

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Doruk AĞYEL

**CMS DEDEKTÖRÜNÜN HADRONİK KAPAK
KALORİMETRESİNDEKİ SİLİKON
FOTOÇOĞALTICILARIN PERFORMANS ANALİZİ**

FİZİK ANABİLİM DALI

ADANA-2019

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**CMS DEDEKTÖRÜNÜN HADRONİK KAPAK
KALORİMETRESİNDEKİ SİLİKON FOTOÇOĞALTICILARIN
PERFORMANS ANALİZİ**

Doruk AĞYEL

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FİZİK ANABİLİM DALI

Bu tez 03/07/2019 Tarihinde Aşağıdaki Jüri Üyeleri Tarafından
Oybirliği/Oyçokluğu İle Kabul Edilmiştir.

.....
Prof. Dr. Ayşe POLATÖZ
DANIŞMAN

.....
Prof. Dr. Eda EŞKUT
ÜYE

.....
Doç. Dr. Bayram TALİ
ÜYE

Bu tez Enstitümüz Fizik Anabilim Dalında hazırlanmıştır.

Kod No:

**Prof. Dr. Mustafa GÖK
Enstitü Müdürü**

**Bu Çalışma Ç. Ü. Araştırma Projeleri Birimi Tarafından Desteklenmiştir.
Proje No: FYL-2018-10895**

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

ÖZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**CMS DEDEKTÖRÜNÜN HADRONİK KAPAK
KALORİMETRESİNDEKİ SİLİKON FOTOÇOĞALTICILARIN
PERFORMANS ANALİZİ**

Doruk AĞYEL

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI**

Danışman : Prof. Dr. Ayşe POLATÖZ
Yıl: 2019, Sayfa: 67
Jüri : Prof. Dr. Ayşe POLATÖZ
: Prof. Dr. Eda EŞKUT
: Doç. Dr. Bayram TALİ

CMS deneyi, 2016 yılında yapılan yenilenme çalışmalarından sonra, $\sqrt{s} = 13$ TeV kütle merkezi enerjisinde proton-proton çarpışma verileri almaya başlamıştır. Belirtilen tarihten itibaren geçen sürede, alt dedektörler yüksek radyasyona maruz kalmıştır. Alt dedektörlerde tespit edilen sinyallerin doğruluğu, fizik analizleri açısından büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle, CMS deneyinin alt dedektörlerinden biri olan Hadronik Kalorimetre (HKAL)'nin, dedektörde alınan en yeni veriler ile kontrollerinin yapılması gerekmektedir. Bu tezde, 2018 yılında $\sqrt{s} = 13$ TeV'de alınan proton-proton çarpışma verileri ile HKAL'in alt dedektörlerinden biri olan Hadronik Uç Kapak (HE) kalorimetresinin verimliliği analiz edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: HKAL, HE, SiFÇ

ABSTRACT

MSc THESIS

PERFORMANCE ANALYSIS OF SILICON PHOTOMULTIPLAYER IN HADRONIC ENDCAP CALORIMETER OF CMS DETECTOR

Doruk AĞYEL

ÇUKUROVA UNIVERSITY
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
DEPARTMENT OF PHYSICS

Supervisor : Prof. Dr. Ayşe POLATÖZ

Year: 2019, Pages: 67

Jury : Prof. Dr. Ayşe POLATÖZ

: Prof. Dr. Eda EŞKUT

: Assoc. Prof. Bayram TALİ

After the upgrade in 2016, the CMS experiment started to collect proton-proton collision data with the center of mass $\sqrt{s} = 13$ TeV. From the date specified, the sub-detectors were exposed to high radiation. The accuracy of the signals detected in the sub-detectors is very important in terms of physics analysis. Therefore, the Hadronic Calorimeter (HCAL), one of the sub-detectors of the CMS experiment, should be checked with the latest data taken from the detector. In this thesis study, the efficiency of the Hadronic EndCap (HE) calorimeter, one of the sub-detectors of HCAL, was analyzed with proton-proton collision data in $\sqrt{s} = 13$ TeV center of mass energy taken in 2018.

Key Words: HCAL, HE, SiPM

GENİŞLETİLMİŞ ÖZET

1. Standart Model

Standart Model (SM); temel parçacıkları ve bunların nasıl etkileştiğini açıklayan kuramdır. Madde parçacıkları iki grupta incelenir bunlar; kuark ve leptonlardır. Altı adet kuark, altı adet lepton ve bunların karşıtları (antileri) bulunmaktadır.

Doğada dört temel kuvvet bulunmaktadır. Bunlar; elektromanyetik kuvvet, kütle çekim kuvveti, güçlü nükleer kuvvet ve zayıf nükleer kuvvettir. Bu dört temel kuvvetin üç tanesi (elektromanyetik, güçlü ve zayıf kuvvet), SM tarafından açıklanan kuvvetlerdir. Kütle çekim kuvveti ise SM'nin açıklayamadığı bir kuvvettir.

2. Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (BHÇ)

BHÇ yerin 100 metre altında, çevresi yaklaşık 27 km uzunluğunda olan süper iletken bir halka içine kurulu olup, tünelin yarıçapı 4,2 km'dir. BHÇ'de proton-proton (p-p) ve ağır iyon yani kurşun-kurşun (Pb-Pb) demetlerini çarpıştırmak için iki demet borusu bulunmaktadır. Proton demetleri, BHÇ halkasının içinde bulunan ve çok sayıda mıknatıs içinden geçen iki ayrı vakum tüpü içinde yol alır. Toplam 1232 adet dipol mıknatıs, demetleri 27 km uzunluğundaki halka boyunca, halkanın yöneldiği doğrultuda bükerek, parçacıkları yönlendirmektedir.

2.1. CMS

BHÇ halkası üzerindeki deneylerden biri olan CMS (Compact Muon Solenoid) genel amaçlı bir deneydir. SM'in çalışmalarından, karanlık madde oluşturabilecek ekstra boyutların ve parçacıkların araştırılmasına kadar uzanan geniş bir fizik programına sahiptir. CMS dedektörü silindirik soğansız bir yapıdadır. Dedektörün iç kısmına parçacıkların izini belirlemek için iz dedektörleri

yerleştirilmiştir. İz dedektöründen sonra elektronların ve fotonların enerjisini ölçen elektromanyetik kalorimetre (EKAL) bulunur. EKAL'den sonra kuvvetli etkileşen parçacıkları ölçmek için hadronik kalorimetre (HKAL) yer almaktadır. En dışta, muonların yük ve momentumlarını ölçmek için muon odacıkları bulunmaktadır.

2.1.1. Elektromanyetik Kalorimetre (EKAL)

Elektromanyetik Kalorimetre (EKAL), güçlü bir manyetik alan içerisinde, foton, elektron ve pozitronun enerjilerini ölçmek için tasarlanmıştır. Ayrıca, hadronik kalorimetre ile birlikte jetlerin ölçümüne de katkıda bulunur. 61200 adet yüksek çözünürlüklü kurşun tungsten (PbWO_4) kristal EKAL'in alt dedektörlerinden Elektromanyetik Fıçı (EB) bölgesinde, 7.324 adet kristal ise EKAL'in bir diğer alt dedektörü olan Elektromanyetik Kapak (EE) bölgesinde bulunmaktadır.

2.1.2. Hadronik Kalorimetre (HKAL)

Hadronik Kalorimetre (HKAL), "hadronların" enerjisini ölçer. Ek olarak, nötrinolar gibi hiçbir dedektör ile etkileşmeyen, yüksüz parçacıkların dolaylı olarak ölçülmesini sağlar. Bu parçacıkların ölçülmesi, Higgs bozonu veya Süpersimetrik (SÜSİ) parçacıklar gibi yeni parçacıkları gözlemlemek açısından önem taşımaktadır. HKAL'de, atom numarasının düşük ve manyetik alandan etkilenmemesi nedeniyle pirinç malzeme kullanılmıştır. HKAL, dört alt dedektörlerden oluşur bunlar; İleri Hadron Kalorimetresi (HF), Hadronik Uç Kapak Kalorimetresi (HE), Hadronik Dış Kalorimetresi (HO) ve Hadronik Fıçı Kalorimetresi (HB)'dir.

2.1.2.1. Hadronik Uç Kapak (HE) Kalorimetresi

HE Kalorimetresi, $1.3 < |\eta| < 3.0$ psüdo-rapidity aralığında, iki kapaktan (HE + ve HE -) oluşmuştur. HE Kalorimetresi, HB Kalorimetresine benzeyen bir

örnekleme kalorimetresidir. HKAL’de bulunan HE Kalorimetresi, 20°’lik 18 modülden oluşmuş olup katı açının %13.2’sini kapsamaktadır. Yani, parçacıkların yaklaşık %34’ünü içeren bir bölgededir. BHÇ’nin yüksek ışıklılığı ($10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$), HE’nin yüksek sayım oranlarının (MHz) üstesinden gelmesi ve yüksek radyasyon toleransına sahip olmasını gerektirir.

3. Silikon Foto Çoğaltıcılar (SiFC)

SiFC, elektrik yükünü çoğaltma özelliğine sahip, yarı iletken tabanlı foto-dedektördür. Bir SiFC, çalışması ve özellikleri bakımından Foto Çoğaltıcı Tüp (FÇT)’e ve Hibrit Foto-Diyot (HFD)’a benzemektedir. Bunlara kıyasla, bir SiFC daha düşük bir çalışma voltajı gerektirir. Manyetik alana karşı duyarsız, bazı durumlarda foton algılama verimliliği daha yüksektir. Yoğun, sağlam ve düşük maliyetlidir. Ayrıca, boyut olarak daha küçüktür. Bunlar ve diğer sebeplerden dolayı dedektörlerde, SiFC’ler tercih edilmiştir. SiFC’ler, okuma elektroniklerinin işini önemli ölçüde kolaylaştıran yüksek voltajlı bir kazanç sağlar ve sıcaklık, voltaj değişimlerine karşı kararlılıklarını artırır. SiFC’ler ayrıca iyon radyasyonuna duyarsızdır.

4. Veri Analizi

4.1. $\sqrt{s} = 13$ TeV Çarpışma Verilerinin Analizi

2017 yılının sonunda, HE kalorimetresindeki tüm HFD’ler, yerine SiFC’ler kullanılmaya başlamıştır. Bu yenilenme çalışmasından sonra HE kalorimetresindeki tüm kanalların performans ve kararlılık kontrollerinin yapılması fizik analizlerinin doğruluğu ve güvenilirliği açısından büyük önem taşımaktadır. 2018 yılında, $\sqrt{s} = 13$ TeV kütle merkezi enerjisindeki p-p çarpışmalarının başlamasıyla analizlere, alınan bu veriler ile devam edilmiştir.

2018 yılının temmuz ayı başlarında, HE kalorimetresinde meydana gelen bir problem nedeniyle, HE Negatif 15 (HEM15) ve 16 (HEM16) bölgelerinde bir

arıza oluşmuştur. 5 haftalık araştırma ve incelemenin ardından, HEM15 ve HEM16 bölgelerindeki sorunun, 130 numaralı CAEN güç kaynağının, 10 Volt güç sağlaması istenildiğinde, ön-uç elektroniklerine 20 Volt güç ürettiği ve 15 Volt civarında ise 10 milisaniye kadar beklemesi nedeniyle oluştuğu tespit edilmiştir.

5. Sonuç ve Öneriler

2017 yılının sonunda, HE kalorimetresindeki tüm HFD'ler, $\sim 4T$ 'lık manyetik alandan etkilenmesi, gürültüye sebep olması ve kısa ömürleri sebebi ile yerlerini SiFÇ'lere bırakmıştır. Bu çalışmada, 2018 yılında, SiFÇ'ler ile alınan $\sqrt{s} = 13$ TeV kütle merkezi enerjisindeki veriler analiz edilmiştir.

Elde edilen sonuçlar, öncelikle 62 numaralı demet kesişimini (BX) kontrol etmeyi gerektirmiştir. Yapılan kontroller sonrasında, bu demetin BHÇ'de belli bir zaman aralığında hızlandırılan demetler içerisindeki, ilk demet olmasından kaynaklandığı anlaşılmıştır.

2018 yılı, temmuz ayının başlarında, HE Kalorimetresinde meydana gelen arıza ile HEM15 ve HEM16 ile adlandırılan bölgeler kullanılamaz hale gelmiştir. Temmuz ve Kasım ayları arasında kalan süreçte, bu bölgelere saçılan parçacıkların veriler kaydedilememiştir. Yaşanan bu veri kaybının, toplam veri dağılımına etkisi ve fizik analizleri açısından etkileri kontrol edilmiştir. Yapılan kontroller sonucunda, bu bölgede elde edilen veri miktarının çok küçük oranda olduğu ve bu miktarın fizik analizleri açısından çok büyük önem taşımadığı sonucuna varılmıştır.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının her aşamasında desteğini hissettiğim, yapıcı ve yönlendirici fikirleri ile bana yol gösteren danışman hocam Prof. Dr. Ayşe POLATÖZ'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım değerli hocalarım Prof. Dr. Eda EŞKUT, Prof. Dr. İsa DUMANOGU ve Prof. Dr. Aysel KAYIŞ TOPAKSU'ya sonsuz teşekkür ederim.

Çalışmalarım sırasında yardımlarını esirgemeyip bilgi ve deneyimlerini paylaşan Doç. Dr. Shuichi KUNORI'ye teşekkürlerimi sunarım. Yardımını esirgemeyen Yalçın Güler'e teşekkürlerimi sunarım.

Tüm eğitim-öğretim hayatım boyunca maddi-manevi her konuda beni destekleyen, sabır gösteren değerli anneme ve ablalarım sonsuz teşekkür ederim.

Her türlü çalışmamda bana yardım eden, destekleyen her zaman yanımda olan Ali Eren ŞİMŞEK'e sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

SAYFA

ÖZ	I
ABSTRACT.....	II
GENİŞLETİLMİŞ ÖZET	III
TEŞEKKÜR.....	VII
İÇİNDEKİLER	VIII
ÇİZELGELER DİZİNİ	X
ŞEKİLLER DİZİNİ	XII
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	XVI
1. GİRİŞ	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	3
2.1. Standart Model	3
2.2. CERN	6
2.3. Büyük Hadron Çarpıştırıcısı.....	7
2.3.1. ALICE	9
2.3.2. ATLAS	10
2.3.3. LHCb	12
2.4. CMS.....	13
2.4.1. CMS'in Koordinat Sistemi	14
2.4.2. CMS'in Alt Dedektörleri.....	15
2.4.2.1. İz Dedektörleri.....	15
2.4.2.2. Elektromanyetik Kalorimetre	16
2.4.2.3. Hadronik Kalorimetre.....	17
2.4.2.3.(1). Hadronik Fıçı (HB) Kalorimetresi.....	19
2.4.2.3.(2). Hadronik Uç Kapak (HE) Kalorimetresi ...	19
2.4.2.3.(3). Hadronik Dış (HO) Kalorimetresi	21

2.4.2.3.(4). İleri Hadronik (HF) Kalorimetre	22
2.4.2.4. Selenoid Mıknatıs.....	23
2.4.2.5. CMS Muon Sistemi	24
3. MATERYAL VE METOD	27
3.1. Hadronik Uç Kapak Kalorimetresi.....	27
3.1.1. Soğurucu Yapısı	28
3.1.2. Sintilatör Tablaları.....	29
3.2. HE Kalorimetresindeki Yenilikler.....	33
3.2.1. Silikon Foto Çoğaltıcılar ve Özellikleri	34
3.2.1.1. Sinyal Süresi Özellikleri.....	37
3.2.1.2. SiFÇ Kazancı.....	38
3.2.1.3. Karanlık Oran ve Atım Sonrası	38
3.2.1.4. Optik Parazit.....	38
3.2.2. SiFÇ Yanıtı.....	39
3.2.2.1. Foton Algılama Verimliliği	39
3.2.2.2. Tepki Fonksiyonu ve Dinamik Erim	40
3.2.3. Kalibrasyon ve İzleme Sistemi.....	41
3.4. YEF Dedektörlerinde SiFÇ Uygulamaları	41
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	43
4.1. Hadronik Uç Kapak Kalorimetresi ve SiFÇ'ler	43
4.1.1. HE Pozitif 17 Bölgesi (HEP17).....	43
4.1.2. 2018 Yılı $\sqrt{s} = 13$ TeV Proton-Proton Çarpışma Verilerinin Analizi	45
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	61
KAYNAKLAR	63
ÖZGEÇMİŞ	67

ÇİZELGELER DİZİNİ

SAYFA

Çizelge 4.1 62 Numaralı proton demet kesişiminde en fazla kullanılan 1. Seviye tetikleyiciler.....	55
---	----





ŞEKİLLER DİZİNİ

SAYFA

Şekil 2.1.	SM'in ön gördüğü temel parçacıklar.....	4
Şekil 2.2.	Fransa ve İsviçre sınırında bulunan BHÇ tüneli.....	8
Şekil 2.3.	ALICE deneyinin şematik gösterimi	10
Şekil 2.4.	ATLAS dedektörünün şematik görünümü	11
Şekil 2.5.	LHCb dedektör tasarımı	12
Şekil 2.6.	CMS dedektörünün şematik görünümü.....	13
Şekil 2.7.	CMS dedektörünün koordinat sisteminin bir şematik anlatımı	14
Şekil 2.8.	(a) CMS Elektromanyetik Kalorimetresinin şematik yerleşimi, (b) EKAL'in bir çeyreğinin geometrik görüntüsü	16
Şekil 2.9.	Kurşun tungsten kristaller	17
Şekil 2.10.	HKAL'in alt dedektörleri	18
Şekil 2.11.	HB +'nın ilk yarısı.....	19
Şekil 2.12.	HE dedektör sisteminden kesitler. Yukarıda HE dedektörünün CMS'e yerleştirilmesi görülmektedir. Aşağıda HE de kullanılan tablalar görülmektedir. En son resim HE Kalorimetresinin takozlarıdır.....	20
Şekil 2.14.	HO karolarının şematik görüntüsü. Her karo HB kulesine eşleşir. Tabladan gelen optik fiberler, foto-dedektör ve okuma elektroniği içeren şifre çözücü kutuya bağlanır.....	22
Şekil 2.15.	HF Kalorimetresinin yer altına indirilişi	23
Şekil 2.16.	Solenoid mıknatısın bir görünümü	24
Şekil 2.17.	CMS'in müon sistemi.....	25
Şekil 3.1.	Hadron kalorimetresinin genel görüntüsü	28
Şekil 3.2.	HE soğutucusunun mekanik yapısı. Parçacıklar aşağıdan kalorimetreye girer	29
Şekil 3.3.	a) WLS fiberlerini sabitlemek için boş tablanın temel yapısı. b) 1.Katmandan, 17. Katmana kadar olan bölgeler için 3.7 mm	

	kalınlığındaki sintilatörün kesitleri. c) 0 katmanı için, 9 mm kalınlığındaki sintilatörün kesitleri. İki kat yansıtıcı boya karonun yan yüzeylerini kaplamıştır	30
Şekil 3.4.	Kalorimetre sintilatör tablalarının tasarımı a) üst alüminyum kapağı olmadan bir tablanın önden görünümü, b) 0 katmanına sahip tablanın bir kesiti, c) 1-17 arası katmanlara sahip tablanın bir kesiti	31
Şekil 3.5.	HE kamalarının etkileşim noktasından bakıldığı şekilde numaralandırma şeması. + X yönü BHÇ halkasının ortasına işaret etmektedir.....	32
Şekil 3.6.	Bitişik sintilatör tablalarındaki karolar için numaralandırma şeması	33
Şekil 3.7.	Tipik bir SiFC yapısı	35
Şekil 3.8.	HFD ve SiFC'ların görünümleri.....	36
Şekil 3.9.	400 APD ve SiFC'ların görünümleri.....	37
Şekil 3.10.	Farklı üreticilerden SiFC için foto-yayınım spektrumları. Sol üstte MEPhI/PULSAR, sağ üstte SensL ve altta MPPC aygıtları bulunmaktadır.....	40
Şekil 4.1.	HEP17 Bölgesinde algılanan parçacıkların toplam enerjilerinin kanallara göre dağılımları.....	44
Şekil 4.2.	HEP17 bölgesindeki SiFC'lara çarpan kozmik ışınların (parçacıkların) kanallara göre toplam enerji dağılımları	45
Şekil 4.3.	HE Kalorimetresinin kanallara göre (a) toplam enerji dağılımlarını (b) SiFC'lar ile etkileşen toplam parçacık sayısını göstermektedir	46
Şekil 4.4.	(a) HE'nin 2016 yılı segmentasyonu (b) 2018 yılı segmentasyonu....	48
Şekil 4.5.	HE Kalorimetresinin, sırasıyla tüm derinliklerindeki kanallara göre, toplam enerji oranları (a) 1. derinlik, (b) 2. derinlik, (c) 3. derinlik, (d) 4. derinlik, (e) 5. derinlik, (f) 6. derinlik, (g) 7. derinlik	48

Şekil 4.6.	HE Kalorimetresinin, sırasıyla tüm derinliklerindeki kanallara göre, algılanan toplam parçacık sayıları (a) 1. derinlik, (b) 2. derinlik, (c) 3. derinlik, (d) 4. derinlik, (e) 5. derinlik, (f) 6. derinlik, (g) 7. derinlik	49
Şekil 4.7.	BHÇ’de kesişen proton demetlerinin olay miktarları.....	50
Şekil 4.8.	Yüksek miktarda olay içeren proton demetinin, demet kesişimi numarası	51
Şekil 4.9.	62 Numaralı demet kesişiminde algılanan parçacıkların toplam enerjilerinin, dedektörde algılanan tüm parçacıkların toplam enerjilerine oranı.....	52
Şekil 4.10.	62 Numaralı demet kesişimindeki parçacıkların algılanma sürelerinin, dedektörde algılanan tüm parçacıkların toplam algılanma sürelerine oranı	52
Şekil 4.11.	CMS deneyinde, belirli bir süre içerisinde alınan verilerin, tetikleyici numaralarına göre dağılımları	54
Şekil 4.12.	CMS deneyinde, 62 numaralı demet kesişiminde alınan verilerin, tetikleyici numaralarına göre dağılımları	55
Şekil 4.13.	CMS deneyinde, 62 numaralı demet kesişiminde oluşan bir olayın gösterimi.....	57
Şekil 4.14.	CMS deneyinde, 62 numaralı demet kesişimi harici oluşan bir olayın gösterimi.....	57
Şekil 4.15.	Oluşan arıza sonrası HEM15 ve HEM16 bölgelerinin kanallara göre toplam enerji dağılımları	59



SİMGELER VE KISALTMALAR

SM	: Standart Model
SİFÇ	: Silikon Foto Çoğaltıcı
KRD	: Kuantum Renk Dinamiği
CERN	: Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi
BHÇ	: Büyük Hadron Çarpıştırıcısı
LEP	: Büyük Elektron Pozitron Çarpıştırıcısı
CMS	: Sıkı Muon Solenoidi
ATLAS	: Büyük Toroidal Dedektör
ALICE	: Büyük İyon Çarpıştırma Deneyi
LHCb	: LHCb Fiziği Deneyi
LHCf	: Büyük İleri Hadron Çarpıştırıcısı
TOTEM	: Toplam Elastik ve Difraktif Tesir Kesit Ölçüm Dedektörü
PS	: Proton Sinkrotron
SPS	: Süper Proton Sinkrotron
LS	: Uzun Mola
EKAL	: Elektromanyetik Kalorimetre
EE	: Elektromanyetik Uç Kapak
EB	: Elektromanyetik Fıçı
ES	: Elektromanyetik Ön Duş
HKAL	: Hadronik Kalorimetre
HB	: Hadronik Fıçı
HE	: Hadronik Uç Kapak
HO	: Hadronik Dış
HF	: İleri Hadronik Kalorimetre
ME	: Muon Kapak Bölgesi
MB	: Muon Fıçı Bölgesi

SST	: Silikon Şerit İzleyici
YEF	: Yüksek Enerji Fiziği
HLT	: Yüksek Seviye Tetikleyici
EDM	: Olay Veri Modeli
HEP17	: Hadronik Uç Kapak Kalorimetresi Pozitif 17
HL-LHC	: Yüksek Işıklıklı Büyük Hadron Çarpıştırıcısı
CSC	: Katot Şerit Odaları
DT	: Sürüklenme Tüpleri
RPC	: Dirençli Paralel Levhalı Odalar
FÇT	: Foto Çoğaltıcı Tüp
APD	: Çığ Foto Diyot
RBX	: Okuma Kutusu
HFD	: Hibrit Foto Diyot
RM	: Okuma Modülü
BX	: Demet Kesişimi
R _Q	: Sönümleme Direnci
ADC	: Analog – Sayısal Çevirici
DAQ	: Veri Akış Sistemi
QIE	: Yük Toplayıcı Kodlayıcı
IR	: Kızıl Ötesi
UV	: Mor Ötesi
WLS	: Dalga Boyu Kaydırıcı
QE	: Kuantum Verimliliği
PET	: Pozitron Emisyon Tomografisi
L1	: Seviye 1
η	: Psüdo rapidite
θ	: Polar Açısı
ϕ	: Azimutal Açısı

MET	: Kayıp Dik Enerji
PbWO ₄	: Kurşun Tungsten
eV	: Elektron Volt
MeV	: Milyon Elektron Volt
GeV	: Milyar Elektron Volt
TeV	: Trilyon Elektron Volt
T	: Tesla
L	: Işıklılık
$\sqrt{s}$	: Kütle Merkezi Enerjisi
Cu	: Bakır
Zn	: Çinko
SiO ₂	: Silikon Dioksit
P_T	: Dik Momentum
X_0	: Radyasyon Uzunluğu
r_M	: Moliere Yarıçapı
$\Psi(x)$	: Dalga Fonksiyonu
λ_I	: Nükleer Etkileşme Uzunluğu



1. GİRİŞ

Parçacık fiziği, diğer bir adı ile yüksek enerji fiziği, maddenin temel yapı taşları ve aralarındaki etkileşmeler ile ilgilenir. Standart Model (SM) olarak adlandırılan modern kuram, temel parçacıkları ve bunların nasıl etkileştiğini açıklayan kuramdır.

