



**T.C.
HATAY MUSTAFA KEMAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AKTİF MADDESİ YÜKSEK YOĞUNLUKLU GADOLİNYUM
TANTALUM TETRA OKSİT SİNTİLATÖRÜ OLAN
KALORİMETRELERİN GEANT4 PROGRAMI İLE BENZETİMİ**

ALİ ÖZTÜRK

**FİZİK ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**HATAY
AĞUSTOS-2018**



T.C.
HATAY MUSTAFA KEMAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**AKTİF MADDESİ YÜKSEK YOĞUNLUKLU GADOLİNYUM
TANTALUM TETRA OKSİT SİNTİLATÖRÜ OLAN
KALORİMETRELERİN GEANT4 PROGRAMI İLE BENZETİMİ**

ALİ ÖZTÜRK

FİZİK ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**HATAY
AĞUSTOS-2018**

T.C.
HATAY MUSTAFA KEMAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AKTİF MADDESİ YÜKSEK YOĞUNLUKLU GADOLİNYUM TANTALUM
TETRA OKSİT SİNTİLATÖRÜ OLAN KALORİMETRELERİN GEANT4
PROGRAMI İLE BENZETİMİ

ALİ ÖZTÜRK

FİZİKANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANSTEZİ

Dr. Öğr. Üyesi Güral AYDIN danışmanlığında hazırlanan bu tez 01/07/2018 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından OYBİRLİĞİ ile kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi Güral AYDIN
Başkan

Prof. Dr. İsmail Hakkı KARAHAN
Üye

Doç. Dr. Yusuf Oğuzhan GÜNAYDIN
Üye

Kod No:

Prof. Dr. Erdal SERTKAYA
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

10.08.2018

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını ve tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılamayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülendiğinde asıl nüsha ile aynı olması sorumluluğunun tarafıma ait olduğunu beyan ederim.

ALİ ÖZTÜRK

ÖZET

AKTİF MADDESİ YÜKSEK YOĞUNLUKLU GADOLİNYUM TANTALUM TETRA OKSİT SİNTİLATÖRÜ OLAN KALORİMETRELERİN GEANT4 PROGRAMI İLE BENZETİMİ

Sintilatörler yüksek enerji ve parçacık fiziği deneylerinde kalorimetrelerin aktif malzemesi olarak kullanılırlar. Bu malzemelerin optik ve fiziksel özellikleri kalorimetrelerin ve dolayısıyla deneyin performansını oldukça etkileyebilmektedir. Bu çalışmada, iyi optik ve sintilasyon özellikleri gösteren $GdTaO_4$ kristali çarpışma deneylerinde kullanılmak üzere incelenmiştir. Bu rapor, aktif malzemesi $GdTaO_4$ olan homojen bir kalorimetrenin elektromanyetik performansına ait Geant4 benzetim programı ile elde edilmiş sonuçlarını sunmaktadır. Çeşitli geometrilerde kalorimetre benzetim programında inşa edilmiş olup gelen gama ışını enerjilerine bağlı olarak enerji çözünürlük değerleri farklı sintilatör-fotodedektör bileşimleri için elde edilmiştir. Sonuçlar, yakın geometrilere sahip farklı malzemeler ile yapılan çalışmalar ile karşılaştırılmış olup enerji çözünürlüğü değerlerinde önemli gelişmelerin olduğu gözlemlenmiştir.

2018, 51 sayfa

Anahtar Kelimeler: Enerji Çözünürlüğü, Geant4, Homojen Kalorimetreler, Sintilatör

ABSTRACT

GEANT4 SIMULATION OF CALORIMETERS WHOSE ACTIVE MATERIAL IS HIGH DENSITY GADOLINIUM TANTALUM TETRA OXIDE

Scintillators are used as active materials of calorimeters in high energy and particle physics experiments. The optical and physical properties of such materials could affect performances of calorimeters and hence of experiments quite a lot. In this study, GdTaO₄ crystal, which shows good optical and scintillating properties, was examined to be used in collider experiments. This report presents the results which were obtained with Geant4 simulation program and belong to the electromagnetic performances of a homogeneous calorimeter whose active material is GdTaO₄. Calorimeters were reconstructed in the simulation program in different geometries and energy resolution values for various scintillator-photodetector combinations were obtained as a function of incident beam energies. The results were compared with those of carried out with different materials which have compatible sizes and the results showed significant improvements in energy resolutions.

2018, 51 pages

Keywords: Energy Resolution, Geant4, Homogeneous Calorimeter, Scintillator

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu lisans çalışmasında benden bilgisini, sabrını esirgemeyen ve çalıőmam boyunca yaptığı manevi katkılarından dolayı tez danışmanlığını yapan Dr. Öğr. Üyesi Gural AYDIN hocama teşekkürlerimi sunarım.

Çalıőmalarımda gerek laboratuvar ortamında, gerekse ders ortamında bana bilgi ve tecrübelerini aktaran Mustafa Kemal Üniversitesi Fizik Bölümü' nün değerli öğretim üyelerine teşekkür ederim.

Yüksek lisans çalıőmalarım boyunca benden tecrübesini esirgemeyen değerli arkadaşım Hasan Sarıgöl' e, üniversite döneminde ve yüksek lisans çalıőmalarımda beni yalnız bırakmayıp destekleyen değerli arkadaşlarım Nizam Öztürk, Hasan Yener ve Serkan Dayan' a teşekkür ederim.

Hayatımın her anında elimden tutup beni doğruya yönlendiren, maddi ve manevi her türlü desteği benden esirgemeyen en değerli varlıklarım olan annem, babam ve kardeşlerime SONSUZ teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	I
ABSTRACT.....	II
TEŞEKKÜR.....	III
İÇİNDEKİLER	IV
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	V
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	VI
1. GİRİŞ	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	3
3. MATERYAL VE YÖNTEM	6
3.1. MATERYAL	6
3.1.1. Sintilasyon Malzemeleri	6
3.1.1.1. Gadolinyum Tantalum Tetra Oksit (GdTaO ₄)	9
3.1.2. Tıpta Kullanımı.....	12
3.1.3. Yüksek Enerjide Kullanımı	13
3.1.4. Foto Çoğaltıcı Tüpler.....	14
3.1.5. Foto Diyotlar.....	16
3.1.5.1. Çığ Tipi Foto Diyot.....	17
3.1.5.2. PIN Foto Diyotlar.....	18
3.2. YÖNTEM	19
3.2.2. Geant4 Simülasyon Programı	21
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	25
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	34
KAYNAKLAR	35
ÖZGEÇMİŞ	39

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3. 1. GdTaO ₄ malzemesine ait yayınım spektrumu	9
Şekil 3. 2. GdTaO ₄ malzemesine ait iletim spektrumu	10
Şekil 3. 3. GdTaO ₄ kristalinin sıcaklık – özgül ısı ilişkisi	11
Şekil 3. 4. GdTaO ₄ kristalinin uyarma ve yayınlama spektrumu.....	12
Şekil 3. 5. Foto çoğaltıcı tüpün şematik gösterimi.....	16
Şekil 3. 6. Si foto diyot enine kesitin şematik gösterimi.....	19
Şekil 3. 7. Si foto diyot PN eklem (birleşme) durumu.....	19
Şekil 3. 8. Geant4 kategori sınıf şeması.....	24
Şekil 4. 1. 1 GeV gelen gama ışını için uydurma (fit) fonksiyonu ile birlikte enerji depolama dağılımı.....	26
Şekil 4. 2. 16 cm kalınlıklı ve farklı enine alanlı kalorimetrelerde gelen ışın enerjilerine göre enerji çözünürlükleri	27
Şekil 4. 3. 18 cm kalınlıklı ve farklı enine alanlı kalorimetrelerde gelen ışın enerjilerine göre enerji çözünürlükleri	27
Şekil 4. 4. 20 cm kalınlıklı ve farklı enine alanlı kalorimetrelerde gelen ışın enerjilerine göre enerji çözünürlükleri	28
Şekil 4. 5. 60 mm x 60 mm enine alanlı ve farklı kalınlıklı kalorimetrelerde gelen ışın enerjilerine göre enerji çözünürlükleri.....	29
Şekil 4. 6. 80 mm x 80 mm enine alanlı ve farklı kalınlıklı kalorimetrelerde gelen ışın enerjilerine göre enerji çözünürlükleri.....	30
Şekil 4. 7. 100 mm x 100 mm enine alanlı ve farklı kalınlıklı kalorimetrelerde gelen ışın enerjilerine göre enerji çözünürlükleri.....	30
Şekil 4. 8. 100 mm ² enine alanlı ve 18 cm ve 20 cm kalınlıklı sintilatörlerin içsel enerji çözünürlüğü	31
Şekil 4. 9. 100 mm ² enine alanlı ve 18 cm kalınlıklı kalorimetreye ait CFD ve PIN foto detektörleri ile elde edilmiş parametrize enerji çözünürlük fonksiyonları.....	31
Şekil 4. 10. 100 mm ² enine alanlı ve 20 cm kalınlıklı kalorimetreye ait CFD ve PIN fotodetektörleri ile elde edilmiş parametrize enerji çözünürlük fonksiyonları.....	32

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

B	: Bor
Ba	: Baryum
BeO	: Berilyum oksit
BGO	: Bizmut germanyum oksit
Bi	: Bizmut
°C	: Santigrat derece
CaWO ₄	: Kalsiyum tungsten oksit
CdTe	: Kadmiyum tellür
CdZnTe	: Kadmiyum çinko tellür
CdWO ₄ (CWO)	: Kadmiyum tungsten oksit
CeF ₃	: Seryum florit
Co	: Kobalt
Cs	: Sezyum
CsI(Tl)	: Talyum katkılı sezyum iyodür
E	: Enerji
Ev	: Elektronvolt
GaAs	: Galyum arsenik
GdTaO ₄ (GTO)	: Gadolinyum tantalum tetra oksit
h	: Planck sabiti
InGaAs	: İndiyum galyum arsenik
InSb	: İndiyum antimon
J	: Joule
K	: Sıcaklık (Kelvin)
KeV	: Kilo elektronvolt
Li	: Lityum
MeV	: Mega elektronvolt
NaI	: Sodyum iyodür
NaI(Tl)	: Talyum katkılı sodyum iyodür
ns	: Nano saniye
PbWO ₄ (PWO)	: Kurşun tungsten oksit
Sb	: Antimon
Si	: Silisyum
Sr	: Stronsiyum
ZnS	: Çinko sülfür

KISALTMALAR

CERN	: Avrupa nükleer araştırma merkezi
CMS	: Kompakt muon selenoid
ÇFD	: Çıg foto diyot
FÇT	: Foto çoğaltıcı tüp
KEK	: Japon ulusal hızlandırıcı merkezi

LHC	: Büyük hadron çarpıştırıcısı
MPPC	: Çoklu piksel foton sayacı
N_{pe}	: Fotoelektronların sayısı
PET	: Pozitron yayılım tomografisi
PIN	: Pin foto diyot (P-intrinsic-N)
PSD	: Pozitron hassasiyetli dedektör
SPECT	: Foton yayımlı hesaplamalı tomografi
USA	: Amerika Birleşik Devletleri



1. GİRİŞ

Sintilasyon malzemeleri yüksek enerji fiziği deneylerinde parçacıkların konum ve enerjisini ölçmek için kalorimetrelerle aktif malzeme olarak kullanılırlar. Bu malzemelerden geçen parçacıklar enerjileriyle orantılı foton üretirler. İki çeşit kalorimetre vardır: Örnekleme ve homojen kalorimetrelerdir. Örnekleme kalorimetresi ardışık sıra halinde dizilmiş soğurucu malzeme ve aktif malzemedendir. Bu tür kalorimetrelerde gelen ışın enerjisinin bir kısmı aktif malzemededir soğurur. Homojen kalorimetre ise tamamıyla bir aktif malzemedendir oluşmaktadır ve gelen ışın enerjisinin çoğu aktif malzemededir depolanır. Örnekleme kalorimetreleri elektromagnetik ve hadronik etkileşmeler için kullanılır ama homojen kalorimetreler sadece elektromagnetik etkileşme uygulamaları için kullanılırlar. Bu tür kalorimetrelerin kullanıldığı sistemde aktif malzemelerin birçok özelliği kalorimetrelerin ve dolayısıyla deneyin performansını etkiler. İlk olarak sintilatörün ışık verimliliği gerekli enerji çözünürlüğü elde etmek için yeteri kadar yüksek olmalıdır. Çarpışmalar arası sürenin kısa olduğu deneylerde veri toplama hızı önemlidir. Bu yüzden dedektörlerin tepki zamanı mümkün olduğu kadar hızlı olmalıdır. Sintilatör malzemelerinin bozunma zamanları sinyal oluşum sürelerini etkiler ve dolayısıyla veri toplama hızı için anahtar faktörlerden biridir. Yüksek yoğunluklu sintilasyon malzemeleri durdurma gücünü artırır ve böylelikle enerji ve konum çözünürlüğü artar ve daha kompakt sistemlerin oluşmasına olanak sağlar. Dahası iyi bir optik ilettime sahip olan sintilatörler foto dedektörlerde düzgün bir elektrik sinyali oluşması için önemlidir. Sintilasyon malzemeleri bazı alanlarda iyi özellikler gösterebilirlerken bazı alanlarda ise dezavantajları olabilir. Özetle yüksek yoğunluklu, yeterli ışık verimliliğine sahip ve hızlı ve kısa ışık atımları oluşturan sintilasyon malzemeleri kompakt, hızlı veri alımı sağlayan ve gerekli enerji ve konum çözünürlüğü elde edilen sistemlerin inşasında önemli role sahiptir. Örneğin kurşun tungsten kristali ($PbWO_4$ veya PWO) yüksek yoğunluğu ve hızlı bozunma zamanı ile kompakt müon selenoid (CMS)' in elektromagnetik kalorimetresinde kullanılır (CMS Collaboration, 2008; Paramatti, 2016).

Tezin 2. bölümünde önceki çalışmaların özetine yer verilmiştir. Tezin 3. bölümünde ise sintilasyon malzemeleri ve bu malzemelerin yüksek enerjide kullanım alanlarından bahsedilmiş olup elektromanyetik etkileşme süreçlerine de değinilmiştir.

Ayrıca tezin 3. bölümünde Geant4 programı hakkında bilgiler de yer almaktadır. Tezin 4. bölümünde aktif maddesi yüksek yoğunluklu gadolinyum tantalum tetra oksit ($GdTaO_4$) sintilatörü olan kalorimetrelerin Geant4 programı ile yapılan analizin araştırma bulgularına yer verilmiştir. Tez, sonuç ve önerilerin ardından kaynakça ile bitmektedir.



2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

M. Nikl ve ark. (1999); çalışmalarında pasif radyasyon hasarının (iletim kaybı) özelliklerini iyi bilinen talyum katkılı sezyum iyodür ($CsI(Tl)$), CeF_3 ve kurşun tungsten oksit sintilatörleri için incelemiş ve altında yatan fiziksel mekanizmaları da ayrıca tartışmıştır. Dahası sintilasyon dedektörleri için umut vaat eden yeni malzeme sistemlerine kısaca değinmişlerdir.

Mao ve ark. (2008); çalışmalarında yüksek enerji fizik deneylerinde yaygın bir şekilde kullanılan çeşitli inorganik kristal sintilatörleri için optik ve sintilasyon özellikleri üzerine karşılaştırmalı bir çalışma sunmuşlardır. Geçirgenlik, uyarma ve foto lüminesans spektrumu için bazı numuleri ölçmüşlerdir. Lütesyum oxyorthosilicate ve lütesyum-itriyum oxyorthosilicate' ın kırılma indekslerinin bir V prizma kullanılarak ölçüldüğünü ifade etmişlerdir. Ayrıca bu numuneler için ışık çıkışı ve ışık çıkışının sıcaklık katsayısının da ölçülmesi çalışmalarını yapmışlardır.

