktarı artar [2]. ^{238}U nüklitinin bozunum serisinde ^{234}U ($t_{1/2} \approx 246000$ yıl) ve ^{230}Th ($t_{1/2} \approx 75000$ yıl) ile radyoaktif dengeye gelme süresi çok fazla zaman gerektirmektedir çünkü bozunan bir radyoaktif seride radyoaktif dengenin yeniden sağlanabilmesi, o serinin en uzun ömürlü nüklitinin yarı ömrüne bağlı olarak değişmekte olup, bu süre yaklaşık olarak 7 yarı ömür kadardır [4]. ^{238}U bozunum serisinde gerçekte aktivite konsantrasyonu belirlenen ^{226}Ra nüklitidir. ^{226}Ra ortamda daha fazla hareketliliğe sahiptir ve ana nüklitler ^{230}Th ve Uranyumdan ayrışarak oluşabilir. ^{226}Ra nükliti, toprakta gaz halinde bulunan radon gazını toprağın dışına yayarak ^{238}U radyasyonuna maruz kalma oranını düşürür. Bu

bozunum serisindeki ^{222}Rn nüklitinin yarı ömrü yaklaşık 3.8 gün olmakla birlikte bozunum serisinde yarı ömürleri çok uzun olan ve doz değerlendirmelerinde önemli bir yere sahip olan ^{210}Pb ve ^{210}Po nüklitleri yer alır [2]. Toryum bozunum serisinin genellikle radyoaktif dengede olduğu varsayılır. ^{232}Th radyoaktif bozunum serisinde en uzun yarı ömürlü ^{228}Ra ($t_{1/2} \approx 5.75$ yıl) nüklitidir. 7 yarı ömür sonra (yaklaşık 40-50 yıl sonra) ^{232}Th ile bozunum ürünleri arasında radyoaktif denge kurulur [4].

^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{134}Cs ve ^{131}I yapay radyonüklitler olup; nükleer testler, nükleer kazalar sonucunda veya endüstri ve sağlık alanındaki çeşitli uygulamalar sonucunda kontrollü veya kontrolsüz bir şekilde çevreye yayılırlar [2, 5]. ^{137}Cs , yarı ömrü 30.08 yıl [3] olan yapay radyonüklittir ve atmosferik olaylarla çok geniş alanlara yayılma özelliğine sahiptir. ^{137}Cs yapay radyonüklitinin çevresel radyoaktivite araştırmalarında gözlenme ihtimali, 1986 yılında gerçekleşen Çernobil ve 2011 yılında gerçekleşen Fukushima-Daiichi nükleer kazaları sonrasında artmıştır [6].

Günümüzde doğal ve yapay radyonüklitlerin aktivite konsantrasyonlarını belirlemek için birçok çalışma yapılmaktadır. Yapılan çalışmalarda genellikle toprak [7, 8], kaya [9, 10], kum [11, 12, 13] ve sediment [14] örnekleri incelenmiştir. Doğal ve yapay radyonüklitlerin yiyecekler yoluyla da insanlara geçtiği göz önüne alınarak yiyecekler içinde bulunan doğal ve yapay radyonüklitlerin aktivite konsantrasyonlarını belirlemek amacıyla da çalışmalar yapılmıştır. Örneğin; bal [15], süt [5, 16], marketlerde satılan çeşitli yiyecekler [17], balık [18], gıda maddeleri (sebze, tahıl ve meyve) [19] doğal ve yapay radyonüklitlerin aktivite konsantrasyonları incelenen örneklerden bazılarıdır. Ülkemizde de doğal ve yapay radyonüklitlerin aktivite konsantrasyonlarını belirlemek amacıyla kum [20, 21], toprak [22, 23], kaya [24], sediment [25, 26], gıda maddeleri [27, 28, 29, 30] incelenmiştir.

Literatürde tuz örnekleri içindeki doğal ve yapay radyonüklitlerin aktivite konsantrasyonlarını belirlemek amacıyla yapılan çalışmalar sınırlı sayıdadır [31, 32, 33]. Eski çağlardan beri gıda maddesi olan tuz temel besin maddelerinden biri olup, doğal tuzlu sulardan (denizler, tuzlu göller ve tuzlu su kaynakları) ve kaya tuzlarından elde edilmektedir, saf tuz %60 Klor ve %40 Sodyum içerir [34]. Doğal ve yapay radyonüklitler hava,

toprak ve su gibi çeşitli yollarla doğrudan ya da dolaylı olarak insanların vücuduna geçerek insan sağlığını ve canlı ekosistemini olumsuz olarak etkilemektedir. Doğal ve yapay radyonüklitlerin gıda maddelerinde aktivite konsantrasyonlarının belirlenmesi çevresel radyoaktivitenin izlenmesi ve takip edilmesi, elde edilen sonuçların insan sağlığına etkileri üzerine analiz edilip gerekli önlemlerin alınması açısından önem arz etmektedir [35].

Bu çalışmada; bazı ticari, rafine edilmiş ve rafine edilmemiş tuz örnekleri içindeki doğal ve yapay radyonüklitlerin aktivite konsantrasyonlarının, radyum eşdeğer aktivitesinin, soğurulan doz oranının, yıllık etkin doz eşdeğerinin, ²²⁶Ra, ²³²Th ve ⁴⁰K doğal radyonüklitlerin tuz örneklerinin yetişkinlerde yıllık tüketimden gelen etkin doz değeri, iç ve dış tehlike indeksi değerlerinin belirlenmesi ve elde edilen değerlerin UNSCEAR [2] raporlarında belirtilen limit değerlerle karşılaştırılması hedeflenmektedir.

2. MATERYAL VE METHOD (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Tuz Örneklerinin Hazırlanması (Preparation of Salt Samples)

Çalışma 5 adet rafine edilmemiş (1, 2, 3, 5 ve 7 numaralı numuneler), 5 adet rafine edilmiş (4, 8, 9, 10 ve 11 numaralı numuneler) ve 1 tane bulaşık makinesi (6 numaralı numune) tuzu olmak üzere toplamda 11 adet ticari tuz örneği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Satın alınan ticari tuz örnekleri 100 ml hacminde, yaklaşık 6.1 cm çapında ve 5.3 cm yüksekliğinde plastik numune kaplarına yerleştirilmiştir. Radyum ve Toryum doğal radyonüklitlerinin bozunum ürünleri ile dengeye gelmesi için tuz örnekleri plastik kaplarda 30 gün süre ile bekletilmiştir çünkü Uranyum bozunum serisinde ²²⁶Ra nüklitinin ²²²Rn ($t_{1/2}=3.825$ gün) nükliti ile radyoaktif dengeye gelmesi için gerekli olan süre yaklaşık 10 yarı ömürdür [36].

