

DİSK KAYNAK GEOMETRİSİ İÇİN 30-670 keV GAMA IŞINI ENERJİ ARALIĞINDA CdZnTe DETEKTÖRÜNÜN DEDEKSİYON VERİMİ

Haluk YÜCEL^{a,1}, Ayşe Nur SOLMAZ^b, Asena KURT^b, Tolga İNAL^b ve Doğan BOR^b

^aTürkiye Atom Enerjisi Kurumu, Beşevler Yerleşkesi, 06100 Tandoğan, Ankara, haluk.yucel@taek.gov.tr,

^bAnkara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü(A.Ü. NBE), 06100 Tandoğan, Ankara, ansolmaz@ankara.edu.tr, kurt.asena@hotmail.com, tinale@eng.ankara.edu.tr, dogan.bor@eng.ankara.edu.tr

(Geliş/Received: 06.11.2007; Kabul/Accepted: 08.02.2008)

ÖZET

Bu çalışmada, dedektör hassasiyeti, temelde iki parametreye; enerji çözme gücü ve dedeksiyon verimine bağlı olduğundan, belirli bir enerji aralığında CdZnTe dedektörlerin spektroskopik özellikleri incelenmiştir. Bu amaçla, radyoaktif disk kaynaklar kullanılarak bir 5x5x5 mm³ CdZnTe dedektörle elde edilen gama spektrumlarının analizinden enerji çözme gücü (yarı yükseklikteki tam genişlik, YYTG cinsinden) ve pik biçimleri (pik-vadi oranı, P/V cinsinden) belirlenmiştir CdZnTe dedektörünün disk kaynak geometrisindeki dedeksiyon verimi, 30-670 keV enerji aralığında ölçülmüştür. Bu enerji aralığı, medikal görüntülemelerde kullanılan radyoizotopların, nükleer alandaki zenginleştirilmiş uranyum, plütonyum izotoplarının ve kullanılmış yakıt içindeki aktivasyon/fisyon ürünlerinin yayınladığı X- ve gama ışınlarının hemen hemen tümünü kapsar. Belirli bir mesafeye yerleştirilen disk kaynaklar ile CdZnTe dedektör için gama dedeksiyon veriminin enerjiye bağlılığını gösteren yarı-ampirik fonksiyon önerilmiştir. Ancak ölçülen verim değerlerinde, özellikle yüksek enerjilerde, 200-670 keV aralığında önemli derecede düşmeler gözlenmiştir. Bu durum, esas olarak kristal kusurlarına bağlı olan ve yükün etkin toplanamamasının bir sonucu olarak, fotopik alanlarında kayıpların olduğunu göstermektedir. Bunlar, geleneksel CdZnTe dedektörlerin bilinen yetersizlikleridir.

Anahtar Kelimeler: CdZnTe dedektör, disk kaynak, enerji çözme gücü, dedeksiyon veya fotopik verimi, gama ışını spektrometrisi.

DETECTION EFFICIENCY OF CdZnTe DETECTOR IN THE RANGE OF 30-670 keV GAMMA RAY ENERGY FOR A DISC SOURCE GEOMETRY

ABSTRACT

The present study is concerned with the measurement of the spectroscopic properties of the CdZnTe detectors in a particular energy range since its sensitivity depends mainly on two parameters: energy resolution and detection efficiency. Thus, the energy resolution (in terms of FWHM) and the peak shape (in terms of peak-to-valley (P/V) ratio) were determined from the gamma-ray spectra measured with a 5x5x5 mm³ CdZnTe detector using radioactive disk sources. The detection efficiency of a CdZnTe detector for a disk source geometry was measured in the energy range of 30-670 keV covering almost most of the X-ray and gamma-ray emissions from the radioisotopes medically used in imaging, the enriched uranium and plutonium isotopes, and some activation/fission products in the spent fuel. A semi-empirical function was proposed to describe the energy dependence detection efficiency of CdZnTe detector for the disk source geometry at a given distance. However, the remarkable decreases in the measured efficiency curve for the detector are found especially in higher energies, above 200 keV up to 670 keV. This indicates that there are the losses in the peak areas associated with incomplete charge collection due to mainly crystal imperfections which can be attributed to the drawbacks existed in the conventional CdZnTe detectors.

Keywords: CdZnTe, detector, disk source, energy resolution, detection or photopeak efficiency, gamma ray spectrometry.

¹ Bu yazar, araştırma ve eğitim etkinliklerinde bulunmak üzere A.Ü. NBE’de görevlidir.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde, medikal görüntüleme ve nükleer spektroskopide uygulamalarında X-ışını veya gama ışını dedeksiyonu için yüksek verimli ve yüksek çözme güçlü sintilatörlere veya yarı iletken dedektörlere gereksinim duyulmaktadır. Ancak bu iki temel parametreyi aynı anda istenilen düzeyde sağlayan bir dedektör uygulaması henüz yoktur. Bu nedenle, uygulama gereksinimine göre yeni tip dedektörlerin geliştirilmesi etkinlikleri hızla devam etmektedir [1]. CdZnTe dedektörler, yüksek kararlılık, istenilen enerji aralığındaki fotonlara karşı düzgün bir tepki (uniformity of response), yüksek hassasiyet (sensitivity) ve geniş dinamik aralığı gibi özellikleri ile dikkat çekmektedirler. Özellikle NaI(Tl) sintilatörlü gama kameralara kıyasla, CdZnTe yarı iletken dedektörlerin kullanımı, medikal görüntüleme için sensör kalınlığı azaldıkça artan uzaysal çözünürlüğü nedeniyle de yaygınlaşmaktadır [2,3].

Oda sıcaklığında çalışabilme ortak özelliğine sahip bu iki farklı tip dedektörün, enerji çözme güçleri; ^{137}Cs izotopunun 661,6 keV gama ışını piki ve yine tıpta sıkça kullanılan $^{99\text{m}}\text{Tc}$ izotopunun 140,5 keV'lik gama ışını piki dikkate alınarak, Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Bir CdZnTe yarı iletken dedektör ve bir NaI(Tl) sintilasyon dedektörünün enerji ve uzaysal çözme güçleri (Energy and spatial resolutions of a CdZnTe semiconductor and a NaI(Tl) scintillation detector)

	Cd _{0,9} Zn _{0,1} Te	NaI(Tl)
Özellik	dedektör ¹⁾	dedektör ²⁾
Enerji aralığı	30 keV -10 MeV	10 keV -10 MeV
Uzaysal çözünürlük	~0,2-0,4 mm	3-6 mm
Enerji çözme gücü	<u>YYTG³⁾ ve % olarak</u>	
140,5 keV ($^{99\text{m}}\text{Tc}$) için	4-6 keV (% 3-4,3)	~15 keV (% 10,7)
661,6 keV (^{137}Cs) için	16-26 keV (% 2,5-4)	60-70 keV (% 9-11)

¹⁾ Ticari olarak üretilen ve %10 Zn içeren standart CdZnTe kristal.

²⁾ Standart, 7,65 cm x 7,65 cm NaI(Tl) sintilatör kristali.

³⁾ YYTG: Yarı Yükseklikteki Tam Genişlik.

