ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Serhan ANAGÜL

CMS DEDEKTÖRÜNÜN 2. AŞAMA YENİLEME PROJESİNDEKİ ÇOK TANECİKLİ KALORİMETREDE KULLANILMASI PLANLANAN SİLİKON SENSÖRLERİN TEST VERİLERİNİN ANALİZİ

FİZİK ANABİLİM DALI

ADANA-2020

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

CMS DEDEKTÖRÜNÜN 2. AŞAMA YENİLEME PROJESİNDEKİ ÇOK TANECİKLİ KALORİMETREDE KULLANILMASI PLANLANAN SİLİKON SENSÖRLERİN TEST VERİLERİNİN ANALİZİ

Serhan ANAGÜL
YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

Bu tez 12/02/2020 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oybirliği / ~~oyçokluğu~~ ile kabul edilmiştir.

.....	.....	.....
Prof. Dr. Ayşe POLATÖZ DANIŞMAN	Prof. Dr. İsa DUMANOĞLU ÜYE	Prof. Dr. Sezgin AYDIN 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-2018-10932

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

ÖZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

CMS DEDEKTÖRÜNÜN 2. AŞAMA YENİLEME PROJESİNDEKİ ÇOK TANECİKLİ KALORİMETREDE KULLANILMASI PLANLANAN SİLİKON SENSÖRLERİN TEST VERİLERİNİN ANALİZİ

Serhan ANAGÜL

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

Danışman : Prof. Dr. Ayse POLATÖZ
Yıl: 2020, Sayfa: 71
Jüri : Prof. Dr. Ayse POLATÖZ
: Prof. Dr. İsa DUMANOĞLU
: Prof. Dr. Sezgin AYDIN

Yüksek Işıklılıklı-Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (YI-BHÇ) programının bir parçası olarak, CMS'de halihazırda kullanılan uç kapak (ENDCAP) kalorimetresini değiştirmek için çok tanecikli kalorimetre (HGCAL) geliştirilmektedir. HGCAL, hem elektromanyetik hem de hadronik bölmeleri için benzeri görülmemiş enine ve boyuna okuma ve tetikleyici özelliklerine sahip bir örnekleme kalorimetresidir. Skiroc2-CMS kartı okuması ile 1,1 cm^2'lik ped alanlarına sahip 6 ve 8 inç altıgen silikon sensörlerine dayanan prototip modülleri yapılmıştır. 2018 yılında CMS'de ki prototip modülleri için 20 ila 300 GeV'lik arasında farklı enerjide hüzmeler kullanılarak farklı örnekleme konfigürasyonlarının testleri yapılmıştır. Bu çalışmada, HGCAL prototip silikon modüllerinin performans testlerinde alınan verilerde minimum iyonize parçacık (MİP) analizleri yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: HGCAL, CMS, MİP

ABSTRACT

MSc THESIS

ANALYSIS OF THE TEST DATAS OF THE SILICON SENSORS OF HİGH GRANULARITY CALORIMETER TO BE USED FOR IMPROVEMENT IN THE SECOND PHASE UPGRADE PROJECT OF CMS DEDECTOR

Serhan ANAGÜL

ÇUKUROVA UNIVERSITY
INSTITUE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
DEPARTMENT OF PHYSICS

Supervisor : Prof. Dr. Ayse POLATOZ
Year: 2020, Pages: 71
Jury : Prof. Dr. Ayse POLATOZ
: Prof. Dr. Isa DUMANOGLU
: Prof. Dr. Sezgin AYDIN

As part of its High Luminosity-Large Hadron Collider (HL-LHC) upgrade program, CMS is developing a High Granularity Calorimeter (HGCAL) to replace the existing ENDCAP calorimeters. The HGCAL is a sampling calorimeter, featuring unprecedented transverse and longitudinal readout and trigger for both electromagnetic and hadronic compartments. Prototype modules, based on 6 and 8 inch hexagonal silicon sensors with pad areas of 1,1 cm^2, have been constructed with Skiroc2-CMS card readout. In 2018, beam tests of different sampling configurations were conducted with the prototype modules at CMS, used to different energy from 20 to 300 GeV. In this thesis study minimum ionizing particle analysis are performed with data from performance tests of HGCAL prototype silicon modules.

Keywords: HGCAL, CMS, MIP

GENİŞLETİLMİŞ ÖZET

Evrenin, ne zaman ve hangi koşullar altında oluştuğu insanlık tarihinde merak edilen en önemli konulardan biri olmuştur. Atomun keşfinden sonra bu merak daha da artarak en küçüğü arama yoluna girmiştir. Bu da ancak atom altı parçacıkların incelenmesi ile mümkündür. Etrafımızdaki tüm maddeler, maddenin yapı taşı olan temel parçacıklardan oluşmuştur. Bu parçacıkların özellikleri ve birbiriyle etkileşme biçimleri Standart Model (SM) tarafından açıklanmaktadır. SM'ye göre temel parçacıklar kuarklar ve leptonlar olarak sınıflandırılır. Temel etkileşimler ise elektromanyetik, güçlü, zayıf ve kütle çekim olarak kategorilendirilmiştir. SM, birçok deneysel sonuç ile uyum içinde olmasına rağmen cevaplayamadığı sorular da vardır. Bu sorulara cevap verebilmek için yüksek enerji fiziğinde yapılan teorik ve deneysel çalışmalar devam etmektedir. Evrenin gizemini çözmek için dizayn edilen en büyük hızlandırıcı laboratuvarı İsviçre-Fransa sınırında kurulan Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi (CERN)'dir.

CERN'de Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (BHÇ) tüneli üzerinde 4 ana deney bulunmaktadır. Bunlar; CMS, ATLAS, ALICE VE LHC-b deneyleridir. Bu 4 ana dedektörün yanı sıra irili ufaklı çok sayıda deneysel çalışmalar da yapılmaktadır. Çukurova Üniversitesi Yüksek Enerji Fiziği grubu, çalışmalarına CMS (Compact Muon Selenoid) deneyinde devam etmektedir. CMS deneyi genel amaçlı bir deney olmakla birlikte başlıca amacı, maddeye kütle kazandıran Higgs parçacığını araştırmaktır. Bunun yanında Karanlık Madde, Karanlık Enerji, Süpersimetri, Ekzotik Parçacıklar ve birçok yeni alanda araştırmalar yapılmaktır.

Zamanla dedektörün bazı parçaları yenilenmekte veya iyileştirilmektedir. YI-BHÇ evresinde yüksek ışıklılık seviyelerine çıkılacak bu da yüksek parçacık yoğunluğu ve yüksek radyasyon ortamı meydana getirecektir. Bu YI-BHÇ evresine Faz-2 denilmektedir. BHÇ'nin Faz-2 yenilenmesi sonrasında ışıklılık miktarı şimdiki miktarın 30 katına çıkacaktır. Bu durum detektörlerdeki fiziki performansının düşüşüne neden olacaktır. Mevcut ENDCAP kalorimetreleri bu

yüksek radyasyon dozunu karşılayamayacağından dolayı bu amaçla Faz-2 yükseltmesinde Çok Tanecikli Kalorimetre (HGCAL) adlı yeni bir alt dedektör yapılması düşünülmektedir. Bu dedektör hem elektromanyetik, hem de hadronik bölmeleri içeren bir örnekleme kalorimetresidir. Bu katmanların bir kısmında aktif malzeme olarak silikon kullanılacak olup içerisindeki sensörler altıgen şeklinde yapılacaktır. Düşük radyasyon bölgelerinde Silikon Foto Çoğaltıcı (SiFÇ) okumasına sahip sintilatör karoları, yüksek radyasyon bölgelerinde ise silikon sensörler kullanılacaktır.

Bu tez çalışmasının amacı, CERN'nün 2024-25 yıllarında bitirilmesi planlanan HGCAL'in 2018 Ekim ayının test çalışmalarından alınan verileri incelemektir. Farklı enerjilerdeki müon ve pion parçacık demetlerinden alınan veriler sayesinde dedektörün performansı test edilmiştir. Bu performansın en iyi sonuç vermesi için çeşitli ayarlamalar yapılmıştır. Bunlardan birisi test düzeneğinde yer alan modüllerin dizilim ayarlamasıdır. Bir diğer önemli etken ise minimum iyonize parçacıkları (MİP) yakalamak için yapılan çalışmalarıdır. Bu tez de yer alan analizlerin büyük kısmı MİP çalışmalarından oluşmaktadır. MİP için buna yakın olan müon seçilerek test çalışmaları yapılmıştır. Daha sonrasında ise pion hüzmeleri kullanılarak bu dedektör için uygun olup olmadığı araştırılıp tüm sonuçlar Monte Carlo (MC) simülasyon verileri ile karşılaştırılarak performans uygunluğu test edilmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması süresince değerli zamanını ayırarak düşünce, deneyim, yönlendirici fikirleri ve anlayışlı tavrı ile bana yol gösteren danışman öğretmenim Prof. Dr. Ayşe POLATÖZ'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım değerli hocalarım Prof. Dr. Eda EŞKUT, Prof. Dr. Aysel KAYIŞ TOPAKSU ve jüri üyelerim olan Prof. Dr. İsa DUMANOĞLU ve Prof. Dr. Sezgin AYDIN'a teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans hayatım boyunca bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım, maddi ve manevi beni her konuda destekleyen abim Özgün KARA'ya çok teşekkür ederim.

Analiz çalışmalarımda ve tez yazımında bana her zaman yardımcı olan grup arkadaşlarım Ali Eren ŞİMŞEK ve Ümit SÖZBİLİR'e çok teşekkür ederim.

Ders dönemim ve sonrasında bulunduğumuz tüm süre boyunca bana her zaman inanan, maddi ve manevi destekçim olan sevgili arkadaşım Melike ÖZDOĞAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimim süresince her zaman yanımda olan ve bana inanan Yüksek Enerji Fiziği grubu arkadaşlarımdan Doruk AĞYEL ve Ebru USLAN'a çok teşekkür ederim.

Son olarak tezim süresince yaptığım analiz kodlarında ve her konuda yardımcı olan sevgili kuzenim Mehmet PEKGENÇ'e çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER **SAYFA**

ÖZ I
ABSTRACT II
GENİŞLETİLMİŞ ÖZET III
TEŞEKKÜR V
İÇİNDEKİLER VI
ÇİZELGELER DİZİNİ VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ X
SİMGELER VE KISALTMALAR XIV
1. GİRİŞ 1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR 3
2.1. Standart Model 3
2.2. CERN 6
2.3. Büyük Hadron Çarpıştırıcısı 8
2.4. Büyük Hadron Çarpıştırıcısı Deneyleri 10
2.4.1. ATLAS 10
2.4.2. ALICE 12
2.4.3. LHCb 13
2.4.4. CMS 14
2.4.4.1. İzleyici Sistem 16
2.4.4.2. Elektromanyetik Kalorimetre 18
2.4.4.3. Hadronik Kalorimetre 20
2.4.4.4. Süperiletken Mıknatıs 21
2.4.4.5. Müon Odaları 22
2.4.4.6. Tetikleme ve Veri Toplama Sistemi 24
2.4.4.6.(a). Seviye-1 Tetikleyici 25
2.4.4.6.(b). Yüksek Seviye Tetikleyici 25

3. MATERYAL VE METOT 27
3.1. HGCAL 27
3.1.1. YI-BHÇ için CMS HGCAL Geliştirilmesi 27
3.1.2. HGCAL Tasarımına Genel Bakış 28
3.1.3. Mekanik Tasarım 29
3.1.4. Silikon Sensörlerin Tasarımı 32
3.1.5. Sensör Hücreleri 34
3.1.6. Modül Yapısına Genel Bakış 37
3.1.7. Veri Aktarımı 39
3.2. 2016 Yılında Yapılan Testler 40
3.3. 2017 Yılında Yapılan Testler 43
4. ARAŞTIRMA VE BULGULAR 47
4.1. MİP Analizi 47
4.2. MİP Kalibrasyonu 49
4.2.1. Müonlarla Kalibrasyon 52
4.2.2. Pion Sonuçları ile Kıyaslama 57
4.2.3. Monte Carlo Verileri ile Kıyaslama 60
5. SONUÇ VE ÖNERİLER 65
KAYNAKLAR 67
ÖZGEÇMİŞ 71

ÇİZELGELER DİZİNİ **SAYFA**

Çizelge 2.1. Kuark çeşni özellikleri..... 5
Çizelge 3.1. EE, FH&BH'nin ana parametreleri 29
Çizelge 3.2. Farklı kalınlıktaki silikon sensörlerin yerleşimi ve özellikleri 34
Çizelge 3.3. Hücre tiplerinin sayıları ve okuma kanalları 35
Çizelge 4.1. 697-722 Run aralığı için 200 GeV'lik müon hüzmesinin olay sayıları. 50

ŞEKİLLER DİZİNİ **SAYFA**

Şekil 2.1. SM'deki temel parçacıklar 4
Şekil 2.2. CERN'de yer alan hızlandırıcılar. 7
Şekil 2.3. BHÇ Ana Dedektörlerinin Şematik Yapısı. 10
Şekil 2.4. ATLAS Dedektörünün şematik yapısı. 11
Şekil 2.5. ALICE Dedektörünün kesit görüntüsü. 13
Şekil 2.6. LHCb dedektörünün kesit görüntüsü. 14
Şekil 2.7. CMS Dedektörünün şematik görüntüsü. 15
Şekil 2.8. Parçacıkların CMS bileşenlerinin bir kesitin de izlediği yolların şematik görüntüsü. 16
Şekil 2.9. CMS izleyici sisteminin şematik bir kesiti. Her çizgi bir dedektör modülünü temsil eder. Çift çizgiler arka arkaya olan modülleri gösterir. 17
Şekil 2.10. EKAL'in kristal yapılarının düzenini gösteren bileşenlerin şematik yapısı. 18
Şekil 2.11. HKAL ve EKAL kalorimetrelerinin şematik yapısı. 20
Şekil 2.12. Süperiletken mıknatıs ve müon odalarının yerleşik düzeni. 22
Şekil 2.13. Üç ayrı müon dedektör odalarını gösteren müon sisteminin konfigürasyonu. 23
Şekil 3.1. FLUKA simülasyon programı kullanılarak YI-BHÇ'de CMS ENDCAP kısmında *r* ve *z* koordinatları boyunca maruz kaldığı doz seviyesinin gösterimi. 28
Şekil 3.2. HGCAL genel yapısının ve EE, FH, ve BH kısımlarının teknik çizimi. 29
Şekil 3.3. Boş yuvalarla alternatif tungsten soğurucu plakaları birleştiren EE karbon-fiber yapısı (sol). Bir kaset yapısının bir yuvaya yerleştirilmesi (sağ). 30
Şekil 3.4. HGCAL'in uzunlama yapısındaki kaset tipleri. 32

Şekil 3.5. Farklı sensörlerin aktif kalınlıklarına göre konumu. Daha ince sensör, beklenen nötron akısının daha yüksek olduğu kalorimetrenin daha iç kısmına yerleştirilmiştir. 33
Şekil 3.6. Bir modülde hücre tiplerinin gösterimi. 35
Şekil 3.7. Altıgen plaka ile BDK okuma bağlantılarının yakınlaştırılmış bir görüntüsü. 36
Şekil 3.8. HGCAL modülünün 2016/17 deki montajına genel bakış. 37
Şekil 3.9. Modülden Zedboard'a kadar giden veri akış sistemi. Sarı oklar, modülden gelen veri yolunu temsil eder. 38
Şekil 3.10. DWC okumasının şematik gösterimi (sol). Test çalışmalarında kullanılan DWC'lerden birinin görüntüsü (sağ). 41
Şekil 3.11. Konfigürasyon I. 42
Şekil 3.12. Konfigürasyon II. 42
Şekil 3.13. Temmuz 2017 testindeki 80GeV elektronlar(üst) ve 300GeV hadronlar(alt) için silikon-bazlı prototipin GEANT4 simülasyon sonucu. 44
Şekil 3.14. HGCAL test düzeneğinin CERN'deki gerçek görüntüsü. EE, FH ve BH kısımlarının görüntüsü. 45
Şekil 4.1. 200 GeV'de gönderilen müon hüzmesinin HGCAL'deki modüllerin tüm çip ve kanallarındaki MİP başına düşen yüksek kazanç grafiği. 48
Şekil 4.2. 200 GeV'lik müon hüzmesinin en çok etkileştiği kanalın ADC'sindeki olay sayısı. 48
Şekil 4.3. DWC bilgileri kullanıldığında en çok etkileşen 10 modülün etki faktörü. 54
Şekil 4.4. 200 GeV'lik müon testinde en çok etkileşen 10 modülün yüksek kazancı. 55
Şekil 4.5. 200 GeV'lik müon testinde en çok etkileşen 10 modülün normalize ve fit uygulanmış dağılımları. 56

Şekil 4.6. Pionların farklı enerjilerindeki modül:77 - çip:1 - kanal:38 deki isabet sayıları. 58
Şekil 4.7. Farklı enerjilerde alınan sonuçların, en çok etkileşen kanaldaki MİP spektrumlarının, üst üste bindirilmiş hali. 59
Şekil 4.8. MİP spektrumlarındaki rölativistik artışı gözlemlemek için oluşturulan HG/MİP değişim grafiği. 60
Şekil 4.9. MC verilerine göre müonun farklı enerjileri için tüm sinyallerin fit ile uyumu. 61
Şekil 4.10. MC verilerine göre pionun farklı enerjileri için tüm sinyallerin fit ile uyumu. 62
Şekil 4.11. Farklı enerji dağılımlarındaki müon ve pion MC sonuçlarının üst üste bindirilmiş spektrumları. 63

SİMGELER VE KISALTMALAR

AD : Antiproton Yavaşlatıcı
ADC : Analog-Dijital Dönüştürücü
AHCAL : Örneksel Hadron Kalorimetresi
ALICE : Büyük İyon Çarpıştırıcısı Deneyi
ASIC : Uygulamaya Özel Tümleşik Devre
ATLAS : Simit Biçimli Büyük Hadron Çarpıştırıcısı Düzeneği
BDK : Baskılı Devre Kartı
BEP : Büyük Elektron-Pozitron Çarpıştırıcısı
BH : Arka Hadronik
BHÇ : Büyük Hadron Çarpıştırıcısı
CALICE : Doğrusal Çarpıştırıcı Deneyi İçin Kalorimetre
CE-E : Elektromanyetik Kalorimetre
CE-H : Hadronik Kalorimetre
CERN : Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi
CMS : Sıkı Müon Sarmalı
CSC : Katot Şerit Odaları
DDC : Çift-Kızak Plaka Taşıyıcı
DT : Sürükleme Tüpleri
DWC : Gecikmeli Tel Odası
EB : Elektromanyetik Fıçı
EE : Uç Kapak EKAL
EKAL : Elektromanyetik Kalorimetre
ENDCAP : Uç Kapak
FH : Ön Hadronik
FNAL : Fermi Ulusal Hızlandırıcı Laboratuvarı
GeV : Milyar Elektron Volt
HB : Hadronik Fıçı

HE	: Hadronik Uç-Kapak
HF	: İleri Hadronik
HGCAL	: Çok Tanecikli Kalorimetre
HGCROC	: HGCAL İçin Tasarlanmış BDK Okuması
HiRadMat	: Yüksek Radyasyon Maddeleri
HKAL	: Hadronik Kalorimetre
HLT	: Yüksek Seviye Tetikleyici
HO	: Hadronik Dış
ILC	: International Linear Collider
ILD	: International Linear Design
ISOLDE	: İzotop Ayırıcı
KRD	: Kuantum Renk Dinamiği
LEIR	: Düşük Enerjili Ion Halkası
LHCb	: Büyük Hadron Güzellik Çarpıştırıcısı
LINAC 2	: Doğrusal Hızlandırıcı
MC	: Monte Carlo
MeV	: Milyon Elektron Volt
MİP	: Minimum İyonize Parçacık
MoEDAL	: BHÇ'deki Tek Kutup ve Tuhaflıklar Deneyi
PbWO4	: Kurşun Tungsten
PS	: Proton Sinkrotron
PSB	: Proton Sinkrotron Yükseltici
REX/HIE	: Radyoaktif Deneyi
RPC	: Dirençli Plaka Odası
QFP	: Dörtlü Düzlem Paketi
S/N	: Sinyal/Gürültü
SC	: Synchrocyclotron
Skiroc	: Silikonlu Kalorimetre Okuma Çipi
L1	: Seviye-1 Tetikleyici

SiFÇ : Silikon Foto Çoğaltıcı

SM : Standart Model

SPS : Süper Proton Senkrotron

TDR : Teknik Tasarım Raporu

TeV : Trilyon Elektron Volt

TIB : İç İzleyici Fıçı

TOB : Dış İzleyici Fıçı

ToT : Eşik Aşım Zamanı

TOTEM : Toplam Elastik ve Kırınımlayıcı Tesir Kesit Ölçümü

TPG : Tetik İlkel Jeneratörler

YI-BHÇ : Yüksek Işıklılıklı Büyük Hadron Çarpıştırıcısı

e^- : Elektron

μ^- : Müon

τ^- : Tau

ν_e : Elektron Nötrinosu

ν_μ : Müon Nötrinosu

ν_τ : Tau Nötrinosu

φ : Phi (Fi diye okunur)

η : Sanal hızlılık

fb : Femtobarn

X_0 : Radyasyon Uzunluğu

R_M : Moliere Yarıçapı

λ : Etkileşim Uzunluğu

1 GİRİŞ

Evrenin, ne zaman, nasıl ve nelerden oluştuğu insanlığın var oluşundan itibaren merak edilen en önemli konulardan biri olmuştur. Atomun keşfinden sonra bu merak daha da artarak en küçüğü arama yoluna girmiştir. Bu da ancak atom altı parçacıkların incelenmesi ile mümkündür. Etrafımızdaki tüm maddeler, maddenin yapı taşı olan temel parçacıklardan oluşmuştur. Bu parçacıkların özellikleri ve birbiriyle etkileşme biçimleri SM tarafından açıklanmaktadır. SM'ye göre temel parçacıklar kuarklar ve leptonlar olarak sınıflandırılır. Temel etkileşimler ise elektromanyetik, güçlü, zayıf ve kütle çekim olarak kategorilendirilmiştir. SM birçok deneysel sonuç ile uyum içinde olmasına rağmen cevaplayamadığı sorular da vardır. Bu sorulara cevap verebilmek için yüksek enerji fiziğinde yapılan teorik ve deneysel çalışmalar devam etmektedir. Evrenin gizemini çözmek için dizayn edilen en büyük hızlandırıcı laboratuvarı İsviçre-Fransa sınırında kurulan Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi (CERN)'dir.

CERN'de BHÇ tüneli üzerinde 4 ana deney bulunmaktadır. Bunlar; CMS, ATLAS, ALICE VE LHC-b deneyleridir. Bu 4 ana dedektörün yanı sıra irili ufaklı çok sayıda deneysel çalışmalar da yapılmaktadır. Çukurova Üniversitesi Yüksek Enerji Fiziği grubu, çalışmalarına CMS deneyinde devam etmektedir. Bu grup, CMS dedektörünün donanımsal ve yazılımsal servis işlerinin yanısıra detektörün gelecek planları dahilinde yapılacak geliştirme çalışmalarında yer almaktadır. Ayrıca dedektörden alınan fizik verilerinin analiz çalışmalarını da yapmaktadır.

CMS deneyinin başlıca amacı, maddeye kütle kazandıran Higgs parçacığını araştırmaktır. Bunun yanında Karanlık Madde, Karanlık Enerji, Süpersimetri, Ekzotik Parçacıklar ve birçok yeni alanda araştırmalar yapılmaktır.

Bu tez çalışmasının amacı, CERN'ün 2024-25 yıllarında bitirilmesi planlanan Faz-2 olarak isimlendirilen yenileme programının bir parçası olan HGCAL'in test çalışmalarında alınan verileri incelemektir. BHÇ'nin Faz-2 yenilenmesi sonrasında ışıklılık miktarı şimdiki miktarın 30 katına çıkacaktır. Bu

durum detektörlerdeki radyasyondan kaynaklanan hasarların artmasına neden olacaktır.

CMS detektörünün ENDCAP kalorimetresinin kristal yapısı göz önüne alındığında, birim zamanda birim alana düşen parçacık sayısının artışına paralel olarak kristal yapısının da radyasyondan kaynaklı aldığı hasar artacaktır. Dedektörün çalışmasında bir sorun olmasını engellemek için şimdiye kadar yüksek radyasyon bölgelerinde kullanılan kristal yapı, radyasyona daha dayanıklı olan silikon sensörler ile değiştirilecektir.

Tezin önceki çalışmalar kısmında, SM, CERN'deki BHÇ ve üzerindeki dört büyük dedektörden bahsedilmiştir. Materyal ve metot kısmında ise HGCAL ve deney düzeneğinden bahsedilmiş olup, bulgular ve tartışma kısmında ise silikon sensörlerin yer aldığı altıgen şeklindeki kartların dedektöre uygunluğu ve verimliliği ile ilgili testlerle yapılan analizlerin sonuçlarından bahsedilmiştir.