2.2. Gama Spektrometre Sistemi (Gamma Spectrometry System)

Tuz örneklerinin içindeki doğal ve yapay radyonüklitlerin aktivite konsantrasyonlarını belirlemek amacıyla örneklerin her biri, AMATEK-ORTEC marka, ⁵⁷Co elementinin 122 keV enerjideki çözünürlüğü 768 eV, ⁶⁰Co

elementinin 1332.5 keV gama enerjisinde çözünürlüğü 1.85 keV olan %40 görelî verime sahip, n tipi HpGe detektörü kullanılarak, her bir radyonüklite ait karakteristik gama ışınları sayılmıştır. HpGe dedektörün verim kalibrasyonu numune kaplarının geometrisi ile aynı geometriye sahip, Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK), Çekmece nükleer araştırma ve eğitim merkezinden, enerji aralığı 47 keV ile 1836 keV arasında değişen 11 radyonüklit içeren sertifikalı standart kaynak (IAEA 1364-43-2) kullanılarak yapılmıştır [37]. Güvenilir sonuçlar elde edebilmek pik/doğal fon oranını azaltmak için her bir numune 50398 s sayıma bırakılmıştır. Doğal fon etkisini belirlemek için tuz örneklerinin sayımına başlamadan önde HpGe detektörün önüne boş numune kaplarından biri konularak 50398 s doğal fon ölçümü alınmıştır. Doğal fon spektrumu, her bir numuneden elde edilen spektrumdan çıkarılmıştır. Elde edilen karakteristik gama ışınlarının spektrumları MAESTRO-32 [38] isimli bilgisayar programı ile analiz edilmiştir. Her bir radyonüklit için alınan doğal fon spektrumu kullanılarak 1 kg'lık numune kütlesi alınarak, ²¹⁴Bi için 1.077 Bq/kg, ²¹⁴Pb için 0.977 Bq/kg, ²²⁸Ac için 1.125 Bq/kg, ⁴⁰K için 7.670 Bq/kg ve ¹³⁷Cs için 0.534 Bq/kg olan minimum dedekte edilebilir aktivite (MDA) konsantrasyonu değerleri Currie (1968) [39, 40] tarafından geliştirilen eşitlik-1 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$MDA = \frac{2.71 + 4.66\sigma}{t \cdot E \cdot I_{\gamma} \cdot m} \quad (1)$$

Eşitlik-1'e göre, σ standart sapma, t ölçüm yapılan toplam süre, E incelenen enerji değerindeki verim, I_{γ} gama yayınlanma olasılığı ve m kütledir.

2.3. Radyonüklitlerin Aktivite Konsantrasyonu ve Doz Seviyelerinin Hesaplanması (Calculation of Activity Concentration and Dose Levels of Radionuclides)

Tuz numuneleri içinde ²²⁶Ra, ²³²Th ve ⁴⁰K doğal radyonüklitlerin aktivite konsantrasyonları bu nüklitlerin bozunumu sırasında ortaya çıkan radyonüklitlerden yayınlanan karakteristik gama ışınları kullanılarak belirlenmiştir. ²²⁶Ra radyonüklitinin aktivite konsantrasyonunu ²¹⁴Bi (609.32 keV) ve ²¹⁴Pb (351.93 keV), ²³²Th radyonükliti için ²²⁸Ac (911.20 keV), ⁴⁰K için 1460.82 keV ve ¹³⁷Cs nükliti için 661.66 keV

enerjilerindeki gama ışınlarının sayım sayıları kullanılmıştır. ^{226}Ra nüklitinin aktivite konsantrasyonu ^{214}Bi ve ^{214}Pb nüklitlerinin ortalama değeri alınarak hesaplanmıştır. Tuz örnekleri içindeki doğal ve yapay radyonüklitlerin aktivite konsantrasyonları A (Bq/kg) eşitlik-2 kullanılarak hesaplanmıştır [20, 41].

$$A = \frac{N}{m \cdot t \cdot \varepsilon \cdot I_\gamma} \cdot f \quad (2)$$

Eşitlik 2'ye göre N incelenen radyonüklitten yayımlanan karakteristik gama ışınlarının sayısı, m (kg) tuz örneklerinin kütlesi, t (s) tuz numunelerinin sayım süresi, ε incelenen gama ışını enerji değerinin verim değeri, I_γ gama ışını yayımlama olasılığı, f ise öz soğurma düzeltme faktörüdür. Öz soğurma faktörünün hesaplanması ile ilgili detaylı bilgiler referans [42]'da yer almaktadır. Numunelerin aktivite konsantrasyonlarındaki belirsizlikler ISO-GUM [43] standartları göz önünde bulundurularak eşitlik-3 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\Delta A = A \sqrt{\left(\frac{\Delta N}{N}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t}{t}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I_\gamma}{I_\gamma}\right)^2 + \left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta f}{f}\right)^2} \quad (3)$$

Eşitlik 3'e göre; ΔN sayım sayısındaki belirsizlik, Δt sayım süresindeki belirsizlik, $\Delta \varepsilon$ verimdeki belirsizlik, ΔI_γ gama yayımlama olasılığındaki belirsizlik ve Δf öz soğurma faktöründeki belirsizliktir.

^{226}Ra ve bozunum ürünleri arasında radyoaktivite dengesizliğinden dolayı toprak örnekleri içinde doğal radyoaktif nüklitler homojen olarak dağılmamışlardır. Doğal radyonüklitlerden dolayı maruz kalınan radyasyon tahminlerinde birliktelik sağlamak amacıyla radyonüklitlerin aktivite konsantrasyonları için Radium eşdeğer aktivitesi Ra_{eq} (Bq/kg) terimi kullanılır. Radium eşdeğer aktivitesi numune içindeki farklı bulunan ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktivite konsantrasyonlarının karşılaştırılmasına olanak sağlar [44]. Radium eşdeğer aktivitesi eşitlik-4 kullanılarak hesaplanmıştır [44, 45].

$$Ra_{eq} = A_{Ra} + 1.43A_{Th} + 0.077A_K \quad (4)$$

Eşitlik 3'e göre A_{Ra} , A_{Th} ve A_K sırasıyla ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K radyonüklitlerinin aktivite konsantrasyonudur.

Soğurulan gama doz oranı D (nGy.h⁻¹), yerden 1m yükseklikteki karasal radyasyona maruz kalma sonucunda vücudun saatte soğurduğu gama doz oranıdır. Soğurulan gama doz oranı, eşitlik-5 kullanılarak hesaplanır [2, 46].

$$D = 0.462A_{Ra} + 0.604A_{Th} + 0.0417A_K \quad (5)$$

Eşitlik-5'e göre, 0.462 (nGy h⁻¹ /Bq kg⁻¹), 0.604 (nGy h⁻¹ /Bq kg⁻¹) ve 0.0417(nGy h⁻¹ /Bq kg⁻¹) katsayıları UNSCEAR [2] raporuna göre sırasıyla Uranyum, Toryum ve Potasyum radyonüklitleri için doz katsayılarıdır.