Mevcut teknolojiye göre, CdZnTe dedektörlerin enerji çözme güçleri, bazı karakteristiklerine göre küçük farklılıklar göstermekle birlikte, NaI(Tl) sintilatörlere kıyasla 2-3 kat daha iyidir. Diğer taraftan, göreceli olarak ucuz olan NaI(Tl) sintilatör teknolojisine dayanan gama kameralar, 3-6 mm'lik uzaysal çözünürlüğe sahiptirler. CdZnTe dedektörlerin uzaysal çözünürlükleri ise 0,2-0,4 mm aralığında olup, mm altı mertebeye inebilmektedir ve NaI(Tl) dedektörlerden yaklaşık 10-15 kat daha iyidir [3,4].

Medikal izlemede ve görüntülemede, insan damarlarına enjekte edilen radyonüklit izleyicilerin

yayınladığı gama ışınları, günümüzde en yaygın olarak, foto çoğaltıcı tüplere bağlantılı NaI(Tl) sintilatörlerden oluşan gama kameralar ile dedekte edilmektedir. Bununla birlikte, sintilatörlü gama kameralarının enerji çözünürlüğünün düşük olmasının yanı sıra, bu kameralarla elde edilen görüntü kontrastı, fotoelektrik etkiyle soğurulan gama ışınlarından zor ayrılabilen fotopike yakın Compton platosundan, fotopikin nicel sayım değerlerinin etkilenmesiyle azalır [5]. Enerji ve uzaysal çözünürlük bağlamında, CdZnTe dedektörlere bağlantılı gama kameralarının, sintilatörlere göre daha üstün olduğu gözükmemektedir. Ancak, CdZnTe dedektörleri bu ilgi çekici özelliklere sahip olmalarına karşın, örneğin, gama dedeksiyon veriminin, NaI(Tl) sintilatörlerinin verimine kıyasla oldukça düşük olması, uygulamada önemli bir dezavantajdır. Benzer şekilde, CdZnTe dedektörler, tek elementli Si ve Ge gibi yaygın yarı iletkenlerle kıyaslandığında, yine bazı önemli yetersizlikleri söz konusudur. Bunlardan en önemlisi, CdZnTe dedektörlerinde,deşiklerin (hole) yük toplanma veriminin elektronlara göre oldukça düşük olmasıdır. Bilindiği üzere, yük taşıyıcıların elektrotlar üzerinde toplanması sürecinde, bunlar elektriksel olarak aktif olan kristal kusurlarından (defects) önemli derecede etkilenirler ve bu etki elektron vedeşiklerin hareketlilik (mobility) ve ömürlüğünün çarpım değerleriyle ilişkilidir [6]. Bu aktif kusurlar, CdZnTe dedektör performansının kötüleşmesine neden olacak şekilde etkin yük toplanmasını azaltan tuzaklar veya yük taşıyıcıların yeniden birleşme (recombination) merkezleri olarak görev yaparlar [7,8]. Özellikle yük taşıyıcıların mobilitelerinin çok farklı olması sonucu, dedektördeki bu tuzaklanma merkezleri, kararlılık problemlerine de neden olur, öyle ki oldukça düşük kabul edilen dedektör kaçak akımları üzerinde enerji band genişliğinden ziyade bu kristal kusurları baskın olmaya başlar [9]. Deşikler, elektronlardan 10-30 kat daha düşük mobiliteye sahiptirler [10,11] ve bu nedenle kristal içinde daha yavaş sürüklenirler, elektroda ulaşmadan önce, kristal içindeki sürüklenme zamanlarının (drifting time) artmasıyla tuzaklanma olasılıkları da artar. Bu tam toplanamayandeşik yükü olayının etkisiyle, CdZnTe dedektörlerinde gözlenen fotopiklerin sol tarafa genişleyerek kuyruklanmasının yanı sıra, sinyal genliklerinde de kayıplar olur ve elde edilen spektrum kalitesi kötüleşir [12].

CdZnTe dedektörlerin, normal olarak, -30°C ile +50°C aralığındaki saha şartlarında ve özellikle uzay, astrofizik ve nükleer spektroskopide araştırmalarında, medikal görüntüleme, nükleer madde güvenliği denetimi (safeguard) ve sanayi uygulamalarında kullanımları giderek artmaktadır. Bunların tercih edilme nedenleri, temelde CdZnTe yarı iletken malzemesinin kendine özgü bazı özelliklerine bağlıdır. Bunlar aşağıda özetlenmiştir:

1) Dedektörlerin oda sıcaklığında çalışabilmesi, sıvı azot veya elektrikle soğutma gereksinimi olmadığı için çok küçük boyutlarda (compact) yapılabilir olmaları, böylece konumsal sınırlayıcı alanlarda da kullanılabilirliklerine olanak sağlar.

2) CdZnTe kristalin yüksek dirençli (5×10^{10} - 10^{11} Ω cm) olması sonucu geniş bir enerji band aralığına (1,572-1,70 eV) sahip olması ve dolayısıyla düşük düzeyde kalan kaçak akımların ($<2,5$ nA) oluşması avantajını sağlar. Düşük kaçak akımlar nedeniyle, dedektörde düşük gürültü oluşması ve bunun sonucunda da sinyal/gürültü oranının yüksek elde edilmesi, CdZnTe için diğer bir önemli üstünlüktür.

3) Düşük kaçak akımların olmasının diğer bir sonucu ise, CdZnTe dedektörler için elektronik gereksinimi, çok daha az enerji harcayan minyatürize entegre (integrated circuit) devreli elektronik elemanlar kullanılarak yapılmasına olanak verir ve böylelikle dedektörlerin çok küçük boyutlu, elde taşınabilir üretilmesini mümkün kılar.

4) CdZnTe kristal, yüksek yoğunluklu ($5,78$ - $5,9$ g cm⁻³) ve yüksek etkin atom numaralı, ($Z_{\text{eff}}=49,1$ - $49,6$) olması nedeniyle, radyasyona karşı yüksek durdurma gücüne sahiptir ve bunun sonucunda radyasyon soğurmasında daha etkindir.

Nükleer madde güvenliği denetiminde, tüketilmiş (depleted) veya zenginleştirilmiş (enriched) uranyumun, plütonyumun ve aktivasyon/fisyon ürünleri içeren kullanılmış nükleer yakıtların Ge dedektörlere dayanan yüksek çözme güçlü X-ışını veya gama spektroskopisi rutin olarak yapılmaktadır [13,14,15]. Ancak bu dedektörlerin -196 °C sıvı azot sıcaklığında soğutulması gereği, nükleer sayım sistemlerinin boyutlarının büyük olmasına neden olur ki, taşınabilmesinden daha çok sahadaki uygulamada hem sıvı azot temini, hem de dar alanlarda Ge dedektör boyutu önemli bir sorun oluşturabilmektedir. CdZnTe dedektörlerin, Ge dedektörlere bir alternatif olarak, nükleer maddenin sahadaki tanımlanmasında ilk müdahale sırasındaki analizinde daha pratik oldukları açıktır. Ayrıca CdZnTe dedektörlü sistemler, çok hafif ve kolayca elde taşınabilir, oldukça küçük boyutlu, gerektiğinde uzaktan kontrollü çalışabilen X- veya gama ışını sayım sistemleri olarak kullanımları da elverişlidir. [16]. Özellikle bir radyasyon kazası durumunda radyoaktivite düzeyi yüksek alanlarda ve kullanılmış nükleer yakıtların içerdiği fisyon/aktivasyon ürünlerinin ölçümleri gerektiğinde, CdZnTe dedektörler, yüksek aktivite nedeniyle erişilmesi sınırlı ve oldukça dar aralıklarda etkin olarak kullanılabilirlerdir [17,18]. Benzer şekilde, minyatür CdZnTe dedektörlerin tıptaki medikal görüntüleme ve astrofizikteki çok hızla artan uygulamalarının yanısıra, özel bölünebilir nükleer madde, kullanılmış nükleer yakıt ve nükleer atıkların tanımlanmasında uygulanan spektrometrik ölçümler için kullanımları da artan bir hızla yaygınlaşmaktadır [19,20]. CdZnTe dedektörler, uranyum, plütonyum ve

