

GAMA SPEKTROMETRESİ İLE ÇEVRESEL ÖRNEKLERDE ^{238}U ve ^{235}U RADYONÜKLİTLERİN AKTİVİTELERİNİN DOĞRUDAN ÖLÇÜLMESİNDE KULLANILAN BAZI FOTOPİKLERİN YAYINLANMA OLASILIKLARININ BELİRLENMESİ

Ş. Turhan, S. Boran*, H. Yücel, H. Demirel, A. Parmaksız,
İ. T. Çakır, İ. Yurtseven, H. Karadeniz ve A. Kaşkaş*

Ankara Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi 06100 Beşevler-ANKARA
*A. Ü. Fen Fak. Fizik Böl. 06100 Beşevler-ANKARA

ÖZET

Çevresel örneklerde (özellikle içme, atık, yüzey ve yer altı sularında) ve gıda ürünlerinde, ^{238}U ve ^{235}U radyonüklitlerin aktivite derişimlerinin belirlenmesi, insan sağlığına mümkün radyolojik risk ve biyolojik zarar açısından çok önemlidir.

Bu çalışmada, öncelikle çevresel sıvı örneklerde ^{238}U ve ^{235}U 'un özgün aktivitelerinin gama spektrometresi ile doğrudan ölçülmesinde kullanmak üzere yüksek saflıklı germanyum dedektörü (HpGe) için 120 keV-1500 keV enerji aralığındaki mutlak verim kalibrasyonu, ^{152}Eu standart sıvı (ampul) gama kaynağı kullanılarak belirlendi. ^{238}U 'un, ^{234}Th ile dengede olduğu durumda, yakın ürün radyonüklidi olan $^{234\text{m}}\text{Pa}$ 'un 1001,03 keV enerjili ve ^{235}U 'un ise kendi yayınladığı 143,76 keV enerjili fotopiklerinin mutlak yayınlanma olasılıkları (gama şiddetleri) ile ilgili gama spektrometrik ölçmeler, doğal sıvı uranyum standart (ampul) kullanılarak yapıldı.

Gama yayınlanma olasılık değerleri; 143,76 keV enerjili fotopik için $0,10987 \pm 0,00261$ ve 1001,03 keV enerjili fotopik için $0,00878 \pm 0,00029$ olarak bulundu. Değerlerin, literatürde verilenler ile uyumlu olduğu görüldü.

Anahtar Kelimeler: Gama yayınlanma olasılıkları, Aktivite derişimi, Gama spektrometresi, Mutlak verim kalibrasyonu, Kalıcı Denge.

1. GİRİŞ

Çevredeki radyoaktivitenin en önemli kaynakları; uranyum-radyum (^{238}U - ^{226}Ra), toryum (^{232}Th), aktinyum (^{235}U) doğal radyoaktif seriler ve bu serilerin dışında doğal olarak var olan ^{40}K , vb. radyonüklitlerdir. Uranyum-radyum doğal radyoaktif serisinin ana radyonükliti olan ^{238}U (% 99,2745 ^{238}U , % 0,7200 ^{235}U ve % 0,0055 ^{234}U)'un yarılanma süresi; $4,468 \times 10^9$ yıl, özgün aktivitesi; $0,33 \mu\text{Ci/gr}$ ve derişimi, yeryüzü kabuğunda ortalama $2,7 \text{ mg/kg}$ dır [1]. Ancak ^{238}U derişimi, kayaların çeşidine bağlı olduğundan bölgeden bölgeye değişmektedir. Özellikle fosfat ve granit uranyum açısından zengindir.

Su, toprak, kaya vb. çevresel örneklerde ve gıdalarda mevcut olan değişik radyonüklitlerin bilinmesi ve aktivite derişimlerinin belirlenmesi, hem sağlık fiziği hem de yer bilimi araştırmalarında önemli rol oynar. Toplum bireylerinin maruz kaldıkları radyasyon dozları, radyoaktivitesi normal düzeyin üzerinde olan yapı malzemelerinin kullanıldığı (çimento, kum, çakıl, alçı, tuğla, kiremit, mermer, yan ürün olarak uçucu kül, vb.) meskenlerde yaşamaları halinde artabilir. Yüzey suları ve özellikle yer altı suları, yeryüzü kabuğundaki

radyonüklitlerin geçişinde ve dağılımında önemli bir rol oynadığından, sulardaki radyonüklitlerin aktivite derişimlerinin rutin olarak belirlenmesi, terk edilmiş uranyum maden ocaklarının ıslah çalışmalarının izlenmesi için en önemli konulardan biridir.

