

BİR JEOFİZİK YÖNTEM: GAMA-IŞINI SPEKTROMETRESİ

A Geophysical Method: Gamma-Ray Spectrometry

İbrahim AYDIN*

ÖZET

Bir jeofizik yöntem olan gama-ışını spektrometresi, genellikle uranyum aramalarında, jeoloji haritalarda ayrıntıların ortaya çıkarılmasında ve metalik, kıymetli ve stratejik mineral aramalarında uygulanmaktadır. Ayrıca, çevre amaçlı olmak üzere, doğal ve yapay radyoaktivite kirliliğinin izlenmesi ve belirlenmesinde de kullanılmaktadır.

Gama-ışını spektrometresi Türkiye'de Orta Anadolu'da havadan uranyum aramaları için başarıyla uygulanmıştır.

ABSTRACT

A geophysical method of gamma-ray spectrometry is generally applied for uranium exploration, detailing the geological maps and exploration of metallic, precious and strategic minerals. It is also used in environmental studies to monitor and to determine the natural and industrial radioactive pollution.

Aircraft gamma-ray spectrometry survey has been carried out successfully for uranium exploration in Central Anatolia in Turkey.

GİRİŞ

Bazı elementlerin, dolayısıyla mineral ve kayaların bir fiziksel özelliği olan radyoaktivite, en yalın tanımıyla, bir elementin atom yapısının değişimi şeklinde tanımlanabilir.

Radyoaktif elementlerden potasyum (K-40), Uranyum (U-235 ve U-238) ve Toryum (Th-234) ile bunların izotopları doğada en bol bulunan radyoaktif elementlerdir. Doğal radyoaktif elementler denilen K-40, U-235, U-238 ve Th-232, zaman içinde kendiliğinden bölünüp parçalanarak dönüşüme uğrarlar ve kendi izotoplarını oluştururlar.

Radyoaktivitenin keşfi, önce 1895 yılında Röntgen, 1896 yılında ise Röntgen'den habersiz araştırma yapan Becquerel tarafından gerçekleştirilmiştir. Radyoaktivitenin keşfini bir çok radyoaktif element ve izotoplarının keşfi izlemiştir, buna paralel olarak da radyoaktivite ölçmeye yarayan aletlerin yapımında büyük gelişmeler görülmüştür.

Doğal kaynakların aranması veya benzeri araştırmalar için yerküredeki mineral ve kayaların radyoaktivite özelliğinden yararlanılmasına dayanan jeofizik yöntem radyometrik yöntem denir. Gama-ışını spektrometresi ise radyometrik yöntemin özel bir uygulama şeklidir.

Radyoaktivite ölçmelerden jeofizikte yararlanılmasına 1920 lerin ilk yıllarında başlanmıştır. 1930 lu yıllara ge-

lindiğinde, Geiger-Müller cihazlarının petrol kuyularında log almada kullanıldığını görüyoruz. Daha sonra, radyoaktif elementlerden yayılan gama-ışınlarının uzak mesafelere gidebilmesi ve bazı kristalen maddelerde ışınım (fosforans-sintilasyon) oluşturması özelliğine dayanan sintilometreler yapılmıştır. Sintilometreler genel jeoloji ve radyoaktif mineral aramalarında uzun yıllar kullanılmışlar, 1960 lı yılların ortalarından başlayarak yerlerini spektrometrelere bırakmışlardır (Telford et. al. 1976, IAEA 1979).

Türkiye'de 1960 yılına kadar olan radyoaktif mineral aramalarında Geiger Müller cihazları ve elde taşınabilir küçük sintilometreler kullanılmıştır. 1960 ve 1961 yıllarında Canadian Aero Service isimli şirket, MTA adına yaptığı havadan etütlerde manyetometre ile birlikte bir de sintilometre kullanmıştır (Hutchison ve diğ. 1962). 1962-1968 ve 1973-1975 yılları arasında bir çok küçük saha üzerinde uçularak gerçekleştirilen havadan radyometrik etütlerde MTA kendi uçak, sintilometre ve personelini kullanmıştır. Türkiye'deki ilk gama-ışını spektrometrik etüt ise, 1983 yılında ve Yozgat civarında 2000 km² lik bir alanda helikopterle uçularak gerçekleştirilmiştir (Wallin 1984). Daha sonraki gama-ışını spektrometri etütleri, yine MTA tarafından 1987 ve 1988 yıllarında Kayseri-Yozgat-Nevşehir civarında 25500 km² lik bir alanda yapılmıştır (Aydın 1990).

Bu yazı ile, gama-ışını spektrometresini öz olarak, Türkiye'deki bazı uygulamalardan örnekler vererek tanıtmak amaçlanmıştır.

* MTA Genel Müdürlüğü, Jeofizik Dairesi. 06520 Ankara.

RADYOAKTİVİTE

Bir atomun yapısı incelendiğinde, ortada pozitif yüklü bir çekirdek ve yörüngesinde negatif yüklü elektronlar görülür. Çekirdek ise kütleleri olan pozitif yüklü protonlar ile yüksüz nötronlardan oluşur. Bazı elementlerin çekirdeklerindeki proton ve nötron sayıları farklı olsa da atom numaraları aynıdır ve periyod cetvelinde aynı yerdedirler. Bu elementlere izotop denir. Bunların atomlarındaki proton ve nötron sayılarının farklı olması, atomik kütlelerinin de farklı olmasına neden olur.

Doğada bulunan radyoaktif elementler durağan veya durağan olmayan izotoplarına dönüşürlerken alfa, beta ve gama gibi parçacık veya ışınlar yayarlar. Bu parçacıklar veya ışınlar bazı önemli fiziksel özellikler gösterirler. Bunlar; normal ışık veya X ışınları gibi fotoğraf filminin hassas yüzeyini etkiler, gazları iyonize edip iletken hale getirirler, bazı kristalen madde veya kimyasal bileşiklerde ışıma olayı (fosforesans-sintilasyon) oluştururlar.

Alfa, beta ve gama parçacık veya ışınlarının bu özellikleri, yerbilimin değişik disiplinlerinde değişik amaçlar için kullanılmaktadır. Alfa parçacıkları, kütleleri ve pozitif yükleri olan helyum çekirdekleridir. Yayınım güçleri çok zayıftır. Beta parçacıkları, kütleleri ve negatif yükleri olan elektronlardır. Yayınım uzaklıkları alfa parçacıklarına göre biraz daha fazla olup, havada ancak 1-2 metredir. Gamma ışınları, yükleri ve kütleleri yoktur. Bu nedenle bir kütlesi olan alfa ve beta için parçacık terimi kullanılırken, gama için ışın terimi kullanılır. Yüksüz ve kütsüz oluşları nedeniyle havada yaklaşık 500 metreye kadar yayınabilirler. Yarım metre kalınlığındaki bir topraktan geçemezler, manyetik alanlardan etkilenmezler. Gama-ışını spektrometresinin ana unsurudurlar. Elektromanyetik radyasyonun yüksek enerjili bir türüdürler ve elektromanyetik tayfda, sınırları kesin olmasada X ışınları ile kozmik ışınlar arasındaki bir frekans bandında yer alırlar (Şekil 1).

Gama-ışınları yayınırken karşılaşıp çarpıştıkları maddelerle karşılık etkileşime girerler (Telford et. al. 1976). Bu etkileşim ile ortaya çıkan fiziksel olayların en önemlileri fotoelektrik olay, Compton saçılma olayı, elektron çifti olaylarıdır. Bunlardan fotoelektrik olay, gama-ışını spektrometresinde gama-ışınının ölçmesi için mutlaka oluşması gereken bir olaydır. Compton olayı belirli bir enerjisi olan gama-ışınının yayınırken yolu üzerindeki bir parçacık ile çarpışması ve enerjisinin bir kısmını yitirerek daha düşük bir enerji ile yoluna devam etmesi olayıdır. Elektron çifti olayı ise diğerlerine göre daha az önemli bir olaydır.

DOĞAL RADYOAKTİF ELEMENTLER VE ÖZELLİKLERİ

Yerkürede doğal olarak ve bol miktarda bulunan K-

40, U-238 ve Th-232 radyoaktif elementleri ve bunların her izotopu gama-ışını yaymazlar. Bu elementlerin durağan izotopuna ulaşma süreci içinde ortaya çıkan diğer izotopları Çizelge 1, 2 ve 3 de gösterilmiştir. Çizelgelerde izotopların yarı ömürleri, yaydığı parçacık veya ışın ile gama-ışını spektromunda doruk vererek kendini gösterdiği enerji düzeyleri de yer almaktadır. Diğer taraftan % 2 lik potasyum, 100 ppm lik uranyum ve 1000 ppm lik toryum elementlerinin 0-3.0 MeV arasındaki gama-ışını enerji spektromunda gösterdiği belli başlı doruklar ve bu dorukların enyüksek olduğu enerji düzeyleri Şekil 2 de gösterilmiştir. Yukarıda adı geçen MeV ifadesi gama-ışını spektrometride gama ışınlarının enerjilerini tanımlar ve Mega Elektron Volt birimi ile ölçülür ve 1 000 000 elektron volta (ev) eşittir. Birim yüklü bir parçacığın bir voltluk bir gerilim farkı ile harekete geçirilerek kazandığı enerjiye bir elektron volt denir.

