

Bir Gama Spektrometresinde Farklı Sintilatör ve Ana Yükseltici Kullanımının Dedeksiyon Performansına Etkisinin Araştırılması

Buket CANBAZ ÖZTÜRK^{1*}, Cüneyt ÇELİKTAŞ¹

¹Fizik Bölümü, Fen Fakültesi, Ege Üniversitesi, İzmir, Türkiye

Geliş: 14.05.2025, Kabul: 31.05.2025, Yayınlanma: 22.06.2025

ÖZ

Bu çalışmada, hızlı cevap süresine ve yüksek ışık verimine sahip CsI(Tl) sintilasyon kristali, yeni nesil bir fotoçoğaltıcı tüpe montajlanarak yeni bir radyasyon dedektör sistemi tasarlanmıştır. Söz konusu dedektör, gama spektroskopisi uygulamalarında kullanılmak üzere bir spektrometre sistemine entegre edilmiştir. Dedeksiyon performansının karşılaştırmalı analizini gerçekleştirmek amacıyla, NaI(Tl) sintilasyon dedektörü de aynı spektrometre altyapısında ve aynı fiziksel ortam koşullarında test edilmiştir. Deneysel çalışmalarda, farklı enerjilerde gama fotonları yayan iki farklı standart radyasyon kaynağı, (Cs-137 ve Co-60) kullanılarak her iki dedektörün net enerji spektrumları elde edilmiştir. Spektral çözünürlükleri optimize etmek amacıyla, iki farklı ana yükseltici modeli (ORTEC 451 ve 485) tasarlanan spektrometre sisteminde kullanılmış ve bu yükselticilerin enerji spektrumu üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen spektrumlar, enerji çözünürlüğü ve dedeksiyon verimliliği gibi temel nicelikler açısından karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, 451 model ana yükseltici ve CsI(Tl) kristalli kullanılarak oluşturulan spektrometrenin, özellikle yüksek sayım oranı gerektiren uygulamalarda alternatif bir çözüm potansiyeline sahip olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Gama ışını dedeksiyonu; CsI(Tl) sintilatörü; Enerji spektrumu.

Investigation of the Effect of Using Different Scintillators and Main Amplifiers on Detection Performance in a Gamma Spectrometer

ABSTRACT

In this study, a novel radiation detector system was designed by coupling a CsI(Tl) scintillation crystal—characterized by its fast response time and high light yield—with a next-generation photomultiplier tube. The proposed detector was integrated into a spectrometer system for applications in gamma-ray spectroscopy. To conduct a comparative analysis of detection performance, a NaI(Tl) scintillation detector was also tested within the same spectrometric setup and under identical physical environmental conditions. In the experimental phase, two standard radioactive sources (Cs-137 and Co-60), which emit gamma photons at different energies, were used to obtain the net energy spectra of both detectors. To optimize spectral resolution, two different main amplifier models (ORTEC 451 and ORTEC 485) were employed in the spectrometer system, and the effects of these amplifiers on the resulting energy spectra were analyzed. The acquired spectra were compared in terms of key parameters such as energy resolution and detection efficiency. The results demonstrated that the spectrometer system incorporating the ORTEC 451 main amplifier and the CsI(Tl) crystal offers a viable alternative, particularly for applications requiring high count rates.

Keywords: Gamma-ray detection; CsI(Tl) scintillator; Energy spectrum.

1. GİRİŞ

Dedektör türü, gözlemlenmek istenen parçacıkların cinsine, bu parçacıkların enerjisine ve dedektörün kullanılacağı ortama bağlı olarak belirlenir. Bu nedenle, parçacıkların varlığını ve özelliklerini görünür kılabilen süreçlerin ve araçların geliştirilmesi büyük bir gereklilik arz etmektedir. Işıma (radyasyon) detektörlerinin, ışıltama (sintilasyon) kristalleri kullanılarak geliştirilmesi; dedeksiyon verimliliğinin, tepki süresinin ve doz ile enerji ölçümündeki doğruluğun artırılmasına olanak sağlarken, aynı zamanda üretim sürecinin basitleştirilmesi ve maliyetlerin azaltılması yönünde önemli avantajlar sunmaktadır (Pereira, Filho, Lopes, Berretta, & Cardenas, 2015).

Gama spektroskopisi, nükleer bilim ve radyasyon tespiti alanlarında temel bir ölçüm tekniği olup, çevresel radyasyon izleme, nükleer güvenlik, tıbbi görüntüleme ve reaktör izleme gibi birçok uygulama alanında kritik rol oynamaktadır (Santomé, Sanjurjo-Sánchez, & Alves, 2025). Bir gama spektrometresinin performansı; enerji çözünürlüğü, dedeksiyon verimliliği, yanıt süresi ve sinyal kararlılığı gibi dedektör sisteminin temel özelliklerine bağlıdır. Bu bağlamda, sintilasyon dedektörleri; geniş enerji aralığında çalışabilmeleri, maliyet-etkinlikleri ve yapısal basitlikleri nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir (Parker et al., 2024).

Sentetik bir kristal olan Talyum katkılı Sezyum İyodür (CsI(Tl)) kristalinin ışıltama davranışına ilişkin temel fiziksel özellikleri hakkında kayda değer sayıda akademik çalışma yayımlanmıştır (Mouhti et al., 2025; Tariwong et al., 2025; Yang et al., 2025). Bu konudaki bazı çalışmalar Kaufman ve arkadaşları (Kaufman, Hadley, & Hersh, 1970), Dietrich ve Murray (Dietrich & Murray, 1972), Heath ve arkadaşları (Heath, Hofstadter, & Hughes, 1979) tarafından özetlenmiştir. İnorganik kristallerdeki ışıltama süreçlerinin genel özellikleri ise 1964 yılında Birks (Birks, 1964) tarafından tanımlanmıştır. Son yıllarda ağır iyon nükleer fiziği ve yüksek enerjili astrofizik alanlarında, darbe şekli ayırt etme (pulse shape discrimination) yeteneği nedeniyle CsI(Tl) kristaline olan ilgi artmıştır. CsI(Tl) kristallerinin bu alanlarda kullanılabilirliğini artırmak için, gama radyasyonu, beta radyasyonu, alfa parçacıkları ve nötronlara karşı ışıltama yanıtlarının detaylı biçimde incelenmesi gereklidir.

CsI(Tl) kristali, yüksek ışık verimi, mekanik dayanıklılığı ve hızlı yanıt süresi gibi avantajları sayesinde, özellikle yüksek sayım oranı gerektiren uygulamalarda dikkat çeken bir sintilatör malzemedir. Yeni nesil bir fotoçoğaltıcı tüp (FÇT) olan HAMAMATSU R1828-01 ile eşleştirildiğinde, bu kristal, gelişmiş bir radyasyon dedeksiyon sisteminin temel bileşeni hâline gelebilir. Bununla birlikte, bu tür bir sistemin performansının geleneksel dedektör yapılandırmalarıyla, örneğin yaygın biçimde kullanılan NaI(Tl) kristali ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi önem arz etmektedir.

Bu çalışmada temel olarak; i) hızlı cevap süresine sahip CsI(Tl) sintilatörünün yeni nesil fotoçoğaltıcı tüpe montajlanması sonucunda oluşturulan yeni dedektörden elde edilecek sinyallerde genlik, puls genişliği, yükselme zamanı vb. gibi temel büyüklüklerin incelenmesi, ii) yeni tasarlanan dedektör ile ölçülen bu temel büyüklüklerin, standart olarak gama radyasyonu ölçümü işlemlerinde kullanılan NaI(Tl) dedektörü ile alınacak sonuçlarla karşılaştırılması, iii) her iki tip dedektör için spektral çözünürlükleri optimize etmek amacıyla, iki farklı ana yükseltici modeli (ORTEC Model 485 ve 451) tasarlanan spektrometre sistemine entegre edilerek bu yükselticilerin enerji spektrumu üzerindeki etkilerinin incelenmesi, iv) meydana getirilen yeni dedektörle NaI(Tl) dedektörüne göre daha düşük elektronik gürültü ve daha iyi çözünürlüğe sahip, hata payı daha az olan deneysel sonuçlar ve net spektrumların elde edilmesi amaçlanmıştır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bir gama spektrometresinde farklı sintilatör ve ana yükseltici kullanımının dedeksiyon performansına etkisinin araştırıldığı bu çalışmada ilk olarak, 2"×2" boyutunda CsI(Tl) sintilasyon kristalinin (Epic-Crystal Co., Ltd.), 2" çapındaki pencereye sahip HAMAMATSU marka ve R1828-01 model fotoçoğaltıcı tüpe (FÇT) montajlanması ile yeni bir dedektör oluşturulmuştur. Bilindiği gibi, bir sintilasyon kristali kendi üzerinden bir gama fotonu geçtiğinde bu fotonun enerjisine bağlı şiddette bir ışık pırlıtsı (sintilasyon fotonları) oluşturur. Bu sintilasyon fotonları FÇT vasıtasıyla elektrik sinyallerine dönüştürülür. Bu şekilde kristal üzerine düşen gama radyasyonun enerjisi belirlenmiş olur. Söz konusu fotoçoğaltıcı tüpün, fotoelektron yükseltme katsayısı yani kazancı 2×10^7 olup, bu yeni nesil FÇT ve CsI(Tl) sintilasyon kristali ile oldukça iyi çözünürlük değerleri elde edilmesi amaçlanmıştır. Sintilasyon kristalinde üretilen fotonların minimum kayıpla tüp penceresine iletilmesini sağlayabilmek amacıyla kristal ile tüp penceresi arasına SILICONE TECHNOLOGY marka ve LS-3252 model optik jel sürülmüştür. Bu üç malzeme birbiriyle birleştirildikten sonra meydana gelen dedektör dış ortamdan tüp içine ışık girmesini önlemek maksadıyla da siyah bant ile kuşatılmıştır. Böylece inceleme altındaki CsI(Tl) sintilasyon kristalinin HAMAMATSU R1828-01 model fotoçoğaltıcı tüpe montajı mekanik ve optik olarak uyumlu bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Montaj yapılmadan önce tüp, kristal ve optik jel malzemeleri Şekil 1'de sunulan fotoğrafta görülebilirler.