Yıllık etkin doz eşdeğeri ($AEDE$), soğurulan gama doz oranının bireyde meydana getirebileceği biyolojik etkiyi ve bir yıl boyunca alacağı radyasyon dozunu belirlemek için kullanılır. Yıllık etkin doz eşdeğeri $AEDE$ ($\mu\text{Sv/y}$), soğurulan gama doz oranının eşitlik-6'da görüldüğü gibi çeşitli katsayılarla çarpımı ile hesaplanır [2, 46].

$$AEDE \left(\frac{\mu\text{Sv}}{y}\right) = D \times 8760 \times 0.2 \times 0.7 \times 10^{-3} \quad (6)$$

Dış tehlike indeksi ($H_{dış}$), bina yapı malzemelerinde dış gama radyasyonundan dolayı kapalı alandaki radyasyon oranı belirlemek için kullanılan terimdir. Dış tehlike indeksi eşitlik -7 kullanılarak hesaplanır [9, 44, 45].

$$H_{dış} = \frac{A_U}{370} + \frac{A_{Th}}{259} + \frac{A_K}{4810} \leq 1 \quad (7)$$

İç tehlike indeksi, radon gazı ve radon gazının çok kısa yarı ömürlü ürünlerinin solunum organlarına tehlike düzeyini ve maruz kalınan iç radyasyon oranını belirlemek için kullanılan terimdir. İç tehlike indeksi eşitlik-8 ile hesaplanır [9, 45].

$$H_{iç} = \frac{A_U}{185} + \frac{A_{Th}}{259} + \frac{A_K}{4810} \leq 1 \quad (8)$$

Doğal radyonüklitlerin ölçümleri yapılan tuz örneklerinin yetişkinlerde yıllık tüketimden gelen etkin dozları ($YTED$) eşitlik-9 kullanılarak hesaplanmıştır [47, 48].

$$YTED = \sum_i A_i m C_i \quad (9)$$

Eşitlik-9'a göre, A_i (Bq/kg), tüketilen tuz numunesi içindeki radyonüklitlerin aktivite konsantrasyonu, m (kg/y), yıllık tüketilen tuz kütlesi ve C_i (Sv/Bq), doz dönüşüm katsayısıdır.

Bu çalışmada tuz örnekleri içinde bulunan doğal radyonüklitlerin yetişkinlerde yıllık tüketimden gelen etkin dozlarını hesaplamak için yıllık tüketilen tuz miktarı ortalama 18.01 g/gün [49] (6.573 kg/y) alınarak hesaplanmıştır. IAEA [50] raporuna göre ^{226}Ra için doz dönüşüm katsayısı 2.8×10^{-7} (Sv/Bq), ^{232}Th için 2.3×10^{-7} (Sv/Bq) ve ^{40}K için 6.2×10^{-9} (Sv/Bq) alınmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Tuz örnekleri içindeki ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K ve ^{137}Cs doğal ve yapay radyonüklitlerinin aktivite konsantrasyonları, soğurulan gama doz oranı (D), Radium eşdeğer aktivitesi (Ra_{eq}), yıllık etkin doz eşdeğeri (AEDE), iç tehlike indeksi ($H_{\text{iç}}$) ve dış tehlike indeksi ($H_{\text{dış}}$) değerleri Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1'e göre ^{226}Ra nüklitinin aktivite konsantrasyonu <MDA ile 9.31 ± 0.11 Bq/kg aralığında değişmektedir. ^{226}Ra nüklitinin aktivite konsantrasyonu 1 numaralı numunede minimum detekte edilebilir aktivite konsantrasyonunun altında olup, en yüksek 5 numaralı numunededir. ^{226}Ra nüklitinin ortalama aktivite konsantrasyonu 5.20 ± 0.09 Bq/kg olup, bu değer UNSCEAR [2] tarafından belirlenen ortalama değer 33 Bq/kg değerinden çok düşüktür.

1 numaralı numune rafine edilmemiş pembe Himalaya tuzu, 5 numaralı numune ise rafine edilmemiş beyaz Himalaya tuzudur. Himalaya tuzunun içeriğini belirlemeye yönelik yapılan analiz sonucuna göre, Himalaya tuzunda birçok element yer almakta olup, Potasyum miktarı 914 ppm, Radium ve Toryum miktarı 0.001 ppm değerinden daha düşük olduğu belirtilmiştir [51]. Çalışmada 1 numaralı numune içinde ^{40}K nüklitinin aktivite konsantrasyonunun yüksek olması, ^{226}Ra aktive konsantrasyonunun minimum detekte edilebilir aktivite değerinin altında olması ve ^{232}Th nüklitlerinin aktivite konsantrasyonun düşük olması Himalaya tuzunun içeriği ile ilgili yapılan elementel analiz sonuçları ile uyumludur. Pembe Himalaya tuzu rengini içeriğinde bulundurduğu demir oksitten alır [52]. 5 numaralı beyaz Himalaya tuzunda ^{232}Th nükliti gözlenmemiş olup, 1 numaralı pembe Himalaya tuzuna göre ^{40}K nükliti aktivite konsantrasyonu daha düşüktür.

^{232}Th nüklitinin aktivite konsantrasyonu 1.52 ± 0.61 Bq/kg ile 2.53 ± 0.58 Bq/kg aralığında değişmektedir. Rafine edilmemiş 2 numaralı deniz tuzunda, 3 numaralı ince göl tuzunda, 5 numaralı beyaz Himalaya tuzunda, 6 numaralı bulaşık makinesi tuzunda ve 10 numaralı rafine edilmiş iyotlu sofraya tuzunda ^{232}Th nükliti gözlenmemiştir. ^{232}Th nüklitinin aktivite konsantrasyonu değeri en düşük 4 numaralı numunede, en yüksek 11 numaralı numunededir. 4 numaralı numune rafine edilmiş kaya tuzu, 11 numaralı numune ise rafine edilmiş iyotsuz tuzdur. Rafine edilmiş olan tuz örnekleri arasında 10 numaralı iyotlu sofraya tuzu hariç tüm numunelerde ^{232}Th nükliti gözlenmiştir. ^{232}Th nüklitinin ortalama aktivite konsantrasyonu 2.04 ± 0.71 Bq/kg olup, bu değer UNSCEAR [2] tarafından belirlenen ortalama değer 45 Bq/kg değerinden çok düşüktür.

^{40}K nüklitinin aktivite konsantrasyonu 8.94 ± 5.93 Bq/kg ile 121.50 ± 12.72 Bq/kg aralığında değişmektedir. ^{40}K nüklitinin ortalama aktivite konsantrasyonu 25.77 ± 5.62 Bq/kg olup, bu değer UNSCEAR [2] tarafından belirlenen 420 Bq/kg değerinden düşüktür. ^{40}K nükliti aktivite konsantrasyonu en düşük kaya tuzundan üretilmiş iyotlu tuz olan 8 numaralı numunede, en yüksek ise rafine edilmemiş pembe Himalaya tuzu olan 1 numaralı numunededir. 6 numaralı Bulaşık makinesi numunesi içinde ^{40}K nükliti gözlenmemiştir. Rafine edilmiş veya rafine edilmemiş tüm tuz numuneleri içinde ^{40}K nükliti gözlenmiştir.

^{137}Cs yapay nükliti 9 numaralı numunede minimum detekte edilebilir aktivite değerinin altında gözlenmiş olup, diğer numunelerin hiç birinde gözlenmemiştir.