Madde parçacıkları iki grupta incelenir bunlar; kuark ve leptonlardır. Altı adet kuark, altı adet lepton ve bunların karşıtları (antileri) bulunmaktadır. Kuarkların, üçlü veya ikili olarak bir araya geldikleri bilinmektedir. Üç kuarkın bir araya gelmesiyle “Baryonlar” oluşur. Bir kuark ve bir anti kuarkın bir araya gelmesiyle ise “Mezonlar” oluşur.

Doğada dört temel kuvvet bulunmaktadır. Bunlar; elektromanyetik kuvvet, kütle çekim kuvveti, güçlü nükleer kuvvet ve zayıf nükleer kuvvettir. Bu dört temel kuvvetin üç tanesi (elektromanyetik, güçlü ve zayıf kuvvet), SM tarafından açıklanan kuvvetlerdir. Kütle çekim kuvveti ise SM’nin açıklayamadığı bir kuvvettir.

CERN (Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi), İsviçre ve Fransa sınırında yer alan dünyanın en büyük parçacık fiziği laboratuvarıdır. Fizikçiler merak ettiği birçok sorunun yanıtını burada bulmaya çalışmaktadır. CERN’de bulunan BHÇ’de, proton-proton (p-p) ve ağır iyon yani kurşun-kurşun (Pb-Pb) demetlerini çarpıştırmak için iki demet borusu bulunmaktadır. Her iki borudaki demetler, birbirlerine zıt yönde hızlandırıldıktan sonra kafa kafaya çarpıştırılmaktadırlar.

Bu tez çalışmasında, CERN’deki CMS deneyinde bulunan hadronik kalorimetrenin, Hadronik Uç Kapak (HE) kısmının performans analizlerini yapmak için kalorimetrede algılanan parçacıkların verilerinin incelenmesi amaçlanmaktadır.

Tezin önceki çalışmalar kısmında, SM ve CERN’deki alt-dedektörler hakkında bilgi verilmiş olup BHÇ üzerindeki deneyler anlatılmıştır. Ayrıca, HKAL ve alt dedektörleri (HB, HO, HF, HE) hakkında da bilgiler verilmiştir. HE

Kalorimetresi ve SiFÇ'ler, tezin materyal ve metot kısmında tartışılmıştır. Ayrıca bu kısımda; SiFÇ'lerin, Hibrit Foto-Diyotların (HFD) yerini almasından ve nedenlerinden bahsedilmiştir. Tezin bulgular ve tartışma kısmında ise HE Kalorimetresine takılan SiFÇ'lerin performansı ve kararlılığı ile ilgili olarak yapılan analizler yer almaktadır. Son olarak, tezin sonuç ve öneriler kısmında, yapılan analizin sonuçlarından ve HE Kalorimetresinin gelecek planlarından söz edilmiştir.



2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1. Standart Model (SM)

SM, temel parçacıkları ve bu parçacıkların nasıl etkileştiklerini açıklayan bir kuramdır. Çok sayıda parçacığı ve bunların arasındaki karmaşık etkileşimleri, az sayıda temel parçacık cinsinden tanımlamaktadır. Bu kuram zaman içinde atom altı parçacıklar hakkında bilinen her şeyi birleştirerek başka parçacıkların varlığının tahmin edilmesini kolaylaştırmıştır. Günümüze kadar SM'nin öngördüğü birçok parçacık keşfedilmiştir. 1983'deki W ve Z bozonu, 1995'deki üst kuark (t), 2000 yılındaki Nötrino (ν) ve 2012 yılındaki Higgs bozonu keşfedilen son parçacıklardır.

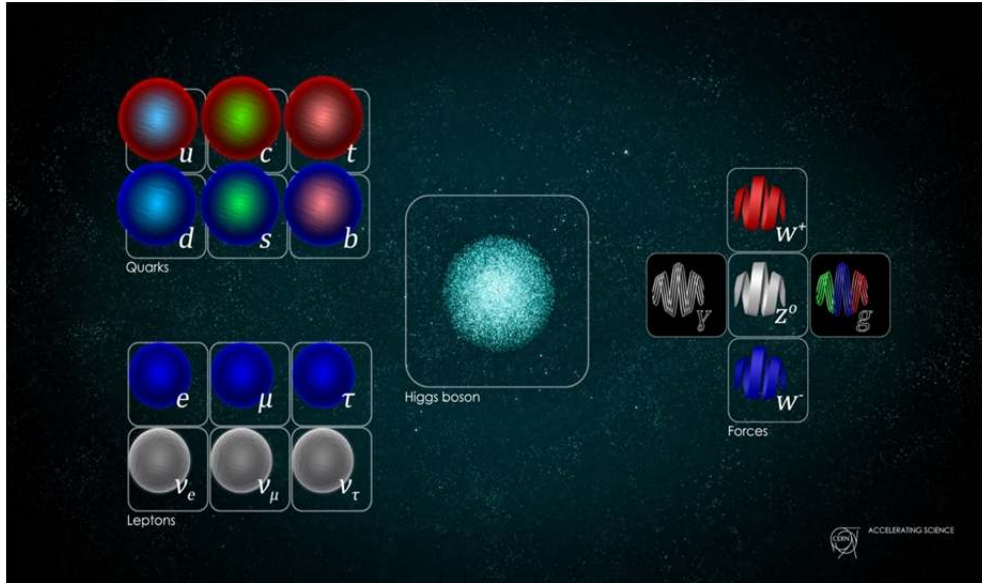
Madde spinlerine göre fermiyon ve bozon olarak ikiye ayrılır. Fermiyonlar, İtalyan Enrico Fermi (1901-1954), İngiliz Paul Dirac (1902-1984) (Fermi-Dirac istatistiği) ve Avusturyalı Wolfgang Pauli (1900-1958) tarafından dışlama ilkesi olarak adlandırılan istatistiksel kurallara uymaktadır. Bir atomda iki fermiyonun aynı anda tamamen aynı kuantum sayısına sahip olmayacağı prensibine “Pauli Dışarlama İlkesi” denir. Fermiyonlar bu ilkeye uymaktadır ve denklem 2.1'de görüldüğü gibi anti simetrik dalga fonksiyonuna sahiptirler.

$$\Psi(1,2) = -\Psi(2,1) \quad (2.1)$$

Fermiyonlar altılı iki gruptan oluşmaktadır. Bunlar; kuarklar ve leptonlardır. Kuarklara; yukarı (u), aşağı (d), çekici (c), garip (s), en üst (t), en alt (b) gibi anlamsız ama dikkat çekici isimler verilmiştir. Kuarkların, üçlü veya ikili olarak bir araya geldikleri bilinmektedir. Üç kuarkın bir araya gelmesiyle Yunanca ağır anlamına gelen “Baryonlar” oluşur. Bir kuark ve bir anti kuarkın bir araya gelmesiyle ise Yunanca orta anlamına gelen “Mezonlar” oluşur. Diğer fermiyonlar ise, Yunanca hafif anlamına gelen “Leptonları” oluşturmaktadır.

Başlangıçta leptonlar hafif parçacıklar olarak düşünülmüştür ve ağır parçacıklara “Hadron” denilmiştir. Ancak, 1975’deki Tau leptonunun keşfi bu kuralı bozmuştur. Tau (en ağır lepton) neredeyse protonun (en hafif hadron) iki katı kadar büyüktür. Leptonlar; elektron (e^-), muon (μ), tau (τ), elektron nötrinosu (ν_e), muon nötrinosu (ν_μ), tau nötrinosu (ν_τ) ve bunların karşıtlarıdır. Nötrinolar çok az kütleyle sahiptir ve maddeyle madde ile çok zayıf etkileştiğinden tespit edilmesi son derece zordur.

Fermiyonlar bir araya gelerek protonları, nötronları, atomları, molekülleri, insanları, duvarları oluştururlar. Günlük hayatta bildiğimiz madde Şekil 2.1’de 1. aileden oluşur. 2. ve 3. aileler birinci aileden daha ağırdır.



Şekil 2.1. SM’in ön gördüğü temel parçacıklar (<https://home.cern/science/physics/standard-model>).

Her temel parçacık, bir spin kuantum sayısı ile ilişkilidir, fermiyonların spin kuantum sayıları ($1/2, 3/2, \dots$) yarım tam sayıdır ve bozonların spin kuantum sayıları ($0, 1, 2, \dots$) tam sayıdır.

Bozonlar, aynı zamanda aynı yeri işgal edebilirler. Yani; iki veya daha fazla bozon aynı kuantum numarası ile tanımlanabilir. Kuvvet taşıyıcı parçacık olan bozonlar, Pauli dışarlama ilkesine uymazlar ve denklem 2.2'deki gibi simetrik dalga fonksiyonuna sahiptirler.

$$\Psi(1,2) = \Psi(2,1) \quad (2.2)$$

Hintli bilim insanı, Satyendra Bose (1894-1974) ve Alman bilim insanı Albert Einstein (1879-1955)'in istatistiksel kuralına uyarlar (Bose-Einstein istatistiği). Bozonlara en iyi örnek fotonlardır (γ). Diğerleri W , Z bozonları, Gluonlar ve Higgs bozonudur (<https://physics.info/standard/>).

Doğada dört temel kuvvet bulunmaktadır. Bunlar; elektromanyetik kuvvet, kütle çekim kuvveti, güçlü nükleer kuvvet ve zayıf nükleer kuvvettir. Bu dört temel kuvvetin üç tanesi (elektromanyetik, güçlü ve zayıf kuvvet), SM tarafından açıklanan kuvvetlerdir. Kütle çekim kuvveti ise SM'nin açıklayamadığı bir kuvvettir. Kütle çekim kuvveti ve elektromanyetik kuvvet günlük hayatımızda karşımıza çıkan kavramlardır ancak güçlü nükleer kuvvet ve zayıf nükleer kuvvet daha küçük ölçekte kavramlar olduğu için günlük hayatta fark edilemeyen kuvvetlerdir.

Güçlü nükleer kuvvet, protonu, nötronu oluşturan kuarkları bir arada tutan kuvvettir. Çekirdekdeki parçacıklardan nötronlar yüksüz, proton ise artı elektrik yüküne sahiptir. Aynı elektrik yüküne sahip parçacıklar arasında oluşan elektromanyetik itme kuvvetine rağmen, proton ve nötronlar kuarklardan meydana geldiği için güçlü nükleer kuvvet, çekirdeği bir arada tutan kuvvet olarak da tanımlanabilir. Gluonlar ise bu kuvvetin taşıyıcılarıdır. İsminden de anlaşıldığı gibi bu kuvvetler arasında en güçlü olanıdır, gücü o kadar büyüktür ki kuarkları birbirinden ayırmak mümkün değildir. Güçlü nükleer kuvvetin diğer kuvvetlerden ayıran önemli bir özelliği; kuarklar birbirlerine yaklaştıkça birbirlerini daha az çekerken birbirlerinden uzaklaştıkça daha çok çekerler.

Zayıf nükleer kuvvetin şiddeti, güçlü nükleer kuvvetin milyarda biridir. Parçacıklar üzerindeki temel etkisi, kuark ve leptonların türlerini (çeşnisini) değiştirmesidir. Buna ek olarak; kararsız çekirdeklerin bozunmasından, nötrinoların ve diğer lepton türlerinin çekirdek ile etkileşmesinden sorumludur.

Nötrinolar, güçlü nükleer kuvvetten etkilenmezken, zayıf nükleer kuvvetten etkilenirler. Zayıf nükleer kuvvet sayesinde, Güneş'in enerjisini sağladığı füzyon (çekirdeklerin birleşme tepkisi) ve birçok radyoaktif bozunma tepkimesi gerçekleşir. Zayıf nükleer kuvvetin taşıyıcıları $W^{\pm}$ ve Z bozonlarıdır. Zayıf nükleer kuvvetin taşıyıcı bozonları belli bir kütleyle sahip oldukları için çok kısa mesafelerde etki ederler. Elektromanyetik ve kütle çekim kuvvetlerinin taşıyıcıları ise kütsüz kabul edildikleri için etki mesafeleri sonsuzdur (<http://www.bilimgenc.tubitak.gov.tr/makale/guclu-ve-zayif-nukleer-kuvvet-nedir>).

2.2. CERN

CERN, Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi anlamına gelen Fransızca, "Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire" sözcüklerinin kısaltmasıdır. Bu kurum, İsviçre ve Fransa sınırında yer alan dünyanın en büyük parçacık fizik laboratuvarıdır. 1954 yılında 12 ülkenin (Belçika, Almanya, Fransa, Danimarka, Hollanda, İngiltere, İsveç, İsviçre, İtalya, Norveç, Yugoslavya ve Yunanistan) katılımıyla kurulmuştur.

CERN, hızlandırıcı ve dedektörlerin olduğu büyük bir araştırma merkezi ve laboratuvarıdır. 1957 yılında ilk olarak, 600 MeV'lik enerji değerlerine ulaşabilen bir proton hızlandırıcısı kurulmuştur. 1959 yılında, günümüzde hala kullanılan ve 28 GeV enerji değerlerine çıkabilen Proton Sinkrotron (PS) isminde dairesel bir proton hızlandırıcısı, 1957 yılında ise, 450 GeV enerji değerlerine çıkabilen Super Proton Sinkrotron (SPS) dairesel hızlandırıcısı kurulmuştur. 1989 – 2000 yılları arasında ise, 100-200 GeV enerji seviyelerine ulaşabilen Büyük Elektron-Pozitron Çarpıştırıcısı (LEP) kullanılmıştır. Ancak bu çarpıştırıcı, 2001 yılında çalışmasını

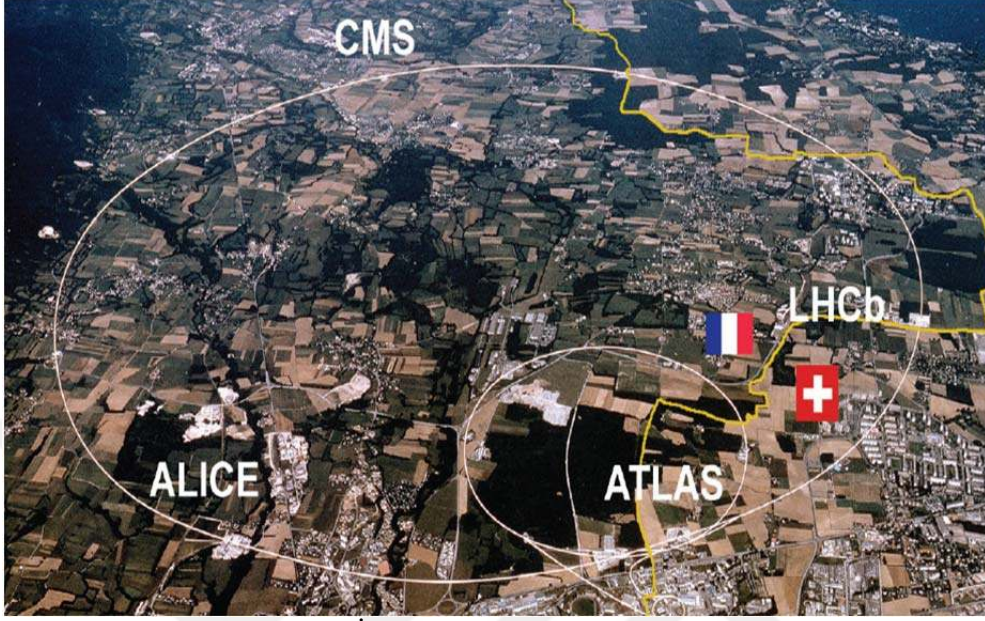
tamamlayıp, yerini 2008 yılında kurulan Büyük Hadron Çarpıştırıcısına (BHÇ) bırakmıştır ve bu dairesel çarpıştırıcıda, dört büyük dedektör sistemi (ATLAS, CMS, ALICE ve LHCb) yer almaktadır.

BHÇ, 10 Eylül 2008 tarihinde çalışmaya başlamış fakat meydana gelen bir arıza nedeniyle çalışmasına ara verilmiştir. BHÇ tesisinin resmi açılışı ise, ülkemizin de temsil edildiği bir törenle 21 Ekim 2008 tarihinde yapılmıştır. BHÇ, 2012 yılına kadar en fazla $\sqrt{s} = 8$ TeV kütle merkezi enerjisinde çarpışma verileri alınabilmektedir. 2013 – 2015 yılları arasında yapılan birinci uzun teknik aranın ardından, 2015 – 2018 yılları arasında BHÇ’de, parçacık başına 6,5 TeV enerji değerine karşılık gelen, $\sqrt{s} = 13$ TeV kütle merkezi enerjisinde p-p çarpışma verisi alınmıştır. Bu enerji değerinin, ikinci uzun teknik aradan sonra (2019-2021) $\sqrt{s} = 14$ TeV düzeyine çıkarılması planlanmaktadır (<http://www.taek.gov.tr/tr/sesame/1037-avrupa-nukleer-arastirma-merkezi-cern.html>).

2.3. Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (BHÇ)

BHÇ yerin 100 metre altında, yaklaşık 27 km uzunluğunda süper iletken bir halka içine kurulu olup, tünelin yarıçapı 4,2 km’dir.

BHÇ’de, p-p ve ağır iyon yani Pb-Pb demetlerini çarpıştırmak için iki demet borusu bulunmaktadır. Proton demetleri, BHÇ halkasının içinde bulunan ve çok sayıda mıknatıs içinden geçen iki ayrı vakum tüpü içinde yol alır. Toplam 1232 adet dipol mıknatıs, demetleri 27 km uzunluğundaki halka boyunca, halkanın yöneldiği doğrultuda bükerek, parçacıkları yönlendirmektedir. Demetin momentumu çok yüksek olduğu için güçlü bir manyetik alan gerekir. Bu güçlü manyetik alanı oluşturmak için, mıknatıslar süper iletken olmalıdır. Bu mıknatısları süper iletken duruma getirmek için -271°C soğuklukta tutulmalıdır, bu soğutma sistemi için sıvı helyum kullanılmaktadır. BHÇ halkası Şekil 2.2’de gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Fransa ve İsviçre sınırında bulunan BHÇ tüneli (<https://spectrum.ieee.org/computing/software/analyzing-the-lhc-magnet-quenches>).

BHÇ’de, her iki borudaki demetler, birbirlerine zıt yönde hızlandırıldıktan sonra kafa kafaya çarpıştırılmaktadırlar. p-p çarpışmaları için kütle merkezi enerjisi $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ ve ışıklılık $L = 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ iken Pb-Pb çarpışmaları için kütle merkezi enerjisi $\sqrt{s} = 5.5 \text{ TeV}$ ve ışıklılık $L = 10^{27} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ’dir. BHÇ’de, hızlandırma işlemi esnasında hem protonlar hem de kurşun iyonları, hedeflenen ışıklılık ve kütle merkezi enerjisine ulaştıkları zaman hızları ışık hızına çok yaklaşımaktadır.

BHÇ üzerinde altı büyük deney vardır. Bunlar; ALICE, ATLAS, LHCb, CMS, TOTEM ve LHCf dir.

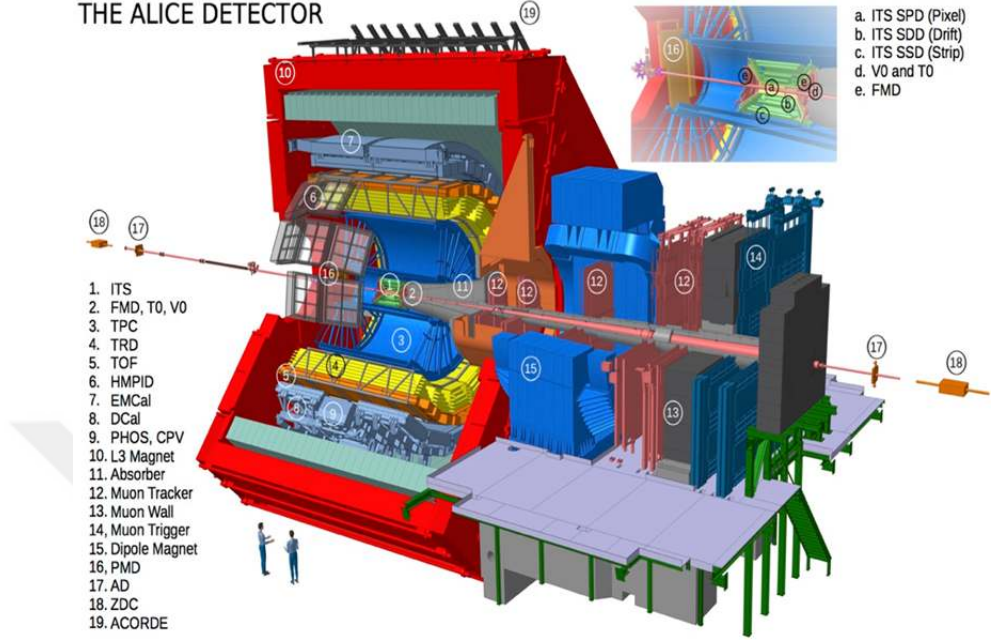
ATLAS ve CMS deneylerinin fizik araştırma konuları ve amaçları aynıdır ama bu dedektörlerin tasarımları farklıdır. Aralarında göze çarpan en önemli farklılıklardan biri de CMS deneyinde selenoit mıknatıs, ATLAS deneyinde ise toroidal bir mıknatısın kullanılmasıdır. CMS ve ATLAS, dünyanın en büyük iki

dedektörü olup boyutları bakımından en büyük ATLAS, ağırlık bakımından en ağır CMS'dir. Diğer dedektörler; ALICE, ağır iyon çarpışmaları, LHCb, b-kurak'ı ile ilgili araştırmalar yapmaktadır. TOTEM ve LHCf ileri yöndeki parçacıkları inceler ve diğer dedektörlerden daha küçük çaplı dedektörlerdir (<http://home.web.cern.ch/about/experiments>).