2 ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

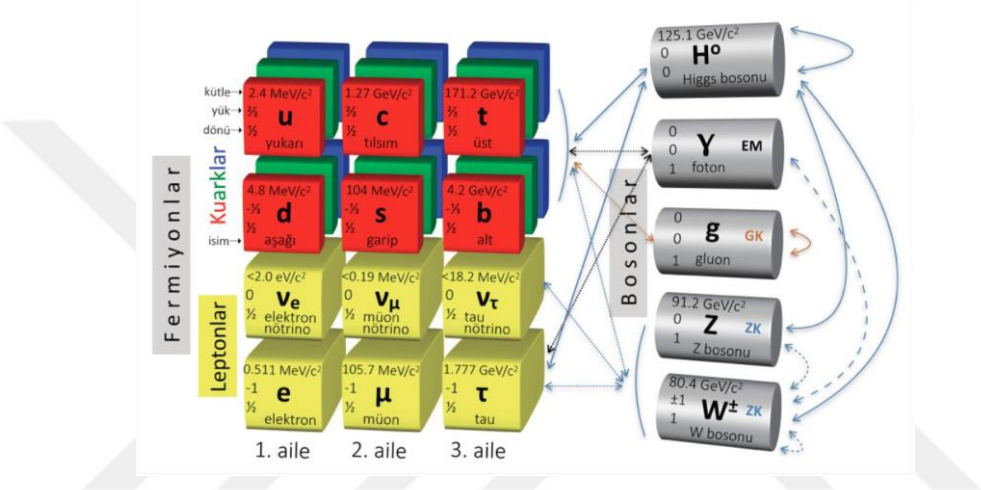
2.1 Standart Model

Doğadaki dört temel kuvvet; kütle-çekim, elektromanyetik, güçlü (nükleer) ve zayıf (nükleer) kuvvetlerdir. Kütle çekimi, kütlesi bulunan maddelerin birbirlerine doğru ivmelenme eğilimidir. Kütleçekim kuvveti, bu dört kuvvet arasında en zayıf olanıdır. Kuvvet taşıyıcısı gravitondur. Gravitonlar kütlesiz ve spini 2 olup henüz gözlenmemişlerdir. Elektromanyetik kuvvet, elektrik yüklü parçacıklar arasındaki kuvvet olup, kuvvet taşıyıcısı, durgun kütlesi 0 ve spini 1 olan foton denilen bir parçacıktır. Fotonun elektrik yükü yoktur. Zayıf kuvvet, pek çok parçacığın ve radyoaktif elementlerin bozunmasından sorumludur. Etki ettiği parçacık, bozunarak kendisiyle akraba bir parçacığa dönüşür. Bu kuvvet, her parçacığa evrensel bir şekilde etki eder. Zayıf kuvvet taşıyıcıları spinleri 1 olan W^+, W^- ve Z^0 arabozonlarıdır. Kuarklar ve gluonlar arasındaki etkileşim güçlü etkileşim olarak adlandırılır ve bu etkileşim kuantum renk dinamiği (KRD) ile tanımlanır. Güçlü kuvvet, hadronlar arasındaki nükleer kuvvet olarak da bilinmektedir. (Padmanabhan, T. 1998)

SM olarak adlandırılan kuram, temel parçacıkları ve bu parçacıklar arasındaki (kütleçekim hariç) etkileşimleri açıklayan kuramdır. SM birçok bilim insanının katkısıyla 20. yüzyılın ikinci yarısında oluşturuldu. 1961'de Shelden Glashow elektromanyetik ve zayıf etkileşimleri birleştirmeyi başardı. Daha sonra 1967'de Steven Weinberg ve Abdus Salam parçacıklara kütle kazandıran Higgs mekanizmasını Glashow'un kuramı ile birleştirerek elektrozayıf kuramı bugünkü haline getirdi. Güçlü etkileşim ise 1970'lerde kuarkların varlığının doğrulanmasından sonra pek çok bilim insanının katkılarıyla son halini aldı. SM, çok başarılı ve kendi içinde tutarlı bir kuram olmasına rağmen bu modelin cevaplayamadığı sorular vardır. Örneğin; kütle-çekim kuvvetinin SM'de yer almaması, neden madde miktarının antimadde miktarından fazla olduğunun

açıklanabilmesi gibi konulara SM, cevap verememektedir. Benzer bir durum da karanlık madde problemi için söz konusudur. Karanlık maddenin kaynağının, henüz bilinmeyen ve SM'de yer almayan parçacıklar olabileceği öngörülmektedir. (http://bilimgenc.tubitak.gov.tr/makale/standart-model-nedir)

SM'de bahsi geçen parçacıklar ve kuvvet taşıyıcıları Şekil 2.1.'deki gibidir.



Şekil 2.1. SM'deki temel parçacıklar.
(https://tr.wikipedia.org/wiki/Standart_Model)

Etrafımızda gördüğümüz her şey fermiyonlardan oluşur. Fermiyonlara zaman zaman madde parçacığı da denir. Elektron, proton ve nötron da birer fermiyondur. Fermiyonlar, $^1/_2$, $^3/_2$ gibi yarım tam sayı spine sahip olan atom altı parçacıklardır. Diğer parçacık türü olan bozonların spinleri ise 1, 2, 3 gibi tam sayıdır. (https://www.britannica.com/science/fermion)

Gözleyebildiğimiz maddeleri oluşturan parçacıklar temel olarak kuarklar ve leptonlardır. 6 adet kuark ve 6 adet lepton içerisindeki en hafif ve en kararlı parçacıklar, SM'nin 1. ailesini oluşturur. Daha ağır parçacıklar 2. aileyi ve en ağırları da 3. aileyi oluştururlar. Bu sıralama, parçacıkların gittikçe daha kararsız olmasıyla da ilişkilidir. Yani 3. aile en kararsız parçacıklardan oluşur. Bu kararsız parçacıklar, kararlı olan parçacıklara bozunurlar.

Her aile 2 kuark ve 2 leptondan oluşur:

1. aile : yukarı (u) kuark, aşağı (d) kuark, elektron ve elektron nötrinosu

2. aile : tılsım (c) kuark, acayip (s) kuark, müon ve müon nötrinosu

3. aile : üst (t) kuark, alt (b) kuark, tau ve tau nötrinosu

(https://www.thoughtco.com/fermion-definition-in-physics-2699188)

Çizelge 2.1. Kuark çeşni özellikleri. (http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Particles/quark.html)

Kuarklar	Sembol	Spin	Yük	Baryon Numarası	Kütle
Yukarı	u	$1/2$	$+2/3$	$1/3$	1,7 - 3,3 MeV
Aşağı	d	$1/2$	$-1/3$	$1/3$	4,1 - 5,8 MeV
Tılsım	c	$1/2$	$+2/3$	$1/3$	1270 MeV
Acayip	s	$1/2$	$-1/3$	$1/3$	101 MeV
Üst	t	$1/2$	$+2/3$	$1/3$	172 GeV
Alt	b	$1/2$	$-1/3$	$1/3$	4,19 - 4,67 GeV

Kuarkların bir araya gelmesiyle hadronlar (bileşik parçacıklar) oluşur ve kuarklarla yapılan en kararlı olan bileşenler, çekirdekte bulunan protonlar ve nötronlardır. Hadronlar, kuarkların ya kuark-antikuark (mezonlar) çifti biçiminde ya da üç kuark (baryonlar) biçiminde olurlar. Örneğin; uud (proton), udd (nötron), uds (lambda), u$\bar{d}$ (pion) vs. gibi.

Çizelge 2.1.'deki kuarkların kütle değerleri tahmini değerlerdir. Bu çizelgedeki değerlerin bulunma şekli dolaylı yoldan, saçılma deneyleri ile sağlanmıştır. Çünkü kuarkların her birinin kendi kütlesini doğrudan ölçmek onları birbirlerinden ayrı olarak yakalayamadığımız için pek mümkün olmamaktadır. Buna "kuark hapsi" ya da "renk hapsi" denilir.

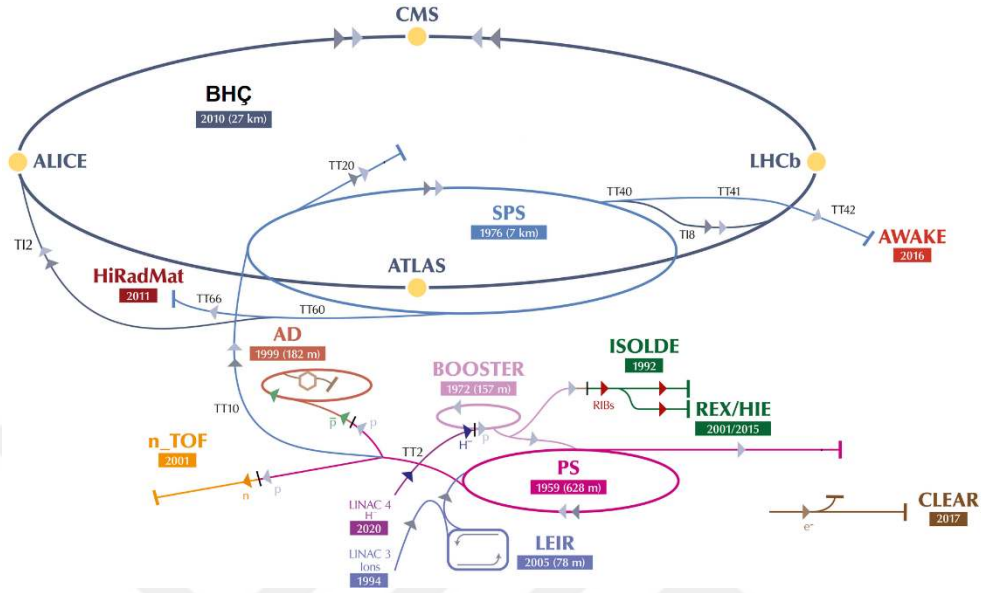
Renk hapsi, renk yükü olan parçacıkların izole bir şekilde bulunamayacağını ifade eden fiziksel bir olaydır. Doğada sadece renkçe nötr parçacıklar veya mezonlar ve baryonlar sayesinde doğrudan gözlemlenebilir. Bu parçacıkları oluşturan kuarkların renk yükleri birbirini nötrleyerek sıfır renk yükünü oluştururlar. Kuarklar her zaman hadron hapsindedirler. Bundan dolayı

kuarklar asla yalnız bulunmazlar. Onlar sadece hadron dahilinde bulunabilirler. Kuark ile anti-kuark birbirine ne kadar yakınsa o ölçüde serbest parçacık gibi davranırlar buna da "asimptotik özgürlük" denir. Bunun yanı sıra aradaki mesafe arttıkça diğer kuvvetlerin aksine renk kuvveti güçlenir. KRD'de bunun anlamı kısaca, kuarkların yüksek enerjilerde zayıf şekilde etkileşmeleri, düşük enerjilerde ise etkileşmelerin güçlenerek, kuark ve gluonların hadron içerisinde tamamen hapsedilmesidir. (http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Forces/color.html#c1)

2.2 CERN

Parçacık fiziğinin simgesi dev hızlandırıcılar ve bunların üzerinde bulunan dedektörlerdir. Bu araçlar olmadan parçacık fiziği deneyleri, bu deneyler olmadan da parçacık fiziğinde ilerleme olamaz. Bu deneyler, hassas etkileri araştırarak nanosaniye seviyesinde ölçümler gerektirirler. Ama yeni parçacıklar keşfetmek ya da bilinmeyen bir etkileşimi araştırmak için gitgide daha yüksek enerjilere ihtiyaç duyulmuştur. "Enerji eşittir kütle" bağıntısı belirli bir enerjide yaratılabilecek parçacığın kütlesini sınırlar. Bu nedenle belirli bir hızlandırıcıdaki tüm olası tepkimeleri incelemişsek, o hızlandırıcının temel amacını yerine getirdiğini söyleyebiliriz. (Nambu, Y. – 1985)

Bugün itibariyle dünyanın en büyük prestijli parçacık fiziği laboratuvarı CERN'dür. Dünyanın her yerinden binlerce bilim insanları, fizikçiler ve mühendisler burada, maddeyle ilgili bilgimizi, temel parçacıkları, onları birbirine bağlayan güçleri, karanlık madde, karanlık enerji, antimadde, süpersimetri ve SM ötesi hakkında bilgilerimizi ilerletmek için çalışmaktadırlar. 1954 yılında İsviçre ve Fransa sınırları arasında, Cenevre'nin batısındaki Jura dağlarının eteğinde kurulan CERN, İkinci Dünya Savaşı sırasında birbirlerine karşı savaşan ülkeleri birleştiren ilk Avrupa işbirliğinden biriydi. (https://voisins.cern/en/cern/what-cern)



Şekil 2.2. CERN'de yer alan hızlandırıcılar.
(https://cds.cern.ch/record/2684277/files/CCC-v2019-final-white.png)

Hızlandırıcılar, parçacık demetlerine enerji verebilmek için elektrik alanı, yön verebilmek için ise manyetik alanı kullanır. Burada manyetik alan parçacıkları çember boyunca döndürmeye ve parçacık demetlerini odaklamaya yarar, böylece her dönüşte parçacıklar enerji kazanmış olurlar. Hızlandırıcılar, hüzmeleri birbirleriyle veya sabit hedeflerle çarpışmadan önce parçacıkları yüksek enerjilere çıkartırlar. Çarpışmalar sonucu Einstein'ın $E = mc^2$ denklemine göre enerji maddeye dönüşür ve ortaya yeni parçacıklar çıkar. Dedektörler bu çarpışmalarda ortaya çıkan parçacıklar ile ilgili bilgileri kaydederler.

CERN'nün hızlandırıcı kompleksi, birbiriyle bağlantılı üç temel hızlandırıcıdan oluşmaktadır. Şekil 2.2, CERN'de bulunan hızlandırıcıları göstermektedir. CERN'deki en eski hızlandırıcı 1957'de yapılan Synchrocyclotron (SC) olup daha sonrasında 1959'da Proton Sinkotron (PS) inşa edildi ve o yıllarda dünyanın en yüksek enerjili hızlandırıcısıydı. Daha sonrasında 1976'da inşa edilen Süper Proton Sinkotron (SPS)'de yapılan çalışmalar da Nobel ödülü kazandırdı.

1989'da ise Büyük Elektron-Pozitron Çarpıştırıcısı (BEP) hizmete girdi. BEP, 2000 yılına kadar laboratuvarda çalıştırıldı. Dairesel bir yeraltı tünelinde inşa edilmiş, 27 kilometre civarında ve BEP'te yer alan parçaların toplam ağırlığı yaklaşık 23.000 ton civarındadır. Bunun dışındaki diğer hızlandırıcılar; AD(antiproton yavaşlatıcı), ISOLDE(izotop ayırıcı), LEIR(düşük enerjili Ion halkası), HiRadMat(yüksek radyasyon maddeleri) ve REX/HIE(radyoaktif deneyi/yüksek yoğunluk ve enerjili izotp ayırıcı)'dir. Elde edilen en yüksek enerjilerdeki bu çarpışmaları inceleyen fizikçiler evrenimizin oluşumunu anlamaya çalışmaktadırlar.
(https://physicsmasterclasses.org/exercises/keyhole/sp/reception/CERN.html)

2.3 Büyük Hadron Çarpıştırıcısı

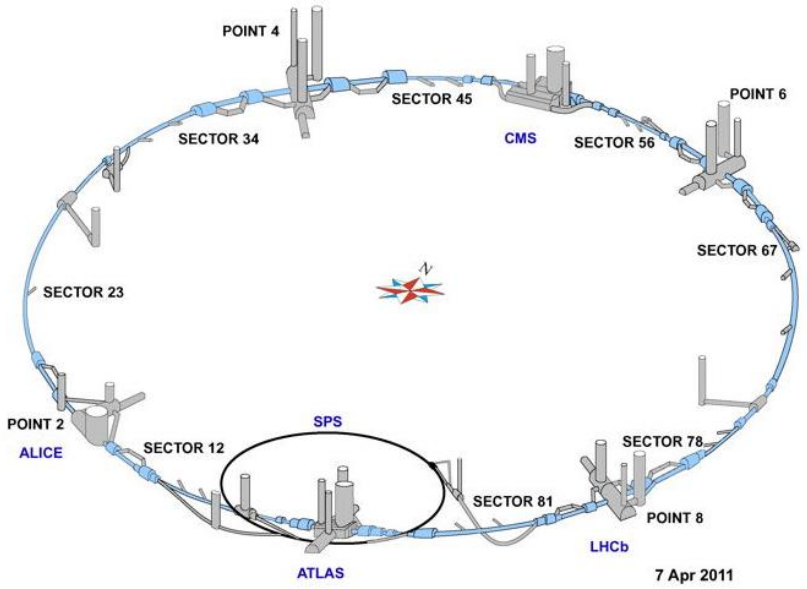
BEP projesinin CERN'de başarılı bir şekilde tamamlanmasından önce, laboratuvar için gelecekteki seçeneklerin düşünülmesi şekillenmeye başlanmış ve "Uzun Menzilli Planlama Komitesi" kurulmuştu. Komite, temel parçacık etkileşimlerinin yeni koşullarla karşılaşması gereken 1 TeV (1000 GeV) enerji ölçeğini keşfetmek için bir plan önermiştir. Bu öneri, BEP tüneline kurulacak olan yüksek manyetik alana sahip BHÇ hızlandırıcısı ile ilgiliydi ve BHÇ'nin CERN'nün 1 TeV arenasına girmesinin en uygun maliyetli yolu olarak görüldüğünü göstermiştir. Bu enerjilerde 'zayıf kuvvet'in elektromanyetik ortağıyla eşleşecek kadar güçlü olması bekleniyordu. Yüksek alanlı süperiletken mıknatıs prototip çalışması, BHÇ'de 7 TeV'lik proton hüzmesi (çarpışma enerjisi 14 TeV) için gereken 10 Teslalık alanı sağlamak için 'ikisi bir arada' tasarımının pratik bir öneri olduğunu göstermiştir. Çarpışan proton hüzmelerini mümkün olduğu kadar sıkıştırarak, hem proton demetlerinin sayısını hem de demet içindeki protonların sayısını artırarak, BHÇ'nin ışıklılığı, $1{,}4 \times 10^{33} s^{-1}\mathrm{cm}^{-2}$ den, $4 \times 10^{34} s^{-1}\mathrm{cm}^{-2}$'ye yükseltilmiştir. BHÇ'nin bir diğer kozu da protonların yanı sıra ağır iyonları da çarpıştırarak 'Büyük Patlama'dan sonraki evrenin ilk koşullarını yeniden oluşturarak o ortamı sağlamasıdır. (CERN Courier, 1989)

BHÇ'de çalışmalar ilk olarak 10 Eylül 2008'de başlamış ve CERN'nün hızlandırıcı kompleksine eklenmiştir. BHÇ, yol boyunca parçacıkların enerjisini artırmak için birkaç hızlandırıcı yapıya sahip 27 kilometrelik bir süperiletken mıknatıs halkasından oluşmaktadır. Hızlandırıcı içinde, iki yüksek enerjili parçacık demeti çarpışmadan önce ışık hızının %99.9998777...'sine kadar bir hızla ilerler. Hüzmeler, ayrı ışın borularında zıt yönlerde hareket ederler. Elektromıknatıslar, süperiletken malzemelerden oluşup, direnç veya enerji kaybı olmadan elektriği verimli bir şekilde ileten özel bobinlerden yapılmıştır. Bu süperiletken malzemelerin oldukça soğutulması gerekmektedir. Bu sebepten dolayı, hızlandırıcının çoğu kısmı, mıknatısları soğutan bir sıvı helyum dağıtım sistemine bağlanmıştır. Günümüzün teknolojik imkanlarına göre bu süperiletken malzemenin sıcaklığı −271,3°C'ye kadar düşürülmektedir. Hızlandırıcı içerisinde hüzmeleri büken 15 metre uzunluğuna sahip 1232 adet dipol mıknatıs ve her biri 5-7 metre uzunluğuna sahip hüzmeleri odaklayan 392 adet dört kutuplu mıknatıs bulunur. (http://lhcphysics.blogspot.com/p/)

BHÇ'nin sürekli çalışması mümkün değildir, çünkü belli zaman aralıklarında sistemin kalibrasyonu ve güvenlik testleri için durması gerekmektedir. Bunun yanında elektronik sistemde belli sorunlar ile karşılaşılabilir. Bu durumda BHÇ içerisinde proton demetleri bulunmaması gerekir. BHÇ, 2018 yılının sonuna kadar çalıştıktan sonra nominal çalışma değerlerine çıkılabilmesi için 2 yıl kadar sistem kapatılıp Faz-2 dönemine geçebilmek için 2024-26 yılları arasında hızlandırıcı ve dedektör sistemlerinde tamir, bakım ve yenileme çalışmaları yapılacaktır. Böylece önümüzdeki 20 yıl boyunca BHÇ, proton çarpışmaları yaparak çok nadir meydana gelen bazı atom altı parçacıklarını üretip fizik analiz programları araştırılacaktır.

2.4 Büyük Hadron Çarpıştırıcısı Deneyleri

BHÇ, 2010 yılında iki hüzmenin yüksek enerjilerde çarpıştığı dünyanın en yüksek enerjili hızlandırıcısı olmuştu. Üretilen veri miktarının analiz edilmesi yıllar alacaktır. BHÇ tarafından kullanılan parçacık dedektörleri son derece büyük makinelerdir. Dedektörler, hüzme parçacıklarının çarpışma noktalarının etrafına yerleştirilir. En büyük dedektörler: ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus), CMS (Compact Muon Selenoid), ALICE (A Large Ion Collider Experiment) ve LHCb (Large Hadron Collider beauty) dir. Bu 4 büyük deneyin dışında CERN'de irili ufaklı bir çok başka deney de bulunmaktadır. Örneğin; Antimadde Fabrikası gibi.



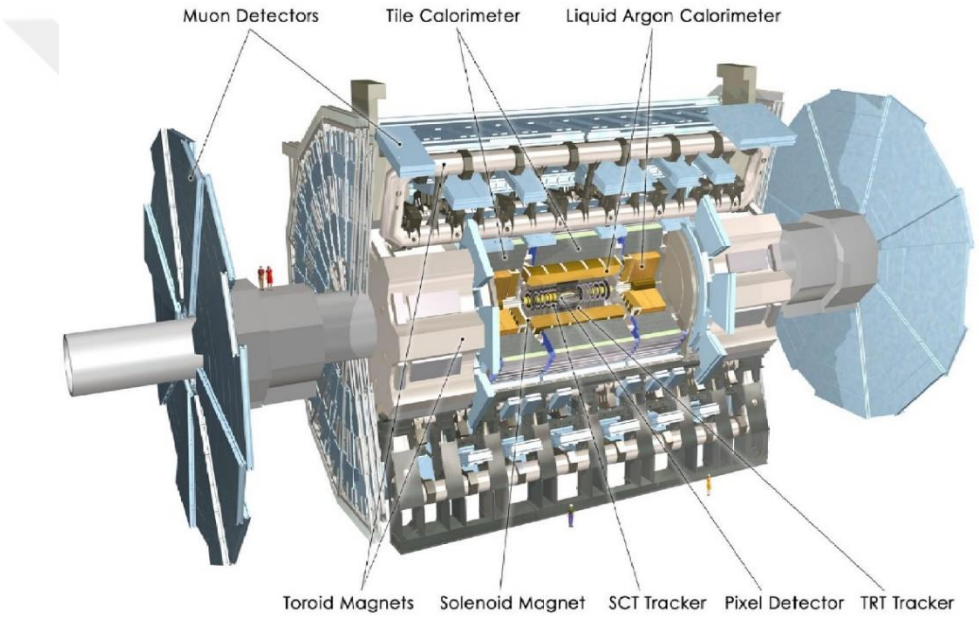
Şekil 2.3. BHÇ Ana Dedektörlerinin Şematik Yapısı. (https://www.extremetech.com/wp-content/uploads/2014/04/LHC_Fig1.jpg)

2.4.1 ATLAS

ATLAS, BHÇ'de kullanılan 2 genel amaçlı detektörlerinden biridir. Higgs bozonunun aranmasından, karanlık maddeyi oluşturan parçacıklara kadar geniş bir fizik yelpazesini araştırmaktadır. CMS deneyi ile aynı bilimsel hedeflere sahip

olmasına rağmen, ATLAS, farklı teknik çözümler ve farklı bir mıknatıs sistemi kullanmaktadır.

BHÇ'den gelen parçacık demetleri ATLAS dedektörünün merkezinde çarpışırlar. Çarpışma noktası çevresinde katmanlar halinde düzenlenmiş altı farklı bileşen, parçacıkların yol, momentum ve enerji bilgilerini kaydeder. Büyük bir mıknatıs sistemi, yüklü parçacıkların yollarını bükerek enerjilerinin ölçülebilmesini sağlar.