Tablo 1'de görüldüğü gibi; tuz örnekleri için soğurulan gama doz oranı (D) değerleri 2.33 nGy/h ile 6.09 nGy/h aralığında değişmekte olup, en düşük ince göl tuzu olan 3 numaralı numunede, en yüksek ise 1 numaralı pembe Himalaya tuzundadır. Soğurulan gama doz oranının ortalama değeri 3.83 nGy/h olup, bu değer UNSCEAR [2] tarafından belirtilen ortalama değer 59 nGy/h değerinden düşüktür.

Tuz örnekleri için radyum eşdeğer aktivitesi (Ra_{eq}) değerleri 4.59 Bq/kg ile 11.78 Bq/kg aralığında

değişmekte olup, en düşük ince göl tuzu olan 3 numaralı numunede, en yüksek ise 1 numaralı numune pembe Himalaya tuzunda gözlenmiştir. Radyum eşdeğer aktivitesi ortalama değeri 8.12

Bq/kg'dır. Çalışmadan elde edilen değerler NEA-OECD [53] tarafından belirlenen 370 Bq/kg değerinden düşüktür.

Tablo 1. Tuz örneklerindeki doğal ve yapay radyonüklitlerin aktivite konsantrasyonu ve doz seviyeleri (Activity concentration of natural and artificial radionuclides and dose levels in salt samples)

Örnek No	²²⁶ Ra (Bq/kg)	²³² Th (Bq/kg)	⁴⁰ K (Bq/kg)	¹³⁷ Cs (Bq/kg)	D (nGy/h)	Ra _{eq} (Bq/kg)	AEDE (μSv/y)	H _{iç}	H _{dış}
1 (RE)	<MDA	1.70±0.91	121.50±12.72	-	6.09	11.78	7.47	0.03	0.03
2 (RE)	6.09±0.11	-	11.24±6.64	-	3.28	6.96	4.03	0.04	0.02
3 (RE)	2.01±0.07	-	33.54±6.20	-	2.33	4.59	2.85	0.02	0.01
4 (R)	2.31±0.07	1.52±0.61	14.10±4.62	-	2.58	5.58	3.16	0.02	0.02
5 (RE)	9.31±0.11	-	15.24±4.30	-	4.94	10.48	6.05	0.05	0.03
6 (BM)	5.83±0.10	-	-	-	2.70	5.83	3.31	0.03	0.02
7 (RE)	6.76±0.11	1.64±0.69	14.36±5.77	-	4.72	10.22	5.78	0.05	0.03
8 (R)	7.17±0.11	2.30±0.71	8.94±5.93	-	5.07	11.15	6.22	0.05	0.03
9 (R)	3.57±0.08	2.51±0.78	10.16±5.41	<MDA	3.59	7.95	4.40	0.03	0.02
10 (R)	4.49±0.09	-	12.52±5.13	-	2.60	5.45	3.18	0.03	0.01
11 (R)	4.44±0.07	2.53±0.58	16.15±5.13	-	4.25	9.30	5.22	0.04	0.03
Ortalama	5.20±0.09	2.04±0.71	25.77±5.62	-	3.83	8.12	4.70	0.04	0.02

- Gözlenmedi, R: Rafine edilmiş, RE: Rafine edilmemiş, BM: Bulaşık Makinesi Tuzu
MDA: Minimum detekte edilebilir aktivite konsantrasyonu

Tuz örnekleri için yıllık etkin doz eş değeri (AEDE) değerleri 2.85 μSv/y ile 7.47 μSv/y aralığında değişmekte olup, en düşük ince göz tuzu 3 numaralı numune, en yüksek ise 1 numaralı pembe Himalaya tuzunda gözlenmiştir. Çalışmada tuz örnekleri için yıllık etkin doz eşdeğeri ortalama değeri 4.70 μSv/y. Bu değer UNSCEAR [2] tarafından belirtilen ortalama değer 70 μSv/y değerinden düşüktür.

Tuz örnekleri için iç tehlike indeksi değerleri 0.02 ile 0.04 aralığında değişmekte olup, ortalama değeri 0.04'tür. Dış tehlike indeksi değerleri 0.01 ile 0.03 aralığında değişmekte olup, ortalama değeri 0.02'dir. İç ve dış tehlike indeksi değerleri Beretka ve Mathew [45] tarafından belirlenen 1'den küçüktür.

Şekil 1'de, Radyum eşdeğer aktivitesi, soğurulan gama doz oranı, yıllık etkin doz eşdeğeri, iç tehlike indeksi ve dış tehlike indeksi dağılımları ve UNSCEAR [2] raporunda verilen ortalama değerler ile değişimi gösterilmiştir.

Doğal radyonüklitlerin ölçümleri yapılan tuz örneklerinin yetişkinlerde yıllık tüketimden gelen etkin dozları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2'ye göre, ²²⁶Ra nüklitinin tuz örneklerinde yıllık tüketimden gelen ortalama etkin doz değeri 9.57 mSv/y olup, bu değer UNSCEAR [2]

raporunda belirtilen Uranyum serisinin yıllık tüketiminden gelen dünya ortalaması etkin doz 0.12 mSv/y değerinden büyüktür. ²²⁶Ra nüklitinin tuz örneklerinde yıllık tüketimden gelen etkin doz değeri en düşük 3.69 mSv/y ile rafine edilmemiş ince göl tuzu olan 3 numaralı numunede, en yüksek ise 17.13 mSv/y ile 5 numaralı rafine edilmemiş beyaz Himalaya tuzunda gözlenmiştir.

²³²Th nüklitinin tuz örneklerinde yıllık tüketiminden gelen ortalama doz değeri 3.08 mSv/y olup, bu değer UNSCEAR [2] raporunda belirtilen Toryum serisinin tüketiminden gelen dünya ortalaması 0.12 mSv/y değerinden büyüktür. ²³²Th nüklitinin tuz örneklerinde yıllık tüketimden gelen etkin doz değeri en düşük 2.30 mSv/y ile rafine edilmiş kaya tuzu olan 4 numaralı numunede, en yüksek ise 3.82 mSv/y ile rafine edilmiş iyotsuz tuz olan 11 numaralı numunede gözlenmiştir.

⁴⁰K nüklitinin tuz örneklerinde yıllık tüketiminden gelen ortalama doz değeri 1.05 mSv/y olup, bu değer UNSCEAR [2] raporunda belirtilen Potasyum nüklitinin tüketiminden gelen dünya ortalaması 0.17 mSv/y değerinden büyüktür. ⁴⁰K nüklitinin tuz örneklerinin yıllık tüketiminden gelen etkin doz değeri en düşük 0.36 mSv/y ile rafine edilmiş iyotlu kaya tuzu olan 8 numaralı numunede, en yüksek ise 4.95

mSv/y ile rafine edilmemiş pembe Himalaya tuzu olan 1 numaralı numunede gözlenmiştir.