bazı diğer aktinitlerin yüksek enerjili X-ışınlarını ve analizlenebilir gama ışınlarını, yüksek durdurma güçleri nedeniyle dedekte edebildiklerinden, özellikle düşük enerji bölgelerinde (<500 keV), oldukça küçük kristal boyutlarına göre oransal olarak iyi sayılabilecek dedeksiyon verimlerine sahiptirler.

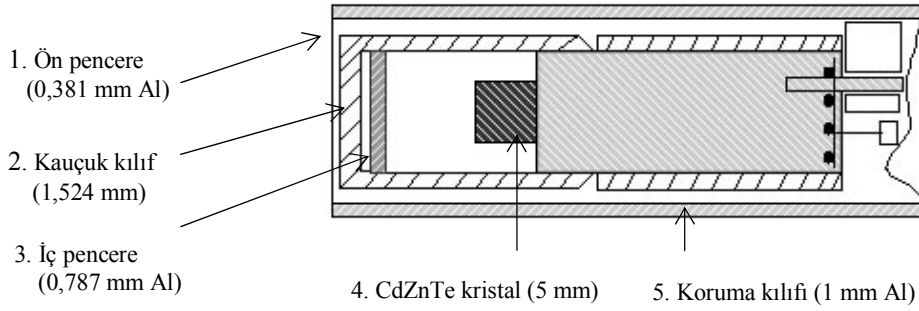
Bu çalışmada, CdZnTe dedektörlerin hassasiyetinin, temelde iki parametreye; enerji çözme gücüne ve dedeksiyon verimine (mutlak veya fotopik verimi) bağlı olmasından dolayı, ilgilenilen bir enerji aralığında dedektörün spektroskopik özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle, literatürde hiç çalışılmamış radyoaktif disk kaynak geometrisinde, bir $5 \times 5 \times 5$ mm³ CdZnTe dedektörle elde edilen gama spektrumlarının analizi yapılarak enerji çözme gücü (YYTG cinsinden) ve pik biçimleri (pik-vadi oranı, P/V cinsinden) belirlenmiştir. İlgilenilen enerji aralığında (30-670 keV), standart radyoizotop kaynakların yayınladığı X- ve gama enerjileri kullanılarak dedektörün enerji çözme gücünün enerji ile değişimi de incelenmiştir. Ayrıca, disk kaynak-kare yüzeyli dedektör geometrisi için katı açısı ifadesi türetilerek, ölçülen fotopik verimi ile dedektör özgül verimi ilişkilendirilmiştir. Seçilen bu enerji aralığı (30-670 keV), tıpta teşhis amaçlı kullanılan PET ve SPECT radyoizotoplarının yayınladığı X- ve gama fotonları ile zenginleştirilmiş uranyum, plütonyum izotopları ve çoğu fisyon/aktivasyon ürünü nüklitlerin yayınladığı fotonların enerjilerinin hemen hemen tümünü kapsayan bir enerji aralığıdır. Ölçülen verim değerlerinden enerjiye bağlı fotopik verim eğrisinin değişimi, yarı-ampirik bağıntılar öngörülerek incelenmiştir.

2. DENEYSEL (EXPERIMENTAL)

Bu çalışmada, $5 \times 5 \times 5$ mm³ kristal hacimli bir Cd_{0,9}Zn_{0,1}Te dedektör (eV Products Inc. SPEAR: Single Point Extended Area Radiation Detector, S/N: B2076) kullanılmıştır [10]. Dedektör, 12 mm (çap) x 89 mm (uzunluk) boyutundaki bir koruma kılıfı içine düşük gürültü özelliğine sahip bir ön yükselteç ile birlikte konularak oluşturulmuştur (Şekil 1). Dedektörün çevresi, ortamdaki gelebilecek doğal fon gama ışınlarına karşı 5 cm Pb ile zırhlıdır.

Radyoizotop kaynakların uyarmasıyla oluşabilen kurşun floresans X-ışınlarının spektruma etkisini azaltmak için kurşunun iç tarafı 1 mm Cu levha ile kaplanmıştır.

Dedektör çalışma gerilimi, standart NIM üniteden enerjisini sağlayan oldukça kararlı bir güç kaynağından (Canberra 3102 D, akım ve gerilimi: 1mA, ± 2 kV), +1000 Vdc olarak sağlanmıştır. Dedektörün önyükselteç çıkış sinyali, bir spektroskopi yükseltecinde (Canberra 2022) 1 μ s puls şekillendirme (pulse shaping) zamanı uygulanarak işlendikten sonra, 16K dönüştürme kazançlı ve hafızalı ADC/MCA modülün (Canberra Multiport II), 8K kanal ADC



Şekil 1. CdZnTe dedektörün şematik görünümü (A schematic diagram of CdZnTe detector-1. Front window, 2. Rubber galosh, 3. Inside window, 4. CdZnTe crystal, 5. Housing material and 6. Preamplifier)

dönüştürme kazancında sayılara dönüştürülerek, çok kanallı analizörde 2048 kanal MCA'de spektrum olarak kaydedilmiştir. Uygun kazanç ayarı yapıldıktan sonra, kanal başına düşen enerji 0,277 keV olarak elde edilmiştir. Deneyde kullanılan standart kaynaklar Canberra Inc. (ABD)'den temin edilmiştir. Kaynak aktiviteleri $\pm\%5$ doğruluktadır ve bunlar: ^{57}Co (10,49 μCi), ^{109}Cd (9,19 μCi), ^{133}Ba (9,22 μCi), ^{137}Cs (9,22 μCi), ^{152}Eu (0,949 μCi), ^{241}Am (9,761 μCi)'dır. Verilen aktivite değerleri, %95 güven seviyesindedir. Ancak, ^{241}Am aktivitesi, sertifikasında %99'luk bir güven seviyesinde $\pm\%3$ 'lük belirsizlikle verilmiştir.