Şekil 1: CsI(Tl) sintilasyon dedektörünü meydana getiren fotoçoğaltıcı tüp, kristal ve optik jel malzemelerinin görünümü.

Daha sonra karşılaştırma yapmak amacıyla, 3"×3" boyutunda NaI(Tl) kristaline sahip BICRON marka (Model: 3143, Seri: G-705) sintilasyon dedektörü (Şekil 2) de referans olarak kullanılmıştır. Dedektörlerde kullanılan sintilasyon kristallerinin özellikleri karşılaştırmalı olarak Çizelge 1’de verilmiştir.

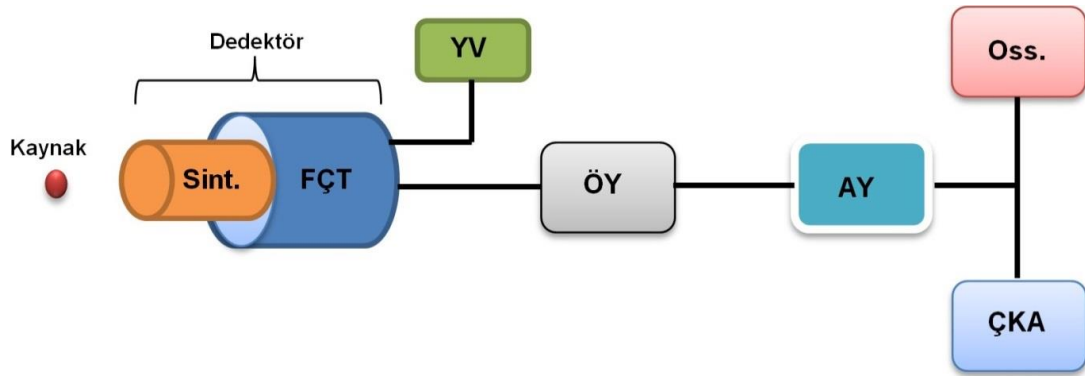


Şekil 2: Karşılaştırma amacıyla kullanılan NaI(Tl) sintilasyon dedektörünün fotoğrafı.

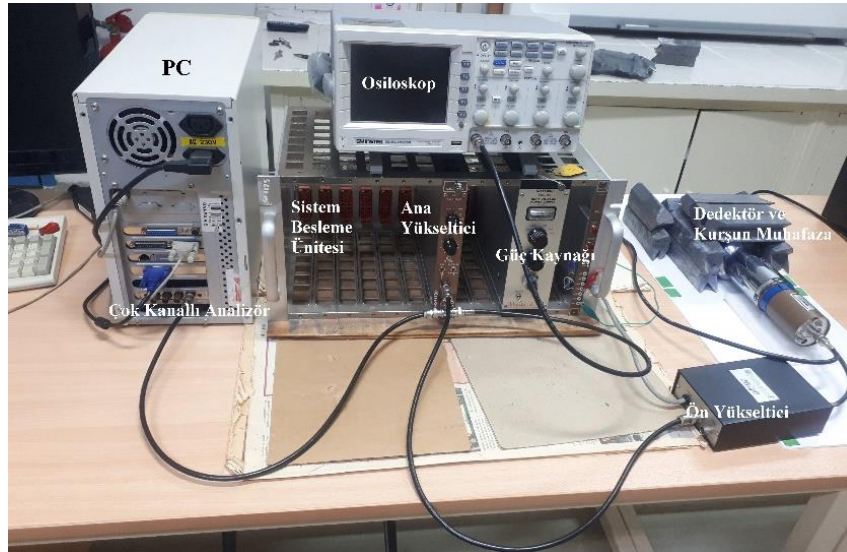
Çizelge 1: Kullanılan CsI(Tl) kristalinin özellikleri ve NaI(Tl) kristali ile karşılaştırması.

Parametreler	CsI(Tl) (http1)	NaI(Tl) (http2)
Yoğunluk (g/cm ³)	4,51	3,67
Erime Noktası (K)	894	924
Termal Genleşme Katsayısı (K ⁻¹)	54×10 ⁻⁶	47,4×10 ⁻⁶
Sertlik (Mho)	2	2
Higroskopik	Biraz	Evet
Maksimum Emisyon Dalga Boyu (nm)	550	420
Maksimum Emisyonda Kırılma İndeksi	1,79	1,85
Birincil Bozunma Süresi (ns)	1000	250
Işık Verimi (foton/keV)	52-56	38

Her iki sintilasyon dedektörü de aynı spektrometre altyapısı içerisinde, aynı çevresel koşullar altında gama spektrometresi için kalibrasyon kaynağı olarak kullanılan Cs-137 ve Co-60 standart radyasyon kaynakları kullanılarak test edilmiştir. Cs-137 kaynağının yarı ömrü ~30 yıl, aktivitesi 5 μ Ci, Co-60 kaynağının yarı ömrü ~5,3 yıl ve aktivitesi ise ~0,17 μ Ci'dir. Dedektörler spektrometreye yerleştirilirken ortamdaki doğal radyasyondan minimum miktarda etkilenmelerini sağlamak için bu dedektörlerin etrafları kurşun külçelerle kaplanmıştır. Test edilen gama spektrometre sisteminin diğer elektronik ekipmanı, ORTEC marka 456 ve 556 model yüksek voltaj kaynakları, ORTEC Model 113 ön yükseltici, ORTEC Model 485 ve 451 ana yükselticiler, GW Instek marka ve GDS 2204 model osiloskop ve bir adet masaüstü bilgisayara montajlanmış ORTEC Model TRUMP 8k model çok kanallı analizör (ÇKA) cihazlarından oluşmaktadır. Çalışmada kullanılan spektrometrenin devre şeması Şekil 3'te, fotoğrafı ise Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 3: Tasarlanan dedektörün test edileceği spektrometrenin basit devre şeması (Sint.: sintilatör, FÇT: fotoçoğaltıcı tüp, YV: yüksek voltaj kaynağı, ÖY: ön yükseltici, AY: ana yükseltici, Oss.: osiloskop, ÇKA: çok kanallı analizör).



Şekil 4: Şekil 3'te devre şeması verilen spektrometrenin fotoğrafı.

Dedektörlere, ihtiyaç duyulan besleme voltajı yüksek voltaj kaynağı (YV) tarafından uygulanmıştır. Dedektörler, kaynaktan gelen gama fotonları enerjilerine bağlı olarak farklı genliklerde sinyaller üretirler. Bu sinyaller, empedans uyumunu sağlamak, elektronik gürültüden arındırmak ve genliklerini yükseltmek amacıyla sırasıyla ön yükseltici ve ana yükselticiye gönderilirler. Çalışmanın diğer amacı olan farklı ana yükseltici kullanımının bir gama spektrometresinin dedeksiyon performansına etkisini incelemek amacıyla, söz konusu dedektörler spektrometrede ayrı ayrı kullanılmış olup, her dedektöre özel ön yükseltici ve iki farklı model ana yükseltici (ORTEC Model 485 ve 451) için kazanç değerleri de ayrı ayrı belirlenmiştir. Ana yükseltici çıkışı, sinyallerin takip edilebilmesi için osiloskopa, bu sinyallerin oluşturduğu enerji spektrumunun elde edilebilmesi için de çok kanallı analizöre gönderilmiştir. ÇKA, her bir puls yüksekliğine veya parçacık enerjisine karşılık gelen sayım sayısını kaydetmektedir.

Çalışmada en iyi performans sonucuna ulaşabilmek düşüncesiyle her bir dedektör için iki farklı radyasyon kaynağı ve iki farklı model ana yükseltici kullanılmış ve bu ana yükselticilerin sonuca olan etkileri karşılaştırılmak suretiyle özellikle CsI(Tl) dedektörüne uygun optimum spektrometre belirlenmeye çalışılmıştır.

Yukarıda da belirtildiği gibi; dedektörlerden alınan sinyaller, iki farklı analog ana yükseltici modeli ile işlenmiştir (ORTEC Model 485 ve Model 451). Bu yükselticiler, sinyal şekillendirme ve kazanç ayarlama özellikleri bakımından farklı tasarım parametrelerine sahiptir. Her bir yükseltici, hem CsI(Tl) hem de NaI(Tl) dedektörleriyle ayrı ayrı kullanılarak, dört farklı deneysel konfigürasyon oluşturulmuştur. Böylece yükseltici modelinin ve dedektör tipinin spektral performansa etkisi sistematik biçimde analiz edilebilmiştir. Bu sistematik yaklaşım sayesinde hem dedektör malzemesinin hem de sinyal işleme bileşenlerinin spektroskopik performansa etkisi detaylı biçimde değerlendirilmiştir.