Liu ve ark. (2010); Czochralski yöntemini kullanarak M-tipi $GdTaO_4$ ve $Tb:GdTaO_4$ bulk formunda tekli kristal üretmişlerdir. Bunların iletim, uyarma, emisyon spektrumları ve lüminesans bozunma eğrilerini ölçmüşlerdir. Malzemelerin kırılma indekslerini, iletim spektrumu ve Sellmeier denklemi ile hesaplamışlardır. Malzemelerin lüminesans zamanlarını tek üslü fonksiyon ile lüminesans bozunma eğrileriyle çizerek belirlemişlerdir.

G. Bizarri (2010); yüksek enerji fiziği, tıbbi görüntüleme ve radyasyon tespiti gibi zorlu uygulamalar için daha iyi performansa sahip yeni inorganik sintilatör kristaller bulmanın uzun süredir devam eden bir sorun olduğunu belirtmiştir. Daha yüksek ışık çıkışı, daha iyi enerji çözünürlüğü ve daha düşük üretim maliyeti ile daha verimli sintilatörlere olan talebin devam etmekte olduğunu ifade etmiştir. Ayrıca bu çalışmasında inorganik malzemelerde sintilasyonun temel kavramlarını tartışmakta ve fiziğin sintilatör keşfine yardımcı olacak yollar sağlayabilmeleri üzerine odaklanmıştır.

Çapalı (2011); çalışmasında Geant4 benzetim ve ROOT programı kullanmış ve silikonun Optik Geçiş Radyasyonu Dedektörlerinde görüntü ekranı olarak kullanılabilirlik düzeyi üzerine inceleme yapmıştır. Benzetim çalışmalarının materyal tipi, kalınlığı ve demet enerjisi üzerinde yapıldığını belirtmiştir. Gelen elektron demet enerjisini 18.5 MeV ve 38.5 MeV olarak seçmiş ve görüntü ekranı malzemesi olarak 0.1

μm -5 μm kalınlıklarında alüminyum, kurşun, titanyum, bakır, gümüş, altın ve silikon kullanmıştır. Benzetim sonuçlarını ise tablo ve şekiller halinde vermiştir.

Ermış (2012); yaptığı çalışmada ^{90}Sr , ^{133}Ba , ^{137}Cs ve ^{207}Bi standart radyoaktif kaynaklarının zaman spektrumlarını BC400 plastik sintilasyon dedektöründen oluşan spektrometresiyle elde etmiştir. Kaynakların zaman spektrumlarının çözünürlüklerini, yükselen kenar ve sabit kesir ayırıcı zamanlama tekniği kullanılarak araştırmıştır. Bu sayede iki farklı yöntem kullanarak dedektörün uygun zaman çözünürlük değerlerini her bir kaynak için elde etmiştir.

Yang ve ark. (2014); Czochralski yöntemini kullanarak umut verici bir yüksek yoğunluğa sahip sintilatör olarak çatlak içermeyen bir GdTaO_4 tek kristali başarılı bir şekilde büyütmüşlerdir. Büyüttükleri kristali X-ışını difraksiyonu ile analiz etmişlerdir. Yoğunluğunun 8.94 g/cm^3 olduğunu ve mevcut inorganik tek kristalli sintilatörlerin arasında bu sintilatörün en yüksek yoğunluğa sahip olduğunu belirtmişlerdir. GdTaO_4 'ün mutlak ışık veriminin, PbWO_4 'ün yaklaşık üç katı olduğunu ve sintilasyon bozunumunun 72.6 ns 'lik hızlı bir bileşenden ve 1236.2 ns 'lik yavaş bir bileşenden oluştuğunu belirtmişlerdir. Sertlik, yoğunluk ve termal özellikler gibi temel fiziksel özelliklerinin kristal büyümesi ve uygulamaları için çok önemli olduğunu ve bu durumun ilk kez saptandığını belirtmişlerdir.

Yang ve ark. (2015); son zamanlarda GdTaO_4 'ün umut verici yüksek yoğunluklu bir sintilatör olduğunu ama ışılda mekanizmasının hala bilinmemekte olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmalarında GdTaO_4 kristal malzemesinin sıcaklığa bağlı ışımaya özelliklerini araştırdıklarını ifade etmişlerdir. Emisyon spektrumunun 300 Kelvin (K)'nin yaklaşık 2.2 ve 2.7 eV' da bulunan iki Gauss bileşeninden oluşmuş geniş bir bant ile karakterize edildiğini belirtmişlerdir. Ayrıca tavlama atmosferinin lüminesans yoğunluğu üzerinde çok az etkisi olduğuna vurgu yapmışlardır.

Lecoq (2016); sintilatörlerin tesadüfen keşfedildiğini söylemiştir. 1990'lı yıllardan beri yüksek parçacık fiziği deneyleri ve tıbbi görüntüleme için daha iyi bir performans sergileyen sintilatörlere olan talebin arttığını ifade etmiştir. Günümüzde artık belirli bir amaç için bir sintilatör üretmenin mümkün olduğunu söylemiştir. Ayrıca bant aralığının, tuzakların enerji seviyeleri ve konsantrasyonlarının ayarlanabilir ve bunların etkileri sönmünebilir veya tam tersine sintilatörün performansının optimizasyonu için spesifik bir katkıyla ilgili bir katkıyla ilgili dile getirmiştir.

Çalışmasında tıbbi görüntüleme cihazlarında kullanılan kristal sintilatörlerin performansını arttırmak için bu tür kristal mühendisliği girişimleri üzerine çalışmıştır. Ayrıca yeni bakış açıları açan kristal üretimi teknolojisindeki olağanüstü ilerlemeye olan bir ilginin varlığı üzerinde durmuştur.

Voloshyana ve ark. (2017); $GdTaO_4$ ve $GdTa_{0.8}Nb_{0.2}O_4$ tek kristallerinin Czochralski metodu kullanılarak büyütüldüğünü ve onların sintilasyon özelliklerinin de çalışıldığını belirtmişlerdir. Her iki kristalin de 10^{-8} saniye civarında bir bozunma süresi ile hızlı bir yayılım gösterdiklerine yer vermişlerdir. $GdTa_{0.8}Nb_{0.2}O_4$ kristalinin yüksek bir durdurma gücü ile aşırı yoğun (8.37 g/cm^3) ve hızlı (en kısa bileşen bozunma süresi 17 ns) sintilatör olarak gösterildiğini ifade etmişlerdir.

Ding ve ark. (2018); $GdTaO_4$ ' ün sintilasyon olarak kullanılabilen mükemmel bir malzeme olduğunu ve bundan dolayı da oldukça ilgi uyandırdığını ileri sürmüştür. Ancak bant yapısının, elektronik yapısının ve optik özelliklerinin hala bir açıklamaya ihtiyaç duyduğu üzerinde durmuşlardır. Bu merak uyandıran problem için, yüksek kaliteli $GdTaO_4$ (M-tipi) tekli kristalin Czochralski metodu kullanılarak başarılı bir şekilde büyütüldüğünü çalışmalarında belirtmişlerdir. Malzemenin yapısının yanı sıra optik özelliklerinin de deneyde belirlendiğinden söz etmişlerdir. Hesaplanan sonuçların da yüksek güvenirliliğe sahip olduğunun ispatlandığına yer vermişlerdir. Bu nedenle bu çalışmada elde edilen hesaplamaların $GdTaO_4$ malzemesini derin bir şekilde anlamak için iyi bir çalışma olduğunu ifade etmiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. Sintilasyon Malzemeleri

Sintilatör, bir parçacığın geçişinden kısa bir süre sonra bir ışık darbesi üreten bir malzeme olarak tanımlanır. Bu olgu bir ışık kuantumunun soğurulmasını takiben, genellikle bir ışık darbesinin üretimi olarak tanımlanan flüoresan ile yakından ilişkilidir. Sintilasyon sayacı en yaygın şekilde kullanılan parçacık dedektörlerinden bir tanesidir. Yüklü bir parçacık tarafından kaybedilen enerjinin bir kısmı ışılda ortamındaki atomları uyarabilir. Sonraki geri uyarımda salınan enerjinin küçük bir yüzdesi görünür ışık üretebilir. Bu teknik Rutherford' un alfa parçacık saçılma deneylerinde parlayan çinko sülfür (ZnS) kristallerini kullandığı zamandan itibaren, radyoaktivitenin en eski araştırmalarından beri kullanılmıştır. Radyoaktif ışınlar bir maddenin atom ve molekülleriyle etkileşime girdiğinde enerjisine göre madde içinde iyonizasyon veya uyarma meydana getirirler. Şayet radyasyon enerjisi her iki olayı da meydana getiremeyecek kadar düşük ise etkileştiği ortamdaki moleküller arasında sadece bir titreşim meydana getirir ve yok olur. Sintilasyon bir materyalin uyarıldığı zaman ışık yaydığı bir süreçtir. Sintilatörden yayılan görülebilir ışıklara sintilasyon denir. Sintilasyon dedektörleri, sintilatör olarak kullanılan bir madde ve bunun hemen arkasına bağlanmış bir fotodedektörden oluşur. Modern dedektörlerde sintilatörlerde üretilen ışık, ışık rehberleri yoluyla yayılır ve bir fotodedektörün yüzeyine yönlendirilir. Fotodedektörde üretilen fotoelektronlar tetikleme ve zamanlama uygulamaları ile beraber konum belirleme ve madde ile etkileşmeye giren ışınların enerji hesapları için kullanılabilen hızlı bir elektronik atıma dönüştürülürler (Fernow, 1986).

Sintilatör olarak kullanılan ilk aygıt, 1903 yılında Sir William Crookes tarafından inşa edilmiş olup bir ZnS perdesi olarak kullanılmıştır. Perde ile üretilen sintilasyonlar, karanlık bir odada mikroskop ile bakıldığında çıplak gözle gözüküyordu. Sintilatörlere olan ilgi, 1944 yılında çıplak göz ölçümünün yeni geliştirilen foto çoğaltıcı tüpler (FÇT) ile yer değiştirmesi ile hız kazanmıştır. Bu da modern sintilatör dedektörünün doğuşu olmuştur (Anonymous 1, 2018). Ancak son zamanlarda FÇT' lerin yanı sıra PIN ve çığ foto diyotlar (ÇFD) da fotodedektör olarak kullanılmaktadır.

Tarihsel olarak, sintilatörler deneme ve yanılma yoluyla geliştirilmiştir (Bizarri, 2010). Sintilatörlerin tesadüfen keşfedilmelerinden dolayı sintilasyon süreçlerinin

mekanizmaları tam olarak bilinmemekteydi. 1990' lardan itibaren sintilatörlere olan talep parçacık fiziğinde ve tıpta görüntüleme alanlarında oldukça artmıştır. Bugünlerde ise istenilen amaçlarla sintilatörler tasarlanabilmektedir. Bant aralığı, enerji seviyelerindeki tuzaklar ve yoğunlukları ayarlanabilir seviyeye gelmiştir. Bu şekilde bunların etkileri azaltılabilir ya da sintilatörlerin performansları bazı katkılarla uygun hale getirilebilir hale gelmiştir (Lecoq, 2016).

Sintilatörler güvenlik amaçlı radyasyon dedektörleri olarak kullanılırlar. Sintilatörler aynı zamanda nötron ve yüksek enerji parçacık fiziği deneylerinde, yeni enerji kaynaklarının keşfinde, X-ışını güvenliğinde, nükleer kameralarda, bilgisayarlı tomografi ve gaz keşfinde, medikal diagnostikte, CT tarayıcıları ve gama kameralarında, geçmiş model CRT bilgisayar ve monitörlerinde ve televizyon setlerindeki perdelerde kullanılabilirler (Anonymous 1, 2018).

Sintilatörlerde aranılan genel özellikler arasında; nükleer radyasyonun soğurulması sırasında meydana gelen ışığın oluşum zamanının kısa olması, maddenin kendi oluşturduğu ışığa karşı saydam olması ve bu ışığın da kullanılan fotodedektör spektrumuna uygun olması bulunmaktadır. Ayrıca uygulama alanına göre çeşitli ölçülerde ve katı, sıvı ya da gaz halinde kullanılabilir olması aranılan özellikler içerisinde yer almaktadır (Nicholson, 1973; Knoll, 1989). Bir sintilatörün ışık çıkış yolu üzerine konulan FCT' lerden birkaç voltluk elektrik pulsları alınabileceği için parçacık sayımına yönelik uygulamalarda çok karışık ve hassas elektronik devrelere ihtiyaç olmaz. Spektrum analizine yönelik uygulamalarda nispeten biraz daha hassas devre tasarımına gereksinim vardır (Gören, 2011; Nicholson, 1973; Knoll, 1989).

Yüksek enerji fiziği, tıbbi görüntüleme ve radyasyon tespiti gibi zorlu uygulamalar için daha iyi performansa sahip yeni inorganik sintilatör kristalleri bulmak uzun süredir devam eden zorlu bir iştir. Kuramcılar, deneysel ve kristal büyütücüler arasındaki yoğun disiplinler arası çaba sayesinde mevcut sintilatör performansları kristalin dayattığı (kristal tarafından uygulanan) içsel sınırlara ulaşıyor. Ancak, istek daha yüksek ışık verimi, daha hızlı cevap, daha yüksek yoğunluk, daha iyi enerji çözünürlüğü ve daha düşük üretim maliyeti ile daha verimli sintilatörler için devam ediyor (Bizarri, 2010). Yüksek yoğunluk ve yüksek atomik numaralı malzemeler evrensel olarak arzu edilir. Yüksek durdurma gücü, gerekli olan sintilatör malzemelerinin miktarını düşürebilir ve böylece dedektörün hacmini düşürebilir. PWO

yüksek enerji fizik deneylerindeki hassas kalorimetrelerde önemli bir rol oynar ve Avrupa nükleer araştırma merkezinin (CERN) CMS dedektörlerinde geniş miktarlarda kullanılmıştır (Yang ve ark., 2014)

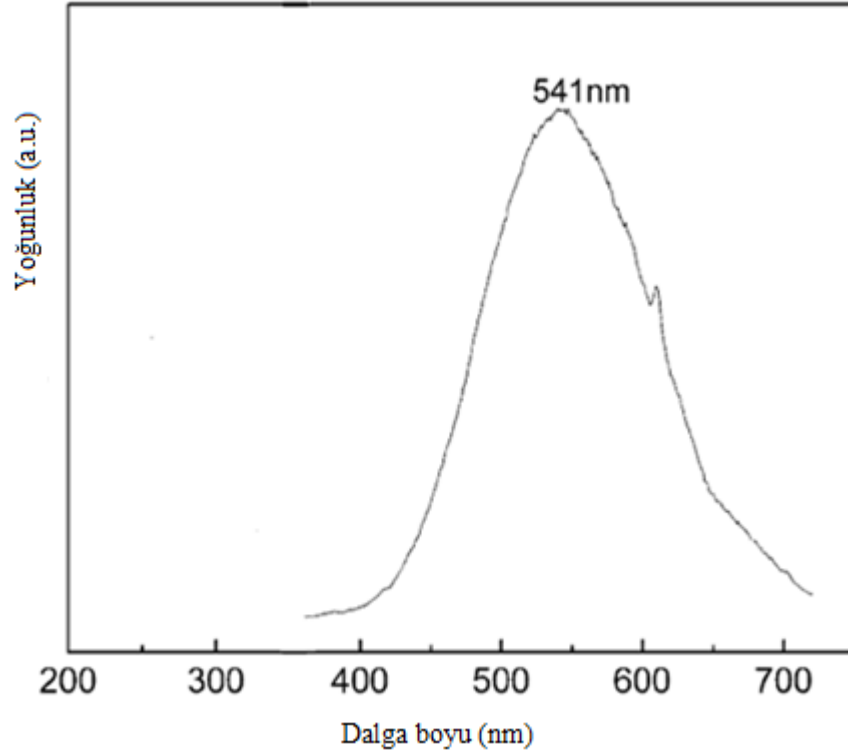
Organik malzemelerin avantajları kendi radyasyonuna şeffaflık, kısa bozunma süreleri, ışın çoğaltıcılara mükemmel uyum sağlayan ışınım spektrumu ve kolay adapte olmayı içerir. Organik sintilatörlerde sintilasyon mekanizması ortamın moleküler yapısına son derece bağlıdır. Yüksek enerjili bir parçacığın geçişinden sonra sintilasyonlama ortamındaki atomların çoğu daha yüksek enerji seviyelerine uyarılmış olacaktır. Uyarma enerjisinin çoğu ısı ve kafes titreşimleri şeklinde bırakılır. Ancak bir sintilatördeki uyarma enerjisinin bir kısmı radyasyon olarak salınır. Sintilasyon verimi, radyasyon olarak görünen enerjinin tortulaşmış kesimi olarak tanımlanır. Hatta en iyi sintilatörün bile tam verimi oldukça düşüktür ki bu değer inorganik malzeme olan sodyum iyodür (NaI) için %7 ve en iyi organik malzeme olan antrasen için %3.5' dir. Organik sintilatörlerden safsızlıkların (kirliliklerin) az miktardaki varlığı bile sintilasyon veriminde söndürmeye (quenching) ve birbirini izleyen bir indirgemeye neden olabilir (Fernow, 1986).