Şekil 2.4. ATLAS Dedektörünün şematik yapısı. (https://mediaarchive.cern.ch/MediaArchive/Photo/Public/2008/0803012/0803012_01/0803012_01-A5-at-72-dpi.jpg)

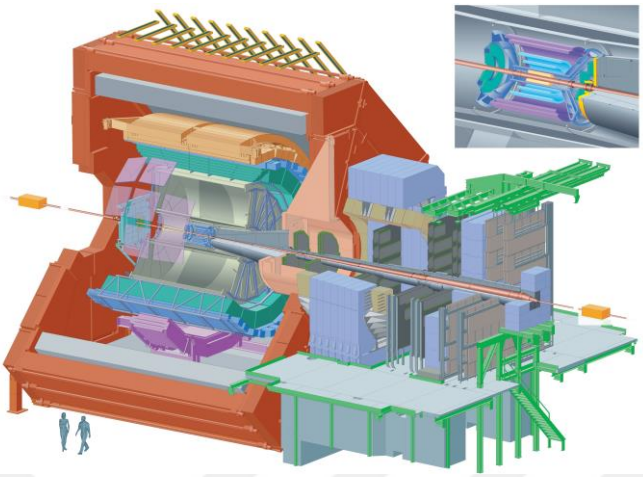
ATLAS dedektöründeki etkileşmeler muazzam bir veri akışı oluşturur. Verileri kaydetmesi için ATLAS, hangi olayların kaydedileceğini ve hangilerinin dikkate alınmayacağını bildirmek için gelişmiş bir "tetikleyici" sistem kullanır. Karmaşık veri toplama ve hesaplama sistemleri daha sonra kaydedilen çarpışma

olaylarını analiz etmek için kullanılır. 46 m uzunluğunda, 25 m yüksekliğinde ve 25 m genişliğinde, 7000 tonluk ATLAS dedektörü şimdiye kadar yapılmış en büyük hacimli parçacık dedektörüdür. Yerin 100 m altındaki mağarada, Cenevre'deki ana CERN yerleşkesine en yakın detektördür. ATLAS deneyinde 38 ülkeden 174 enstitüden yaklaşık 3000 bilim insanı çalışmalarda bulunmaktadır. (https://home.cern/science/experiments/atlas)

2.4.2 ALICE

ALICE, BHÇ halkası üzerindeki ağır iyon dedektörüdür. Kuark-Gluon Plazması denilen maddenin bir fazının oluştuğu aşırı enerji yoğunluklarında kuvvetli etkileşime giren maddenin fiziğini incelemek için tasarlanmıştır. BHÇ'deki çarpışmalar, Güneş'in merkezinden 100000 kez daha fazla sıcaklığa neden olur. Bu sıcaklıktaki bir patlamada kuarklar ile gluonlar arasındaki bağların kopabileceği öngörülmektedir. Kuark-Gluon Plazması dediğimiz ortam, Büyük Patlamadan sonra oluşan ortamının adıdır. Günümüz evrenindeki tüm sıradan maddeler atomlardan oluşur. Her atom, bir elektron bulutuyla çevrili proton ve nötronlardan oluşan bir çekirdek içerir. Kuarklar ve aynı zamanda gluonlar kalıcı olarak birbirine bağlanmış, proton ve nötronlar gibi kompozit parçacıkların içine hapsolmuş gibi görünmektedir.

BHÇ, kurşun iyonları ve bunların yanı sıra daha hafif iyonlar da çarpıştırılarak, laboratuvar ortamında Büyük Patlamadan hemen sonrakine benzer koşullar oluşturulur. ALICE işbirliği, Kuark-Gluon Plazmasını incelemek için 26 m uzunluğunda, 16 m yüksekliğinde ve 16 m genişliğinde 10000 tonluk ALICE dedektörünü kullanmaktadır. Dedektör, Fransa'daki St.Genis-Pouilly köyünün yakınında yerin 56 m aşağısında yer almaktadır. ALICE işbirliğinde, 30 ülkeden toplam yaklaşık 1000'den fazla bilim insanı çalışmalarını sürdürmektedir. (https://home.cern/science/experiments/alice)

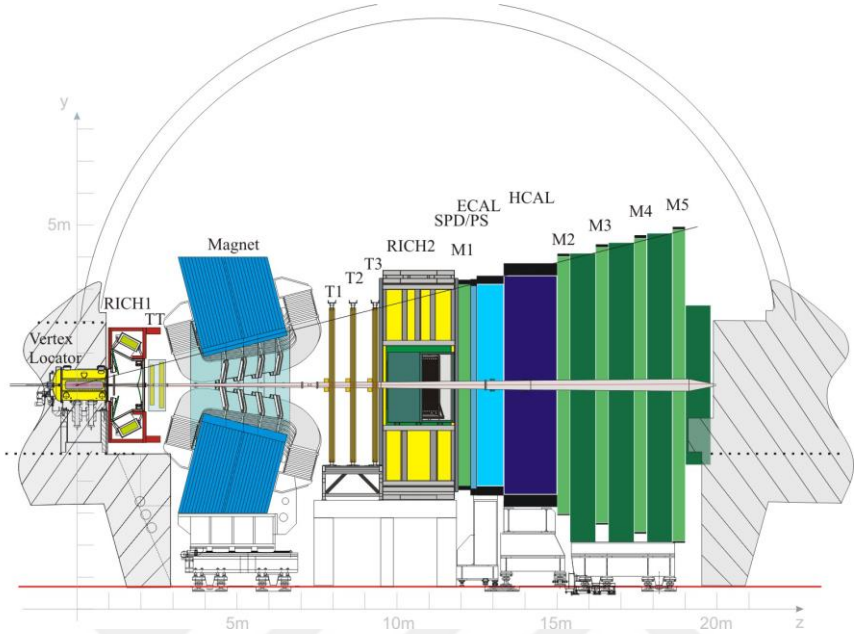


Şekil 2.5. ALICE Dedektörünün kesit görüntüsü. (ALICE Collaboration, 2008)

2.4.3 LHCb

BHÇ-güzellik (LHCb) deneyi, "güzellik kuarkı" veya "b kuark" olarak adlandırılan bir tür parçacığı inceleyerek madde ve anti madde arasındaki hafif farklılıkları araştırmak üzere tasarlanmıştır.

Tüm çarpışma noktasını ATLAS ve CMS gibi kapalı bir detektörle çevrelemek yerine, LHCb deneyi, çarpışma noktasından tek bir yönde ileri doğru giden parçacıkları tespit etmek için bir dizi alt dedektör kullanır. İlk alt algılayıcı çarpışma noktasına yakın monte edilir, diğerleri arka arkaya 20 metreden daha uzun aralıklarla yerleştirilir. BHÇ'de farklı türde ve çok sayıda kuarklar üretilir ve bunlar hızlı bir şekilde başka türlere bozunurlar. LHCb, b kuarklarını bozunmadan önce yakalamak için, BHÇ'de dönen hüzmelerin yoluna yakın yerleştirilen hareketli izleme dedektörleri geliştirmiştir.



Şekil 2.6. LHCb dedektörünün kesit görüntüsü. (LHCb Collaboration, 2008.)

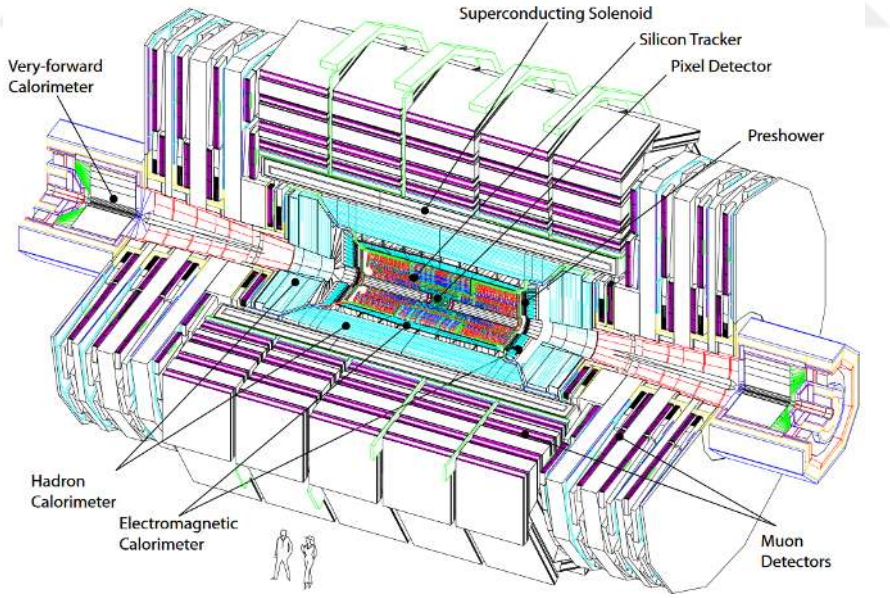
5600 ton ağırlığında olan LHCb dedektörü, ileri spektrometre ve düzlemsel dedektörlerden oluşur. 21 metre uzunluğunda, 10 metre yüksekliğinde ve 13 metre genişliğindedir ve Fransa'nın Ferney-Voltaire köyü yakınlarında yerin 100 metre altında yer almaktadır. 66 farklı kurum ve üniversiteden yaklaşık 700 bilim insanı LHCb işbirliğini oluşturmaktadır.
(https://home.cern/science/experiments/lhcb)

2.4.4 CMS

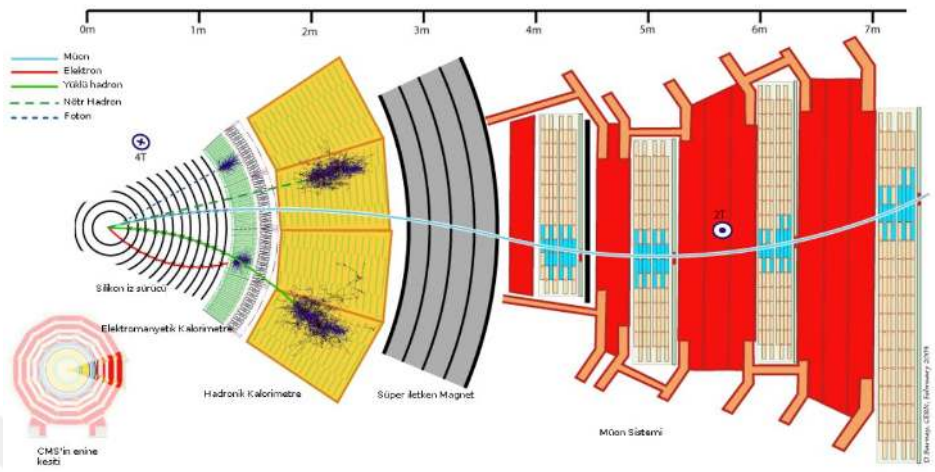
Tıpkı ATLAS deneyi gibi CMS dedektörü de, BHÇ'de yeni fiziği arayan genel amaçlı bir deneydir. BHÇ halkasının Fransa sınırı içerisindeki Cessy kasabasında yaklaşık yerin 100 m altında yer almaktadır. Başlıca amacı, elektrozayıf simetri kırılmasının doğasını açıklamak ve TeV ölçeğinde yeni olayları aramaktır. Ana bileşenleri ATLAS dedektörü gibidir: hüzme borusuna yakın bir izleme sisteminden oluşan silindirik bir kurulum, orta alanda bir elektromanyetik

ve hadronik kalorimetre, bunları çevreleyen ve güçlü bir manyetik alan oluşturan süperiletken bir selenoid, en dışta ise muon odacıkları bulunmaktadır. CMS dedektörü, 15 m çapında ve 28,7 m uzunluğunda olup toplam ağırlığı 14500 tondur.

CMS işbirliği tarafından benimsenen koordinat sisteminin orijini deney içerisindeki çarpışmanın merkezi olarak kabul edilmiştir. Dikey olarak yukarı doğru işaret eden *y* ekseni, BHÇ'nin merkezine doğru radyal olarak içe dönük olarak uzanan *x* ekseni ve BHÇ Point 5'den Jura Dağları'na doğru hüzme yönü boyunca uzanan *z* ekseni, koordinat sisteminin ana eksenlerini oluşturmaktadır. Azimut açısı φ, *x*-*y* düzlemindeki x ekseninden ölçülür ve bu düzlemdeki radyal koordinat *r* ile belirtilir. Kutup açısı θ, *z* ekseninden ölçülür. Dedektörün içindeki pozisyonlar genellikle psüdorapidite $\eta = -ln tan(\theta/2)$ formülü ile tanımlanır. Parçacık üretiminden dolayı psüdorapidite özellikle parçacık fiziğinde yararlıdır. Böylece, sırasıyla p_T ve E_T ile gösterilen hüzme yönüne dik momentum ve enerji, *x* ve *y* bileşenlerinden hesaplanır. (CMS Collaboration, JINST 3 S08004, 2008.)



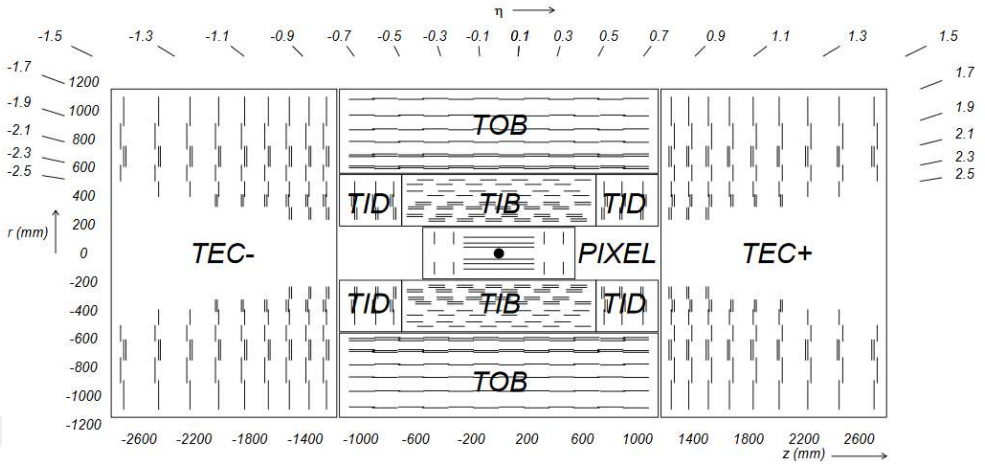
Şekil 2.7. CMS Dedektörünün şematik görüntüsü. (CMS Collaboration, JINST 3 S08004, 2008.)



Şekil 2.8. Parçacıkların CMS bileşenlerinin bir kesitin de izlediği yolların şematik görüntüsü. (CMS Collaboration, JINST 3 S08004, 2008.)

2.4.4.1 İzleyici Sistem

Şekil 2.9'da gösterilen izleme sistemi CMS'nin en içteki parçasıdır ve etkileşim noktasına en yakın olan yerdir. Bu sistem, yüklü parçacıkların izlediği yolun hassas ölçümünün yanı sıra dedektör içinde ikincil köşeleri yeniden yapılandırmak için tasarlanmıştır. İzleyicinin ilk üç katmanı, izleyici kanallarının en yüksek hassasiyetini ve tanecikliliğini sağlayan silikon piksel dedektörlerinden oluşmuştur. Toplam 66 milyon piksel olup her biri 100µm x150µm alanı kapsar.



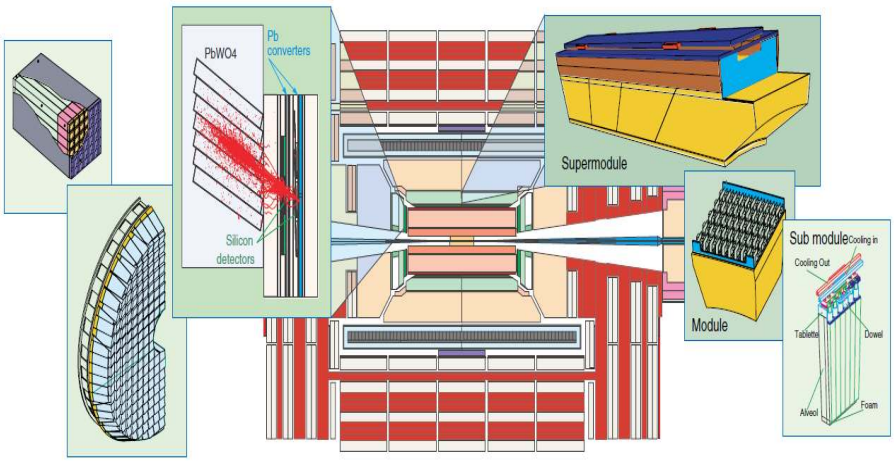
Şekil 2.9. CMS izleyici sisteminin şematik bir kesiti. Her çizgi bir dedektör modülünü temsil eder. Çift çizgiler arka arkaya olan modülleri gösterir. (CMS Collaboration, JINST 3 S08004, 2008.)

Çözünürlük, *r-φ* düzleminde ~10 μm ve *r-z* düzleminde ~20 μm şeklindedir. Piksel dedektörü $|\eta| < 2.5$ bir referans aralığında izleyici kanalları çok yüksek hassasiyet ve tanecikli bir yapı sağlamak için tasarlanmıştır. Dedektörün sonraki 10 katmanı, 1,1 m'lik bir yarıçap kadar olup, silikon mikroşerit dedektörleri ile düzenlenmiştir. Bunlar 11,4 milyon adet uzun şeritler olup, 10 veya 25 cm uzunluğundadır. Fıçı bölgesi, 230 μm çözünürlüğüne sahip $r < 65$ cm için bir izleyici iç fıçı (TIB) ve 530 μm çözünürlüğüne sahip $65 < r < 110$ cm için bir izleyici dış fıçı (TOB) olarak ayrılır. İzleyici ENDCAPlar (TEC), $|\eta| < 2.5$ olan bölgeyi kapsar ve hüzme ile radyal olarak yönlendirilmiş şeritler barındırır. CMS'in en içteki bu tabakası, selenoid tarafından oluşturulan güçlü bir manyetik alana tabi tutulur. Bu nedenle herhangi bir yüklü parçacığın enine momentumu izleyicideki yolunun eğriliği $p_T = qrB$ ile ölçülmesi mümkündür. Burada q parçacık yükü, r parçacık izinin yarıçapı ve B manyetik alan şiddetini gösterir. Daha enerjik parçacıklar manyetik alanda daha az bükülürler, bu yüzden onların momentumunu hesaplamak daha zordur. Böylece p_T artıkça belirsizlik de artar.

İzleyici, hem elektronların hem de müonların tanımlanmasında önemli bir bileşendir. (CMS Collaboration, CERN-LHCC-98-006, 1998.)

2.4.4.2 Elektromanyetik Kalorimetre

Etkileşim noktasından radyal olarak dışa doğru gittiğimizde bir sonraki dedektör bileşeni elektromanyetik kalorimetre (EKAL)'dir. Elektronların ve fotonların enerjilerini doğru şekilde ölçmek için tasarlanmıştır. Şekil 2.10'da şematik yapısı gösterilen EKAL, kurşun tungstat ($PbWO_4$) kristallerinden oluşan homojen bir kalorimetredir. EKAL merkezde bir fıçı (EB) ve iki uç kapak (EE)'tan oluşmaktadır. EB'nin kapsadığı bölge $|\eta| < 5$ olup bu kısımda 61200 adet (modül başına 1700) kristal bulunmaktadır. Yarı fıçının her birinde 18 olmak üzere toplam 36 tane süpermodül vardır. EE ise $1{,}5 < |\eta| < 3{,}0$ bölgesinde olup 7324 adet (her biri 3662) kristal barındırmaktadır. (CMS Collaboration, CMS CR 2010/139, 2011.)



Şekil 2.10. EKAL'in kristal yapılarının düzenini gösteren bileşenlerin şematik yapısı. (CMS Collaboration, CERN/LHCC 97–33, 1997.)

EKAL'in performansını anlamak için elektromanyetik parçacıkların madde ile etkileşimini tartışmak gerekir. Yüksek enerjili elektronlar ağırlıklı olarak

frenleme ışıması (bremsstrahlung) yoluyla enerji kaybeder. Birim uzunluk başına enerji kaybı;

$$\frac{dE}{dx} = -\frac{E}{X_0} \tag{2.1}$$

ile verilir. Burada X_0, karakteristik radyasyon uzunluğudur. EKAL'de kullanılan kurşun tungstat için $X_0 = 0{,}89$'dır; her kristalin uzunluğu 23 cm veya $25{,}8\ X_0$'dir. (CMS Collaboration, JINST vol. 2, P04004, 2007.)

Fotonlar, çift oluşum vasıtasıyla maddelerle etkileşime girme eğilimindedir ve böylelikle madde ortamından geçerken bir e^+e^- lepton çiftine dönüşür. Frenleme ışıması ile bu sürecin kombinasyonu bir elektromanyetik duş oluşmasına yol açar. Bu olayda elektron bir foton yayar, daha sonra bu foton çift üretimiyle iki ek elektron üretir. Bu elektronlar daha sonra tekrar foton yayıp enerjisi kritik bir enerji değerinin altına düşene kadar elektron üretir. Bu süreç kristal tabanlı sintilasyon ile ölçülebilir.

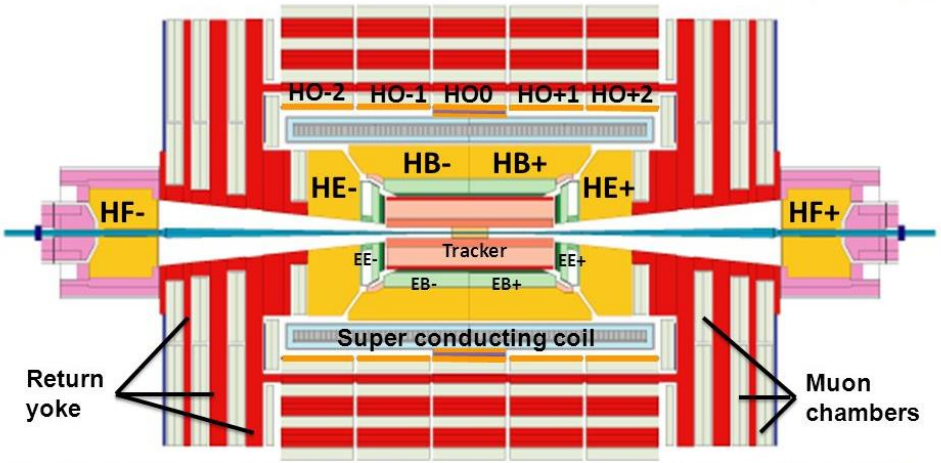
Elektromanyetik duşların enine yönde iyi bir yayılıma sahip olduğu deneysel olarak bilinmektedir. Duşlar genellikle Moliere yarıçapı R_M tarafından karakterize edilip, duş enerjisinin %90'ı içeren bir silindir yarıçapı olarak tanımlanır. EKAL'in ince tanecikli yapıya sahip olması durumundan, $PbWO_4$'ın $R_M = 2{,}2$ cm olarak kristallerin ön boyutlarıyla aynıdır. EKAL'in çözünürlüğü;

$$\left(\frac{\sigma}{E}\right)^2 = \left(\frac{5{,}4\%}{\sqrt{E}}\right)^2 + \left(\frac{124MeV}{E}\right)^2 + (0{,}4\%)^2 \tag{2.2}$$

ile verilir. EKAL'in genel enerji çözünürlüğü çok iyi ve 1GeV - 1TeV arasındaki enerjiler için idealdir. Ek düzeltmeler zaman içinde gereklidir, çünkü radyasyona maruz kalan kristallerin şeffaflığı kaybolmaya başlar, bu nedenle bir lazer sistemi kullanılarak yeniden kalibre edilmelidir. (CMS Collaboration, CERN-LHCC-97-033, 1997.)

2.4.4.3 Hadronik Kalorimetre

EKAL'in arkasında bulunan Hadronik Kalorimetre (HKAL), hem hadron jetlerinin enerjilerini hem de olaydaki kayıp enerjiyi güvenilir bir şekilde ölçmek üzere tasarlanmıştır. HKAL, η tarafından üç bileşene ayrılır. Bunlar; $|\eta| < 1{,}3$ bölgesinde bulunan Hadronik Fıçı (HB), $1{,}3 < |\eta| < 3{,}0$ bölgesinde bulunan Hadronik Uç Kapak (HE) ve $3{,}0 < |\eta| < 5{,}0$ bölgesinde bulunan İleri Hadronik (HF)'dir. HKAL kısmı dedektör içerisinde, EKAL ve mıknatıs arasına yerleştirilmiştir. Bu fıçı, aralıklı katmanları pirinç ve plastik sintilatör karoları ile doldurulmuş malzemelerden oluşmaktadır. Bu katmanlar 0,96 m'ye kadar dışa doğru uzanır ve HB'nin iki yarım fıçı olarak oluşturulan 36 azimutal dilime ayrılır. HF'de, pirinç yerine çelik kullanılır ve bu kısımdaki sintilatör tabakada kuvars fiberden oluşur. (CMS Collaboration, , CERN-LHCC-97-031, 1997.)



Şekil 2.11. HKAL ve EKAL kalorimetrelerinin şematik yapısı. (CMS Collaboration, CERN-LHCC-97-031, 1997.)

Metal katmanların işlevi, hadron etkileşimine neden olmak için ağır çekirdekli yoğun bir malzeme sağlamaktır. Sintilatör katmanları ise bu etkileşimlerdeki enerjiyi ölçmeyi sağlar. Etkileşimler parçacık üretimi de dahil

olmak üzere çeşitli işlemler üzerinden devam edebilir (pion üretimi dahil). π^0 daha sonra $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ ile bozunuma uğrar. Foton üretimi nedeniyle, hadronik duşlar da elektromanyetik bir bileşene sahip olacaktır. Nötr parçacıklar ve üretilen π^0 sayısının dalgalanmalarının sonucu olarak, hadronik jetlerin boyutları ve ölçülen enerjisindeki dalgalanmalar oluşan elektromanyetik jetlerden daha büyüktür. Genellikle oldukça radyal bir duş görüntüsü verir.