3. SONUÇLAR

İki farklı sintilatör ve iki farklı ana yükseltici kullanılarak elde edilen gama spektrometresinin performansının değerlendirildiği bu çalışmada, iki farklı radyasyon kaynağı için elde edilen spektrumlar, o spektrumun elde edildiği ana yükseltici çıkışının osiloskop görüntüleri ve temel sinyal parametre değerleri (sinyal yükselme zamanı, düşme zamanı ve sinyal genişliği) karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

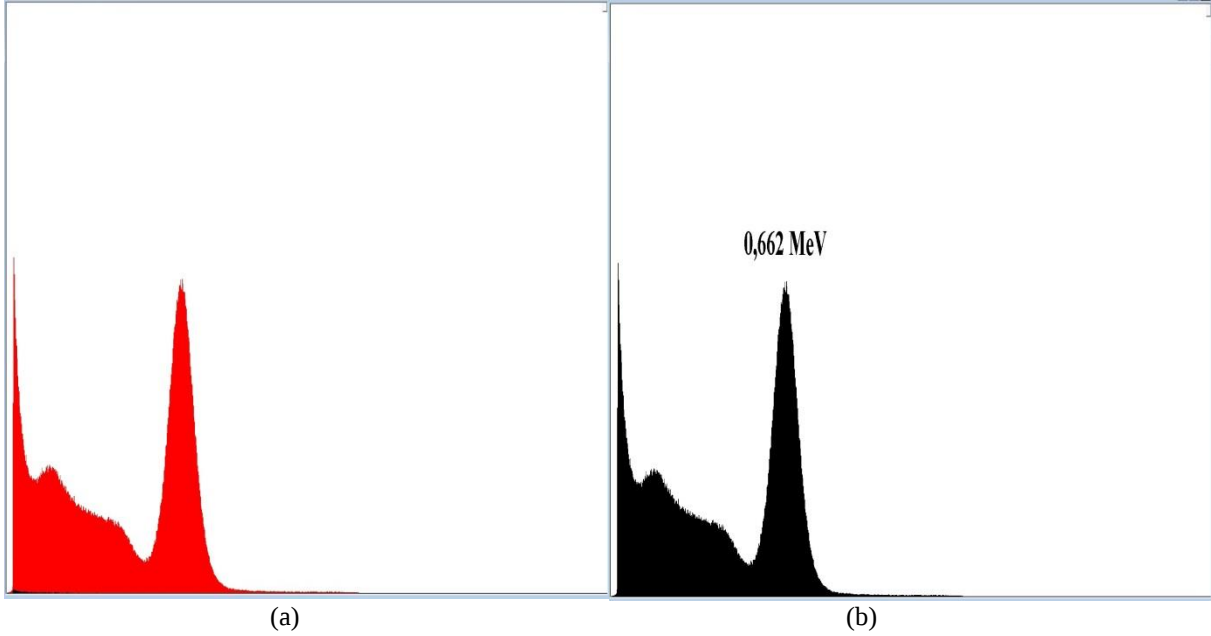
Bir radyasyon dedektörü ortamda hiçbir radyasyon kaynağı yokken bile sayım kaydeder. Tabii fon olarak adlandırdığımız bu ortam radyasyonunun kaynağını çok yüksek oranda uzaydan atmosfere giren kozmik ışınlar meydana getirir. Bu tabii fon değeri düşük sayım hızları veya kısa süreli ölçümlerde önemli olmakla birlikte, yüksek sayım hızları veya uzun süreli radyasyon ölçümlerinde ise küçük etkiye sahiptir. Çalışmada yapılan ölçümlerde tabii fonun alınan spektrumlara ne derecede etki ettiğini görmek amacıyla her

ölçümde tabii fon değeri kaydedilmiş ve radyasyon kaynağı var iken alınan ölçümlerden tabii fon sayımları çıkarılmıştır. Bu şekilde daha net bir kaynak spektrumu elde edilmeye çalışılmıştır.

Verilen tüm deneysel spektrum şekillerinde, her bir gama radyasyon kaynağı için tabii fon, tabii fon çıkarılmadan önceki kaynak spektrumu ve tabii fon çıkarıldıktan sonra elde edilen net spektrumlar gösterilmiştir. Bu spektrum sonuçları Model 451 ve Model 485 ana yükselticileri kullanılarak ayrı ayrı kaydedilmişlerdir. Ek olarak, her şeklin altında ilgili dedektörün enerji çözünürlüğü verilmiş ve bu çözünürlük değerleri tabii fondan çıkarılmış net enerji spektrumları dikkate alınarak hesaplanmıştır. Enerji çözünürlüğü, bir dedeksiyon sisteminin performansını etkileyen önemli bir faktördür. Bu, enerji spektrumundaki bir tepe noktasının maksimumunun yarısına karşılık gelen genişlik (FWHM) tarafından belirlenir. Bir dedektörün enerji çözünürlüğü, FWHM değerine karşılık gelen tepe noktasının yani maksimum sayımın kanal sayısına bölünmesiyle tanımlanır (Knoll, 1999; Leo, 1987; Tsoulfanidis, 1995). Hesaplamalar yapılırken; Cs-137 kaynağı için 0,662 MeV enerjili gama piki, Co-60 kaynağı için ise 1,33 MeV enerjili pik tam belirgin elde edilemediğinden değerlendirmelerde 1,17 MeV enerjili gama piki kullanılmıştır. Düşük enerji çözünürlüğü değeri daha iyi dedeksiyon performansını ifade etmektedir. Ayrıca, aşağıdaki gösterilen tüm deneysel spektrum şekilleri ÇKA'nın yazılımı tarafından verilen ekran görüntüsünün bire bir aynısıdır. Sonuçları en doğal halleriyle paylaşabilmek düşüncesiyle ÇKA'nın ekranı aynen buraya yansıtılmıştır. Aşağıda verilen tüm spektrum görüntülerinde; yatay eksen kanal numarasını, düşey eksen de her kanal numarasına düşen sayım sayısını vermektedir.

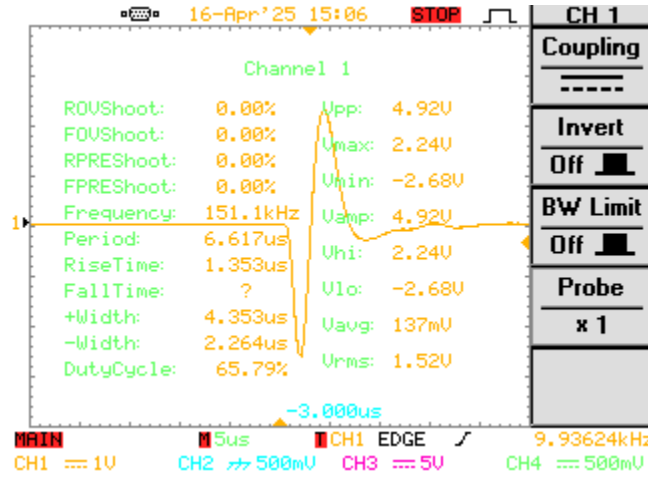
3.1. CsI(Tl) dedektörü ile gama spektrometresi

CsI(Tl) dedeksiyon sistemi ile elde edilen Cs-137 gama radyasyon kaynağı için tabii fon, tabii fon çıkarılmadan önceki kaynak spektrumu ve tabii fon çıkarıldıktan sonra elde edilen net spektrumlar ORTEC Model 485 ve Model 451 ana yükselticileri için ayrı ayrı kaydedilmiş ve sırasıyla Şekil 5 ve 7'de gösterilmiştir.



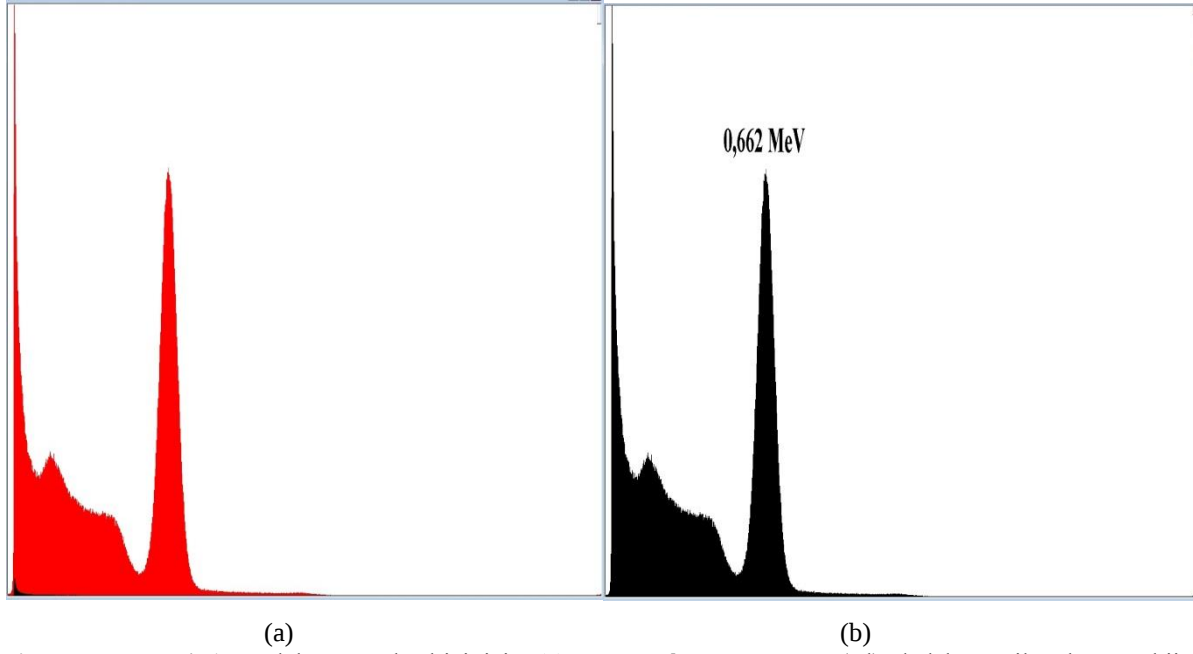
Şekil 5: ORTEC 485 model ana yükseltici için (a) Cs-137 kaynağının CsI(Tl) dedektörü ile alınan tabii fon çıkarılmadan önceki spektrumu (kırmızı) ve tabii fon spektrumu (siyah), (b) tabii fon çıkarılmış net spektrum (Enerji çözünürlüğü: %16,49).