Hiçbir malzeme tüm uygulamalar için üstün nitelikli değildir. Çoğu durumda bir ya da daha çok özellikteki gelişmeler ideal sintilatör arayışında arzu edilebilir. Örneğin, hiçbiri hem ışıldayan hem de çok hızlı olmayabilir. Bundan dolayı sintilasyon araştırmacıları belirli bir uygulama için "daha iyi" nin arayışında sayısız önemin farkında olmalıdır. İhtiyaçlar değişir. Sintilasyon dalga boyu ve ışık verimi kullanmak için en iyi fotodedektörü belirleyecektir (örnek olarak foto çoğaltıcı tüp, foto diyot ve çığ foto diyotu). Halbuki çok güçlü (enerjistik) parçacıkların tespiti için ışık verimi çok hassas olmayabilir. Parçacık enerjisinin daha küçük ya da sabit olduğu yerdeki uygulamalar içinse, artan ışık verimi gelişen kesinlik ve uzaysal çözünürlük için önemlidir. Enerji çözünürlüğü ve orantılılık ayrıca ışık verimine bağlıdır. Hızlı sinyal yükselmesi ve bozunma süresi zamanlama çözünürlüğü ve yüksek sayma oranları veya çalışmanın uçuş zaman modları için önemlidir. Geç ışıldamanın eksikliği tıbbi görüntülemelerde önemlidir. Sağlamlık bilinmesi ya da kontrol edilmesi gereken birkaç faktör içerir: çevresel ve kimyasal dayanıklılık, sertlik ve mekaniksel şok direnci ve sıcaklık ve zaman ile ışık çıkışının değişimidir. Havaya, neme ve ışığa hassasiyetsizlik ve kristallerde zayıf bölünme düzlemlerinin eksikliği oldukça arzu edilen özelliklerdir.

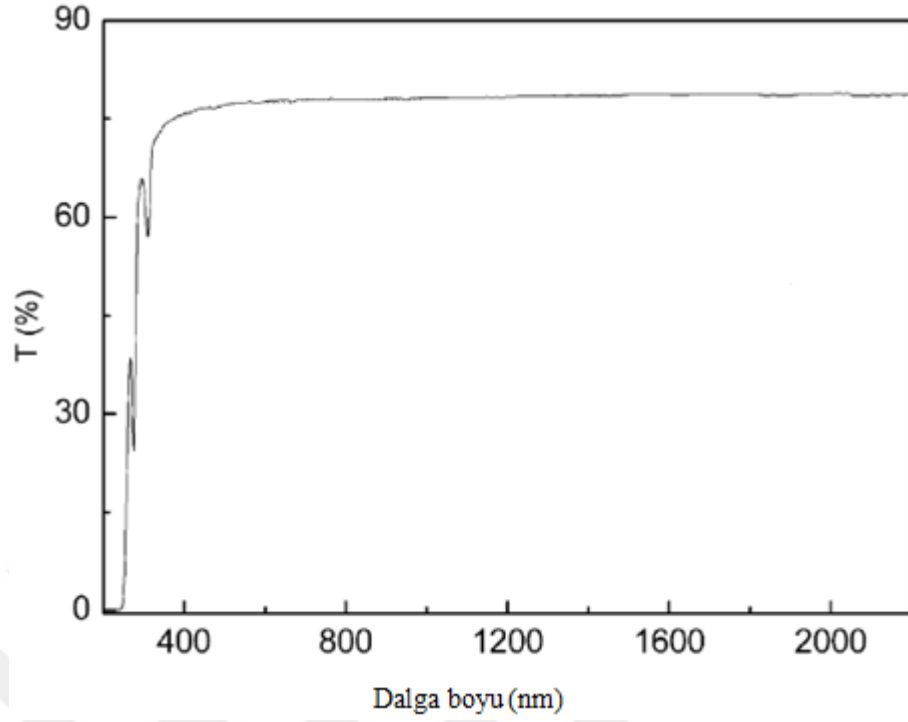
Radyasyon hasarı yüksek radyasyon çevrelerinde oldukça önemlidir. Yüksek yoğunluk ve durdurma gücü (örneğin büyük etkili atomik numara) gerekli olan sintilasyon malzemesinin miktarını azaltmak açısından önemlidir. Nötron tespiti için ${}^6\text{Li}$, ${}^{10}\text{B}$, ya da ${}^{157}\text{G}$ gibi yüksek bir nötron emilim bölümü ile bir bileşen iyonu gereklidir. Sintilatör malzemesi bulk, tel ya da levha şeklinde olabilir. Ham maddenin maliyeti ve malzemeyi arzu edilen şekil ve boyut içine üretme metodu kesin maliyet içine girer. Bu ve diğer faktörler belirli bir uygulama için daha iyi malzemeler seçmede önem farklılaşır. Ama yukarıdaki özelliklerin bir çoğu için “daha iyi” ye sınırlamalar vardır (Weber, 2002).

3.1.1.1. Gadolinyum Tantalum Tetra Oksit (GdTaO_4)

Şekil 3.1 GdTaO_4 malzemesine ait yayılım spektrumunu ve şekil 3.2 ise GdTaO_4 malzemesine ait iletim spektrumunu göstermektedir. İletim spektrumu malzemenin içerisinde kendiliğinden ciddi bir soğurma olmadığını göstermektedir. Yayılım spektrumunun pik değeri olan 541 nm’ de iletim değeri %77,3 olarak belirlenmiştir. İletim değerlerinin yayılım spektrumu içerisinde üst limit değerlerinde olduğu söylenebilir (Liu ve ark., 2010)



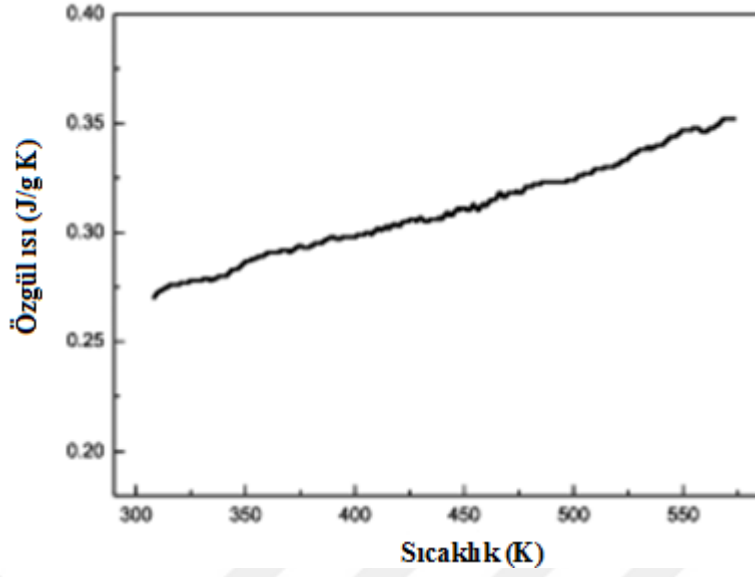
Şekil 3. 1. GdTaO_4 malzemesine ait yayılım spektrumu (Liu ve ark., 2010)



Şekil 3. 2. GdTaO₄ malzemesine ait iletim spektrumu (Liu ve ark., 2010)

GdTaO₄ (GTO) oldukça ilgi çekici bir malzemedir. Bizmut germanyum oksit (BGO) (7.1 g/cm³), PWO (8.3 g/cm³) ve diğer sintilatörler ile kıyaslandığında çok yüksek bir yoğunluk gösterir (8.8 g/cm³) (Yang ve ark., 2014).

308.15 K' den 573.15 K' e kadar ölçülen özgül ısı şekil 3.3' de gösterilmiştir. 308.15 K' deki değer 0.27 j/g K' dir. Bu değer PWO (Cai ve ark., 2011)' nun değerine benzer ve BGO (Suleimenova ve Skorikov., 1992) değerinden ise çok daha küçüktür. GdTaO₄' ün molar kütlesi 402 g/mol' dür ve böylece 308.15 K' de GdTaO₄' ün molar entropisi (molar ısı kapasitesi, C_p) 109 J/mol K olarak hesaplanmıştır (Yang ve ark., 2014).

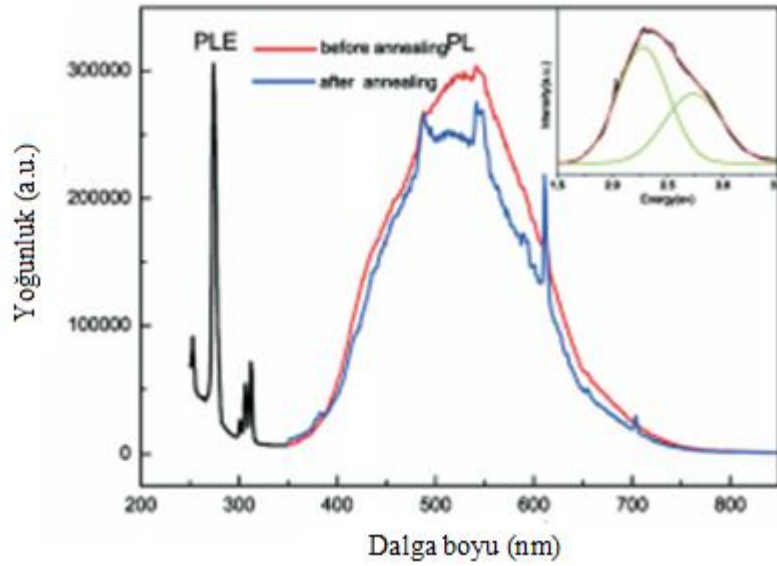


Şekil 3. 3. GdTaO₄ kristalinin sıcaklık – özgül ısı ilişkisi (Yang ve ark., 2014)

Büyük anizotropik termal genleşme ve nispeten düşük ısı muhtemelen büyütme esnasında GdTaO₄ kristalinin kolay bir şekilde çatlamasına neden olacaktır. Bu yüzden küçük bir sıcaklık gradyanı ve düşük bir soğutma işlemi arzu edilebilir (Yang ve ark., 2014).

GdTaO₄ kristalinin ölçülen yoğunluğu latis parametreleri aracılığıyla hesaplanan teoriksel değerinden biraz daha büyük olup Arşimet drenaj metodu ile 8.94 g/cm³ olduğu belirlenmiştir. Bilgimize göre, GdTaO₄ kristalinin kristal yoğunluğu inorganik tek kristalli sintilatörler arasında en yüksek değere sahiptir. Ayrıca GdTaO₄' nun sertliği de kısmen güçlü bir anizotropi göstermiştir (Yang ve ark., 2014).

Şekil 3.4 GdTaO₄ kristalinin uyarma ve yayılımını gösterir. Uyarma spektrumu Gd⁺³ den parlayan (ışıldayan) merkeze enerji transferinin belirtisini gösteren karakteristik Gd⁺³ geçişlerini gösterir. Kazakova ve arkadaşları tarafından belirtilen X-ışını uyarılmış lüminesans spektrumu ile tutarlı olan birçok parazitik pik de dahil 400 nm' den 700 nm' ye geniş bir yayılım bandı emisyon spektrumunda gösterilmiştir (Kazakova ve ark., 1997). Fotolüminesans spektrumu 2.27 ve 2.74 eV' da merkezleşmiş 2 Gaussian bileşeni tarafından fit edilebileceğini oldukça asimetric bir şekil tarafından karakterize edilir. Bir hava atmosferinde 24 saatliğine 1500 °C' deki tavlama işleminden sonra GdTaO₄ kristalinin yayılım bandı hafifçe azalır ve parazitik pikler belli olur. Fotolüminesans bozunma eğrisi şekil 3.4' de gösterilmiştir (Yang ve ark., 2014).



Şekil 3. 4. GdTaO₄ kristalinin uyarma ve yayınlama spektrumu (Yang ve ark., 2014)

3.1.2. Tıpta Kullanımı

X ışını görüntüleme yöntemi tarihsel olarak yaygın bir şekilde kullanılan görüntüleme yöntemidir. Her yıl oldukça çok miktarda X ışını muayenesi yapılmaktadır. Sintilasyon kristalleri tıpta pozitron yayıcı tomografi (PET) ve tek foton emisyonlu bilgisayarlı tomografide (SPECT) kullanılmaktadırlar ve PET ve SPECT kameralarının gözleridir. Bunlar her biri için konumları, dönüşüm zamanları ve enerjileri hakkında bilgi vermektedir. Son zamanlarda PET yüksek hassasiyeti sebebiyle büyük bir gelişme göstermiştir. PET’ de pozitron madde ile etkileştiğinde hemen yok olma sürecine girer ve aynı eksende iki gama yayar. Bununla birlikte yeterli miktarda gama fotonları analiz edilir ve organların tümörlerin görüntüsü yeniden inşa edilmiş olur. SPECT olarak adlandırılan diğer yöntemde ise bir molekül hastaya enjekte edilir ve molekülün hastanın içerisindeki belli bir organda veya tümörde sabit kalması sağlanır. (Lecoq, 2016).

Hastanın maruz kalacağı doz önemli olduğu için sintilasyon malzemesi gelen X ışınlarının tamamını soğuracak şekilde yoğun olmalıdır. Kısa sintilasyon bozunma zamanı dedektör sistemindeki ölü zamanın azalmasını sağlar ve bu da sayım hızını arttırır. Bu sayede duyarlılık ve görüntü kalitesi artar veya hastaya verilen doz miktarı azaltılabilir. Bu da hastaya verilecek doz miktarını görüntü kalitesini azaltmadan en az seviyede tutmayı sağlar. Diğer yandan dental diş tedavilerinde ve tüm vücut

tomografilerinde daha fazla durdurma gücü gerektiğinden daha kalın ekranlar kullanılır. Bu durumlarda tek kristalli inorganik sintilatörler yüksek ışık geçirgenliklerinden dolayı tercih edilirler. Son zamanlardaki gelişmeler düşük dağılımlı tanecik çaplı nano taneciklerinin üretilmesi ile daha saydam seramiklerin üretilmesine yol açmıştır. (Lecoq, 2016).

X-ışını tomografisinde kullanılacak olan sintilatör malzemesi için gereklilikler şunlardır: (Lecoq, 2016).