Bu çalışmada Uranyum, Toryum ve Potasyum nüklitlerinin tuz tüketiminden gelen yıllık ortalama etkin doz değeri 11.33 mSv/y olup, bu değer UNSCEAR [2] raporunda Uranyum, Toryum ve Potasyum nüklitlerinin tüketiminden gelen 0.29 mSv/y doz değerinden büyüktür. Uranyum, Toryum ve Potasyum nüklitlerinin tuz tüketiminden gelen yıllık ortalama etkin doz değeri en düşük 5.06 mSv/y ile rafine edilmemiş ince göl tuzu olan 3 numaralı numunede, en yüksek ise 17.75 mSv/y ile rafine edilmemiş beyaz Himalaya tuzu olan 5 numaralı numunede gözlenmiştir. Bu çalışmada elde edilen Uranyum, Toryum ve Potasyum nüklitlerinin tuz tüketiminden gelen yıllık ortalama etkin doz değerleri, Tahir ve Alaamer'in (2008) [47] ve Kansaana ve diğ. [33] çalışmalarından elde ettikleri ortalama etkin doz değerlerinden büyüktür.

Tablo 3'de literatürde tuz örnekleri ile yapılan çalışmaların ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K radyonüklitlerine ait aktivite konsantrasyonları gösterilmiştir.

Tablo 3'e göre, Calin ve diğerlerinin [54] 2012 yılında Romanya'da yaptıkları çalışma sonucuna göre ^{40}K nüklitinin aktivite konsantrasyonu değeri minimum dedekte edilebilir aktivite değerinin altında olup, ^{226}Ra ve ^{232}Th konsantrasyonu değerleri bu çalışmadan elde edilen ortalama değerden büyüktür. Baloch ve diğerlerinin [32] 2012 yılında Pakistan'da yaptıkları çalışmada ^{226}Ra ve ^{232}Th nüklitlerinin aktivite konsantrasyonları minimum dedekte edilebilir aktivite değerinin altında olup, ^{40}K nüklitinin aktivite konsantrasyonu bu çalışmada elde edilen ortalama değerden büyüktür. Tahir ve Alaamer'in [47] 2008 yılında yaptıkları çalışma sonucuna göre ^{226}Ra ve ^{232}Th aktivite konsantrasyonu değerleri bu çalışmadan elde edilen ortalama değerlerden küçüktür. Bu çalışmadan elde edilen ^{40}K aktivite konsantrasyonu değeri, Tahir ve Alaamer'in [47] yaptıkları çalışmadan elde ettikleri değerler aralığındadır. Ravisankar ve diğerlerinin [55] 2007 yılında Hindistan'da yaptıkları çalışma sonucuna göre, bu çalışmadan elde edilen ^{226}Ra aktivite konsantrasyonu ortalama değeri, Ravinsankar ve diğerlerinin çalışmalarında buldukları değerler aralığında olup, ^{232}Th aktivite konsantrasyonu değerleri bu çalışmadan elde edilen ortalama değerden büyüktür. El-Bahi'nin

[31] 2003 yılında Mısır'da yapmış olduğunu çalışma sonucuna göre, bu çalışmadan elde edilen ortalama ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktivite konsantrasyonu ortalama değerleri, El-Bahi'nin elde ettiği aktivite konsantrasyonu değerleri aralığındadır.

Tablo 2. ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K doğal radyonüklitlerin tuz örneklerinin yetişkinlerde yıllık tüketimden gelen etkin doz değerleri (Annual effective dose values of ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K from ingestion of salt samples for adults)

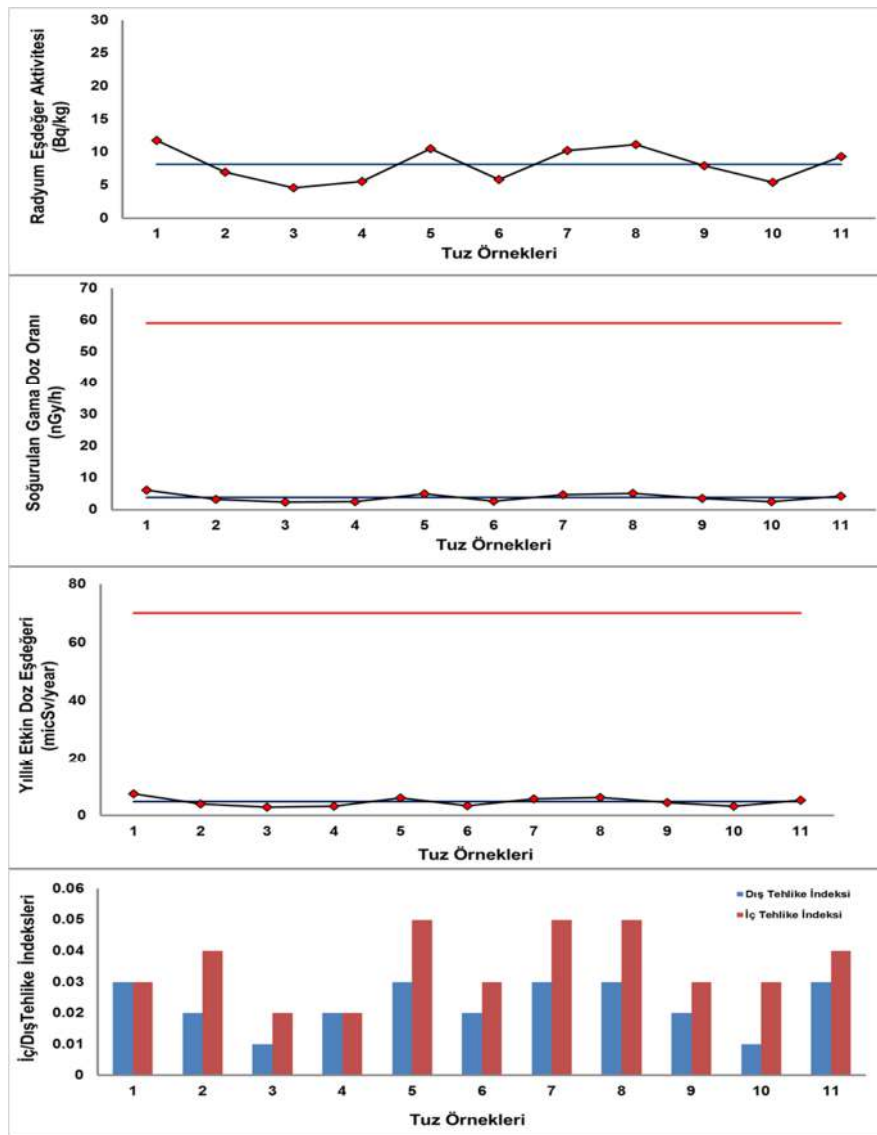
Örnek No	^{226}Ra (mSv/y)	^{232}Th (mSv/y)	^{40}K (mSv/y)	Toplam (mSv/y)
1 (RE)	-	2.57	4.95	7.52
2 (RE)	11.21	-	0.46	11.67
3 (RE)	3.69	-	1.37	5.06
4 (R)	4.26	2.30	0.57	7.14
5 (RE)	17.13	-	0.62	17.75
6 (BM)	10.74	-	-	10.74
7 (RE)	12.45	2.49	0.59	15.52
8 (R)	13.19	3.48	0.36	17.03
9 (R)	6.57	3.80	0.41	10.79
10 (R)	8.26	-	0.51	8.77
11 (R)	8.18	3.82	0.66	12.66
Ortalama	9.57	3.08	1.05	11.33