Pirinç, manyetik olmadığından ve kısa bir etkileşim uzunluğuna sahip olduğundan fıçıda optimaldir. Uç kapaklarda çelik ve kuvars kullanılır, çünkü hüzmelerden gelen yüksek radyasyona dayanıklılıkları daha iyidir. HKAL'in çözünürlüğü;

$$\left(\frac{\sigma}{E}\right)^2 = \left(\frac{90\%}{\sqrt{E}}\right)^2 + (4{,}5\%)^2 \qquad |\eta| < 3{,}0 \qquad (2.3)$$

$$\left(\frac{\sigma}{E}\right)^2 = \left(\frac{172\%}{\sqrt{E}}\right)^2 + (9{,}0\%)^2 \qquad 3{,}0 < |\eta| < 5{,}0 \qquad (2.4)$$

ile gösterilir. İlk terim olasılıksal olarak, istatistiksel dalgalanmalar ve içsel duş boyutu dalgalanmalarını içerir. İkinci terim ise kalibrasyon belirsizliği ve birbirine benzemeyen dedektör bileşeni için sabit bir sayıdır. Karşılaştırma yapılacak olunursa, HKAL'in çözünürlüğü, EKAL'in çözünürlüğünden daha kötüdür. Çünkü HKAL bir örnekleme kalorimetrisidir ve hadronik duşlar daha büyük istatistiksel dalgalanma eğilimi gösterir. (CMS Collaboration, CERN-LHCC-97-031, 1997.)

2.4.4.4 Süperiletken Mıknatıs

CMS'in ana ayırt edici özelliklerinden birisi de selenoid yapının iç kısmına 4T'lik bir manyetik alan sunabilen, 13 m uzunluğunda ve 6 m çapı olan çok büyük bir süperiletken mıknatısla çevrelenmiş olmasıdır. 4T yaklaşık olarak yer kürenin manyetik gücünün 100 bin katı civarındadır. Bu alan, iç katmanlardaki

yüklü parçacıkların yollarını bükerek momentumunun belirlenmesine olanak sağlar. Bu nedenle yüksek manyetik alan hem iyi momentum çözünürlüğü hem de parçacık yükünün belirlenmesi için önemlidir.

Parçacıklar yüksek yoğunluklu mıknatıstan geçmeden önce rahatlıkla ölçülebildiği için iyi bir elektromanyetik enerji çözünürlüğünün yanı sıra kayıp enerji ve jet enerji çözünürlüğü de sağlar. Selenoid iç kısmından geçen manyetik akı, 1,5 m kalınlığındaki, 10000 ton ağırlığındaki ve her biri 3 disk içeren 5 tekerlek ve 2 uç kapak içeren bir destek demir boyunduruk tarafından döndürülür.

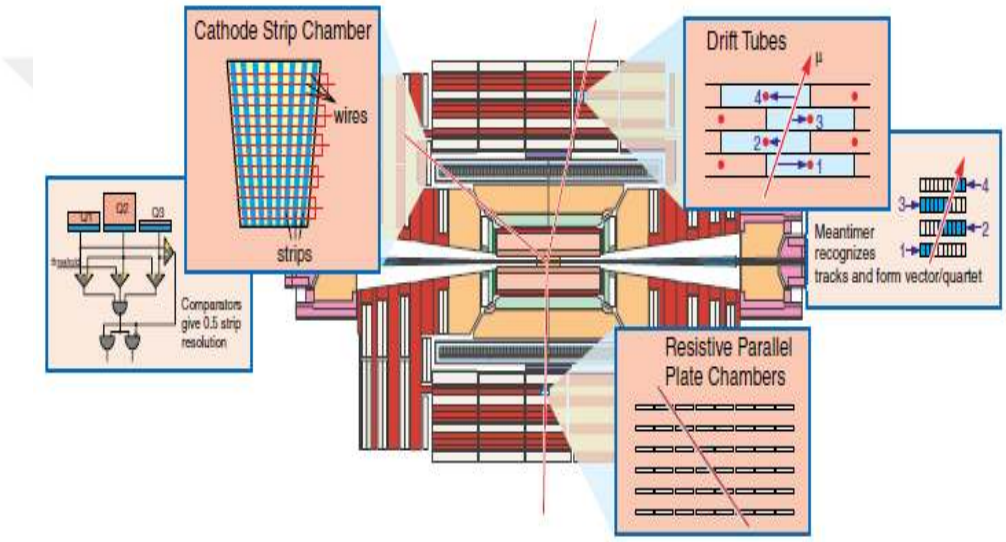
Şekil 2.12. Süperiletken mıknatıs ve müon odalarının yerleşik düzeni. (CERN Courier, 2012.)

2.4.4.5 Müon Odaları

Bu yapı, CMS'in ikinci adı ile ima edildiği gibi, müonların tespiti için merkezi önem taşımaktadır. Müon sistemi, BHÇ'nin tüm kinematik yelpazesine bağlı olarak müonların yükünü ve momentumunu yeniden yapılandırmak için tasarlanmıştır. Büyük kütleleri nedeniyle, müonlar madde ile minimal etkileşime

sahiptir ve sonuç olarak çok delicidirler. Bu nedenle müon sistemi, süperiletken mıknatısın ötesine yerleştirilmiştir.

Müonların belirlenmesi için üç ayrı dedektör sistemi vardır. Merkezde sürükleme tüpleri (DT) kullanılır. Kesin yörünge ölçümleri için katod şerit odaları (CSC) uç kapaklarda kullanılır. Dedektörden geçen müonların kesin zamanlamasını sağlayan dirençli plaka odaları (RPC) ise fıçıyı ve uç kapakların çoğunu kaplar.



Şekil 2.13. Üç ayrı müon dedektör odalarını gösteren müon sisteminin konfigürasyonu. (CMS Collaboration, CERN-LHCC-97-032, 1997.)

DT'ler bir gazın içine batırılmış ince bir telin etrafına (bu durumda argon ve karbondioksit karışımı) yerleştirilen bir tel odası türüdür. Yüklü müonun geçişi bu gazı iyonize eder ve elektrik alanı da serbest kalan atomik elektronların algılama teline doğru kaymasına neden olur. Alan tarafından hızlandırılan bu elektronlar daha fazla iyon üretir ve ortaya çıkan iyon çığı, telde sinyal kaydedilebilecek şekilde bir akım üretir. DT'ler, radyal olarak dışarı doğru hareket eden dört istasyon halinde düzenlenir. Ve her bir odanın sürüklenmesi, hücre genişliğinin

yarısı kadardır. Bu konfigürasyon, her bir odadaki sinyalleri ve her bir teldeki vuruşları tek bir müon izine bağlamayı mümkün kılar.

CSC'ler, yedi katod paneli arasına yerleştirilmiş altı anot teli düzleminden oluşan çok telli orantılı odalardır. Teller azimutal olarak dizilir ve bir radyal koordinatını tanımlar. Müon üretim oranları ve nötron kaynaklı arkaplanlar hüzme hattına daha yakındır, bu nedenle daha hızlı tepki süresi, ince segmentasyon ve radyasyona karşı iyi direnç gösteren CSC'ler, uç kapaklar için tercih edilir. Radyal olarak dışarıya doğru katod şeritlerinden ve şeritlere dik uzanan anot tellerinden oluşurlar. Anot telleri, iyonize edilmiş elektronları, müonun geçişinden algılar ve pozitif iyonlar, katod şeritlerinde bir sinyale neden olur. Bu nedenle, şeritler *r-φ* düzlemindeki müon yolunun hassas bir ölçümünü sağlarken, teller müonun η ölçüsünü sağlar.

RPC'lerin zaman çözünürlüğü sintilatörlerinkiyle kıyaslanabilir. Bunlar birbirlerine paralel gazlı dedektör bileşenlerdir. RPC'ler, geniş bir aralıkta hızlı ve bağımsız müon ölçümleri yapmak için tasarlanmış tamamlayıcı bir müon algılama sistemi içerir. Paralel dirençli plakalar, gaz dolu iç kısımda sabit bir elektrik alanı yaratır, öyle ki bir olay müonu, gazı iyonize ettiğinde elektron levhalara çekilir. Diğer tarafta iletken şeritlerin aksine, elektrotların kendisi sinyale karşı saydamdır. RPC'ler çok hızlı bir tepkime süresine (1ns) sahiptir. Ancak DT'lerden veya CSC'lerden daha fazla uzaysal çözünürlüğe sahiptirler, bu durum onları müonlarla tetiklemek için en uygun hale getirmektedir. (CMS Collaboration, CERN-LHCC-97-032, 1997.)

2.4.4.6 Tetikleme ve Veri Toplama Sistemi

Proton-proton çarpışmaları için, BHÇ, 25 ns'lik bir hüzme geçiş aralığına sahiptir; bu, 40 MHz'lik bir geçiş frekansına karşılık gelir. Her proton demet geçişi için gerçek çarpışma sayısı ışıklılık oranına bağlıdır, ancak deneyin tasarım ışıklılığı $10^{34} cm^{-1} s^{-2}$ için yaklaşık 20-25'tir. Ortaya çıkan yüksek olay sayısıyla ilişkili büyük miktarda veriyi saklamak ve işlemek imkansız olduğundan,

büyük oranda bir düşüş sağlanmalıdır. Bu nedenle, hem toplam olay oranını azaltmak hem de depolanan verilerdeki ilgili fizik olaylarının oranını arttırmak için bir başlangıç olay seçimi yapmak gereklidir. Bu oran, Seviye-1 Tetikleyiciye (L1) ve Yüksek Seviye Tetikleyiciye (HLT) karşılık gelen iki adımda azaltılır.

2.4.4.6.(a) Seviye-1 Tetikleyici

L1, özel olarak tasarlanmış, büyük ölçüde programlanabilir elektroniklerden oluşur ve maksimum 100 kHz çıkış hızına sahiptir. L1 Tetikleyicisi, yüksek çözünürlüklü verileri ön uç elektroniklerinde hafızalarda tutarken, kalorimetrelerden ve müon sisteminden kabaca bölümlenmiş verileri kullanır. L1; yerel, bölgesel ve küresel bileşenlere ayrılmıştır.

Yerel tetikleme bilgileri, hem kalorimetre hem de müon tetikleyicilerinden gelen Tetik İlkel Jeneratörler (TPG) tarafından üretilir. Önceki durumda, kalorimetre kulelerindeki enerji birikimlerine dayanırlar ve ikinci durumda, müon odalarında iz parçalarını veya isabet modellerini kullanırlar. TPG'lerden gelen bilgiler, belirli bölgelerdeki elektron veya müon adayları gibi tetikleyici nesnelerin sıralı bir listesini belirlemek ve bunları enerjiye göre sıralamak için kullanılan bölgesel tetikleyicilere iletilir. Bu adaylar daha sonra, küresel tetikleyiciye gönderilerek en yüksek dereceli kalorimetre ve müon nesnelerini belirleyen küresel kalorimetreye ve küresel müon tetikleyicilere geçilir. L1'in bir olayı reddetme veya HLT tarafından daha ileri değerlendirme için kabul etme kararını veren küresel tetikleyicidir. (CMS Collaboration, CERN-LHCC-2000-038, 2000.)

2.4.4.6.(b) Yüksek Seviye Tetikleyici

HLT, yaklaşık 30 ms gecikme süresi olan yaklaşık 1000 işlemciden oluşan bir filtreli sistem uygulanan bir yazılım sistemidir. HLT'nin işi, olay oranını yaklaşık 300 Hz değerinde bir çıkış oranına, kabaca bir depolama diskine yazılabilecek maksimum orana düşürmektir. L1 tetikleyicisi belli verileri

kullanırken, HLT olayın tüm okuma verisine erişebilir ve bir analizde gerçekleştirilenlere benzer karmaşık hesaplamalar yapabilir. Sonuç olarak, olay seçimi için daha karmaşık tetik gereksinimleri oluşturmak mümkündür.

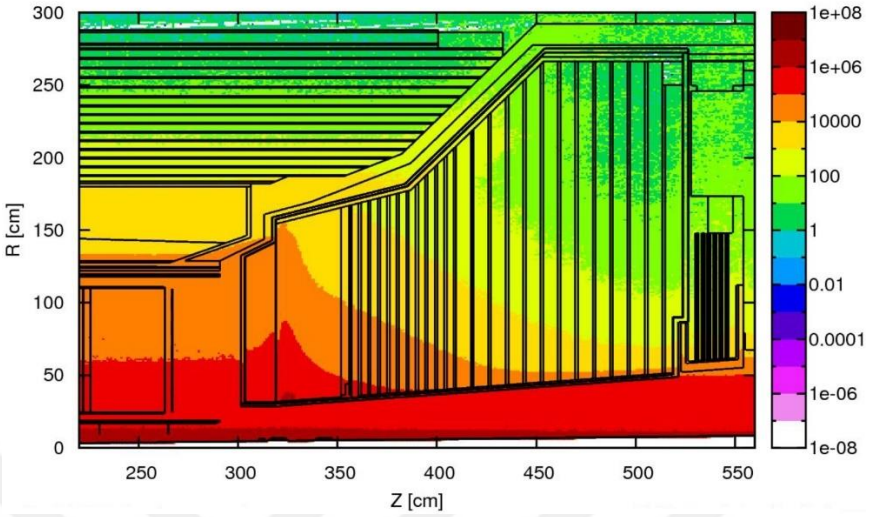
Tahsis edilmiş tetikleyici karar süresinin verimli bir şekilde kullanılması için HLT kodu üç sanal katmana bölünmüştür: müon ve kalorimetre bilgilerinin kullanıldığı seviye-2, L1 tarafından kabul edilen nesnelerden başlayarak daha arıtılmış nesnelerin yeniden yapılandırılması ve ek olarak piksel dedektöründen isabet bilgisinin kullanıldığı seviye-2.5 ve seviye-3 ise tam dedektör bilgisini kullanır. Bu şekilde, hesaplama açısından masraflı olan algoritmalar yalnızca ilginç olaylara uygulanır. (CMS Collaboration, CERN-LHCC-2002-026, 2000.)

3 MATERYAL VE METOT

3.1 HGCAL

3.1.1 YI-BHÇ için CMS HGCAL Geliştirilmesi

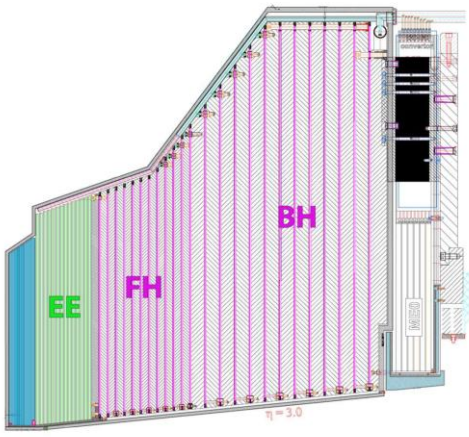
Mevcut CMS kalorimetreleri, BHÇ'de 10 yıllık veri alımı boyunca maksimum 300 fb^{-1} için gerekli şartları karşılamak üzere tasarlanmıştı. Fakat yüksek ışıklılık evresindeki 3000 fb^{-1}'lik gereksinimi karşılamak için dedektörün aktif malzeme ve elektroniğinin yeniden yapılandırılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Öncelikle radyasyon dozuna bağlı olarak dedektörlerin performansındaki düşüşün ele alınması gerekmektedir. Bunun için CMS işbirliği, Faz-2'nin fizik performansını korumak için birçok bileşeni yükseltmeyi planlamaktadır. Bu bileşenlerin bazıları kalorimetrelerdir. YI-BHÇ yükseltme çalışmalarının önemli bir parçası olarak, mevcut ENDCAP kalorimetresi yerine HGCAL seçeneğine karar vermiştir ve teknik tasarımına başlamıştır. Bu değiştirilme işi BHÇ'nin üçüncü kapanması sırasında (2024-2025 yılları arasında) planlanmıştır. Sonuç olarak bu tasarımla, yüksek radyasyon ortamına rağmen, tüm kullanım ömrü boyunca objenin yeniden yapılandırılmasında ve tanımlanmasında mükemmel kalite hedeflenir. Planlanan Faz-2 fizik programı, fotonlar ve elektronların tanımlanması, yeniden yapılandırılması, jetlerin ve kayıp enine momentumun ölçümleri için kritik öneme sahiptir. (https://home.cern/topics/high-luminosity-lhc). Şekil 3.1, 3000 fb^{-1}'lik radyasyon dozuna maruz kalan ENDCAP kalorimetresinin yüksek ve düşük radyasyon alan kısımlarının simülasyonunu göstermektedir. Sağ tarafındaki bar kısmı ise doz seviyesini belirlemek için renklendirilmiştir. Dedektörün tanecikli yapısı, parçacıkların kalorimetre içindeki sinyallerinin izlenmesine ve ayrıştırılmasına izin vererek yüksek performans imkanı sunacaktır.



Şekil 3.1. FLUKA simülasyon programı kullanılarak YI-BHÇ'de CMS ENDCAP kısmında *r* ve *z* koordinatları boyunca maruz kaldığı doz seviyesinin gösterimi. (CMS TDR 019, 2017.)

3.1.2 HGCAL Tasarımına Genel Bakış

HGCAL'in genel tasarımı, Şekil 3.2'de gösterilmektedir. Bu tasarım ilk başta 28 katmanlı altıgen modül ile bir örnekleme kalorimetresi olan elektromanyetik kalorimetre (EE) ile başlar. Bu katman yaklaşık 25 radyasyon uzunluğunda (X_0) veya 1,3 etkileşim uzunluğunda (λ) bir derinliğe sahiptir. EE'nin tamamında aktif malzeme olarak silikonun kullanılması planlanmıştır. Etkileşim bölgesinden dışarı doğru hareket ederken, onu 12 katmanlı ve 3,5 λ derinliğinde, paslanmaz çelik kullanan ön hadron kalorimetresi (FH) takip eder. Bu kısmı da, boyuna yönde ölçüldüğünde toplam 10 λ ve derinliği 5 λ olan 12 katmanlı arka hadron kalorimetresi (BH) takip eder. FH ve BH'nin yüksek radyasyon bölgelerinde aktif malzeme olarak silikonu içerecek şekilde dizayn edilmiştir. Bununla birlikte, FH ve BH'nin düşük radyasyonlu bölgelerinde ise aktif malzeme olarak SiFÇ okumalı plastik sintilatör kullanılacaktır.



Şekil 3.2. HGCAL genel yapısının ve EE, FH, ve BH kısımlarının teknik çizimi. (CMS Collaboration, CERN-LHCC-2015-010, 2015.)

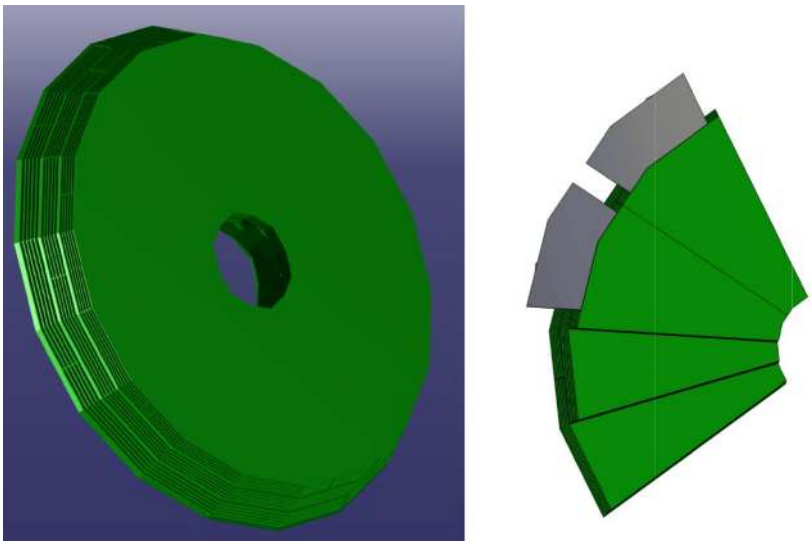
3.1.3 Mekanik Tasarım

EE için önerilen tasarımda, ilk 10 katman 0.65 X_0 kalınlıklı soğurucu, daha sonraki 10 tabaka 0.88 X_0 kalınlıklı soğurucu ve geriye kalan 8 katman ise 1,26 X_0 kalınlıklı soğurucu şeklinde silikon bir düzlemi takip etmektedir. FH ve BH de ise, her birinde 12 katman olmak üzere toplam kalınlık yaklaşık 60 cm'dir. EE, FH ve BH'deki her örnekleme katmanı birbirlerinden bağımsız olarak okunur. Çizelge 3.1, bu katmanların ana parametrelerini göstermektedir. (CMS Collaboration, CERN-LHCC-2015-010, 2015.)

Çizelge 3.1. EE, FH&BH'nin ana parametreleri. (CMS Collaboration, CERN-LHCC-2015-010, 2015.)

	EE	FH & BH	Toplam
Silikon Alanı (m^2)	380	209	589
Kanallar	4,3 M	1,8 M	6,1 M
Dedektör Modülleri	13900	7600	21500
Ağırlık (ton)	16,2	36,5	52,7
Si Düzlemlerin Sayısı	28	24	52

EE'nin genel mekanik tasarımı, ILC (International Linear Collider) TDR'nin 4. baskısında açıklanan, ancak değiştirilmiş bir radyal geometriye sahip olan EE-ILD (International Linear Design) prototipine dayanmaktadır. EE, 30°lik tungsten soğurucu plakaları ve "kaset"lerin yerleştirildiği boş yarıkları ardışık dizildiği bir karbon-fiber yapıdan oluşmaktadır. Her kaset, iki aktif düzlemden ve bunların soğurucu bölgesinin her iki yanındaki ön uç elektroniklerinden oluşur. Soğurucu malzeme, hem mekanik yapı hem de destek ve soğutma sağlar. Bu yapı Şekil 3.3'de gösterilmektedir. Kasetler, soğutma kanalları içeren 6 mm kalınlığındaki bakır bir plakanın her iki tarafında bulunur. Altıgen silikon sensör plaka çiftleri Baskılı Devre Kartı (BDK)'na monte edilir. Sensörlerin diğer yüzeyleri radyasyon uzunluğu açısından uygun kalınlığa sahip tungsten-bakır kompozit taban plakasına yapıştırılmıştır. Taban plakası ve silikon levha arasındaki ince bir Kapton tabakası, sensörün arka düzleminde yüksek voltaj izolasyonu sağlar. (ILC Collaboration, FERMILAB-DESIGN-2007-02 ; CERN-LHCC-2015-010)

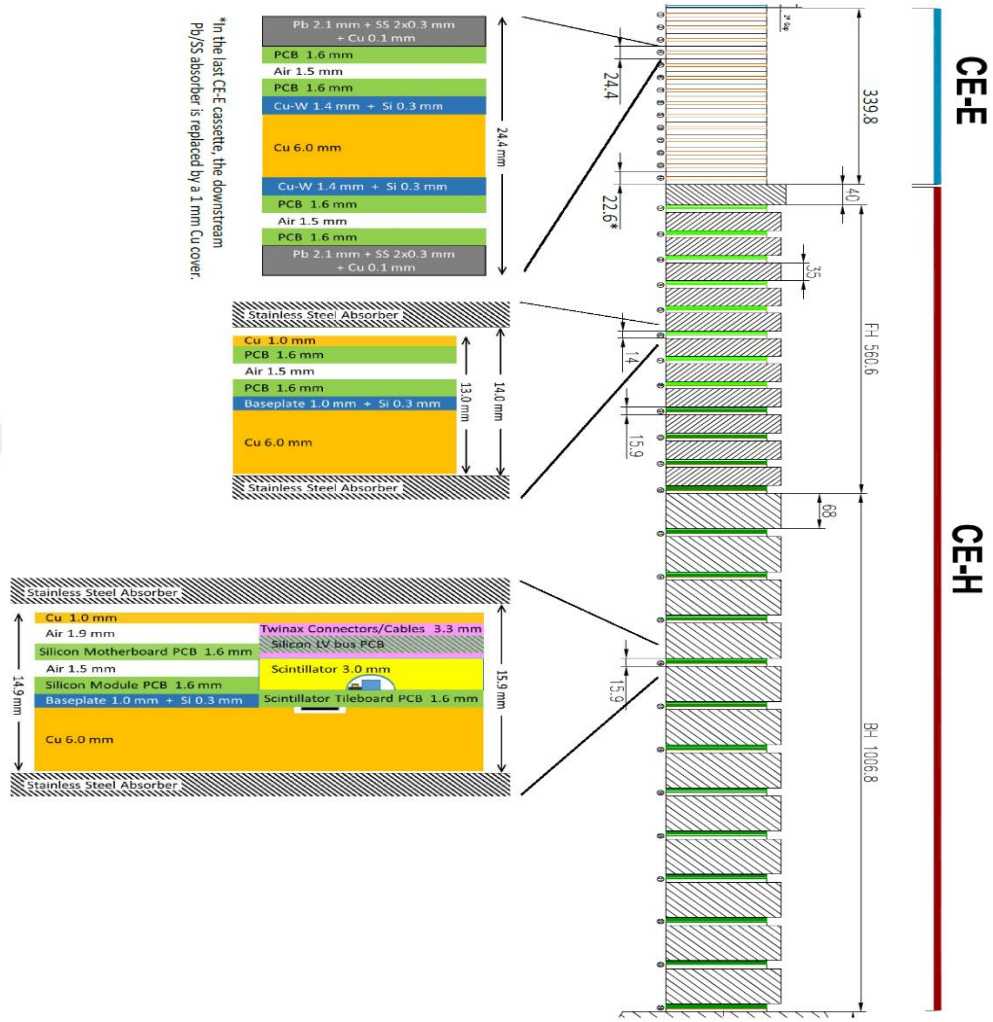


Şekil 3.3. Boş yuvalarla alternatif tungsten soğurucu plakaları birleştiren EE karbon-fiber yapısı (sol). Bir kaset yapısının bir yuvaya yerleştirilmesi (sağ). (CMS Collaboration, CERN-LHCC-2015-010, 2015.)