- 1) 150 keV'e kadar olan X-ışınları için yüksek soğurmaya sahip olmalıdırlar.
- 2) Yüksek ışık verimliliğine sahip olmalıdır.
- 3) Radyo lüminesans spektrumu (görünür bölge veya kızılötesine yakın bölgeler için) silikon foto dedektörlerinin spektral duyarlılığıyla uyumlu olmalıdır.
- 4) İyi bir radyasyon dayanıklılığına sahip olmalıdır.
- 5) Işık verimliliği sıcaklıkla çok fazla değişmemelidir.
- 6) Mekanik özellikleri 2-boyutlu sintilatör dizinlerinin mikro seviyede oluşturulmasına olanak sağlamalıdır.
- 7) Karşılabilir maliyete sahip olmalıdır.

3.1.3. Yüksek Enerjide Kullanımı

Kalorimetreler yüksek enerji fiziği deneylerinde ortaya çıkan parçacıkların enerjilerini ölçmek için kullanılırlar. Bu ölçümler, yeni fiziklerin veya parçacıkların araştırılması için gereklidir. Örnek olarak, elektromanyetik kalorimetresi CMS deneyinde Higgs bozonunun bulunmasında kullanılan elektron ve fotonların enerjilerini belirlemede kullanılır. Bu kalorimetrede optik olarak oldukça saydam kurşun tungsten kristali sintilasyon malzemesi olarak kullanılır. Sintilasyon malzemeleri parçacık enerjileri ile orantılı olarak ışık üretirler. Bu yüksek yoğunluklu kristaller hızlı, kısa ve iyi tanımlanmış ışık atımları meydana getirirler. Bu da hızlı ve kompakt dedektörlerin oluşturulmasına olanak sağlar. Fotodedektörler, kristallerin arasına yapıştırılarak üretilen ışıkların elektrik sinyallerine dönüştürülmelerini sağlarlar. CMS elektromanyetik kalorimetresinde kullanılan kristallerin her biri 1.5 kg ağırlığında ve hacim olarak yaklaşık küçük kahve bardağı kadardır. Bunlardan yaklaşık 80000 tanesi elektromanyetik kalorimetresini oluşturmaktadır. Bu kristalin zorluklarından biri ışık

verimliliğinin sıcaklığa oldukça bağlı olmasıdır. Bunun için sıcaklığı sabit tutma amacı ile soğutma sistemleri kullanılmaktadır. Diğer bir zorluk ise ışık verimliliğinin düşük olmasıdır. Bu yüzden üretilen ışık verimli bir şekilde fotodedektörler tarafından yakalanmalı ve elektrik sinyaline dönüştürülmelidir. Yükseltile bu sinyaller daha sonra analiz edilmek üzere optik fiberler ile taşınmaktadır (Paramatti, 2016; CMS Collaboration, 2008).

Hadron kalorimetresi, hadronların yani kuark ve gluonlardan oluşan (proton, nötron, pion, kaon vs.) enerjilerini ölçmek için kullanılırlar. Ayrıca, nötrino gibi etkileşmeyen yüksüz parçacıkların dolaylı ölçümlerine olanak sağlarlar. Örnekleme kalorimetrelere birbiri ardına gelen yoğun soğurucu ve sintilasyon malzemesi tabakalarından oluşur. Hadronik bir parçacık soğurucu ile çarpıştığı zaman çok sayıda ikincil parçacıklar oluşur. Bu parçacıklar diğer tabakalara akarlar ve yeni etkileşmeler sonucunda düş şeklinde parçacıklar oluşur. Bu parçacıklar sintilasyon malzemelerinde ışığın oluşmasına sebep olurlar. Bu ışıklar fiberler ile ışık okuma kutularına taşınırlar. Bu tip kalorimetrelere sintilasyonlarda üretilen ışığın kaçmaması için malzemeler arasındaki boşluklar yansıtıcı boya ile doldurulmalıdır. Bu sayede bir parçacığın konumu, enerjisi ve geliş zamanı ölçülebilir. Oluşan parçacık duşlarının içerilmesi ve enerjilerinin depolanabilmesi için yaklaşık olarak en az 1 metre (m) uzunlukta örnekleme kalorimetresine ihtiyaç duyulmaktadır (Paramatti, 2016; CMS Collaboration, 2008).

3.1.4. Foto Çoğaltıcı Tüpler

Sintilatör ortamından uyarılma sonucu yayınlanan fotonların tespitinde FÇT' ler kullanılır. Temel olarak bir foto katot, kademeli olarak voltaj uygulanan 8-10 adet dinot olarak adlandırılan elektrottan ve bir toplama elektrodundan (anot) oluşmuştur. (Gören, 2011).

Sintilasyon sayaçlarının büyük faydası FÇT' ler tarafından sağlanır. FÇT' ler, ışığı ölçülebilir bir elektrik akımına dönüştüren cihazlardır. FÇT' ler sintilatör ışığını çevirirler ve karar alma ve hızlı elektronikler ile kullanımını mümkün kılan elektriksel bir darbe içine genişletirler (Fernow, 1986). Oldukça duyarlıdırlar ve nükleer ve yüksek

enerji fiziğinde genellikle sintilatör dedektörü ile beraber kullanılmaktadırlar. Farklı şekillerde kullanımları mümkündür (Atakan, 2014; Öztürk, 2007).

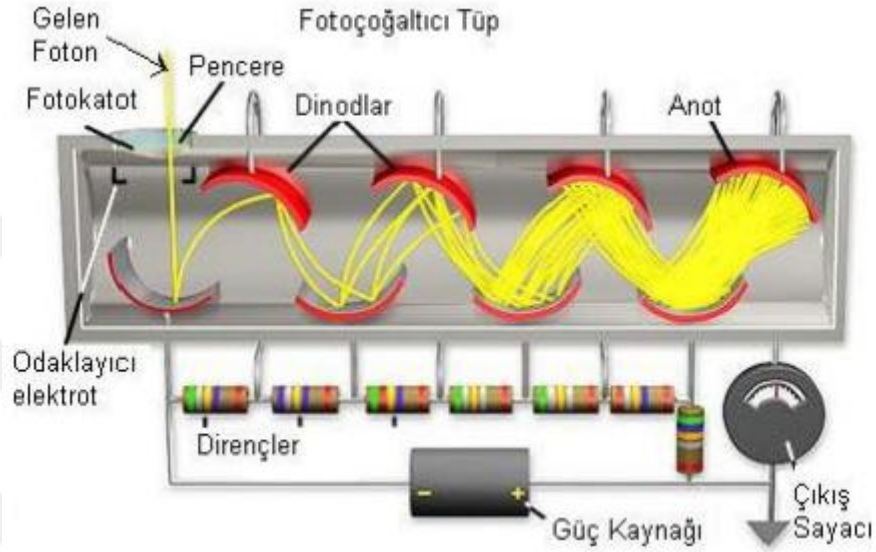
Tüp performansı için bazı önemli durumlar foto katot boyutu, spektral hassasiyet, foto katot yüzeyi üzerine duyarlılık benzerliği ve farklı elektron yörüngeleri için yayılan darbeleri içerir. Bazı tüpler özellikle morötesi bölgede daha büyük cevaba sahip olmak için tasarlanmıştır ve kuartz giriş pencereleri kullanılabilir. Diğer iki önemli etki ise gecikmiş atım ve karanlık akımdır. Gecikmiş atım tüpteki tortu gazından ya da dinotların birinden bir iyon onu foto katoda geri getirdiği ve ikinci bir darbe başlattığı zaman meydana gelir. Karanlık akım ise hiçbir giriş ışığı olmadığı zaman tüpteki akımdır. Bu başlıca foto katottan elektronların termal yayınından doğar (Fernow, 1986).

FÇT' ler tüpteki hassas (narin) odaklanma koşullarını bozan magnetik alanın varlığına karşı çok hassastırlar. Bu nedenden dolayı tüp genellikle yüksek bir geçirgenlikli “mu metal” kapanı tarafından çevrelenir. Tüpün boşluğundaki magnetik akı çizgileri kapan içine akıtılmaya meyillidir. Koruyucu etki tüp ve kapan arasında küçük bir boşluk bırakarak yükseltilir. Kapan foto katot arkasında en azından bir kapan yarı çapı kadar genişletilmelidir. Çok güçlü magnetik alanlar için koruyucunun çoklu tabakaları gerekli olabilir. En dıştaki kapan geniş bir doyma indüksiyonuna sahip yumuşak bir demirden yapılmış olmalıdır (Fernow, 1986).

Çalışması süresince yüksek bir voltaj katot, dinot ve anoda uygulanır. Gelen bir foton foto katotu etkilediği zaman, fotoelektrik etki ile bir elektron yayımlanır. Uygulanan yüksek voltaj dolayısıyla, elektron ilk dinota doğru yönelir ve hız kazanır. İlk dinota çarparak enerjisinin bir kısmını dinottaki elektronlara aktarır. Bu da ikincil elektronların yayımlanmasına neden olur. Bu elektronlar da bir sonraki diğer dinota yönelir ve hızlanmaya devam eder. Elektronlar sıradaki dinota çarparlar ve yeni elektronların yayımlanmasını sağlarlar. Olay bu şekilde sürüp gider ve bir elektron şelalesi dinotlardan aşağıya doğru oluşturulur. Anottaki bu şelale, kuvvetlenir ve analiz edilebilir bir akım vermesi için toplanır. Foto çoğaltıcılar sürekli bir biçimde; örneğin sabit bir aydınlatma altında, ya da sintilatör sayımında olduğu gibi puls şeklinde çalıştırılabilirler. Her iki durumda da, eğer katot ve dinot sisteminin doğrusal olduğunu kabul edecek olursak, foto çoğaltıcının çıkışında meydana gelen akım, doğrudan gelen fotonların sayısı ile orantılı olacaktır. FÇT' lere bağlı bir sintilatör çiftinden oluşan bir

radyasyon dedektörü sadece parçacığın varlığı hakkında bilgi vermekle kalmaz, aynı zamanda parçacığın enerjisi hakkında da bilgi verir (Atakan, 2014; Öztürk, 2007).

Çok çeşitli FÇT' ler vardır. Bu nedenle foto çoğaltıcı tüp seçiminde, fiziksel boyut, gelen farklı dalga boylu radyasyonlara foto katodun cevabı, foto katodun duyarlılığı, kazanç, gürültü seviyesi ve zamanlama karakteristikleri gibi parametreler göz önüne alınır (Dizman, 2015; Şarer, 2001).



Şekil 3. 5. Foto çoğaltıcı tüpün şematik gösterimi (Gören, 2011)

3.1.5. Foto Diyotlar

Diyot belirli bir eşik enerjiye sahip olan ve bu eşik enerjisi geçildikten sonra tek bir yönde akım geçiren, ancak diğer yönde akım geçirmeyen bir devre elemanı olarak bilinir. Anot ve katot olmak üzere iki ucu bulunur ve akımın yönü anottan katoda doğrudur. Zener diyot, kristal diyot, tünel diyot, foto diyot ve ışık yayıcı diyot (LED) gibi çeşitleri vardır (Özcan, 2013).

Foto diyot uzay, hızlandırıcılar, tıbbi görüntüleme sistemleri ve nükleer güç santralleri gibi iyonize radyasyona sahip ortamlarda yaygın olarak kullanılan optoelektronik yarı iletken cihazlardan biridir (Jafari ve ark., 2018).

Foto diyotlar, yarı iletken içerisindeki p-n eklemi ışık tarafından uyarıldığı zaman akım veya voltaj üreten foto sensörlerdir (Anonymous 2, 2018). Foto diyotlar, ışığa karşı duyarlı olan malzemelerdir ve yarı iletkenlerdeki gibi N-P tipi zıt katkı bölgelerin bir araya getirilmesinden meydana gelirler. Bu durum, yüksek direnç

oluşturan yük taşıyıcılarının tükendiği bir bölge oluşturur. Yüksek direnç, düşük sıcaklıkta yüksek hassasiyetle çalışabilen silikon ve germanyumun kullanıldığı dedektörlerin yapılmasını sağlamıştır. Foto diyotlarda aydınlatma pencereleri bulunmaktadır. Foto diyotlar aydınlatma pencereleri aracılığıyla dışarıdan ışık alırlar. Foto diyot ışık enerjisi ile iletme geçtiğinden dolayı normal diyotlara göre ters yönde bir voltaj uygulanır (Özcan, 2013).

Silikon (Si) foto diyotlar fonksiyonlarına göre bu şekilde sınıflandırılırlar. Si foto diyotlar (PN tipi), Si PIN foto diyotlar, Si ÇFD , MPPC (çoklu piksel foton sayacı) ve PSD (pozitron hassasiyetli) dedektörlerdir. Si foto diyotların genel özellikleri şunlardır (Anonymous 2, 2018):

- Gelen ışığa karşı mükemmel doğrusallık
- Kompakt ve hafif
- Mekanik olarak dayanıklı
- Geniş aralıkta spektral tepki
- Düşük gürültü
- Uzun yaşam

3.1.5.1. Çığ Tipi Foto Diyot

ÇFD' ler silikon yarı iletkeninden yapılmıştır ve kuvvetli elektrik alan içerisindedirler. Bir sintilasyon fotonu silikona çarptığı zaman atomdan bir elektron koparılır ve bu elektron elektrik alanında hızlandırılır, diğer atomlara çarpar ve yeni elektronlar koparılır. Bu da çığ şeklinde ve üstel olarak artan elektronların oluşmasını sağlar. Bu sayede kısa zamanda yüksek akım elde edilmesini sağlar. Bu sinyal yükseltilir, sayısallaştırılır ve optik fiberler ile analiz edilmek üzere taşınırlar (Paramatti, 2016; CMS Collaboration, 2008). Bununla birlikte dezavantaj olarak yüksek besleme gerilimi gereksinimine ihtiyaç vardır ve maliyeti yüksektir (Küçükbal, 2009; Franz ve Jain, 2000).

ÇFD' nin PIN foto diyotlara göre üstünlüğü bir iç kazanca sahip olmasından gelir. Bu özelliği sayesinde atmosfer etkileri sonucu ve artan iletim uzaklığından dolayı zayıflamış çok seviyedeki sinyalleri yükseltebilme kapasitesine sahiptir (Küçükbal, 2009).

3.1.5.2. PIN Foto Diyotlar

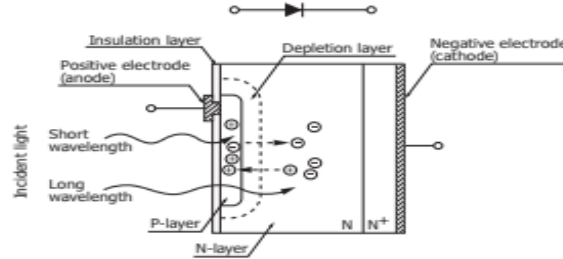
PIN (P-Intrinsic-N) foto diyotlarda, p-n yapısı arasına katılanmış bir katman konularak tüketim bölgesinin genişliği kontrollü bir şekilde genişletilir. Uygulanan ters gerilim tümüyle i bölgesinde (katılanmamış katman veya çok az katkı) gözlemlenir (Sarıkaş, 2014).

PIN foto diyotlar tüketim bölgesinin çok geniş olmasından dolayı daha fazla foton toplanması, tüketim bölgesinin kalınlığının kontrol edilebilir olması ve tepki süresinin piko saniyeler seviyesinde olmasından dolayı diğer foto diyotlara göre daha üstündür (Sarıkaş, 2014).

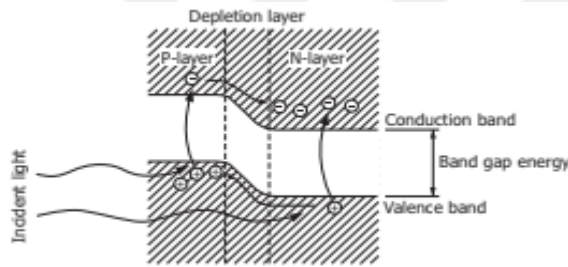
PIN foto diyotların, bant genişliği ve duyarlılığı yüksektir. Atomdan koparılan elektronlar ve oluşan holler, eklem bölgesi son derece saf olduğu için hiçbir engel ile karşılaşmadan hızlı bir şekilde PIN dışına çekilirler. Dolayısıyla t_r ve t_f süreleri kısa olur. Böylece yüksek frekansta gelen darbeleri ayırt etmeleri mümkün olur ve besleme kolaylığı vardır. (Küçükbal, 2009; Wilson and Hawkes 1989; Majumdar and Ricklin, 2008).