Çok kanallı analizörde yukarıdaki gibi enerji spektrumları oluşturulan ana yükseltici sinyal çıkışlarının osiloskoptaki şekli ve bu sinyal için ölçülen çeşitli parametre değerleri de Şekil 6’da gösterilmiştir.



Şekil 6: Cs-137 kaynağı ve CsI(Tl) dedektörü kullanılarak 485 model ana yükseltici çıkışının osiloskoptaki şekli.

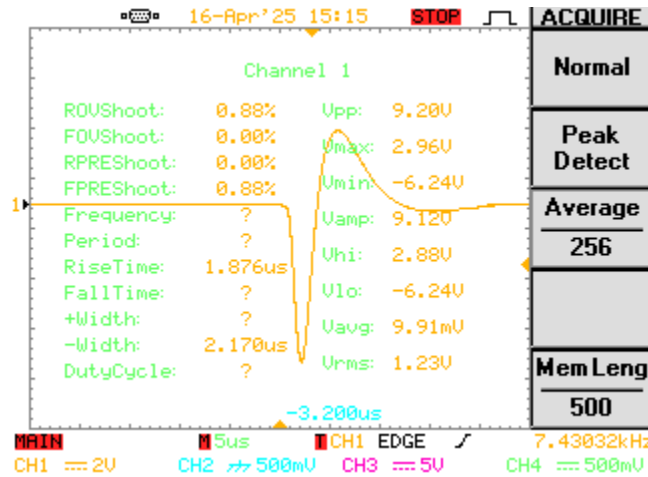
Şekil 7’de Cs-137 kaynağının ORTEC Model 451 ana yükseltici ile alınan tabii fon, kaynak ve tabii fondan çıkarılmış net kaynak spektrumları gösterilmiştir.



Şekil 7: ORTEC 451 model ana yükseltici için (a) Cs-137 kaynağının CsI(Tl) dedektörü ile alınan tabii fon çıkarılmadan önceki spektrumu (kırmızı) ve tabii fon spektrumu (siyah), (b) tabii fon çıkarılmış net spektrum (Enerji çözünürlüğü: %12,23).

Şekil 5 (a)'da ve Şekil 7 (a)'da siyah renk ile gösterilen tabii fon spektrumunun kaynak spektrumuna göre ayırt edilemeyecek kadar az sayım verdiği görülmektedir. Bunun nedeni, kullanılan Cs-137 kaynağının aktivitesinin Co-60 kaynağına göre daha yüksek olmasıdır.

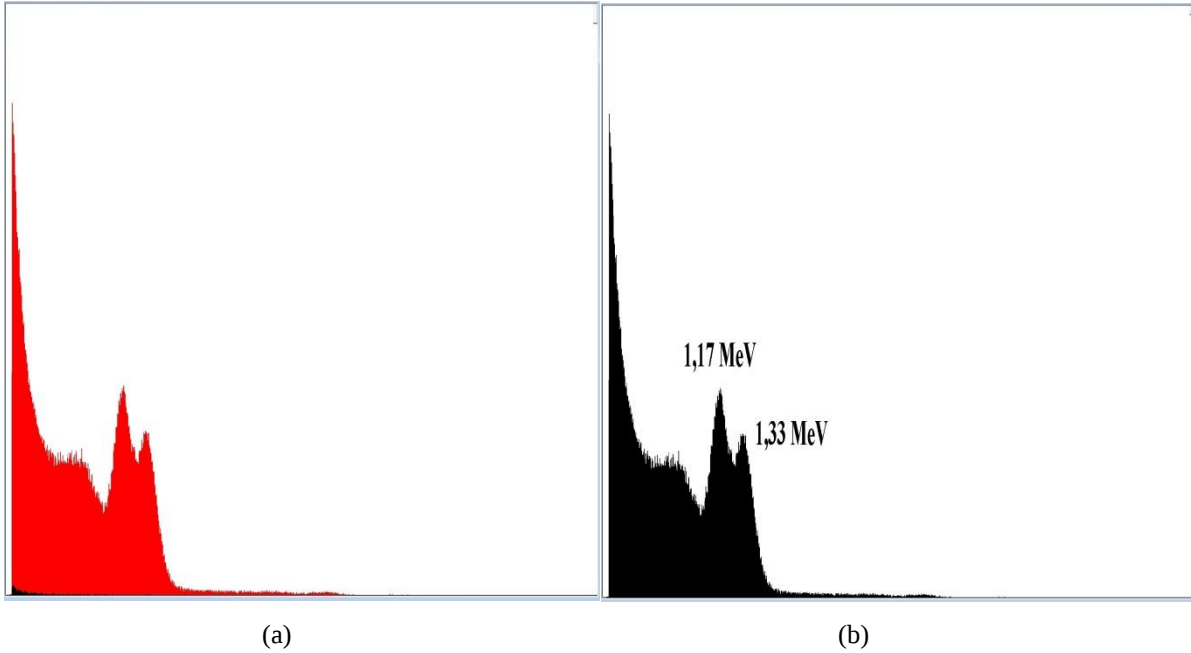
Şekil 8'de CsI(Tl) dedektörü ve ORTEC 451 model ana yükseltici ile Cs-137 kaynağının enerji spektrumunu veren ana yükseltici çıkış sinyal şekli ve ilgili parametreler verilmiştir.



Şekil 8: Cs-137 kaynağı ve CsI(Tl) dedektörü kullanılarak 451 model ana yükseltici çıkışının osiloskoptaki şekli.

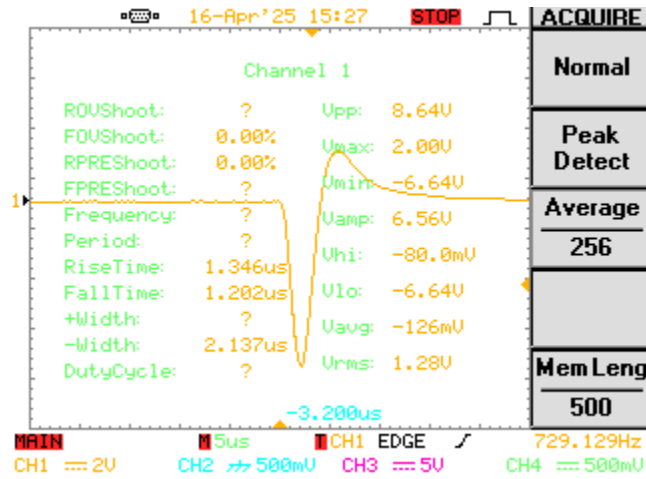
Şekil 6 ve 8 karşılaştırılırsa; fotopik tepe noktaları aynı kanal numarasına denk gelecek şekilde spektrumlar ayarlandığında, başka bir deyişle, her iki yükselticinin kazanç değerleri birbiri ile aynı seviyeye getirildiğinde, 451 model ana yükseltici çıkış genliğinin (V_{amp}) 485 model cihaza göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu nedenle 451 model ana yükseltici çıkış sinyali için yükselme zamanı (Rise time) değeri de doğal olarak büyük çıkmıştır. Bu durum 451 model ana yükselticinin bir üstünlüğünü ortaya çıkarmıştır. Şekil 5 ve 7 karşılaştırıldığında ise, 451 model ana yükseltici üzerinden alınan sonuçların daha düşük çözünürlüğe sahip olduğu görülmüştür, bu da istenen bir özelliktir.

Co-60 kaynağının ORTEC Model 485 ana yükseltici ile alınan tabii fon, kaynak ve tabii fondan çıkarılmış net kaynak spektrumları da Şekil 9’da verilmiştir.



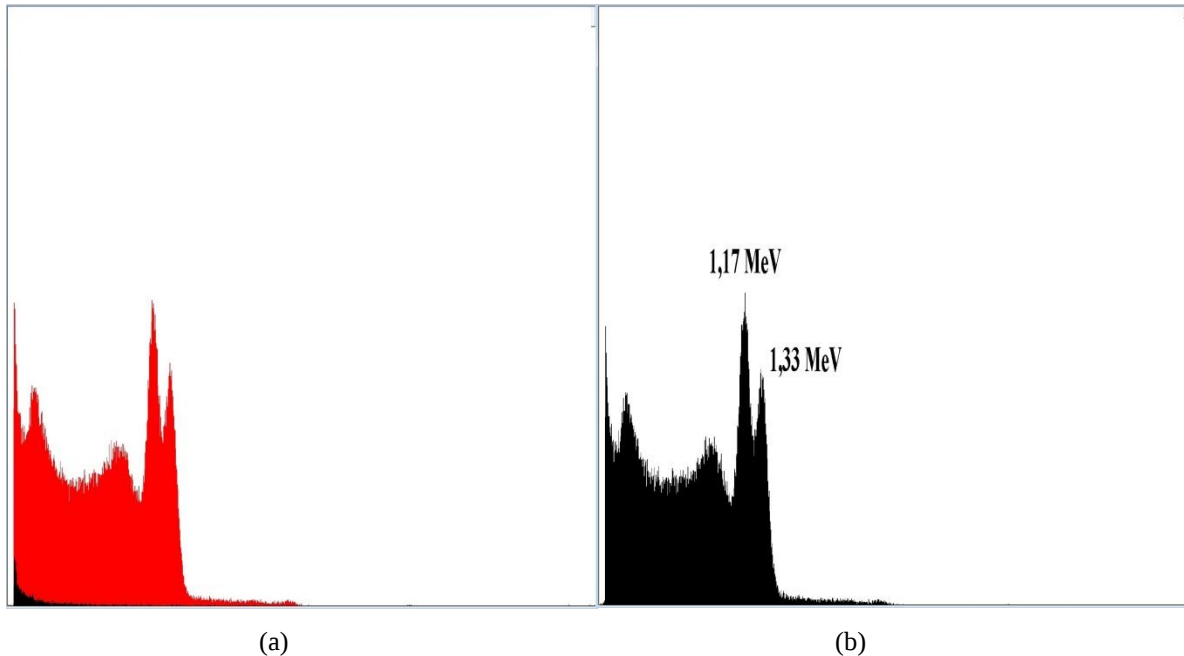
Şekil 9: ORTEC 485 model ana yükseltici için (a) Co-60 kaynağının CsI(Tl) dedektörü ile alınan tabii fon çıkarılmadan önceki spektrumu (kırmızı) ve tabii fon spektrumu (siyah), (b) tabii fon çıkarılmış net spektrum (Enerji çözünürlüğü: %23,53).