YYTG (keV) değeri, ilgilenilen enerjideki çözme gücünü göstermek üzere, diğer dedektörlerde de uygulandığı gibi, her fotopikin yaklaşık bir Gauss eğrisi olduğu varsayılarak, yarı maksimumundaki tam genişliğini hesaplama standart prosedürüne göre belirlenmiştir [21,22]. Sistemin enerji çözme gücü, $(\%) = \frac{\text{YYTG}}{E} \times 100$ eşitliğinden basitçe % olarak da ifade edilebilir. Burada E (keV), ilgilenilen pikin enerjisidir. Belirlenen kanal sayısı, sistemin enerji kalibrasyon sabiti 0,277 keV/kanal ile çarpılarak, enerji birimine de dönüştürülebilir. Diğer dedektörlerde (Si, HPGe, NaI), fotopik (full-energy peak) biçimini nicel olarak ifade etmek için, genelde pikin tepe sayımının, Compton kenarının başladığı bölgedeki sayımlara oranı (Peak-to-Compton, P/C) olarak ifade edilir. Ancak piklerin sol tarafa kuyruklanması fazla olan ve yeni bir pikin başladığı, oluşan vadisinden gözlenen CdZnTe gibi dedektörlerde, pik-vadi oranı (peak-to-valley, P/V) terimiyle ifade edilmesi daha yaygındır. Bu şekilde, fotopikin asimetrisi de hesaba katılmış olmaktadır. P/V oranı, her pikin genişliği YYTG (kanal sayısı olarak) belirlendikten sonra, en yüksek sayımının olduğu pikin tepe noktasından itibaren, $2 \times \text{YYTG}$ kadar pikin sol tarafındaki vadisine inilerek oradaki üç kanaldaki en düşük sayımların ortalaması alınarak, vadisinin en çukur noktası tespit edilir. Sonra, pikin tepe noktasındaki sayım değeri, vadisindeki sayım değerine bölünerek P/V oranı hesaplanır [23].

Dedektör verimi ise, nicel analizler için gerekli olan ve dedektörün spektroskopik performansını gösteren

diğer önemli bir parametredir. Herhangi bir foton enerjisinde, E ve belirli bir kaynak-dedektör mesafesindeki, x dedektörün özgül (intrinsic) verimi, $\varepsilon_{\text{int}}(E, x)$:

$$\varepsilon_{\text{int}}(E, x) = \frac{N_k}{N_g} \quad (1)$$

eşitliği ile ifade edilir. Burada, N_k : dedektörde belirli bir deney süresinde (t_s) kaydedilen foton pulslarının sayısı ve N_g : dedektör yüzeyine gelen fotonların sayısıdır ve herhangi bir nokta kaynak için aşağıdaki

$$N_g = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{A \cdot t_s \cdot S}{x^2} \quad (2)$$

eşitlikten hesaplanabilir. Burada, A: radyoaktif kaynağın ölçme anındaki aktivitesi (Bq), t_s : deney süresi (s), S: dedektör alanı (cm^2) ve x: kaynak ile dedektör arasındaki mesafedir (cm). Ancak uygulamada, nicel analiz için dedektörün özgül (intrinsic) verimi, $\varepsilon_{\text{int}}(E, x)$ yerine, özgül verim ile de doğrudan ilişkili olan dedeksiyon veriminin (absolute or full-energy peak efficiency), $\varepsilon_{\text{abs}}(E, x)$ bilinmesine gereksinim duyulur. Bu nedenle, ilgilenilen geometrideki tüm etkileri hesaba katabilmek için genellikle radyoaktif standartlar kullanılarak, deneysel olarak ölçülür. Bu amaçla, ölçüm sisteminin dedeksiyon verimi, $\varepsilon_{\text{abs}}(E, x)$ için dedektörün simetri ekseninde belirli bir x mesafesine yerleştirilen herhangi bir kaynakla elde edilen spektrumdan;

$$\varepsilon_{\text{abs}}(E, x) = \frac{C(E, x)}{A \cdot P_\gamma(E)} \quad (3)$$

eşitliği ile elde edilebilir. Burada $C(E, x)$: E enerjisindeki fotopikin net sayımından belirlenen sayım hızı (sayım/s), A: ölçme başlangıcındaki kaynak aktivitesi (Bq) ve $P_\gamma(E)$: ilgilenilen E enerjili fotonun yayınlanma olasılığıdır. Diğer taraftan, dedektörün dedeksiyon verimi, $\varepsilon_{\text{abs}}(E, x)$, dedektör yüzeyine dik gelen foton aydınlanması olduğu varsayılırsa, özgül verimi, $\varepsilon_{\text{int}}(E, x)$ ile dedektör-kaynak geometrisine bağlı katı açının, $\Omega_E(x)$ çarpımıyla ilişkilidir [21]:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{\text{abs}}(E, x) &= \Omega_E(x) \times \exp(-\mu_{\text{hava}}(E) \cdot t_{\text{hava}}) \\ &\times \exp(-\mu_{\text{Al}}(E) \cdot t_{\text{Al}}) \cdot \exp(-\mu_k(E) \cdot t_k) \\ &\times [1 - \exp(-\mu_{\text{det}}(E) \cdot t_{\text{det}})] \times p_1 \\ &\equiv \frac{\text{sabit}}{4\pi x^2} \cdot \varepsilon_{\text{int}}\end{aligned}\quad (4)$$

Burada t (cm), sırasıyla fotonların geçtiği madde ortamlarının (hava, pencere, Al, kauçuk kılıf, k) ve sonunda soğurulduğu dedektörün kalınlığını göstermektedir. μ_i (cm^{-1}), bu maddeler için lineer azaltma (attenuation) katsayılarıdır. Eşitlik (4)'deki üstel terimler, fotonların hava, Al pencere, kauçuk kılıf (k) içinden geçtiği maddelerin transmisyon katsayılarıdır. Ancak bu Eşitlik (4)'ün son terimi $P = [1 - e^{-\mu_{\text{det}} \cdot t_{\text{det}}}]$ ise, CdZnTe dedektöründe esas itibariyle fotoelektrik etki ile meydana gelebilecek foton soğurulmasını temsil eder. Burada p_1 , fotopik oluşmasına katkı vermeyen etkileşimler (saçılan, kaçan fotonlar vb.) için bir olasılık katsayısıdır. İlgili maddelerin kütle soğurma katsayıları, μ/ρ (cm^2g^{-1}), NIST XCOM veri tabanından hesaplanabilir [24]. Şekil 1'deki kare yüzey alanlı dedektöre dik ve bunun simetri eksenine yerleştirilen dairesel aktif yüzeyli bir disk kaynak geometrisi için Eşitlik (4)'de yer alan katı açı, $\Omega_E(x)$ ise, herhangi bir x mesafesinde yazılan integralin seriye açılan Bessel fonksiyonları sonucunda elde edilebilir [25]:

$$\begin{aligned}\Omega_E(x) &= \frac{\alpha^2}{\pi} \cdot \left[1 - \frac{3}{4}\beta^2 - \alpha^2 + \frac{1}{8}\beta^4 + \frac{7}{6}\alpha^4 - \frac{35}{64}\beta^6 - \frac{35}{8}\beta^4\alpha^2 + \right. \\ &\quad \left. \frac{5}{2}\beta^2\alpha^2 - \frac{49}{8}\beta^2\alpha^4 - \frac{3}{2}\alpha^6 \right]\end{aligned}\quad (5)$$