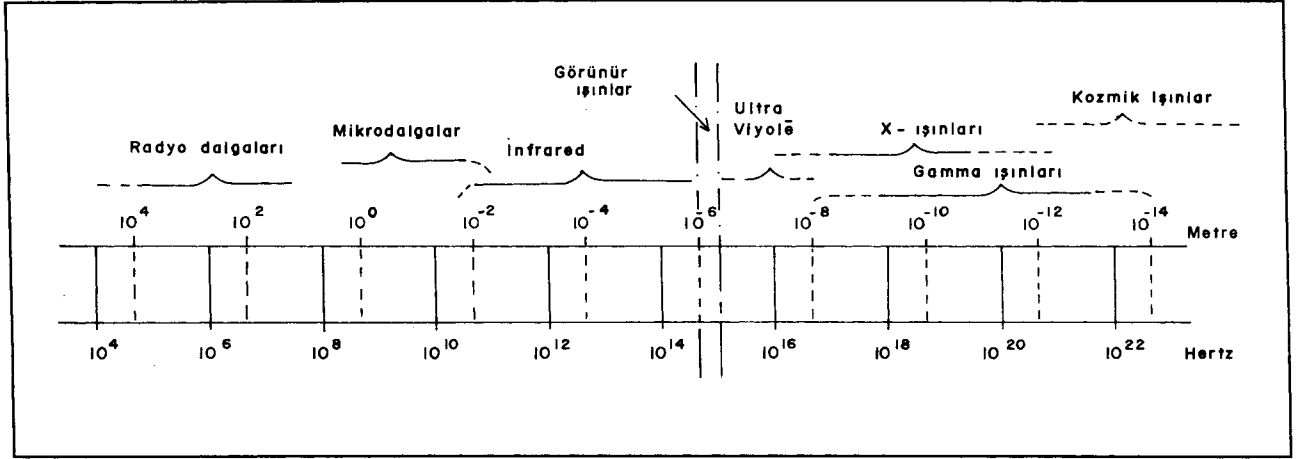
Bazı elementlerin radyoaktif özellikleri izleyen şekilde özetlenebilir. Potasyumun radyoaktif izotopu olan K-40, tüm potasyumun % 0.0118 i kadardır. K-40 ın yarı ömrü, yani ilk oluşum miktarının yarısının bir başka izotopu dönüşmesi için geçen süre 1.3 milyar yıldır. K-40 ın % 89 u beta parçacıkları yayımlayarak durağan Ca40 a dönüşürken, kalan % 11 i ise gama-ışınları yayımlayarak bir başka durağan izotop olan Ar-40 a dönüşür. K-40 orijinli gama-ışınlarının 1.4608 MeV luk enerjisi bulunmaktadır (Çizelge 1 ve Şekil 2). Gama-ışını spektrometrelerin potasyum penceresi 1.36 MeV ile 1.56 MeV arasındaki enerji düzeylerindeki gama ışınlarını algılamak üzere düzenlenmiştir.

Uranyumun iki doğal izotopu bulunmaktadır. Bunlar U-235 ve U-238 olup, bunlardan U-238 doğada daha çok (% 99.73) bulunur. U-235 in ve izotoplarının gama-ışınlarının enerjileri 0.89 MeV nin altındadır. Çizelge 2 de görüldüğü gibi, U-238 in kendisi gama-ışını yaymaz, buna karşın iki değişik izotopu Pb-214 ve Bi-214 ün gama-ışını enerji düzeyleri yüksektir. Bunların dışındaki U-238 izotopları gama-ışını yaymazlar. Bi-214 ün en belirgin doruk verdiği enerji düzeyi 1.76 MeV dur. Doruk verdiği diğer enerji düzeylerinde K-40 ve Th-232 de doruk oluşturmaktadır (Şekil 2). Bu yüzden, U-238 aramalarında spektrometrelerin uranyum penceresi, sadece K-40 ve Th-232 izotoplarından gelen gama-ışınlarının girmediği ve 1.66 MeV ile 1.86 MeV arasındaki enerji düzeyi gama-ışınlarını algılamak üzere düzenlenirler.

Toryumun doğal izotopu Th-232 dir ve en belirgin ve şiddetli doruk verdiği enerji seviyesi 2.62 MeV dur. Bu doruk toryumun Tl-208 (Talum) izotopu tarafından yaratılır (Çizelge 3 ve Şekil 2). Toryum minerali aramalarında spektrometrelerin toryum penceresi 2.42 MeV ile 2.82 MeV arasındaki enerji düzeyli gama-ışınlarını yakalamak üzere düzenlenirler.

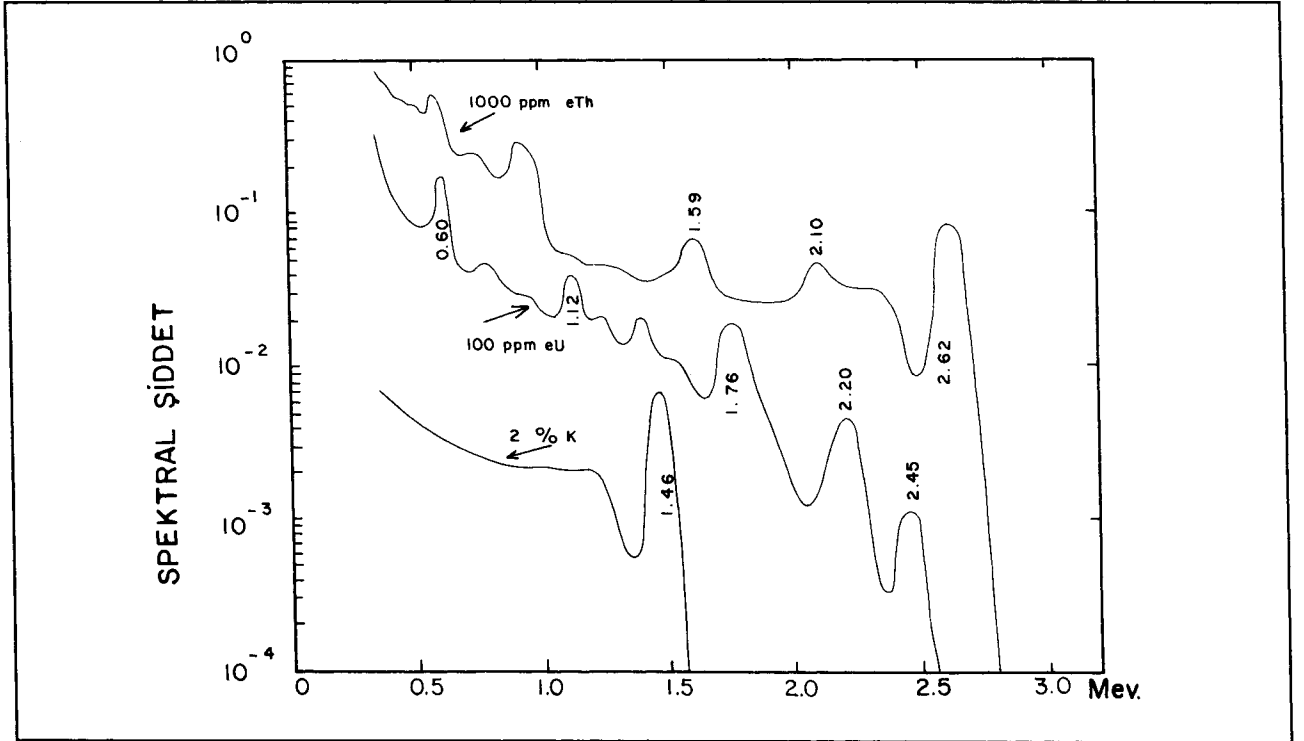
İZOTOP DENGESİ

Kapalı bir izotopik dönüşüm sisteminde, bir izotopun



Şekil 1. Göreceli frekans bandlarını gösteren elektromanyetik spektrum.

Fig. 1. The electromagnetic spectrum showing relative frequency bands



Şekil 2. Potasyum, Uranyum ve Toryumun yer seviyesinde ve 76 mm x 76 mm boyutlu bir NaI kristalle elde edilen gama-ışını Spekturumu (IAEA 1976).

Fig. 2. Thorium, Uranium and Potassium gamma-ray spectra obtained at ground level with a 76 mm x 76 mm NaI scintillator.

Çizelge 1. K-40 Elementinin dönüşüm özellikleri.

Table 1. Characteristics of K-40 decay scheme.

Değişim Dizisi	Yarı ömür	Radyasyon	Gama/ Parçalanma	Gama-Işını Enerji (MeV)
$^{40}_{\text{K}}$	$1.3 \times 10^9 \text{y}$	β, γ	0.11	1.4608
(89%), $^{40}_{\text{Ca}^{+}}$	Duraylı			
(11%), $^{40}_{\text{Ar}^{+}}$	Duraylı			

Çizelge 2. U-238 Dönüşüm dizisinin özellikleri.

Table 2. Characteristics of U-238 decay series.

İzotoplar	Yarı ömür	Temel Radyasyon	Gama/ Parçalanma	Gama-Işını Enerji (MeV)
$^{238}_{\text{U}}$	$4.51 \times 10^9 \text{ y}$	∞	-	0.05
$^{234}_{\text{Th}}$	24.1 g	β	0.08	0.03,0.06,0.09
$^{234}_{\text{Pa}}$	1.18 dk	β	-	
$^{234}_{\text{U}}$	$2.48 \times 10^5 \text{ y}$	∞	-	0.053
$^{230}_{\text{Th}}$	$8 \times 10^4 \text{ y}$	∞	-	0.07
$^{226}_{\text{Ra}}$	$1.600 \times 10^3 \text{ y}$	∞	0.04	0.186
$^{222}_{\text{Rn}}$	3.82 g	∞	-	
$^{218}_{\text{Po}}$	3.05 dk	∞	-	
$^{214}_{\text{Pb}}$	26.8 dk	β, γ	0.6	0.05,0.24,0.29,0.35
$^{214}_{\text{Bi}}$	19.8 dk	β, γ	1.3	0.61,1.12,1.76,2.20,2.44
$^{214}_{\text{Po}}$	$1.6 \times 10^{-4} \text{ s}$	∞	-	
$^{210}_{\text{Pb}}$	21.3 y	β	0.04	0.047
$^{210}_{\text{Bi}}$	5.01 g	β	-	
$^{210}_{\text{Po}}$	138.4 g	∞	-	
$^{206}_{\text{Pb}}$	Duraylı	-	-	

Çizelge 3. Th-232 Dönüşüm dizisinin özellikleri.