Şekil 3.6 bir Si foto diyotun enine kesitini gösterir. P tipi bölge (p tabakası) foto duyarlı yüzeydedir, n tipi bölge (n tabakası) alt tabakada yer alarak p-n eklemine oluşturur. p ve n tabakası arasındaki yapı içi bölge tüketim bölgesi olarak adlandırılır. p tabakasının kalınlığı, n tabakasının kalınlığı ve katılama miktarı dedektörün spektral tepkisini ve tepki hızını belirler. Bir Si foto diyot bir ışıkla uyarıldığı zaman eğer ışığın enerjisi bant aralığı enerjisinden büyükse valans bandındaki elektronlar uyarılır ve iletkenlik bandına geçerler ve valans bandında boşluklar bırakırlar (Şekil 3.7). Bu elektron boşluk çiftleri p tabakası, tüketim bölgesi ve n tabakası boyunca oluşur. Tüketim bölgesindeki elektrik alanı elektronları n tabakasına doğru, boşlukları da p tabakasına doğru hızlandırır. n tabakasında üretilen elektron-boşluk çiftleri içerisindeki elektronlar ve p tabakasından gelen elektronlar birlikte n tabakasının iletkenlik bandında kalırlar. n tabakasındaki boşluklar tüketim bölgesine nüfuz ederler orada hızlandırılırlar ve p tabakasının valans bandında toplanırlar. Bu yolla elektron-boşluk çiftleri, ki bunlar gelen ışınların miktarıyla orantılıdır, n ve p tabakasında toplanır. Bu p tabakasında pozitif yüklerin ve n tabakasında negatif yüklerin oluşmasına yol açar. Bir elektrot p ve

n tabakasında yerleştirilirse ve bir dış devreye bağlanırsa elektronlar n tabakasından boşluklar da p tabakasından karşı elektrotlara akarlar ve bir akım oluştururlar. Bu elektron ve boşluklar yarı iletkende akım oluştururlar ve taşıyıcılar olarak adlandırılırlar (Anonymous 2, 2018).



Şekil 3. 6. Si foto diyot enine kesitin şematik gösterimi (Anonymous 2, 2018)



Şekil 3. 7. Si foto diyot PN eklem (birleşme) durumu (Anonymous 2, 2018)

3.2. Yöntem

Bir sintilatörün enerji çözünürlüğü dört parametre ile karakterize edilebilir: Yanal terim, fotoelektron istatistiği, sabit ve gürültü terimleri. Enerji çözünürlüğü denklem 3.1' de görüldüğü gibi bu parametrelerin kuadratik toplamıdır.

$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{a_{yan}}{E^{1/4}} \oplus b_{sab} \oplus \frac{a_{pe}}{\sqrt{E}} \oplus \frac{c_{gür.}}{E} \quad (3.1)$$

Burada a_{yan} , a_{pe} , b_{sab} ve $c_{gür.}$ sırasıyla yan al terim, fotoelektron istatistiği terimi, sabit ve gürültü terimlerine karşılık gelir. Burada, ilk iki terim sırasıyla malzeme içerisindeki duş gelişimindeki dalgalanmaları (a_{yanal}) ve foto elektron istatistiğinden gelen katkıyı temsil eder. Sabit terim ise malzemedeki homojensizliklerin ve safsızlıkların katkısıyla oluşur. Ayrıca duş gelişimindeki dalgalanmaların bir kısmı sabit

terim ile temsil edilir. Foto elektron istatistiğinden gelen katkı denklem 3.2 ile verilir (CMS Collaboration, 2008).

$$a_{pe} = \sqrt{\frac{\bar{F}}{N_{pe}}} \quad (3.2)$$

Burada N_{pe} foto elektronların sayısı, F ise yayılım ağırlıklı artan gürültü faktörüdür. F çığ kazanç sürecinden kaynaklanır. N_{pe} foto dedektörün kuantum verimliliğine, foto dedektörlerin aktif alanına ve malzemenin arka ucuna ulaşan fotonların sayısına bağlıdır. Bu çalışmada gürültü terimi enerji çözünürlüğü hesabına katılmamıştır. İki çeşit fotodedektör kullanılmıştır: PIN foto diyot ve çığ foto diyot. Yakın zamanlarda birçok deneyde PIN diyot kullanılmıştır: (Lewandowski, 2002; Miyabayashi, 2002; Ablıkim, 2010). Hamamatsu S2744-08 PIN foto diyotunu kullanmıştır. Diğer taraftan ÇFD S8664-55 CMS deneyinde kullanmıştır (Renker, 2002). S2744-08 ve ÇFD S8664-55 sırasıyla 340 ile 1100 nm ve 320 ile 1100 nm arasında spektral aralığa sahiptir. PIN ve ÇFD sırasıyla $1\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ ve $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ aktif alana sahiptirler. Silikon foto diyotlar yüksek tepki zamanına, yüksek duyarlılığa ve düşük gürültü kirliliğine sahiptirler. PIN diyotlar iç kazançta sahip değildirler. Dolayısıyla fotoelektron istatistiğine artan gürültü faktörü yüzünden katkıda bulunamazlar. ÇFD çığ kazancına sahip olduğu için çözünürlüğe artan gürültü faktörü olarak etki eder (Pilicer ve ark., 2005). Bu çığ kazancındaki dalgalanmalardan kaynaklanır ve yayınlanan fotonların dalga boyu spektrumuna bağlı olarak değişir. Denklem 3.3 ile bu faktör elde edilebilir.

$$\bar{F} = \frac{\int F(\lambda)Em(\lambda)d\lambda}{\int Em(\lambda)d\lambda} \quad (3.3)$$

Burada $F(\lambda)$ dalga boyuna bağlı artan gürültü faktörüdür ve $Em(\lambda)$ sintilasyon spektrumunun yayılım ağırlıklarındadır (Pilicer ve ark., 2005).

Sintilasyon malzemesi içerisinde üretilen fotonların sayısı malzemede depolanan enerjiyle orantılıdır. Eğer malzeme içerisinde kendiliğinden soğurma yoksa üretilen fotonlar yüzey yansıması kaybı dışında malzemenin arka ucuna ulaşacaktır. Bu yüzden şu metot enerji çözünürlüğünü hesaplamak için Geant4 programı ile kullanılabilir. İlk

olarak ilgili ışın enerjisi için enerji depolama dağılımı elde edilir. Bu dağılımı uygun bir fonksiyonla fit etmek enerji çözünürlüğü değerini verecektir. Bu değer enerji depolanmasındaki dalgalanmalar sonucu yanal ve sabit terime katkı sağlayacaktır. Enerji çözünürlüğüne bir diğer katkı fotoelektron istatistiğinden kaynaklanır. Burada fotodedektörde üretilen fotoelektronlar, fotoelektron istatistik teriminin hesaplanmasında kullanılır. Bu sayı üretilen fotonların ve fotodedektörlerin aktif alanına ulaşan fotonların sayısına bağlıdır. Bu çalışmada ortalama üretilen fotonların sayısı üzerinden fotoelektronlar hesaplanmıştır. Malzemenin iletim spektrumu ile arka uca ulaşan fotonların sayısı hesaplanmıştır. Son olarak dedektörlerin aktif alanının malzemenin arka yüzünün toplam alanı oranı ile fotodedektöre çarpan fotonların sayısı hesaplanmıştır. Son adım fotodedektörlerde üretilen fotoelektronların sayısını yayılım ağırlıklı kuantum verimliliğini kullanarak belirlemektir.

Enerji depolama dağılımı logaritmik Gaussian fit fonksiyonu ile benzetimi yapılır. Bu fit fonksiyonu denklem 3.4 ile verilir.

$$F(x) \equiv N \exp \left(-\frac{1}{2\sigma_0^2} \ln^2 \left(1 - \frac{x-x_p}{\sigma_E} \eta \right) - \frac{\sigma_0^2}{2} \right) \quad (3.4)$$

Burada $\sigma_0 = 2 / \xi \sinh^{-1}(\eta\xi / 2)$ ve $\xi = 2\sqrt{\ln 4}$ 'dir. Formülde, x_p pik değeridir, η asimetri parametresi, N normalleşme faktörü ve σ_E ise yarı maksimumda tam genişliğin ξ değerine bölümüdür. Enerji çözünürlüğü σ_E 'nin pik değeri x_p 'ye oranı olarak tanımlanmıştır.

3.2.2. Geant4 Simülasyon Programı

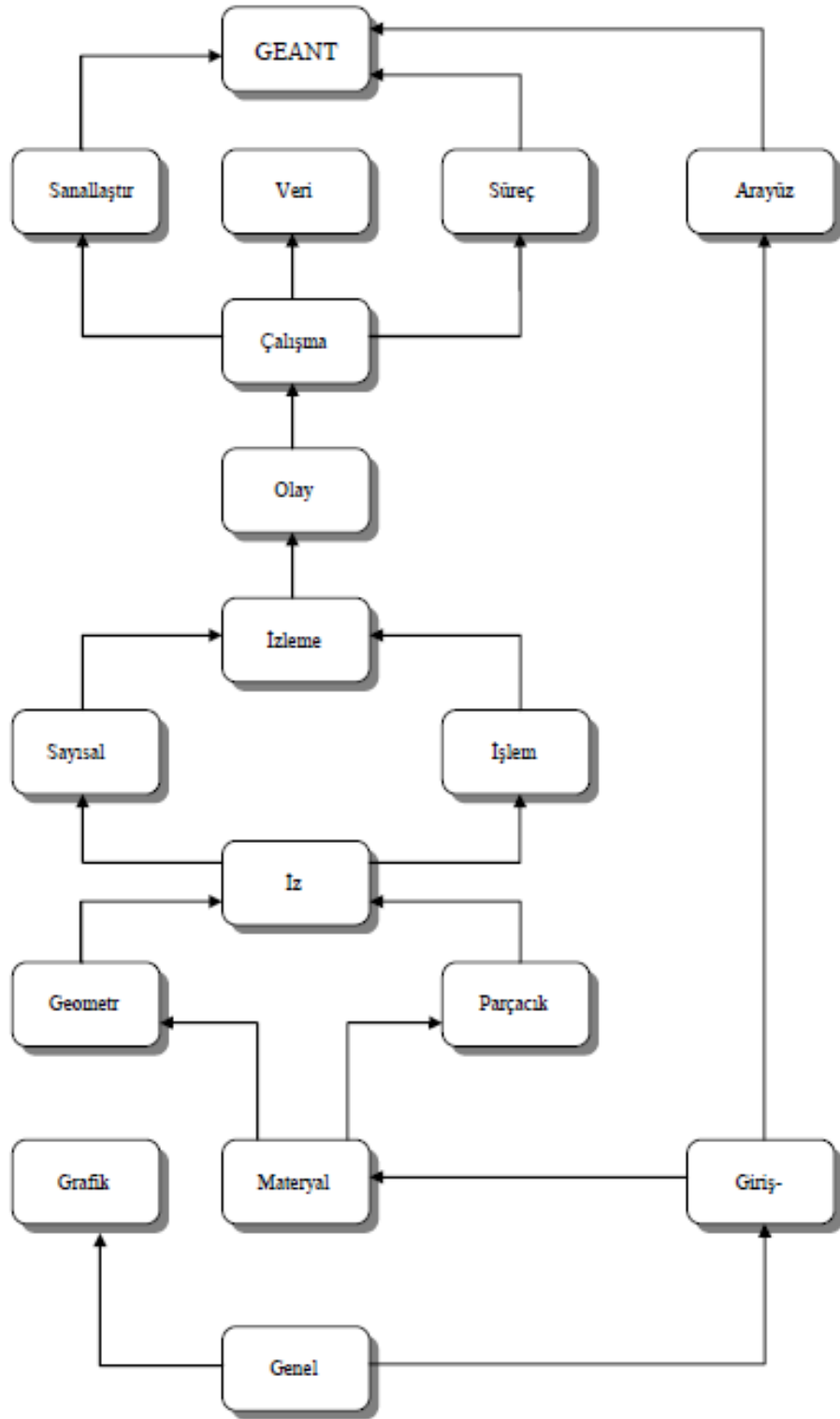
Yüksek enerji fiziğinde nesneye dayalı simülasyon yazılımı fikri ilk olarak 1993' de CERN ve Japon ulusal hızlandırıcı merkezindeki (KEK) iki ayrı çalışmada görülmüştür. 1993 yılında CERN ve KEK' de bilimsel araştırmaların daha iyi bir yazılımla nasıl yapılabileceği düşüncesiyle bir eski versiyon olan Fortran yazılım tabanlı Geant3' ün geliştirilmesi düşünülerek yeni bir yazılım olan Geant4' ün temeli atılmıştır. CERN ve KEK' de yapılan çalışmalar 1994 yılında birleştirildi ve resmi bir

çalışma grubu oluşturuldu. Böylelikle RD44 nesne tabanlı ilk simülasyon programını yayımlamış oldular. 1994 yılından sonra RD44 yazılımını geliştirmek üzere Avrupa, Japonya, Kanada ve USA’ daki üniversite, enstitü ve araştırma merkezlerinden bir ekip oluşturuldu ve 1997 yılının sonuna kadar yüksek enerji fiziği işlem modellerini temel alan yeni bir çalışma gerçekleştirildi. Bu çalışmaların sonucu olarak bugün de kullanmakta olduğumuz Geant4 yazılımı geliştirildi (Çapalı, 2011). Analiz hesaplarında fiziksel süreç olarak Geant4 programında standart elektromanyetik etkileşme fiziği kullanılmıştır (Agostinelli ve ark., 2003; Allison ve ark., 2006; Allison ve ark., 2016). Geant4 eski bir yazılım tipine göre oldukça ileri bir yazılım olan c++ nesne yönelimli bir programlama dili kullanılarak yazılmış bir programdır. Bu programın ilk oluşturulmasında etken olarak büyük hadron çarpıştırıcısı (LHC) içerisindeki dedektörlerin simülasyonu için bir çalışma başlatılmış olmasıdır. Geant4 simülasyon kiti bilhassa dedektör simülasyonunda öncü role sahiptir. İlk yapım aşaması yüksek enerji fiziğine yönelik olsa da nükleer fizik ve diğer bilim dalları içerisinde ihtiyaç duyulan simülasyonları yapabilme imkanını sunmaktadır (Baykal, 2007). Geant4 programı Monte Carlo tekniği tabanlı bir simülasyon kitidir (Hüyük, 2009). Yazılım kitinin Monte Carlo tabanlı olmasının nedeniyse olayların gerçekleşme olasılıklarını göz önüne alan bir yazılım olmasındandır (Baykal, 2007). Monte Carlo yöntemi, istatistiksel teknikler kullanılarak bir deneyi ya da olayı sayısal veriler elde ederek gerçekleştirme yöntemidir. Aslında olasılık teorisine bağlıdır. Var olan bir problem rastgele sayılar kullanılarak bu metot ile defalarca simüle edilir ve hesap edilmek istenen parametere ise bu simülasyonların sonuçlarına bakılarak yaklaşık olarak hesaplanabilir. Günümüzde Monte Carlo metotlarının nümerik integrasyon, sistem analizi, kısmi diferansiyel denklemler, integral denklemleri, ekonomik modelleme, matematiksel finans, kuantum mekaniği, istatistiksel fizik, nükleer ve katıhal fiziği ve sosyal bilim dallarında kullanımı mevcuttur. GEANT, adını “GEometry ANd Tracking (Geometri ve iz sürme)” kelimelerinin kısaltmasından almaktadır. Başta yüksek enerji fizik deneylerinde kullanılmak amacıyla hazırlanmıştır ama bugün bu alana ek olarak, nükleer fizik, medikal ve biyoloji bilimleri, astrofizik, hızlandırıcı fiziği gibi alanlarda da kullanılmaktadır (Bolat ve ark., 2011).