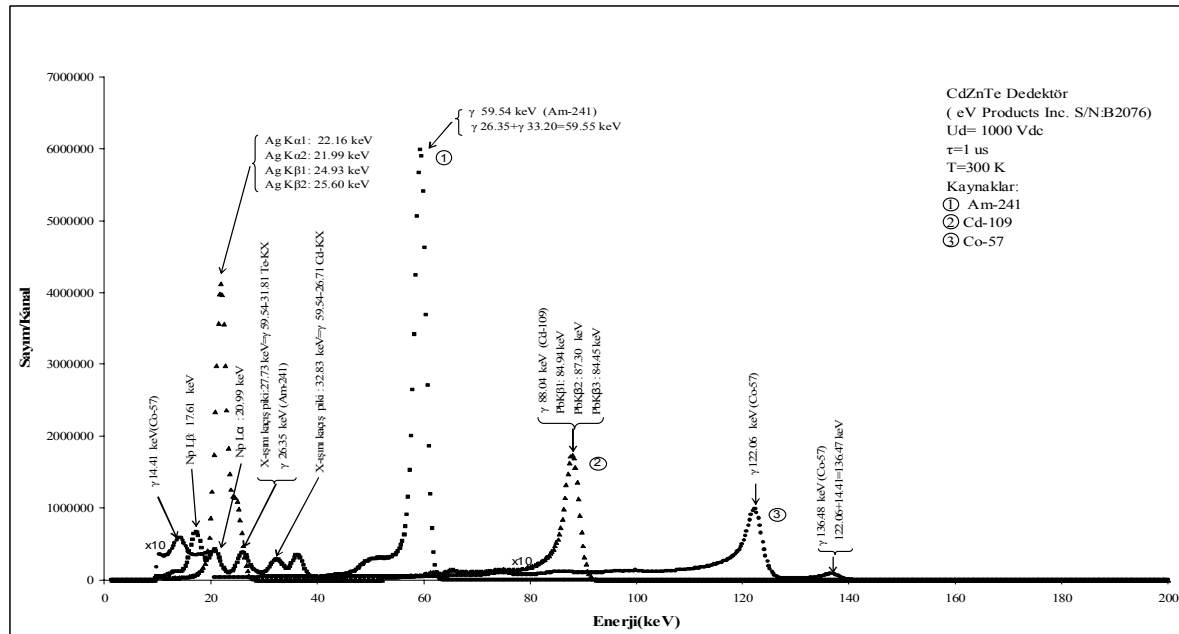
Burada, a (mm), CdZnTe kristal yüzeyinin (kare) bir kenar uzunluğu ve R (mm) disk kaynağın yarı çapı olmak üzere, $\alpha=a/2x$ ve $\beta=R/x$ 'dir. Kullanılan standart kaynakların aktif yüzeyinin yarı çapı, $R=2,5$ mm ve dedektör kristal yüzeyinin bir kenar uzunluğu, $a=5$ mm ve bu durumda sırasıyla kaynakların aktif yüzey alanları, $19,625$ mm² ve dedektörün ışınlanan yüzeyinin alanı, 25 mm² olduğundan, dedektör yüzey alanı yaklaşık %27,4 daha büyüktür. Gerçekte, Eşitlik (5)'deki katı açı ifadesindeki köşeli parantez içindeki ilk terimden sonraki terimler, disk kaynak-kare dedektör etkisini göstermektedir. Bu terimler ihmal edilirse, buradan hesaplanacak katı açı değeri, Eşitlik (2)'deki nokta kaynak durumuna çok yakın çıkar. Bu nedenle, mevcut sayım geometrisinde, dedektör yüzeyinde ($x=0$ mm) ölçüm yapılsa dahi, dedektörün kristali ile pencere arasındaki mesafe, yapım cisminin verdiği göre $8,38 \pm 0,76$ mm olduğundan [10], katı açı $\Omega_E(0)=2,4518 \times 10^{-2}$ olur ve dedektörün, gelen fotonların büyük bir kesrini algılama olasılığı her zaman vardır. Bu çalışmada ise en yakın ölçüm mesafesi olarak $x_0=5$ mm olarak seçilmiştir ve $x=5$ mm'de hesaplanan katı açı, $\Omega_E(5)=1,0479 \times 10^{-2}$ 'dir.

Dolayısıyla dedektör yüzeyinde, yeterli foton akısı her zaman sağlanmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Bu çalışmada, CdZnTe dedektör ile çeşitli radyoizotop kaynakları (⁵⁷Co, ¹⁰⁹Cd, ¹³³Ba, ¹⁵²Eu ve ²⁴¹Am) kullanılarak elde edilen puls yüksekliği spektrumları elde edilmiştir. Örnek olarak, ⁵⁷Co, ¹⁰⁹Cd ve ²⁴¹Am ayrı ayrı olmak üzere her biri 100 000 s süreyle alınan gama spektrumları birlikte Şekil 2'de gösterilmiştir. Şekil 2'deki spektrumlarda ilgilenilen 59,54 keV (²⁴¹Am), 88,04 keV (¹⁰⁹Cd), 122,06 ve 136,48 keV (⁵⁷Co) piklerin yanında istenmeyen diğer pikler (interference peaks) olarak, a) eşzamanlı çakışma (coincidence) nedeniyle oluşan toplam (summing) enerji pikleri, b) CdZnTe dedektörün kristal yapısındaki elementlerin Cd K-kenarı: 26,71 keV ve Te K-kenarı: 31,81 keV nedeniyle oluşan X-ışını kaçış pikleri ile c) kurşun fluoresans X-ışınları (Pb K_{α1,2}: 74,9 ve 72,8 keV ile Pb K_{β1,2,3}: 84,9; 87,3 ve 84,5 keV) pikleri de görülmektedir. Özellikle verim değerlerinin belirlenmesinde, eşzamanlı çakışma nedeniyle oluşabilecek puls yığılma etkilerini (true coincidence summing effect) hesaba katacak bir düzeltme yapılmamıştır. Ancak bu etkiler, hem radyoizotopun bozunma şemasına hem de kaynak-dedektör geometrisine bağlı değiştiğinden [21,22], bu etkileri makul en düşük düzeyde tutabilmek için (örneğin, kaynak aktiviteleri belirsizlik düzeyinden daha az, < %5), kaynaklar dedektörden farklı uzaklıklarda yerleştirilerek ölçümler gerçekleştirilmiştir. Böylelikle, eşzamanlı yığılma olaylarındaki geometri etkisi (mesafe etkisi) en aza indirilmiştir. Bununla birlikte, bozunma şemaları ve spektrumlar incelenerek kullanılan radyonüklitlerin bazı piklerinde, sistemin mevcut karakteristik enerji çözme gücü ile ayırt edilemeyen çeşitli toplam piklerin sayım kayıplarına ya da artışlarına neden olduğu da gözlenmiştir.

Örneğin; yığılma etkisi (summing) yapan X- ve gama ışınlarının toplam pikleri; ¹³³Ba için 34,1+53,2=87,3 keV, 53,2+223,2=276,4 keV ile 81+302,8=383,8 keV; ¹⁵²Eu için 39,5+121,8=161,3 keV, 39,5+344,4=383,9 keV, 121,8+244,8=366,6 keV; ²⁴¹Am için 26,3+33,2=59,5 keV ve ⁵⁷Co için 14,4+122,1=136,5 keV ifade edilebilir. Ayrıca, elde edilen gama spektrumlarında, belli başlı X-ışını kaçış pikleri olarak, ¹³³Ba'dan kaynaklanan 80,99-31,81=49,18 keV, 80,99-26,71=54,28 keV, ¹⁰⁹Cd'den kaynaklanan 88,04-31,81=56,24 keV ve ⁵⁷Co'den kaynaklanan 122,06-31,81=90,25 keV'lik pikler de gözlenmiştir. Bu çalışmada, tüm kaynaklar için elde edilen spektrumlardaki her fotopikin asimetri derecesini gösteren P/V oranları hesaplanarak, ortalama değerleri ve değişim katsayıları Çizelge 2'de verilmiştir. Foton enerjisi arttıkça, pikin sol tarafındaki vadinin iyice çukurlaşması sonucunda P/V oranlarının azaldığı görülmektedir. Bunun nedeni ise yüksek enerjili fotonun