Table 3. Characteristics of Th-232 decay series.

İzotoplar	Yarı-ömür	Temel Radyasyon	Gama/ Parçalanma	Gama-Işını Enerji (MeV)
$^{232}_{\text{Th}}$	$1.39 \times 10^{10} \text{ y}$	∞	-	0.06
$^{228}_{\text{Ra}}$	5.75 y	β	-	0.01
$^{228}_{\text{Ac}}$	6.13 sa	β, γ	0.68	0.06,0.13,0.21,0.27,0.33,0.34,0.91,0.96
$^{228}_{\text{Th}}$	1.91y	∞	0.02	0.084
$^{224}_{\text{Ra}}$	3.64 g	∞	0.04	0.024
$^{220}_{\text{Rn}}$	55.3 s	∞	-	
$^{216}_{\text{Po}}$	0.15 s	∞	-	
$^{212}_{\text{Pb}}$	10.64 sa.	β, γ	0.52	0.12,0.24,0.30
$^{212}_{\text{Bi}}$	60.6 dk	β, γ	0.12	0.04,0.73,0.78,1.62
$^{214}_{\text{Po(64%)}}$	$3 \times 10^{-7} \text{ s}$	∞	-	
$^{208}_{\text{Ti(36%)}}$	3.1 dk	β, γ	2.3	0.28,0.51,0.58,0.76,0.86,2.62
$^{208}_{\text{Pb}}$	Duraylı	-	-	

bir saniyede bölünen (parçalanan) atom sayısı, bir önceki izotopun bölünmesiyle oluşan atom sayısı kadardır. Bu nedenle, kuramsal olarak bir izotopun ölçülmesi ile bir önceki izotopun yani ana elementin miktarı belirlenebilir.

Gama-ışını spektrometrik ölçmelerde, Bi-214 den yayınan 1.76 MeV enerjili ve Tl-208 den yayınan 2.62 MeV enerjili gama radyasyonu ölçülmektedir. İzotopik denge kuramına göre bu ölçmelerden uranyum ve toryum miktarlarının hesaplanmasına gidilmektedir. Bulunan miktarların her zaman doğru olduğu söylenemez. Çünkü doğada bulunan uranyum ve toryum izotopları, uzun dönüşüm süreci içinde ortaya çıkan jeolojik ve çevresel şartlar (rüzgar, yeraltı ve yerüstü su hareketleri v.b.) ile kendilerinin mineralojik ve kimyasal özellikleri (kolay çözünme, kolay soğrulma v.b) yüzünden her zaman ilk konum ve miktarlarını koruyamazlar. Yukarıda anlatıldığı gibi, izotop dengesinin korunduğuna ilişkin kesin kanıtlar yoksa, Bi-214 ve Tl-208 in gama radyasyonlarından bulunan uranyum ve toryum ifadelerinin başına eşdeğer (equivalent) sözcüğünü belirlemek üzere e harfi konur. Örneğin; (...) ppm eU veya (...) ppm eTh.

GAMA-IŞINI SPEKTROMETRESİ

Radyometrik ölçme aletlerinin en eskisi iyon odacığı adı verilen aletler olup, halen nadiren de olsa kuyu ölçmelerinde nötron logu almada kullanılmaktadır. Bu aletin çalışması alfa, beta ve gama-ışınlarının gazları iyonize etme esasına dayanır.

İkinci kuşak radyometrik etüt aletleri olarak bilinen ve çok uzun yıllar kullanılan aletler Geiger-Müller sayaçlarıdır. Çalışma esası iyon odası aletine benzeyen, öncelikle beta parçacıklarına duyarlı olan bu sayaçlar ilk kullanıma 1920 li yıllarda çıkmıştır. 1940 lı yılların başlarında sintilometreler jeolojik amaçlarla kullanılmaya başlanmıştır. Sintilometrelerin çalışma prensibi, gama ışınlarının bazı kristalen madde veya kimyasal bileşiklerde oluşturduğu ışınma olayına dayanır. 1940 yılların sonlarında uçaklara yerleştirilerek havadan radyometrik etütlerde kullanılmıştır. Sintilometreler, gama ışınlarının çarpıp ışınma oluşturduğu bir kristal, bu kristale bitişik ve ışınmayı şiddetlendirerek elektrik sinyallerine dönüştürmeye yarayan bir tüp (PMT) ve genellikle 0.5-2.8 MeV enerjili gama-ışınlarının oluşturduğu tüm elektrik sinyallerini sayan bir sayaçtan oluşur (Şekil 3).

Belli bir zaman aralığında (genellikle bir saniye) sayılan sinyal sayısı bir kayıtçı yardımı ile kaydedilir. Kristale gelen gama-ışınının enerjisi PMT den çıkan elektrik sinyalinin şiddetine eşdeğerdir.

Gama-ışını spektrometrelerin çalışma prensibi, sintilometrelerin çalışma prensibinin aynıdır. Tek fark, spektrometrelerin değişik enerji şiddetli elektrik sinyallerini, belli enerji seviyeli kanallardan veya alt-üst enerji limitleri belli pencerelerden geçiren çözümleyicilerinin bulunmasıdır (Şekil 4).

Genellikle dört pencereleli spektrometreler standart

Çizelge 4. Dört pencereleli bir spektrometrenin pencere enerji düzeyleri.

Table 4. Energy limits of four windows spektrometer.

Pencere	Enerji Düzeyleri
Toplam Sayım Penceresi	0.4 - 3.00
Potasyum Penceresi	1.36 - 1.56
Uranyum Penceresi	1.66 - 1.86
Toryum Penceresi	2.42 - 2.82

spektrometrelerdir ve bu pencerelerin isimleri ve yaklaşık alt ve üst enerji seviyeleri Çizelge 4 de verilmektedir (IAEA 1991).

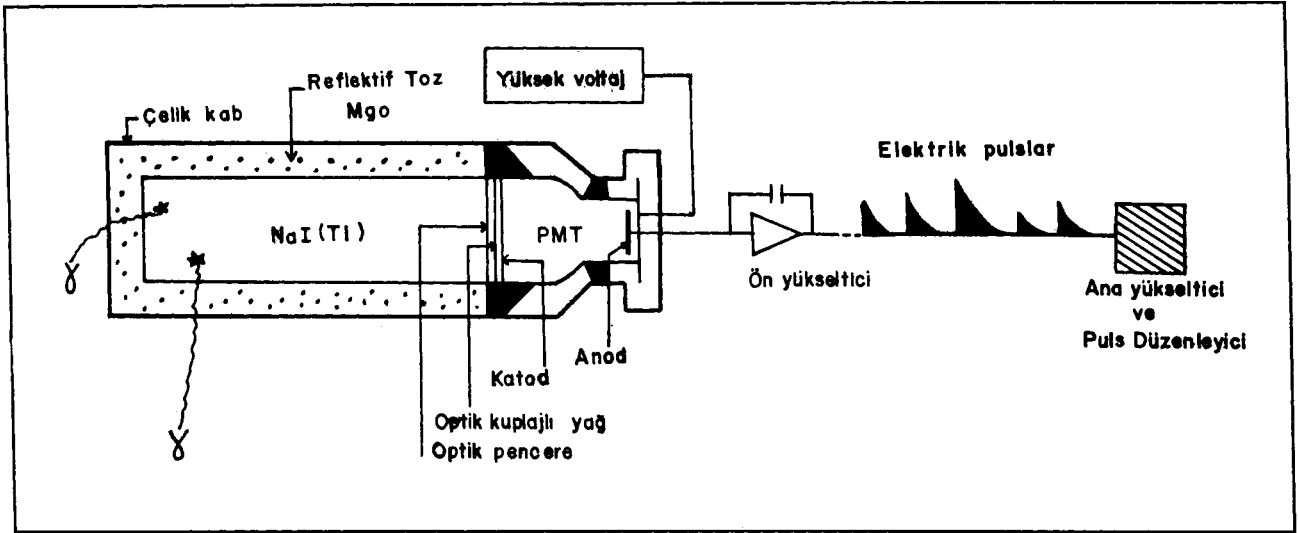
Gama-ışınlarının 0.0-3.0 MeV enerji bandı, 256 eşit aralığı bölünerek 256 kanallı spektrometreler yapılmıştır. Her kanalın yaklaşık 12 KeV luk bir enerji aralığı bulunmaktadır ve bu tür spektrometreler doğal ve yapay izotopların arama ve araştırılmasında başarıyla kullanılabilirlerdir (Grasty et. al. 1985).

Spektrometrelerin kristalleri genellikle talyum katkılı NaI den yapılmıştır. NaI kristalli spektrometrelerin etkinliği ve ayrımlılığı yüksek, spektrum kayması (drift) ile maliyetleri düşüktür. Spektrum kaymasını önlemek için kristaller etüt mevsimi süresince sabit ısıda tutulmalıdırlar. Etkinliği, ayrımlılığı ve maliyetleri daha yüksek olan spektrometrelerin kristalleri talyum katkılı CsI veya lityum katkılı germanyumdan yapılmışlardır.