CsI(Tl) dedektörü ve ORTEC 485 model ana yükseltici ile Co-60 kaynağının enerji spektrumu Şekil 9’u veren ana yükseltici çıkış sinyal şekli ve ölçülen parametre değerleri de Şekil 10’da verilmiştir.



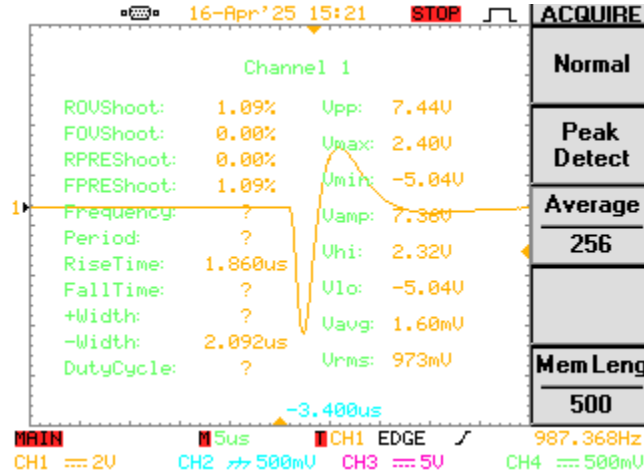
Şekil 10: Co-60 kaynağı ve CsI(Tl) dedektörü kullanılarak 485 model ana yükseltici çıkışının osiloskoptaki şekli.

Şekil 11 ise Co-60 kaynağının ORTEC Model 451 ana yükseltici ile alınan tabii fon, kaynak ve tabii fondan çıkarılmış net kaynak spektrumlarını göstermektedir. Şekil 9 (a) ve Şekil 11 (a)'da yer alan kaynak spektrumlarının daha uzun zamanda kaydedilmesi sebebiyle tabii fon spektrumları küçük sayımlar vermiştir.



Şekil 11: ORTEC 451 model ana yükseltici için (a) Co-60 kaynağının CsI(Tl) dedektörü ile alınan tabii fon çıkarılmadan önceki spektrumu (kırmızı) ve tabii fon spektrumu (siyah), (b) tabii fon çıkarılmış net spektrum (Enerji çözünürlüğü: %11,81).

CsI(Tl) dedektörü ve ORTEC 451 model ana yükseltici ile çok kanallı analizörde Şekil 11'deki Co-60 kaynağının enerji spektrumlarını oluşturan ana yükseltici sinyal çıkışının osiloskoptaki şekli ve bu sinyal için ölçülen parametreler Şekil 12'de verilmiştir.

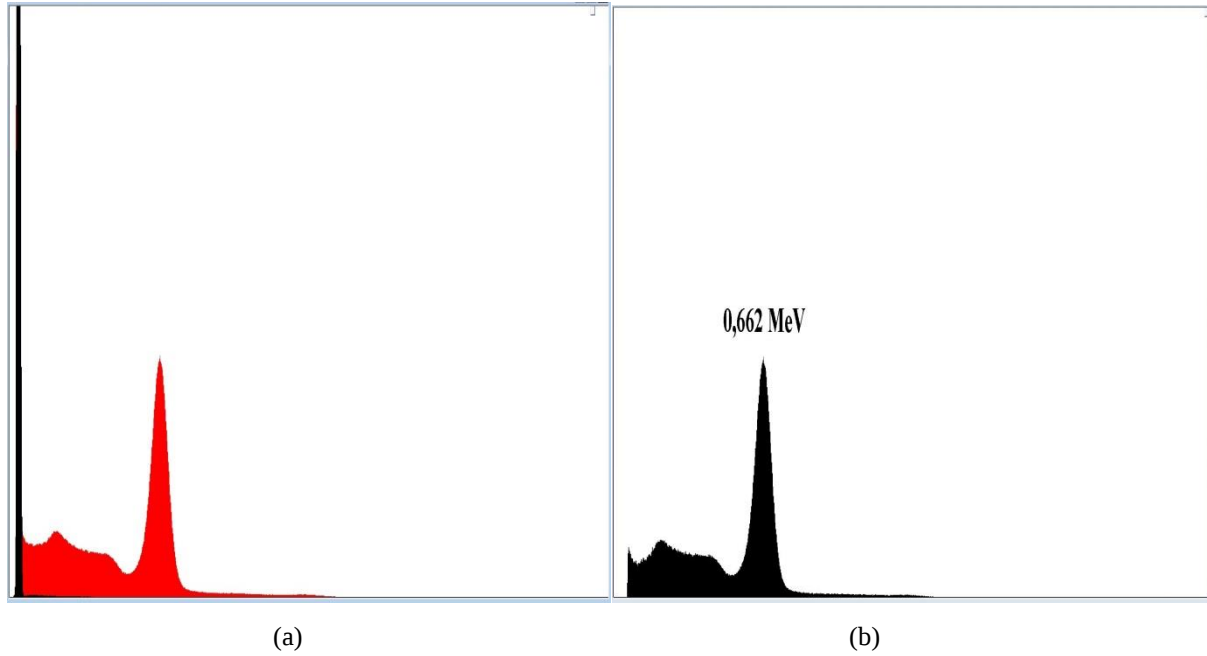


Şekil 12: Co-60 kaynağı ve CsI(Tl) dedektörü kullanılarak 451 model ana yükseltici çıkışının osiloskoptaki şekli.

Şekil 10 ve 12'deki veriler incelendiğinde; yukarıda da belirtilmiş olduğu gibi, genlik değerinin yükselmesiyle yükselme zamanında da artış görülmüştür. Şekil 11b'den görüldüğü üzere, 451 model ana yükseltici kullanılarak elde edilen kaynak spektrumundaki 1,17 MeV pikinin enerji çözünürlüğünün daha iyi çıkması da bu yorumumuzu kuvvetlendirmiştir.

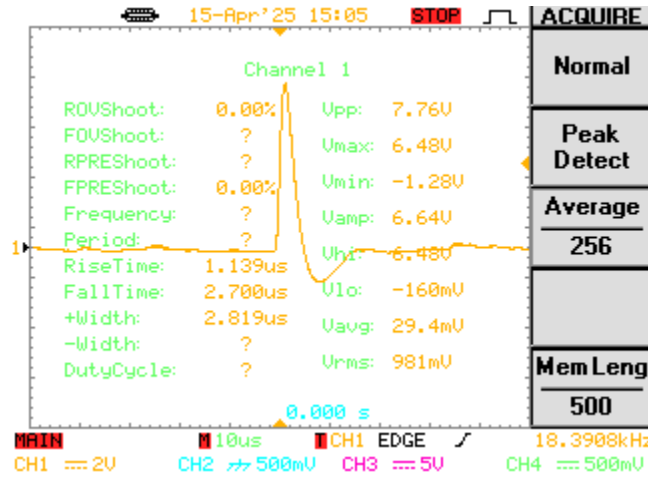
3.2. NaI(Tl) dedektörü ile gama spektrometresi

NaI(Tl) dedeksiyon sistemi ile elde edilen, Cs-137 gama radyasyon kaynağı için tabii fon, tabii fon çıkarılmadan önceki kaynak spektrumu ve tabii fon çıkarıldıktan sonra elde edilen net spektrumlar ORTEC Model 451 ve Model 485 ana yükselticileri için ayrı ayrı kaydedilmiş ve sırasıyla Şekil 13 ve 15'te gösterilmiştir.