Şekil 2. CdZnTe dedektör ile alınan ^{57}Co , ^{109}Cd ve ^{241}Am gama spektrumları (The gamma-ray spectra of ^{57}Co , ^{109}Cd and ^{241}Am measured with a CdZnTe detector)

kristalin daha derinlerinde etkileşip oluşturduğu elektriksel yükün önemli belirli bir kesrinin tuzaklanarak, elektrotlara zamanında ulaşamamasıdır. Bunun sonucu oluşan sinyal kayıplarına bağlı sayım değerlerindeki düşmeler, vadi çukurlarından belirginleşmektedir. Bu durum literatürde, CdZnTe dedektörlerinde, tam toplanamayandeşik yükü (incomplete hole charge collection) etkisinin bir sonucu olduğu şeklinde rapor edilmiştir [7,8]. Diğer taraftan, CdZnTe dedektörlere özgü elektron vedeşiklerin mobilite-ömür çarpımı ($\mu\tau$) değerlerinin oranlarının birbirinden çok farklı olması da (örneğin; $(\mu\tau)_e/(\mu\tau)_h$ oranları: 150-265), bu dedektörlerdekideşik yükü toplanma etkinliğinin oldukça yetersiz kaldığına delil oluşturmaktadır [10].

CdZnTe dedektör sisteminin performansını karakterize eden diğer bir parametre ise, enerji çözme gücüdür. YYTG (keV biriminde) değerleri, her bir enerji için beş değer ortalaması olarak Çizelge 2’de

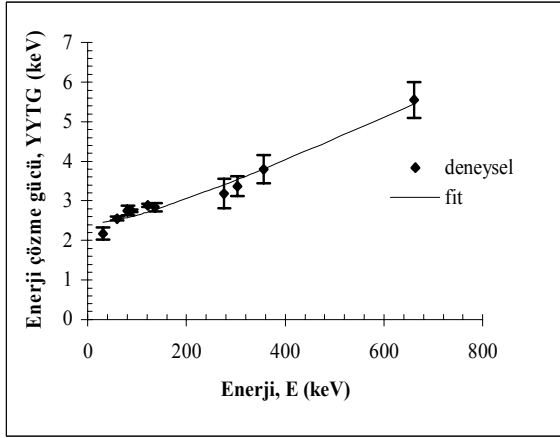
verilmiştir. Ortalama YYTG değerinden sapmalar ($\pm 1\sigma$ aralığında), % değişim katsayısı olarak Çizelge 2’de verilmiştir. Bu sapmaların, fotopik altındaki sayımın az olduğu, yani, pik alanı belirsizliği yüksek olan piklerde, daha yüksek olduğu görülmektedir. Her fotopik için enerji çözme gücünün enerjiye bağlı değişimi ise Şekil 3’de gösterilmiştir.

Bu eğriden, sistemin enerji çözme gücünün, düşük enerjilerde daha iyi olduğu, yüksek enerjilere gidildikçe bozulduğu (degradation) gözlenmektedir. Diğer foton dedektörlerine benzer şekilde beklediği gibi, enerji arttıkça çözme gücü de YYTG olarak artmak suretiyle veya % olarak dönüştürüldüğünde ise düşmek suretiyle bozulmaktadır. Ölçülen YYTG değerlerinin, en küçük kareler yöntemiyle bir eğriye uyarlanmasıyla, CdZnTe dedektörün enerji çözünürlüğünün doğrusala yakın, $YYTG = a + b \times E + c \times \sqrt{E}$ bir davranış gösterdiği belirlenmiştir. Önerilen eğriye

Çizelge 2. CdZnTe dedektörün 30-670 keV enerji aralığındaki enerji çözme gücü ve pik/vadi oranları (Energy resolution and peak to valley ratio of CdZnTe detector in the range of 30-670 keV)

		Enerji çözme gücü (YYTG)			Pik/Vadi(P/V) oranı		
Radyonüklit	Enerji (keV)	Ortalama ¹⁾ YYTG (keV)	Std sapma, ±1σ	Değişim katsayısı ²⁾ (%)	Ortalama ¹⁾ P/V	Std sapma, ±1σ	Değişim katsayısı ²⁾ (%)
¹³³ Ba	30,9*	2,17	0,15	6,75	15,27	0,97	6,33
²⁴¹ Am	59,54	2,55	0,05	1,8	15,25	1,72	11,25
¹³³ Ba	80,99	2,76	0,12	4,5	6,32	0,24	3,81
¹⁰⁹ Cd	88,03	2,75	0,03	1,19	5,88	0,22	3,67
⁵⁷ Co	122,06	2,88	0,04	1,23	3,67	0,11	3,03
⁵⁷ Co	136,47	2,84	0,11	3,76	3,25	0,12	3,81
¹³³ Ba	276,40	3,18	0,37	11,6	1,43	0,04	2,97
¹³³ Ba	302,85	3,36	0,25	7,29	1,68	0,06	3,69
¹³³ Ba	356,01	3,80	0,35	9,25	2,17	0,12	5,59
¹³⁷ Cs	661,66	5,55	0,45	8,17	2,2	0,06	2,88

¹⁾ Beş (5) farklı ölçümün ortalamasıdır, 2) % değişim katsayısı=(σ/ortalama değer)x100 ve *: X-ışını.



Şekil 3. CdZnTe dedektörün enerji çözme gücü (Energy resolution of a CdZnTe detector)