FH ve BH'nin genel mekanik yapısı da, EE'ye benzer olan ancak tek bir sensör düzlemi taşıyan kasetler ile pirinç levhalar arasındaki yuvalara yerleştirilen sürmeli bir yapıdan oluşmaktadır. Bu kasetlerde, sensör plakası ve Cu soğutma plakası arasındaki bölgenin bir soğurucu olarak işlev görmesi gerekli değildir.

Uçucu etkisi olan CO_2 soğutma kullanılacaktır. CO_2, sıvı fazından $-56°C$ ila $+31°C$ arasında buharlaşır ve pratik bir uygulama aralığı $-45°C$ ila $+25°C$ arasındadır. Soğutma sıvısı, bakır levhalara gömülmüş paslanmaz çelik borulardan geçer. Ön uç ASIC (Application Specific Integrated Circuit) tarafından dağıtılan toplam gücün, kanal başına 10.5 mW olduğu tahmin edilmektedir. Bu da her iki uç kapak için toplam 65 kW'dir. Toplam dağıtılan 100 kW güç, kontrol ve okuma bağlantılarını iletmek için gereken güçtür. 3000 fb^{-1} den sonra her iki uç kapağı için sensörler boyunca kaçak akım tarafından harcanan gücü hesaba katarak, ayrıca soğuk hacim içindeki sistem tarafından dağıtılan 125 kW güç sağlamak için 25 kW güç daha ilave edilmelidir. (CMS Collaboration, CERN-LHCC-2015-010, 2015.)

Yapılacak HGCAL tasarımının kaset yapılarına detaylı bakacak olursak 3 farklı tip kaset yapılacaktır. Elektromanyetik kısım (CE-E) 1 tip, hadronik kısım (CE-H) ise 2 tip kaset yapısı içerecektir. Şekil 3.4'de bu 3 tip kaset yapıları gösterilmektedir.

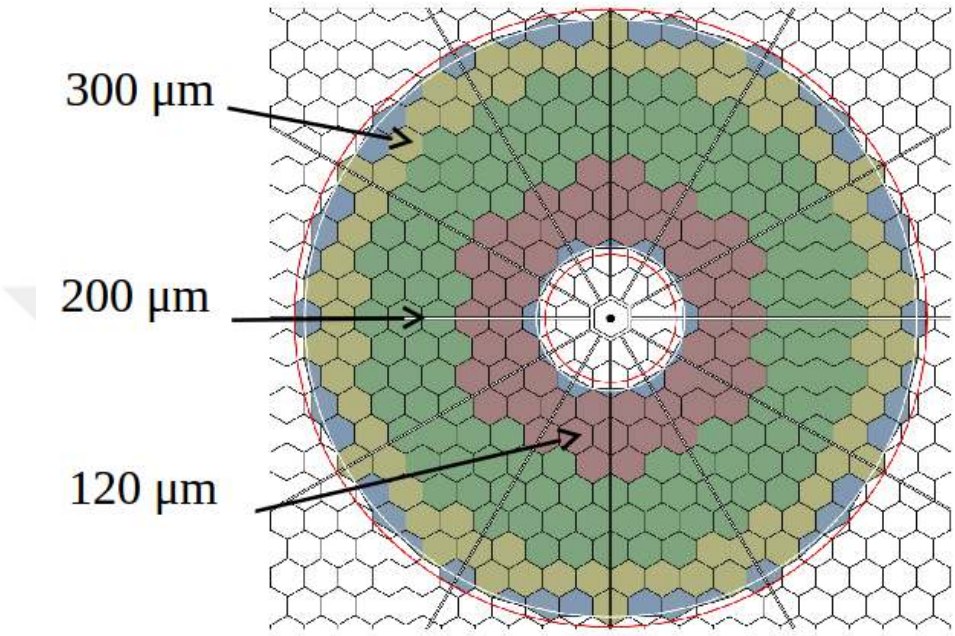


Şekil 3.4. HGCAL'in uzunlama yapısındaki kaset tipleri. (CMS TDR-019, 2017.)

3.1.4 Silikon Sensörlerin Tasarımı

HGCAL için silikon sensörler basit, geniş alanlı, tek taraflı okuma hücrelerinden oluşmaktır. Şekil 3.5'da gösterildiği gibi sensörler, bulundukları yerde beklenen nötron akısı ile belirlenen 300 µm, 200 µm ve 120 µm aktif kalınlıklara sahip olacaktır. Hücre boyutları, hücre kapasitansını yaklaşık 60 pF ile sınırlayacak şekilde ayarlanır. Çizelge 3.2, farklı aktif kalınlıkların kullanıldığı EE ve FH bölgelerini, 3000 fb^{-1} den sonra beklenen maksimum nötron akısını, hücre

boyutlarını ve bir MİP için beklenen S/N (sinyal/gürültü) oranını vermektedir. Bölgeler hüzme ekseninden ölçülen yarıçap (R) ile belirlenir.



Şekil 3.5. Farklı sensörlerin aktif kalınlıklarına göre konumu. Daha ince sensör, beklenen nötron akısının daha yüksek olduğu kalorimetrenin daha iç kısmına yerleştirilmiştir. (CMS TDR-019, 2017)

CMS izleyici tarafından seçilen sensör tipi, yüksek radyasyon dayanıklılığı için n-on-p tipi sensörlerdir. Sensörler ve hücreler, plaka yüzeyini en iyi şekilde kullanmak için altıgen şekillerinde üretilmiştir. Sensörler 6" veya 8" boyutlarında üretilecek ve tam boyutlu altıgen sensör ilk durumda yaklaşık 137 cm^2'lik bir alanı kaplayacaktır.

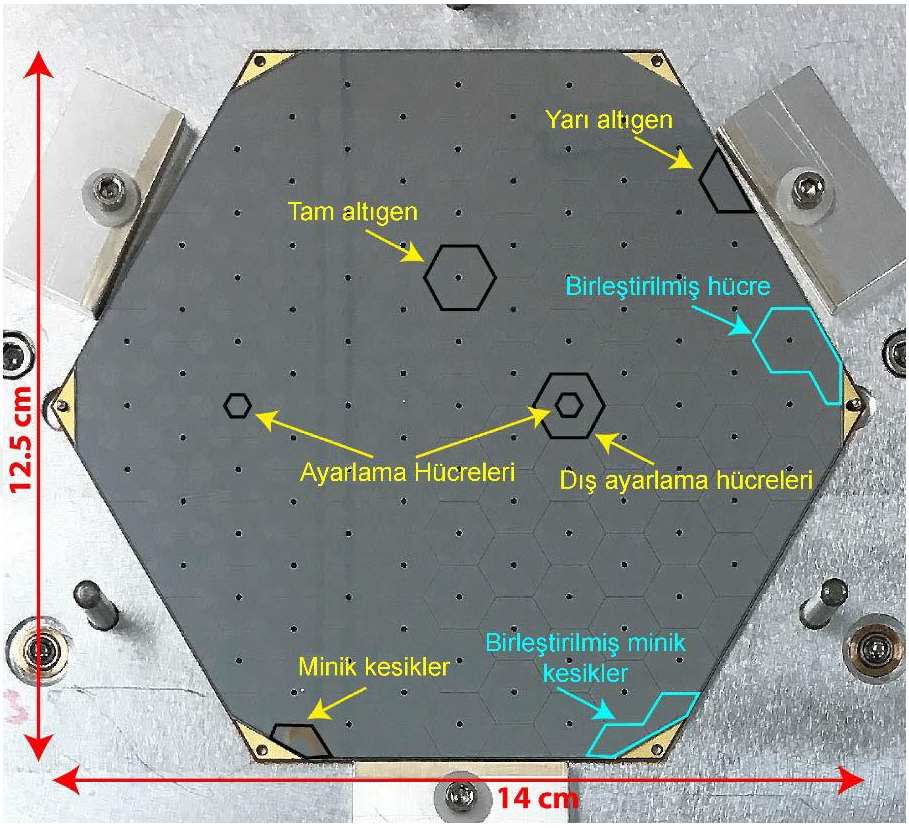
Çizelge 3.2. Farklı kalınlıktaki silikon sensörlerin yerleşimi ve özellikleri. (CMS Collaboration, CERN-LHCC-2015-010, 2015.)

Kalınlık (μm)	300	200	120
Maksimum doz (Mrad)	3	20	100
Maksimum n akısı (cm^{-2})	6×10^{14}	2.5×10^{15}	1×10^{16}
EE bölgesi	$R > 120$ cm	$120 > R > 75$ cm	$R < 75$ cm
FH & BH bölgesi	$R > 100$ cm	$100 > R > 60$ cm	$R < 60$ cm
Si plaka alanı (m^2)	290	203	96
Hücre boyutu (cm^2)	1,05	1,05	0,53
Hücre kapasitansı (pF)	40	60	60
MİP için S/N	13,7	7,0	3,5
3000 fb^{-1} den sonra S/N	6,5	2,7	1,7

3.1.5 Sensör Hücreleri

Sensördeki hücrelerin çoğunluğu 1,1 cm^2'lik alana sahip altıgen şekillerden oluşmaktadır. İki parçaya ayrılmış iki altıgen hücre vardır. Bunlar, tam altıgen hücrenin yaklaşık 1/9'luk kısmı kadar bir "iç kalibrasyon hücresi" ve bunu çevreleyen "dış kalibrasyon hücresi"dir. Daha küçük alanlar daha küçük bir kapasitansla sağlanmaktadır. Sensörlerin kenarlarına "yarı-altıgen hücre" ve köşelerine "birleştirilmiş hücreler" denilmektedir. Şekil 3.6'de bir BDK düzlemi üzerindeki silikon algılayıcıdaki çeşitli hücre tiplerinin gösterimi verilmiştir. Her sensörde 134 bireysel hücre vardır.

Bu, ön-uç ASIC çiftlerinde mevcut olan elektronik kanal sayısını (128) aştığından, sensör çevresindeki bazı hücre çiftleri, "birleştirilmiş minik kesikler" ve "birleştirilmiş hücreler" oluşturmak için BDK'ye elektriksel olarak bağlanmıştır. Bu da toplam 127 okuma kanalı ile sonuçlanmıştır. Bağlanmamış olan bu 1 adet kanal ise iletişim bağlantısı için kullanılacaktır. Her bir hücre tipinin ve okuma kanallarının sayıları Çizelge 3.3'de özetlenmiştir.



Şekil 3.6. Bir modülde hücre tiplerinin gösterimi. (Akchurin, 2018.)

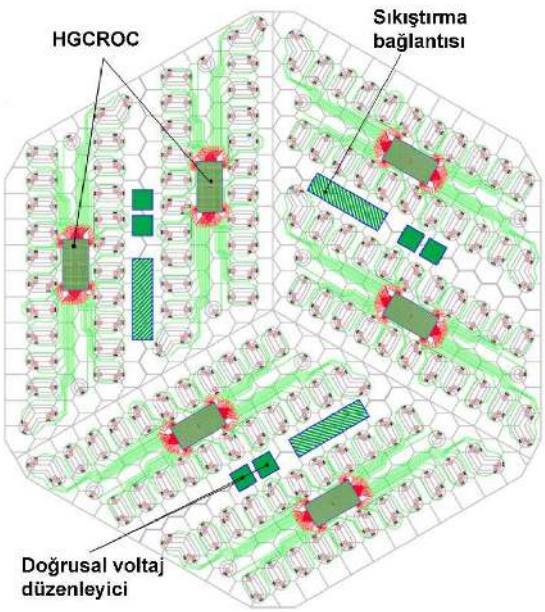
Çizelge 3.3. Hücre tiplerinin sayıları ve okuma kanalları. (Akchurin, 2018.)

	Sensör hücreleri	Okuma kanalları
Tam altıgen	106	103
Yarı altıgen	12	12
Minik kesikler	12	0
İç ayarlama hücreleri	2	2
Dış ayarlama hücreleri	2	2
Birleştirilmiş minik kesikler	0	4
Birleştirilmiş hücreler	0	4
Toplam	134	127

Altıgen plaka, altı köşesinde de minik kesikleri olan yapılardır. Minik kesikler, taban plakasındaki konumlandırma ve birleştirme deliklerine erişim sağlar. Minik kesikler ayrıca altıgen plakalara kablo bağlantıları için Kapton-

Au'nın bir kısmına erişebilme imkânı sağlar. Bu sayede sensörün arka düzlemine ön gerilim uygulanır. Altıgen plaka HGCROC (HGCAL için BDK okuması) ön uç okuma ASIC'lerini içerecektir. Sensör altlıklarından gelen sinyaller dâhili ADC (Analog-Dijital Dönüştürücü) için HGCROC'a yönlendirilir. 432 kanallı sensör için altıgen plaka modül düzeni ve döner halkaların yakınlaştırılmış bir görüntüsü, Şekil 3.7'de gösterilmiştir.

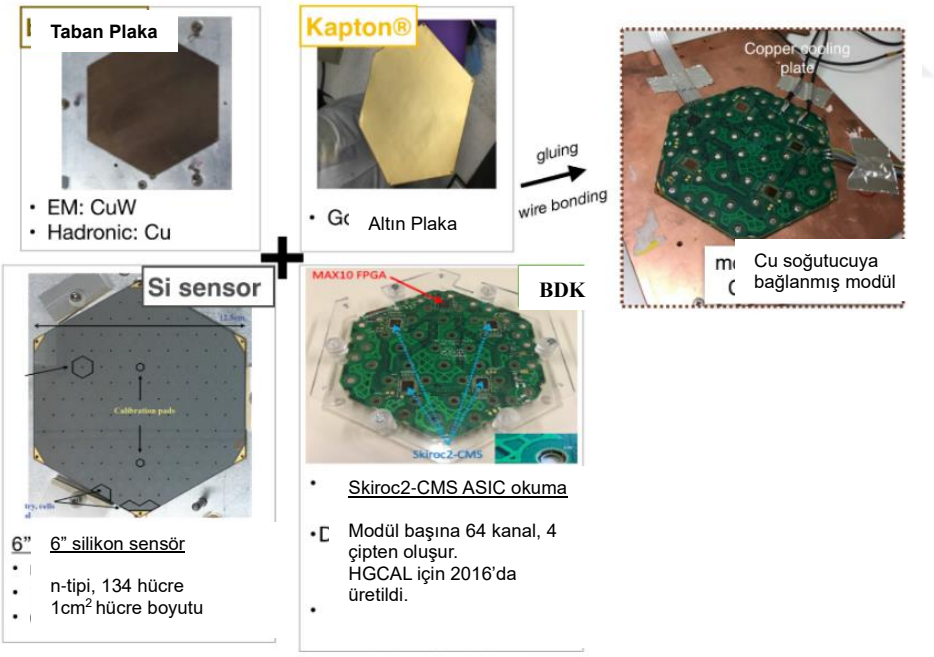
Taban plakası, Kapton, silikon sensörü ve altıgen plaka, tek bir fiziksel ünite oluşturmak üzere epoksi ile birleştirilir. Altıgen plaka üzerindeki bir Au yapıştırma altlığı ve her bir sensör altlığı; arka düzlem ön gerilimi sağlayan Au-Kapton katmanı ve sensör koruyucu halkalar arasında çoklu tel bağlantı kümeleri yapılır. Tel kümeleri şeffaf ve ışımaya karşı korumalı silikon elastomer ile kaplanıp korunur. Modüllere monte edilmeden önce, tüm sensörler hücre başına kaçak akımlarına ve farklı ön mıknatıslama voltajları altındaki dirençlerine göre yerleştirilmiştir.



Şekil 3.7. Altıgen plaka ile BDK okuma bağlantılarının yakınlaştırılmış bir görüntüsü. (CMS TDR-019, 2017)

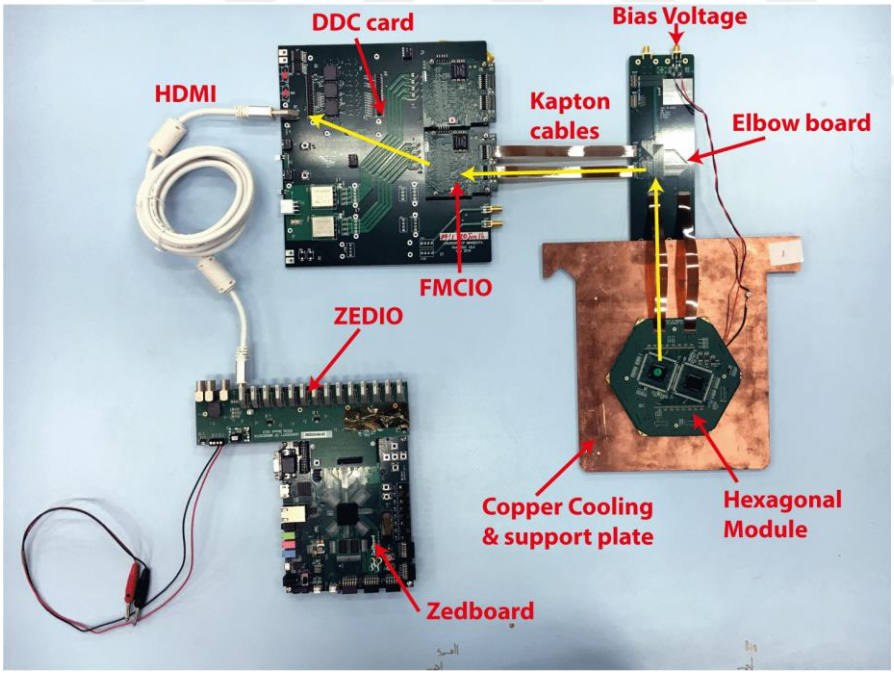
3.1.6 Modül Yapısına Genel Bakış

Şekil 3.8, bir modülün montajını göstermektedir. Modül bileşimi, elektromanyetik kısım için bakır-tungsten (sırasıyla, %25-%75) alt tabakalarından oluşurken, hadronik kısımlarda saf bakır kullanılır. Yalıtım ve ön beslemesi için, altıgen silikon modüller taban plakalarına yapıştırılmadan önce kapton folyo üstüne tutturulmuştur. Folyo, silikon arka paneli bastırmak için altınla kaplanmıştır. Okuma çipleri, sonunda hassas hücrelere bağlanmış tel olan BDK üzerinde bulunur. 2017 hüzme testlerinde, modül başına dört Skiroc2-CMS ASIC çipi kullanılır. Her çip için mevcut 64 kanalın sadece 32'si sensöre bağlıdır. Buna karşılık 2016 modülleri, ilk BDK üzerindeki konnektörlere takılan ek bir BDK'da Skiroc2 ASIC kartı barındırmaktaydı. Son olarak, birleştirilmiş modüller bakır soğutma plakalarına monte edilir ve farklı soğurucu plakalarını içeren esnek askılı dosya yapıya yerleştirilir. (CMS Collaboration, CERN-LHCC-2015-010, 2015.)



Şekil 3.8. HGCAL modülünün 2016/17 deki montajına genel bakış. (Akchurin, 2018.)

Her bir okuma BDK'sına iki Skiroc2 ASIC kartı monte edilerek kart düzeni, ya sade kalıp ya da dörtlü düzlem paketi (QFP) barındırmaktadır. Kalorimetrenin kompakt yapısı, ardışık soğurucular/kasetler arasındaki boşluğu en aza indirmek için testlerde ilk başta düşük profilli bağlantılar kullanılmıştır. Bu, ticari olarak uygun maliyetle temin edilebilen esnek polimed kablolar ve ilgili yüzeye montaj edilmiş konnektörler ile oluşturulmaktadır. Skiroc2 dijital verileri, iki esnek kablo ile bir pasif dik açılı adaptör BDK'ye, daha sonra başka bir esnek kablo ile Çift Kızaklı Taşıyıcı Kartlar (DDC)'a taşındı. Bu DDC, standart FMC (FPGA ara kat kartı) konnektörlerini kullanan ve Xilinx XC7A100T "Artix" FPGA'ları içeren iki "FMCIO" kartına ev sahipliği yapar. DDC, sinyalleri standart bir HDMI konnektörüne yönlendirir. Piyasada satılan diğer bir board olan "Zedboard", "ZEDIO" olarak bilinen başka bir pasif özel board 14 adet DDC yi kontrol edebilecek şekilde veri toplamak için üretildi.



Şekil 3.9. Modülden Zedboard'a kadar giden veri akış sistemi. Sarı oklar, modülden gelen veri yolunu temsil eder. (Akchurin, 2018.)

Tüm tetikleme ve kontrol sinyalleri, Zedboard'dan, Skiroc2'e yukarıda belirtilen diğer boardlar yoluyla yönlendirildi. Bu nedenle tek bir Zedboard, 3564 elektronik kanalları ile bir EE prototipinde yer alan 28 modüle kadar veriyi okuma ve kontrol etme kapasitesine sahiptir. Zedboard'dan ethernet vasıtasıyla PC'ye veri aktarımı yapılmaktadır. (Akchurin, 2018.)

3.1.7 Veri Aktarımı

Ön uç okuma yongaları, 70 kanal genişliğindedir ve her kanal bir yükseltici, bir 40 MHz düşük-güçlü ADC ve sinyal sayısallaştırma için bir mantık kartı içerir. 70 kanal, 63 standart hücre ve 7 küçük kalibrasyon pedine bölünmüş hücre içerir. Okuma kanallarının sayısına göre bir modülde 4 veya 8 ön uç yongası olacaktır. Sensör yüzeyinin çoğunu kapsayan geniş alanlı ve çok katmanlı bir BDK, sinyalleri sensörden ön uç yongalarına tel bağlarla yönlendirecektir.

Ön uç elektroniklerin temel tasarımı için, sensörlere bağlanmış bir yükseltici kullanılır. Büyük sinyallerin sayısallaştırılması için eşik üzeri zaman (ToT) ölçümleri gerekir. ToT, ön uçu, ilk biçimlendirme aşamasından sonra 15 ns, ikinci aşamadan sonra 20 ns ile hızlı bir şekilde biçimlendirilir. Kazanç yaklaşık 25 mV / fC'dir ve 100 fC'ye kadar doğrusaldır; bu yaklaşık 300 μm aktif kalınlıkta plaka kullanan bölgedeki bir 5 GeV elektromanyetik duş içindeki hücrelerde en büyük sinyale karşılık gelir. Bu da yaklaşık olarak 1,5 GeV'lik bir E_T'ye eşittir. Silikonun aktif katmanlarının hücre boyutları ve kalınlıklarının çeşitliliği nedeniyle, sinyal yükü ve E_T arasındaki haberleşme dedektörün tüm η aralığında tutulur. 100 fC'den büyük atımları işlemek için ve küçük atımların ölçümleri için 10-bitlik bir ADC kullanılır. Bu nedenle, ToT mimarisi, yaklaşık 80 fC'den daha büyük bir enerji birikimine sahip her hücre için yüksek hassasiyetli bir zaman ölçümü sağlar. Duşların hassas şekilde zamanlanması ve konumunun ölçülmesi aktif olarak incelenmektedir.

3.2 2016 Yılında Yapılan Testler

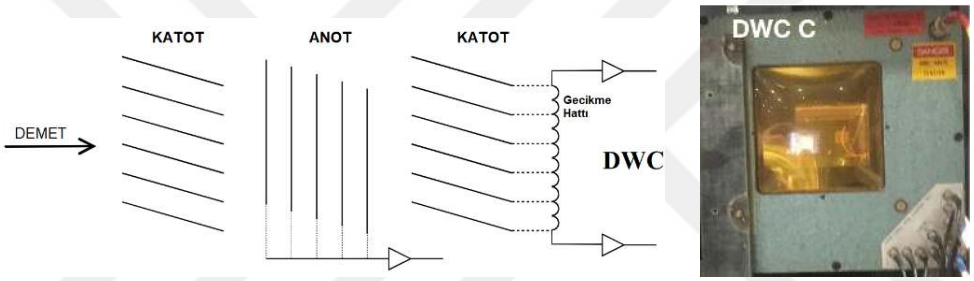
2016 yılında elektromanyetik bölmenin kalorimetrik performansını test etmek için bir prototip üretildi ve hem Fermi Ulusal Hızlandırıcı Laboratuvarı (FNAL)'nda hem de CERN'de test edildi. 2016 yılındaki test edilen modüller Skiroc2-ASIC kartı ile donatılmıştır. Daha önce belirtildiği gibi bu modülleri esnek bir şekilde yerleştirmek için bir askılı dosya yapısı benimsendi. Bu yapı ile farklı örnekleme konfigürasyonlarının araştırılmasına olanak sağlanmıştır. FNAL'deki sistem, uzunluğu 15,3 radyasyon uzunluğu (X_0) olan toplam 16 örnekleme katmandan oluşuyordu. Bu konfigürasyon 4 GeV – 32 GeV aralığında elektronlarla test edilmiştir. Sistemi kalibre etmek için MİP'e yakın olan müon kullanılmıştır. CERN'de ise iki farklı kurulum araştırıldı. Şekil 3.11 ve Şekil 3.12'de gösterildiği gibi iki kurulum 8 örnekleme katmanından oluşuyordu. İlk konfigürasyon modülleri yaklaşık $6X_0$ ve $15X_0$ arasında yerleştirilirken, ikinci konfigürasyonu yaklaşık $5X_0$ - $27X_0$ arasında uzunlamasına bir derinliğe sahiptir. Ayrıca silikon sensörlerin içsel zamanlama yeteneklerini gösteren bir dizi test FNAL'de ve CERN'de yapıldı. Radyasyona maruz kalmış tüm silikon sensörler ve radyasyona maruz kalmamış çeşitli kalınlıktaki diyotlar test edildi. Giriş soğurucularındaki olay elektronları nedeniyle silikondaki sinyallerden kaynaklanan atım şeklini ölçebilmek için özel bir hızlı dijitalleştirici kuruldu.