2.3.1. ALICE

ALICE (A Large Ion Collider Experiment- Büyük İyon Çarpıştırma Deneyi), BHC'de bulunan bir ağır iyon dedektördür. Kuark-gluon plazması olarak adlandırılan, maddenin bir fazının olduğu ve aşırı enerji yoğunluklarında, kuvvetli bir şekilde etkileşmeye giren maddenin, fiziksel durumlarını incelemek üzere tasarlanmıştır. Kurşun iyonları çarpıştırıp, Güneş'in merkezinden yüz bin kat daha sıcak bir ortam oluşturulur. Amaç, bu ortamda yeni bir kuark-gluon plazma fazı olup olmadığını incelemektir. Kuark hapsinin (bir kuarkın tek başına gözlenememesi olayı) ortadan kalktığı bir fazın varlığı ve kiral simetrisinin yeniden sağlanması gibi Kuantum Renk Dinamiği (KRD)'nin temel varsayımları burada sağlanır. ALICE deneyi, p-p ve Pb-Pb çarpışmalarının sonuçlarını da karşılaştırmaktadır.

ALICE deneyinin şematik gösterimi Şekil 2.3'te verilmiştir. ALICE; 16 metre yüksekliğinde, 26 metre uzunluğunda, 8 metre yarıçapında ve yaklaşık 10.000 ton ağırlığındadır. Fransa'nın, St. Genis-Pouilly isimli kasabanın yakınlarında bulunmaktadır (<https://home.cern/science/experiments/alice>).

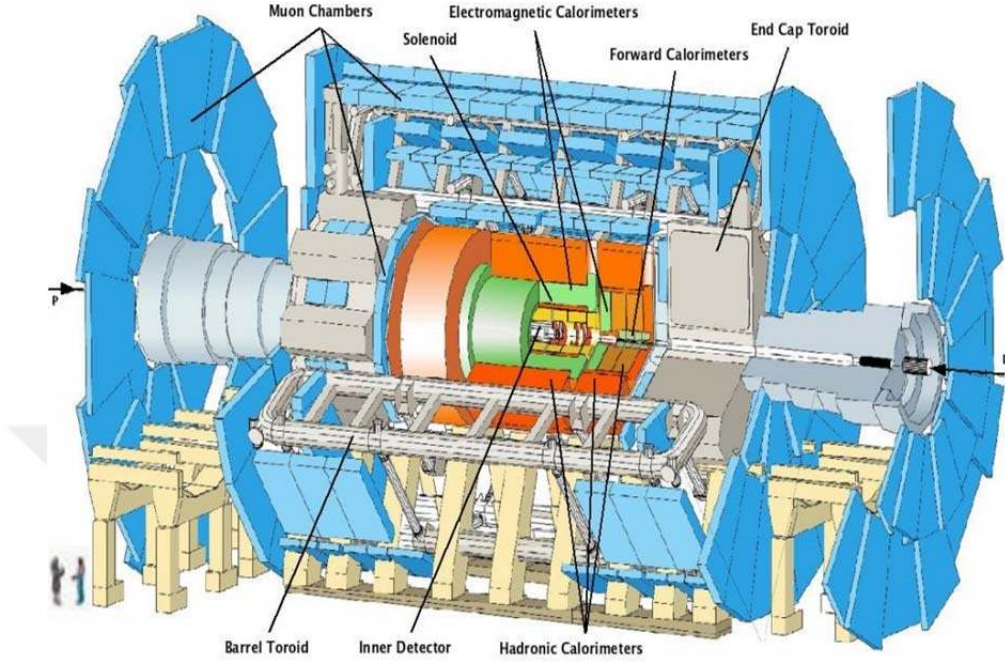


Şekil 2.3. ALICE deneyinin şematik gösterimi (<https://cds.cern.ch/record/2282027/plots>).

2.3.2. ATLAS

ATLAS (A Torodial LHC Apparatus- Büyük Toroidal Dedektör), CMS gibi genel amaçlı bir dedektördür. Dedektör, Higgs Bozonu araştırmalarından, karanlık maddeyi oluşturabilecek ekstra boyutlara ve parçacıklara kadar geniş bir yelpazeyi incelemektedir. Koordinat sisteminde etkileşim noktası orijin olup, demetin yönü z-ekseni, etkileşim noktasından BHÇ merkezine doğru x-ekseni ve yukarı yönde y-ekseni olarak ayarlanmıştır. Azimutal açı (ϕ) ve kutupsal açı (θ), demet eksenine ile uyumlu şekilde, psüdo-rapidity (η) ise kutupsal açı ile ilişkili olacak şekilde tanımlanmıştır (Horvat, S., 2005).

ATLAS dedektörü; 25 metre yüksekliğine, 42 metre uzunluğuna, 11 metre yarıçapına ve yaklaşık 7.000 ton ağırlığa sahip olup şimdiye kadar yapılmış en büyük hacimli parçacık dedektörüdür (Şekil 2.4.). İsviçre'nin Meyrin semti yakınlarındaki, CERN'nin merkez bölgesinin karşı tarafında bulunmaktadır (<https://home.cern/about/experiments/atlas>).



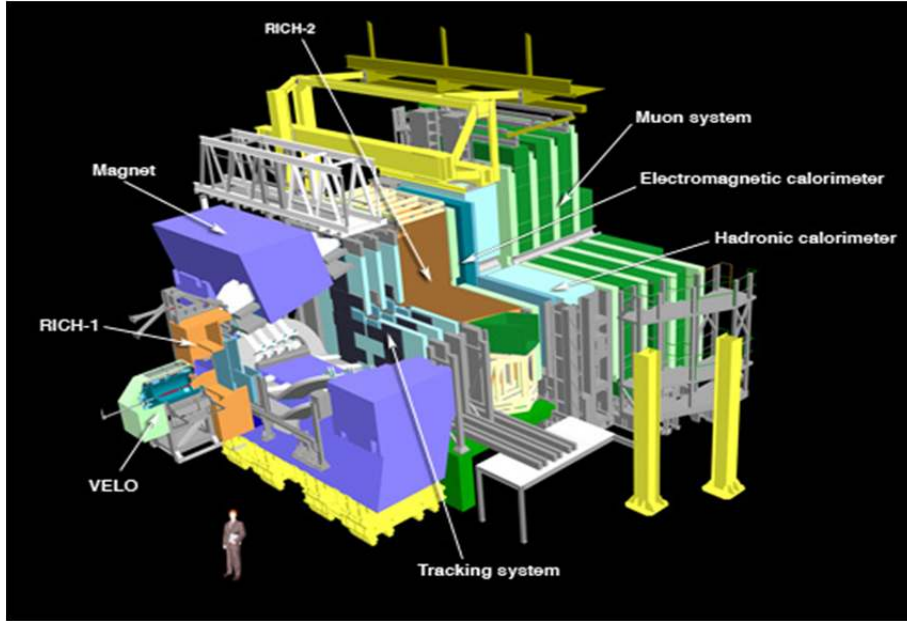
Şekil 2.4. ATLAS dedektörünün şematik görünümü
(<https://sites.uci.edu/energyobserver/2012/11/26/introduction-to-the-atlas-detector-at-the-lhc/>).

ATLAS dedektörü, üç temel dedektörden oluşur. Bunların, manyetik alana bağlı olarak yerleşimi sırasıyla; iç dedektör, kalorimetreler ve müon spektrometresidir. En iç kısımda bulunan iç dedektör (izleme dedektörü), süper iletken solenoid ile çevrilidir. Süper iletken solenoid mıknatıs sayesinde, çarpışma noktasından uzaklaşan elektrik yüklü parçacıkların yörüngesi bükülür ve böylece iç dedektörler bu izleri kaydeder. Daha sonra bu iz eğrilerinden, her bir parçacığın momentumu ve elektrik yükü saptanır. İç dedektörün dışında, süper iletken toroid mıknatıs ile oluşan bir kalorimetre bulunmaktadır. Burada, her birime bırakılan enerji elektrik sinyaline çevrilir ve farklı elektronik sistemlerle okunup kayıt altına alınır (Coadou, Y.,2003).

2.3.3. LHCb

LHCb (A Large Hadron Collider beauty) deneyinde, maddenin yanı sıra doğada, neden anti-maddenin de var olmadığı araştırılmaktadır. LHC-b, b kuarkı içeren mezonları inceleyerek, büyük patlamadan sonra neden madde- karşıt madde simetrisinin bozulduğunu araştıran bir deneydir.

Yapısal açıdan diğer dedektörlerden farklıdır (Şekil 2.5.). Alt dedektörleri (VELO, RICH, Magnet, İzleyici, Kalorimetre, Müon Sistemi) sıra ile dizilmiş olup, parçacıkların özelliklerini ölçmek amacıyla inşa edilmiştir. LHCb’de, 27 Temmuz 2018 tarihinde gerçekleşen proton çarpışmalarında, daha önce hiç görülmemiş iki parçacığın yanı sıra başka yeni bir parçacığın ipuçları bulunmuştur. Bu yeni parçacıkların özelliklerinin gelecekteki çalışmaları, kuarkları birbirine bağlayan güçlü kuvvete ışık tutacaktır (<https://home.cern/about/updates/2018/09/lhcb-experiment-discovers-two-perhaps-three-new-particles>).



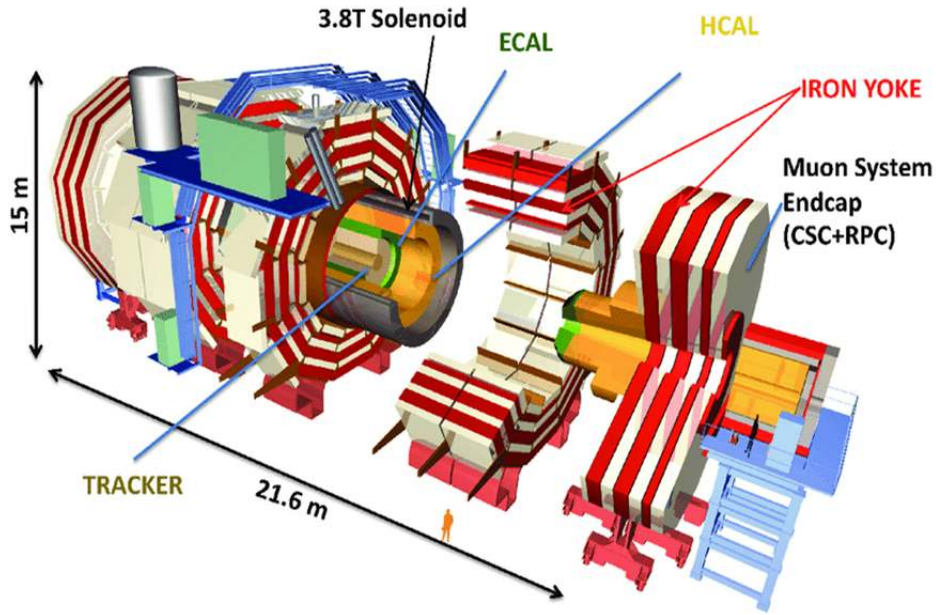
Şekil 2.5. LHCb dedektör tasarımı (<https://lhcb-public.web.cern.ch/lhcb-public/en/detector/Detector-en.html>).

LHCb dedektörü; 10 metre yüksekliğine, 21 metre uzunluğuna, 13 metre genişliğine ve yaklaşık 5600 ton ağırlığa sahiptir. Fransa'nın, Ferney-Voltaire kasabanın yakınlarında yer almaktadır (<https://home.cern/about/experiments/lhcb>).

2.4. CMS

CMS (Compact Muon Solenoid) genel amaçlı bir deney olup SM'nin çalışmalarından, karanlık madde oluşturabilecek ekstra boyutların ve parçacıkların araştırılmasına kadar uzanan geniş bir fizik programına sahiptir.

CMS, silindirik soğansı bir yapıdadır. Dedektörün iç kısmında parçacıkların izini belirlemek için iz dedektörleri konulmuştur. İz dedektörlerinin ardında elektronların ve fotonların enerjisini ölçen elektromanyetik kalorimetre (EKAL) bulunur. EKAL'den sonra kuvvetli etkileşen parçacıkları ölçmek için hadronik kalorimetre (HKAL) yer almaktadır. En dışta müonların yük ve momentumlarını ölçmek için müon odacıkları bulunmaktadır (Şekil 2.6.).



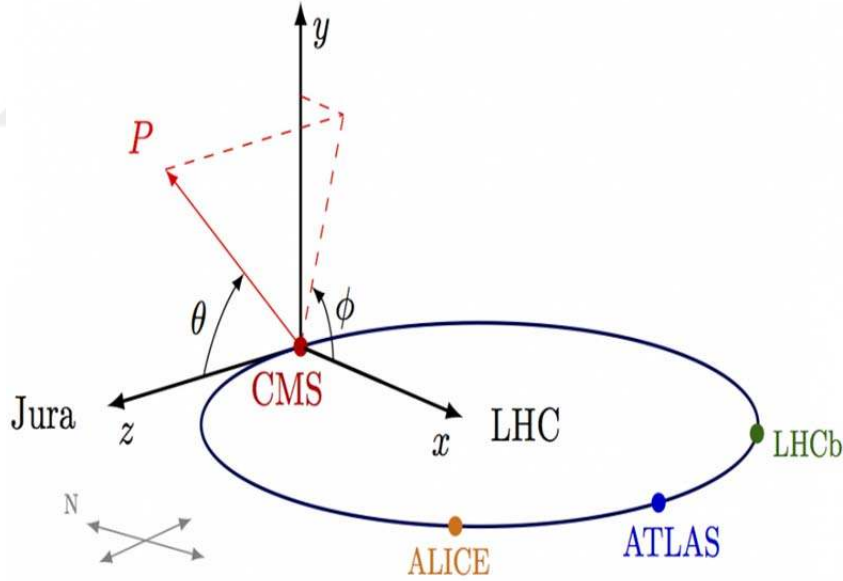
Şekil 2.6. CMS dedektörünün şematik görünümü (https://www.researchgate.net/figure/Schematic-view-of-the-CMS-detector_fig1_271616599).

CMS dedektörü diğer dedektörlerden farklı olarak, montajı yeryüzünde tamamlandıktan sonra vinç yardımı ile yer altına indirilmiştir. CMS, 15 metre yüksekliğe, 21 metre uzunluğa, 7,5 metre yarıçapına ve 14500 ton ağırlığa sahiptir.

CMS dedektörü, Fransa'daki Cessy isimli bölgenin yakınlarında yer almaktadır. CMS merkezinde bulunan 4 Tesla'lık süper iletken solenoid mıknatıs ise 13 metre uzunluğuna ve 11,8 metre iç çapına sahiptir (<https://home.cern/about/experiments/cms>).

2.4.1. CMS'in Koordinat Sistemi

CMS dedektörünün merkezi, çarpışmanın yani etkileşmenin olduğu yerdir. CMS koordinat sisteminde, Şekil 2.7'de gösterildiği gibi x-ekseni, BHÇ halkasının merkezine, güneyi gösterecek şekilde yönlendirilir.



Şekil 2.7. CMS dedektörünün koordinat sisteminin bir şematik anlatımı.

Burada; y-ekseni, dikey olarak yukarı doğru bakar ve z-ekseni ise demet doğrultusundadır. Azimutal açı x-y ekseninden, kutupsal açı ise z-ekseninden

ölçülmektedir. Kutup açısı yerine, CMS’de psüdo rapidite (η) kullanılmakta olup denklem 2.3’teki gibi tanımlanmıştır.

$$\eta = -\ln \left(\tan \frac{\theta}{2} \right) \quad (2.3)$$

Demet yönünün dik momentumu (P_T), x-y bileşenlerinden hesaplanır ve dik enerji denklem 2.4’deki gibi tanımlanır (Camianda, L., 2010).

$$E_T = E \sin \theta \quad (2.4)$$

2.4.2. CMS’in Alt Dedektörleri

2.4.2.1. İz Dedektörleri

CMS dedektörünün en iç kısmında bulunan iz dedektörleri, çarpışma noktasında oluşan yüklü parçacıkların momentumlarını, yüklerini ve yörüngelerini bulmayı sağlar. Ayrıca elektronlar ve fotonlar elektromanyetik kalorimetre ile benzer sinyal ürettiği için bunları birbirinden ayırmak için önemlidir. $|\eta| < 2.5$ psüdo rapidite aralığında yer alan bu dedektörün yaklaşık 4T’lık güçlü bir manyetik alanı vardır. 4T’lık bu manyetik alan, yüklü parçacıkları dairesel olarak bükür. Böylece, yörünge yarıçapı ile parçacığın momentumu, bükülme yönü ile de parçacığın yükünün işareti bulunur. İz dedektörleri iki kısımdan oluşur. Bunlar; piksel dedektör ve iç izleyici dedektördür.

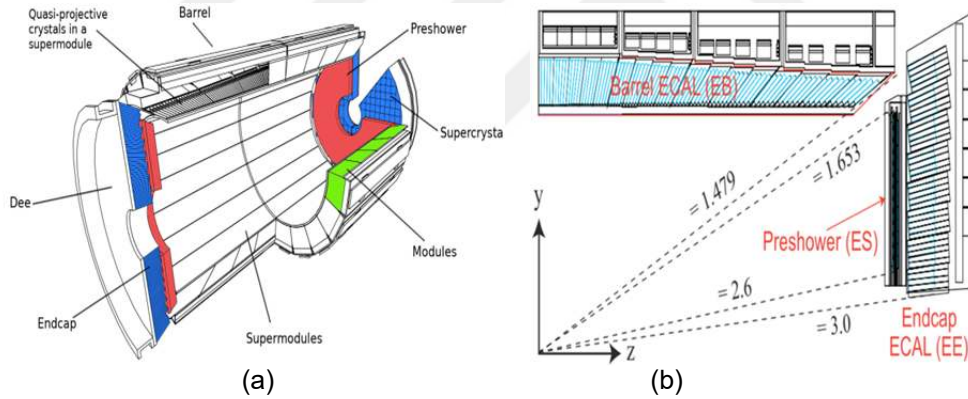
Piksel Dedektör Sistemi, CMS dedektörünün çekirdeğinde bulunur ve demet borusundaki etkileşim noktasına en yakın dedektördür. Çarpışma noktasından çıkan yüklü parçacıkların tümünü tespit etmek ve izlemek için tasarlanmıştır. İz izleyici sistemi ise; sensörler, modüller ve sensörlerden sinyal alan fiberlerden oluşur

(<http://home.fnal.gov/~souvik/CMSPixels/index.html>).

2.4.2.2. Elektromanyetik Kalorimetre

Elektromanyetik Kalorimetre (EKAL), güçlü bir manyetik alan içerisinde, foton, elektron ve pozitronun enerjilerini ölçmek için tasarlanmıştır. Ayrıca, hadronik kalorimetre ile birlikte jetlerin ölçümüne de katkıda bulunur. 61200 adet yüksek çözünürlüklü kurşun tungsten (PbWO_4) kristal Elektromanyetik Fıçı (EB) bölgesinde, 7.324 adet kristal ise Elektromanyetik Kapak (EE) bölgesinde bulunmaktadır. Bu kristaller 8.28g/cm^3 yoğunluğa, $X_0=0,89$ cm'lik küçük radyasyon uzunluğuna ve $r_M=2,19$ cm Moliere yarıçapına sahiptirler.

Kristaller, bir yarı yansıtıcı (quasi-projective) geometrisinde düzenlenir ve Şekil 2.8'de gösterildiği gibi, $|\eta| < 1.48$ psüdorapidite aralığını kapsayan merkezi bir fıçı bölümüne ve $|\eta| = 3.0$ psüdorapidite aralığına kadar uzanan iki uç kapak bölümlerine yerleştirilmiştir.



Şekil 2.8. (a) CMS Elektromanyetik Kalorimetresinin şematik yerleşimi, (b) EKAL'ın bir çeyreğinin geometrik görüntüsü.

Fıçı kristalleri, 23 cm ($\sim 26 X_0$) uzunluğuna ve $2,2 \times 2,2$ cm²'lik bir ön yüzey kesitine sahipken, uç kapak kristalleri 22 cm ($\sim 25 X_0$) uzunluğuna ve $2,86 \times 2,86$ cm²'lik bir ön yüzey kesitine sahiptir. Şekil 2.9'da verimliliği artırmak için kullanılan radyasyona dayanıklı kurşun tungsten kristaller gösterilmiştir (<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/9/02/C02008>).



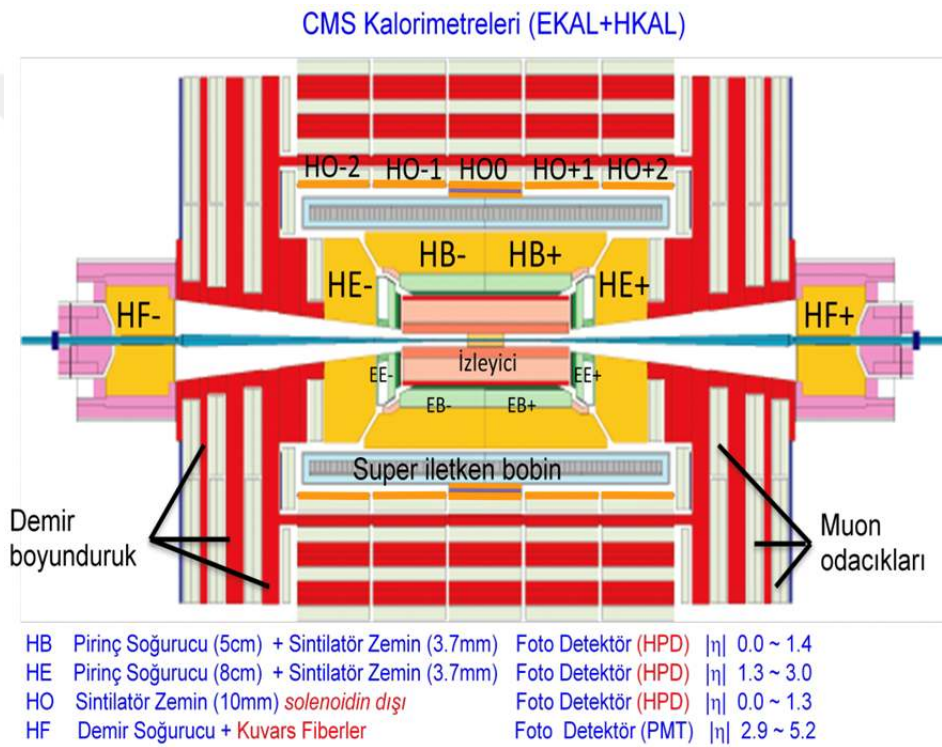
Şekil 2.9. Kurşun tungsten kristaller (<http://cds.cern.ch/record/41867>).

PbWO_4 ’ün dezavantajı, nispeten düşük ışık verimliliğine sahip olmalarıdır. EKAL; EB ve EE gibi iki bölümden oluşmaktadır. EB, $0 < |\eta| < 1.48$ psüdorapidite aralığını kapsamaktadır ve iç yarıçapı 129 cm’dir. EE ise, $1.48 < |\eta| < 3.0$ psüdorapidite aralığında bulunmaktadır ve yarıçapı 314 cm’dir (CMS TDR, 2006).

2.4.2.3. Hadronik Kalorimetre

Hadronik Kalorimetre (HKAL), “hadronların” enerjisini ölçer. Ayrıca, nötrinolar gibi etkileşmeyen, yüksüz parçacıkların dolaylı olarak ölçülmesini sağlar. Bu parçacıkların ölçülmesi, Higgs bozonu veya süper simetrik parçacıklar gibi yeni parçacıkların oluşumunu gözlemlemek açısından önem taşımaktadır (<http://cms.web.cern.ch/news/hadron-calorimeter>).

HKAL’de, atom numarasının düşük olması ve manyetik alandan etkilenmemesi sebebi ile pirinç malzeme kullanılmıştır. HKAL, dört alt dedektörlerden oluşur bunlar; İleri Hadron Kalorimetresi (HF), Hadronik Uç Kapak Kalorimetresi (HE), Hadronik Dış Kalorimetre (HO) ve Hadronik Fıçı Kalorimetresi (HB)’dir (CMS TDR, 2006). Şekil 2.10’da HKAL’in alt dedektörleri gösterilmiştir.