Bazı gama-ışını spektrometre etütlerinde, alt bölüme kurşun bir levha konulan küçük hacimli ek bir kristal daha kullanılır ve bu kristale gelen gama ışınları sayımları da ayrıca kaydedilir. Yerden gelen gama-ışınlarının kurşun levha yardımıyla engellendiği bu kristalin kayıtları, havadaki radon gazının ana kristale etkisinin belirlenip yok edilmesinde kullanılır. Herhangi bir radyoaktif elementten yayınan gama-ışını sayısı, her birim zaman aralığında ve her yönde eşit dağılır.

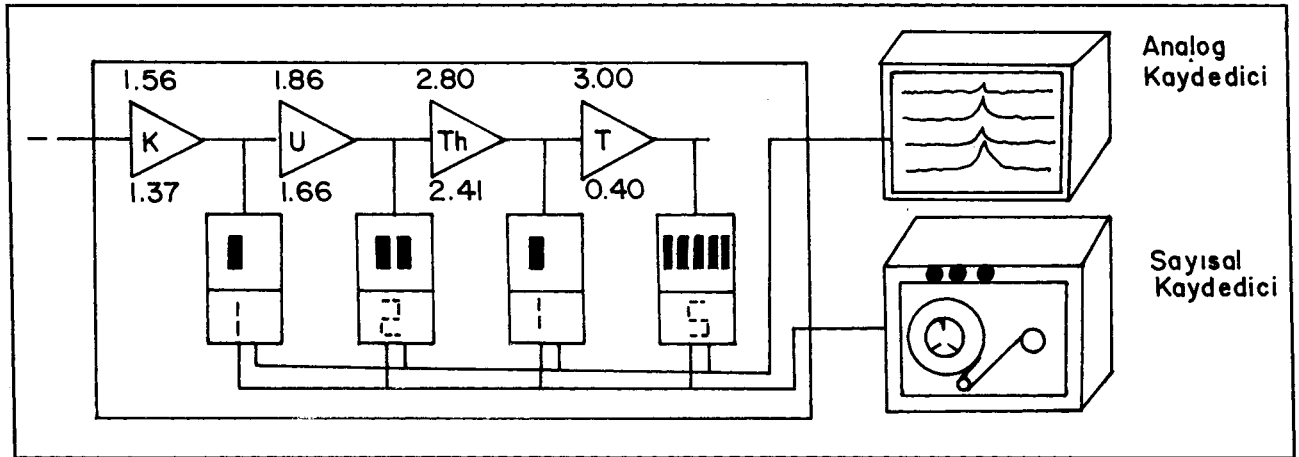
UYGULAMA ALANLARI VE TÜRKİYE'DEN ÖRNEKLER

Gama-ışını spektrometre etütleri sonunda potasyum konsantrasyonunu % olarak, uranyum ve toryum konsantrasyonlarını ise ppm cinsinden gösteren haritalar hazırlanır. Ayrıca mikroröntgen/saat cinsinden yerin radyasyon dozunu gösteren haritalar hazırlanır (Şekil 5). Etütlerde 0.2-3.0 MeV enerji aralıklı ve 256 kanallı spektrometre kullanılması halinde, yerin yapay radyoizotop dağılım haritaları da hazırlanabilir. K, U, Th konsantrasyon haritaları ve yer radyoaktivite haritaları kullanılarak doğal radyoaktif elementler, bileşiminde bu element bulunan mineraller, bu minerallerle köken ve litoloji bağımlılığı olan diğer mineral ve jeolojik oluşumlar aranabilir ve araştırılabilir.



Şekil 3. Bir kristal gama-ışını algılayıcısının şematik gösterimi.

Fig. 3. Schematic presentation of a crystal dedector assemble.



Şekil 4. Dört kanallı bir spektrometre ve kayıtçılarının şematik gösterimi.

Fig. 4. Schematic presentation of a 4-channel spectrometer and recorders.

Gama-ışını spektrometre ölçümlerinin uygulama alanları , radyoaktif mineral aramaları, jeolojik haritalama çalışmaları, kömür, petrol ve doğalgaz aramaları, metalik mineral aramaları, altın, ağır mineral ve stratejik mineral aramaları, endüstriyel hammadde aramaları, doğal ve yapay radyoizotopların neden olduğu çevre kirliliğinin araştırılması ve diğer bazı uygulamalar olarak sıralanabilir.

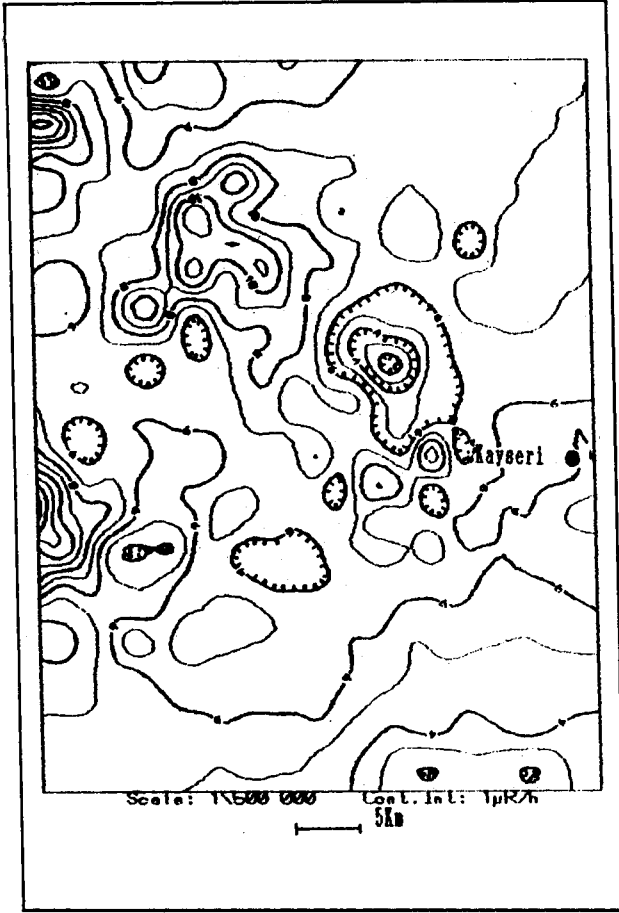
RADYOAKTİF MİNERAL ARAMALARI

Gama-ışını spektrometri, yerkürede doğal olarak bulunan uranyum, toryum ve potasyum gibi radyoaktif elementlerin minerallerinin aranmasında başarıyla uygulanmaktadır. Özellikle nükleer enerjinin hammaddesi olan uranyum minerallerinin aranmasında doğrudan ve tek yöntemdir. Dünyada bu yöntemle bulunmuş yüzlerce uranyum yatağı bulunmaktadır. Türkiye'deki uygulama örnekleri,

Yozgat-Şefaati ile Nevşehir-Bekdik yöreleri uranyum alanlarıdır (Şekil 6).

JEOLOJİK HARİTALAMA ÇALIŞMALARI

Gama-ışını spektrometri ile etüt edilen sahanın potasyum, uranyum ve toryum içerikleri belirlenerek haritalanabilmektedir. Jeolojik tanımlama yapabilmek için bir formasyonun K, U ve Th içeriğinin bilinmesi bazı koşullarda çok önemli olabilmektedir (Pitkin 1968, Clark et. al. 1966). Spektrometrik etütler, özellikle geniş alanların küçük ölçekli jeoloji haritalarının ayrıntılandırılmasında büyük kolaylıklar getirmesi, her türlü jeolojik ve jeofizik bilgiye destek sağlaması ve konuya başka boyuttan bakabilme fırsatı vermesi açısından her zaman güvenle gözönüne alınmalıdır (Darnly and Grasty 1971, Potts 1976 ve Charbonneau 1988). Şekil 7 de jeoloji ve Şekil 8 de aynı yöreye ait spektrometrik etüt potasyum yüzdesi dağılım haritaları ve-



Şekil 5. Radyasyon doz hızı haritası (Orta Anadolu).

Fig. 5. Exposure dose rate map (Central Anatolia).

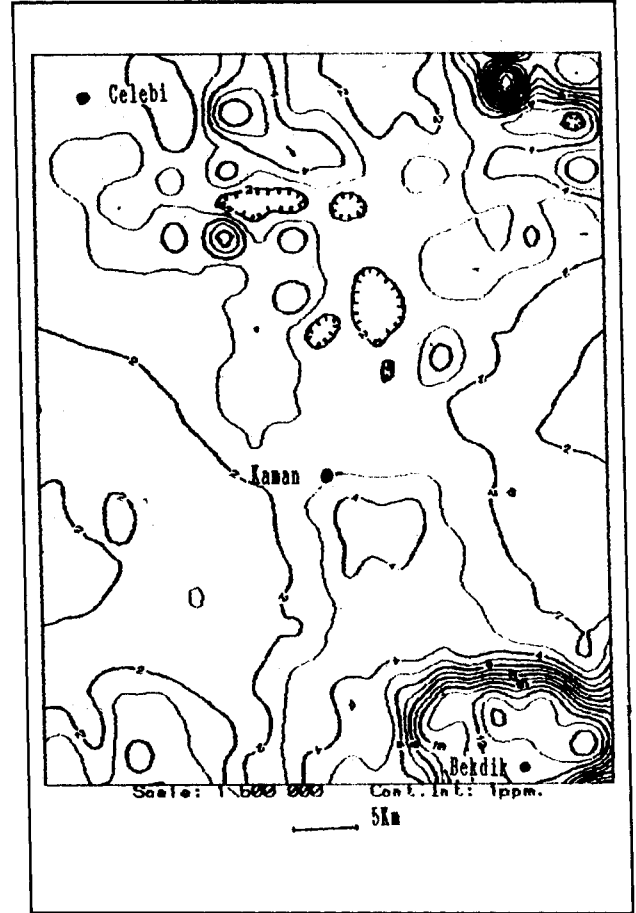
rilmiştir. Haritaların incelenmesinden granit sınırının büyük bir doğrulukla, kuzeyindeki ofiyolitlerin sınırının da kesinlikle belirlenebildiği anlaşılmaktadır.