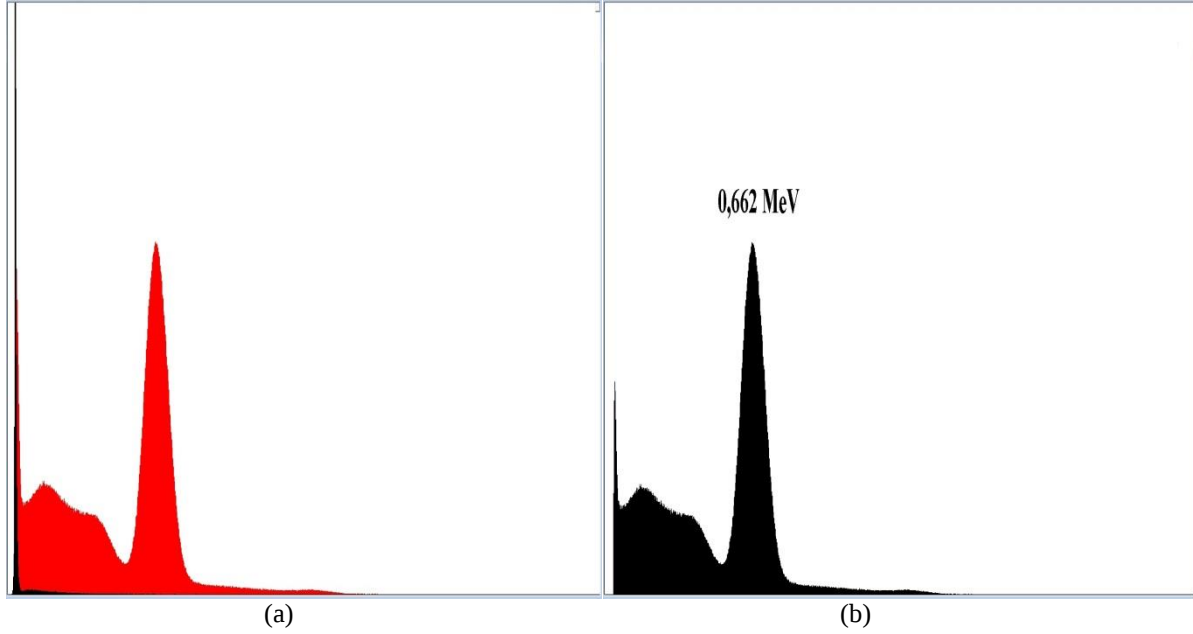
Şekil 13: ORTEC 451 model ana yükseltici için (a) Cs-137 kaynağının NaI(Tl) dedektörü ile alınan tabii fon çıkarılmadan önceki spektrumu (kırmızı) ve tabii fon spektrumu (siyah), (b) tabii fon çıkarılmış net spektrum (Enerji çözünürlüğü: %12,40).

Çok kanallı analizörde yukarıdaki gibi enerji spektrumları oluşturulan ana yükseltici sinyal çıkışlarının osiloskoptaki şekli ve bu sinyal için ölçülen çeşitli parametre değerleri de Şekil 14’te gösterilmiştir.



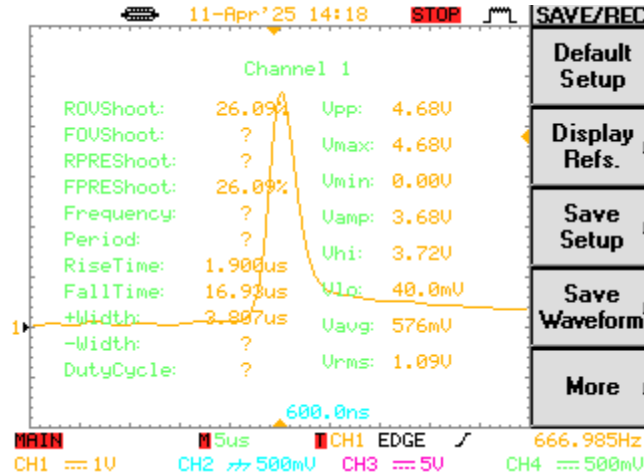
Şekil 14: Cs-137 kaynağı ve NaI(Tl) dedektörü kullanılarak 451 model ana yükseltici çıkışının osiloskoptaki şekli.

Benzer şekilde, aynı kaynak için ORTEC Model 485 ana yükseltici ile alınan tabii fon, kaynak ve tabii fon çıkarılmış net kaynak spektrumları da Şekil 15’te verilmiştir.



Şekil 15: ORTEC 485 model ana yükseltici için (a) Cs-137 kaynağının NaI(Tl) dedektörü ile alınan tabii fon çıkarılmadan önceki spektrumu (kırmızı) ve tabii fon spektrumu (siyah), (b) tabii fon çıkarılmış net spektrum (Enerji çözünürlüğü: %18,35).

Şekil 15'teki enerji spektrumunu veren ana yükseltici çıkış sinyali Şekil 16'de yer almaktadır.

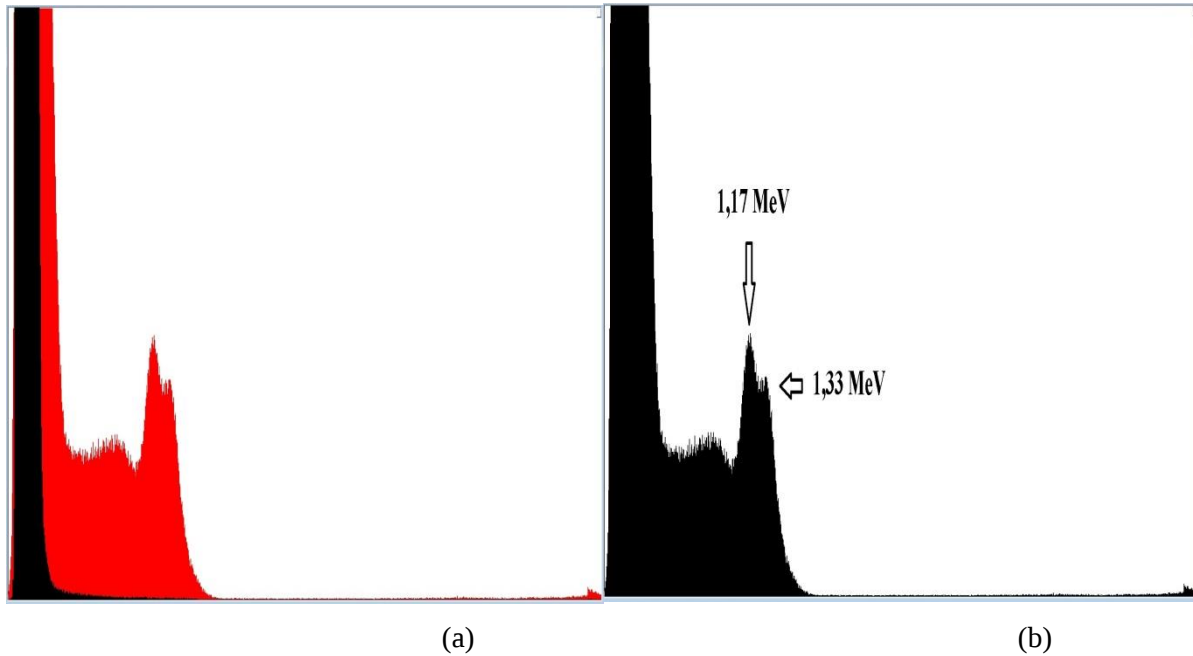


Şekil 16: Cs-137 kaynağı ve NaI(Tl) dedektörü kullanılarak 485 model ana yükseltici çıkışının osiloskoptaki şekli.

Aynı kaynak ve aynı dedektör için osiloskop sonuçları karşılaştırıldığında; Şekil 14 ve Şekil 16 birlikte değerlendirildiğinde; 451 model ana yükseltici çıkış genliğinin (V_{amp}) 485 model ana yükseltici çıkış genliğinden daha büyük olmasına rağmen 485 model cihaza göre daha düşük sinyal yükselme zamanı (Rise Time), sinyal düşme zamanı (Fall Time) ve daha düşük sinyal/puls genişliği (Width) değerleri vermesi, Cs-137 kaynağı için 451 model ana yükseltici ile kullanılan NaI(Tl) dedektöründen daha verimli sonuçlar elde

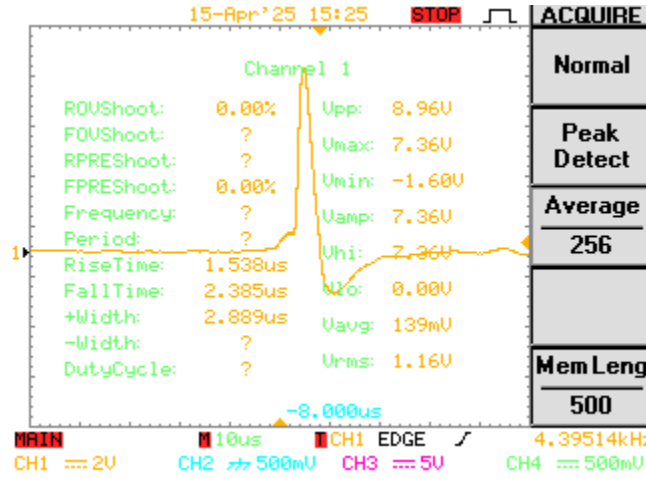
edildiği yorumunu ortaya çıkarmıştır. Benzer şekilde, enerji çözünürlük değerinin de 451 model ana yükseltici ile daha düşük çıkması bu yorumu destekler niteliktedir. Enerji çözünürlüğünün de küçük olması yukarıda da belirtildiği gibi aranan bir özelliktir. Bunun yanı sıra, deneylerimizden elde edilen 0,662 MeV piklerinin literatüre göre (http3) daha uzun çıkması da deney sonuçlarımızın güvenilirliğini artırmıştır.

Şekil 17’de Co-60 gama radyasyon kaynağı için tabii fon, tabii fon çıkarılmadan önceki kaynak spektrumu ve tabii fon çıkarıldıktan sonra elde edilen net spektrum gösterilmiştir. Bu spektrum sonuçları iki farklı ana yükseltici ile ayrı ayrı kaydedilmişlerdir. Buna göre; ORTEC Model 451 ana yükseltici ile alınan tabii fon, kaynak ve tabii fondan çıkarılmış net kaynak spektrumları Şekil 17’de gösterilmiştir.