Çevresel örneklerdeki doğal radyoaktif serilere ait alfa yayınlayıcı radyonüklitlerin belirlenmesi için bir çok radyoanalitik yöntem (veya teknikler) kullanılmaktadır. Bunlardan en yaygın olanları; 1) gama spektrometresi ile doğrudan gama ışının ölçülmesi [2-15], 2) kimyasal ayırma işleminden sonra gama spektrometresi ile gama ışınlarının ölçülmesi [15], 3) alfa spektrometresi ile alfa ışınlarının ölçülmesi [16], 4) sıvı sintilasyon sayımı [17] ve 5) orantılı sayaçlar ile α - β toplam sayımı gibi tekniklerdir [17]. Sintilasyon (NaI(Tl) dedektörü; verimi yüksek, çözme gücü düşük) ve yarı iletken (yüksek saflıklı germanyum dedektörü, HpGe; verimi düşük, çözme gücü yüksek) dedektörlerin kullanıldığı gama spektrometrik yöntem, radyokimyasal ayırma işlemlerine gerek duyulmadan doğrudan, tahribatsız, hızlı ve radyonüklitleri aynı anda ölçme imkânı sağlamaktadır.

^{235}U 'un aktivite derişimi, gama spektrometresi ile kendi yayınladığı 143,76 keV, 163,33 keV, 185,71

keV ve 205,31 keV enerjili gamalardan doğrudan ölçülebildiği halde, ^{238}U 'un aktivite derişimini, kendi yayınladığı, gama şiddetleri çok düşük olan 49,55 keV (% 0,070) ve 113,5 keV (% 0,064) enerjili gamalar kullanarak doğrudan ölçmek oldukça zordur. ^{238}U 'un aktivite derişiminin ölçülmesi için ^{238}U 'un, bozunum zincirindeki ürün radyonüklitleri ile kalıcı (seküler) dengede olduğunda, gama yayınlayan herhangi bir radyonükliti kullanılabilir. Bu çalışmada, ^{238}U ve ^{235}U 'un aktivite derişimlerinin belirlenmesinde kullanılan "temiz analitik pikler", geniş bir literatür araştırmasından sonra tespit edilmiştir. "Temiz analitik pik", analiz edilecek örneklerde var olabilen uranyum-radyum bozunum zincirine veya diğer doğal radyoaktif serilere ait radyonüklitlerin yayınladıkları gamaların katkısının olmadığı (veya çok az olduğu) ve bunlar ile girişimde bulunmayan (ayrıca pikleri birbirinden ayırma işlemi gerektirmeyen) pik anlamına gelmektedir.

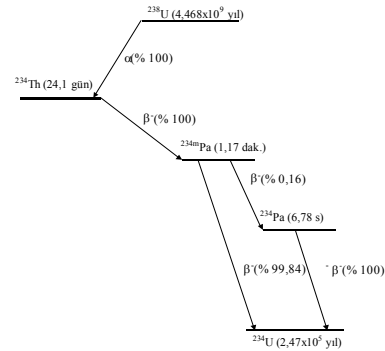
Dedektörün mutlak verimi veya tüm enerji üzerinden fotopik verimi; kaynak-dedektör mesafesine ve kaynağın geometrisine bağlı olarak yarılanma süreleri, aktiviteleri ve gama yayınlanma olasılıkları kesin olarak bilinen, farklı geometrilere (nokta, ampul, çeşitli hacimlerdeki Marinelli kabı) katı veya sıvı standart kaynaklar kullanılarak istenilen enerji aralığında, gama enerjilerinin bir işlevi olarak doğrudan deneysel ölçmeler sonucunda belirlenir. Mutlak verimin deneysel olarak belirlenmesi daha kolaydır ve hesaplamalardan elde edilenlere göre daha doğrudur [18]. Bu çalışmada, hem çevresel sıvı örneklerdeki ^{238}U ve ^{235}U özgün aktiviteilerinin doğrudan ölçülmesinde hem de söz konusu fotopiklerin gama yayınlanma olasılıklarının belirlenmesinde kullanılacak mutlak dedektör verim kalibrasyonu; sertifikalı sıvı ^{152}Eu radyoaktif standart kaynağı (ampul) kullanılarak yapılmıştır.