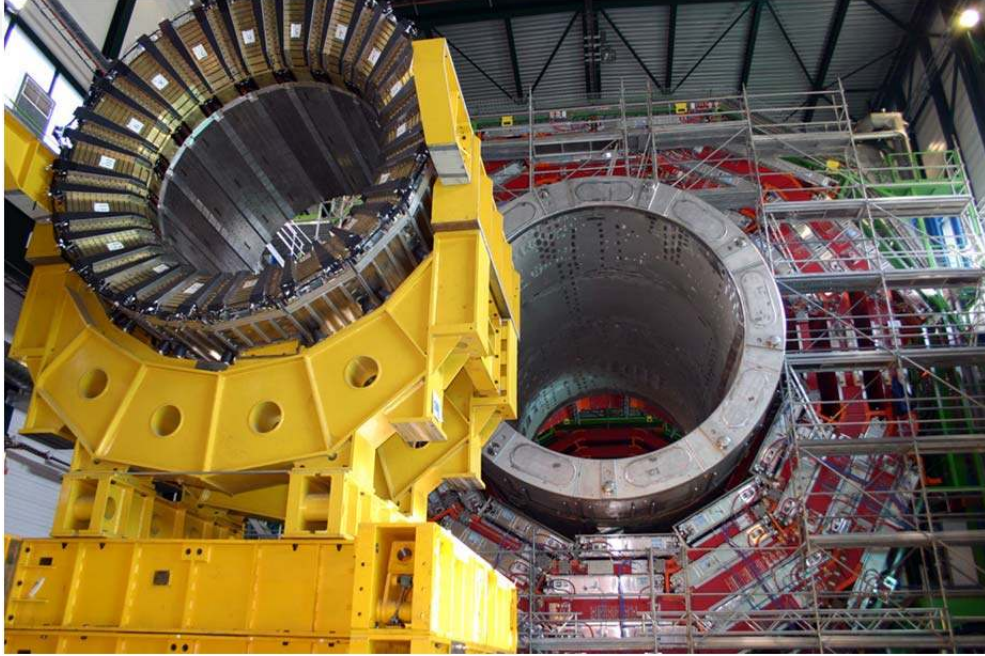


Şekil 2.10. HKAL’in alt dedektörleri (www.slideserve.com/zeki/cms-calorimeter).

HKAL, $|\eta| \leq 5.0$ psüdo-rapidity aralığındadır. Bu dedektörde, 50 mm kalınlığındaki bakır plaklar soğutucu olarak kullanılmakta olup bu bakır plakalar arasında 4 mm’lik plastik sintilatörler bulunmaktadır. Bu sintilatörlerin içerisinde, sinyallerin aktarılması için WLS fiberleri vardır.

2.4.2.3.(1). Hadronik Fıçı (HB) Kalorimetresi

Hadronik fıçı (HB) Kalorimetresi, $|\eta| < 1.3$ psüdorapidite aralığında yer almaktadır. 9 metre uzunluğunda, 1 metre kalınlığında ve dış yarıçapı 3 metre olan iki yarım fıçı (HB + ve HB -)'dan oluşmuştur. Burada kullanılan soğurucu malzemesi pirinç olup ön bölümünde 40 mm kalınlığında çelik, devamında 50,5 mm kalınlığında plaka, arka bölümünde 56,5 mm kalınlığında pirinç plaka ve en arkada 75 mm kalınlığında çelik bulunmaktadır (Şekil 2.11.).



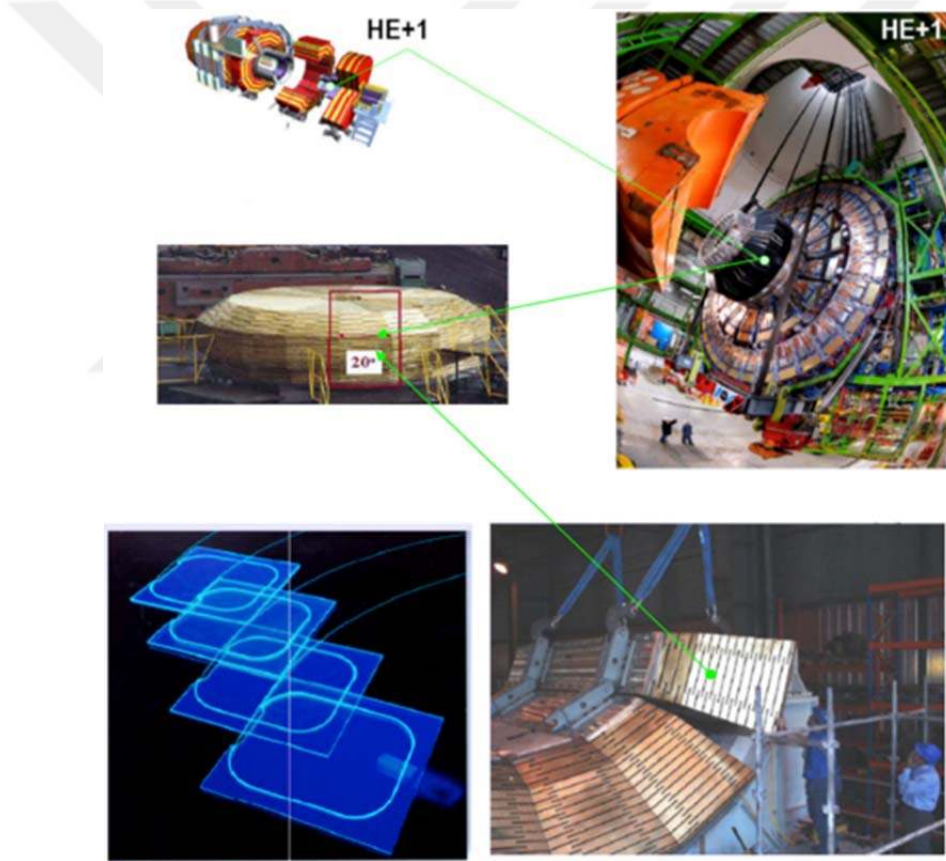
Şekil 2.11. HB +'nın ilk yarısı (<https://cds.cern.ch/record/1431485>).

2.4.2.3.(2). Hadronik Uç Kapak (HE) Kalorimetresi

HE Kalorimetresi, $1.3 < |\eta| < 3.0$ psüdorapidite aralığında, iki kapaktan (HE + ve HE -) oluşmuştur. HE Kalorimetresi, HB Kalorimetresine benzer bir örnekleme kalorimetresidir. HE, Şekil 2.12'de görüldüğü gibi 20°'lik 18 modülden oluşmuştur.

HKAL'de bulunan HE Kalorimetresi, katı açının %13,2'sini kapsamaktadır. Yani, parçacıkların yaklaşık %34'ünü içeren bir bölgededir. BHÇ'nin yüksek ışıklılığı ($10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$), HE'nin yüksek sayım oranlarının (MHz) üstesinden gelmesi ve yüksek radyasyon toleransına sahip olmasını gerektirir.

HE ve HB kalorimetreleri, $|\eta| < 3.0$ durumu dışındaki sektör boyutları aynıdır. $|\eta| < 3.0$ durumunda ise sektör boyutu iki katına çıkmaktadır (CMS NOTE, 2008/010).



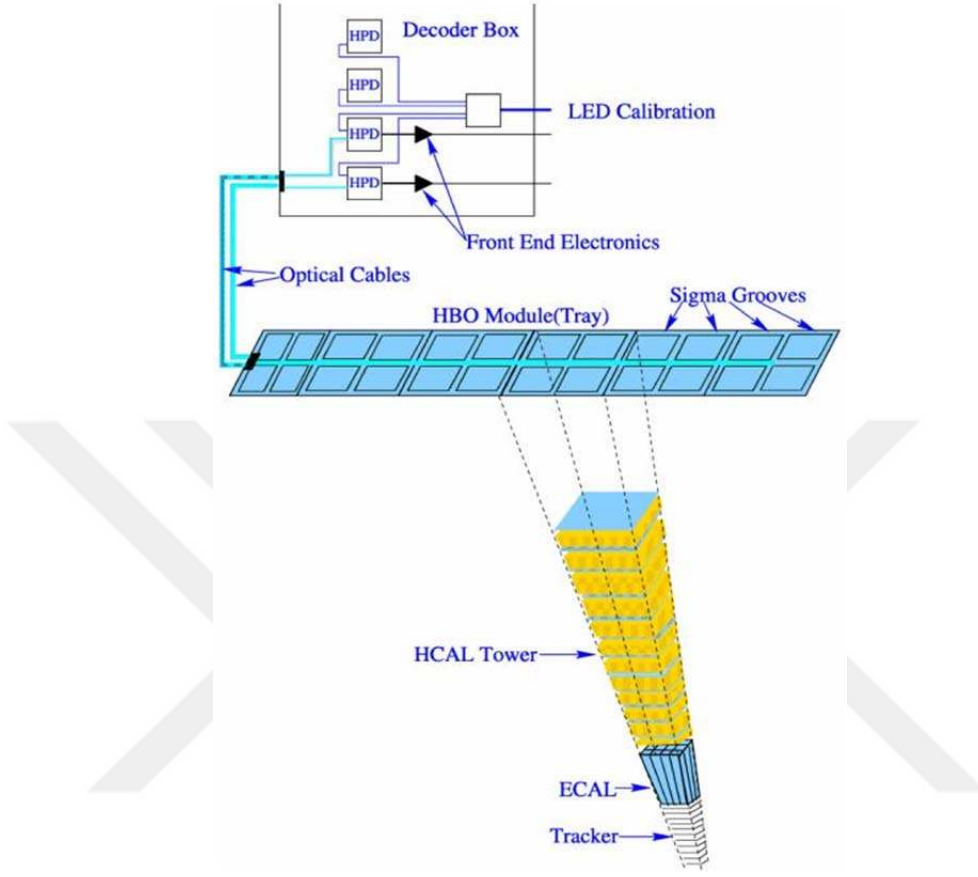
Şekil 2.12. HE dedektör sisteminden kesitler. Yukarıda HE dedektörünün CMS'e yerleştirilmesi görülmektedir. Aşağıda HE de kullanılan tablalar görülmektedir. En son resim HE Kalorimetresinin takozlarıdır..<https://web.itu.edu.tr/kcankocak/itu-fizik-upgrade.html>).

2.4.2.3.(3). Hadronik Dış (HO) Kalorimetresi

Hadronik dış kalorimetre (HO), EB ve HB den sonra gelen, 4T'lık solenoid mıknatısın dışında nispeten ince bir örnekleme dedektörüdür. $|\eta| < 1.4$ psüdorapidite değeri için yeterli örnekleme derinliği sağladığından emin olmak için, hadronik kalorimetre kriyostatın dışında uzatılır. HO, etkileşme uzunluğuna $(1.4 \lambda_{int}/\sin \theta)$ eşit solenoid mıknatısı ek bir soğurucu olarak kullanır. Ayrıca yeni başlangıç duşlarını belirlemek ve HB'nin sonundaki depolanan duş enerjisini ölçmek için kullanılır.

Kriyostatın dışında, muon silindir sistemi içinde, 2,536 m genişliğinde (z-ekseni boyunca) 5-halka şeklinde tasarlanan demir bir boyunduruktan geçirilir. Halkalar sırasıyla; -2, -1, 0, +1, +2 şeklinde tanımlanmış olup konumları z-ekseni boyunca; -5,342 m, -2,686 m, 0, +2,686 m, +5,342 m'dir. Merkezi halkada (halka 0) EB + HB'de λ_I 'nin en küçük değerine sahip olduğu için, 19,5 cm bir demirin her iki tarafına, sırasıyla 3820 mm ve 4070 mm'lik radyal uzaklıklarda iki HO sintilatör tabakası yerleştirilmiştir. Diğer tüm halkalar 4070 mm'lik bir radyal uzaklıkta tek bir HO tabakasına sahiptir. Kalorimetre sisteminin toplam derinliği, Fıçı-Kapak sınır bölgesi dışında en az $10 \lambda_{int}$ 'e kadar genişletilir.

HO Kalorimetresinin kurulumunu basitleştirmek için, sintilatör karoları, tabla denilen tek bir ünite halinde paketlenmiştir. Her tabla bir ϕ dilimine (ϕ 'deki genişlik $\sim 5^\circ$) karşılık gelmektedir. Ancak, z (η) yönü boyunca, bir tabla bir muon halkasının tüm kirişlerini kapsamaktadır. Şekil 2.14 bir karonun, HB'nin bir kulesine eşleştiğini ve tabladan gelen optik kablunun okuma kutusunu bağladığı bir HO tablasının şematik bir görünümünü göstermektedir (CMS NOTE, 2008/020).



Şekil 2.14. HO karolarının şematik görüntüsü. Her karo HB kulesine eşleşir. Tabladan gelen optik fiberler, foto-dedektör ve okuma elektroniği içeren şifre çözücü kutuya bağlanır.

2.4.2.3.(4). İleri Hadronik (HF) Kalorimetre

İleri Hadronik (HF) Kalorimetre, kayıp dik enerjileri ve jetleri ölçmek için tasarlanmıştır. $3 < |\eta| < 5$ psüdorapidite aralığında bulunmaktadır. HF Kalorimetresi, $HF+$ ve $HF-$ şeklinde iki kısma ayrılmaktadır ve etkileşim noktasına uzaklığı 11,2 m'dir. Her kısımda 18 kama bulunmaktadır. Şekil 2.15'te HF Kalorimetresinin yer altına indirilişi gösterilmiştir. HF'de yoğun radyasyon olduğu için, radyasyona dayanıklı malzemeler tercih edilmiştir. HF'de 36 adet çelik kama, 1728 adet okuma kanalı bulunmaktadır.



Şekil 2.15. HF Kalorimetresinin yer altına indirilişi (<https://cds.cern.ch/record/1431489>).

2.4.2.4. Selenoid Mıknatıs

Parçacıkların enerjisini ölçmek için, parçacığın enerjisinden daha güçlü bir manyetik alan (4T) kullanılır. CMS'nin manyetik alanı, sıvı helyum ile soğutulan, 7 metre çapında ve 12 metre uzunluğunda, süper iletken bir bobin biçiminde olan (Şekil 2.16.) bir elektromıknatıs tarafından üretilir. Bu bobin, termal olarak izole edilmesi amaçlanan bir vakum kabında bulunmaktadır. Bu devasa selenoid, ürettiği manyetik alandan dolayı 14500 tonluk çelik yapının merkezine yerleştirilmiştir (http://cmsinfo.cern.ch/outreach/CMStimes/2006/11_13/index.html).



Şekil 2.16. Selenoid mıknatısın bir görünümü.

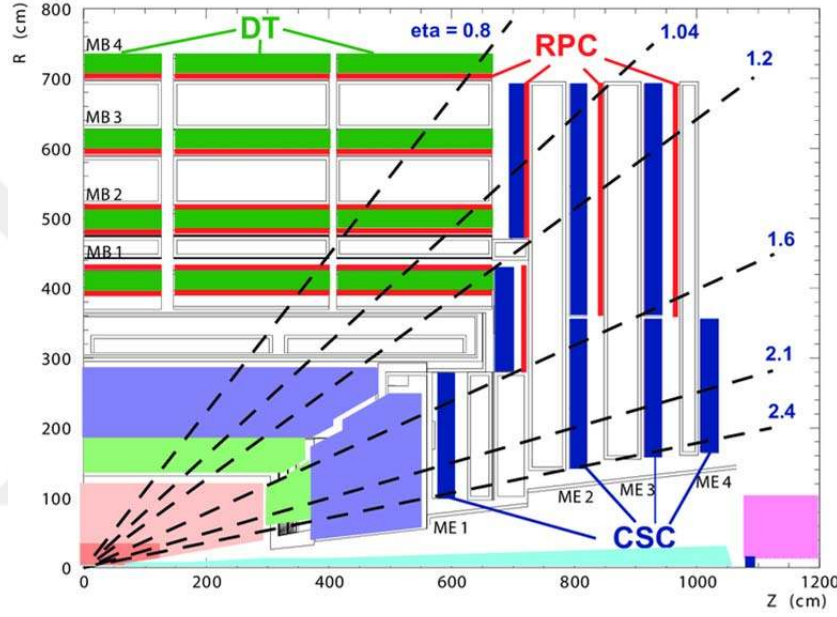
Mıknatıs, BHÇ’de yüksek enerjili çarpışmalardan ortaya çıkan parçacıkların yollarını bükme görevi görür. Bu mıknatıs, elektromanyetik bir manyetik alan oluşturan tel bobinlerinden oluşan bir selenoid’dir.

Aslında normal sıcaklıklarda mümkün olan en güçlü mıknatıs, CMS selenoidinin sadece yarısına sahiptir. EKAL ve HKAL, mıknatıs bobinin içine rahatça yerleşirken, müon dedektörleri, manyetik bobinleri çevreleyen ve alanı içeren ve kılavuzluk eden 12 taraflı bir demir ile birbirine geçirilir. Üç katmandan oluşan bu dönüş boyunduruğunun yarıçapı 7 metreye ulaşmaktadır ve aynı zamanda sadece müonlar ve nötrinolar gibi zayıf etkileşimli parçacıklar yoluyla bir filtre görevi görmektedir (<http://cms.web.cern.ch/news/superconducting-magnet>).

2.4.2.5. CMS Müon Sistemi

Müon sistemi CMS’in en dış kısmında bulunur. İsminden de anlaşıldığı gibi müonları algılamaktadır. Müonlar, elektronlar ve pozitronlar gibi yüklü parçacıktır,

ama 200 kat daha ağırdır. Müonlar, etkileşime girmeden demirin birkaç metre ilerisine kadar nüfuz edebildikleri için diğer parçacıkların aksine CMS'in hiçbir kalorimetresinde durdurulmazlar. Bu yüzden, CMS deneyinin en dış kısmına, müonları algılamak için bazı odacıklar yerleştirilmiştir ki bu parçacıklar (müonlar), o bölgede sinyal oluşturabilmesi muhtemel tek parçacıklardır.



Şekil 2.17. CMS'in müon sistemi (<https://cds.cern.ch/record/1477844/plots>).

Toplam 1400 müon odası vardır: 250 adet sürüklenme tüpleri (DT) ve 540 adet katot şerit odası parçacıkların (CSC) yerlerini takip eder ve bir tetikleyici sağlarken, 610 dirençli plaka odaları (RPC) yedek bir tetikleme sistemi oluşturur. (Şekil 2.17). Birçok dedektör katmanı ve her türden farklı özellikleri nedeniyle, sağlamdır ve arka plandaki gürültüyü filtreleyebilir. Müon sistemi 2×10^6 katot şerit odası teli içerir. Her biri insan saçı kadar incedir fakat hiçbiri kırılmamıştır (<http://cms.web.cern.ch/news/muon-detectors>)



3. MATERYAL VE METOD

3.1. Hadronik Uç Kapak Kalorimetresi

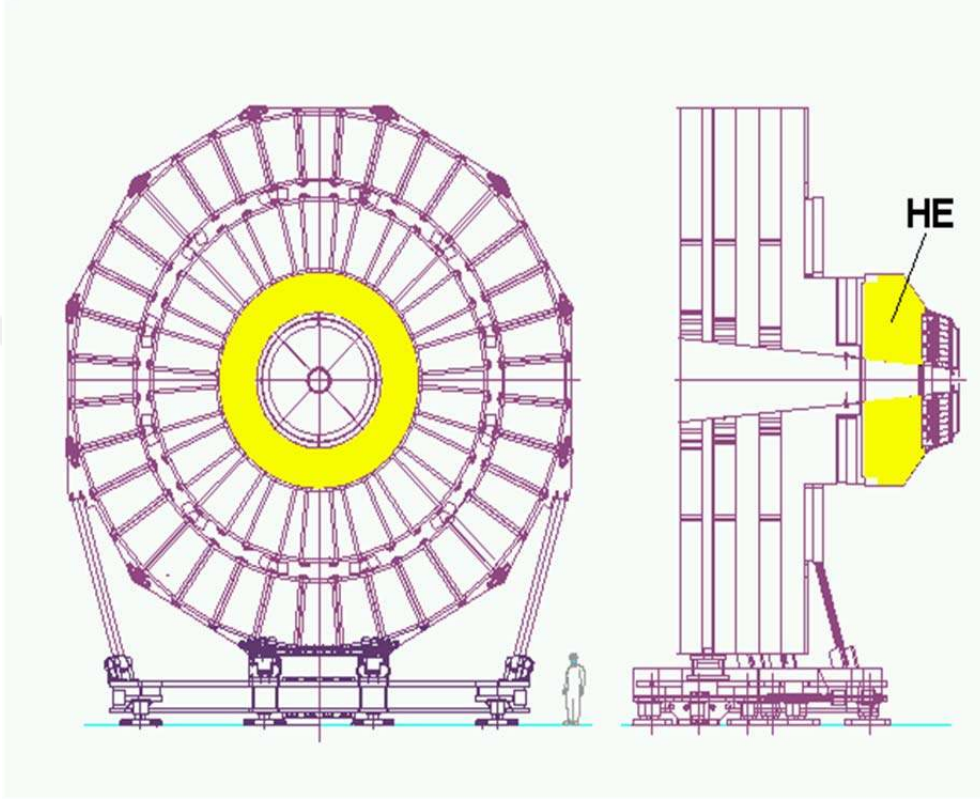
Hadronik Uç Kapak kalorimetresi 4T'lık selenoid mıknatısın uç kısımlarında bulunmaktadır. Bu yüzden, kullanılan materyallerin manyetik olmaması, maksimum soğurucu uzunluğuna sahip olması, iyi mekanik özelliklerinin olması ve makul bir fiyat aralığında temin edilebilir olması gerekir. Bu durum, C26000 numaralı pirinç kartuşun (%70 Cu ve %30 Zn) seçimine sebep olmuştur. Etkileşim uzunluğu 16,4 cm ve radyasyon uzunluğu 1,5 cm'dir. 2 ton ağırlığındaki ön-duş dedektörü ile 10 ton ağırlığındaki elektromanyetik kalorimetre, HE'nin ön yüzünde bulunmaktadır. Yaklaşık 300 ton ağırlığında olmasından dolayı, kullanılan malzemeleri en düşük seviyede tutma gerekliliği, mühendislere büyük zorluk çıkarmıştır.

Ara yüzey, bitişik müon demirine göre kapak dedektörlerin konumlanmasını sağlamak ve manyetik kuvvetler altında deformasyonun etkisini en aza indirmek için tasarlanmıştır. Ara yüz; demir diskler (YE1) ve menteşeler ile birbirine açılır-kapanır bir şekilde bağlanmıştır. HE arka bağlantısı ve ara yüz tüpü arasında, bir sürgülü eklem bulunmaktadır. Ara yüz sisteminde kullanılan yapısal malzemeler manyetik alanı bozmamak için manyetik olmayan malzemelerden üretilmiştir.

Hadronik Uç Kapak tasarımında, uçlar (Şekil 3.1)'de müon uç kapak boyunduruğuna bağlanmıştır. Kalorimetre yapısının sadece küçük bir kısmı, mıknatıs demirine sabitlemek için kullanılabilir. Çünkü, HE ve müon soğurucu arasındaki boşluğun çoğu, müon katot şeridi odaları ile kaplıdır (CMS Collaboration, 2008, JINST 3 S08004).

Hadronik Uç Kapak ve elektronikler, 36 okuma kutusundan (RBX) oluşmaktadır. Her bir RBX, dört adet okuma modülü (RM), kalibrasyon ünitesi, saat, kontrol modülü ve alçak gerilim modülü olan ek servis modüllerinden oluşur.

Okuma modülü, HE ön-uç elektroniklerinin kalbidir. Silikon foto-çoğaltıcılardan gelen sinyalleri işlemek için kullanılan foto-dedektör ve QIE11 kartlarından oluşur.