2016 çalışma süresinin ana hedeflerinden biri prototiplerle alınan veriler kullanılarak dedektör simülasyonunun doğrulanmasıydı. Genel olarak, "FTFP_BERT_EMM" Geant4 fizik listesini kullanarak yüzde yüze çıkmış simülasyon sonuçları ile yapılan uyumluluk, elektron kaynaklı duş şekilleri, derinlikler ve enerji çözünürlükleri ile bulunur. En son iki sonuç sunulmuştur:

Pozisyon Çözünürlüğü: Her duş için, logaritmik bir enerji-ağırlık pozisyonunun ağırlık merkezi hesaplanmış ve Gecikmeli Tel Odaları (DWC) tahmini olarak olarak beklenen etki alanı pozisyonuyla karşılaştırılmıştır.

DWC'nin çalışma prensibi, geçen bir parçacığın gazı iyonize ederek serbest elektronlar oluşturmasına dayanır. Her bir DWC, iki katot arasında bir anot

olacak şekilde dizayn edilmiştir. Yani merkezi bir anot tel düzlemini çevreleyen iki düzlemli bir sandviçten oluşur. Şekil 3.10'da DWC ve iç yapısının şematik gösterimi verilmiştir. Anot ve katotlar arasındaki yüksek voltaj daha sonra elektronları 20 mikronluk anot tellerine doğru yönlendirir. Aynı zamanda, voltajın gerçekleştiği yere en yakın katot tellerinde akım indüklenir. Buna karşılık katot tellerinde indüklenen sinyal, gecikme çizgisinde, her bir yönde bir tane olmak üzere iki atım oluşturur. Aynı yuvaya ortogonal olarak yerleştirilmiş ikinci bir katot ve anot sandviçi diğer düzlemi oluşturur ve iki boyutlu pozisyon okuması verir. (Spanggaard, 1998.)

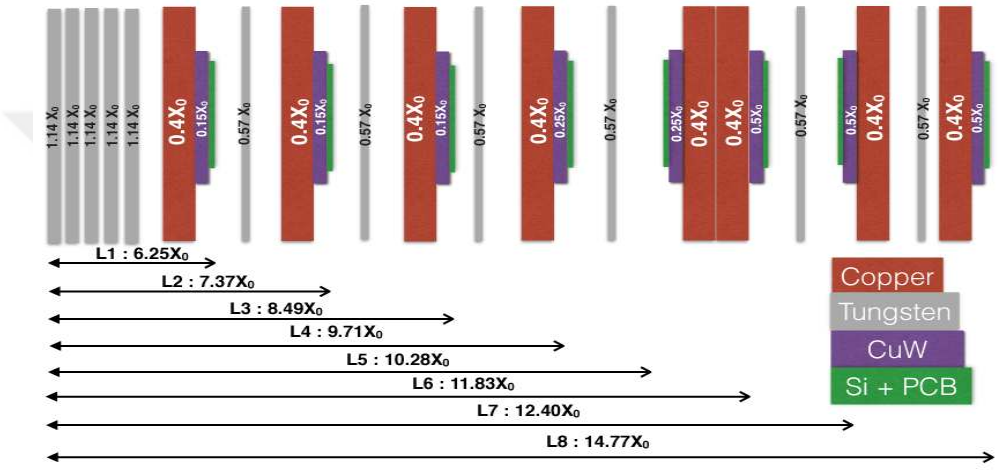


Şekil 3.10. DWC okumasının şematik gösterimi (sol). Test çalışmalarında kullanılan DWC'lerden birinin görüntüsü (sağ). (Spanggaard, 1998.)

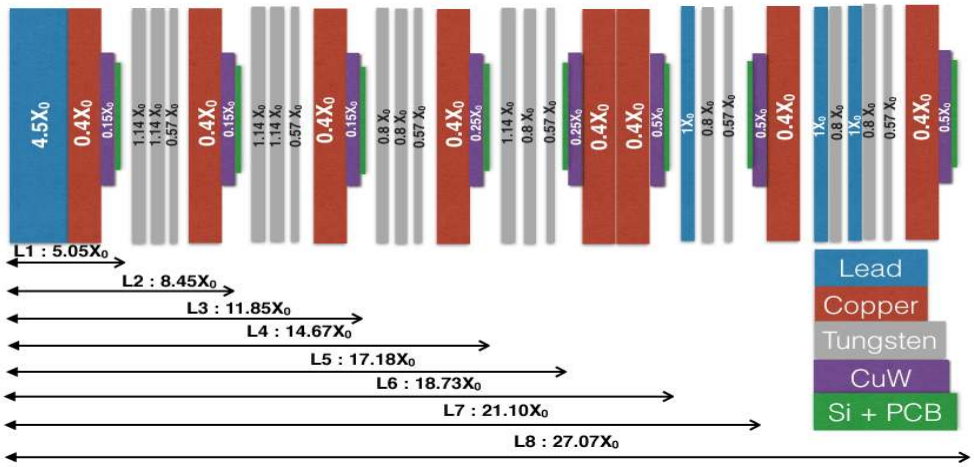
İçsel zamanlama çözünürlüğü: Bu çözünürlük hesabı, ışınlanmamış bir tam sensörün gerçek zamanlama hassasiyetini gösterir. Bu hassasiyetin bir tahmini olarak, sensördeki komşu hücrelerin çiftleri arasındaki zaman farkı, farklı olay elektron enerjileri için hesaplanmaktadır. Zamanlama hassasiyeti, aşağıdaki gibi tanımlanmış olan etkin S/N'nin bir fonksiyonu olarak denklem (3.1)'de gösterilir:

$$(S/N)_{eff} = \frac{(S/N)_{ref}(S/N)_n}{\sqrt{(S/N)_{ref}^2(S/N)_n^2}} \tag{3.1}$$

Burada n, hassas hücreyi ve ref, referans ölçümünü belirtir. İçsel zamanlama çözünürlüğünün, belirli bir S/N'de, parçacıkların enerjisine önemli ölçüde bağlı olmadığı gösterilmiştir. Hem tam altıgen sensörler hem de diyotlar için çözünürlük, 30 MİP (Minimum İyonize Parçacık)'e karşılık gelen $(S/N)_{eff} > 100$ için 20 ps'den daha iyidir.



Şekil 3.11. Konfigürasyon I. (2018 JINST 13 P10023)



Şekil 3.12. Konfigürasyon II. (2018 JINST 13 P10023)

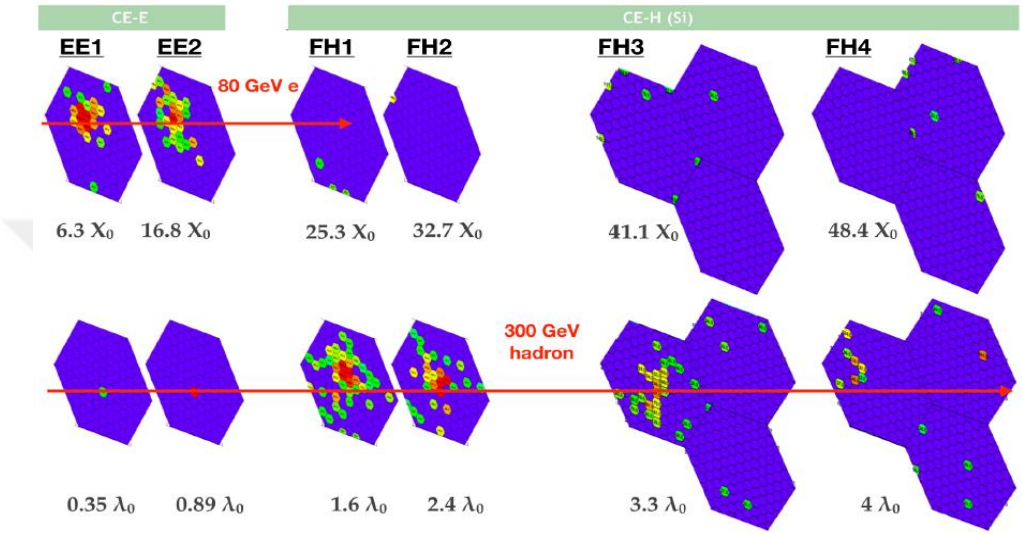
3.3 2017 Yılında Yapılan Testler

2017 yılındaki kurulum, hadronik bölümü için genişletildi. HGCAL'in hadronik kısmı için planlandığı gibi, bu bölüm soğurucu olarak çelikten oluşuyordu. Hadronik duşlar, HGCAL sisteminin bir prototipi ile araştırıldı. Test edilen modüller Skiroc2-CMS ASIC kartı ile donatıldı. Bu yonga, daha önceki Skiroc2'nin geliştirilmiş halidir, örneğin; 5–80 ns işlemci süresiyle CMS gereksinimlerini daha iyi karşılayacak şekilde ayarlanmıştır. Yeni okuma çipi, bu dedektörün zamanlama özelliklerinin araştırılmasına izin verir. Bunun bir sonucu olarak, veri toplama sisteminin revize edilmesi gerekiyordu. Bunun için özel okuma panoları tasarlanmış ve üretilmiştir. (Borg, J. ve ark., 2017.)

Çoklu modüller, bir okuma kartına HDMI kablolarıyla bağlanmıştır. Özel bir senkronizasyon kartı, okuma çiplerine ortak gönderim saati sağlamıştır ve tetik sinyalini dağıtmıştır. DAQ yazılımı EUDAQ çerçevesinde yazılmıştır ve IPbus kontrol sistemini kullanmaktadır. Bu sistem kullanılarak ilk veriler Temmuz ve Ekim 2017'de CERN'nün SPS'sinde alınmıştır.

2017 prototipi, HGCAL tasarımının elektromanyetik ve hadronik bölümlerini temsil eden kısım, silikon-bazlı parçalardan oluşuyordu. Tamamen monte edilmiş fonksiyonel modüllerin sayısının az olmasından dolayı, Temmuz ayında yapılan ana test için yalnızca birkaç örnekleme katmanı gerçekleştirilebildi. Sintilatör tabanlı hadronik kısmı taklit etmek için, CALICE'in AHCAL prototipinin 5 λ_0 sürümü, silikon modüllerinin aşağı yönde ve paralel olarak yerleştirilerek okunması sağlanmıştır. Tam sistem, elektromanyetik bölümde iki katmandan, silikon-bazlı hadronik bölüm ise dört katmandan yapılmıştır. Sadece AHCAL'ın kendisi 12 aktif katmandan oluşmaktadır. Elektromanyetik kısımın derinliği 17 X_0 idi, silikon bazlı hadronik kısım 4 λ_0'da sona erdi ve AHCAL bir 5 λ_0 daha ekledi. SPS-H2 hüzme hattında gerçekleştirilen Temmuz testinde, sistemi araştırmak için 80 ve 200 GeV elektronlarının yanı sıra 100–300 GeV hadronlar kullanıldı. MİP sinyalleriyle kurulumu kalibre etmek için müonlarla yapılan özel çalışmalar kaydedildi. Şekil 3.13, 300 GeV hadronlar ve 80 GeV elektronları için

silikon-bazlı bölmelerde kaydedilen sinyalleri göstermektedir. Bu sonuçlardan sonra 17 ve 20 modüllerden oluşan örnekleme konfigürasyonları ekimdeki hüzme ile test edilecek hale gelmiştir. (CALICE collaboration, arXiv:1711.03796, 2017.)



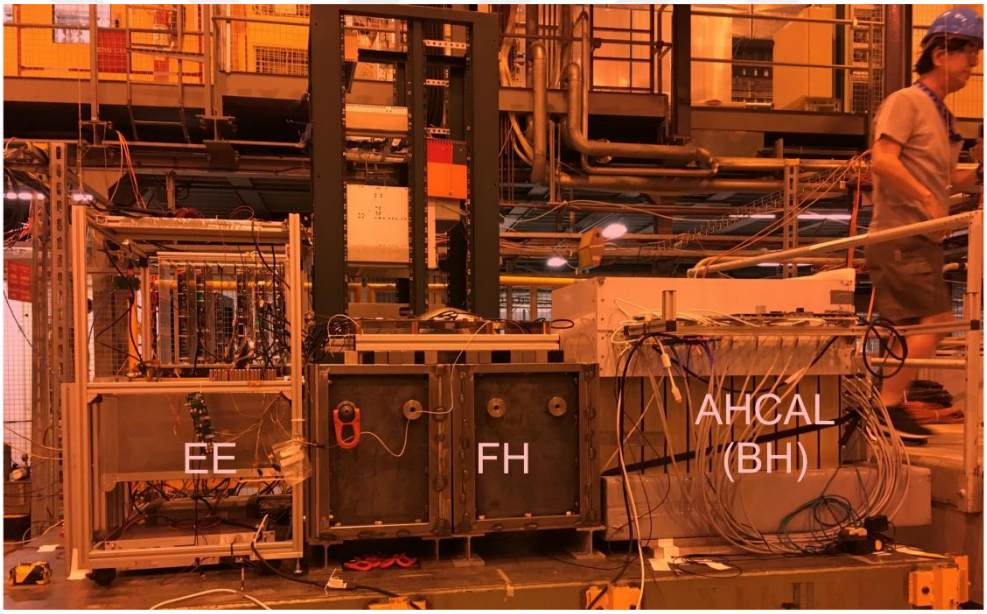
Şekil 3.13. Temmuz 2017 testindeki 80GeV elektronlar(üst) ve 300GeV hadronlar(alt) için silikon-bazlı prototipin GEANT4 simülasyon sonucu. (CMS-TDR019)

2017 modüllerinde yüksek seviyede mod gürültüsü mevcuttu. Sebebi hala araştırılmaktadır. Bu yaygın ortak mod gürültüsünün çoğu, çevrimdışı sinyal yeniden yapılandırma prosedürü kullanılarak olay olay belirlenebilir ve hesaplamalardan çıkarılabilir. MİP'lerin neden olduğu birçok hücre için genlik spektrumu hesaplandı ve MİP sinyalleri gözlendi. Bu spektrumdaki gürültü, sadece ilgili olayın, hüzme hattındaki dört DWC'den tahmini olarak elde edilen gürültü verileri seçilerek elenebilir.

2017 yılında alınan verilerin analizi ve sonuçları dedektör simülasyonu ile karşılaştırılmıştır. Özellikle, farklı fizik listelerinin karşılaştırılması ve zamanlama özelliklerinin kaydedilen Skiroc2-CMS ASIC ile keşfedilmesi hedeflenmektedir.

Başarılı bir kalibrasyondan sonra, AHCAL verilerinin, kombinasyonlu ve kombinasyonsuz şeklinde enerjinin yeniden yapılandırılması ile çalışılmaktadır.

2018'de daha fazla hüzme testi Fermilab, DESY, IHEP Beijing ve CERN'de planlanarak temel amacın, sistemi daha fazla modülle genişletmek ve zamanlama performansını daha da ayrıntılı bir şekilde keşfetmek olmuştur. Modüllerin laboratuvar testleri, gözlenen gürültünün kaynağını araştırarak sensör kalibrasyonunun anlaşılmasına yardımcı olarak geliştirilmeye devam etmiştir. CERN'de kurulan HGCAL test düzeneğinin gerçek görüntüsü Şekil 3.14'de verilmiştir.



Şekil 3.14. HGCAL test düzeneğinin CERN'deki gerçek görüntüsü. EE, FH ve BH kısımlarının görüntüsü.

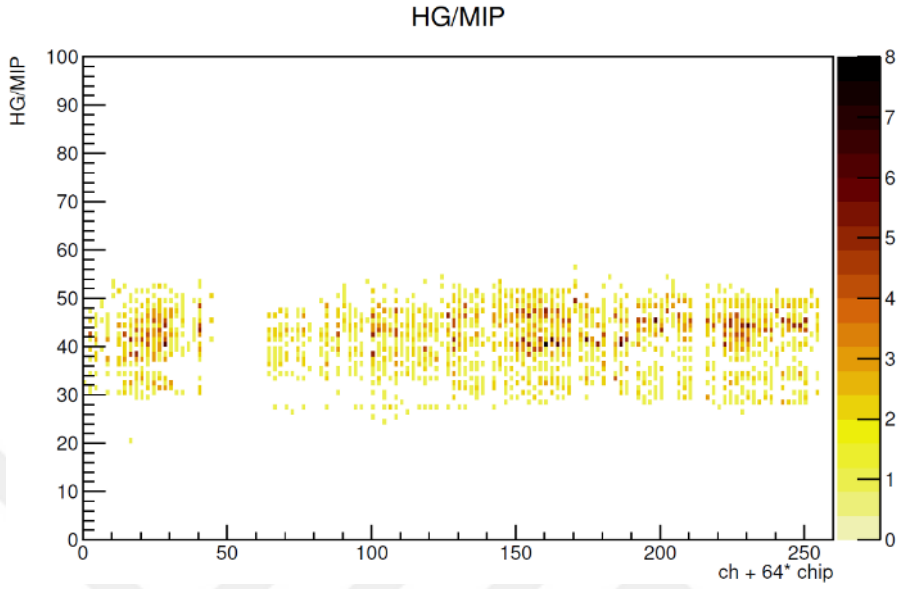
4 ARAŞTIRMA VE BULGULAR

4.1 MİP Analizi

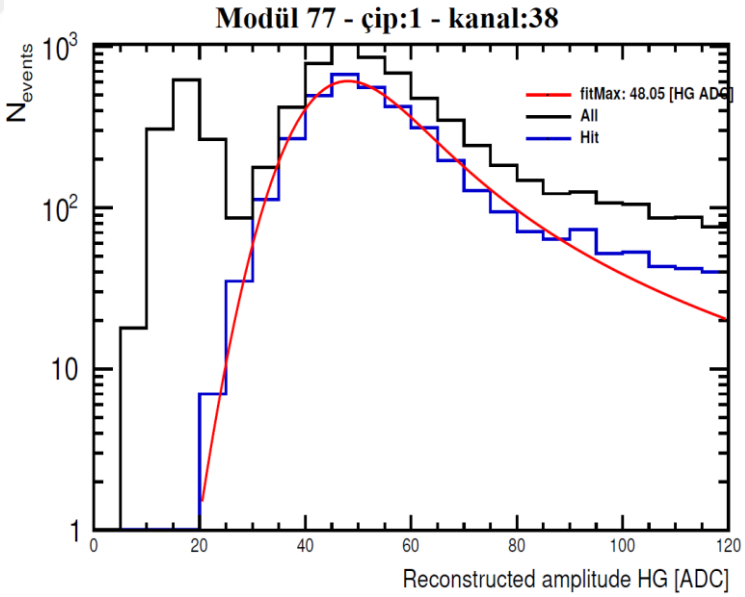
Bu tez çalışmasında, bir dedektörün en iyi şekilde yürütülmesini sağlayan yöntemlerin en önemlilerinden birisi olan MİP çalışmaları yapılmıştır. MİP analizi, ortamda ender olarak etkileşime giren parçacıkları temsil etmek için kullanılan bir çalışmadır. Bu parçacıklardan en önemlileri müon ve bazı yüklü hadronlardır.

Dedektör, gelen parçacık demetindeki MİP'leri algılayabilecek şekilde kalibre edilmelidir. Demet gönderildiğinde, dedektör, hem gönderilen parçacık sayısına hem de enerjisine yakın bir ölçüm yapmalıdır. Kalibrasyonlar bu ölçüme en yakın sonucu elde edene kadar devam etmektedir. Bunun için iki çalışma bulunmaktadır. MC sonuçları ile karşılaştırmak ve katmanlarda ölçülen MİP'lerin yeniden yapılandırılmış yüksek kazanım grafiklerini kontrol etmektir. Böylelikle bir dedektörün hangi parçacığı nerede algıladığının doğruluğu artmaktadır.

Bu analiz, 2018 yılı Ekim ayında yapılan demet testlerinde alınan veriler ile yapılmıştır. Gürültü elemesi yapılan Ekim verilerinin MİP analizlerine başlanılmıştır. Bu analiz ilk olarak 200 GeV'lik müon hüzmesi için yapıldı. Farklı enerji değerleri için en yüksek olay sayısına sahip runlar kullanıldı. Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de 200 GeV'lik müon hüzmesinin ilk analiz sonucu yer almaktadır. Şekil 4.1'de tüm kanallardaki çiplere karşılık gelen doluluk oranı verilmektedir. Şekil 4.2'deki grafikte yer alan siyah çizgi: o kanalda algılanan tüm veriyi, mavi çizgi: dedektörde alınan verilerin gürültüden arındırılmış halini, kırmızı çizgi ise: fiti gösterir, yani sinyallerin normalde nasıl olması gerektiğini göstermektedir.



Şekil 4.1. 200 GeV'de gönderilen müon hüzmesinin HGCAL'deki modüllerin tüm çip ve kanallarındaki MİP başına düşen yüksek kazanç grafiği.



Şekil 4.2. 200 GeV'lik müon hüzmesinin en çok etkileştiği kanalın ADC'sindeki olay sayısı.

Normal bir CMS run'ı milyonlarca veri içerdiğini düşünecek olursak, bizim analiz ettiğimiz rootların her birinde yaklaşık 10.000 olay vardır ve bu rakam az gelmektedir. Bu sebepten dolayı analizlerimizi yaparken tek bir run numarası yerine birkaç run numarasını aynı anda kullandık. Buna rağmen verilerin az gelmesinden dolayı fit yapamadığımız grafikler olmuştur. Bunun için bir kesme komutu kullanarak oradaki verileri dışarladık. Bu nedenle Şekil 4.1'deki boşlukların sebebi bu az verilerdir yani başka bir sorun teşkil eden bir yanı yoktur. Çizelge 4.1'de örnek olarak müon 200 GeV düzeyindeki runların olay sayıları verilmiştir.

4.2 MİP Kalibrasyonu

MİP sabiti, örneğin müonlar için bir kanalın ADC'sinde en olası enerji birikimi olarak da tanımlanabilir. Diğer kalibrasyon sabitlerinin yanı sıra MİP sabiti, ADC değerini MİP'in enerji ölçeğine dönüştürmek için çok önemli bir sabittir ve kalorimetredeki enerji birikimini bu eşdeğerlerinde gösterir. Tek tek kanallar (i.) için ADC'den MİP'e dönüşüm yapmak için denklem 4.1 kullanılır.

$$A_i = \frac{{f_{sat}^{i}}^{-1}((a_i - P_i).\frac{IC_i}{G_i^{CM}(T)})}{LY_i} \tag{4.1}$$

Burada A_i, MİP genliğini, a_i, ADC genliğini, P_i, sinyaldeki gürültüyü, $G_i^{CM}(T)$, SiPM kazancını, IC_i, kalibrasyon faktörünü, ${f_{sat}^{i}}^{-1}$, SiPM piksel doygunluk oranını ve LY_i ise MİP sabitini barındırarak enerji depolama miktarını vermektedir.

Çizelge 4.1. 697-722 Run aralığı için 200 GeV'lik müon hüzmesinin olay sayıları. (https://docs.google.com/spreadsheets/d/1FlwthMixJHmHVBguYSbw5mIeBo2tF7rFJPTYLTNI9Vs/edit#gid=290023431)

Tarih	**Run No**	**Olay Sayısı**	**Başlangıç Zamanı**	**Bitiş Zamanı**	**Parçacık**	**Enerji**
17-Oct	697	10147	00:03	00:23	Muons	200
17-Oct	698	343	00:25	00:27	Muons	200
17-Oct	699	10674	00:30	00:50	Muons	200
17-Oct	700	12948	00:50	01:15	Muons	200
17-Oct	701	10268	01:15	01:38	Muons	200
17-Oct	702	6000	01:38	01:53	Muons	200
17-Oct	703	85	02:01	02:01	Muons	200
17-Oct	704	11471	02:02	02:23	Muons	200
17-Oct	705	10250	02:23	02:43	Muons	200
17-Oct	706	0	02:43	02:44	Muons	200
17-Oct	707	0	02:45	02:45	Muons	200
17-Oct	708	10132	02:49	03:08	Muons	200
17-Oct	709	10116	03:10	03:28	Muons	200
17-Oct	710	10013	03:29	03:48	Muons	200
17-Oct	711	555	03:53	03:54	Muons	200
17-Oct	712	10058	03:57	04:17	Muons	200
17-Oct	713	10054	04:19	04:37	Muons	200
17-Oct	714	10026	04:40	05:00	Muons	200
17-Oct	715	10079	05:07	05:21	Muons	200
17-Oct	717	10114	05:23	05:35	Muons	200
17-Oct	718	41830	05:37	06:46	Muons	200
17-Oct	719	10028	06:49	07:17	Muons	200
17-Oct	721	10132	07:19	07:31	Muons	200
17-Oct	722	10049	07:32	07:41	Muons	200

MİP ’ler tarafından depolanan enerjinin dağılımı ve ADC değerleri, yaklaşık olarak bir Gaussian Landau Fit modeli ile üretilmiştir. Kullanılan bu Landau Fit formülünün dağılımı ile HGCAL’de alınan sonuçların birbiriyle uyum içerisinde olup olmadığı karşılaştırılmıştır. Mesafe başına depolanan enerji miktarı, kalorimetre derinliğinden bağımsız olarak kabul edilebilir. Bu amaçla 2018 demet testlerinde ilk olarak yüksek enerjili müonlarla özel çalışmalar yapıldı.