^{238}U ve ^{235}U doğal radyoaktif zincirindeki radyonüklitlerin özgün derişimlerini ölçebilmek için nükleer bozunum verisi olan gama yayınlanma olasılıklarının daha kesin olarak bilinmesi gerekmektedir. Bu olasılıkların ölçülmesi ile ilgili çalışmalar, gelişen dedektör teknolojisine ve ölçme tekniklerine paralel olarak daha doğru ve kesin (belirsizlikleri daha küçük) veriler elde etmek üzere gittikçe artan bir hızda devam etmektedir. Ancak literatürde özellikle 1001,03 keV ile ilgili yayınlanan veriler farklıdır veya tam değildir [19-29]. Bu farklılıklar, hem örnek hazırlanması hem de elde edilen dedektör veriminden kaynaklanabilen belirsizlikler ile ilgilidir.

2. KALICI (SEKÜLER) DENGESİ

^{238}U 'un, bozunum zincirindeki radyonüklitler ile kalıcı denge şartını iki durumda incelemek mümkündür. Birinci durumda, uranyum-radyum doğal radyoaktif serisinin ana nüklidi ^{238}U ($4,468 \times 10^9$ yıl), kendisine göre yarılanma süresi çok kısa olan en yakın üç ürün çekirdeği ^{234}Th (24,1 gün), $^{234\text{m}}\text{Pa}$ (1,17 dakika) ve ^{234}Pa (6,78 saat) ile kalıcı dengede olmalıdır. ^{238}U ile ^{234}Th arasında kalıcı dengenin oluşabilmesi için en az 6-7 yarılanma süresinin (168 gün) geçmesi gerekmektedir. ^{234}Th , beta bozunumundan (β) sonra yarılanma süresi çok kısa (1,17 dakika) olan $^{234\text{m}}\text{Pa}$ dönüşür. Bu radyonüklit de çok kısa bir süre sonra ^{234}Th ile kalıcı dengeye ulaşır (Şekil 1).

İkinci durumda ise, ^{238}U 'un, bozunum zincirindeki uzak ürün radyonüklitleri ^{214}Pb , ^{214}Bi , vb. ile dengede olması gerekmektedir. Bunun için ^{226}Ra 'un ürün çekirdeği olan ^{222}Rn asal gazının, özellikle kazılardan dolayı yapı malzemelerinde kullanılan kum, çakıl, vb. çevresel örneklerde kaçma olasılığı çok yüksek olduğundan, ^{226}Ra (1620 yıl)'un, kendisine göre yarılanma süresi çok kısa olan ^{222}Rn (3,8 gün) ile kalıcı denge olması gerekir. Analiz edilecek çevresel örnekler, bu kalıcı dengenin sağlanabilmesi için sızdırmaz bir kap içinde (^{222}Rn gazının kaçma olasılığına karşı) en az 3-4 hafta bekletilmelidir.



Şekil 1 $^{238}\text{U} \rightarrow ^{234}\text{Th} \rightarrow ^{234\text{m}}\text{Pa} \rightarrow ^{234}\text{U}$ bozunum zinciri

3. ^{238}U VE ^{235}U RADYONÜKLİTLERİNİN AKTİVİTELERİNİN ÖLÇÜLMESİNDE KULLANILAN GAMA FOTOPİKLERİN SEÇİMİ

^{238}U 'un aktivitesini, kendisinin 4,198 MeV ve 4,151 MeV enerjili alfa bozunumlarından sonra ürün çekirdeği olan ^{234}Th dönüşürken yayınladığı, şiddeti çok düşük % 0,0102 ve % 0,064 olan 113,5 keV ve 49,55 keV enerjili gamalar kullanılarak ölçmek oldukça zordur. Ancak aktivite ölçümü için ^{238}U 'un, bozunum zincirindeki ürün radyonüklitleri ile kalıcı

dengede olması şartı ile, gama yayınlayan herhangi bir ürün çekirdeği kullanılabilir. ^{238}U 'un derişiminin belirlenmesi için, ^{238}U 'un en yakın üç radyonüklidine ait, ^{234}Th 'un, β^- bozunumundan sonra $^{234\text{m},234}\text{Pa}$ 'a dönüşürken yayınladığı 63,29 keV ve 93,00 keV enerjili gamalar [30-31] ile $^{234\text{m}}\text{Pa}$ 'un, β^- bozunumundan sonra ^{234}U 'a dönüşürken yayınladığı 1001,03 keV enerjili gama fotopikleri [13, 22, 32-33] kullanılabilir. Ancak Çizelge 1'den görüleceği gibi ^{234}Th 'un 63,29 keV enerjili gama fotonuna, 63,86 keV (^{231}Th), 63,90 keV (^{232}Th), 62,90 keV (^{234}Th), 62,70 keV ($^{234\text{m}}\text{Pa}$) ve 64,37 keV (^{235}U) enerjili fotopiklerden katkılar gelmektedir. ^{234}Th 'un 93,00 keV enerjili gama fotopiki ise ^{234}Th 'un 92,38 keV ve 92,80 keV enerjili iki gama fotopikinin birbirlerine olan girişiminden dolayı çift pik olmasının yanında 93,02 keV (^{231}Th) enerjili fotopikten de katkıları içerir. Bundan dolayı, bu piklerin analitik amaçlar için kullanımında problemler ortaya çıkarabilir.