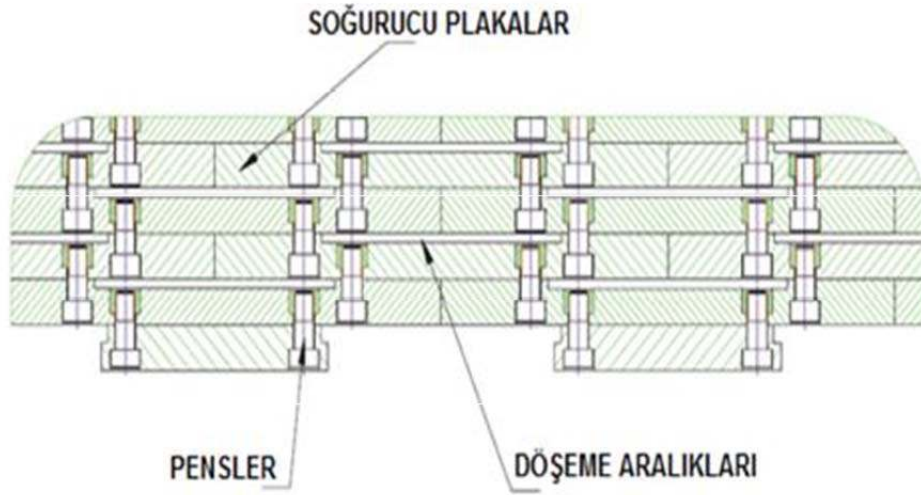


Şekil 3.1. Hadron kalorimetresinin genel görüntüsü (http://rdms-cms.jinr.ru/docs/rdms_1/hadron/HEenglish.html).

3.1.1. Soğurucu Yapısı

Soğurucunun detaylı tasarımı, HB ve HE arasındaki boşlukları en aza indirir ve ölü bölgenin olmadığı destekleyici bir tasarım sağlar. Şekil 3.2’de HE dedektörünün soğurucu yapısı gösterilmektedir. Pirinç plakalar 79 mm kalınlığında ve sintilatörlere 9 mm mesafede olacak şekilde tasarlanmıştır. Kalorimetrenin etkileşme uzunluğu (λ_1) yaklaşık 10’dur ve bu kalorimetre elektromanyetik kristaller içerir.

HE'nin dış katmanları çıkarılıp, bu kısma foto-dedektörler ve ön-uç elektronikleri yerleştirilmiştir. Dış katman çıkarıldığı için materyalde azalma olmuştur. Bu açığı kapatmak için, 18. Kuleye bir katman eklenir. Dış katmanlar 10 cm kalınlığında paslanmaz çelik bir destek plakaya sabitlenmiştir. Soğurucu tamamen monte edildikten sonra optik elemanlar boşluklara yerleştirilmiştir, burada optik elemanlar herhangi bir konumdan istenen şekilde yerleştirmek için sert bir yapıya sahip olacak biçimde seçilmiştir.



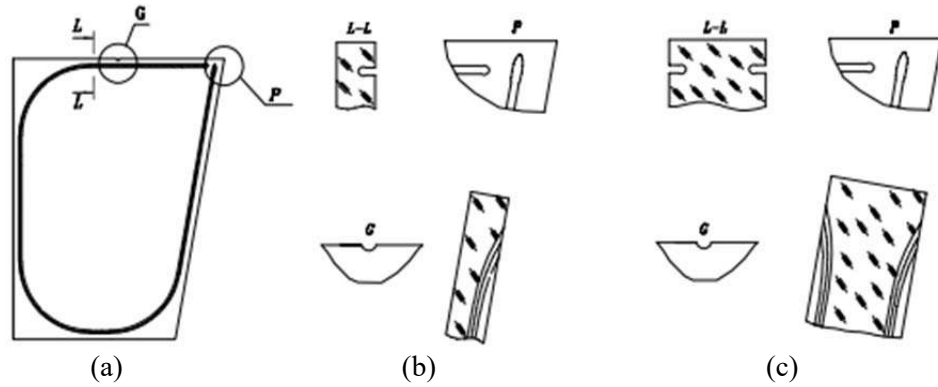
Şekil 3.2. HE soğutucusunun mekanik yapısı. Parçacıklar aşağıdan kalorimetreye girer.

3.1.2. Sintilatör Tablaları

Dalga Boyu Kaydırıcı (WLS) fiberler; sintilasyon ışığını toplar. Soğurucular, HE ve HB arasındaki boşluğu en aza indirmeyi hedeflemiştir ve ışığı foto-dedektörlere kolayca gönderdikleri için tasarımı ölü bölgeyi minimuma indirir.

Şekil 3.3'te, ikizkenar yamuk şeklindeki sintilatörler; 1-17 katmanları için 3,7 mm kalınlığında SCSN81 ve 0. katman için 9 mm kalınlığında Bircon BC408 kullanılmıştır. Bunlar WLS fiberlerinin takılı olduğu oyuklarda bulunur ve

fiberlerin ucu elmas ile kesilmiştir. Uçlardan biri ışığı artırmak için alüminyum ile kaplanmış ve diğer uç da optik konektörde son verilmek üzere, belli fiberler ile birleştirilmiştir. Ayrıca yapıştırılmış fiberli konektörler, elmas ile kesilmiştir. Dar kenarlar boyunca sintilatörler boyanmış ve bir tabla oluşturmak üzere çerçevenin içine dizilmiştir. HE’de toplam 1368 tabla, 20916 karo bulunmaktadır. Şekil 3.4’te tablaların şematik görünümü verilmiştir. Şekil 3.5, η numaralandırılma şemasını ve Şekil 3.6 ise, HE kamalarının etkileşim noktasından bakıldığı açıda ki numaralandırma şemasını göstermektedir. Burada her bir kama, 10° ’lik ϕ açısına karşılık gelmektedir.



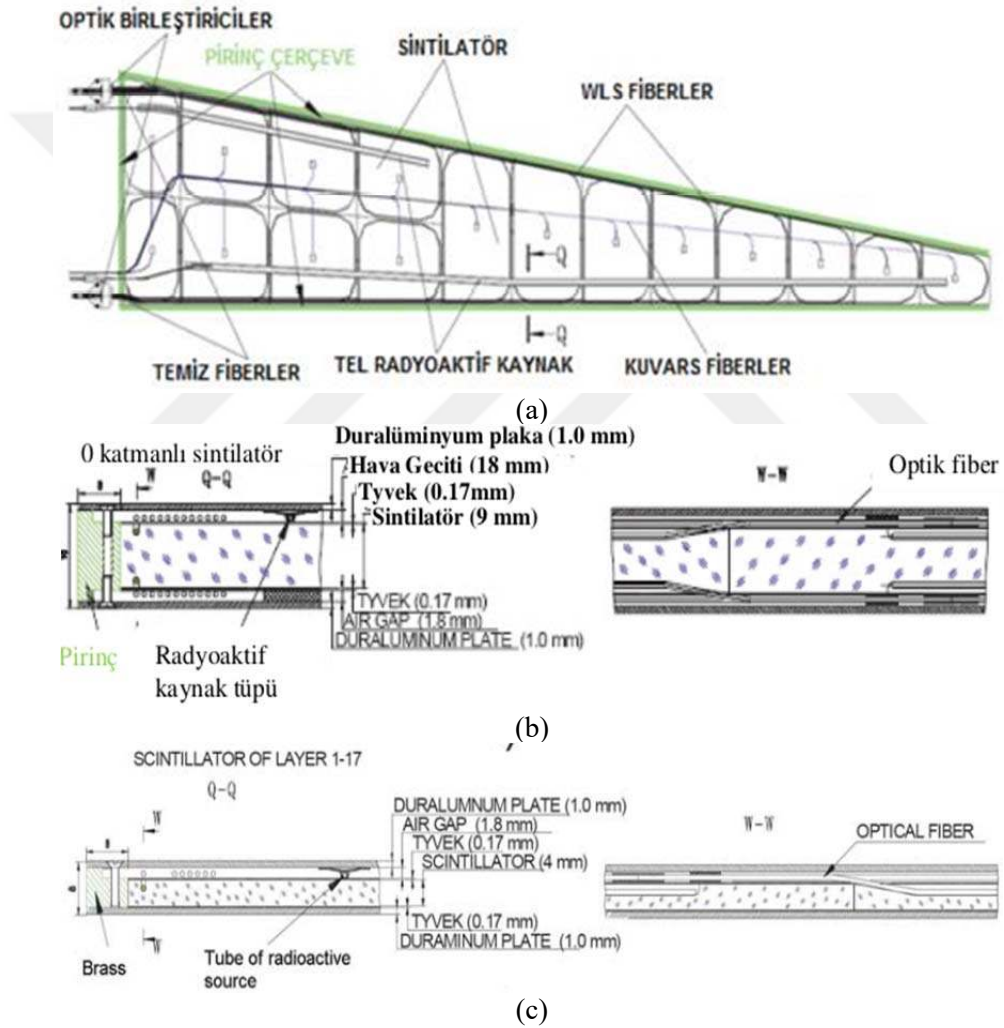
Şekil 3.3. a) WLS fiberlerini sabitlemek için boş tablanın temel yapısı. b) 1.Katmandan, 17. Katmana kadar olan bölgeler için 3.7 mm kalınlığındaki sintilatörün kesitleri. c) 0 katmanı için, 9 mm kalınlığındaki sintilatörün kesitleri. İki kat yansıtıcı boya karonun yan yüzeylerini kaplamıştır.

Sintilatörler, Tyvek (bir kumaş markası) ile kaplanmış ve sert alüminyum levha arasında sıkıştırılmıştır. Bu yığın, optik konektörlerle sonlandırılmış fiberler için boşluklar içerir. Sert alüminyum levhalar arasındaki boşluk birbirine vidalanmış pirinç ara parçaları ile sabitlenir. Kalorimetrelerin tanecikleri $|\eta|$ için;

$$\Delta\eta \times \Delta\phi = 0.087 \times 0.087 \quad |\eta| < 1.6 \text{ ve}$$

$$\Delta\eta \times \Delta\phi \approx \text{için } 0.17 \times 0.17 \quad |\eta| \geq 1.6 \text{ 'dır.}$$

Tabla tasarımı dayanıklı ve güvenilir şekilde inşa edilmiştir, çünkü tablalar soğurucunun içine eklendiği için çok önemlidir. Bu yapı nispeten serttir. Sintilatör tabla kalitesini kontrol etmek ve sintilatörleri uyarmak için, bir UV nitrojen lazer kullanılmıştır. Şekil 3.4'te görüldüğü gibi ışık, konektöre kuvarz fiberler tarafından gelir ve yayılır. Bu fiberler alüminyum reflektörler ile sınırlandırılır ve ışık tüm karolarla dağılır.

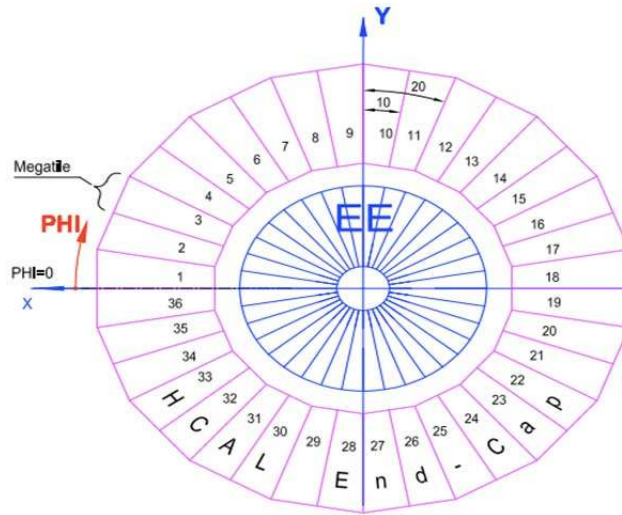


Şekil 3.4. Kalorimetre sintilatör tablalarının tasarımı a) üst alüminyum kapağı olmadan bir tablanın önden görünümü, b) 0 katmanına sahip tablanın bir kesiti, c) 1-17 arası katmanlara sahip tablanın bir kesiti.

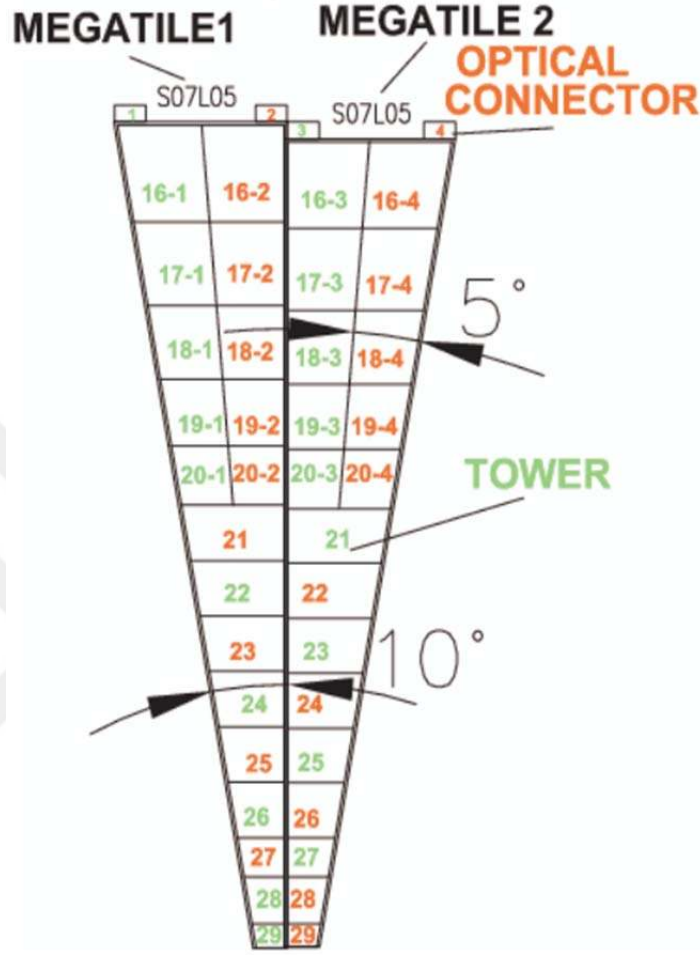
Sintilatördeki bir UV ışık tarafından üretilen sinyaller, yüklü parçacıklar tarafından uyarılmış sinyallere benzer. Bu, radyasyon hasarı nedeniyle, saydamlığın bozulma olasılığını izlemek için önemli bir teknik sağlayarak, sintilatörden elektroniğe kadar tüm optik rotanın, performans kontrolüne izin verir. Daha fazla kalibrasyon ve izleme için, paslanmaz çelik tüp içinde hareket eden radyoaktif kaynak kullanılmaktadır. Ayrıca bu kaynak kalibrasyon katsayısının zaman bağımlılığını incelemek için de kullanılır.

Tablalar soğurucudaki boşluklara yerleştirilmiş ve vidalarla sabitlenmiştir. Kalorimetrenin arkasına foto-dedektör ve elektronik kutular yerleştirilmiştir. Optik kablolar, sintilatör tablalarından foto-dedektörlere sinyal aktarır.

Foto-dedektörler, ışıldayıcıdan gelen analog sinyali dijitale dönüştürürler. HE’de bu foto-dedektörün yeri, kalorimetre ile müon kapağı arasındaki kutunun içindedir. Burada çok pikseli Hibrit Foto-Diyotlar (HFD), fotodedektör olarak kullanılmıştır (CMS Collaboration, 2008, JINST 3 S08004). Daha sonra HFD’lerin yerini silikon foto çoğaltıcılar almıştır.



Şekil 3.5. HE kamalarının etkileşim noktasından bakıldığı şekilde numaralandırma şeması. + X yönü BHÇ halkasının ortasına işaret etmektedir.



Şekil 3.6. Bitişik sintilatör tablalarındaki karolar için numaralandırma şeması.

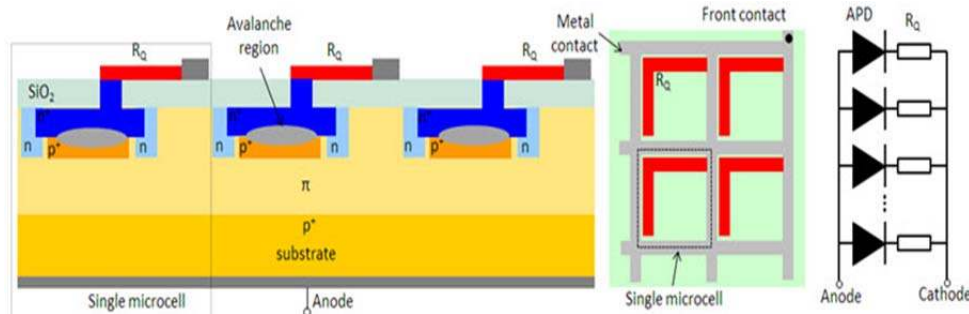
3.2 HE Kalorimetresindeki Yenilikler

BHÇ’de 2009 yılında, $\sqrt{s} = 900$ GeV’de ilk kez p-p çarpışma verileri alınmıştır. BHÇ, Veri Alımı-1 (2010-2012) sırasında, $\sqrt{s} = 7$ TeV’de iki yıl boyunca fizik verisi toplamıştır ($\approx 6 \text{ fb}^{-1}$). 2012’de ise, $\sqrt{s} = 8$ TeV kütle merkezi enerjisinde veri almıştır ($\approx 23 \text{ fb}^{-1}$). Veri Alımı-1’de elde edilen en önemli fizik keşifi Higgs Bozonu olmuştur. 2015 yılında başlayan Veri Alımı-2’de ise, $\sqrt{s} = 13$ TeV’lik kütle merkezi enerjisine ve $1.7 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ kadar yüksek, ani ışıklılık değerine ulaşmıştır.

Higgs bozonu ve SM süreçlerinin yanı sıra SM'nin ötesinde fizik arayışları üzerinde ayrıntılı çalışmalar yapılmaktadır. 2023'te, Veri Alımı-3'ün sonuna doğru, toplam ışıklılığın yaklaşık 300fb^{-1} değerine ulaşılması planlanmaktadır. Yüksek Işıklılıklı Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (HL-LHC)'nin ise, üçüncü uzun aradan (LS3) sonra yani 2026 yılının son çeyreğinde çalışmaya başlaması planlanmaktadır. 2030'ların ortasına kadar toplam ışıklılık yaklaşık olarak 3000fb^{-1} değerlerine ve $5 \times 10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ anlık ışıklılık seviyelerine ulaşılması hedeflenmektedir. Bunlara ek olarak, demet kesişimi (BX) başına düşen ortalama çarpışma sayısı 140'a çıkarılacaktır. Ancak BHÇ hem anlık hem de toplam ışıklılık için %50 daha yüksek değerlere sahiptir. Bu nedenle; radyasyon ve olay yığılma çalışmaları için, BX başına etkileşim sayısı olarak, nominal değerinin yanı sıra 200 değeri kullanılmaktadır. HL-LHC yükseltme programının bir parçası olarak, CMS, mevcut uç kapak kalorimetresini değiştirmek için Yüksek Tanecikli Kalorimetre (HGAL) çalışmalarını sürdürmektedir. Mevcut ileri kalorimetreler, PbWO_4 tabanlı elektromanyetik kalorimetre ve plastik sintilatör tabanlı hadron kalorimetresi, 500fb^{-1} toplam ışıklılığa uygun olacak şekilde tasarlanmıştır (CMS-TDR, 2019).

3.2.1. Silikon Foto Çoğaltıcılar ve Özellikleri

Bir Silikon Foto-Çoğaltıcı (SiFÇ), mikro hücrelerin bulunduğu, çıkış foto-diyot (APD) ve sönmüleme direncinin (R_Q) bir dizi kombinasyonundan oluşan pikseli bir cihazdır. Yarı iletken tabanlı foto-dedektördür. Tüm mikro hücreler paralel bağlandığı için, SiFÇ'nin biri anot ve biri katot olmak üzere iki ucu vardır. Şekil 3.7'deki üç panel, soldan sağa doğru; üç mikro hücrenin kesitini, cihazın üstten görünümü ile çarpan ışığın tarafını ve eşdeğer bir elektrik devresini göstermektedir.



Şekil 3.7. Tipik bir SiFÇ yapısı.

Pratik SiFC'lerde, aynı boyuttaki mikro hücreler dikkörtgen bir düzende ayarlanır. Cihaza bağlı olarak, bir mikro hücrenin boyutu 10 μm ile 100 μm arasında değişmektedir ve cihaz başına mikro hücre sayısı, birkaç yüz ile on binlerce mikro hücreler arasında değişiklik göstermektedir. SiFC'ler, 1 mm^2 ile 6 mm^2 arasında değişen aktif alanlara ve UV ile IR arasındaki görünür bölgede pik yapan (400nm-500nm) spektral hassasiyete sahiptir (<https://hub.hamamatsu.com/jp/en/technical-note/how-sipm-works/index.html>).

SiFC'nin birincil karakteristik özellikleri, foton tespit verimliliği (PDE) ve kazanımdır. PDE; birincil tetiklenen piksellerin sayısının, SiFC yüzeyinde bulunan fotonların sayısına oranıdır. SiFC kazancı, pikselin içindeki Geiger deşarjının bir sonucu olarak, bir foto-elektronun çarpımının kaç kat olduğunu gösterir. SiFC'nin en ciddi zorluklarından biri optik parazittir. Pikseldeki birincil deşarj (çığ), yakınlardaki piksellerde ikincil deşarjları tetiklediğinde ortaya çıkan olasılıksal bir süreçtir (Bychkova, et al., 2017).

Bir SiFÇ, işleyişi ve özellikleri bakımından en çok Foto Çoğaltıcı Tüpe (FÇT) benzemektedir. Bir FÇT'ye kıyasla, bir SiFÇ daha düşük bir çalışma voltajı gerektirir. Manyetik alana karşı duyarsız, bazı durumlarda foton algılama verimliliği daha yüksektir. Yoğun, sağlam ve düşük maliyetlidir. Ayrıca, boyut olarak daha küçüktür. Bunlar ve diğer sebeplerden dolayı SiFÇ'ler, Pozitron Emisyon Tomografisinde (PET) ve radyasyon algılama gibi düşük ışıklı

uygulamalarda FÇT yerine kullanılmıştır (<https://hub.hamamatsu.com/jp/en/technical-note/how-sipm-works/index.html>).

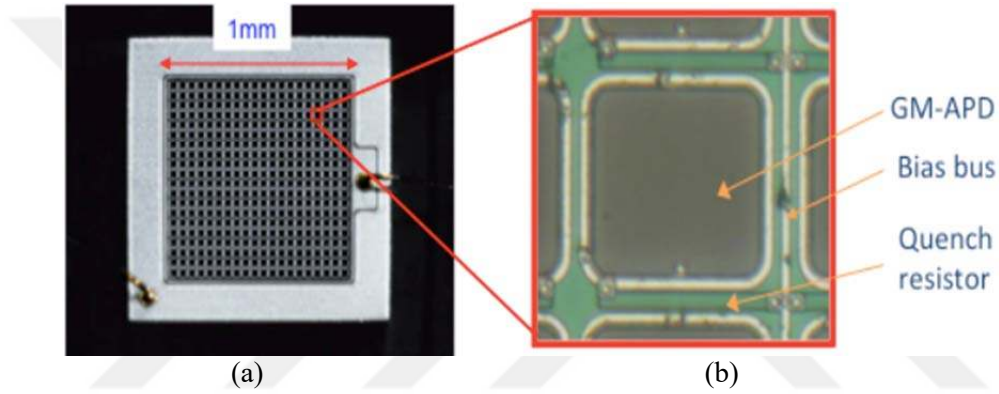
Ayrıca SiFÇ'ler, yüksek enerji fiziği, tıp ve astro-parçacık fiziğinde de giderek popüler olmuştur. SiFÇ'ler, okuma elektroniklerinin işini önemli ölçüde kolaylaştıran yüksek voltajlı bir kazanç sunar ve sıcaklık, voltaj değişimlerine karşı kararlılığını artırır. SiFÇ'ler ayrıca iyon radyasyonuna, başka bir deyişle, nükleer etkiye karşı duyarsızdırlar. Diğer bir özelliği ise hızlı zamanlama (tek foton için yaklaşık 100 ps FWHM) ve tek foton sayma yeteneği sağlıyor olmasıdır. SiFÇ'ler 4T değerindeki manyetik alandan etkilenmezler (Gratti E, 2018).