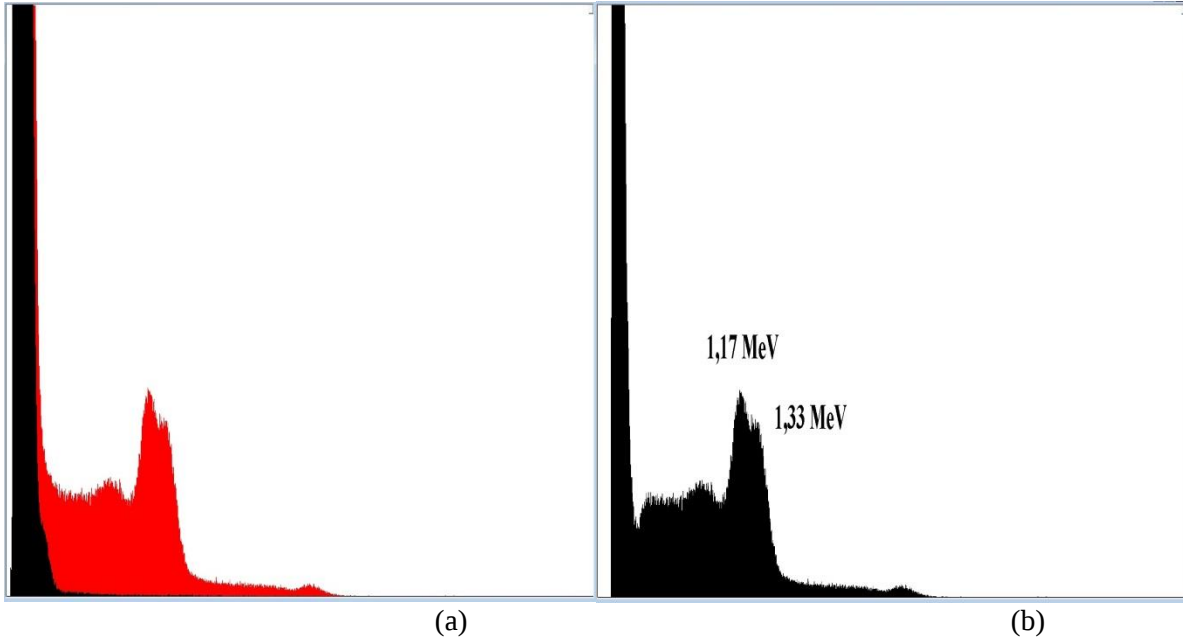
Şekil 17: ORTEC 451 model ana yükseltici için (a) Co-60 kaynağının NaI(Tl) dedektörü ile alınan tabii fon çıkarılmadan önceki spektrumu (kırmızı) ve tabii fon spektrumu (siyah), (b) tabii fon çıkarılmış net spektrum (1,17 MeV enerjili pik için enerji çözünürlüğü: %15,08).

Şekil 17’deki enerji spektrumu için ana yükseltici çıkış sinyal şekli Şekil 18’de verilmiştir.



Şekil 18: Co-60 kaynağı ve NaI(Tl) dedektörü kullanılarak 451 model ana yükseltici çıkışının osiloskoptaki şekli.

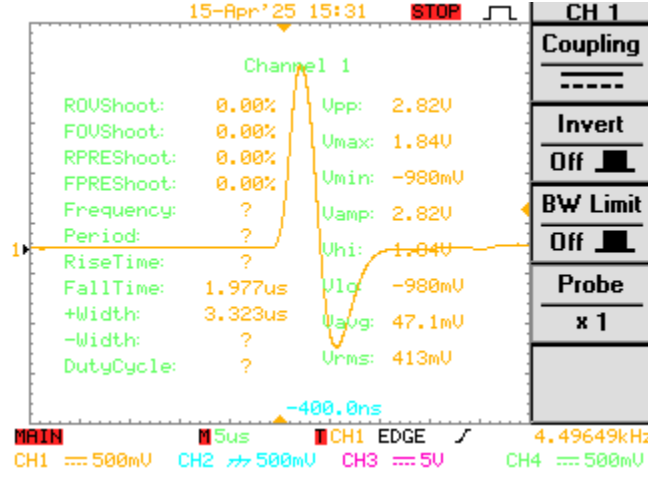
Co-60 kaynağının ORTEC Model 485 ana yükseltici ile alınan tabii fon, kaynak ve tabii fondan çıkarılmış net kaynak spektrumları da Şekil 19'da gösterilmiştir.



Şekil 19: ORTEC 485 model ana yükseltici için (a) Co-60 kaynağının NaI(Tl) dedektörü ile alınan tabii fon çıkarılmadan önceki spektrumu (kırmızı) ve tabii fon spektrumu (siyah), (b) tabii fon çıkarılmış net spektrum (1,17 MeV enerjili pik için enerji çözünürlüğü: %17,81).

Şekil 17 ve 19'da verilen spektrumların sol kenarlarında yukarıdan aşağıya doğru yer alan şeritler dedektör tarafından üretilen elektronik gürültüyü göstermektedir. Bu bantlara az da olsa tabii fonun da katkısı bulunmaktadır.

Şekil 19'daki spektrumun kaydedildiği ana yükseltici çıkışındaki sinyal için osiloskopta Şekil 20'de yer alan veriler elde edilmiştir.



Şekil 20: Co-60 kaynağı ve NaI(Tl) dedektörü kullanılarak 485 model ana yükseltici çıkışının osiloskoptaki şekli.

Çizelge 2’de, bu çalışmada sistematik olarak incelenen farklı dedektör ve yükseltici kombinasyonlarına göre elde edilen enerji çözünürlükleri verilmiştir. Bu değerler karşılaştırıldıklarında; CsI(Tl) kristali ile tasarlanan dedeksiyon sisteminin enerji çözünürlüğü daha iyi olduğu görülmüştür. Çizelge 1’de de gösterildiği gibi, CsI(Tl) kristali NaI(Tl) kristaline göre daha düşük fotoelektron verimine sahip olmasına rağmen [NaI(Tl) kristalinin fotoelektron veriminin %45’i], NaI(Tl) kristalinden ortalama %54 oranında daha fazla ışık verimine sahiptir. Yani kristal, kendi içinde birim enerji başına daha çok foton salınımı meydana getirmektedir. Bu nedenle elde ettiğimiz sonuçlar beklentilerimiz doğrultusundadır.

Çizelge 2: Dedektör ve yükseltici kombinasyonlarına göre elde edilen enerji çözünürlükleri.

Dedektörde kullanılan kristal tipi	Ana yükseltici modeli	Enerji çözünürlük değeri (%)	
		Cs-137 (662 keV)	Co-60 (1173 keV)
CsI(Tl)	Model 451	12,23	11,81
CsI(Tl)	Model 485	16,49	23,53
NaI(Tl)	Model 451	12,40	15,08
NaI(Tl)	Model 485	18,35	17,81

Bu çalışmada elde edilen Co-60 kaynağının spektrumları ile literatür spektrumu (<http3>) karşılaştırıldığında; çalışmamızda kullanılan NaI(Tl) ve CsI(Tl) dedektörlerinin her ikisinin de kaynak spektrumunun 1,33 MeV enerji değerine karşılık gelen pikini ayırt etmekte zorlandığı görülmüştür. Bu durumun kaynağın aktivitesinin çok düşük olmasından ve laboratuvarımızda kullandığımız NaI(Tl) sintilasyon dedektörümüzün yaşlanma sebebiyle de yeterli ayırma gücüne sahip olamamasından kaynaklandığı sonucuna varılmıştır.

Elde edilen spektrumlar 1,17 MeV enerjili pik üzerinden değerlendirilecek olursa; Şekil 17 ve 19’da verilen spektrumlarda Şekil 17’de sol kısımda yer alan gürültü bandının biraz daha kalın olduğu görülmektedir. Bu da aktivitenin düşük olması sebebiyle 451 model ana yükselticisinin kazanç değerinin biraz daha yüksek seçilmesinden ileri gelmiştir. Fakat, pik şekillerinin ise genel olarak birbirine benzediği görülmüştür.

Şekil 18 ve 20’de gösterilen osiloskop şekilleri incelendiğinde; Şekil 18’de yer alan sinyal parametrelerinin genel olarak Şekil 20’de verilen parametrelerden daha büyük olmasının nedeni 451 model ana yükselticinin kazancının yüksek olması olarak yorumlanmıştır. Buna rağmen 1,17 MeV piki için hesaplanan enerji çözünürlüğünün 451 model ana yükseltici için daha küçük çıkması bu yorumumuzu desteklemiştir.

Şekil 17 ve 19, Şekil 9 ve 11 ile karşılaştırıldıklarında; genel olarak CsI(Tl) kristalli dedektörün Co-60 kaynak spektrumlarında 1,17 ve 1,33 MeV piklerini birbirlerinden daha iyi bir şekilde ayırabildiği, bunun ötesinde; Model 451 tip ana yükseltici ile bu pikleri daha da başarılı bir şekilde birbirinden ayırdığı ve Co-60 kaynağının NaI(Tl) dedektörü için literatürde verilen gama spektrumuna (http3) daha yakın bir sonuç verdiği görülmüştür.

4. TARTIŞMA

Bu çalışmada, hızlı cevap süresine sahip CsI(Tl) sintilasyon kristalinin yeni nesil bir fotoçoğaltıcı tüpe (HAMAMATSU R1828-01) montajlanması suretiyle yeni bir dedektör yapılmış ve bu dedektörü kullanan bir spektrometre oluşturulmuştur. Bir NaI(Tl) sintilasyon dedektörü (BICRON Model: 3143) de aynı spektrometrede CsI(Tl) dedektörü yerine kullanılmıştır. Bu iki spektrometre ile deneysel net kaynak spektrumlarının elde edilmesine çalışılmıştır. Bu iki dedektör arasında daha iyi performans karşılaştırması yapabilmek amacıyla iki farklı gama radyasyon kaynağı (Cs-137 ve Co-60) kullanılmıştır. Enerji çözünürlüğü en iyi olan enerji spektrumunu elde etmek amacıyla, iki farklı ana yükseltici modeli (Model 451 ve Model 485) tasarlanan spektrometrede denenmiş, bazı temel elektronik veriler, enerji spektrumları ve bu spektrumlardan yararlanarak belirlenen enerji çözünürlüğü sonuçları birbirleri ile karşılaştırılmıştır.