$^{234\text{m}}\text{Pa}$ 'a ait gama yayınlanma şiddetleri düşük olan 258,26 keV ve 766,36 keV enerjili fotopiklerinin hem gama şiddetleri düşüktür hem de 257,20 keV (^{234}Pa) ve 766,40 keV (^{234}Pa) enerjili fotopiklerden katkılar içerirler. $^{234\text{m}}\text{Pa}$ 'un 1001,03 keV enerjili gama fotopikine, hiç bir katkı olmadığı gibi yüksek enerji bölgesinde de diğer pikler ile girişimde bulunması söz konusu değildir. Ayrıca, yüksek enerjisinden dolayı, 1001,03 keV enerjili gama fotopiki için öz soğurma düzeltmesi yapmaya da gerek yoktur. Son yıllarda, temiz analitik pik olan 1001,03 keV enerjili bu fotopikin, çevresel örneklerdeki ^{238}U 'un gama spektrometrik analizleri için kullanımı (çevresel örnekler yüksek derecede toryum içerse bile), kristal hacmi daha büyük yüksek saflıklı germanyum dedektörlerinin geliştirilmesi ile gittikçe yaygınlaşmaktadır.

^{238}U 'un derişimini, gama yayınlayan uzak ürün radyonüklitlerin aktivite derişiminden bulmak için ^{226}Ra ile ürün çekirdeklerin dengede olması şarttır. Bu dengenin sağlanması durumunda, ^{238}U 'un derişim için ^{214}Pb 'ye ait 295,207 keV ve 351,925 keV enerjili fotopikler ile ^{214}Bi ait 609,318 keV, 1120,285, 1764,515 keV enerjili fotopikler kullanılabilir. Doğal sistemlerdeki bu denge durumu, ^{222}Rn gazının kaçması ihtimalinin yüksek olmasından dolayı bozulabildiğinden, bu fotopiklerin aktivite derişimlerinden ^{238}U 'un aktivite derişiminin belirlenmesi yanlış sonuç verebilir.

^{235}U 'un aktivite derişimi için yaygın olarak kullanılan, ^{235}U 'un alfa bozunumundan sonra ^{231}Th 'a dönüşürken yayınladığı gama fotopikleri içinde gama yayınlanma olasılığı en yüksek olan 185,72 keV enerjili fotopike, 186,21 keV (^{226}Ra), 183,50 keV, 188,76 keV (^{231}Th), 186,05 keV (^{230}Th), 184,7 keV ve 186,15 keV ($^{234\text{m},234}\text{Pa}$) fotopikleri katkıda bulunmaktadır. ^{235}U derişiminde, kullanılacak temiz analitik pik olarak gama şiddetleri 185,72 keV' göre düşük olan ancak girişim ve katkıların az olduğu ^{235}U 'un 143,76 keV ve 205,3 keV enerjili diğer fotopikleri kullanılabilir.

4. ÖLÇME İŞLEMLERİ

Gama spektrometrik ölçme işlemleri, Canberra tarafından üretilen, bağıl verimi % 12,4 (25 cm kaynak-dedektör mesafesinde, 7,62 cm x 7,62 cm NaI(Tl) sintilasyon dedektör verimine göre), ayırma gücü 1,96 keV (^{60}Co 'ın 1332,5 keV enerjili fotopikinin yarı maksimumdaki tam genişliği), pik-Compton oranı 42,1:1, kapalı uçlu, koaksiyal, dikey geometri ve 57 cm³ kristal hacime sahip p-tipi yüksek saflıklı Ge dedektörü ile yapılmıştır. Dedektör, çevreden gelen doğal fon (background) radyasyonunu en aza indirmek için, 32 mm kalınlıklı demir iskelet içine yerleştirilen 100 mm kalınlığındaki kurşun (Pb) ile zırhlanmıştır. Bu zırhın iç tarafı, Pb'den kaynaklanan X-ışınları için 1 mm kalınlığındaki Cu ve Cd levhalar ile kaplanmıştır.