SiFÇ'nin, HFD'ye göre avantajları; daha düşük çalışma voltajına (70V), daha yüksek kazanç ve daha düşük maliyete sahip olmasıdır. Ayrıca SiFÇ'nin kuantum verimliliği HFD'den iki kat daha fazladır. 2017 yılının sonundaki teknik ara sırasında, bu sebepler ve anormal sinyal kaynaklarını ortadan kaldırmak için HFD'ler, SiFÇ'ler ile değiştirilmiştir. Değişim ilk olarak HEP17 bölgesi ile başlayıp HE kanallarının geri kalanı da SiFÇ ile donatılmıştır (CMS CR, 2018/163). Bir HFD ve bir SiFÇ sensör Şekil 3.8'de verilmiştir.



Şekil 3.8. HFD ve SiFÇ'lerin görünüşleri (CMS CR -2018/163).

Şekil 3.9. (a)'da bir SiFÇ'nin görünümü verilmiştir. Aktif alan $1,1 \text{ mm} \times 1,1 \text{ mm}$ 'dir ve 400 APD'den oluşur. Şekil 3.9. (b), bireysel bir APD'nin şematik bir sunumunu göstermektedir. Foto-diyotun arka tarafındaki $n - p$ bağlantısına, ters voltaj uygulanır. Yarı iletken malzemeye uygulanan bu voltaj ile bir elektrik alan oluşur. Elektrik alan etkisiyle sintilasyon fotonları tarafından yarı iletken içerisinde elektron- deşik çifti oluşur. Oluşan yükler çıkış sinyali oluşturmak üzere bir ön yükselticide işlenir (CERN-EP-LCD, 2017).



Şekil 3.9. 400 APD ve SiFÇ'lerin görünümüleri (https://www.hamamatsu.com/sp/hc/osh/sipm_webinar_1.10.pdf).

3.2.1.1. Sinyal Süresi Özellikleri

Bir pikselin, deşarjdan sonra tekrar aktif hale gelmesi için gereken zamana 'piksel iyileşme süresi' (τ) denir. Bu, piksel sönümlenme direnci ve piksel kapasitansının bir ürünüdür. R_Q 'nun değerinin, 100 k Ω 'dan daha büyük olması gerekir ama bazı durumlarda 20 M Ω kadar büyük de olabilir. Piksel kapasitansının değeri piksel alanı ile ölçülebilir ve değeri 20 – 150 fF aralığında olabilir. Böylece, τ birkaç ns ile birkaç μ s arasında değişebilir. Polisilikon dirençleri, sıcaklığa bağlıdır. Bu yüzden pikselin iyileşme süresi göz önünde tutulmalıdır. Alternatif su vererek soğutma yöntemi, silikon devir

levhasındaki entegre FET devreleri gibi ya da dijital SiFÇ durumundaki CMOS sönümlleme devreleri gibi test edilir.

3.2.1.2. SiFÇ Kazancı

SiFÇ kazancı, SiFÇ pikselinde Geiger deşarj tarafından üretilen ‘elektrik yükü sayısı’ (M) olarak tanımlanır. Bu değer Geiger deşarjı için oldukça kararlıdır ve yaklaşık değeri $10^5 - 10^7$ civarında değışebilir. SiFÇ tek piksel sinyalinin, 50Ω ’luk bir yükte, birkaç mV’lik bir sinyal olarak, ön amplifikatör olmadan, doğrudan osiloskop üzerinde görüntülenmesinin nedeni budur. Piksel iyileşme süresi, okuma elektronığının tasarımını etkilemektedir.

Etkili SiFÇ kazanımı, bir piksel Geiger deşarjından sonra belli bir zaman aralığında ölçülen elektrik yüklerinin sayısıdır ($M_{eff}(\Delta t) \leq M$). SiFÇ sinyalini, küçük bir ayrıştırma kapasitöründen okurken, bazen 10 ila 50 arasında bir ön amplifikatör faktörü kullanmak gerekmektedir.

3.2.1.3. Karanlık Oran ve Atım Sonrası

Işığın yokluğunda boşaltım bölgesine, taşıyıcılar tarafından ısı aracılığı ile SiFÇ’ler sinyal üretilebilir. Atım sonrası olarak bilinen ikincil çıkışlar ilk çıkış takip eder. Bu birincil Geiger çıkışı, silikon kristalinde tutulan taşıyıcıların salınmasından kaynaklanır. Burada ilk katkı sıcaklığa bağlıdır ve sekiz derecelik bir artış için yaklaşık iki katına çıkmaktadır. Ek olarak, ikincil piksel iyileşme sürelerine de bağlıdır. Ayrıca karanlık oran, SiFÇ üretimi için kullanılan silikon devre levhasının kalitesinden ve yapım işlemleri boyunca oluşan kirlilikten son derece etkilenmektedir.

3.2.1.4. Optik Parazit

Görünür bölgede $p - n$ birleşme yerindeki fotonlar, çıkış işlemi boyunca yayılmaktadır. $1\mu m$ ’den daha az bir dalga boyuna sahip yük taşıyıcı başına

yaklaşık foton sayısı 3×10^{-5} 'tir. Bu fotonlar komşu bir piksele ulaştıklarında, ek bir çığa neden olabilirler. Bu etki, pikseller arasındaki 'optik parazit' olarak bilinir ve Geiger deşarjı olduğunda %30 – %40 daha fazla sıklıkta meydana gelebilir.

Deşarjda oluşan fotonların sayısı, taşıyıcıların sayısı ile orantılı olarak artar ve aşırı gerilimin artmasıyla çıkış tetik etkinliği buna bağlı olarak artar. Bu iki faktörün bileşik etkisi olarak; optik parazit, SiFÇ kazancı ile katlanarak artmaktadır. Doğrudan pikseller arasında hareket eden fotonlar, silikondaki optik dilimlerle durdurulabilir. İlk olarak CPTA / Photonique tarafından tanıtılan ve daha sonra SensL ve ST-Microelectronics tarafından kullanılan bu teknik, optik parazit miktarını %1 – %3'e düşürmektedir. Geriye kalan etki, silisyum kütlesindeki fotonları soğurmasından kaynaklanır, bu da optik kısmın çok altındadır. Bunlar daha sonra, komşu bir piksele ulaşmalarını sağlayan bir açıda yeniden yayılırlar. Bu son etkiden neredeyse hiç kaçınılamaz.

3.2.2. SiFÇ Yanıtı

SiFÇ yanıtı, SiFÇ aktif bölgelerine çarpan belli bir miktar foton tarafından uyarılan, tüm piksellerden gelen yüklerin toplamıdır. Çok az sayıda çarpan foton sayısı (N) ve foton algılama verimliliğinin (PDE) ürünü olarak, uyarılan piksel sayısı (N_{pix}) verilir. N_{pix} doğrusal değildir ve iyileşme süresi etkilerini göz ardı ederek, çok sayıda çarpan foton için cihazdaki toplam pikselleri doyurur.

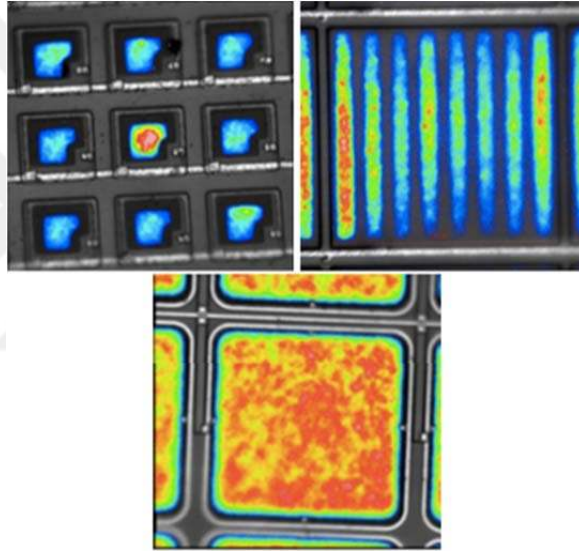
3.2.2.1. Foton Algılama Verimliliği

Foton algılama verimliliği denklem 3.1'de görüldüğü gibi üç bileşenden oluşur.

$$PDE(\lambda, U, T) = QE(\lambda) \cdot G_{ff} \cdot P_{ba}(\lambda, U, T) \quad (3.1)$$

Burada $QE(\lambda)$; bir pikselin kuantum verimliliğine bağlı dalga boyudur, G_{ff} ; SiFÇ'nin geometrik dolgu faktörü, $P_{bd}(\lambda, U, T)$; arıza tetikleme ya da diğer bir deyişle, bir foto-elektron için Geiger deşarjı, dalga boyu, voltaj ve sıcaklığa bağlı olasılıktır.

Dolum faktörü birim alan başına düşen piksel sayısı ile ters orantılıdır. Şekil 3.10'da farklı üreticilerden SiFÇ için foto-emisyon spektrumlarının örnekleri verilmiştir. Resimlerdeki renkli alan, piksellerin aktif alanlarına karşılık gelir ve renk ölçeği, piksel boyunca elektrik alan kararlılığı hakkında bir izlenim verir.



Şekil 3.10. Farklı üreticilerden SiFÇ için foto-yayınım spektrumları. Sol üstte MEPhi/PULSAR, sağ üstte SensL ve altta MPPC aygıtları bulunmaktadır.

3.2.2.2. Tepki Fonksiyonu ve Dinamik Erim

Sınırlı sayıda piksel ve piksel iyileşme süresi nedeniyle, SiFÇ'ler kendiliğinden doğrusal olmayan cihazlardır. SiFÇ'nin tepki fonksiyonu, gözlemlenmiş uyarılan piksel sayısı ve etkileşmiş foto-elektron sayısı ile ilişkilidir ve buna parazit ve atım sonrası da dâhildir. SiFÇ'nin tepki fonksiyonu, yaklaşık olarak denklem 3.2'deki gibidir.

$$N_{pix} = N_{tot} \cdot (1 - e^{-N_{pe}/N_{tot}}) \quad (3.2)$$

Burada N_{tot} ; SiFÇ'deki maksimum uyarılmış piksel sayısını verir. Bu formül; pikseller ve kısa ışık atımları üzerine eşit ışık dağılımı için, piksel geri kazanım süresine kıyasla daha yararlı bir yaklaşımdır. SiFÇ'lerdeki toplam piksel sayısının %80'ine karşılık gelen sinyaller, doğrusal bir cihazın ölçümüne göre %50 oranında küçümsenmektedir. Bu etki, bir sistemin dinamik erimini sınırlar ve sistem bileşenlerinin ışık veriminde kabul edilen yayılımı azaltır.

3.2.3. Kalibrasyon ve İzleme Sistemi

SiFÇ'leri kullanmanın avantajlarından biri; cihazın kazanımını, tek foto-elektron pik spektrumundan kalibre etme ve izleme olanağıdır. Bu, düşük ışık yoğunluğu ile her SiFÇ'nin aydınlatılmasını gerektirir. SiFÇ kazancı, sıcaklık ve voltaj değişikliklerine duyarlı olduğundan, kazancı izlemek, dedektör tepki değişikliklerini düzeltmeye izin verir. Bu yöntemin avantajı, ışık kaynağından yayılan ışık yoğunluğundaki küçük değişikliklere karşı duyarsız olmasıdır.

SiFÇ tepki fonksiyonunun doyum noktasını izlemek, cihazdaki aktif piksellerin sayısını izlemeyi sağlar. Bu, aşırı yüksek voltajda veya sert bir radyasyon ortamında çalışmaya uygundur. Bu durumda, ışık izleme sistemi SiFÇ'deki piksel sayısından 2-3 kat daha yüksek ışık yoğunluğu sağlayabilmelidir.

3.4. YEF Dedektörlerinde SiFÇ Uygulamaları

Yüksek Enerji Fiziği (YEF) dedektörleri için uygulanan SiFÇ'lerin avantajlarından biri, FÇT ve hatta APD tabanlı okuma tasarımına göre, dedektör tanecliğini önemli ölçüde artırmayı mümkün kılmaktır. WLS okumasına sahip plastik sintilatörler, yüksek taneciklilik gerektiren dedektörler için çok çekici bir çözümdür. Doğrusal çarpıştırıcı dedektörleri için tasarlandığı gibi, parçacık akışı için de kalorimetreler uç örneklerdir. Bu tür kalorimetrelerde, $3,0 \times 3,0 \text{ cm}^2$ ve hatta $1,0 \times 4,5 \text{ cm}^2$ boyutlarında tek hücreler gerekmektedir. Ayrıca,

kalorimetreler, spektrometre mıknatısının içindedir, bu yüzden okumada kullanılan foto-dedektörler manyetik alana duyarsız olmalıdır. Bir HB kalorimetresi için yaklaşık beş ila on milyon tek hücre öngörülmekte olup, HE kalorimetresinde de benzer sayılara ihtiyaç duyulmaktadır. Eğer okuma kısmı için sintilatör teknolojisinin kullanılması seçilirse, elektromanyetik kalorimetreler için de durum benzerdir (Garutti E, 2018).



4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Hadronik Uç Kapak Kalorimetresi ve SiFÇ'ler

Genel amaçlı CMS dedektörü, 13 TeV kütle merkezi enerjisindeki p-p çarpışmalarında, $10^{34} \text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ 'den daha yüksek ışıklılıkta çalışmak için tasarlanmıştır. Bu deney, CERN'ün en büyük çarpıştırıcısı olan BHÇ'de görevini başarılı bir şekilde sürdürmektedir. Süperiletken solenoid mıknatısın oluşturduğu yüksek manyetik alan, silikon piksel ve şerit izleyiciler tarafından elde edilen yüksek hassasiyetli tepe ve izlerin yeniden yapılanmasına izin verir.

CMS sistemi; sırasıyla izleyici, ışıldayıcı tungsten-kristal elektromanyetik kalorimetre, pirinç sintilatör hadronik örnekleme kalorimetre, bir çelik-kuvars fiber yapısındaki ileri örnekleme kalorimetre ve muon odacıklarından oluşmaktadır.

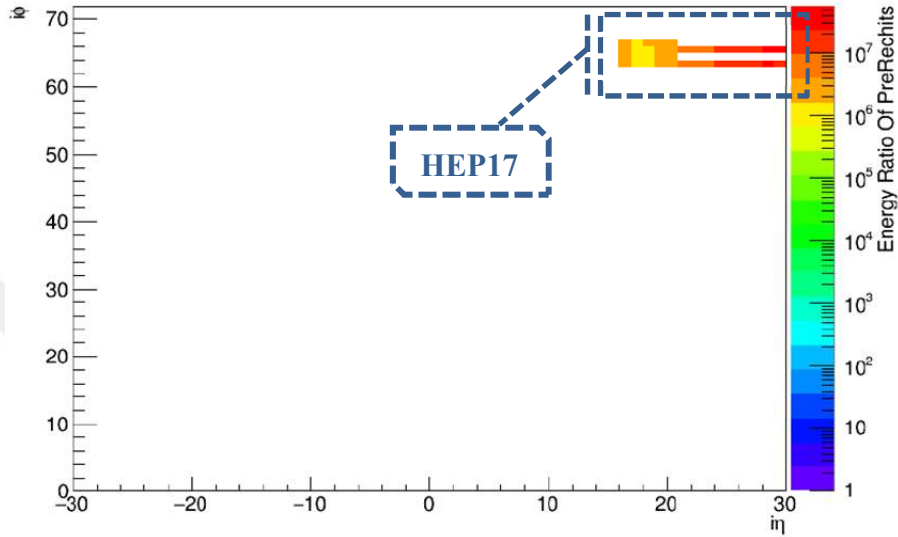
HKAL, Jet ve Kayıp Dik Enerji (MET) ölçümlerinde çok önemli bir rol oynar. HE Kalorimetresi'nin segmentasyonu, $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0.087 \times 0.087$ (0.17×0.17) boyutundaki karolardan oluşur. Bu uzunlamasına eksenli karolar 19 tabakada düzenlenmiştir.

2016 yılının sonundaki teknik ara sırasında, HE Kalorimetresi'nin HE Pozitif 17 (HEP17) olarak adlandırılan bölgesindeki HFD'lerin dört tanesi, HE faz-1 ön uç yükseltmesinin ilk aşamasının bir parçası olarak, SiFÇ ile değiştirilmiştir. Yeni SiFÇ'ler, 2,5 kat daha yüksek foto algılayıcı verimliliğine (PDE) sahiptir ve sintilatör radyasyon hasarının azaltılmasına olanak tanıyan 400 kat daha yüksek tepki ve uzunlamasına taneciklilik oranı gibi kanalları okumak için birçok avantaj sağlamaktadır.

4.1.1. HE Pozitif 17 Bölgesi (HEP17)

HEP17 bölgesi; $\Delta\phi = 20^\circ$ 'lik açığı ve pozitif z-ekseni doğrultusunda tüm HE psüdorapidite aralığını kapsamaktadır. Bu çalışmaya, 2017 yılında alınan veriler ile bu bölgedeki yeni SiFÇ'lerin kararlılık ve performans kontrolleri yapılarak başlanmıştır. Şekil 4.1'de, bu bölgede algılanan parçacıkların toplam

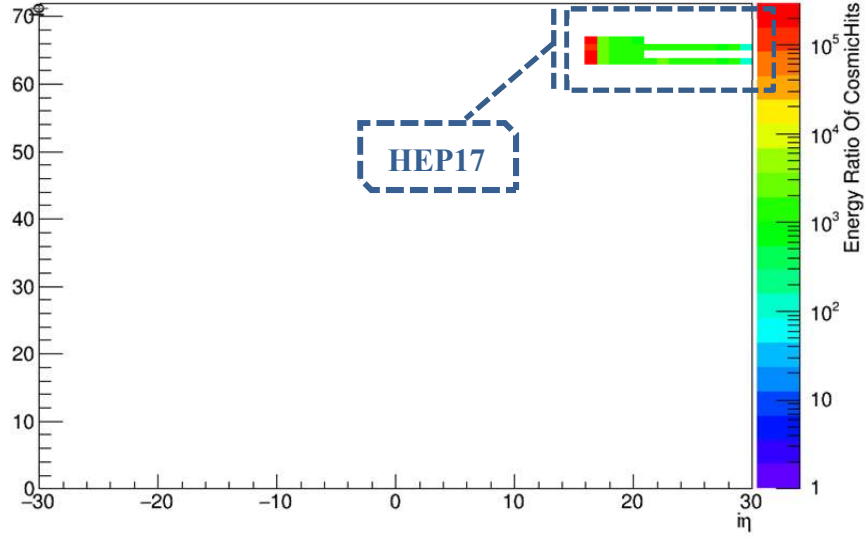
enerjilerinin kanallara göre dağılımları verilmiştir. Burada kanal olarak adlandırılan bölgeler η ve $i\phi$ değerlerinin kesişim noktalarını ifade etmektedir.



Şekil 4.1. HEP17 Bölgesinde algılanan parçacıkların toplam enerjilerinin kanallara göre dağılımları.

Yapılan analizler sonucunda, bu bölgedeki yeni SiFÇ'lerin kararlı ve beklenen performansta çalıştığı gözlemlenmiştir. Bu sonuca bağlı olarak, 2018 yılı p-p çarpışma verisi alınmaya başlanmadan önce HEP17 bölgesi, ek olarak 2018 yılı kozmik ışın verileri ile test edilmiştir.

Kozmik ışınlardaki birincil parçacıklar ve bunların ikincil parçacıkları (müon vb.), dünya atmosferi ile etkileşime girer. Böylece, bu parçacıklar yer yüzeyine ulaştığında CMS dedektörüyle etkileşerek varlanırlar. Atmosferden gelen kozmik ışınlar, dedektör ile rastgele yönlerde ve zamanlarda etkileşime girer. Bu nedenle kozmik ışın verileri, çarpışma verilerinden ayrı kontrol edilmelidirler. Şekil 4.2 HEP17 bölgesindeki kanallarda algılanan kozmik verilerin, bu bölgedeki etkisini göstermektedir.

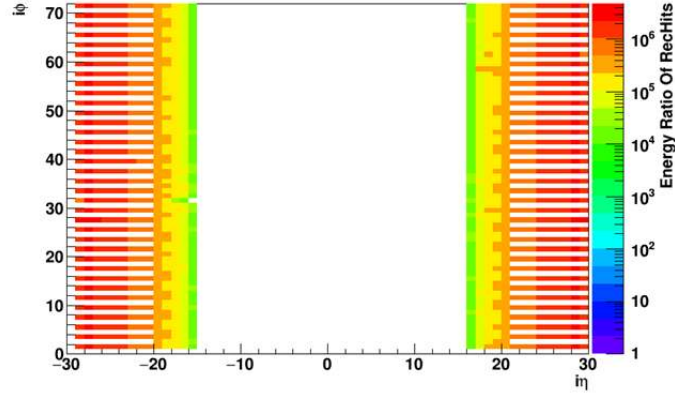


Şekil 4.2. HEP17 bölgesindeki SiFC'lara çarpan kozmik ışınların (parçacıkların) kanallara göre toplam enerji dağılımları.

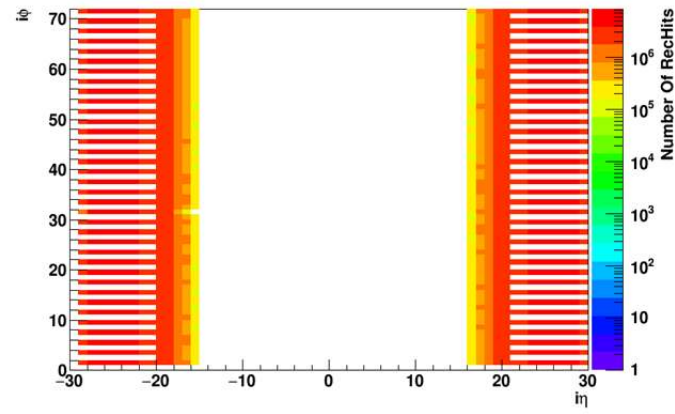
4.1.2. 2018 Yılı $\sqrt{s} = 13$ TeV Proton-Proton Çarpışma Verilerinin Analizi

2017 yılının sonunda, HE kalorimetresindeki tüm HFD'ler, yerlerini SiFC'lere bırakmıştır. Bu yenilenme çalışmalarından sonra HE kalorimetresindeki tüm kanalların performans ve kararlılık kontrollerinin yapılması fizik analizlerinin doğruluğu ve güvenilirliği açısından büyük önem taşımaktadır. 2018 yılında $\sqrt{s} = 13$ TeV kütle merkezi enerjisindeki p-p çarpışmalarının başlamasıyla analizler, alınan bu veriler ile devam ettirilmiştir.

HEP17 bölgesi için yapılan kontroller öncelikli olarak tüm HE bölgeleri için tekrarlanmıştır. Şekil 4.3. (a)'da HE kalorimetresinde, 2018 yılında, $\sqrt{s} = 13$ TeV kütle merkezi enerjisinde alınan p-p çarpışma verilerinde algılanan parçacıkların kanallara göre toplam enerji dağılımlarını görülmektedir.