Geant4’ ün yazılım kiti örnek olarak dedektör simülasyonu için gereken tüm dedektör geometrisi, dedektör için kullanılan materyal, element veya bileşik, dedektörün

hassaslığı, parçacık oluşturma, parçacık tipi, fiziksel süreçler (elektromanyetik, hadronik, standart etkileşme vs.) tracking, görüntüleme, dijitalasyon, ara yüzler ve histogramlama vb gibi, bir dedektör simülasyonu için gerekli olan tüm c++ sınıflarını içerir. Geant4' ün en önemli özelliklerinden biri de bu ara yüzlerdir. Bu ara yüz tamamı ile kullanıcıya yönelik bir kolaylık sağlama amacıyla kullanıcının yazmış olduğu ana program içinde G4UI yöneticisi (Geant User Interface) içerisinde belirtilerek simülasyon çalışma satırında makro dosyalarının kullanımını sağlar. Böylelikle, kullanıcı kendi yazmış olduğu programın özelliğine göre program içerisinde değişiklik yapmadan makro dosyalar üzerinde değişiklik yapıp istediği simülasyon özelliklerini değiştirebilme imkanına sahiptir. Geant4 programında basit bir simülasyon yapmak için gereken üç zorunlu sınıf mevcuttur. Bunlar dedektörün geometrisinin, materyalinin, hassaslığının belirlendiği G4VUserDetectorConstruction, fiziksel süreçlerin belirlendiği G4UserPhysicsList ve parçacık oluşumu ve tipinin enerjisinin vb. özelliklerinin belirlendiği G4User PrimaryGenerationAction sınıflarıdır. Ek olarak programın seviyesine göre ilave edilen sınıfları da içerir. Bu sınıflar ise programın akışını, olayları, parçacık iz sürümünü, basamakların kontrol ve akışını sağlar (Baykal, 2007).

Buradaki tracking olayı, dedektör ile etkileşen parçacıkları basamak basamak dedektörün etkin hacim içerisindeki hareketini birer snapshot olayı gibi çekerek kullanıcıya dedektörün farklı hacimleri içerisinde depolanan enerjiyi, yerini yaptığı etkileşmeyi ve momentum gibi özellikleri veren ve bunu kullanıcıya görsel bir şekilde, parçacıkların dedektördeki izlediği yörünge olarak gösterebilmesidir (Baykal, 2007).

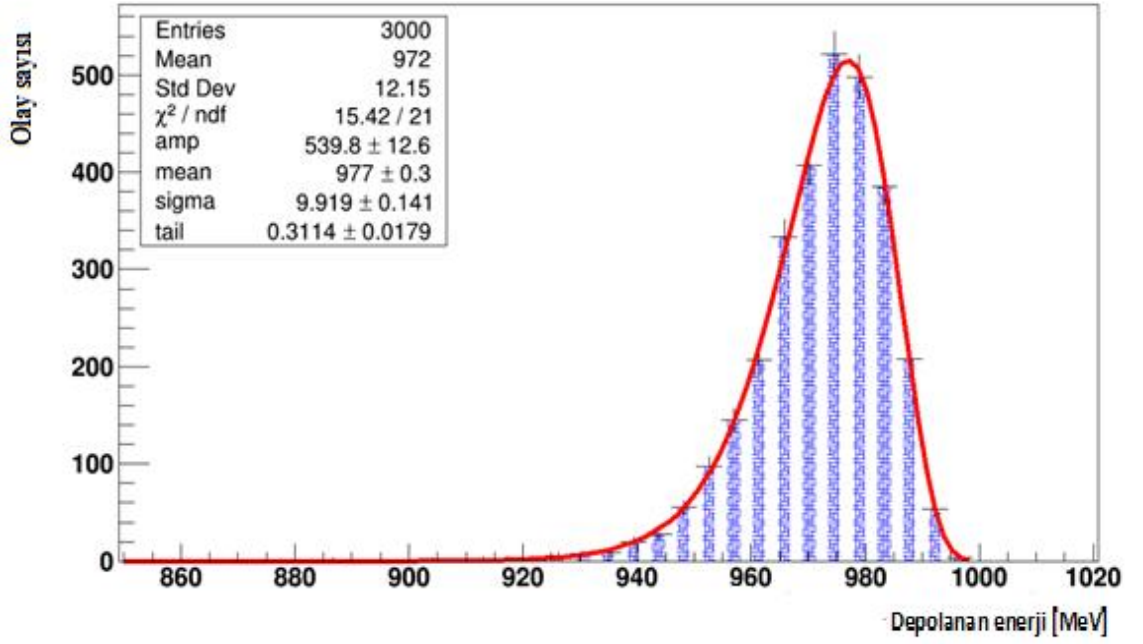


Şekil 3. 8. Geant4 kategori sınıf şeması (Çapalı, 2011)

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

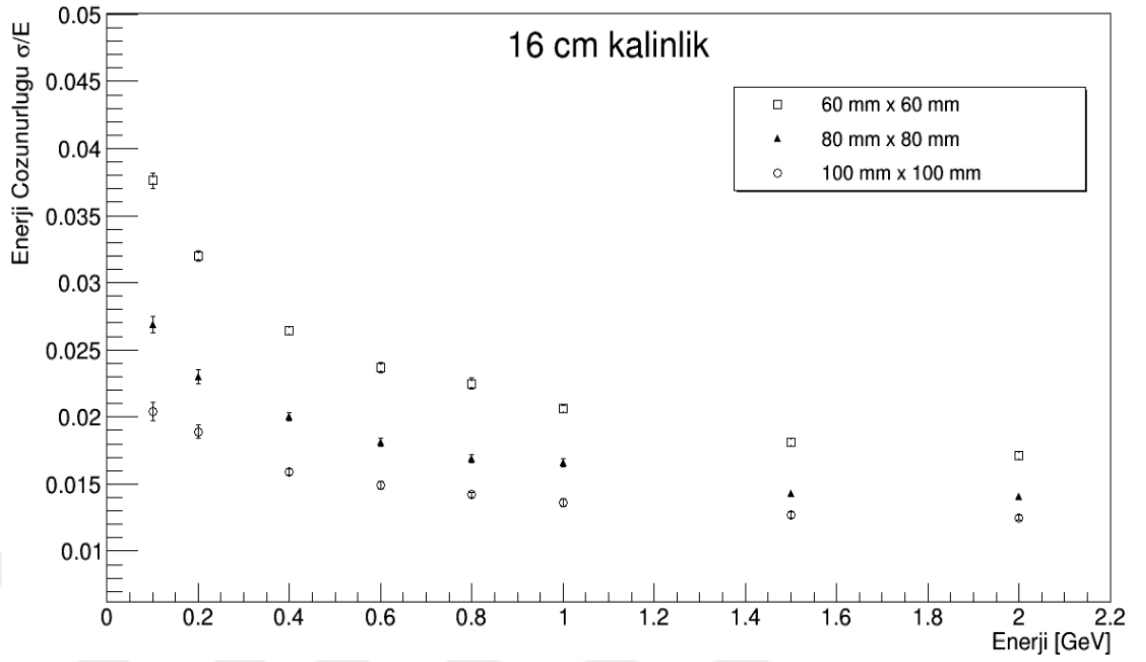
Gürültü terimi ışın ortada yok iken fotodedektörde oluşan sinyalden kaynaklanan bir terimdir. CMS elektromanyetik kalorimetrede kullanılan ÇFD için bu 150 fotoelektron olarak tanımlanmaktadır. ÇFD için yayılım ağırlıklı aşırı gürültü faktörü ise 3.1 olarak hesaplanmıştır (Pilicer ve ark., 2005; CMS Collaboration, 2008). Ortalama fotoelektron sayısı, iletim oranına, yayılım ağırlıklı kuantum verimliliğine ve fotodetektörlerin aktif alanlarının boyutuna bağlı olarak hesaplanmıştır. İletim oranı yayılım spektrumu ile birlikte değişmemekte ve 541 nm tepe dalga boyunda 77.3% değerine ulaşmaktadır. Yayılım ağırlıklı kuantum verimlilikleri PIN diyot ve ÇFD için sırasıyla 79% ve 84% olarak hesaplanmıştır. Fotodetektörlerin aktif alanlarının sintilatörlerin toplam arka yüzey alanlarına oranları PIN diyot ve ÇFD için sırasıyla 1 ve 0,125 olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamada her bir sintilatörün arka yüzünde iki fotodetektörün yer aldığı göz önüne alınmıştır. Bu bilgiler ışığında ve ortalama ışık verimliliği olan 360 foton/MeV kullanılarak birim enerji başına üretilen fotoelektron sayısı PIN diyot ve ÇFD için sırasıyla 220 fe/MeV ve 29 fe/MeV olarak belirlenmiştir. Daha sonra fotoelektron istatistiğinden kaynaklanan terim PIN ve ÇFD için sırasıyla 0,23% ve 1,031% olarak hesaplanmıştır. Buradan ÇFD kullanıldığında toplam enerji çözünürlüğüne katkının PIN' e göre daha fazla olduğu görülmektedir.

Olay başına enerji depolanmasındaki dalgalanmalar gelen ışın enerjileri ve farklı enine boyutlarda ve kalınlıklarda kalorimetreler için histogramlara dönüştürülmüştür. Bu dağılımlar denklem 3.4' e göre fit edilmiştir. Enerji çözünürlüğü değerleri fit parametreleri olan sigma ve orta değerler kullanılarak hesaplanmıştır. 100 mm x 100 mm enine boyutlu ve 20 cm kalınlıklı sintilatör ve 1 GeV/c enerjili ışın için fit örneği Şekil 4.1' de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi düşük enerji bölgesinde özellikle boylamasına enerji depolanmasındaki dalgalanmalardan dolayı asimetri oluşmaktadır. Dağılımlar fit edildikten sonra enerji çözünürlüğü değerleri gelen ışın enerjilerine bağlı olarak histograma dönüştürülmüştür.

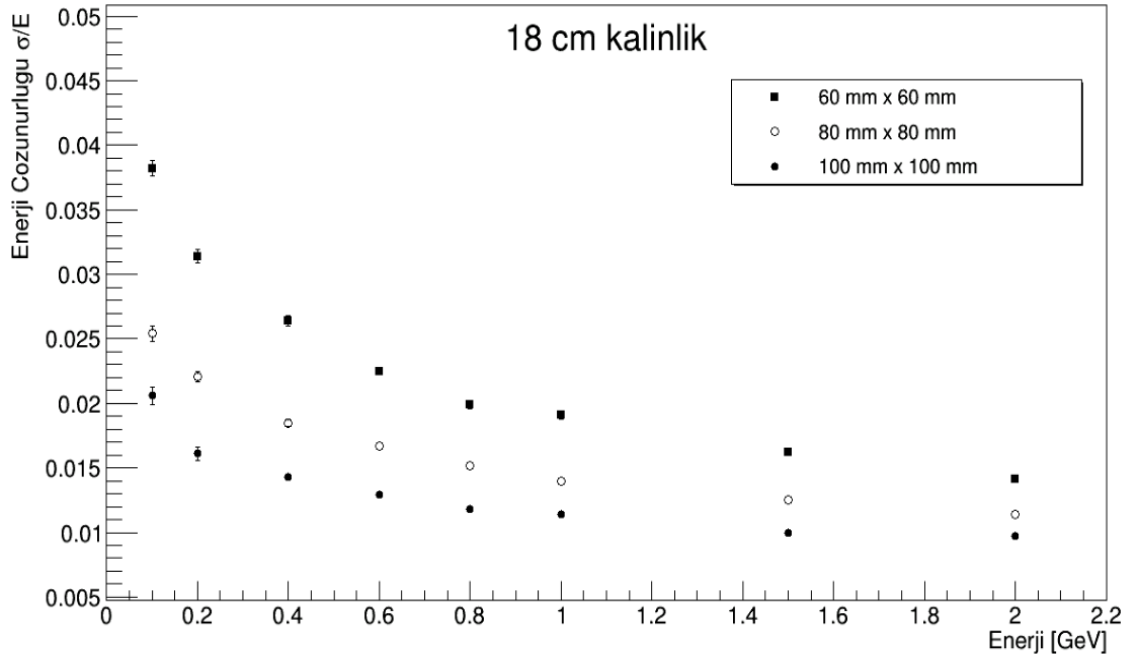


Şekil 4. 1. 1 GeV gelen gama ışını için uydurma (fit) fonksiyonu ile birlikte enerji depolama dağılımı

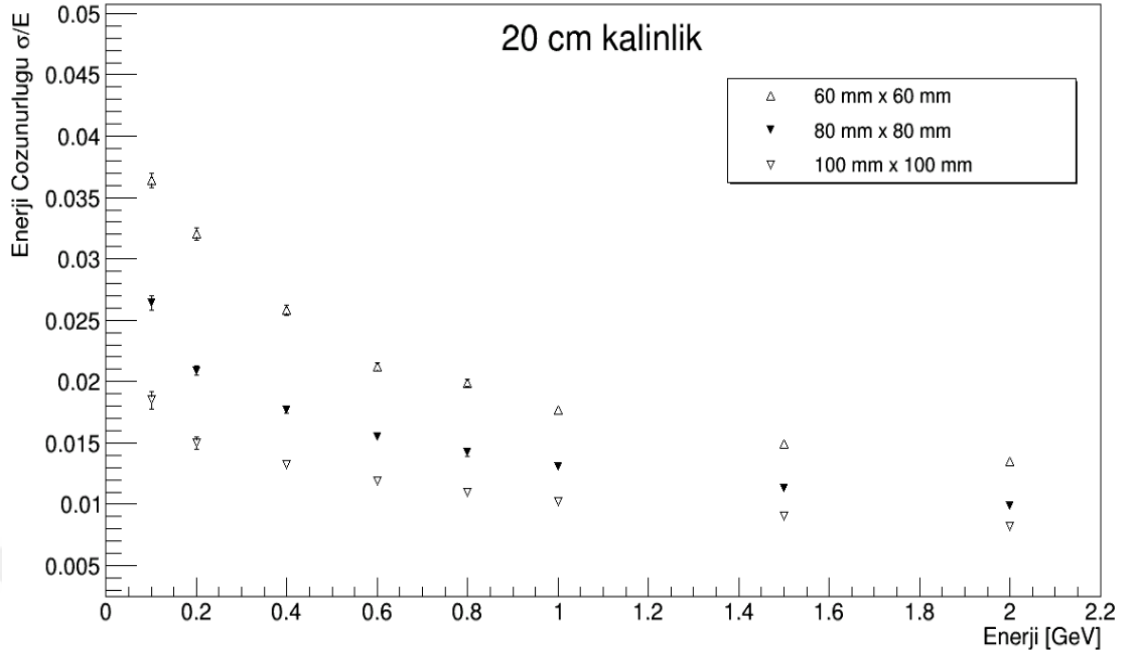
Şekil 4.2, 4.3 ve 4.4 aynı kalınlıkta ve farklı enine alana sahip kalorimetrelere ait sonuçları göstermektedir. Bu grafiklerden görüldüğü üzere daha düşük enerjilerde, enine boyut daha etkili olmakta ve çözünürlükler enine boyutla beraber önemli ölçüde değişmektedir. Çözünürlüklerin 2 GeV/c ' ye doğru yüksek enerjilerde birbirine yaklaştığı görülmektedir.