Dedektörün verim kalibrasyonu ve ^{238}U , ^{235}U 'in söz konusu gama fotopiklerinin yayınlanma olasılıklarının ölçümü için 5 mL hacimli sızdırmaz cam ampuller içindeki NIST tarafından izlenebilen, sertifikalı sıvı standart ^{152}Eu ve toplam aktivitesi 2600 Bq olan (242 Bq/g ^{238}U , 11,14 Bq/g ^{235}U ve 233,1 Bq/g ^{234}U) doğal sıvı uranyum radyoaktif kaynakları kullanılmıştır. 120 keV-1500 keV enerji aralığındaki tam enerji fotopik verimi, ^{152}Eu standart kaynağı, dedektör ile eş eksenli olarak, 10 cm kaynak-dedektör mesafesine yerleştirilerek ölçülmüştür. İyi bir sayım istatistiği elde etmek için standart kaynak ile yapılan ölçme işlemi, 4500 sn-5000 sn zaman aralığında dört kez tekrar edilmiştir. Ortalama verim değerleri, enerjinin bir işlevi olarak grafiğe geçirilmiş (Şekil 2) ve yayınlanma olasılıkları hesaplanacak fotopiklerin enerjilerine karşılık gelen verimleri elde etmek üzere bu çalışma için en uygun olan işleve uyarlanmıştır (fit edilmiştir).

Çizelge 1 Çevresel örneklerdeki ^{238}U ve ^{235}U analizi ile kullanılan fotopikler (ait oldukları radyonüklitler) ve bu piklere girişimde ve katkıda bulunabilen diğer fotopikler (ait oldukları radyonüklitler).

Kullanılan analitik fotopikler		Girişim ve katkıda bulunan fotopikler	
Radyonüklitler	Enerji (keV) ve gama şiddeti (%)	Radyonüklitler	Enerji (keV) ve gama şiddeti (%)
^{238}U 'un yakın ürünleri ^{234}Th	63,29 (4,84)	$^{234\text{m}}\text{Pa}$ ^{231}Th ^{232}Th ^{234}Th ^{235}U ^{231}Th	62,70 ($1,2 \times 10^{-3}$) 63,86 (0,023) 63,9 (0,255) 62,9 (0,018) 64,37 (0,01) 93,02 (0,045)
^{234}Th	92,38 (2,81) 92,80 (2,77)	^{234}Pa ^{234}Pa	257,2 (0,05) 766,4 (0,07)
$^{234\text{m}}\text{Pa}$	258,26 (0,0728) 766,36 (0,294) 1001,03		
^{238}U 'un uzak ürünleri ^{214}Pb	295,207 (18,2) 351,925 (35,1)		
^{214}Bi	609,318 (44,6) 1120,285 (14,7) 1764,515 (15,1)		
^{235}U	143,76 163,33 (5,08) 185,72 (57,2) 202,11 (1,08) 205,31 (5,01)	^{230}Th ^{234}Pa ^{231}Th ^{234}Pa ^{226}Ra ^{231}Th ^{230}Th ^{231}Th $^{234\text{m}}\text{Pa}$ ^{234}Pa $^{234\text{m}}\text{Pa}$ ^{234}Pa ^{230}Th	143,87 (0,0488) 143,78 (0,32) 163,10 (0,155) 164,94 (0,054) 186,21 (3,51) 183,5 (0,0329) 186,05 ($8,8 \times 10^{-3}$) 188,76 ($3,2 \times 10^{-3}$) 184,7 ($1,7 \times 10^{-3}$) 186,15 (1,76) 203,12 ($1,02 \times 10^{-3}$) 203,12 (1,23) 205,1 ($5,2 \times 10^{-6}$)

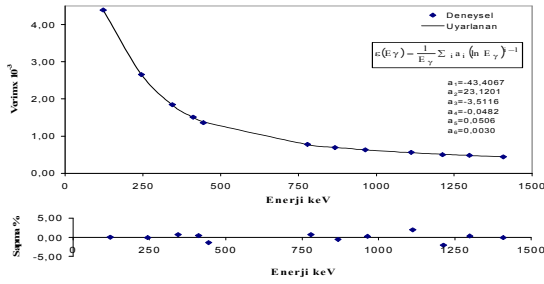
143,76 keV ve 1001,03 keV enerjili fotopiklerin yayınlanma olasılıkları ile ilgili ölçmeler, doğal uranyum standart kaynağı, ^{152}Eu standart kaynağı ile aynı mesafede ve konumda, iyi bir sayım istatistiği için 250000 sn ile 945000 sn arasındaki sayım zamanlarında dört kez tekrar edilmiştir. Doğal uranyum standart kaynağının aktivitesi çok düşük olduğu için sayım zamanları uzun tutulmuştur. Yayınlanma olasılıkları ve belirsizlik,