(a)

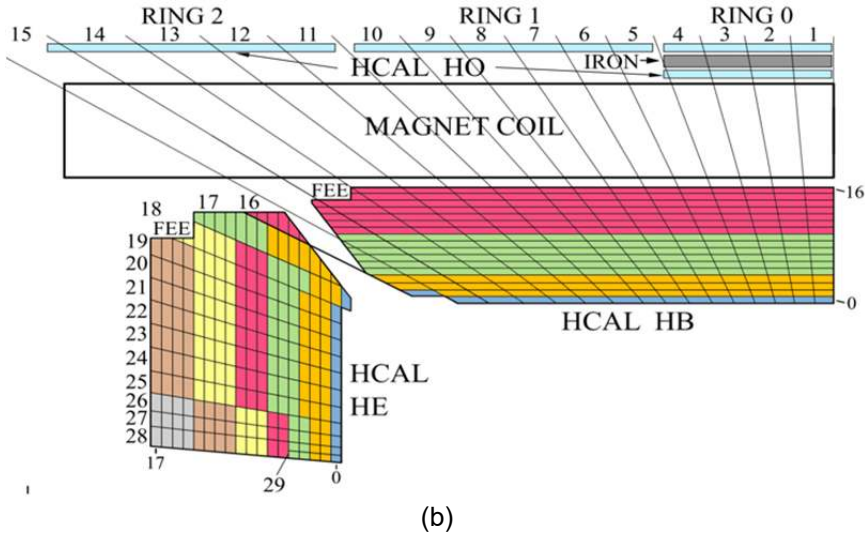
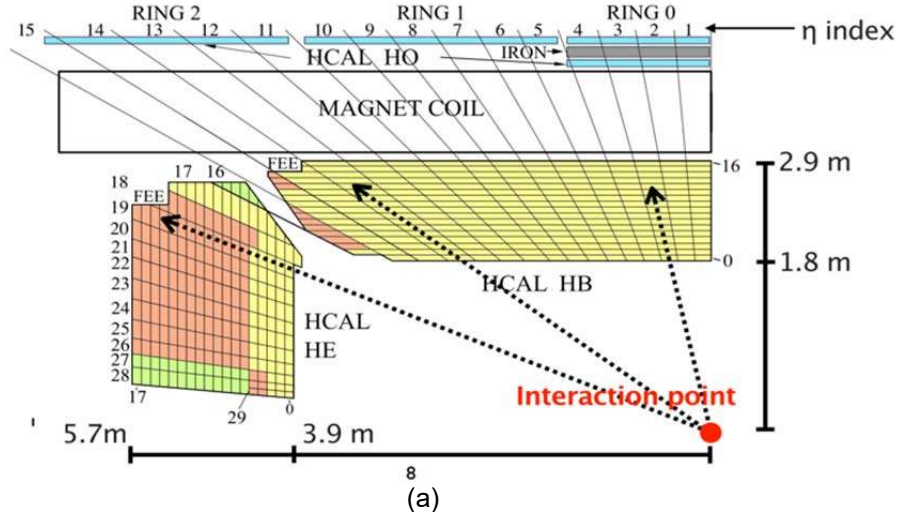


(b)

Şekil 4.3. HE KALORIMETRESİNİN kanallara göre (a) toplam enerji dağılımlarını (b) SiFÇ'ler ile etkileşen toplam parçacık sayısını göstermektedir.

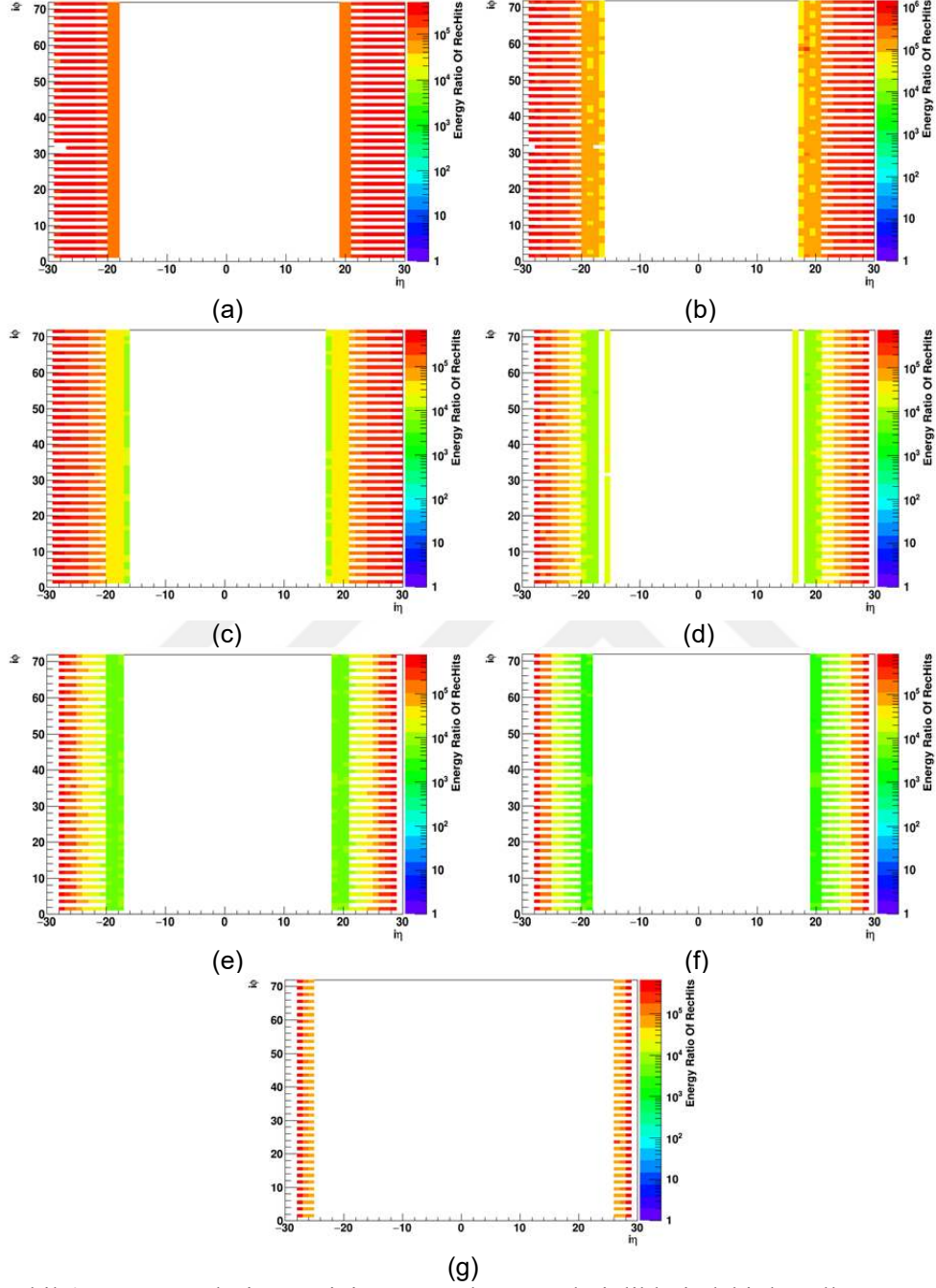
HE KALORIMETRESİNİN tüm kanalları, kendilerine en yakın kanallar ile oranlandığında, tüm SiFÇ'lerin kararlı çalıştığı gözlenmiştir. Bu durum üzerine, elde edilen sonuçların doğruluğu farklı durumlar ve yöntemler ile de test edilmiştir.

HE KALORIMETRESİ, 2016 yılında üç derinlik, 2664 kanaldan oluşmuştur. 2018 yılında yenilenme çalışmalarıyla $184 \times 36 = 6624$ kanal ve yedi derinliğe sahiptir. Şekil 4.4. (a)'da HE kalorimetresinin 2016 yılındaki segmentasyonu (b)'de ise 2018 yılındaki tamamen yenilenme çalışması sonrası segmentasyonu görülmektedir. Bu derinliklerin her birinde ayrı ayrı SiFÇ'ler bulunmakta olup her birinin ayrı ayrı kontrollerinin yapılması, analizin doğruluğu açısından önemlidir.

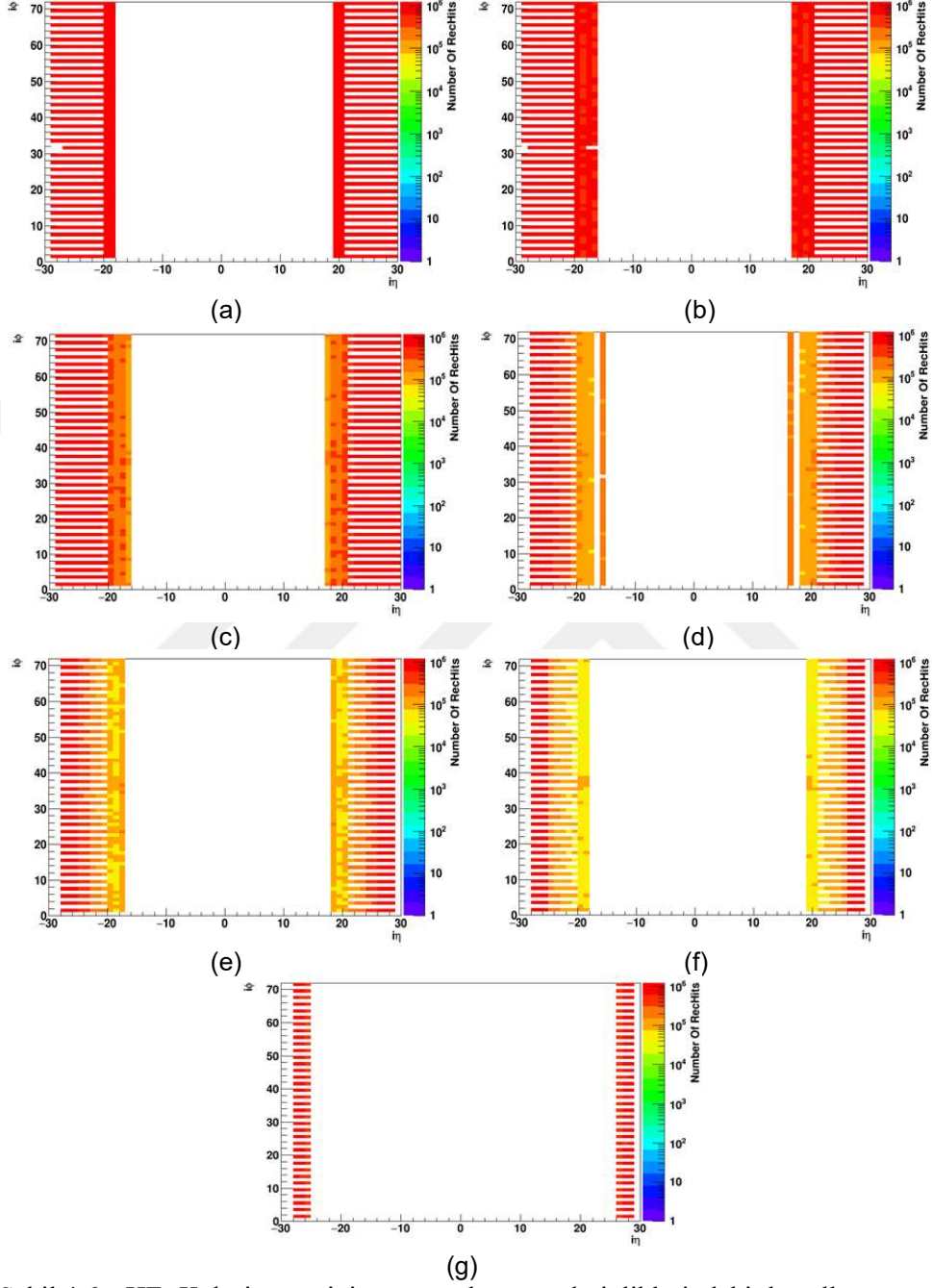


Şekil 4.4 (a) HE'nin 2016 yılı segmentasyonu (b) 2018 yılı segmentasyonu (<http://cds.cern.ch/record/2636475>).

Bu çalışmada, kalorimetrenin tüm derinliklerinden alınan veriler ayrı ayrı incelenmiştir. Şekil 4.5'te, HE kalorimetresindeki SiFÇ'ler tarafından algılanan parçacıkların toplam enerjilerinin, Şekil 4.6'da ise toplam parçacık sayılarının, tüm derinliklerdeki kanallara göre dağılımları bulunmaktadır.



Şekil 4.5. HE KALORIMETRESİNİN, sırasıyla tüm derinliklerindeki kanallara göre, toplam enerji oranları (a) 1. derinlik, (b) 2. derinlik, (c) 3. derinlik, (d) 4. derinlik, (e) 5. derinlik, (f) 6. derinlik, (g) 7. derinlik.



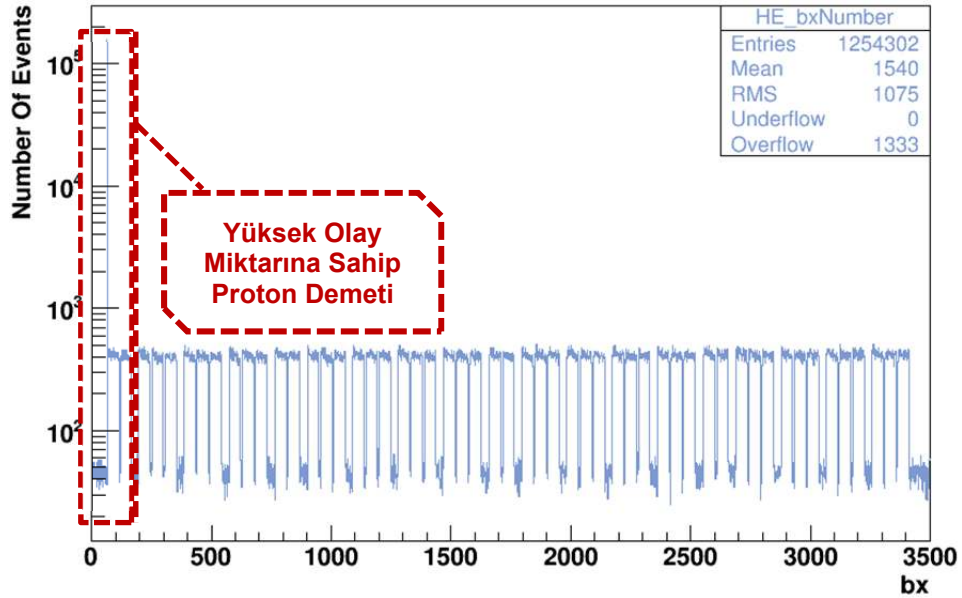
Şekil 4.6. HE Klorimetresinin, sırasıyla tüm derinliklerindeki kanallara göre, algılanan toplam parçacık sayıları (a) 1. derinlik, (b) 2. derinlik, (c) 3. derinlik, (d) 4. derinlik, (e) 5. derinlik, (f) 6. derinlik, (g) 7. derinlik.

Elde edilen sonuçlar ile, HE kalorimetresindeki tüm kanallardaki SiFÇ'lerin, kalorimetrenin her derinliğinde sorunsuz ve kararlı olduğu tespit edilmiştir.

Protonlar, BHÇ borularının içerisinde sürekli bir akış halinde değildir. Aksine, çok yakın bir şekilde bir araya getirilmiş demetler halinde hareket ederler. Birbiriyle çarpışan küçük protonların olasılığını en üst düzeye çıkarmak için BHÇ, hüzmeye olabildiğince çok sayıda proton toplamaya çalışır ve mümkün olduğu kadar dar bir şekilde sıkıştırır. Daha dar hüzmeye ve daha fazla proton, daha fazla ışıklılık anlamına gelmektedir.

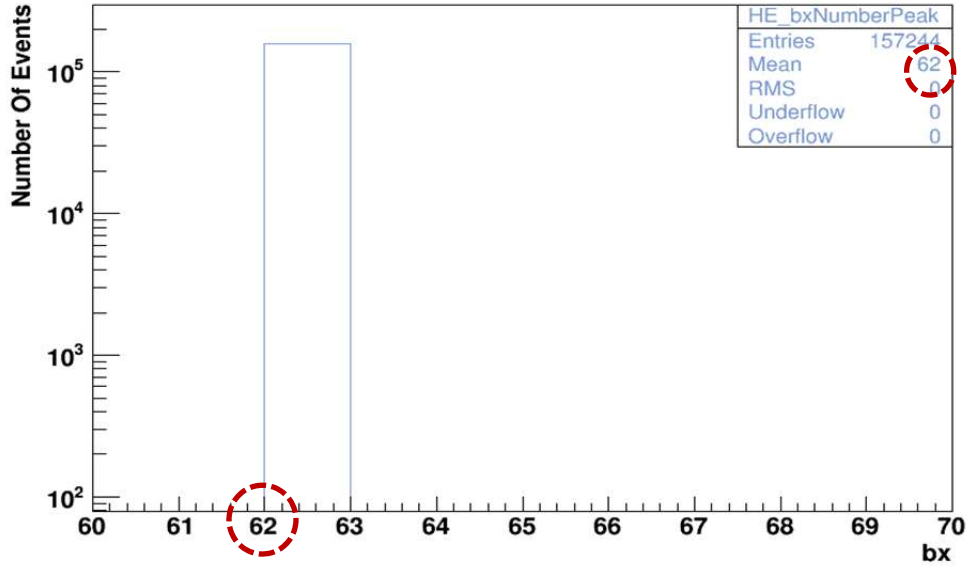
Bu demetlerin biri diğerini geçtiği zaman, birden fazla p-p çarpışması gerçekleşir ve bu “olay yığılması” (pile-up) olarak bilinir. BHÇ’de her 25ns’de bir proton demetleri çarpışmaktadır.

2018 yılında $\sqrt{s} = 13$ TeV kütle merkezi enerjisinde alınan p-p çarpışma verilerinde, bahsi geçen olay yığılmalarının olup olmadığı kontrol edildi. Şekil 4.7’de, BHÇ’de kesişen her demetin içerdiği olay miktarı görülmektedir.



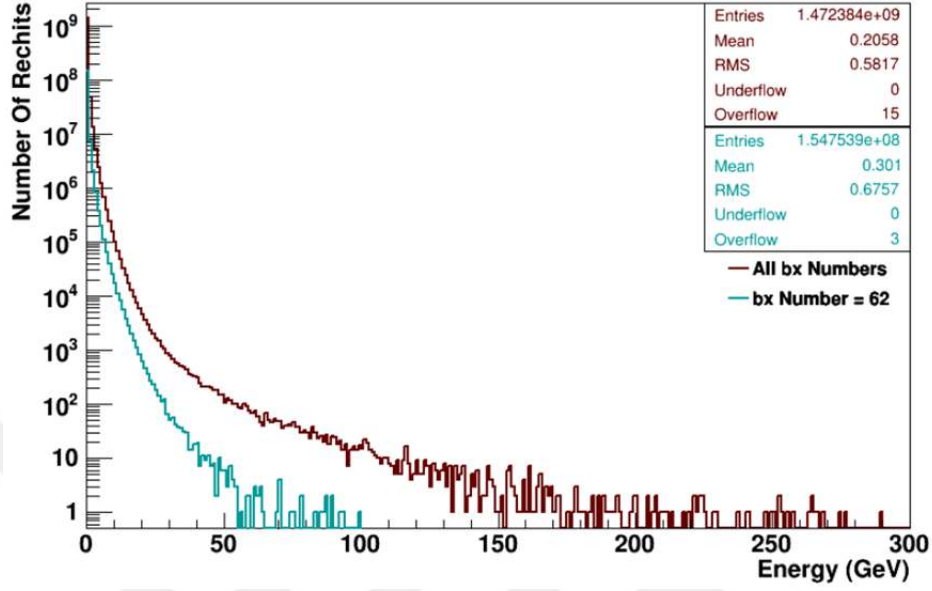
Şekil 4.7. BHÇ’de kesişen proton demetlerinin olay miktarları.

Elde edilen sonuçlar kontrol edildiğinde, grafiğin sol kısmında kalan proton demetinin diğer demetlerden çok daha yüksek miktarda olay içerdiği gözlenmiştir. Bu yüksek oranda olay içeren demeti tespit etmek için gerekli kontroller yapılmıştır. Şekil 4.8’de proton demetinin, demet kesişim numarası verilmektedir.

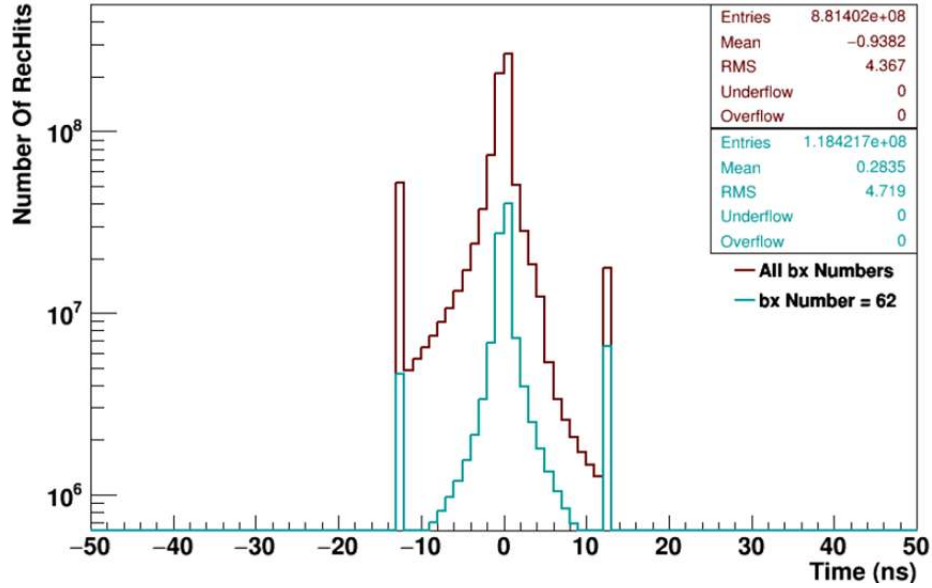


Şekil 4.8. Yüksek miktarda olay içeren proton demetinin, demet kesişim numarası.

62 numaralı demet kesişimindeki durumun, bir olay yığılması ya da dedektör sorunu olup olmadığını tespit etmek için gerekli kontroller yapılmıştır. Şekil 4.9’da 62 numaralı demet kesişiminde elde edilen verilerin enerjilerinin, dedektörde alınan toplam verilerin enerjilerine oranı görülmektedir. Ayrıca, Şekil 4.10’da 62 numaralı demet kesişiminde algılanan parçacıkların algılanma sürelerinin, dedektörde alınan toplam verilerin algılanma sürelerine oranı görülmektedir. Buradaki amaç; dedektörde herhangi bir olay yığılması oluşup oluşmadığını kontrol etmektir. Herhangi bir olay yığılması durumunun oluşması halinde, 62 numaralı demet kesişiminde bulunan verilerin, büyük olasılıkla, algılanma sürelerinin 25 ns’den daha fazla genişlikte gözlenmesi beklenirdi.



Şekil 4.9. 62 Numaralı demet kesişiminde algılanan parçacıkların toplam enerjilerinin, dedektörde algılanan tüm parçacıkların toplam enerjilerine oranı.



Şekil 4.10. 62 Numaralı demet kesişimindeki parçacıkların algılanma sürelerinin, dedektörde algılanan tüm parçacıkların toplam algılanma sürelerine oranı.

Bunlara ek olarak, 62 numaralı demet kesişiminde olay yığılması olması halinde, enerji dağılım grafiklerinde bir tepe veya çukur nokta oluşma olasılığı yüksektir. Fakat yapılan kontroller sonrasında bu kısımdaki enerji dağılımlarının düzgün olduğu gözlemlenmiştir.

CMS çalışırken, dedektörün içinde her saniyede yaklaşık 600 milyon p-p etkileşimi gerçekleşmektedir. Tüm bu olaylardan elde edilen verilerin okunabileceği bir yol yoktur ve eğer olsa bile, çoğu zaman yeni olguları ortaya çıkarma olasılığı daha az olacaktır. Bu nedenle, örneğin; Higgs parçacığını üretecek olan parçacıklar gibi, potansiyel olarak ilginç olayları seçebilecek ve sonraki analiz için bilgisayar diskinde saklanabilecek miktara yani saniyede sadece birkaç yüz olaya indirgeyebilecek çok hızlı bir tetikleyiciye ihtiyaç duyulmaktadır.