Şekil 4. 2. 16 cm kalınlıklı ve farklı enine alanlı kalorimetrelerde gelen ışın enerjilerine göre enerji çözünürlükleri



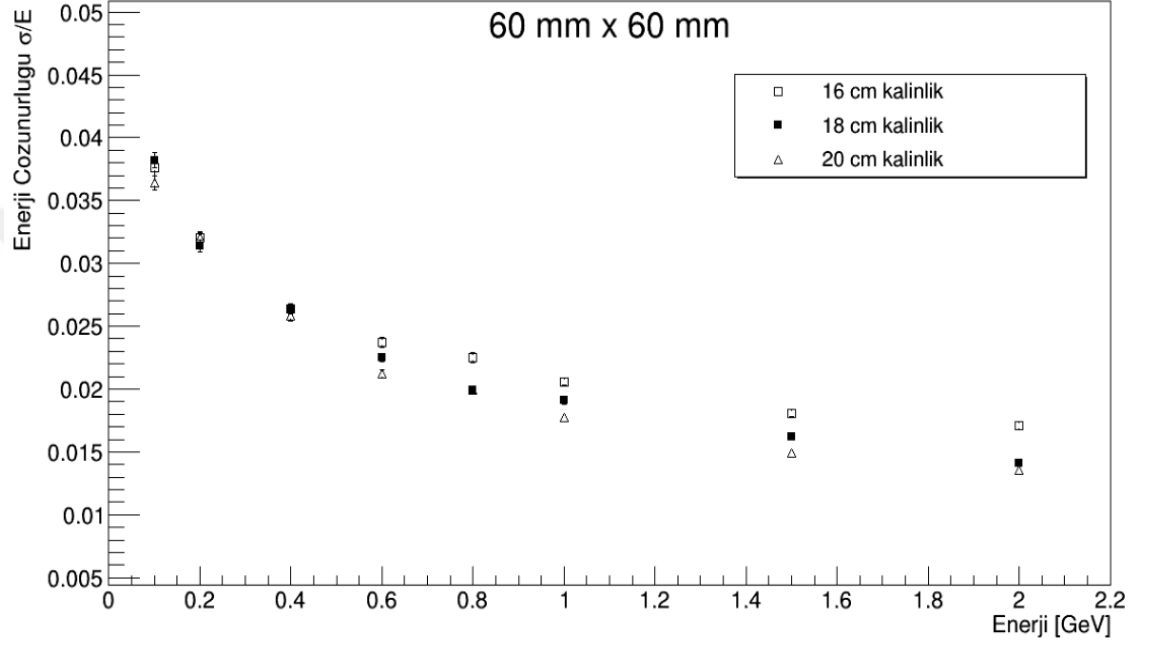
Şekil 4. 3. 18 cm kalınlıklı ve farklı enine alanlı kalorimetrelerde gelen ışın enerjilerine göre enerji çözünürlükleri



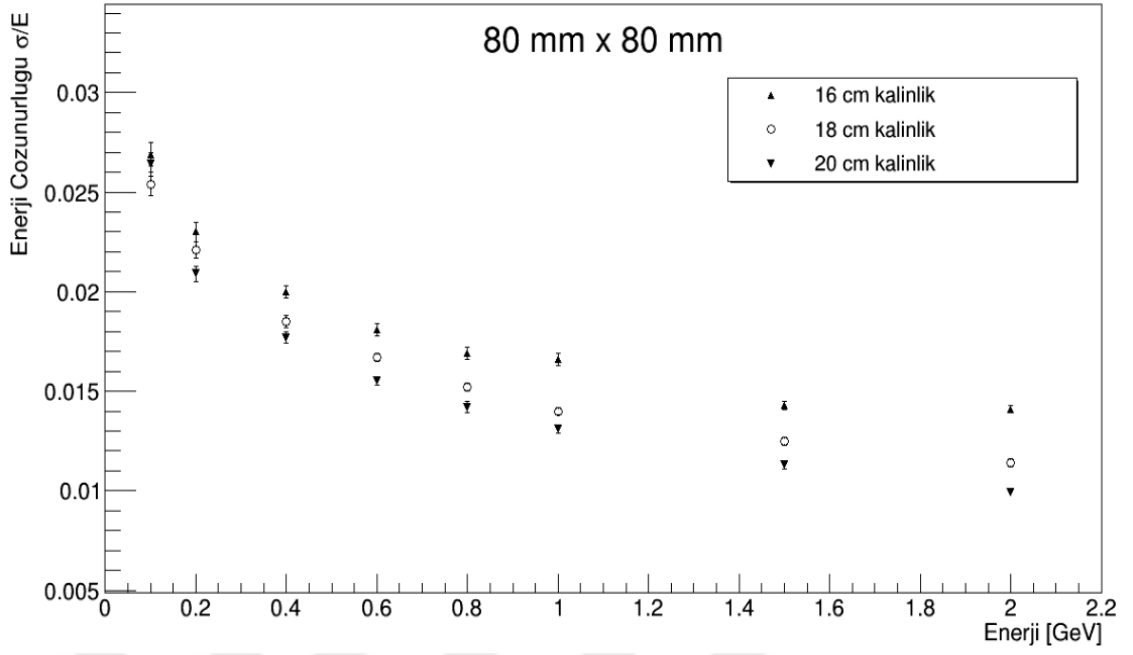
Şekil 4. 4. 20 cm kalınlıklı ve farklı enine alanlı kalorimetrelerde gelen ışın enerjilerine göre enerji çözünürlükleri

Şekil 4.5, 4.6 ve 4.7 aynı enine alana ve farklı kalınlıklara sahip kalorimetreler için enerji çözünürlüğü değerlerini göstermektedir. Görüldüğü üzere, çözünürlükler kalınlıkla beraber daha çok daha geniş enine alanlar için değişmektedir. 60 mm x 60 mm ve 80 mm x 80 mm enine alanlı ve 16 cm kalınlıklı kalorimetreler için enerji çözünürlük değerleri aynı boyutta daha önce yapılan değerlere göre daha kötüdür (Kocak, 2015., Kocak ve Tapan, 2017). Ancak, 16 cm kalınlık ve 100 mm x 100 mm enine alan için uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. 18 cm kalınlıklı ve 80 mm x 80 mm ve 100 mm x 100 mm enine alanlı kalorimetreler için çözünürlük değerleri önceki çalışmalar ile uyumlu sonuçlar göstermektedir. Diğer taraftan, açık bir gelişme 100 mm x 100 mm enine alanlı ve 18 cm kalınlıklı kalorimetreye ait sonuçlarda görülmektedir. 80 mm² enine alanlı ve 18 cm kalınlıklı kalorimetre için çözünürlük değerleri 600 MeV, 1 GeV ve 2 GeV ışın enerjilerinde sırasıyla 1,67%, 1,40%, ve 1,14% değerlerine ulaşır. Diğer taraftan, 100 mm² enine alana ve 18 cm kalınlığa sahip kalorimetrede çözünürlük 600 MeV, 1 GeV ve 2 GeV ışın enerjilerinde enerji çözünürlükleri 1,29%, 1,14%, ve 0,97% olarak belirlenmiştir. 20 cm kalınlık için sonuçların 18 cm'ye ait sonuçlara benzediği görülmektedir. 80 mm x 80 mm' ye ait sonuçların aynı boyutlu malzeme ile yapılan daha önceki sonuçlar ile uyumlu olduğu görülmüştür. Önemli gelişme, 100 mm x 100 mm enine alanlı ve 20 cm kalınlıklı kalorimetre için ortaya çıktığı görülmektedir.

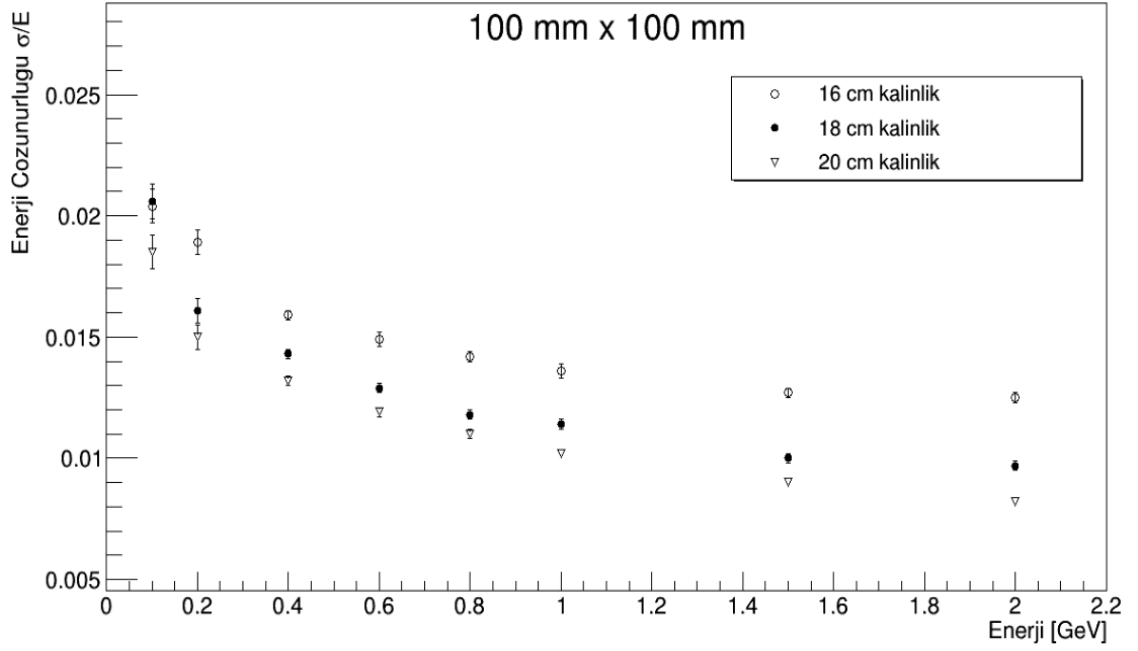
80 mm² enine alanlı ve 20 cm kalınlıklı kalorimetre için çözünürlük değerleri 600 MeV, 1 GeV ve 2 GeV ışın enerjilerinde sırasıyla 1,55%, 1,31%, ve 0,99% değerlerine ulaşır. Diğer taraftan, 100 mm² enine alana ve 20 cm kalınlığa sahip kalorimetrede çözünürlük 600 MeV, 1 GeV ve 2 GeV ışın enerjilerinde enerji çözünürlükleri 1,19%, 1,02%, ve 0,82% olarak belirlenmiştir.



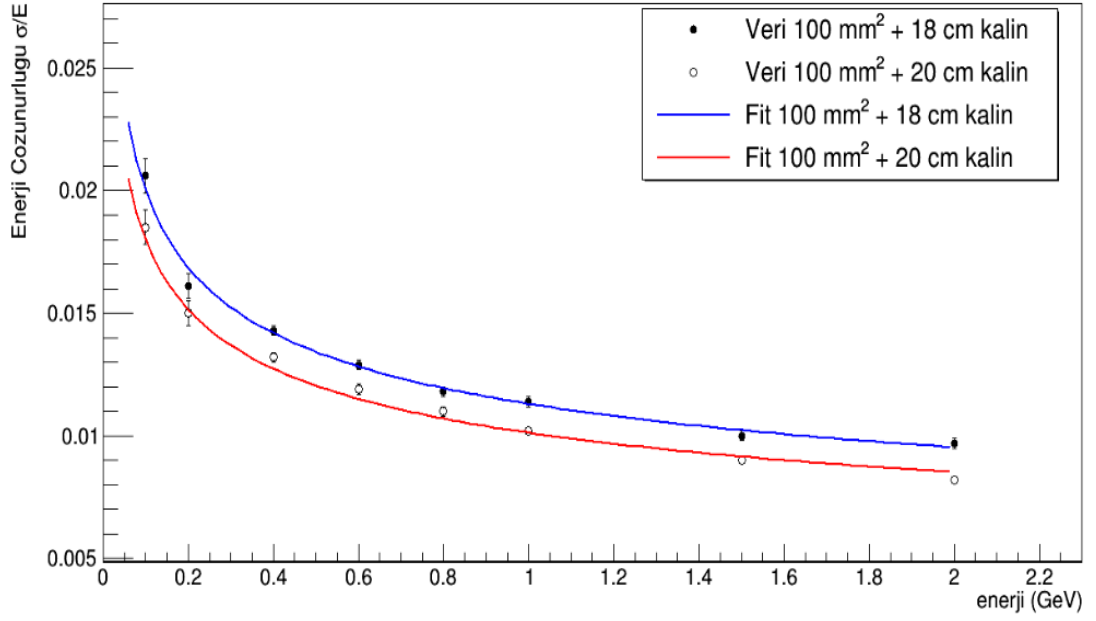
Şekil 4. 5. 60 mm x 60 mm enine alanlı ve farklı kalınlıklı kalorimetrelerde gelen ışın enerjilerine göre enerji çözünürlükleri



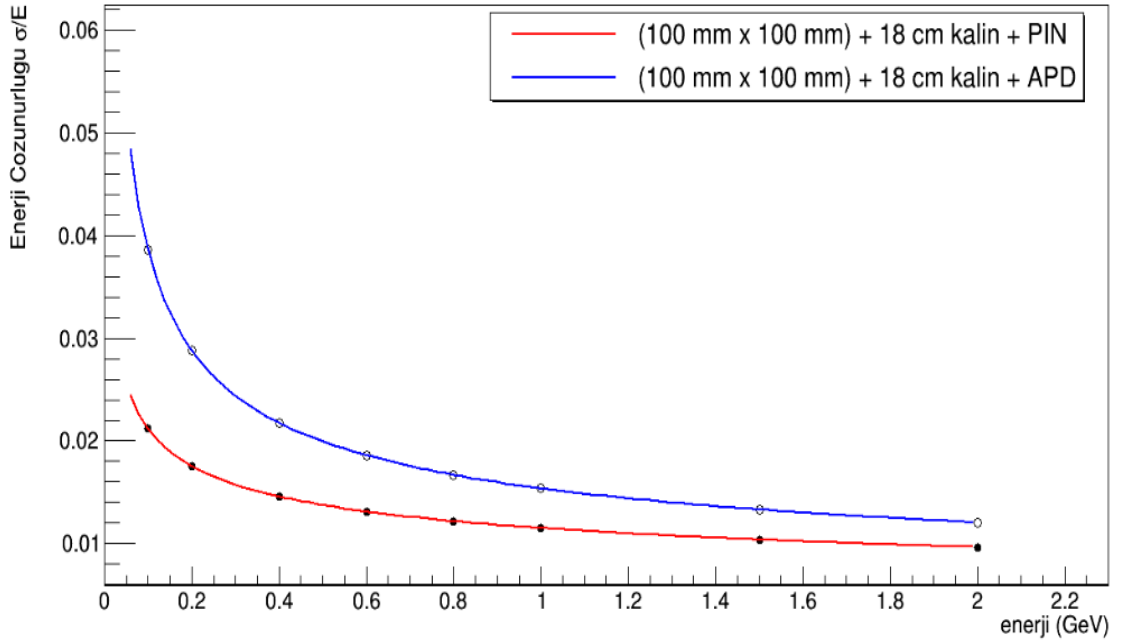
Şekil 4. 6. 80 mm x 80 mm enine alanlı ve farklı kalınlıklı kalorimetrelerde gelen ışın enerjilerine göre enerji çözünürlükleri