$$P_{\gamma}(E) = \frac{n}{t \cdot \varepsilon(E_{\gamma})} \quad \text{ve} \quad \frac{\Delta P_{\gamma}}{P_{\gamma}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta A}{A}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{\Delta n}{n}\right)^2}$$

denklemleri kullanılarak hesaplanmıştır. Burada, n ve Δn ; E enerjili fotopikinin altındaki net alan ve belirsizliği (dört ölçmenin ortalaması olarak, 143,76 keV için $25396,5 \pm 595$ ve 1001,03 keV için 6575 ± 251 olarak hesaplanmıştır, belirsizlikler $1,65 \sigma$ 'da alınmıştır), t; sayım zamanı, $\varepsilon(E_{\gamma})$ ve $\Delta \varepsilon$;

ilgili E enerjisindeki gama fotopikinin mutlak verimi ve belirsizliği (143,76 keV enerjili fotopik için $0,00413457 \pm 0,0000118$ ve 1001,03 keV için $0,00060868 \pm 0,00000174$), A ve ΔA ; aktivite ve belirsizliğidir (^{238}U için $1272,44 \pm 3,82$ ve ^{235}U için $58,57 \pm 0,18$, belirsizlikler 1σ 'da alınmıştır).

Sonuç olarak fotopiklerin yayınlanma olasılıkları ve belirsizlikleri; 143,76 keV enerjili fotopik için $0,10987 \pm 0,00261$ ve 1001,03 keV için $0,00878 \pm 0,00029$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 2 HpGe dedektörünün 120-1500 keV enerji aralığındaki verim kallibrasyonu.

5. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada kullanılan doğal uranyum standart kaynaktan ^{226}Ra özütlenerek çıkarıldığı için ^{238}U , uzak ürünleri ile dengede değildir ve ^{238}U 'un uzak ürünlerinden ölçülen ^{238}U aktivitesinin, yakın ürünü olan $^{234\text{m}}\text{Pa}$ 'un 1001,03 keV enerjili fotopikten ölçülen ^{238}U aktivitesine oranı Çizelge 2'de verilmiştir. Çizelgedeki veriler, kalıcı denge sağlanmadığında, ^{238}U 'un aktivite derişim için uzak ürün radyonüklitleri kullanmanın ne kadar hatalı sonuçlar vereceğini göstermektedir. Bu durumlarda, ^{238}U 'un aktivite derişimini ölçmenin en doğru yolu, 1001,03 keV enerjili fotopiki kullanmaktır.

Son zamanlarda, çevresel örneklerdeki ^{238}U 'un özgün aktivitesinin ölçülmesinde ve özellikle doğal, tüketilmiş ve zenginleştirilmiş uranyum arasındaki farkların ortaya çıkarılmasında, temiz analitik pik olarak kabul edilen $^{234\text{m}}\text{Pa}$ 'un 1001,03 keV enerjili fotopikin kullanımı, ilginç problemlerden biri durumuna gelmiştir. Ancak bu fotopikin yayınlanma olasılıkları ile ilgili tutarsızlıklar vardır. Çizelge 3'den de görüleceği gibi daha önceki değerlendirmelerde, $0,0059 \pm 0,00010$ değeri alınırken [29] son yapılan çalışmalarda yeni tavsiye edilen değer $0,00835 \pm 0,00011$ [21] olarak kabul edilmiştir. Bu çalışmada, 1001,03 keV enerjili fotopik için ölçülen $0,00878 \pm 0,00029$ değeri, Yücel ve ark. bulduğu $0,00861 \pm 0,00015$ [19] değeri ile

Anilkumar ve ark. buldukları değere $0,0092 \pm 0,0002$ [20] yakın bir değerdir. Bu üç değerde tavsiye edilen değerden büyüktür. Bu çalışma da 1001,03 enerjili fotopikin yayınlanma olasılığı değerinin, tekrar gözden geçirilmesi gerekliliğini göstermiştir.

^{235}U 'un 143,76 keV enerjili fotopiki için ölçülen $0,10987 \pm 0,00261$ değeri literatürde verilen $0,1096 \pm 0,0008$ değeri ile uyumludur [18, 33].