Çalışmada deneyler yapılırken, her iki dedektörle alınan sonuçlar aynı fiziksel ortam koşullarında (sıcaklık, nem, basınç, ışık vb.) gerçekleştirilmiştir. Böylelikle, dış fiziksel ortamın deney sonuçlarına herhangi bir etkisinin olmamasına gayret edilmiştir.

Co-60 kaynağı ile alınan sonuçların gürültü açısından her iki dedektör için literatürden farklı olmasının nedeni, deneylerimizde kullandığımız Co-60 kaynağımızın aktivitesinin çok düşük olmasıdır. Aktivite düşük olunca, ana yükselticinin kazanç değerleri artırılmak zorunda kalmıştır. Bu durum, elektronik gürültü sinyallerinin de güçlendirilmesine ve böylece kaynak spektrumundaki gürültü bandının genişlemesine neden olmuştur. Bundan dolayı, kaynaktan gelen gama fotonlarının oluşturacağı sinyallerin

elektronik gürültü sinyallerinden ayırt edilebilmesi güçleşmiştir. Bu da spektrometrenin dedeksiyon verimine olumsuz etki etmiştir. Buradan hareketle, kullanılan gama kaynağının aktivite şiddetinin de çok düşük değerde olmaması gerektiği sonucuna varılmıştır. Ancak, düşük aktiviteler durumu söz konusu ise gürültü bandını azaltabilmek için spektrometreye elektronik gürültü filtresi gibi çeşitli elektronik devrelerin de eklenebileceği sonucu çıkarılmıştır.

Şekil 17 ve 19, Şekil 9 ve 11’de verilen spektrumlar ile karşılaştırıldıklarında; CsI(Tl) dedektörünün düşük aktiviteli kaynak spektrumlarında daha düşük gürültü bandına sahip olduğu görülmüştür. Bu sonuç, elektronik gürültü açısından CsI(Tl) kristalinin NaI(Tl) kristaline göre bir üstünlüğünü ortaya koymuştur.

Edinilen bulgular genel olarak değerlendirildiğinde; CsI(Tl) sintilasyon kristali ile elde edilen sonuçların NaI(Tl) kristaline göre daha iyi olduğu söylenebilir. Şöyle ki; osiloskop ölçümlerinde genel olarak CsI(Tl) kristalli dedektörün elektronik ölçümleri NaI(Tl) kristalli dedektörünkinden daha iyi değerlerdedir. Benzer şekilde, CsI(Tl) dedektöründen alınan gama spektrumlarının literatürde verilen spektrumlara daha iyi uyum sağladığı, hatta NaI(Tl) detektörüne göre daha düşük enerji çözünürlük değerlerine sahip olduğu da belirlenmiştir. Küçük enerji çözünürlüğü her zaman aranan bir özellik olup, bu değer dedektörün daha hassas enerji ayırma gücüne sahip olduğunu gösterir. Ek olarak, kullanılan CsI(Tl) kristali 2"×2" boyutunda, laboratuvarımızdaki NaI(Tl) sintilasyon dedektörünün NaI(Tl) kristali ise 3"×3" boyutuna sahiptir. CsI(Tl) kristalinin NaI(Tl) kristaline göre daha küçük boyutta olmasına rağmen daha iyi sonuçlar vermesi, bu kristalin gama radyasyon ölçümü için iyi bir alternatif olacağı görüşünü kuvvetlendirmiştir. Elde edilen sonuçlar, CsI(Tl) kristalinin sağlık başta olmak üzere her türlü eğitim, öğretim, araştırma, tetkik, izleme, kontrol ve güvenlik gibi alanlarda da başarılı şekilde kullanılabileceği yorumunu getirmiştir. Bunun yanı sıra, en iyi sistem performansını elde edebilmek amacıyla kullanılan spektrometrede farklı iki tip ana yükseltici denenerek de deneyler yapılmıştır. Buna göre; en iyi çözünürlük için önerilecek olan spektrometre bileşenleri ortaya çıkarılmaya çalışılmıştır. Yukarıda verilen deneysel sonuçlar ışığında; 451 model spektroskopisi ana yükseltici kullanılarak oluşturulan spektrometrenin en iyi dedeksiyon performansı sergilediği belirlenmiştir.

Her iki radyoaktif kaynak için aynı dedektörden alınan sinyal şekilleri kendi aralarında karşılaştırıldığında; kullanılan ana yükseltici tipinin okunan temel sinyal büyüklükleri üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Bu durum, ana yükseltici seçiminin özellikle sinyal şekillendirilmesi açısından radyasyon spektrometrelerinde önemli bir role sahip olduğunu ortaya koymuştur. Aynı karşılaştırma CsI(Tl) dedektörü için yapıldığında ise CsI(Tl) dedektörünün spektrometrik sonuçlar bakımından mevcut NaI(Tl) detektörümüze göre çok daha iyi sonuçlar verdiği yorumuna ulaştırmıştır. Ek olarak, spektrometrede kullanılan kaynağın aktivitesinin,

dedektörün cinsinin ve devredeki ana yükseltici tipinin de sonuç üzerinde ne kadar etkili bu çalışma ile gösterilmiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI BEYANI

Yazarlar arasında çıkar çatışması bulunmamaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Ege Üniversitesi Aliye Üster Vakfı tarafından desteklenmiştir.

YAZARLARIN KATKILARI

B.C.Ö.: Yöntem, araştırma, kaynaklar, yazı yazma - orijinal taslak hazırlama.

C.Ç.: Kavramsallaştırma, yöntem, araştırma, doğrulama, kaynaklar, yazı yazma- gözden geçirme ve düzenleme.

KAYNAKLAR

- Birks, J. B. (1964). *The theory and practice of scintillation counting*. (D. W. Fry, L. Costrell, & K. Kandiah, Eds.). Pergamon Press Oxord.
- Dietrich, H. B., & Murray, R. B. (1972). Kinetics of the diffusion of self-trapped holes in alkali halide scintillators. *Journal of Luminescence*, 5, 155–170.
- Heath, R. L., Hofstadter, R., & Hughes, E. B. (1979). Inorganic scintillators. A review of techniques and applications. *Nuclear Instruments and Methods*, 162, 431–476. [https://doi.org/10.1016/0029-554X\(79\)90728-6](https://doi.org/10.1016/0029-554X(79)90728-6)
- http1: (Erişim Tarihi: 13/05/2025). <http://tr.kinheng-crystal.com/csitl-scintillator-csitl-crystal-csitl-scintillation-crystal-product/>.
- http2: (Erişim Tarihi: 13/05/2025). <http://tr.kinheng-crystal.com/naitl-scintillator-naitl-crystal-naitl-scintillation-crystal-product/>.
- http3: (Erişim Tarihi: 13/05/2025). <https://www.scientificlib.com/en/Spectroscopy/GammaRaySpectroscopy.html>.
- Kaufman, R. G., Hadley, W. B., & Hersh, H. N. (1970). The scintillation mechanism in thallium doped alkali halides. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 17, 82–87.
- Knoll, G. F. (1999). *Radiation Detection and Measurement*. John Wiley and Sons Inc., U.S.A.
- Leo, W. R. (1987). *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Germany.
- Mouhti, I., McFee, J. E., Drissi El-Bouzaidi, M., El Qars, J., Ouacha, E. H., Assakrar, M., & Bellioua, M. (2025). Experimental validation of absolute full energy peak efficiency and energy resolution of NaI(Tl), CsI(Tl), BGO, YAP(Ce) and CeBr₃ scintillation detectors modeled with Monte Carlo codes. *Radiation Physics and Chemistry*, 231, 112603. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2025.112603>.
- Parker, A. J., Bandala, M., Croft, S., Crouch, L., Dunphy, R. D., Hutchinson, D., ... Joyce, M. J. (2024). Enrichment measurement by passive γ -ray spectrometry of uranium dioxide fuel pellets using a europium-doped, strontium iodide scintillator. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A*:

Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1062. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2024.169191>.

- Pereira, M. C. C., Filho, T. M., Lopes, V. M., Berretta, J. R., & Cardenas, J. P. N. (2015). Scintillation response of CsI:Tl crystal under neutron, gamma, alpha particles and beta excitations. In *International Nuclear Atlantic Conference*, SP, Brasil.
- Santomé, A. C. H., Sanjurjo-Sánchez, J., & Alves, C. (2025). Use of hand-held gamma-ray spectrometry to assess decay of granite ashlar in historical buildings of NW Spain (Barbanza, Galicia). *Journal of Cultural Heritage*, 71, 20–29. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2024.10.019>
- Tariwong, Y., Kim, H. J., Quang, N. D., Khan, A., Daniel, D. J., Limsuwan, P., ... Kaewkhao, J. (2025). Ca co-doped CsI(Tl) crystal scintillator for γ - and X-ray detecting applications. *Radiation Physics and Chemistry*, 226, 112241. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2024.112241>
- Tsoufanidis, N. (1995). *Measurements and Detection of Radiation* (2nd ed.). Taylor & Francis: London, UK.
- Yang, H., Lai, Z., Wang, W., Qi, H., Wang, S., Chen, J., Qin, J., Zhang, H., Fang, Z., Xu, H., Xu, R., & Zhu, Y. (2025). Growth of high-quality, large-size CsI and CsI(Tl) scintillator single crystals via continuous-mass transport process method. *Optical Materials*, 164, 117065. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2025.117065>