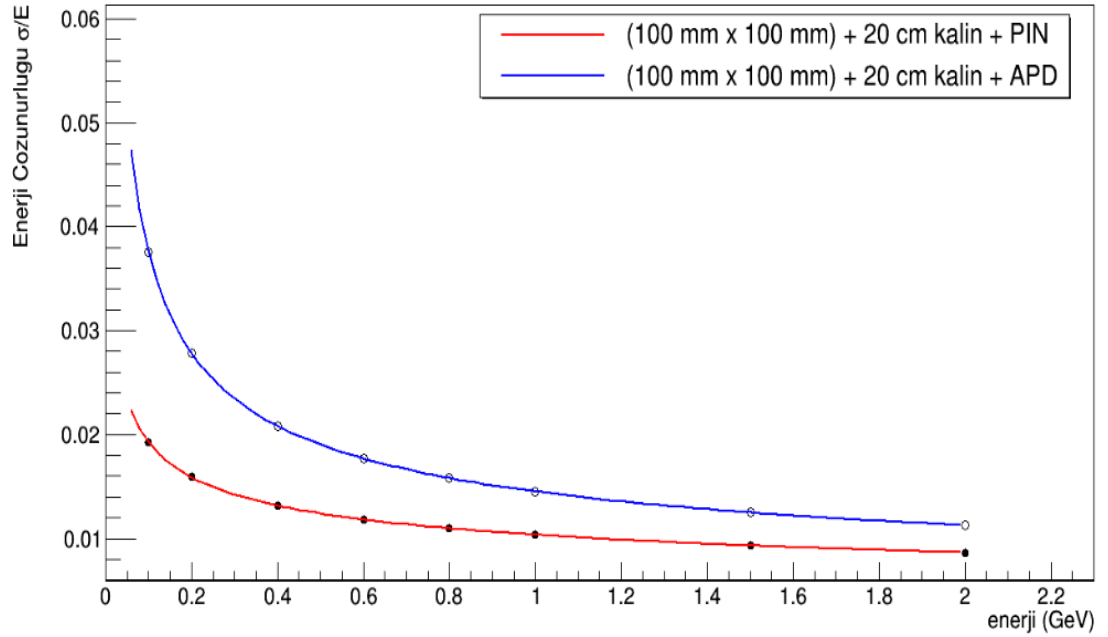
Şekil 4. 7. 100 mm x 100 mm enine alanlı ve farklı kalınlıklı kalorimetrelerde gelen ışın enerjilerine göre enerji çözünürlükleri



Şekil 4. 8. 100 mm² enine alanlı ve 18 cm ve 20 cm kalınlıklı sintilatörlerin içsel enerji çözünürlüğü



Şekil 4. 9. 100 mm² enine alanlı ve 18 cm kalınlıklı kalorimetreye ait ÇFD ve PIN foto detektörleri ile elde edilmiş parametrize enerji çözünürlük fonksiyonları



Şekil 4. 10. 100 mm² enine alanlı ve 20 cm kalınlıklı kalorimetreye ait ÇFD ve PIN fotodetektörleri ile elde edilmiş parametrize enerji çözünürlük fonksiyonları

Işın enerjilerine bağlı enerji çözünürlüğü dağılımları gürültü parametresi hariç denklem 3.2 ile fit edilmiştir. Bu yol ile, yanal terim ve sabit terim farklı geometriler için elde edilmiştir. Parametrize edilmiş farklı geometrilere ve fotodetektör bileşimlerine ait sonuçlar Şekil 4.9 ve 4.10 ile gösterilmiştir. Bu çizimler 100 mm² enine boyutlara ve ÇFD ve PIN diyotları ile 18 ve 20 cm kalınlığa sahip kalorimetre geometrileri için çizilmiştir. ÇFD ile birlikte elde edilen çözünürlüklerin PIN ile elde edilenlere oranla daha düşük olduğu görülmektedir. Sonuç olarak, çözünürlük değerlerinde önemli bir gelişmenin aynı boyutlardaki farklı malzemeler ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırıldığında ortaya çıktığı görülmektedir. ÇFD ile oluşan çözünürlüğün özellikle düşük enerjilerde PIN' e göre daha kötü olduğu görülmektedir. Bu büyük ölçüde ÇFD' nin boyutlarına bağlıdır. ÇFD' nin sayısı artırılarak ya da boyutları büyütülerek çözünürlük önemli derecede iyileştirilebilir. Farklı geometri ve fotodetektör bileşimleri için elde edilen toplam enerji çözünürlüğü parametreleri ve sabit terimler aşağıdaki gibi elde edilmiştir:

$$\sigma/E = 1.124\%/E^{1/4} \oplus 1.044\%/ \sqrt{E} \oplus 0.123\% \oplus 0.01\%/E \quad 100 \text{ mm}^2 + 18 \text{ cm}$$

$$+ \zeta_{FD}$$

$$\sigma/E = 1.124\%/E^{1/4} \oplus 0.216\%/ \sqrt{E} \oplus 0.123\% \oplus 0.01\%/E \quad 100 \text{ mm}^2 + 18 \text{ cm}$$

$$+ PIN$$

$$\sigma/E = 1.013\%/E^{1/4} \oplus 1.043\%/ \sqrt{E} \oplus 7.291 \times 10^{-14}\% \oplus 0.01\%/E \quad 100 \text{ mm}^2$$

$$+ 20 \text{ cm} + \zeta_{FD}$$

$$\sigma/E = 1.013\%/E^{1/4} \oplus 0.216\%/ \sqrt{E} \oplus 7.291 \times 10^{-14}\% \oplus 0.01\%/E \quad 100 \text{ mm}^2$$

$$+ 20 \text{ cm} + PIN$$



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Sintilatör malzemelerinde yüksek yoğunluk daha kompakt dedektörlerin oluşturulması için önemli bir faktördür. Bu çalışma daha yüksek yoğunluğa sahip sintilatörlerin yakın boyut geometrilerinin sonuçlarına kıyasla kalorimetrelerin enerji çözünürlüğünü nasıl etkilediğini göstermektedir. $GdTaO_4$ önceki çalışmalarda kullanılan malzeme boyutlarına yakın ya da daha küçük ölçülerde (boyutlarda) homojen (türdeş) bir kalorimetre olarak göz önünde bulunduruldu. PWO ile kıyaslandığında temel avantajı ışık verimidir ve PWO' nun üç katıdır (PWO' nun ışık verimi 120 foton/MeV ve $GdTaO_4$ ' ün ışık verimi 360 foton/MeV). Kullanılan malzemenin yoğunluğu da 8.94 g/cm^3 'tür. Enerji depolama dalgalanmasının uygun dedektör boyutlarının göz önünde bulundurulması durumunda $GdTaO_4$ ile önemli bir ölçüde düştüğü görülmüştür. Hatta daha düşük boyutlar da hesaba katıldığında uygun enerji çözünürlüklerinin bazı geometrilerde elde edildiği görülmüştür. Enerji depolama dalgalanması nedeniyle % 1' in altındaki içsel enerji çözünürlüğüne bazı ışın enerjileri ve geometrilerinde ulaşılmıştır. Parametrelerle ifade edilen enerji çözünürlük fonksiyonlarının, seçilmiş olan 18 cm ve 20 cm kalınlıklarında ihmal edilebilir sabit terimlere sahip oldukları fark edilmiştir. Enerji depolanmasından kaynaklanan çözünürlük $E^{1/4}$ şeklindeki enerji ile iyi bir uyumluluk göstermektedir. Ayrıca PWO ile kıyaslandığında ışık verimliliğinin fazlalığı ve yoğunluğunun sintilatörün ÇFD ile kullanıldığında enerji çözünürlüğünün azalışını durdurmaya katkı sağladığı görülmektedir. 1 GeV' in altındaki nispeten düşük ışın enerjilerinde bile ÇFD ve PIN' in her ikisi ile de yapılan çalışmanın iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

KAYNAKLAR

- Ablikim, M., An, Z.H., Bai, J.Z., and et al.,2010. Design and construction of the BesIII detector. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A**,614(2010) 345.
- Agostenelli, S., et al., 2003. Geant4-a simulation toolkit. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A**. 506 (2003), 250-303.
- Allison, J., et al., 2006. Geant4 developments and applications. **IEEE Transactions on Nuclear Science**. 53 No:1 (2006), 270-278.
- Allison, J., et al., 2016. Recent developments in Geant4.**Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A**,835 (2016), 186-225.
- Anonymous 1,<https://en.wikipedia.org/wiki/Scintillator#CITEREFLeo1994> . Eriřim tarihi:18.07.2018.
- Anonymous 2,
https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/e02_handbook_si_photodiode.pdf . Eriřim tarihi: 10 mayıs 2018.
- Atakan, M., 2014. Kars bölgesinde ölçülen kozmik ışın akı yoğunluğu. Kafkas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi Kars.
- Baykal, S., 2007. Yeni tip gama dedektörleri ve iz sürme tekniği. Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi Ankara.
- Bizarri, G., 2010. Scintillation mechanism of inorganic materials: From crystals characteristics to scintillation properties. **Journal of Crystal Growth**, 312:1213-1215. USA.
- Bolat, A., Çitçi Ş., Akkaya R., 2011. Elektromanyetik ve hadron kalorimetrelerinin farklı açılardaki verimleri.**BAÜ Fen Enstitü Dergisi Cilt 13(1)**, 9-25.
- Cai, A., Yang, L.P., Ren, G.H., Chen, J.P., Xi, T.G., ve Xu, Z.J., 2011. Specific heat and thermal diffusivity and conductivity of PbWO₄ single crystal related to its crystal orientation at (300 to 673) K. **Journal of Chemical & Engineering Data**, 56:2202-2204.
- CMS Collaboration., Chatrchyan, S., 2008. The CMS Experiment at the CERN LHC, **JINST 3 (2008) S08004**.

- Çapalı, V., 2011. Yüksek enerji fiziği parçacık dedektörlerinde silikon şerit dedektörün GEANT4 simülasyonu ve ROOT nesneye yönelik veri analiz yapısı. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi Isparta.
- Ding, H., Kinross, A., Wang, X., Yang, H., Zhang, Q, Liu, W, Sun, D., 2018. Experiment and density high functional theory analyses of GdTaO₄ single crystal. **Solid State Communations**, 273:5-10.
- Dizman, S., 2015. İdrar örneklerinde trityum seviyesinin belirlenmesi ve bazı kimyasal parametrelerle ilişkisi. Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi Rize.
- Ermiş, E.E., 2012. Plastik sintilasyon dedektöründen oluşan spektrometrede zaman ölçüm tekniğinin uygulanması. Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi İzmir.
- Fernow, R., 1986. Introduction to experimental particle physics. **Cambridge University Press**, New York, New Rochelle, Melbourne, Sydney.
- Franz, J.H. ve Jain, V.K., 2000. Optical communications components and systems. **Alpha Science International Ltd.**, 717 s, Pang Bourne.
- Gören, E., 2011. Adana içme sularında trityum aktivitesinin belirlenmesi. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi Adana.
- Hüyük, T., 2009. Yeni bir nötron dedektörü tasarımı için simülasyon çalışmaları-NEDA. Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi Ankara.
- Jafari, H., Fegghi, S.A.H.,Boorboor, S., 2018. Evaluation of gamma dose effect on PIN photodiode using analytical model. **Radiation Physics and Chemistry**, 144:379-385. Tehran, Iran.
- Kazakova, L.I., Bykov, I.S., ve Dubosvsky, A.B., 1997.**J. Lumin.** ,72-72, 211-212.
- Knoll, G, F., 1989. Radiation dedection and measurement. **John Wiley & Sons, Inc.**, U.S.A.
- Kocak, F., 2015. Simulation studies of crystal-photodetector assemblies for the Turkish accelerator center particle factory electromagnetic calorimeter. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Researc Section A**,787:144-147. Turkey.

- Kocak, F., ve Tapan, I., 2017. Simulation of LYSO crystal for the TAC-PF electromagnetic calorimeter. **ACTA PHYSICA POLONICA A**, 131:527. Turkey.
- Küçükbal Mustafa, 2009. Optiksel telsiz ile iletişimde veri transfer kapasitesi artırma teknikleri. Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi Ankara.
- Lecoq, P., 2016. Development of new scintillators for medical applications. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A**, 809:130-139. USA.
- Lewandowski, B., 2002. The BABar electromagnetic calorimeter. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A**, 494 (2002) 303.
- Liu, W., Zhang, Q., Zhou, W., Gu, C., Yin, S., 2010. Growth and luminescence of M-Type GdTaO₄ and Tb:GdTaO₄ scintillation single crystals. **IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE**, 57:1287-1290.
- Majumdar, A.K., and Ricklin, J.C., 2008. Free-space laser communications principles and advances. **Springer**, 417 s., New York.
- Mao, R., Zhang, L., Zhu, R-Y., 2008. Optical and scintillation properties of inorganic scintillators in high energy physics. **IEEE Nuclear and Plasma Sciences Society**, 55:2425-2431.
- Miyabayashi, K., 2002. Belle electromagnetic calorimeter. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A**,494(2002)298.
- Nicholson, P.W., 1973. Nuclear Electronics.A **Wiley-Interscience Publication**, London.
- Nikl, M., Bohacek, P., Mihokova, E., Baccaro, S., Vedda, A., Diemoz, M., Longo, E., Kobayashi, M., Auffray, E., Lecoq, P., 1999. Radiation damage processes in wide-gap scintillating crystals. New scintillation materials. **Nuclear Physics B-Proceedings Supplements**, 78:471-478.
- Özcan, M., 2013. CMS' deki hadronik dış kalorimetre (HO) için HO904 kararlılık testlerinde LED analizi. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi Adana.
- Öztürk, Sertaç., 2007.CMS-CASTOR alt dedektörünün foto tüplerinin kalite kontrol testleri. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi Adana.

- Renker, D., 2002. Properties of avalanche photodiodes for applications in high energy physics, astrophysics and medical imaging. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* 486 (2002) 164.
- Paramatti, R., CMS Collaboration., 2016. Design options for the upgrade of the CMS electromagnetic calorimeter. *Nuclear and Particle Physics Proceedings*, 273-275:995-1001.
- Pilicer, E., Kocak, F., Tapan, I., 2005. Excess noise factor of neutron-irradiated silicon avalanche photodiodes. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 552:146-151.
- Sarıkaş, A., 2014. Meyve dokularında niteliksel ölçüm yapabilen elle tutulabilir spektroskopik donanım tasarımı ve gerçekleşmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans tezi İstanbul.
- Suleimenova, G.S., ve Skorikov, V.M., 1992. Thermochemical studies on $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ and $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ single crystals. *Journal of Thermal Analysis*, 38:1251-1256.
- Şarer, B., 2001. Nükleer fizik. **Palme Yayıncılık**, yayın no: 173, 1. Baskı, ISBN: 975-7477-82-6, 404 s.
- Voloshyna, O., Gerasymov, I., Sidletskiy, O., Kurtsev, D., Gorbacheva, T., Hubenko, K., Boiaryntseva, I., Ivanov, A., Spassky, D., Omelkov, S., Belsky, A., 2017. Fast ultradense $\text{GdTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_4$ scintillator crystal. *Optical Materials*, 66:332-337.
- Weber, Marvin J., 2002. Inorganic scintillators: today and tomorrow. **Journal Of Luminescence**, 100:35-45. USA.
- Wilson, J., and Hawkes, J.F.B., 1989. Optoelectronics. Prentice Hall, 363 s., New York.
- Yang, H., Peng, F., Zhang, Q., Guo, C., Shi, C., Liu, W., Sun, G., Zhao, Y., Zhang, D., Sun, D., Yin, S., Gu, M., Mao, R., 2014. A promising high-density scintillator of GdTaO_4 single crystal. **ROYAL SOCIETY OF CHEMISTRY**, 16:2480-2485.
- Yang, H., Peng, F., Zhang, Q., Shi, C., Guo, C., Wei, X., Sun, D., Wang, X., Dou, R., Xing, X., Zhaang, H., 2015. Temperature-dependent luminescence of GdTaO_4 single crystal. **Journal of Luminescence**, 160:90-94.

ÖZGEÇMİŞ

1990 yılında Hatay' ın Antakya ilçesinde doğdu. İlkokul, ortaokul ve lise öğrenimini Antakya ilçesinde tamamladı. 2009 yılında Mustafa Kemal Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü' nde öğrenim görmeye başladı. 2011 yılında fizik bölümünden mezun oldu. 2015 yılında Mustafa Kemal Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü' nde yüksek lisans öğrenimine başladı. Halen bu bölümde öğrenimine devam etmektedir.