Çizelge 2 Doğal uranyum standardı için ^{238}U 'un uzak ürünleri ile dengede olup olmadığının testi

Radyonüklitler	Fotopik enerjileri, keV	Aktivite oranları
$^{214}\text{Pb}/^{234\text{m}}\text{Pa}$	295,207/1001,03	0,0067
$^{214}\text{Pb}/^{234\text{m}}\text{Pa}$	351,925/1001,03	0,0093
$^{214}\text{Bi}/^{234\text{m}}\text{Pa}$	609,318/1001,03	0,0163
$^{214}\text{Bi}/^{234\text{m}}\text{Pa}$	1120,285/1001,03	0,0342
$^{214}\text{Bi}/^{234\text{m}}\text{Pa}$	1764,515/1001,03	0,0646

Çizelge 3 $^{234\text{m}}\text{Pa}$ 'un 1001,03 keV enerjili fotopikinin yayınlanma olasılığı ile ilgili yapılan çalışmalar ve sonuçları

Çalışmanın yapıldığı yıl	P_γ (%) ve belirsizliği	Referans
2003 (Deneysel)	$0,878 \pm 0,029$	Bu çalışma
2002 (Deneysel)	$0,861 \pm 0,015$	[19]
1999 (Deneysel)	$0,92 \pm 0,02$	[20]
1999 (Değerlendirme)	$0,835 \pm 0,004$	[21]
1998 (Değerlendirme)	$0,835 \pm 0,011$	[22]
1992 (Deneysel)	$0,839 \pm 0,005$	[23]
1990 (Deneysel)	$0,839 \pm 0,005$	[24]
1986 (Deneysel)	$0,834 \pm 0,007$	[25]
1986 (Değerlendirme)	0,65	[26]
1982 (Deneysel)	0,92	[27]
1971 (Deneysel)	$0,828 \pm 0,008$	[28]
1963 (Deneysel)	$0,59 \pm 0,10$	[29]

KAYNAKÇA

- [1]- Padam, S., Rana, N., Azaam, A., Naqvi, A., Srivastava, D., 1996. Levels of uranium in waters from some Indian cities determined by fission track analysis. Radiation Measurements, 26 (5), 683-687.
- [2]- El-Bahi, S. M., 2003. Radioactivity levels of salt for natural sediments in the northwestern desert and local markets in Egypt. Applied Radiation and Isotopes, 58,143-148.
- [3]- Croft, S., Hutchinson, I. G., 1999. The measurement of U, Th and K concentrations in building materials. Applied Radiation and Isotopes, 51,483-492.
- [4]- Johnston, A., Martin, P., 1997. Rapid analysis of Ra in waters by γ -ray spectrometry. Applied Radiation and Isotopes, 48 (5), 631.
- [5]- Kohler, M., Niese, S., Gleisberg, B., Jenk, U., Nindel, K., 2000. Simultaneous determination of Ra and Th nuclides, ^{238}U and ^{227}Ac in uranium mining waters by γ -ray spectrometry. Applied Radiation and Isotopes, 52, 717-723.
- [6]- Khatibeh, A. J. A. H, Ahmad, N., Matiullah and Kenawy, M. A., 1997. Natural Radioactivity in marble stones-Jordan. Radiation Measurements, Vol-28, No.1-6, 345-348.