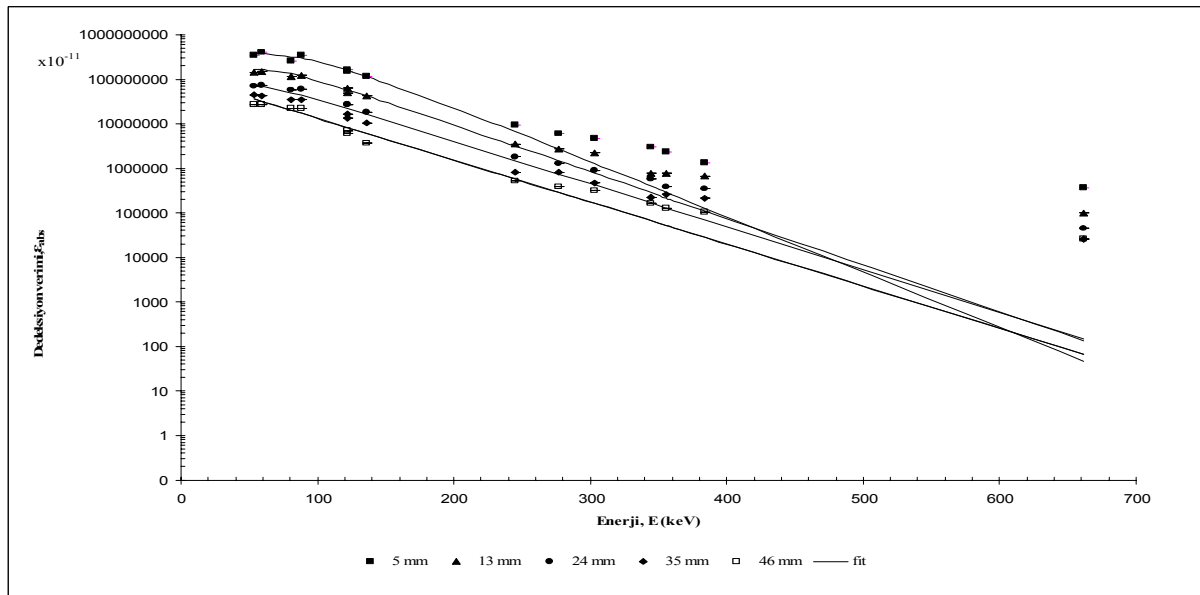
uyum, %95 düzeyindedir. Ancak, Ge ve Si gibi tek elementli bazı yarı iletken dedektörlerde de beklenebilen doğrusallıktan belirli derecedeki bir sapma, sistemdeki “gürültü” ve “elektron-deşik” üretileme işlemleriyle ilişkili “istatistiksel” katkıların bir toplamıdır. Bu bağlamındaki, b katsayısı, Fano faktörüne karşılık gelir. Oda sıcaklığında çalışan CdZnTe dedektöründe, gürültü terimi 1 keV’i aştığından [26] çözme gücü eğrisinde ilâve sapsmalar da doğal görünmektedir. Üstelik CdZnTe dedektör piklerinde, sol taraftaki kuyruklanma çok baskındır, bu nedenle $(c \times \sqrt{E})$ terimi de anlamlıdır. Diğer taraftan, fotopiklerin şeklindeki genişlemenin, foton etkileşme derinliğine bağımlı olarak değişebildiği ifade edilmektedir [27,28].

Dedektör hassasiyetini tanımlayan bir diğer parametre, dedeksiyon verimi, 5 mm ile 46 mm arasında beş farklı mesafede radyoaktif disk kaynaklar kullanılarak ölçülmüştür. Verim değerleri, elde edilen sayım

hızlarından Eşitlik (3)’den yararlanılarak hesaplanmıştır. Verim değerleri, ölçüm belirsizlikleri ile birlikte logaritmik ölçekte Şekil 4’de gösterilmiştir. Dedeksiyon veriminin, enerjiye bağlı değişimi için çeşitli fonksiyonlar denenmiştir. Herhangi bir kaynak-dedektör mesafesinde, enerji- fotopik verimi ilişkisi için:

$$\varepsilon(E) = \frac{a_1 \cdot \exp(-(E/E_0)^{a_2})}{\sqrt{1 + a_3 \cdot (E/E_0)^{a_4}}} \quad (6)$$

şeklindeki bir fonksiyona uyarlanmasıyla elde edilmiştir. Burada, E foton enerjisi (keV) ve E_0 spektrum başlangıcına yakın ve keyfi seçilen ($E_0=30$ -150 keV aralığında) bir referans enerjisidir. Deneyisel verim değerlerinin, Eşitlik (6) ile önerilen ifadeye uyumu ise kabul edilebilir (korelasyon katsayıları, $r=0,8970$ - $0,9900$) düzeyde olduğu bulunmuştur. Eşitlik (6)’daki a_1 katsayısı, dedektör yüzey alanı, S (mm²) ve kaynak-dedektör mesafesi, x (mm)’yi göstermek üzere $a_1=S/(4\pi x^2)$ ifadesinden de hesaplanabilir. CdZnTe dedektörünün, Şekil 4’deki deneyisel verim değerlerinde, 200 keV’in üzerindeki enerjilerde oldukça hızlı bir düşüş görülmektedir. Üstel azalan bir fonksiyon olması, madde içindeki foton soğurulması eğrisine benzerlik göstermesi nedeniyle de fiziksel olarak anlamlıdır. Literatürde, noktasal kaynaklar için CdZnTe dedektörlerin enerji-verim ilişkisi için Eşitlik (6)’da verilen bağıntıya benzer şekilde, enerji ile azalan bir ampirik formül önerilmektedir [29]. Özellikle yüksek enerjilerde, 200-670 keV aralığında uyumsuzluk derecesi artmaktadır. Bu önemli farklılaşma, esas olarak kristal kusurlarına bağlı olan ve yükün etkin toplanamayışının bir sonucu olarak oluşan sinyal kayıplarından kaynaklanan pik alanlarında değişimler olduğunu göstermektedir. Bu kristal kusurları, geleneksel CdZnTe dedektörlerin bilinen



Şekil 4. CdZnTe dedektörün disk kaynaklar için farklı mesafelerdeki dedeksiyon verimi (Detection efficiencies of a CdZnTe detector for a disk source geometry at different distances)

yetersizlikleridir. Ancak daha yüksek enerjili piklerde (200 keV'in üzerinde), aşırı asimetrikleşme ve kuyruklanma nedeniyle fotopik alanı altındaki net sayımın hesaplanmasında ciddi yanılgıya düşülmektedir. Örneğin, Şekil 4'deki ^{137}Cs 'nin 661,6 keV'lik enerjinin dedeksiyon verimi, hesaplanan değerinden daha yüksektir. 661,6 keV'lik fotopikin net sayımındaki belirsizlik $\pm 2,5-3,5$ civarında olmasına karşılık, uyumsuzluk bu belirsizlik değerinin de çok üstündedir. Bu nedenle, 661,6 keV için elde edilen deneysel verim değeri, öngörülen verim eğrisi ile hiç uyuşmamaktadır. Normal olarak, uzak mesafelerden yapılan ölçümlerden yapılan verim tayinindeki belirsizlik daha da artmıştır. Bu yüzden, CdZnTe dedektörleriyle elde edilen spektrumlardan, ilgilenilen fotopike bozucu etki yapan diğer piklerin ve kuyruklanma etkisinin de hesaba katıldığı özel algoritmalarla, fotopik alanını ayırarak belirleme yöntemlerinin (deconvolution algorithms) çalışılması gereken önemli bir konu olduğu açıktır.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