Gürültülerin çıkarılması ve MİP kalibrasyonu müon test hüzmesi için genel olarak kullanılır. Bu MİP kalibrasyonu 3 adımdan oluşur:

- Ham veriyi .root dosyasına dönüştürmek.
- Otomatik tetikleme modunda pedestal ve gürültü sabitlerinin çıkarımı.
- MİP sabitlerinin çıkarılması, Landau-Gauss uyumunun hataları ve uyum parametreleri.

Bu çalışmada genellikle 3. adım ile ilgili çalışılmıştır. MİP sabiti hazır paket programlar ile çıkarılmıştır. Bu program her kanal için histogramları 0-8 bellek hücresinden 1 ADC genliği ile doldurur (daha yüksek bellek hücrelerinde olası sıçramalarını önlemek için). Bundan sonra 3 aşamalı Landau-Gaussian Fiti uygulanır. Birinci aşama, Gauss ve Landau genişliği için uyum parametrelerinin alt ve üst sınırlarını belirleyerek grafiğin altındaki alan hariç tüm Landau-Gauss uyum parametreleri sabitlenir. İkinci aşama, en uygun fiti belirlemek için integral işleminin ardından parametreler tekrarlanır. Son aşamada ise her kanal için MİP sabiti olarak belirlediğimiz maksimum fit noktası bulunur. Çıkarılan kıvrımlı Landau-Gauss grafiği eğer tek pik yapıyorsa uyumludur, birden fazla pik yapıyorsa bu analizler tamamıyla yanlıştır diyebiliriz.

4.2.1 Müonlarla Kalibrasyon

Yüksek enerjili müonlar, kalorimetre içindeki parçacık duşlarını tek başına başlatma eğiliminde değildir. Hücrelere gelen sinyallerin yanı sıra, sistemdeki gürültüye bağlı fiziksel olmayan sinyaller oluşturulmuştur. Bu tür sinyallerin oranı yaklaşık olarak %0,1'dir. Aynı zamanda, sadece az sayıda fiziksel sinyal reddedilir. Dikkat çekici bir şekilde, MİP'ler tarafından depolanan enerji spektrumu, düşük sinyalli ADC'de bile belirgindir.

Bu kalibrasyonları yapmak için modül dizilimleri de çok önemli bir faktördür. Modül hizalamaları aritmetik olarak sıralanmamıştır. Bu hizalama, χ^2/ndf oranına göre hesaplanıp büyük değerden küçük değere doğru hizalanmıştır, yani en fazla değeri alan modül en öne konmuştur. χ^2/ndf, bir istatistiksel hesap olup analiz çalışma kodlarımızda bu hesap root dosyalarından alınarak hesaba işlenmiştir.

Hizalama işlemleri EE ve FH kısımları için ayrı ayrı yapılıp sonra EE+FH olarak birleştirilmiştir. Aşağıda bu katmanlarda yer alan modül numaralarının dizilimi verilmiştir:

EE içi hizalama: {78, 90, 89, 88, 77, 85, 84, 32, 69, 79, 76, 83, 70, 73, 86, 87, 82, 72, 67, 65, 35, 36, 44, 51, 142, 143, 145, 144}

FH içi hizalama: {98, 105, 115, 95, 40, 96, 101, 123, 113, 122, 34, 104, 106, 100, 97, 37, 99, 111, 121, 94, 114, 118, 120, 124, 107, 108, 102, 109, 136, 138, 141, 140, 147, 139, 137, 134, 146, 91, 132, 130, 131, 133, 127, 135, 125, 126, 119, 129, 128, 53, 48, 38, 46, 39, 45, 42, 55, 66, 75, 63, 59, 64, 71, 62, 54, 43}

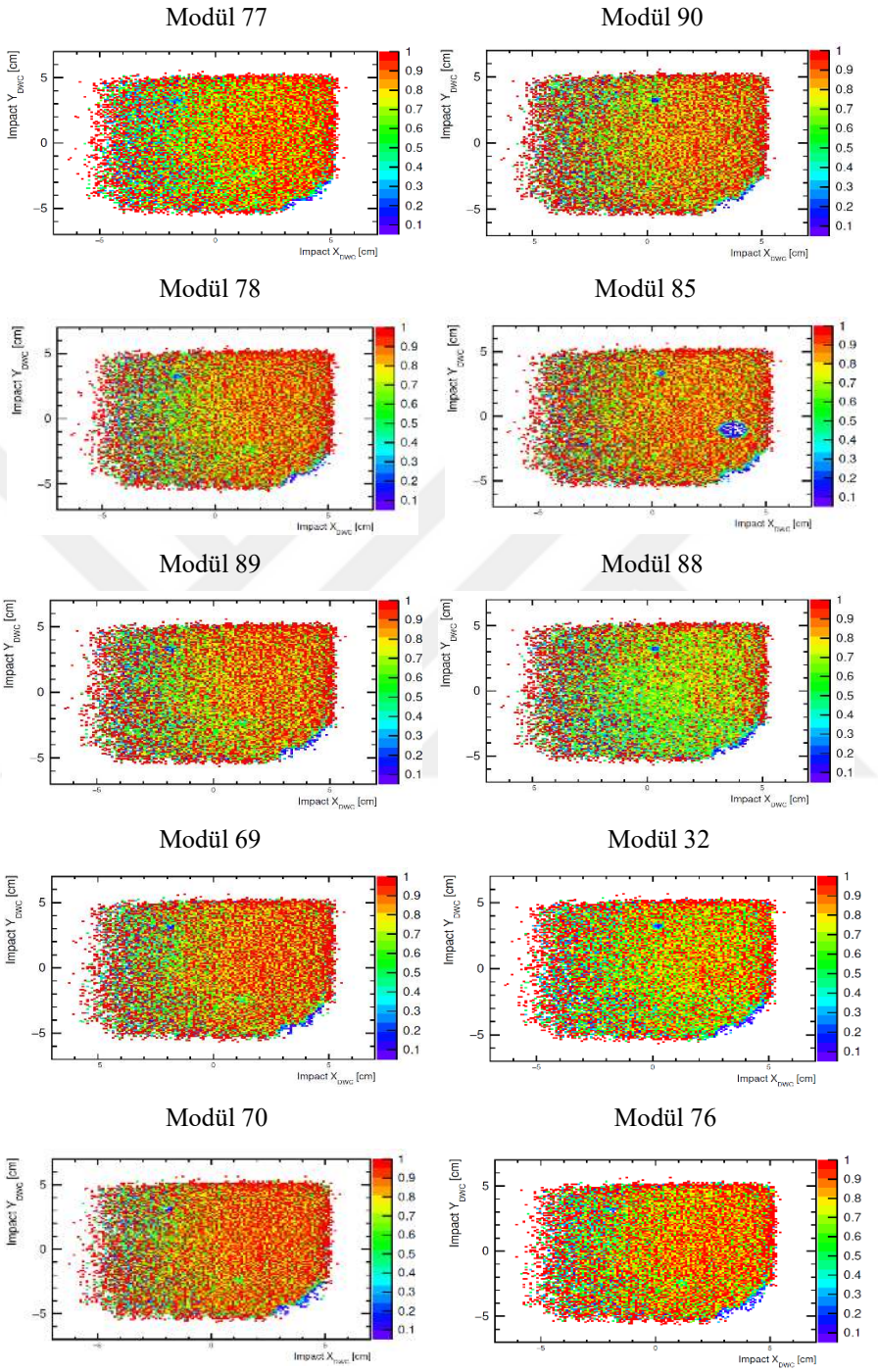
Alınan 381 numaralı Run dosyasının incelenmesi sonucu hatalı okuma tespit edilmiştir. Bu arıza ile ilgili yapılan araştırmanın ardından 22. kanalda bir arızanın olduğu onaylanmıştır. Arızanın sebebi 22. kanal üzerindeki mikro-HDMI bağlantısı esnasında o hücrenin zarar görmesidir. Bu sebepten dolayı oradaki kanaldan düzgün sinyal alabilmek mümkün olmamaktadır. Çalışmaların daha

doğru yürütülebilmesi adına ilerleyen süreçlerde 22. kanal analizlerde dışarlanmıştır.

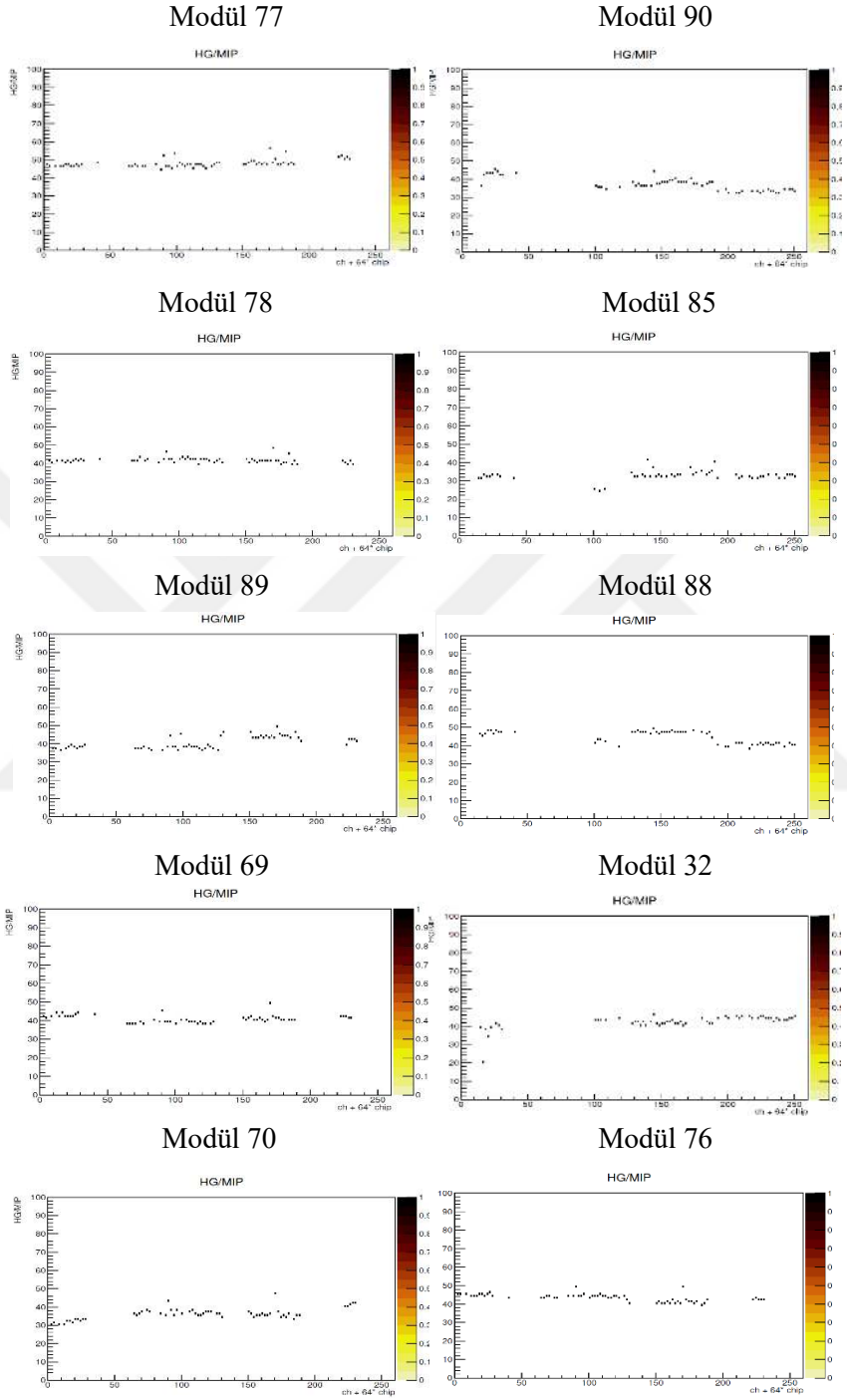
Şekil 4.3, HGCAL verilerini, DWC bilgileri kullanıldığında en çok etkileşime maruz kalan 10 modülün etki faktörlerinin parçacık yoğunluğunu göstermektedir. *x*-ekseni DWC'den alınan X etki faktörünü, *y*-ekseni ise DWC'den alınan Y etki faktörünü göstermektedir. Etki faktörü, modül üzerinde sinyal aldığı parçacık yoğunluğu olarak tanımlanır. 200 GeV'lik müon hüzmesinin doluluk oranına bakacak olursak bu birimlerin parçacıkları algılama performansının iyi olduğu görülmektedir. Buradaki amaç, altıgen modüllerde kullanılan silikon sensörlerin herhangi bir sorununun olup olmadığının kontrolünün sağlanmasıdır. HGCAL prototipinin test verileri için kullanılan DWC'lerin kapton koruyucu filmleri, 11 cm X 11 cm'lik alanı kapsar.

Şekil 4.4, en çok etkileşime maruz kalan 10 modülün yüksek kazanç değerlerini vermektedir. *x*-ekseni o modülün tüm kanal ve çiplerini, *y*-ekseni ise yüksek kazancın MİP'e oranını göstermektedir. HGCAL demet testlerinde modül başına 4 adet çip , 64 adet kanal kullanılmıştır. Yüksek kazanç oranlarına bakacak olursak modüllerin birbirleriyle uyum içinde olduğu ve algılama performansının iyi olduğu görülmektedir.

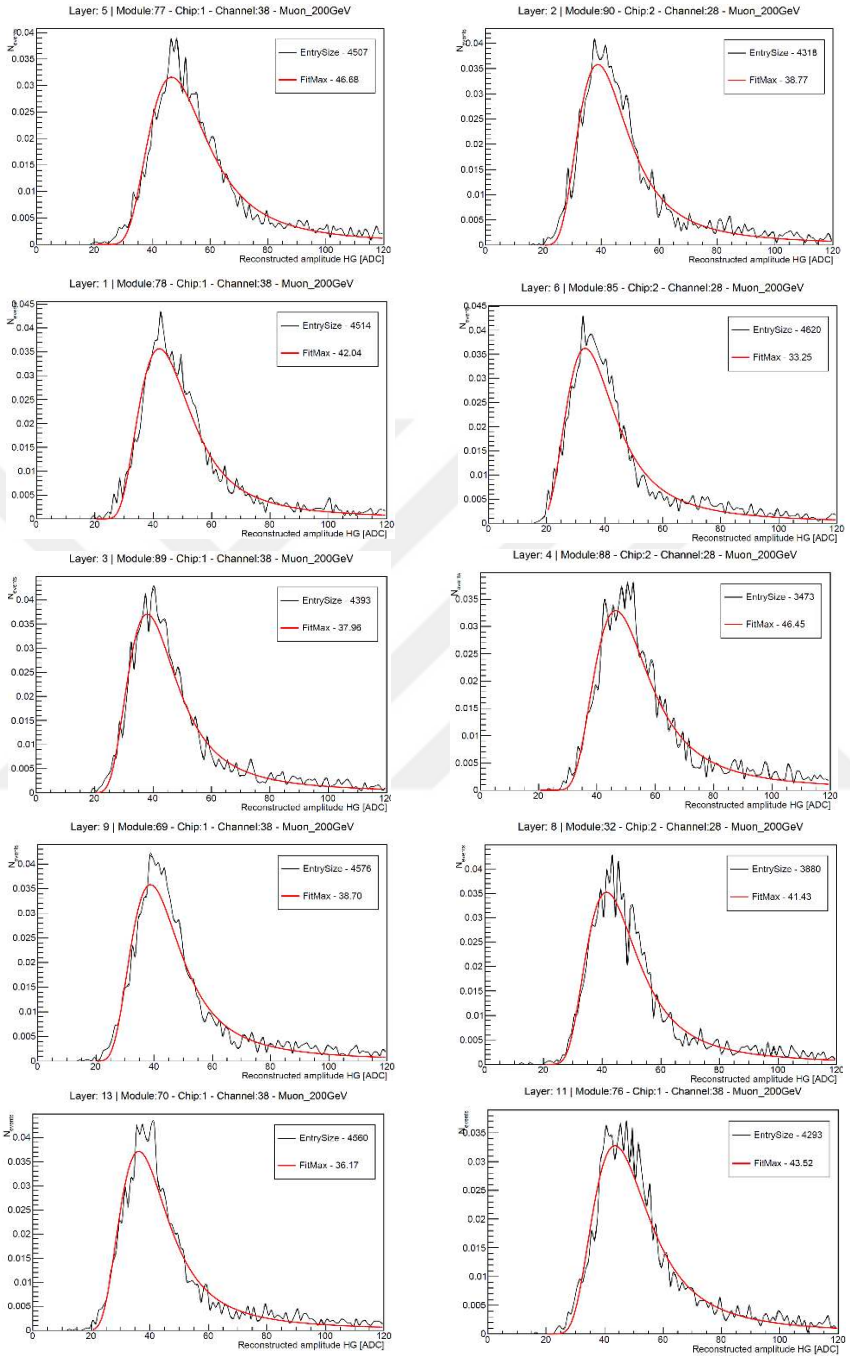
Şekil 4.5 ise elde edilen ilk sonuçların kalibrasyon aşamasından sonra uygulanan normalize işleminden sonraki yeniden oluşturulmuş ADC spektrumlarını vermektedir. *x*-ekseni ADC sayısını, *y*-ekseni ise olay sayısını (normalize olmuş) göstermektedir. Siyah çizgi etkileşme sayısını, kırmızı çizgi ise Gaussian Landau Fit çalışmasını göstermektedir.



Şekil 4.3. DWC bilgileri kullanıldığında en çok etkileşen 10 modülün etki faktörü.



Şekil 4.4. 200 GeV'lik müon testinde en çok etkileşen 10 modülün yüksek kazancı.



Şekil 4.5. 200 GeV'lik müon testinde en çok etkileşen 10 modülün normalize ve fit uygulanmış dağılımları.

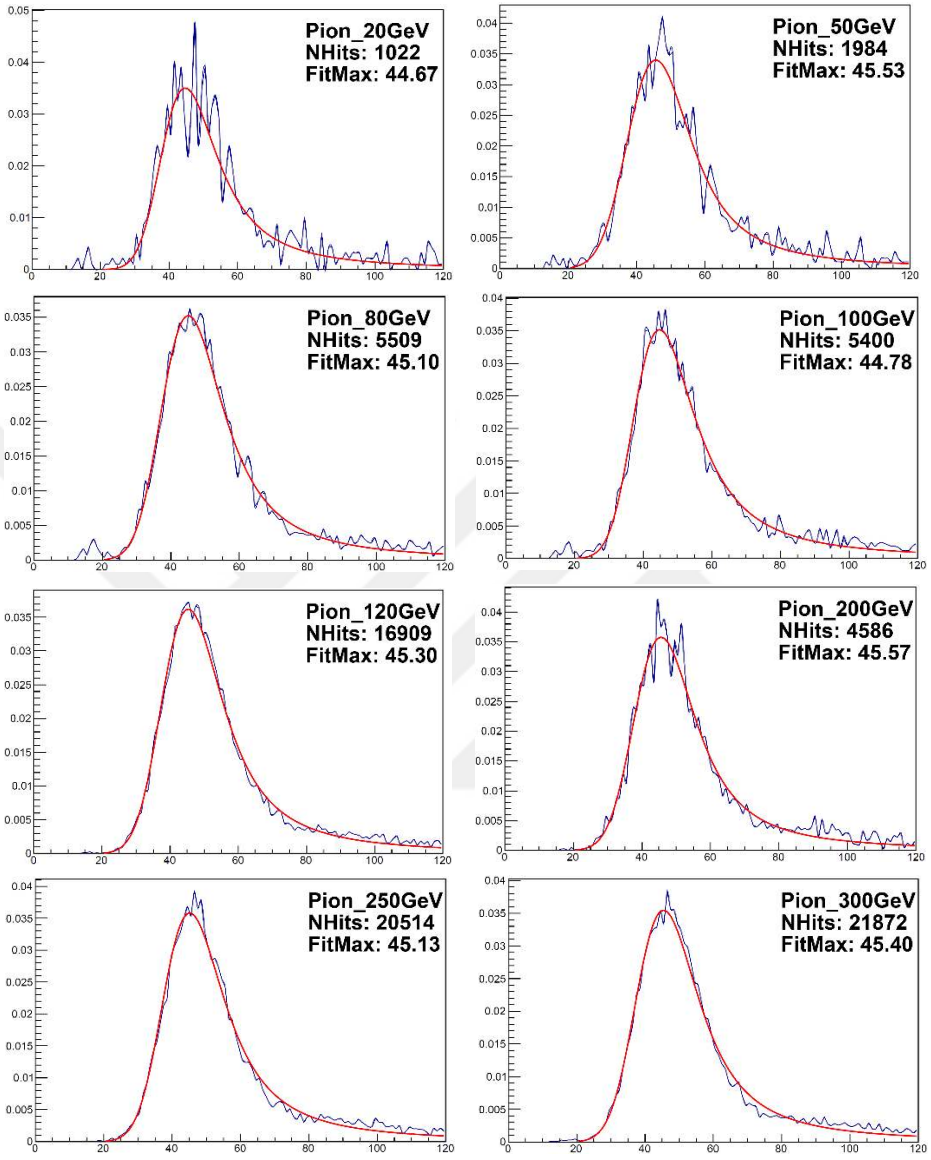
200 GeV'lik müon hüzmesinin sonuçları alındıktan sonra dağılıma en uygun fiti oluşturmak için Gaussian Landau Fit formülünün parametreleri değiştirilerek kalibre edildi. Gaussian Landau dağılımının formülü;

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)} \tag{4.2}$$

ile açıklanır. Burada μ, ortalama ve σ^2, varyans anlamına gelir.

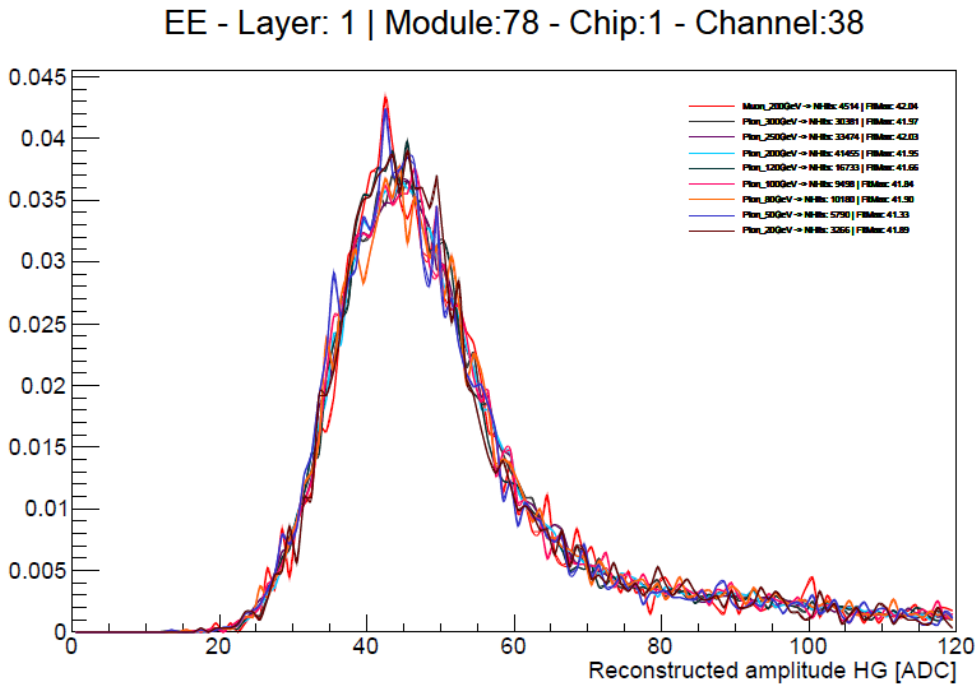
4.2.2 Pion Sonuçları ile Kıyaslama

Müon verilerinin performans sonuçlarının tutarlı alınmasından sonra pionların testine başlandı. Gayemiz pionların da müonlar gibi etkileşme düzeylerinin ve MİP verimliliğinin birbirleriyle tutarlı olup olmadığını görmekti. Bunun için pion verileriyle müon sonuçlarımızı ile kıyaslama yaptık. Şekil 4.6'da pionların farklı enerji değerlerindeki en çok etkileşen 77. modülün 1. çipinin 38. kanalındaki sonuçları verilmiştir. Grafiklere detaylı bakıldığında düşük enerjilerde dağılımın fazla, yüksek enerjilere doğru çıkıldığında ise bu dağılımların daha düzenli olduğu görülmektedir. Bir diğer sonuç ise maksimum fit noktalarının birbirlerine yakın olmasına rağmen yüksek enerjilere doğru parçacık sayısı artmıştır. Bu da olası bir durumdur. Bu sonuçlara göre pionların da, müonlar gibi MİP etkileşme düzeylerinin tamamen birbirleriyle tutarlı olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlara göre maksimum fit değeri ile kıyaslandığında, neredeyse hiç değişmemektedir. Yani sonuç olarak normalize işlemi sonrası tüm sinyallerin enerji değerine bağlı olmadığı görülmektedir.