- [7]- Iqbal, M., Tufail, M., Mira, M., 2000. Measurement of natural radioactivity in marble found in Pakistan using a Na I(Tl) gamma-ray spectrometer. *Journal of Environmental Radioactivity*, 51, 255-265.
- [8]- Alam, M. N., Chowdhury, M. I., Kamal, M., Ghose, S., Islam, M. N., Mustafa, M. N., Miah, M. M. H., Ansary, M. M., 1999. The ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K activities in beach and minerals and beach soils of Cox's Bazar, Bangladesh. *Journal of Environmental Radioactivity*, 46, 243-250.
- [9]- Kumar, V., Ramachandran, T. V., Prasad, R., 1999. Natural radioactivity of Indian building materials and by-products. *Applied Radiation and Isotopes*, 51, 93-96.
- [10]- Coles, D. G., Ragaini, R. C., Ondov, J. M. 1978. Behaviour of natural radionuclides in western coal-fired power plants. *Environ. Sci. Technol.*, 12, 442.
- [11]- Jojo, P. J., Rawat, A., Kumar, A., Prasad, R., 1994. Trace uranium analysis in Indian coal samples. *Nucl. Geophys.*, 7, 445.
- [12]- Köhler, M., Preuße, B., Gleisberg, I., Schöfer, I., Heinrich, T., Krobos, B., 2002. Comparison of methods for the analysis of ^{226}Ra in water samples. *Applied Radiation and Isotopes*, 56, 387-392.
- [13]- Yücel, H., Çetiner, A., Demirel, H., 1998. Use of the 1001 keV peak of $^{234\text{m}}\text{Pa}$ daughter of ^{238}U in measurement of uranium concentration by HpGe gamma-ray spectrometry. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A*, 413, 74-82.
- [14]- Holtzman, R.B., Jiang, Huixia, 1989. Simultaneous determination of ^{224}Ra , ^{226}Ra , ^{228}Ra in large volumes of well waters. *Health Phys.*, 57(1), 167.
- [15]- Kahn, B., Rasson, R., Contrell, J., 1990. Analysis of ^{228}Ra and ^{226}Ra in public water supplies by a γ -ray spectrometer. *Health Phys.*, 59(1), 125.
- [16]- Hoincock, G.J., Martin, P., 1991. Determination of Ra in environmental samples by α -particle spectrometry. *Applied Radiation and Isotopes*, 42(1), 63.
- [17]- Salonen, L., Hukkaren, H., 1997. Advantages of low-background liquid scintillation alpha-spectrometry and pulse shape analysis in measuring ^{222}Rn , uranium and ^{226}Ra in ground water. *J. Radional.Nucl. Chem.*, 226 (1-2), 67.
- [18]- Debertin, K., Helmer, R.G., 1988. *Gamma and X-ray spectrometry with semiconductor Detectors*, North Holland, Amsterdam.
- [19]- Yücel, H., Karadeniz, H., Çetiner, A., Demirel, H., Turhan, Ş., 2003. Measurement of absolute intensity of 1001 keV gamma ray of $^{234\text{m}}\text{Pa}$. *J. Radional.Nucl. Chem.*, Vol. 258, No.2.
- [20]- Anilkumar, S., Krishnan, N., Abani, M. C., 1999. Application of fundamental parameter method for investigation of the branching intensity of 1001 keV gamma energies of $^{234\text{m}}\text{Pa}$. *Applied Radiation and Isotopes*, 51, 725.
- [21]- Nzuruba, A. C., 1999. *Nucl. Instr. And Meth. Phys. Res. A* 424, 425.
- [22]- Adsley, I., Backhouse, J. S., Nichols, A.I., Toole, J., 1998. U-238 Decay Chain: Resolution of observed anomalies in the measured secular equilibrium between Th-234 and daughter Pa-234m. *Applied Radiation Isotopes*, 49, 1337-1344.
- [23]- Siemon, K. J., Esterlund, R. A., Aarle, V. J., Knaack, M., 1992. *Applied Radiation and Isotopes*, 43, 873.
- [24]- Scott, H. L., Marlow, K. W., 1990. *Nucl. Instr. and Meth. Phys. Res. A* 286, 549.
- [25]- Moss, C. E., 1986. *Radiat Eff.*, 94, 81.
- [26]- Browne, E., Firestone, R. B., 1986. *Table of Radioactive Isotopes*. Wiley, New York.
- [27]- Momeni, M. H., 1982. *Nucl. Instr. Meth.* 193, 185.
- [28]- Gunnink, R., Tinney, J.F., 1971. Lawrence Radiation Laboratory Report No. UCRL-51086. App. C.
- [29]- Bjornholm, S., Nielsen, O. B., *Nucl. Phys.* 42, 642.
- [30]- Joshi, S. R., 1987. Nuclear spectrometric determination of uranium isotopes without use of radiochemical yield monitors. *Nucl. Instr. and Meth. Phys. Res. A* 254, 349-354.
- [31]- Righi, S., Betti, M., Bruzzi, L., Mazzoti, G., 2000. Monitoring of natural radioactivity in working places. *Microchemical Journal* 67, 119-126.
- [32]- Papachristodoulou, C. A., Assimakopoulos, P. A., Patronis, N. E., Ionnides, K. G., 2003. Use of HpGe γ -ray spectrometry to assess the isotopic composition of uranium in soils, *J. Environmental Radioactivity* 64, 195-203.
- [33]- Shoji, M., Hamajima, Y., Takatsuka, K., Honoki, H., Nakajima, T., Kondo, T., Nakanishi, T., 2001. A convenient method for discriminating between natural and depleted uranium by γ -ray spectrometry. *Applied Radiation and Isotopes*, 55, 221-227.