KÖMÜR, PETROL VE DOĞALGAZ ARAMALARI

Yapılan bazı çalışmalar kömür ve petrolün iz elementler ile uranyum, toryum ve radyum gibi radyoaktif elementleri soğurarak bünyesinde tutup zenginleştiğini ortaya koymuştur. Yine yapılan bazı araştırmalar, petrolün kendi çevresinde uranyum zenginleşmesine neden olabilecek fiziksel ve kimyasal şartları oluşturduğunu ortaya koymakta ve bunu petrolü sahalarındaki radyoaktivite anomalileri ile kanıtlamaya çalışmaktadırlar (Shidler and Hinz 1971, Amstrong and Heemstra 1972, 1973).

METALİK MİNERAL ARAMALARI

Bakır kurşun ve çinko minerallerinin içinde veya beraber bulunduğu jeolojik birimlerin K, U ve Th içeriğine bakılarak, yakın sahalardaki aynı oranda K, U ve Th içeren jeolojik birimlerin dolaylı yoldan belirlenmesine çalışılabilir. Moxham et. al. (1961), civarında bakır, kurşun ve çinko



Şekil 6. Uranyum yoğunluğu haritası (Orta Anadolu).

Fig. 6. Uranium concentration map (Central Anatolia).

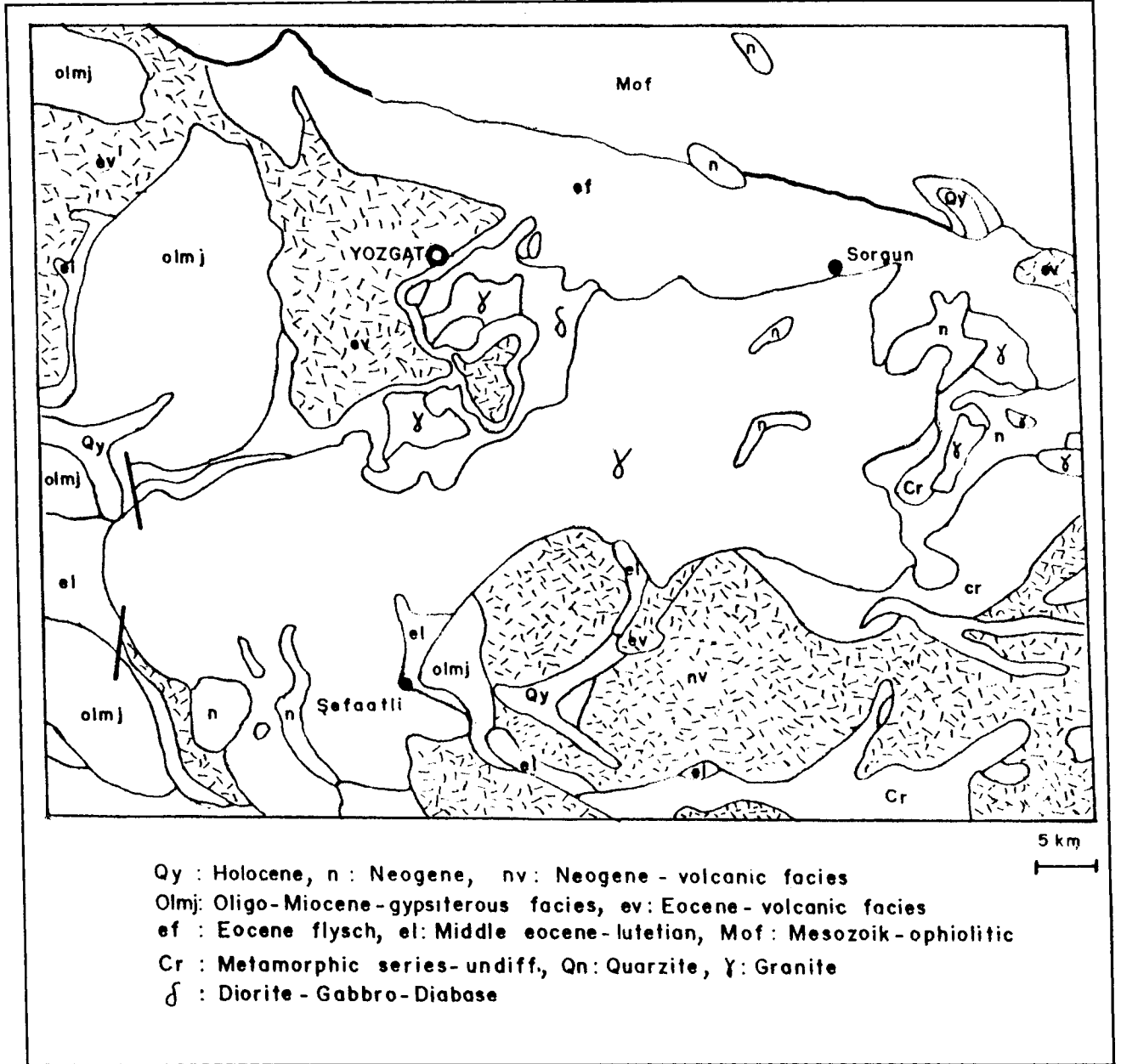
mineralizasyonu bulunan alterasyon zonlarındaki potasyum miktarının iki katına kadar çıktığı ve spektrometrik etüdlere elde edilen potasyum konsantrasyon haritalarına bakılarak söz konusu minerallerin dolaylı aranabileceğini göstermiştir.

Kanada, ABD ve Şili'deki bakır yatakları ile Zaire'deki kobaltlı bakır yatakları uranyumca zengin yataklardır. Balıkesir yöresindeki bakır, molibden ve volfram içeren bazı zonlarda radyoaktivite yüksektir. Ayrıca, Nevşehir-Genezin civarındaki uranyumlu zonlarda bakır mineralizasyonunun varlığı bilinmektedir (Aydın 1990).

Bu bilgiler ışığında, gama-ışını spektrometri etütleri sonunda hazırlanacak potasyum ve uranyum konsantrasyon haritalarından yararlanılarak, dolaylı olarak metalik mineral aranabileceği söylenebilir.

ALTIN, AĞIR MİNERAL VE STRATEJİK MİNERAL ARAMALARI

Bilinen pekçok altın yatağında uranyum zenginleşmesine rastlanmakta ve bunların köken birliğinin olduğu düşünülmektedir (Gross 1952, Charboneau and Swettenham 1986).



Şekil 7. 1983 yılında yapılan spektrometre etüdü jeoloji haritası (Orta Anadolu).

Fig. 7. Geological map of spectrometry survey conducted in 1983 (Central Anatolia).

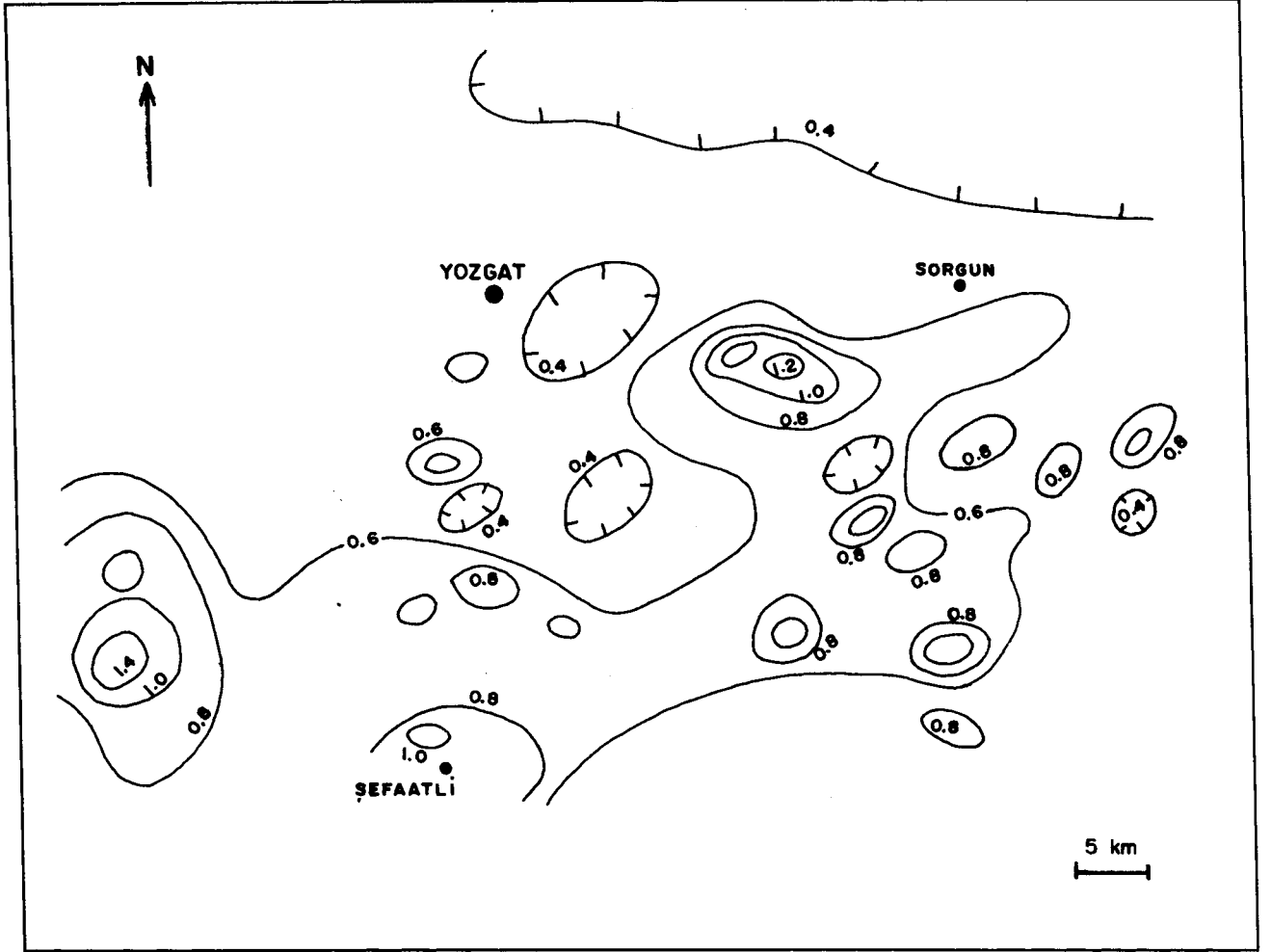
Diğer taraftan, zirkon ve monazit gibi ağır minerallerin bileşiminde toryum elementi bulunmaktadır. ayrıca, toryum konsantrasyonunun arttığı yerlerde önemli oranlarda nadir toprak elementlerine de rastlanmaktadır (IAEA 1979). Bunun Türkiye'deki en tipik örneği, Sivrihisar-Kızılcaören yöresindeki toryum yatağıdır. Bu toryum yatağı barit ve florit ile birlikte Nd, Ce ve La gibi değerli nadir toprak elementlerini de içermektedir (Kaplan 1976).