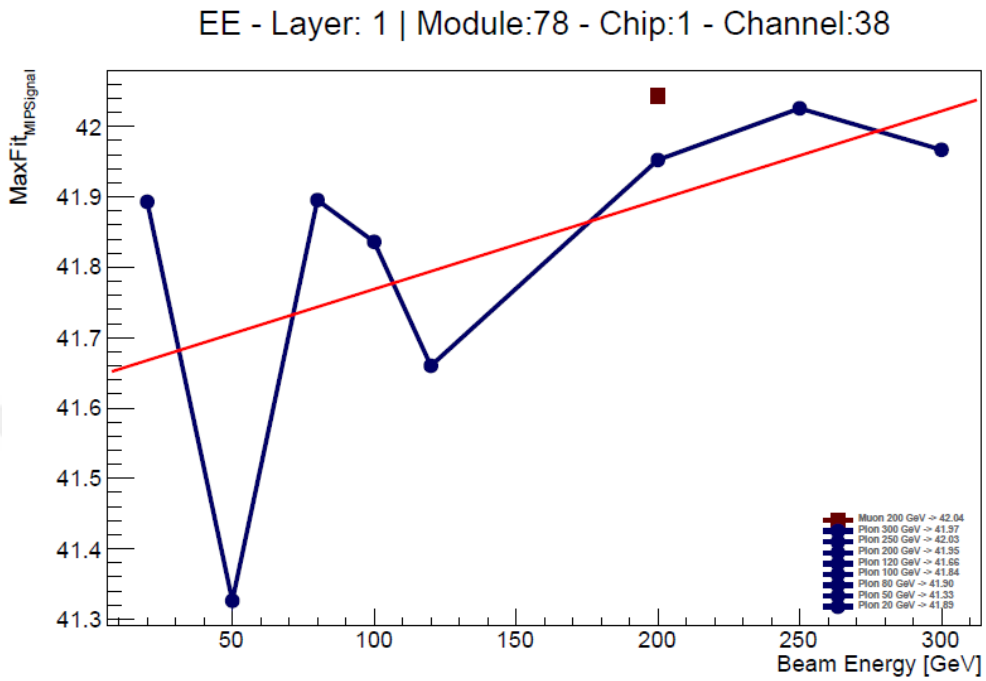


Şekil 4.6. Pionların farklı enerjilerindeki modül:77 - çip:1 - kanal:38 deki isabet sayıları.

Fit spektrumlarının maksimum değerlerindeki rölativistik artışın varlığını gözlemlemek için farklı parçacık (muon, pion) ve farklı hüzme enerjilerinde alınan verilerin MİP spektrumlarını karşılaştırdık. Şekil 4.7'de, farklı enerji ve parçacıklardaki hüzmelerden etkilenmiş ortak bir kanalda alınan MİP spektrumlarının, normalize edilmiş ve üst üste bindirilmiş hali verilmiştir. Ayrıca bu grafiklerdeki rölativistik artışı daha rahat kontrol etmek için oluşturulan HG/MİP değişimlerindeki maksimum fit noktaları Şekil 4.8'de verilmiştir. Bu grafikte yer alan kırmızı çizgi sapmayı yani maksimum noktaların normalde nasıl bir yolu izlemesi gerektiğini göstermektedir. Grafik detaylı incelendiğinde düşük enerjilerde sapmanın fazla (kırmızı çizgiden uzak), yüksek enerjilerde ise sapmanın çok az (kırmızı çizgiye yakın) olduğunu göstermektedir. Bu da yüksek enerjilerde elde edilen sonuçların çok iyi olduğunu gösterir.



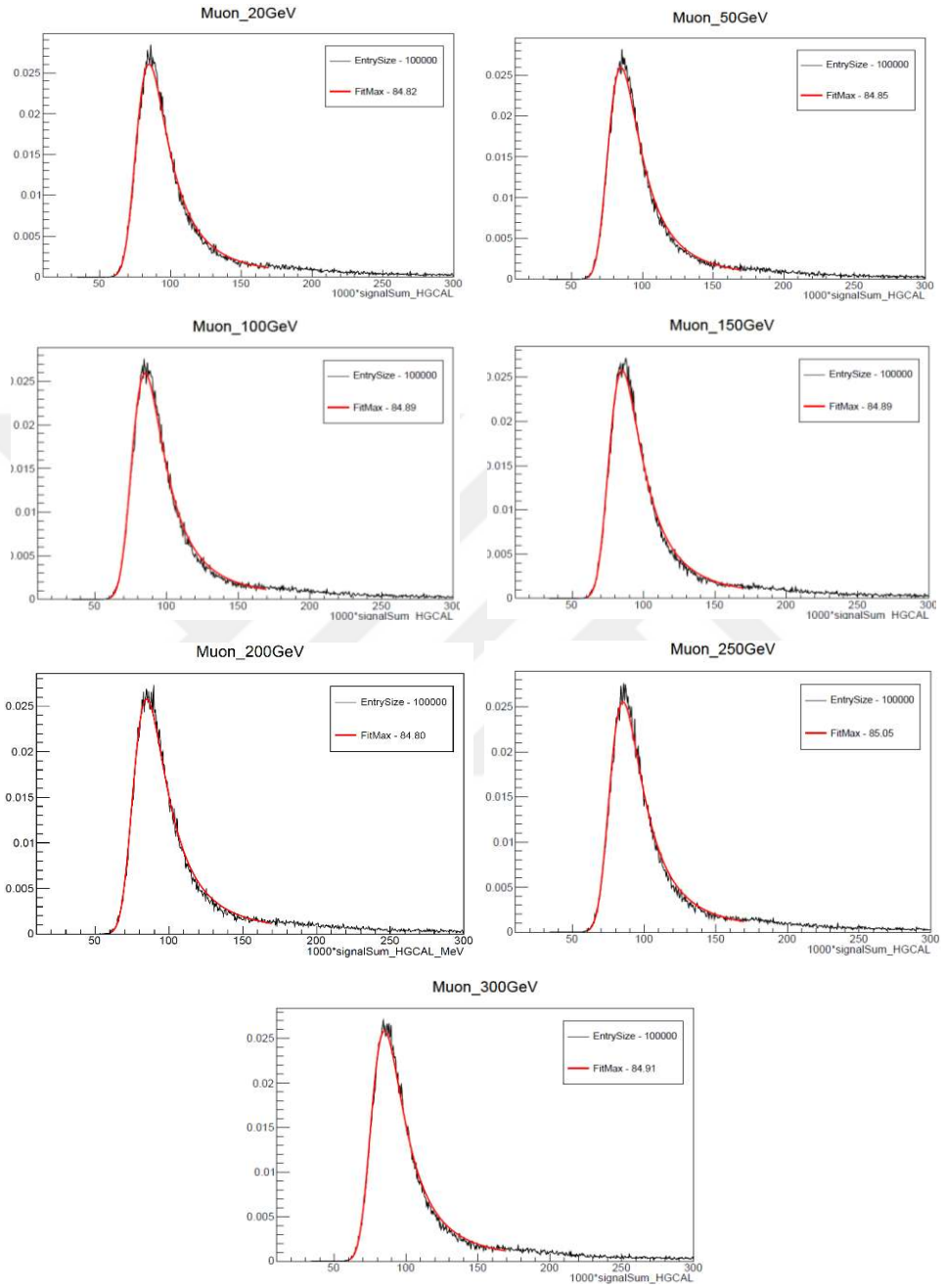
Şekil 4.7. Farklı enerjilerde alınan sonuçların, en çok etkileşen kanaldaki MİP spektrumlarının, üst üste bindirilmiş hali.



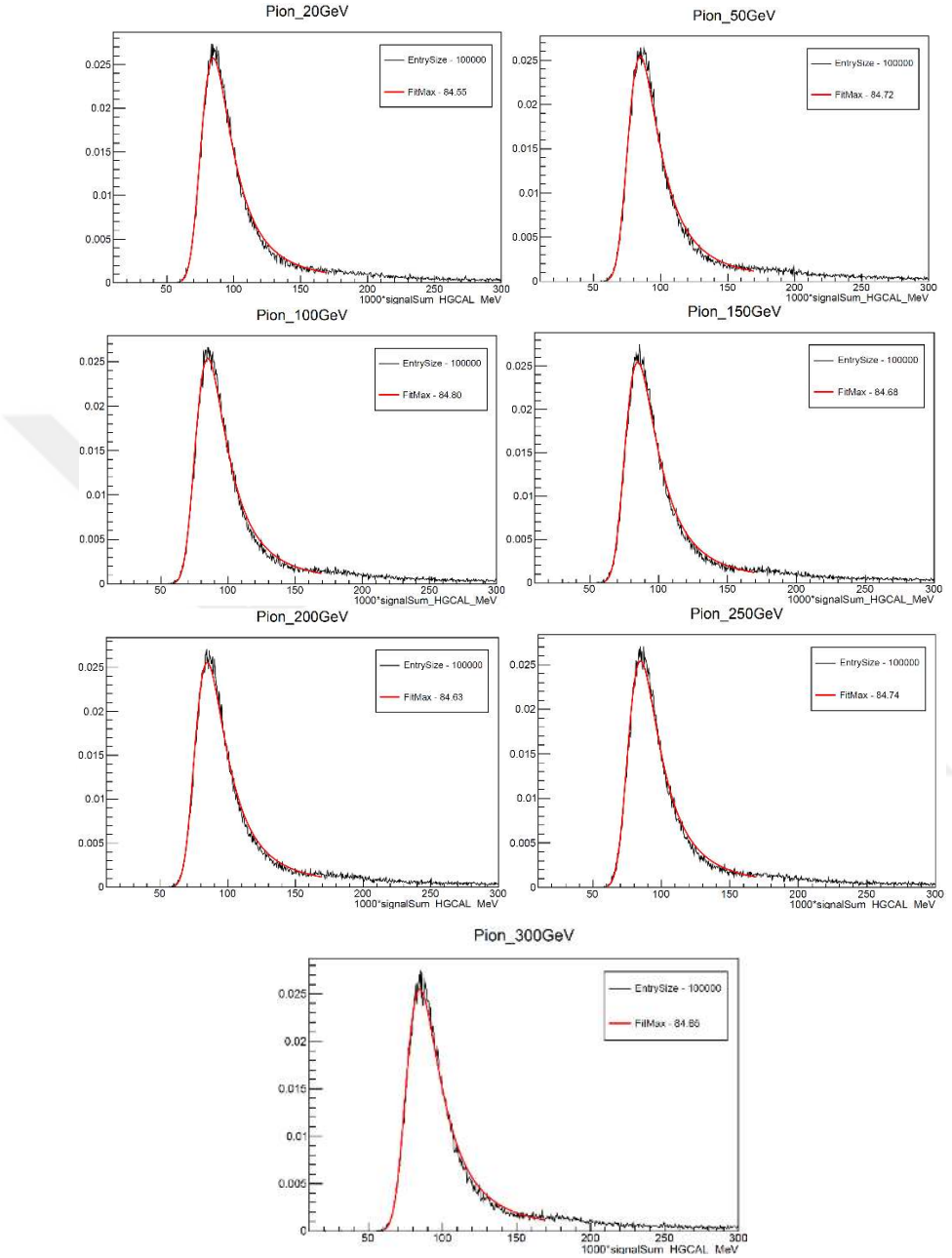
Şekil 4.8. MİP spektrumlarındaki rölativistik artışı gözlemlemek için oluşturulan HG/MİP değişim grafiği.

4.2.3 Monte Carlo Verileri ile Kıyaslama

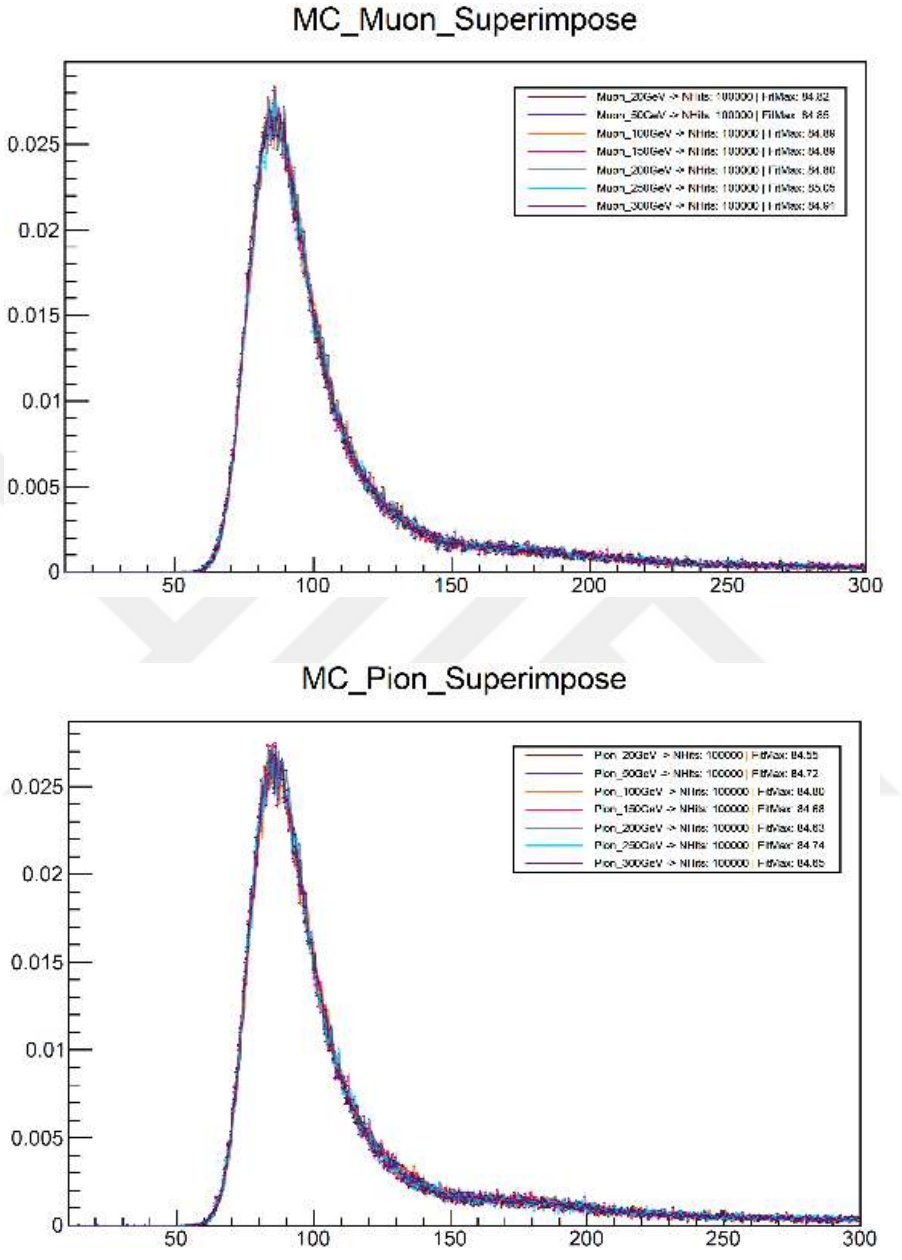
HGCAL test verileri incelendikten sonra verilerin doğruluğunun kontrolü için üretilen MC simülasyon verileri incelenmiştir. Bu MC verileri, test verilerinden farklı olarak, müon ve pionun farklı enerji değerleri için yapılmıştır. Her enerjide 10 bin parçacık tespit edilecek şekilde MC verisi alınmıştır. Şekil 4.9, müon MC sonuçlarını, Şekil 4.10 ise pion MC sonuçlarını göstermektedir. Elde ettiğimiz MC sonuçlarının test verilerimiz gibi tutarlı ve uyumlu olduğu görülmektedir. Son olarak da müon ve pionlar için MC simülasyon sonuçları üst üste bindirilip Şekil 4.11'de gösterilmiştir.



Şekil 4.9. MC verilerine göre müonun farklı enerjileri için tüm sinyallerin fit ile uyumu.



Şekil 4.10. MC verilerine göre pionun farklı enerjileri için tüm sinyallerin fit ile uyumu.



Şekil 4.11. Farklı enerji dağılımlarındaki müon ve pion MC sonuçlarının üst üste bindirilmiş spektrumları.

5 SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, 2018 yılı Ekim ayında alınan HGCAL test verileri kullanıldı. İlk başta 200 GeV'lik müon hüzme verileri incelendi. Müonların DWC bilgisi kullanılarak dedektör üzerindeki parçacık yoğunluğuna ve modül/çip/kanal grafiklerine bakıldı. Elde edilen sonuçlar analiz edilerek MİP kalibrasyon çalışmaları yapıldı. Bu MİP çalışmaları sonucunda HGCAL'in MİP'leri en iyi algılayabilecek şekilde kontrolü sağlandı. Analizin en iyi sonuçları vermesi için olay sayıları fazla olan run numaraları seçildi. En son MC simülasyon verileri ile doğrulanarak test düzeneğinin en uygun haline karar verildi.

Dedektörün genel çalışmaları CERN'deki HGCAL Test Beam grubu ile birlikte yürütüldü. Yapılan hüzme testlerinde EE ve FH katmanları ayrı ayrı incelendi. EE kısmının iyi sonuç vermesine rağmen, 22. kanaldaki arızadan dolayı bu kanaldan iyi bir sonuç alınamadığı tespit edilmiştir. Ve diğer analizler, bu kanalın elenmesine gidilerek devam etmiştir. FH kısmının ise iyi çalışmasına rağmen yapılacak yükseltmeler düşünülüp farklı konfigürasyonlar ile tekrar tekrar denenmesine karar verildi. Konfigürasyon-2 ve Konfigürasyon-3 ile ilgili testler de yapılmış olup bazı teknik sorunlardan dolayı Konfigürasyon-1 deki gibi bilgi elde edilememiştir. Genel olarak en yüksek performans Konfigürasyon-1'de sağlanmıştır.

Sonuç olarak, MİP analizleri ve dedektör kalibrasyonları için hadronik parçacık olan pionların da müonlar gibi verimli olarak kullanılabileceğini ispatlamış olduk.

Ekim ayında alınan veriler ile ilgili yapılan çalışmalardan sonra CERN'de bulunan HGCAL test düzeneği Almanya'da bulunan DESY Laboratuvarına taşınmış olup farklı konfigürasyon ile veri alımı devam etmektedir. 2020'nin Şubat ayında ise HGCAL prototipinin sintilatör testleri için FNAL'de yeni veriler alınacaktır.

KAYNAKLAR

Akchurin, N., 2018. "First beam tests of prototype silicon modules for the CMS High Granularity ENDCAP Calorimeter", JINST 13 (2018) P10023, https://cds.cern.ch/record/2646748/files/pdf.pdf, (Erişim Tarihi: 15 Aralık 2019)

ALICE Collaboration, 2008. "The ALICE Experiment at the CERN LHC", JINST 3 S08002, http://cds.cern.ch/record/1129812/files/jinst8_08_s08002.pdf, (Erişim Tarihi: 15 Aralık 2019)

Borg, J. ve ark., 2017. "SKIROC2_CMS an ASIC for testing CMS HGCAL", JINST 12 C02019, https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/12/02/C02019/pdf, (Erişim Tarihi: 15 Aralık 2019)

CALICE Collaboration, 2017. "Performance of a Highly Granular Scintillator-SiPM Based Hadron Calorimeter Prototype in Strong Magnetic Fields", arXiv:1711.03796, http://cds.cern.ch/record/2310959/files/1711.03796.pdf, (Erişim Tarihi: 15 Aralık 2019)

CERN Courier Volume 29, Number 10, December 1989, https://cds.cern.ch/record/1731629/files/vol29-issue10.pdf, (Erişim Tarihi: 15 Aralık 2019)

CERN Courier Volume 52, Number 10, December 2012, https://cds.cern.ch/record/1734758/files/vol52-issue10.pdf, (Erişim Tarihi: 15 Aralık 2019)

CMS Collaboration, "The CMS Experiment at the CERN Large Hadron Collider", JINST3S08004,http://cds.cern.ch/record/1129810/files/jinst8_08_s08004.pdf, (Erişim Tarihi: 15 Aralık 2019)

CMS Collaboration, 1997. "The CMS Tracker System Project: Technical Design Report", CERN-LHCC-98-006 ; CMS-TDR-5, http://cdsweb.cern.ch/record/368412, (Erişim Tarihi: 15 Aralık 2019)

CMS Collaboration, 1997. “The Electromagnetic Calorimeter Project: Technical Design Report”, CERN/LHCC 97–33, http://cds.cern.ch/record/349375/files/ECAL_TDR.pdf, (Erişim Tarihi: 15 Aralık 2019)

CMS Collaboration, 2007. “Energy Resolution of the Barrel of the CMS Electromagnetic Calorimeter”, JINST vol. 2, P04004, http://cds.cern.ch/record/1009081/files/NOTE2006_148.pdf, (Erişim Tarihi: 15 Aralık 2019)

CMS Collaboration, 1997. “The Hadron Calorimeter Project: Technical Design Report”, CERN-LHCC-97-031 ; CMS-TDR-2, http://cds.cern.ch/record/357153/files/CMS_HCAL_TDR.pdf, (Erişim Tarihi: 15 Aralık 2019)

CMS Collaboration, 1997. “The CMS Muon Project: Technical Design Report”, CERN-LHCC-97-032, http://cdsweb.cern.ch/record/343814/files/LHCC-97-032.pdf, (Erişim Tarihi: 15 Aralık 2019)

CMS Collaboration, 2000. “CMS TriDAS project : Technical Design Report, Volume 1: The Trigger Systems”, CERN-LHCC-2000-038 ; CMS-TDR-6-1, http://cdsweb.cern.ch/record/706847/files/cer-002248791_LHCC-2000-38.pdf, (Erişim Tarihi: 15 Aralık 2019)

CMS Collaboration, 2000. “The TriDAS Project: Technical Design Report Volume 2: Data Acquisition and High-Level Trigger”, CERN-LHCC-2002-026, http://cdsweb.cern.ch/record/578006/files/cer-2336481.pdf, (Erişim Tarihi: 15 Aralık 2019)

CMS Collaboration, 2015. “Technical Proposal for the Phase-II Upgrade of the CMS Detector: Technical Report” CERN-LHCC-2015-010 ; LHCC-P-008, http://cds.cern.ch/record/2020886/files/LHCC-P-008.pdf, (Erişim Tarihi: 15 Aralık 2019)

CMS Collaboration, 2017. “The Phase-2 Upgrade of the CMS Endcap Calorimeter” CERN-LHCC-2017-023 ; CMS-TDR-019, https://cds.cern.ch/record/2293646/files/CMS-TDR-019.pdf, (Erişim Tarihi: 15 Aralık 2019)

ILC Collaboration, 2007. “ILC Reference Design Report Volume 4 – Detectors”, FERMILAB-DESIGN-2007-02 ; FERMILAB-PUB-07-793-E, http://cds.cern.ch/record/1075831/files/fermilab-pub-07-793-e.pdf, (Erişim Tarihi: 15 Aralık 2019)

ILC Collaboration, 2007. “SKIROC2, front end chip designed to readout theElectromagnetic CALorimeter at the ILC”, JINST 6 C12040, https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/6/12/C12040/pdf, (Erişim Tarihi: 15 Aralık 2019)

LHCb Collaboration, 2008. “The LHCb Detector at the LHC”, JINST 3 S08005, http://cds.cern.ch/record/1129809/files/jinst8_08_s08005.pdf, (Erişim Tarihi: 15 Aralık 2019)

Nambu, Y., 1985. “Some Theoretical Problems in Particle Physics”, Physikertagung München (1985) Volume 41 Issue 7, https://doi.org/10.1002/phbl.19850410705, (Erişim Tarihi: 15 Aralık 2019)

Padmanabhan, T., 1998. “The Hypothesis of Path Integral Duality I: Quantum Gravitational Corrections to the Propagator”, Phys. Rev. D. 57 (1998) 6206, https://doi.org/10.1103/PhysRevD.57.6206, (Erişim Tarihi: 15 Aralık 2019).

Spanggaard, J., 1998. “Delay wire chambers - A users guide”, SL-Note-98-023, http://cds.cern.ch/record/702443/files/sl-note-98-023.pdf, (Erişim Tarihi: 15 Aralık 2019)

Steen, A. “Beam-Tests of Prototype Modules For The CMS High Granularity Calorimeter at CERN”, JINST 14 C04008, https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/14/04/C04008/pdf, 2019. (Erişim Tarihi: 15 Aralık 2019)

https://mediaarchive.cern.ch/MediaArchive/Photo/Public/2008/0803012/0803012_01/0803012_01-A5-at-72-dpi.jpg
http://bilimgenc.tubitak.gov.tr/makale/standart-model-nedir
https://tr.wikipedia.org/wiki/Standart_Model
https://www.britannica.com/science/fermion
https://www.thoughtco.com/fermion-definition-in-physics-2699188
http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Particles/quark.html
http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Forces/color.html#c1
https://voisins.cern/en/cern/what-cern
https://cds.cern.ch/record/2684277/files/CCC-v2019-final-white.png
https://physicsmasterclasses.org/exercises/keyhole/sp/reception/CERN.html
http://lhcphysics.blogspot.com/p/
https://www.extremetech.com/wp-content/uploads/2014/04/LHC_Fig1.jpg
https://home.cern/science/experiments/atlas
https://home.cern/science/experiments/alice
https://home.cern/science/experiments/lhcb
https://home.cern/topics/high-luminosity-lhc

ÖZGEÇMİŞ

01.01.1986 tarihinde Adana'da doğdu. İlkokul, ortaokul ve lise eğitimini Adana'da tamamladı. 2009-2013 yılları arasında İstanbul Üniversitesi Astronomi ve Uzay Bilimleri bölümünü okudu. 2017 yılında Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında Yüksek Enerji Fiziği alanında tezli yüksek lisans programına başladı.