CdZnTe dedektörlerle elde edilen gama spektrumlarında, foton enerjisi arttıkça, özellikle 200 keV'in üzerinde enerjiye bağımlı önemli bir verim kaybı ve yüksek enerjili fotopiklerde de giderek fazlalaşan kuyruklanma artışı şeklinde bir bozulma olduğu gözlenmiştir. Bu yüzden, CdZnTe dedektörlerde, foton etkileşme derinliği ile dedektör verimi arasındaki ilişkinin incelenmesi gerektiği anlaşılmaktadır. CdZnTe dedektörün enerji-verim eğrisi için diğer Si ve Ge gibi tek elementli yarı iletken dedektörlerin enerji ile logaritmik azalan fonksiyonlardan daha farklı bir fonksiyona uyduğu bulunmuştur. Bu çalışmadan elde edilen bulgulara göre, CdZnTe dedektörlerle yapılacak nicel analizlerde, özellikle 30-670 keV enerji aralığındaki tüm fotopikler için Eşitlik (6) ile önerilen veya benzeri bir fonksiyonla dedektör verimi belirlenebilir. Ancak fotopik alanlarının belirlenmesindeki prosedürler ayrıntılı çalışılmalı ve pikin solunda oluşan kuyruklanma etkisini hesaba katan özel algoritmalar kullanılmalıdır. Nükleer madde denetiminde ve medikal görüntüleme çalışmalarında, geleneksel CdZnTe dedektörler yerine özellikle deşik yükü etkisinin minimuma indirildiği eş eksenli-kafes anotlu (coplanar grid- CPG) - veya şerit anotlu (strip) CdZnTe dedektörlerin yaygınlaştığı göz önüne alınırsa, söz konusu yeni nesil CdZnTe dedektörlerin performans özellikleri de çalışılmalıdır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma, TAEK Başkanlığı ile A.Ü. Rektörlüğü arasında yapılan işbirliği protokolü çerçevesinde, A.Ü. Nükleer Bilimler Enstitüsü'nün laboratuvar olanakları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yazarlar, bu iki Kuruma (A.Ü. ve TAEK) teşekkür eder.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Scheiber, C., Giakos, G. C., "Medical applications of CdTe and CdZnTe detectors", **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, Cilt 458, No 1, 12-25, 2001.
2. Eisen, Y., Shor, A., Mardor, I., "CdTe and CdZnTe gamma ray detectors for medical and industrial imaging systems", **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, Cilt 428, No 1, 158-170, 1999.
3. Brunet, B. A., Von Scyoc, J. M., Schlesinger, T. E., James, R. B., "The spatial response of CdZnTe gamma-ray detectors as measured by gamma-ray mapping", **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, Cilt 458, No 1, 76-84, 2001.
4. Spartiotis, A. K., Havulinna, J., Leppänen, A., Panssar, T., Puhakka, K., Pyyhtiä, J., Schulman, T., "A CdTe real time X-ray imaging sensor and system", **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, Cilt 527, 478-486, 2004.
5. Schulman, T., "Gama kameralar için geliştirilmiş yarıiletken CdTe ve CdZnTe piksel dedektörlerinin performans simülasyonu", **VIII. Nükleer Bilimler ve Teknolojileri Kongresi**, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 77, 15-17 Ekim 2003. Tam metin Web adresi: <http://kutuphane.taek.gov.tr/internet_tarama/dosyalar/cd/4115/pdf/45.pdf>.
6. Fougères, P., Siffert, P., Hageali, M., Koebel, J.M., Regal, R., "CdTe ve $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ for nuclear detectors: facts and fictions", **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, Cilt 428, No 1, 38-44, 1999.
7. Franc, J., Höschl, P., Belas, E., Grill, R., Hlídek, P., Moravec, P., Bok, J., "CdTe and CdZnTe crystals for room temperature gamma-ray detectors", **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, Cilt 434, No 1, 146-151, 1999.
8. Luke, P. N., Amman, M., Lee, J. S., Ludewigt, B. A., Yaver, H., "A CdZnTe coplanar-grid detector array for environmental remediation", **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, Cilt 458, No 1, 319-324, 2001.
9. Owens, A., Buslaps, T., Erd, C., Graafsma, H., Lumb, D., Welter, E., "Hard X- and γ -ray measurements with a $3 \times 3 \times 2 \text{ mm}^3$ CdZnTe

- detector”, **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, Cilt 563, 268-273, 2006.
10. eV Products Inc., a division of II-VI Incorporated, Saxonburg, PA 16056, “The eV-Products Electronic Catalog and The Semiconductor Material Properties on the Web page <<http://www.evproducts.com/>>”, 2007.
 11. Knoll, G. F., **Radiation Detection and Measurement Third Edition**, John Wiley & Sons, Inc., New York, 2000.
 12. Shikhaliev, P. M., “Tilted angle CZT detector for photon counting/energy weighting X-ray and CT imaging”, **Physics in Medicine and Biology**, Cilt 51, No 17, 4267-4287, 2006.
 13. Abbas, K., Morel, J., Etchevery, M., Nicolaou, G., “Use of miniature CdZnTe X/γ detector in nuclear safeguards: characterisation of spent nuclear fuel and uranium enrichment determination”, **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, Cilt 405, No 1, 153-158, 1998.
 14. Berlizov, A. N., Gunnink, R., Zsigrai, J., Nguyen, C. T., Tryshyn, V.V., “Performance testing of upgraded uranium isotopes multi-group analysis code MGAU”, **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, Cilt 575, No 3, 498-506, 2007.
 15. Yücel, H., “The applicability of MGA method for depleted and natural uranium isotopic analysis in the presence of actinides (^{232}Th , ^{237}Np , ^{233}Pa and ^{241}Am)”, **Applied Radiation and Isotopes**, Cilt 65, No 11, 1269-1280, 2007.
 16. Carchon, R., Moeslinger, M., Bourva, L., Bass, C., Zendel, M., “Gamma radiation detectors for safeguards applications”, **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, Cilt 579, No 1, 380-383, 2007.
 17. Arlt, R., Gryshchuk, V., Sumah, P., “Gamma spectrometric characterization of various CdTe and CdZnTe detectors”, **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, Cilt 428, No 1, 127-137, 1999.
 18. Mortreau, P., Berndt, R., “Characterization of Cadmium Zinc Telluride detector spectra-application to the analysis of spent fuel spectra”, **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, Cilt 458, No 1, 183-188, 2001.
 19. Czock, K. H., Arlt, R., “Use of miniature CdZnTe to analyze gamma emission of safeguards samples in the field”, **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, Cilt 458, No 1, 175-182, 2001.
 20. Hofsetter, K. J., Beals, D. M., “Comparison of CdTe and CdZnTe detectors for field determination of uranium isotopic enrichments”, **Journal of Radioanalytical Nuclear Chemistry**, Cilt 263, No 1, 171-176, 2005.
 21. Debertin, K., Helmer, R.G., **γ- and X-ray Spectrometry with Semiconductor Detectors**, Elsevier, New York, 1988.
 22. Gilmore, G., Hemingway, J.D., **Practical Gamma-Ray Spectrometry**, John Wiley & Sons, 2000.
 23. Keyser, R.M., “Characterization of room temperature detectors using the proposed IEEE Standard (draft standard), 2001, IEEE NPSS, available: RonKeyser@IEEE.org, ORTEC, 801 South Illinois Avenue, Oak Ridge, TN 37830, ABD.
 24. Berger, M. J., Hubbell, J. H., Seltzer, S. M., Chang, J., Coursey, J. S., Sukumar, R., Zucker, D. S., XCOM Database Web page: <<http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/Text/XCOM.html>>, **National Institute of Standards and Technology (NIST)**, 2007.
 25. Tsoulfanidis, N., **Measurement and Detection of Radiation**, Hemisphere Publishing Corporation, 1983.
 26. Gunnink, R., Arlt, R., “Methods for evaluating and analyzing CdZnTe spectra”, **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, Cilt 458, 196-205, 2001.
 27. Pérez, J. M., He, Z., Wehe, D. K., Du, Y. F., “Estimate of large CZT detector absolute efficiency”, **IEEE Transactions on Nuclear Science**, Cilt 49, 2010-2018, 2002.
 28. González, R., Pérez, J.M., He, Z., “Efficiency at different interaction depth in large coplanar CdZnTe detectors”, **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, Cilt 531, No 3, 544-559, 2004.
 29. Brutscher, J., Arlt, R., Czock, K. H., “Isotope identification software for gamma spectra taken with CdZnTe detectors”, **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, Cilt 458, No 1, 189-195, 2001.