Bilinen bazı sedimenter uranyum yataklarında selenyum, vanadyum ve molibden minerallerine sık sık rastlanmaktadır (Harshman 1974). Gama-ışını spektrometrik etüt-

lerle yukarıda değinilen element veya mineraller dolaylı olarak aranabilmektedir.

ENDÜSTRİYEL HAMMADDE ARAMALARI

Bileşiminde potasyum bulunan feldspatlar cam ve seramik sanayinin en önemli hammadleridir. Spektrometrik etütlerle hazırlanan K konsantrasyon haritaları yardımıyla doğrudan potasyum aranabilmektedir. Fosfatlı bileşiklerin uranyumu soğurma özelliği vardır. Kanada, Fas, Suriye ve Ürdün'deki fosfat yataklarının önemli miktarlarda uranyum içerdiği bilinmektedir. Gübre sanayinin ham-



Şekil 8. 1983 Yılında yapılan spektrometre etüdü Potasyum dağılımı haritası (Orta Anadolu).

Fig. 8. Potassium concentration map of spectrometry survey conducted in 1983 (Central Anatolia).

maddesi olan fosfatların dolaylı olarak spektrometre ile aranması olanaklıdır.

DOĞAL VE YAPAY RADYOİZOTOPLARIN NEDEN OLDUĞU ÇEVRE KİRLİLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Gama-ışını spektrometri, nükleer tesislerin çevrelerine etkilerinin belirlenmesi veya izlenmesinde (Brasch and Beers 1971), nükleer başlık füzelerin düştüğü yerlerin belirlenmesinde ve nükleer reaktör kazalarında ortaya çıkan izotopların nerelerde ve ne yoğunlukta çevre kirliliği yarattığının belirlenmesinde (Grasty and Multala 1991) başarıyla kullanılan bir yöntemdir.

Çizelge 2 de görüldüğü gibi radon gazı uranyum-238 in doğal bir izotopudur. Yine Çizelge 2 incelendiğinde radonun çok kısa bir zamanda Po-218 ve Pb 214'e dönüştüğü anlaşılmaktadır. Radon gazının nefesle ciğerlere çekilmesi ve ciğerlerdeki radonun da Po-218 ve Pb-214 parçacıklarını dönüştürmesi ve bu parçacıkların da ciğerlere yapışmasıyla insan sağlığı için çok önemli bir tehlike ortaya çıkmaktadır (Kerr 1988).

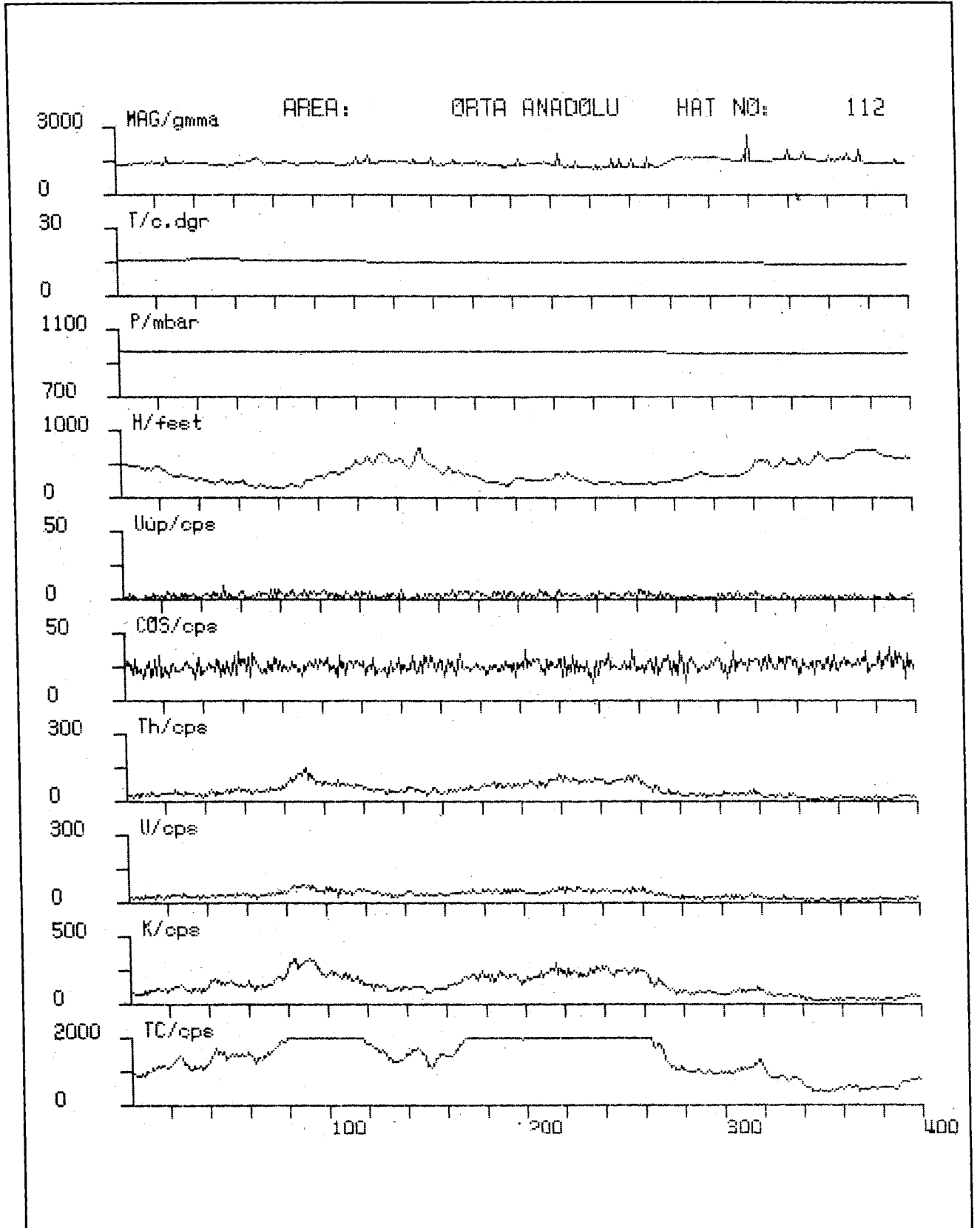
İnsan sağlığı için bu oranda tehlikeli olabilen radon gazı yeryüzünden çıkarak atmosfere yayılmaktadır. Radon gazı potansiyeli olan dolayısıyla insan sağlığı için tehlike oluşturabilecek yerlerin belirlenmesinde gama-ışını spektrometri etütlerinden yararlanmak olanaklıdır (Grasty 1988).

DİĞER UYGULAMALAR

Gama-ışını spektrometri, radyoaktif element konsantrasyonlarının yeryüzünde oluşturabileceği ısı miktarlarının hesaplanması ile topraktaki nemlilik oranı ve su eşdeğerli kar kalınlığının hesaplanmasında kullanılmaktadır. Bu hesaplamalar yerbilimin çeşitli disiplinlerine, tarım, orman ve enerji sektörlerine önemli katkılar sağlanmaktadır.

GAMA-IŞINI ÖLÇMELERİ

Her jeofizik yöntemde olduğu gibi gama-ışını spektrometride de ölçümleri etkileyen faktörler, ölçümlere uygulanan bazı düzeltmeler ve ölçümlerin indirgendiği bazı



Şekil 9. Spektrometrik veri ile birlikte diğer yardımcı verilerinde kaydedildiği bir örnek.

Fig. 9. An example showing the recorded spectrometric and auxiliary data.

değerler vardır. Bu düzeltmeler ve indirgemeler için spektrometre ile birlikte uçuş yüksekliğinin bir altimetre, havanın ısısının bir termometre ve hava basıncının da bir barometre ile ölçülüp kaydedilmeleri gerekmektedir (Şekil 9).

Dış Etkenler

Normal şartlarda yeryüzünün herhangi bir noktasındaki radyasyon, her türlü kaynaktan yayılan radyasyonların toplamıdır. Bir cismin veya bir yerin radyasyonunu tam olarak bilebilmek için, o cismin veya o yerin dışındaki kaynaklardan gelen radyasyonun da ölçülmesi veya hesap edilmesi gerekmektedir.