- Etkin doz değerine katkısı yok, R: Rafine edilmiş, RE: Rafine Edilmemiş, BM: Bulaşık Makinesi Tuzu

Tablo 3. Farklı çalışmalarda tuz örnekleri içindeki ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K radyonüklitlerinin aktivite konsantrasyonları (The activity concentrations of ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K radionuclides in salt samples from different studies)

^{232}Th (Bq/kg)	^{40}K (Bq/kg)	Kaynak	
13.926±3.831	28.56±2.31	<MDA	Calin ve diğ., 2012, Romanya
<MDA	<MDA	36 ± 20	Baloch ve diğ., 2012, Pakistan
1.39±0.31 (mBq/l)	2.91±0.47 (mBq/l)	37.88±3.10 (mBq/l)	Kansaana ve diğ.,2012, Ghana
500–1300 mBq/kg	400–900 mBq/kg	15000–34000 mBq/kg	Tahir ve Alaamer, 2008, Pakistan
<MDA-13.30±7.60	27.88±6.33-45.27±7.59	135.54±31.36-381.28± 39.81	Ravisankar ve diğ., 2007, Hindistan
0.46±0.02-32.6±1.6	0.20±0.01-10.5±0.5	0.42±0.02-158.6±7.9	El-Bahi, 2003, Mısır
5.20±0.09	2.04±0.71	25.77±5.62	Bu çalışma

MDA: Minimum detekte edilebilir aktivite



Şekil 1. Radyum eşdeğer aktivitesi, soğurulan gama doz oranı, yıllık etkin doz eşdeğeri, iç tehlike indeksi ve dış tehlike indeksi dağılımları (Yatay kırmızı çizgi UNSCEAR [2] ortalama değeri ve yatay mavi çizgi bu çalışmanın ortalama değerini temsil etmektedir.) (Distribution of Radium equivalent activity, absorbed gamma dose rate, annual effective dose equivalent, internal hazard index and external hazard index) (Horizontal red line and blue line symbolize average value of UNSCEAR [2] and average value of this study respectively)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada 11 adet ticari tuz örneği için ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K ve ^{137}Cs doğal ve yapay radyonüklitlerinin aktivite konsantrasyonları yüksek saflıkta germanyum (HpGe) dedektörü kullanılarak gama spektrometre sistemi ile belirlenmiştir. Tuz örneklerinde sadece 9 numaralı numunede minimum detekte edilebilir aktivite konsantrasyonun altında ^{137}Cs nükliti gözlenmiş olup, diğer numunelerin hiç birinde ^{137}Cs yapay radyonüklitine rastlanmamıştır. Sadece 6 numaralı bulaşık makinesi tuzunda ^{40}K nükliti gözlenmemiştir. ^{232}Th nükliti, 2 numaralı rafine edilmemiş deniz tuzu, 3 numaralı rafine edilmemiş ince göl tuzu, 5 numaralı rafine edilmemiş beyaz Himalaya tuzu, 6 numaralı bulaşık makinesi tuzu ve 10 numaralı rafine iyotlu tuzda gözlenmemiştir. 10 numaralı numune hariç tüm rafine edilmiş tuzlarda ^{232}Th nükliti gözlenmiştir. 6 numaralı bulaşık makinesi tuzunda sadece ^{226}Ra nüklitine ait aktivite konsantrasyonu belirlenmiş olup, ^{232}Th ve ^{40}K nüklitleri gözlenmemiştir. Tuz örneklerinin rafine edilmiş yada rafine edilemiş olmasına göre tuzun içeriğine göre radyonüklitlerin aktivite konsantrasyonunda değişmektedir. Çünkü tuzların kimyasal bileşimi coğrafi kökenlerine ve üretim yöntemlerine göre değişir ve bu durum sınıflandırmalarını sağlamaktadır [56].

Soğurulan gama doz oranı, Radium eşdeğer aktivitesi, yıllık etkin doz eşdeğeri en yüksek rafine edilmemiş pembe Himalaya tuzu olan 1 numaralı numunede, en yüksek ise rafine edilmemiş ince göl tuzu olan 3 numaralı numunede gözlenmiştir. Tuz örnekleri için soğurulan gama doz oran değerleri UNSCEAR [2, 46] raporunda belirlenen ortalama değer 59 nGy/h değerinde düşüktür, yıllık etkin doz eşdeğeri değerleri UNSCEAR [2, 46] 70 $\mu\text{Sv/y}$ değerinden küçüktür, Radium eşdeğer aktivitesi değerleri NEA-OECD [53] raporunda belirlenen ortalama 370 Bq/kg değerinden düşüktür. İç ve dış tehlike indeksi değerleri Beretka ve Mathew [45] tarafından belirlenen 1'den küçüktür. Ayrıca çalışmada ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K doğal radyonüklitlerin tuz örneklerinin yetişkinlerde yıllık tüketimden gelen etkin doz değerleri hesaplanmıştır. Uranyum, Toryum ve Potasyum nüklitlerinin tuz tüketiminden gelen yıllık ortalama değeri en düşük rafine edilmemiş ince göl tuzu olan 3 numaralı numunede, en yüksek ise rafine edilmemiş beyaz Himalaya tuzu olan 5

numaralı numunede gözlenmiştir. Uranyum, Toryum ve Potasyum nüklitlerinin tuz tüketiminden gelen yıllık ortalama etkin doz değeri UNSCEAR [2] raporunda Uranyum, Toryum ve Potasyum nüklitlerinin tüketiminden gelen 0.29 mSv/y doz değerinden büyüktür. Uranyum, Toryum ve Potasyum nüklitlerinin tuz tüketiminden gelen yıllık ortalama etkin doz değerinin yüksek çıkmasının nedeni yıllık tuz tüketimimizin çok yüksek olmasından dolayıdır [49]. Bu sonuca göre insanlar tuz tüketimi sonucunda bir radyasyona maruz kalmakta olup, insanlar tuz tüketimini azaltmalıdır.

Bu çalışmada ticari tuz örnekleri içinde bulunan ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K ve ^{137}Cs doğal ve yapay nüklitlerinin aktivite konsantrasyonları, soğurulan gama doz oranı, Radium eşdeğer aktivitesi, yıllık etkin doz eşdeğeri, tuz tüketiminden meydana gelen yıllık etkin doz değeri, iç ve dış tehlike indeksleri belirlenerek çok sık kullandığımız tuzların radyoaktivite açısından insan sağlığına zararlı olup olmadığı konusunda bilgi edinmemizi sağlamıştır. Gelecekte daha fazla tuz örneği kullanılarak yapılacak çalışmalarla daha detaylı sonuçlara ulaşılabilir ayrıca her bir tuz örneği içinde bulunan elementler çeşitli atomik ve nükleer tekniklerle elde edilerek, tuz numuneleri içinde bulunan ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K nüklitlerinin aktivite konsantrasyonlarına olan etkisini incelenebilir.

KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] M. Mohery, S. Baz, A. Kelany and A. Abdallah, "Environmental radiation levels in soil and sediment samples colled from floating water from a land runway resulting from heavy rains in the Jeddah region, KSA," Radiat.Phys.Chem., vol. 97, pp. 16-24, 2014.
- [2] UNSCEAR 2000a, "Sources and effects of ionizing radiation, UNSCEAR 2000 report to general assembly with scientific annexes Volume I: Sources," United Nations, New York, 2000.
- [3] NUDAT, "National Nuclear Data Center, Brookhaven National Laboratory," [Online]. Available: <http://www.nndc.bnl.gov/nudat2/chartNuc.jsp> p. [Accessed 19 July 2017].
- [4] P. Killeen, "Gamma-ray spectrometric methods in Uranium exploration-application

- and interpretation," Geological Survey of Canada, Economic Geology Report, vol. 31, pp. 163-299, 1979.
- [5] T. Alrefae, T. Nageawaran, A. Al-Failakawi and T. Al-Shemali, "Radioactivity of long lives gamma emitters in milk powder consumed in Kuwait and estimates of annual effective doses," Kuwait J. Sci. Eng, vol. 39, no. 1A, pp. 143-158, 2012.
- [6] UNSCEAR 2013, "Sources, effects and risks of ionizing radiation," United Nations, New York, 2014.
- [7] S. Forkapic, D. Maletic, I. Vasin, K. Bikit, D. Mrdja, I. Bikit, V. Udovicic and R. Banjanac, "Correlation analysis of the natural radionuclides in soil and indoor radon in Vojvodina, Province of Serbia," J. Environ. Radioactiv., vol. 166, pp. 403-411, 2017.
- [8] I. Guagliardi, N. Rovella, C. Apollaro, A. Bloise, R. Rosa, F. Scarciglia and G. Buttafuoco, "Modelling seasonal variations of natural radioactivity in soils: A case study in southern Italy," J. Earth. Syst. Sci., vol. 125, no. 8, pp. 1569-1578, 2016.
- [9] D. Rangaswamy, M. Srilatha, C. Ningappa, E. Srinivasa and J. Sannappa, "Measurement of natural radioactivity and radiation hazards assessment in rock samples of Ramanagara and Tumkur districts, Karnataka, India," Environ. Earth. Sci., vol. 75, no. 5, 2016.
- [10] W. Abdurabu, A. Ramli, M. Saleh, A. Heryansyah, A. Alnhary and S. Fadhl, "Terrestrial gamma dose rate, radioactivity and radiological hazards in the rocks of an elevated radiation background in Juban District, Ad Dali' Governorate, Yemen," J. Radio.Prot., vol. 36, pp. 163-177, 2016.
- [11] H. Aboelkhair and M. Zaaeimah, "Potential of natural gamma-ray spectrometry for mapping and environmental monitoring of black-sand beach deposits on the northern coast of Sinai, Egypt," Radiat. Prot. Dosimetry, vol. 154, no. 1, pp. 81-94, 2013.
- [12] P. Kessaratikoon, R. Boonkrongcheep, S. Benjakul and U. Youngchaay, "Specific activities and radioactive contour maps of natural and anthropogenic radionuclides in beach sand samples (Patong, Kamala, Kata, Karon and Nai Yang) after tsunami disaster in Phuket province, Thailand," J. Radioanal. Nucl. Chem., vol. 297, pp. 247-255, 2013.
- [13] L. Xinwei and Z. Xiaolan, "Measurement of natural radioactivity in sand samples collected from the Baoji Weihe Sands Park, China," Environ. Geol., vol. 50, pp. 977-982, 2006.
- [14] J. Wang, J. Du and Q. Bi, "Natural radioactivity assessment of surface sediments in the Yangtze Estuary," Marine Poll. Bull., vol. 114, pp. 602-608, 2017.
- [15] M. Meli, D. Desideri, C. Roselli, L. Feduzi and C. Benedetti, "Radioactivity in honey of the central Italy," Food Chemistry, vol. 202, pp. 349-355, 2016.
- [16] E. Agbalagba, H. Agbalagba and G. Avwiri, "Cost-benefit analysis approach to risk assessment of natural radioactivity in powdered and liquid milk products consumed in Nigeria," Environ. Forensics, vol. 17, no. 3, pp. 191-202, 2016.
- [17] J. Chae, T. Kim, H. Kim and J. Yun, "Estimation of annual effective dose from ingestion of ^{40}K and ^{137}Cs in foods frequently consumed in Korea," J. Radioanal. Nucl. Chem., vol. 310, pp. 1069-1075, 2016.
- [18] J. Chen, M. Rennie, B. Sadi, W. Zhang and N. St-Amant, "A study on the levels of radioactivity in fish samples from the experimental lakes area in Ontario, Canada," J. Environ. Radioactiv., vol. 153, pp. 222-230, 2016.
- [19] K. Kant, R. Gupta, R. Kumari, N. Gupta and M. Garg, "Natural radioactivity in Indian vegetation samples," Int. J. Radiat. Res., vol. 13, no. 2, pp. 143-150, 2015.
- [20] C. Eke and I. Boztosun, "Determination of activity concentration of natural and artificial radionuclides in sand samples from mediterranean coast of Antalya in Turkey," Kerntechnik, vol. 80, pp. 280-290, 2015.
- [21] Z. Korkulu and N. Ozkan, "Determination of natural radioactivity levels of beach sand samples in the belack sea coast of Kocaeli (Turkey)," Radit. Phys. Chem., vol. 88, pp. 27-31, 2013.
- [22] O. Agar, I. Boztosun, M. Korkmaz and S. Ozmen, "Measurement of radioactivity levels and assessment of radioactivity hazards of soil samples in Karaman, Turkey," Radit. Prot. Dosimetry, vol. 162, no. 4, pp. 630-637, 2014.