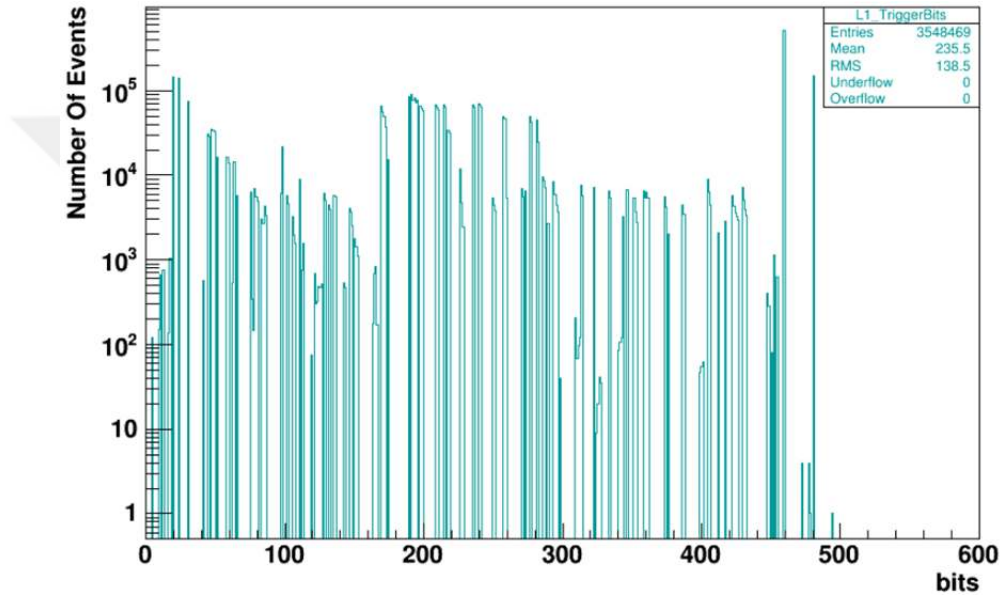
Seviye-1 tetikleyici (L1), ilginç fiziğin basit belirtilerini (Örneğin; büyük miktarda enerji veya sıra dışı kombinasyonlar içeren parçacıkları) arayan son derece hızlı ve tamamen otomatik bir süreçtir. Bu, bir okuyucunun acaba gözüne bir şey takılacak mı diye bir gazetenin manşetlerini taramasına benzetilebilir. Bu şekilde, mevcut milyarlarca olaydan, yaklaşık olarak en iyi 100.000 olay veya durum seçilmektedir. Bir sonraki test için, Yüksek Seviye Tetikleyici (HLT), tüm gazeteyi oluşturmak için farklı sayfaları harmanlayıp 1.000'i aşkın standart bilgisayardan oluşan bir çiftliğe göndermek üzere tüm olayları yeniden oluşturmak için dedektörün farklı bölümlerinden bilgileri senkronize etmektedir.

Buradaki bilgisayarlar, daha detaylı bilgi içeren verileri, saniyenin onda birinden daha az bir süre içinde gözden geçiren çok hızlı okuyucular gibidir. Bu bilgisayarlarda belirli imzaları aramak için çok karmaşık fizik testleri yapılmaktadır. Örneğin; fotonları tespit etmek için yüksek enerjili ama yüksüz durumları aramak gibi. Genel olarak saniyede yaklaşık 100 olay seçilir ve kalan 99.900 tanesi atılır.

Parçacık fiziğinde, atom-altı parçacıklar hakkında yeni şeyler öğretebilecek çarpışma olayları ile uğraşilmektedir. Tetikleme sistemine rağmen CMS, her ne kadar tüm bu veriler saklayamasa da her saniye 10,000 ansiklopediye eşdeğer bir

miktarında, milyonlarca gigabaytlık veriyi kaydetmekte ve analiz etmektedir (<http://cms.web.cern.ch/news/triggering-and-data-acquisition>).

Şekil 4.11’de, CMS deneyinde, belirli bir süre içerisinde alınan verilerin, veriler alınırken kullanılan 1. Seviye tetikleyicilerin, algıladığı olay sayıları verilmektedir.

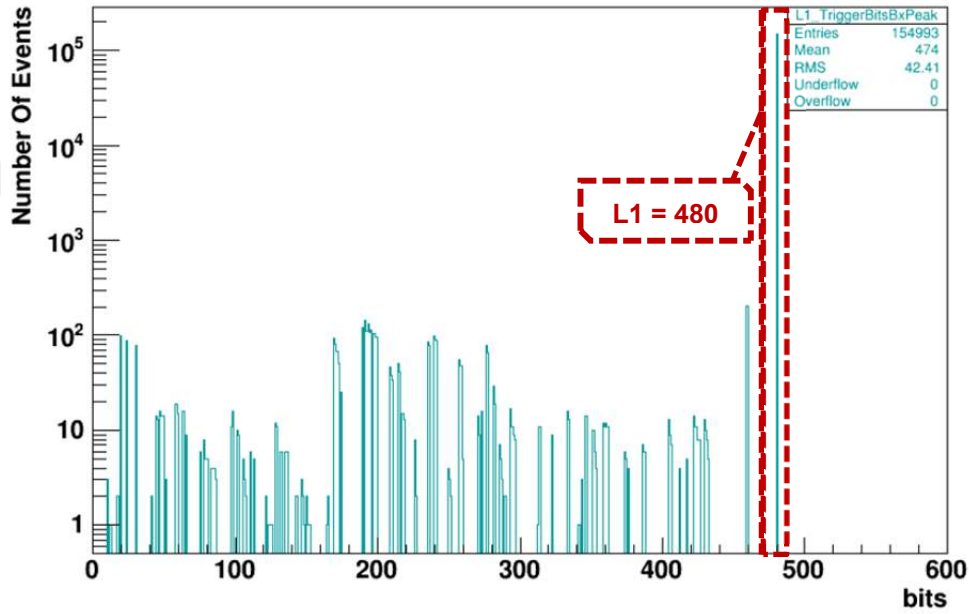


Şekil 4.11. CMS deneyinde, belirli bir süre içerisinde alınan verilerin, tetikleyici numaralarına göre dağılımları.

62 numaralı demet kesişiminde oluşan yüksek olay miktarı durumunu anlamak için bu demet kaydedilirken kullanılan 1. Seviye tetikleyiciler kontrol edilmiştir. Çizelge 4.1’de, 62 numaralı proton demet kesişiminde en fazla kullanılan 1. Seviye tetikleyicinin algıladığı toplam sinyal miktarı bulunmaktadır. Ayrıca, Şekil 4.12’de, bu değerlerin grafiksel görünümü verilmiştir.

Çizelge 4.1. 62 Numaralı proton demet kesişiminde en fazla kullanılan 1. Seviye tetikleyiciler.

480	L1_FirstCollisionInOrbit	151474	193	L1_SingleIsoEG32er2p5	132
459	L1_ZeroBias	202	189	L1_SingleIsoEG28er2p1	122
191	L1_SingleIsoEG30er2p5	143	195	L1_SingleIsoEG28er2p1	115



Şekil 4.12. CMS deneyinde, 62 numaralı demet kesişiminde alınan verilerin, tetikleyici numaralarına göre dağılımları.

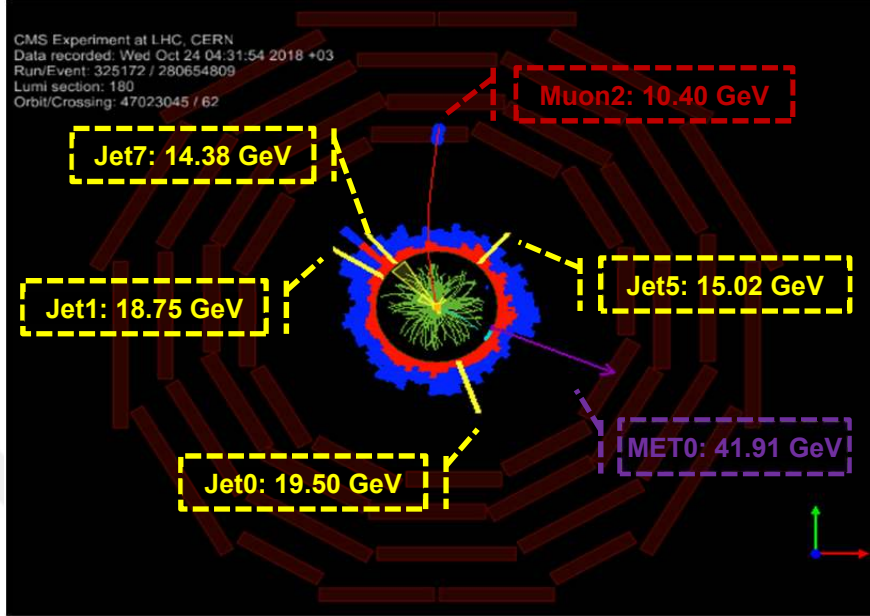
Elde edilen sonuçlara göre; 62 numaralı demet kesişiminin, belirli bir sürede alınan verilerdeki, ilk p-p demet kesişimi olduğunu ve bu duruma bağlı olarak yüksek yoğunlukta proton ve olay içermesinin normal olduğu sonucuna varılmıştır. Bu demet kesişimindeki olay miktarı, Yüksek Işıklılık BHC'ye (HL-LHC) hazırlık için bilinçli olarak yüksek tutulduğu sonucuna varılmıştır. Sadece ilk çarpışmada bu yoğunluğun olmasının sebebi, bu çarpışma öncesi, hüzme demetlerinde yeterli miktarda proton biriktirmek ve hızlandırmak için gerekli sürenin bulunmasıdır.

Parçacık fiziğinde duş, bir parçacığın, yoğun bir madde ile ya da başka bir parçacık ile etkileşime girmesi sonucu üretilen ve birbiri ardına gelen ikincil parçacıkların toplamıdır. Gelen parçacıklar, daha az enerji ile birden fazla yeni parçacık üreterek etkileşir, daha sonra her biri binlerce, milyonlarca hatta milyarlarca düşük enerjili parçacık üretene kadar devam eden bir süreçle aynı şekilde etkileşir. Bunlar daha sonra bir maddede durdurulur ve/veya soğurulur.

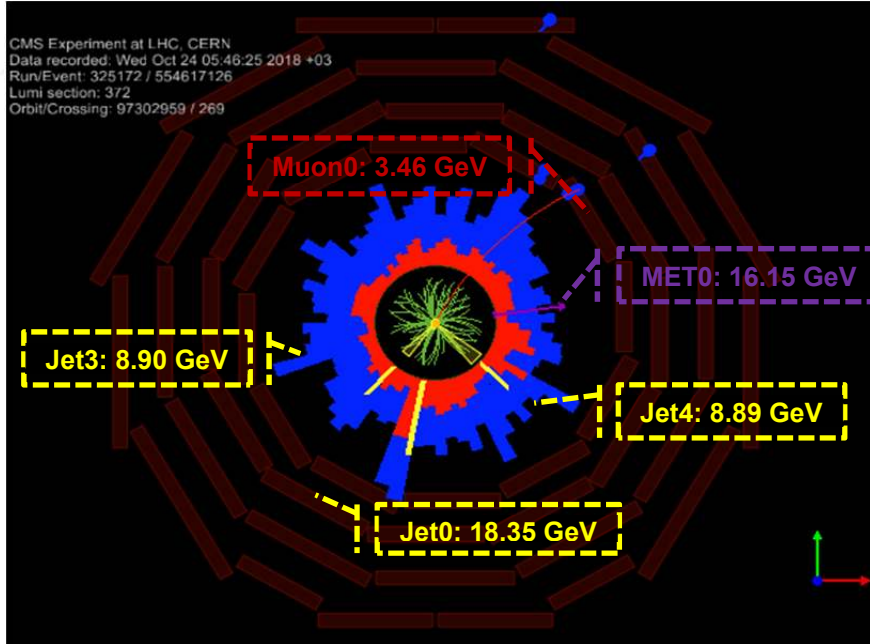
Bu tarz olayları, CMS deneyinde elde edilen veriler ile yeniden yapılandırmak için Fireworks veya cmsShow adıyla bilinen bir olay görüntüleme sistemi kullanılmaktadır. Fireworks'ün çekirdeği, Olay Veri Modeli'nin (EDM) ve yazılım çerçevesinin (FWLite) hafif bir sürümünün üzerine kurulmuştur.

Olay görüntüleme işleminde, EDM koleksiyonlarından görsel sunumlarına dönüştürme yapmak için sisteme basit eklentiler kaydedilir. Kılavuz ilke olarak, Fireworks yalnızca EDM olay verisinde bulunanları gösterir, bunlara ek olarak yeniden yapılandırma veya sonuç iyileştirme yapılmaz (<https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CMSPublic/WorkBookCMSSWFramework>).

Şekil 4.13'de 62 numaralı demet kesişiminde oluşan bir olayın gösterimi verilmiştir. Ayrıca Şekil 4.14'de 62 numaralı demet kesişimi dışında oluşan bir olay gösterilmiştir. Bu olayları yeniden gösterme amacı, iki olayı karşılaştırıp olaylar arasındaki sıra dışı farklılıkları tespit etmektir. Yapılan bu çalışmada sıra dışı bir farklılık görülmemiştir.



Şekil 4.13. CMS deneyinde, 62 numaralı demet kesişiminde oluşan bir olayın gösterimi.



Şekil 4.14. CMS deneyinde, 62 numaralı demet kesişimi harici oluşan bir olayın gösterimi.

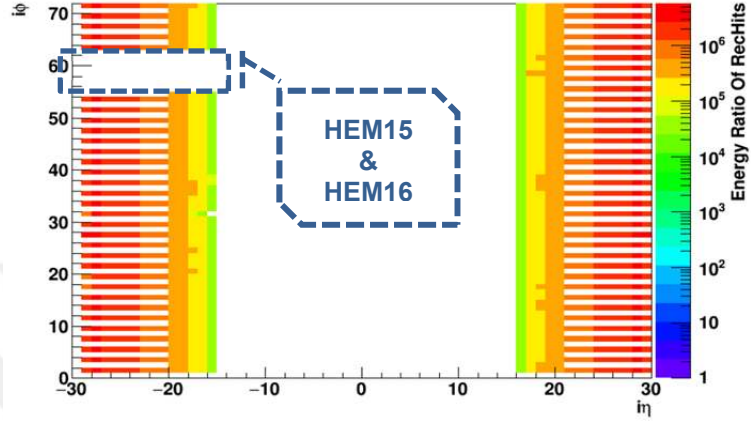
2018 yılı temmuz ayı başlarında, HE kalorimetresinde meydana gelen bir problem nedeniyle, HE Negatif 15 (HEM15) ve 16 (HEM16) bölgelerinde bir arıza oluşmuştur. Yangın algılama sistemlerindeki yanlış alarmlar nedeniyle, problemler dizisi ilk olarak elektrik kesintileriyle başlamıştır. Güç kesintileri, alt sistemlerdeki birkaç güç kaynağına ve modüle zarar vermiştir. Elektrik sistemleri onarılıp güç geri sağlandıktan sonra, HEM15 ve HEM16 bölgelerindeki güç kaynaklarının onarılamayacak düzeyde olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle bu bölgedeki güç kaynakları, yenileri ile değiştirilmiştir. Fakat maalesef yenilenen güç kaynaklarıyla, okuma kutuları ile olan bağlantı kurulamamıştır.

5 haftalık araştırma ve incelemenin ardından, HEM15 ve HEM16 bölgelerindeki sorunun neden kaynaklandığı tespit edilmiştir. Yangın algılama sistemleri hakkındaki varsayımların aksine, 130 numaralı CAEN güç kaynağının, 10 Volt güç sağlaması istenildiğinde, ön-uç elektroniklerine 20 Volt güç ürettiği ve 15 Volt civarında ise 10 milisaniye kadar kaldığı tespit edilmiştir. Bu güç kaynağının kontrol panosu, EP-ROM'dan alması gereken kalibrasyon parametreleriyle ilgili bir problem yaşamıştır. Bu olduğunda, güç kaynağı programlanandan daha yüksek voltajlara çıkmaya çalışmıştır. Aşırı voltaj koruması 11,1 Voltta devreye girip gücü kapatmaktadır ancak bu sistem devreye girmeden önce güç kaynağı 20 V'a kadar çıkmaktadır.

CAEN güç kaynağı kontrol panosu, diğer CMS alt sistemleri tarafından da kullanılan birçok güç kaynağının içinde kullanıldığı için bu konuyla ilgili diğer tüm CMS projeleri bilgilendirilmiştir. Bu durumların önüne geçebilmek için güç kaynağı arızalarına karşı ek bir korumanın eklenmesi planlanmaktadır.

Oluşan bu arıza sonrası HEM15 ve HEM16 bölgelerindeki veri alımları durmuştur. Arıza sonrası p-p çarpışmalarında, bu bölgelerde kaybedilen verilerin oranı, kaybedilen verilerin toplam veri dağılımına etkisi ve fizik analizleri açısından etkileri kontrol edilmiştir. Yapılan kontroller sonucunda elde edilen veriler ile bu bölgede kaybedilen veri miktarının çok küçük oranda olduğu ve bu miktarın fizik analizleri açısından çok büyük önem teşkil etmediği sonucuna

varılmıştır. Şekil 4.15'te, HEM15 ve HEM16 bölgelerdeki kanalların durumu gösterilmektedir.



Şekil 4.15. Oluşan arıza sonrası HEM15 ve HEM16 bölgelerinin kanallara göre toplam enerji dağılımları.



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

2017 yılının sonunda, HE kalorimetresindeki tüm HFD'ler, $\sim 4T$ 'lık manyetik alandan etkilenmesi, gürültüye sebep olması ve kısa ömürleri sebebi ile yerlerini SiFÇ'lere bırakmıştır. Bunlara ek olarak, SiFÇ'lerin kazancı, HFD'lerden 2 kat daha yüksektir. Bu yenilenme çalışmalarının sonrasında, HE kalorimetresindeki tüm SiFÇ'lerin performans ve kararlılık kontrollerinin yapılması fizik analizlerinin doğruluğu ve güvenilirliği açısından büyük önem taşımaktadır.

Yenilenme çalışması öncesi denemeler, 2016 yılının sonu ile 2017 yılı başlarında HE Pozitif 17 bölgesinde başlamıştır. SiFÇ'lerin, bu bölgelerdeki başarılı çalışmalarının ardından, 2017 yılsonu itibari ile yenilenme başlatılmıştır. Bu çalışmada, 2018 yılında, SiFÇ'ler ile alınan $\sqrt{s} = 13$ TeV kütle merkezi enerjisindeki veriler analiz edilmiştir ve herhangi bir sorun görülmemiştir.

Elde edilen sonuçlar, öncelikle 62 numaralı demet kesişimini (BX) kontrol etmeyi gerektirmiştir. Yapılan kontroller sonrasında, bu demetin BHC'de belli bir zaman aralığında hızlandırılan demetler içerisindeki, ilk demet olmasından kaynaklandığı anlaşılmıştır.

2018 yılı, temmuz ayının başlarında, HE Kalorimetresinde meydana gelen bir arıza ile HEM15 ve HEM16 ile adlandırılan bölgeler kullanılamaz hale gelmiştir. Temmuz ve Kasım ayları arasında kalan süreçte, bu bölgelere saçılan parçacıkların verileri kaydedilememiştir. Yaşanan bu veri kaybının, toplam veri dağılımına etkisi ve fizik analizleri açısından etkileri kontrol edilmiştir. Yapılan kontroller sonucunda, bu bölgede elde edilen veri miktarının çok küçük oranda olduğu ve bu miktarın fizik analizleri açısından çok büyük önem taşımadığı sonucuna varılmıştır.

HL-LHC ile birlikte, özellikle ileri kalorimetreler iki büyük zorlukla karşı karşıya kalmıştır: radyasyon toleransı ve benzeri görülmemiş olay yığını. Bu

zorluklarla başa çıkmak için CMS deneyi, elektromanyetik ve hadronik parçalar için Yüksek Tanecikli Kalorimetre (HGCAL) oluşturmaya karar vermiştir.



KAYNAKLAR

- Bychkova, et al., 2017 ‘Preparation for the upgrade of CMS Hadron Endcap Calorimeter front-end’
- Camianda, L., 2010 ‘Study of the Inclusive Beauty Production at CMS and Construction and Commissioning of the CMS Pixel Barrel Detector’
- CERN-EP-LCD, 2017. ‘Characterization of Silicon Photomultipliers’
- Coadou, Y., 2003. ‘Search for the Charged Higgs at Hadron Colliders Based on the Tau Lepton Signature’, Acta University, Uppsala
- CMS Technical Design Report, 2006. “Detector Performance and Software, Volume-I”, CERN/LHCC 2006-001, <https://cdsweb.cern.ch/record/922757/files/lhcc-2006-001.pdf>
- CMS HCAL Collaboration, 2008. “Design, Performance, and Calibration of CMS Hadron Endcap Calorimeters”, CMS NOTE-2008/010, http://inspirehep.net/record/785992/files/NOTE2008_010.pdf
- CMS HCAL Collaborations, 2008. “Design, Performance, and Calibration of the CMS Hadron-Outer Calorimeter, CMS NOTE-2008/020, <http://cds.cern.ch/record/922757/files/lhcc-2006-001.pdf>
- CMS Collaboration, 2008. “The CERN Large Hadron Collider: Accelerator and Experiments”, JINST 3 S08004, https://cds.cern.ch/record/1129810/files/jinst8_08_s08004.pdf
- CMS Technical Design Report, 2019. ‘The Phase-2 Upgrade of the CMS endcap calorimeter’, <https://cds.cern.ch/record/2293646/files/CMS-TDR-019.pdf>
- CMS CR, 2018. ‘First results from the CMS SiPM-based hadronic endcap calorimeter’
- Garutti, E., 2018. ‘Silicon Photomultipliers for High Energy Physics Detectors’, <https://arxiv.org/pdf/1108.3166.pdf>
- Horvat, S., 2005. ‘Study of the Higgs Discovery Potential in the Process’, Zagreb University, Zagreb

<http://www.bilimgenc.tubitak.gov.tr/makale/guclu-ve-zayif-nukleer-kuvvet-nedir>
<http://home.web.cern.ch/about/experiments>
<https://home.cern/science/experiments/alice>
<https://home.cern/about/experiments/atlas>
<https://home.cern/about/experiments/lhcb>
<https://home.cern/about/experiments/cms>
<http://cms.web.cern.ch/news/hadron-calorimeter>
www.slideserve.com/zeki/cms-calorimeter
<http://home.fnal.gov/~souvik/CMSPixels/index.html>
<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/9/02/C02008>
<http://cds.cern.ch/record/41867>
<https://cds.cern.ch/record/1431485>
<https://web.itu.edu.tr/kcankocak/itu-fizik-upgrade.html>
<https://cds.cern.ch/record/1431489>
http://cmsinfo.cern.ch/outreach/CMStimes/2006/11_13/index.html
<http://cms.web.cern.ch/news/superconducting-magnet>
<https://cds.cern.ch/record/1477844/plots>
<http://cms.web.cern.ch/news/muon-detectors>
<https://home.cern/science/physics/standard-model>
http://rdms-cms.jinr.ru/docs/rdms_1/hadron/HEenglish.html
<https://lhcb-public.web.cern.ch/lhcb-public/en/detector/Detector-en.html>
<http://www.taek.gov.tr/tr/sesame/1037-avrupa-nukleer-arastirma-merkezi-cern.html>
<https://hub.hamamatsu.com/jp/en/technical-note/how-sipm-works/index.html>
https://www.hamamatsu.com/sp/hc/osh/sipm_webinar_1.10.pdf
<https://sites.uci.edu/energyobserver/2012/11/26/introduction-to-the-atlas-detector-at-the-lhc/>
<https://home.cern/about/updates/2018/09/lhcb-experiment-discovers-two-perhaps-three-new-particles>

[https://www.researchgate.net/figure/Schematic-view-of-the-CMS-
detector_fig1_271616599](https://www.researchgate.net/figure/Schematic-view-of-the-CMS-detector_fig1_271616599)

<https://cds.cern.ch/record/2282027/plots>

<https://physics.info/standard/>

<http://cds.cern.ch/record/2636475>

<https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CMSPublic/WorkBookCMSSWFramework>

<http://cms.web.cern.ch/news/triggering-and-data-acquisition>





ÖZGEÇMİŞ

29.08.1988 yılında Kars'ta doğdu. Kafkas Üniversitesi Gıda Teknolojileri Bölümünü bitirdikten sonra, 2011 yılında Çukurova Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü'nde Lisans öğrenimine devam etti. 2014 yılında Fizik bölümünden mezun oldu. 2017 yılında Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde Fizik Anabilim Dalında tezli yüksek lisans programına başladı.