Bir gama-ışını spektrometrik etütte, spektrometrenin herbir penceresinde veya kanalında ölçülen gama ışınları sayısı, yerden ve yerdışı kaynaklardan gelen gama ışınlarının toplamıdır. Yerdışı (background) radyasyon kaynakları kozmik ışınlar, spektrometrenin yapıldığı malzeme ile taşıyan aracın (uçak, jeep, vb.) yapıldığı malzemenin bileşiminde bulunan radyoaktif maddeler ve havadaki radon gazıdır.

Diğer taraftan, gama-ışınlarının kendi doğal özellikleri nedeniyle spektrometrelere uygulanan bazı kalibrasyon işlemleri gerekmektedir. Örneğin, toryum izotopu olan Tl-208 den yayılan 2.62 MeV enerjili gama-ışınları, toryum penceresinin yanısıra daha düşük enerjili kanal veya pencerelerde de kendilerini gösterirler. Bu olaya Compton olayı denildiği daha önce açıklanmıştı. Buna göre, uranyum penceresinde ölçülen bir değer, uranyum orijinli 1.76 MeV lik gama-ışınlarının oluşturduğu ışın sayısı ile Compton olayı nedeniyle daha düşük enerjili (örneğin toryum orijinli ve 2.62 MeV enerjili) gama-ışınlarının oluşturduğu ışın sayısının toplamıdır.

Herhangibir penceredeki net ışın sayısının bulunması için diğer pencerelere ait gama-ışını etkilerinin giderilmesi gerekir. Bunun için özel kalibrasyon blokları kullanılır ve üzerinde spektrometre ile ölçüler almak suretiyle her pencerenin gama ışınının diğer pencerelere etkisi belirlenir. Spektrometrik ölçmeleri etkileyen bir diğer etken, yer ile spektrometre arasındaki uzaklıktır. Herhangibir penceredeki ışın sayısı spektrometre ile yer arasındaki uzaklığa bağlı olarak üstel olarak azalır. Bunun için spektrometrik ölçmeler yerden belli bir yüksekliğe indirgenir.

Spektrometrik Ölçmelerdeki Düzeltmeler

Gama-ışını spektrometrenin bir penceresindeki ve ho yüksekliğine indirgenmiş net ışın sayısı N_n , aşağıdaki eşitlik ile verilebilir

$$N_n = (N_o - N_b) - N_s \cdot \exp(\mu(h - h_o)) \quad (1)$$

Burada, N_o ; herhangi bir penceredeki ölçülen sayımı, N_b ; yerdışı radyasyon kaynaklarının neden olduğu sayımı,

N_s ; Compton nedenli sayımı, μ ; spektrometrenin herhangi bir penceresine ait uzaklık ile azalma katsayısını, h ; uçuş yüksekliğini, h_o ; indirgeme yüksekliğini göstermektedir.

Yerdışı radyasyondan gelen sayım N_b ise, (2) eşitliği ile verilebilir

$$N_b = D + R \quad (2)$$

Bu eşitlikteki R atmosferdeki radonun neden olduğu sayımı tanımlamaktadır. D ise izleyen şekilde verilir:

$$D = A + b \cdot C \quad (3)$$

Burada A ; uçağın kütesinden ileri gelen radyasyonun neden olduğu sayımı, C ; 3.0-6.0 MeV enerji düzeyleri arasındaki kozmik penceredeki sayımı tanımlar. b ise kozmik penceredeki her bir sayımın, Compton nedeniyle herhangi bir pencerede oluşturabileceği sayımı tanımlayan bir katsayıdır.

D 'nin bulunması için yeryüzü kaynaklı radyasyonun ulaşmadığı 3000-15000 feet yükseklikler arasında bir dizi uçuş yapılır. D , sözkonusu yükseklerde herhangi bir penceredeki sayım, C kozmik penceresindeki sayım olacaktır. İlgili pencere ile kozmik pencere arasında, (3) eşitliğindeki gibi kurulan doğrusal eşitliklerden b ve A bulunur.

Atmosferdeki radon gazının neden olduğu spektrometre pencerelerindeki sayımın belirlenmesi için izlenen birkaç yol vardır. Bunlardan en çok başvurulanı, etüt sahası içinde radyoelement konsantrasyonu düşük ve radyoelement dağılımı düzgün olan bir küçük sahada günde en az iki defa ölçü alma yöntemidir. Bununla saha içindeki radon değişimi izlenmeye çalışılır. Bir diğer usul, daha küçük hacimli ve alt bölümüne kurşun levha yerleştirilen ek bir kristal kullanarak sadece havadaki radon kaynaklı radyasyonu belirlemeye çalışmaktır.

Spektrometrenin herhangi bir penceresindeki net ışın sayısını bulmak için yapılacak düzeltme ve indirgeme işlemlerinin sırası şöyle olmalıdır.

1- Yerdışı radyasyonun yok edilmesi,

a. Uçak ve kozmik nedenli radyasyon

b. Atmosferdeki radonun neden olduğu radyasyon

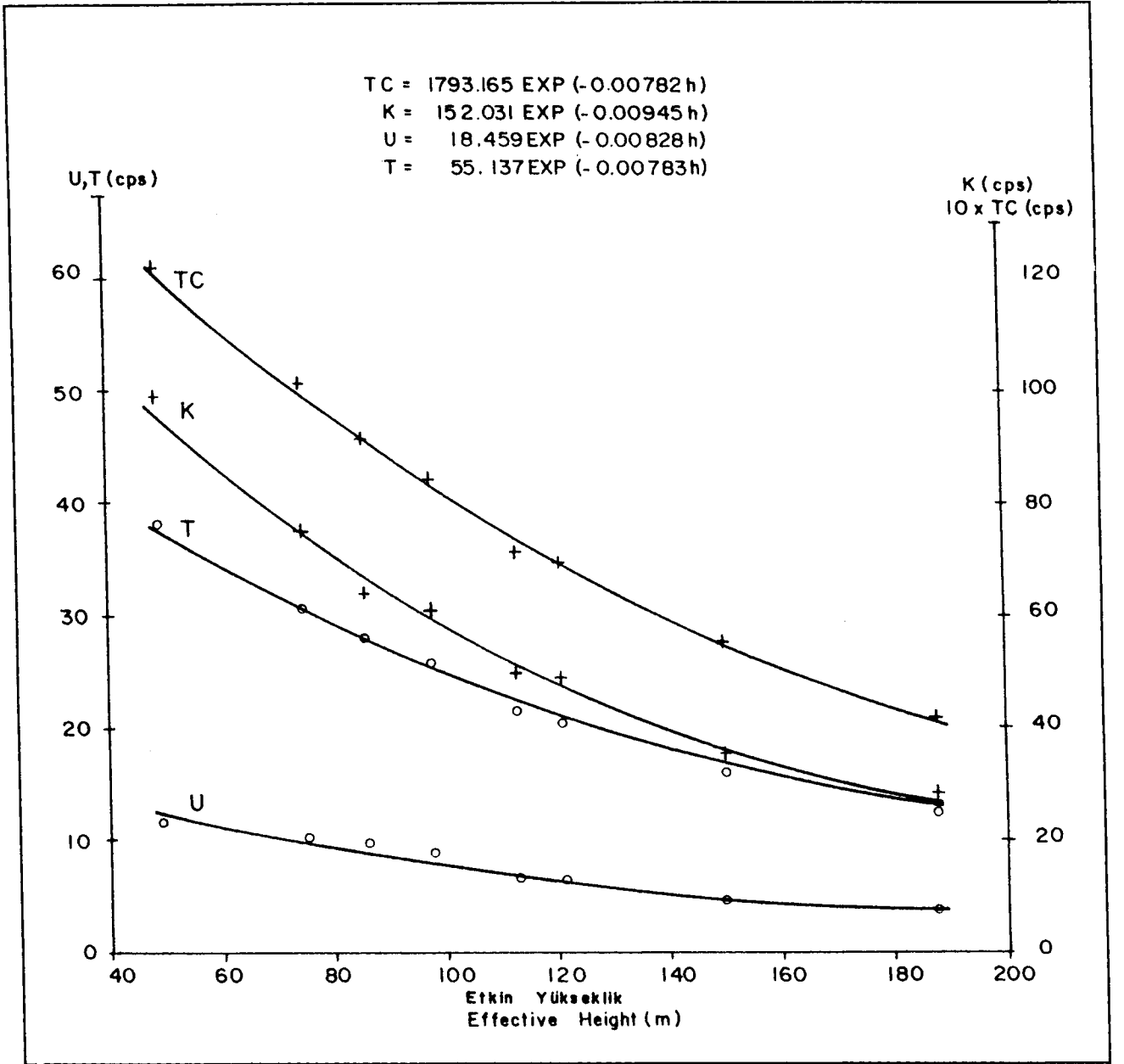
2- Pencerelerdeki karşılıklı etkileşimin enden olduğu radyasyon yok edilmesi,

3- Ölçümlerin belli bir yüksekliğe indirgeme işlemi,

4- Net sayımların radyoaktif element konsantrasyonlarına dönüştürme işlemi.

Pencerelerdeki karşılıklı etkileşimin neden olduğu sayımın belirlenip, yerdışı radyasyon düzeltmesi yapılmış değerlerden çıkarılması işlemine gama-ışını spektrometresi literatüründe "Stripping" işlemi denmektedir.