- [23] O. Baykara and M. Dogru, "Determination of terrestrial gamma, ^{238}U , ^{232}Th and ^{40}K in soil along fracture zones," *Radiat. Meas.*, vol. 44, pp. 116-121, 2009.
- [24] R. Keser, F. Korkmaz Gorur, I. Alp and N. Okumusoglu, "Determination of radioactivity levels and hazards of sediment and rock samples in İkizdere and Kaptanpasa Valley, Turkey," *In. J. Radiat. Res.*, vol. 11, no. 3, pp. 155-165, 2013.
- [25] P. Otansev, H. Taskin, A. Bassari and A. Varinlioglu, "Distribution and environmental impacts of heavy metals and radioactivity in sediment and seawater of the Marmara Sea," *Chemosphere*, vol. 154, pp. 266-275, 2016.
- [26] Y. Kobya, H. Taskin, C. Yesilkanat, A. Varinlioglu and S. Korcak, "Natural and artificial radioactivity assessment of dam lakes sediments in Coruh River, Turkey," *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, vol. 303, pp. 287-295, 2015.
- [27] S. Akca, O. Sogut, E. Kucukonder, S. Karatepe and M. Dogru, "Radioactivity levels in some mushroom species and consequent doses," *Asian J. Chem.*, vol. 26, no. 3, pp. 879-882, 2014.
- [28] S. Erenturk, S. Yusan, D. Turkozu, Z. Camtakan, M. Olgen, M. Aslani, S. Aytas and M. Isik, "Spatial distribution and risk assessment of radioactivity and heavy metal levels of sediment, surface water and fish samples from Lake Van, Turkey," *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, vol. 300, pp. 919-931, 2014.
- [29] O. Kilic, M. Belivermis, S. Topcuoglu and Y. Cotuk, " ^{232}Th , ^{238}U , ^{40}K , ^{137}Cs radioactivity concentrations and ^{137}Cs dose rate in Turkish market tea," *Radiat. Eff. Defect S.*, vol. 164, no. 2, pp. 138-143, 2009.
- [30] E. Ekdal, T. Karali and M. Sac, " ^{210}Po and ^{210}Pb in soils and vegetables in Kucuk Menderes basin of Turkey," *Radiat. Meas.*, vol. 41, pp. 72-77, 2006.
- [31] S. El-Bahi, "Radioactivity levels of salt for natural sediments in the northwestern desert and local markets in Egypt," *Appl. Radit. Isot.*, vol. 58, pp. 143-148, 2003.
- [32] M. Baloch, A. Qureshi, A. Waheed, M. Ali, N. Ali, M. Tufail, S. Batool, M. Akram, P. Ifrikhar, H. Qayyum, S. Manzoor and H. Khan, "A Study on Natural Radioactivity in Khewra Salt Mines, Pakistan," *J. Radiat. Res.*, cilt 53, pp. 411-421, 2012.
- [33] C. Kansaana, E. Darko, C. Schandorf, O. Adukpoo, A. Faanu, H. Lawluvi and D. Kpeglo, "Determination of natural radioactivity in Saline Water and Salt from Panbros Salt Industry Limited in the Accra Metropolis, Ghana," *international Journal of Science and Technology*, vol. 2, no. 3, pp. 107-111, 2012.
- [34] Z. Ergin, "Tuzun üretim teknolojisi ve insan sağlığındaki yeri," *Madencilik*, vol. 27, no. 1, pp. 9-30, 1988.
- [35] H. Khan, Z. Chaudhry, M. Ismail and K. Khan, "Assessment of Radionuclides, Trace Metals and Radionuclide Transfer from Soil to Food of Jhangar Valley (Pakistan) Using Gamma-Ray Spectrometry," *Water Air Soil Pollut.*, vol. 213, pp. 353-362, 2010.
- [36] G. Gilmore, *Practical gamma-ray spectrometry*, 2nd Edition, UK: John Wiley&Sons, Ltd, 2008.
- [37] S. Ozmen, I. Boztosun, M. Yavuz and M. Tunc, "Determination of gamma radioactivity levels and associated dose rates of soil samples of the Akkuyu/Mersin using high-resolution gamma-ray spectrometry," *Radit. Prot. Dosimetry*, vol. 158, no. 4, pp. 461-465, 2014.
- [38] Maestro-32, "Multichannel analyser software," Ortec, 2008. [Online]. Available: <http://www.ortec-online.com/products/application-software/maestro-mca>. [Accessed 16 03 2017].
- [39] L. Currie, "Limits for qualitative detection and quantitative determination," *Analytical Chemistry*, vol. 40, no. 3, pp. 586-593, 1968.
- [40] G. Knoll, *Radiation detection and measurement (3rd Edition)*, United States of America: John Wiley&Sons, Inc., 2000.
- [41] M. Al-Masri, M. Hasan, Y. Amin and A. Doubal, "Mass attenuation coefficients of soil and sediment samples using gamma energies from 46.5 to 1332 keV," *J. Environ. Radioactiv.*, vol. 116, pp. 28-33, 2013.
- [42] C. Eke and I. Boztosun, "Gamma-ray spectrometry for the self-attenuation correction factor of the sand samples From

- Antalya In Turkey," J. Radioanal. Nucl. Chem., vol. 301, pp. 103-108, 2014.
- [43] ISO-GUM (International Organization for Standardization-Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) , [Online]. Available: <http://www.bipm.org/en/publications/guides/gum.html>. [Accessed 22 July 2017].
- [44]A. Miah, M. Miah, M. Kamal, M. Chowdhury and M. Rahmatullah, "Natural radioactivity and associated dose rates in soil samples of Malnichera Tea Garden in Sylhet district of Bangladesh," Journal of Nuclear and Particle Physics, vol. 2, no. 6, pp. 147-152, 2012.
- [45]J. Beretka and P. Mathew, "Natural radioactivity of Australian building materials, industrial wastes and by-products," Health Phys., vol. 48, no. 1, pp. 87-95, 1985.
- [46]UNSCEAR 2000, "Sources effects and ionizing radiation, UNSCEAR 2000 report to the general assembly with scientific annexes," United Nations, New York, 2000.
- [47] S. Tahir and A. Alaamer, "Determination of natural radioactivity in rock salt and radiation doses due to its ingestion," J. Radiol. Prot., vol. 28, pp. 233-236, 2008.
- [48] I. Fatima, J. Zaidi, M. Arif and S. Tahir, "Measurement of natural radioactivity in bottled drinking water in Pakistan and consequent dose estimates," Radiat. Prot. Dosimetry., vol. 123, no. 2, pp. 234-240, 2007.
- [49] Y. Erdem, M. Arici, B. Altun, C. Turgan, S. Sindel, B. Erbay, U. Derici, O. Karatan, E. Hasanoglu and S. Caglar, "The relationship between hypertension and salt intake in Turkish population: SALTURK study," Blood Pressure, vol. 19, pp. 313-318, 2010.
- [50]IAEA (International Atomic Energy Agency), "Radiation protection and safety of radiation sources: International basic safety standards. Interim edition. General safety requirements," International Atomic Energy Agency, Vienna, 2011.
- [51] Certificate of Analysis of Himalayan Crystal Salt, [Online]. Available: <http://smartchoicesalt.com/chemical-analysis.pdf>. [Accessed 24 July 2017].
- [52] S. Sims, "Is Himalayan pink rock salt worth its salt?," Mineral Minutes, vol. 72, no. 8, pp. 9-10, 2013.
- [53]NEA-OECD (Nuclear Energy Agency-Organisation for economic co-operation and development), "Exposure to natural radioactivity in building materials," Report by NEA group of experts of the nuclear energy agency, Fransa, 1979.
- [54] M. Calin, M. Calin, G. Simionca and O. Mera, "Indoor radon levels and natural radioactivity in Turda salt mine, Romania," J. Radioanal. Nucl. Chem. , vol. 292, pp. 193-201, 2012.
- [55] R. Ravisankar, A. Rajalakshmi, P. Eswaran, V. Gajendiran and V. Meenakshisundram, "Radioactivity levels in soil of salt field area, Kelambakkam, Tamilnadu, India," Nuclear Science and Techniques, vol. 18, no. 6, pp. 372-373, 2007.
- [56] Z. Papp, "Morphological and microchemical characterization of Himalayan salt samples," Academia Romana, vol. 61, no. 3, pp. 169-174, 2016.