Bunun için, içerdiği K , U ve Th konsantrasyonları bilinen 4 adet kalibrasyon bloğuna gerek vardır. Türkiye'de MTA Genel Müdürlüğü tarafından 1987 yılında inşaa edilen Kalibrasyon Blokları Ankara-Etimesgut'ta bulunmaktadır. Bu blokların en ve boyları 8 metre, kalınlığı 0.375 metre ve aralarındaki mesafe 15 metredir. Ankara-Etimesgut kalibrasyon bloklarının radyoaktif element konsantrasyonları Çizelge 5 de verilmiştir. Stripping işlemi için gerekli olan Stripping katsayıları (4) de verilen düzey eşitliğinden elde edilir.



Şekil 10. Dinamik test uçuşu verisi dökümü ve yükseklik sönüm katsayıları (Orta Anadolu).

Fig. 10. Dynamic test flight data and height attenuation coefficients (Central Anatolia).

Çizelge 5. Ankara-Etimesgut kalibrasyon bloklarının radyoaktif element konsantrasyonları.

Table 5. Radioactive element concentrations of Ankara Etimesgut calibration pads.

Blok	K (%)	eU (ppm)	eTh (ppm)
B- Blok	1.22	1.65	6.98
K- Blok	7.04	0.56	0.99
U- Blok	1.22	23.37	6.98
T- Blok	1.17	2.59	50.15

K, U ve T blokları üzerinde yapılan K, U ve Th pencereleri ölçümlerinden B bloku üzerinde yapılan K, U ve Th pencereleri ölçümleri çıkartılarak, her pencere için yerdışı radyasyondan arındırılmış ışınma sayısı dizeyi N elde edilir.

$$(S) = (N) (C)^{-1}$$

(4)

B bloku konsantrasyon değerleri K, U ve T blokları konsantrasyon değerlerinden çıkartılarak C dizeyi elde edilir. (4) eşitliğinin çözümünden elde edilen S dizeyi değerleri yardımıyla da stripping katsayıları bulunur. (1) eşitliğindeki Ns in hesaplanmasına da stripping katsayılarından yararlanılır (Grasty 1979).

Spektrometrik ölçmelerin bir düzleme indirgenbilmesi için belli bir enerji aralığındaki gama-ışınlarının uçuş yüksekliğine bağlı olarak ne oranda sönmüme uğradıklarının bilinmesi için, bu pencerelere gelen gama-ışınlarının sönmü katsayıları da farklı olacaktır (Grasty 1975, Grasty et. al 1979).

(1) eşitliğinde yeralan μ sönmü katsayısının herbir pencere için hesaplanabilmesi amacıyla, yerden 50-1000 feet arasındaki yüksekliklerde bir dizi uçuş yapılır ve her bir yükseklikteki sayımlar kaydedilerek (5) eşitliği kurulur. Buradan da μ değerleri hesap edilir. Şekil 10'da Orta Anadolu havadan spektrometre etüdünde kullanılan gama sönmü katsayılarının elde edildiği uçuş değerleri ile bunların grafik dökümü görülmektedir.

$$N = N_0 \cdot \exp(-\mu h) \quad (5)$$

N; herhangi bir penceredeki kaydedilen sayımı, μ ; ilgili pencerenin gama sönmü katsayısını, h; ölçü yani uçuş yüksekliğini ifade eder. N_0 ise ilgili pencerenin yeryüzündeki sayımıdır.

Ölçümlere uygulanan en son düzeltme işlemi, herhangi bir pencerenin net sayım değerinin radyoaktif element konsantrasyonuna dönüştürülmesi işlemidir. Örneğin, uranyum penceresinin net sayımını, o sayımı verecek uranyum konsantrasyonu olarak tanımlamak gerekir. Bunun içinde radyoaktif element konsantrasyonları bilinen bir saha üzerinde ölçüm yapılır, ölçümlere tüm düzeltme ve indirgeme işlemleri uygulanır ve elde edilen herhangi bir pencere değeri sahanın ilgili radyoaktif element konsantrasyon miktarına bölünür. Bulunan değer spektrometrenin o penceresinin ilgili radyoelemente duyarlılığını verir. Daha sonra, etüt verileri tüm düzeltme ve indirgeme işlemlerinden sonra spektrometrenin duyarlılık sabitine bölünerek radyoaktif element konsantrasyonlarına dönüştürülmüş olur.

SONUÇ

Bu yazı ile gama-ışını spektrometresinin tanıtımı yapılarak Türkiye'deki jeofizikçilerin konuya eğilmeleri, konunun kuramsal gelişimine ve uygulama tekniklerine katkı getirmeleri amaçlanmıştır. Gama-ışını spektrometresi bugün dünyanın pek çok ülkesinde yerbilimi ile ilgili pek çok sorunun çözümünde başarıyla uygulanmaktadır. Özellikle son yıllarda çevresel radyoaktivite kirliliğinin belirlenmesi veya izlenmesi uygulamalarında çok büyük gelişmeler sağlanmıştır.

KATKI BELİRTME

Bu yazının hazırlanması, şekillerinin çizilmesi ve bilgisayarda yazılmasında emeği geçen Hacer ASLAN, Ayla ARIN ve Arzu SEVİNÇ'e teşekkür ederim.

KAYNAKLAR

- Amstrong, F.E. and Heemstra, R.J. 1972, Radiometrics proposed for exploration. Oil and Gas Journal, V. 88-97, and p. 152-161.
- Amstrong, F.E. and Heemstra, R.J. 1973, Radiation halos and hydrocarbon reservoirs: a review. Information Circular 8579, Bureau of Mines, U.S. Dept. of Int.
- Aydın, I. 1990, Orta Anadolu Uranyum aramaları Havadan Gamma Ray Spektrometri Etüdü Raporu. MTA rapor No. 9146, Ankara.
- Barasch, G.E. and Beers, R.H. 1971, Aerial Radiological Measuring Surveys of the Nuclear Fuel Service Plant, West Valley, Newyork, 1968 Rep, ARMS 68-6-9, EG and G. inc., Las Vegas.
- Charbonneau, B.W. 1988, Spectrometric and magnetic anomalies associated with Cu-U mineralization, Faber Lake Volcanic Belt, District of Mackenzie, NWT. Paper 88-1C, Geol. Surv. Of Canada
- Charbonneau, B.W. and Swettenham, S.S. 1986, Gold occurrence in radioactive calc silicate float at Sandybeach Lake, Nueltin Lake Area, District of Keewatin, Paper 86-1a, Geological Survey of Canada.
- Clark, S.P. Jr, Peterman, Z.E. and Heiers, K.S. 1966 Abundance of Uranium, Thorium and Potassium. Handbook of Physical Constants. Geol. Sec. of Am. memorial 97.
- Darnley, A.G. and Grasty, R.L. 1971, Mapping from the air by gamma ray spectrometry. Can. Inst. of Mining and Metallurgy. Geochemical Explo. 11, 1-16.
- Grasty, R.L. 1975, Uranium measurement by airborne gamma-ray spectrometry. Geophysics 40, 503-519.
- Grasty, R.L. 1979, Gamma-ray Spectrometric Methods in Uranium Exploration-Theory and Operational Procedures. Economic Geology Report 31, Geological Survey of Canada.
- Grasty, R.L. 1988, The relationship of geology to radon in homes. GSC forum, Geological Survey of Canada (unpublished)
- Grasty, R.L., Glynn, J.E. and Grant, J.A. 1985, The analysis of multichannel airborne gamma-ray spectra, Geophysical, 2611-2620.
- Grasty, R.L. and Multala, J. 1991, A correlation technique for separating natural and man-made airborne gamma-ray spectra, Paper 90-1D, Geological Survey of Canada
- Gross, W.H. 1952, Radioactivity as a guide for ore. Economic Geology 47, 722-742.
- Harshman, E.N. 1974, Formation of uranium ore deposits. Sm-183-4, IAEA, Vienna.
- Hutchison, R.D., Lucarelli, L.B. and Hartman, R.R. 1962, Türkiye'nin Münteçap Sahalarında Maden Kaynaklarının Kıymetlendirilmesi Hakkında İstikşaf Programı. MTA Rapor, Ankara.
- IAEA 1979, Gamma-Ray Surveys in Uranium Exploration. Technical Report Series No. 186, Vienna.
- IAEA 1991, Airborne Gamma Ray Spektrometre Surveying Technical Report Series No. 323, Vienna.

- Kaplan, H. 1976, Eskişehir-Sivrihisar-Kızılcaören köyü Güneyi Nadir Toprak Elementleri-Toryum Kompleks Yatağı Üzerine 1975 Yılında Yapılmış Çalışmalar Hakkında ara Rapor. MTA Rad. Min. ve Köm. Dairesi rapor No 464, Ankara.
- Kerr, R.A. 1988, Indoor radon-the deadliest pollutant. Sci. Am. 240, 606-608.
- Moxam, R.M., Foote, R.S. and Bunker, C.M. 1965, Gamma ray spectrometer studies of hydrothermally altered rocks. Economic Geology, 60, 653-671
- Pitkin, J.A. 1968, Airborne measurements of terrestrial radioactivity as an aid to geological mapping. Paper 516-F, USGS.
- Potts, M.J. 1976, Computer methods for geological analysis of radiometric data, SM-208-46, IAEA, Vienna.
- Shideler, G.L. and Hinze, W.J. 1971, Utility of carbonne radiometric surveys in petroleum exploration of glaciated regions. Geophysical Prospecting of 19, 568-585.
- Telford, W.M., Geldart, L.P., Sherriff, R.E. and Keys, D.A. 1976, Applied Geophysics, Cambridge Un. Press, Cambridge.
- Wallin, B. 1984, A Pilot Airborne Gamma-Ray Survey in Yozgat ve Bayburt Area, Anatolia, Turkey. Riso, DK-4000, Roskilde, Denmark.