

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Samet LEZKİ

**CMS DETEKTÖRÜNÜN HF KALORİMETRESİNDE YENİLENEN
FÇT'LERİN PERFORMANS ANALİZİ**

FİZİK ANABİLİM DALI

ADANA, 2016

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**CMS DETEKTÖRÜNÜN HF KALORİMETRESİNDE YENİLENEN
FÇT'LERİN PERFORMANS ANALİZİ**

Samet LEZKİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FİZİK ANABİLİM DALI

Bu tez ../../2016 Tarihinde Aşağıdaki Jüri Üyeleri Tarafından Oybirliği/Oyçokluğu İle Kabul Edilmiştir.

.....
Prof. Dr. İsa DUMANOĞLU
DANIŞMAN

.....
Prof. Dr. Eda EŞKUT
ÜYE

.....
Doç. Dr. Bayram TALİ
ÜYE

Bu tez Enstitümüz Fizik Anabilim Dalında hazırlanmıştır.
Kod No:

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

**Bu Çalışma Ç. Ü. Araştırma Projeleri Birimi Tarafından Desteklenmiştir.
Proje No: FYL-2015-4684**

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

Sevgili Anneme ve Babama...



ÖZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**CMS DETEKTÖRÜNÜN HF KALORİMETRESİNDE YENİLENEN
FÇT'LERİN
PERFORMANS ANALİZİ**

Samet LEZKİ

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

Danışman :Prof. Dr. İsa DUMANOĞLU
Yıl: 2016, Sayfa: 63
Jüri :Prof. Dr. İsa DUMANOĞLU
:Prof. Dr. Eda EŞKUT
:Doç. Dr. Bayram TALİ

CMS – HKAL'ın HF alt kalorimetresinde $i\emptyset = 43$ konumunda yer alan R7525 FÇT'leri, 2012 yılında yapılan yılsonu teknik durdurma sırasında yeni R7600U-200-M4 FÇT'leri ile değiştirildi. Bu eski ve yeni FÇT'ler kullanılarak toplanan veriler topolojik ve zaman temelli gürültü filtreleri kullanılarak analiz edildi. Bu analiz $\sqrt{s} = 8$ TeV ve $\sqrt{s} = 13$ TeV çarpışma verileri kullanılarak yapıldı. $\sqrt{s} = 8$ TeV çarpışma verilerinin analiz sonuçlarında yeni FÇT'lerin performanslarının daha iyi olduğu görüldü. 2013-2014 yılında verilen uzun molada HF kalorimetresindeki R7525 FÇT'lerinin tamamı yeni R7600U-200-M4 FÇT'leri ile değiştirildi. $\sqrt{s} = 13$ TeV çarpışma verilerinin analiz sonuçlarında ise zaman temelli filtrelerin problemlili olduğu görüldü. Bu çalışma, HF FÇT'lerinin ve gürültü filtrelerinin $\sqrt{s} = 8$ TeV ve $\sqrt{s} = 13$ TeV çarpışma verileri ile yapılan analiz sonuçlarını içermektedir.

Anahtar Kelimeler: HKAL, HF, FÇT, Gürültü, Filtre

ABSTRACT

MSc THESIS

PERFORMANCE ANALYSIS OF THE NEW PMT'S OF HF CALORIMETER OF THE CMS DETECTOR

Samet LEZKİ

ÇUKUROVA UNIVERSITY
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
DEPARTMENT OF PHYSICS

Supervisor :Prof. Dr. İsa DUMANOĞLU
Year: 2016, Pages: 63
Jury :Prof. Dr. İsa DUMANOĞLU
:Prof. Dr. Eda EŞKUT
:Assoc. Prof. Dr. Bayram TALİ

During the year-end technical stop 1 in 2012, the old R7525 PMTs which are located at $i\phi = 43$ in HF sub-calorimeter of the CMS – HCAL were replaced with the new R7600U-200-M4 PMTs. Collected data with old and new PMTs were analyzed using noise filters which are classified as topological and time based. This analysis was done using collision data taken at $\sqrt{s} = 8$ TeV and $\sqrt{s} = 13$ TeV. According to the results of the $\sqrt{s} = 8$ TeV collision data analysis, the performance of the new PMTs were observed to be better than of the old PMTs. During the long shutdown between 2013 and 2014 all of the old PMTs in the HF calorimeter were replaced with the new PMTs. According to the $\sqrt{s} = 13$ TeV collision data results, the time based filters were found to be problematic. This study includes analysis results of the $\sqrt{s} = 8$ TeV and $\sqrt{s} = 13$ TeV collision data for the HF PMTs and efficiency of the noise filters.

Key Words: HCAL, HF, PMT, Noise, Filter

TEŞEKKÜR

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

Bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım değerli hocalarım Prof. Dr. Gülsen ÖNENGÜT, Prof. Dr. Eda EŞKUT, Prof. Dr. Ayşe POLATÖZ, Prof. Dr. Aysel KAYIŞ TOPAKSU'ya sonsuz teşekkür ederim.

CERN'deki deneysel çalışmalarım sırasında yardımlarını esirgemeyip bilgi ve deneyimlerini paylaşan Doç. Dr. BAYRAM Tali, Doç. Dr. Shuichi KUNORI, Dr. Emine GÜRPINAR'a teşekkür ederim.

Hem çalışmalarım sırasında bana yardımcı olan hem de sahip olduğum fikirlerimi destekleyen dostlarım Zuhal Şeyma DEMİROĞLU, Mehmet OĞLAKÇI, Özgün KARA, Bahadır ALTUNTAŞ, Candan DOZEN, Zekeriya UYSAL, Uygur ŞAŞMAZ'a çok teşekkür ederim. Tez yazımı sırasında bana yardımcı olan ve neredeyse benimle aynı fikir ve düşüncelere sahip olan dostum Ümit SÖZBİLİR'e çok teşekkür ederim.

Çocukluğumdan bu yana yanımda olan ve beni destekleyen dostlarım Murat SAVCI ve Erdem AKKİREÇ'e teşekkürü bir borç bilirim.

Tüm eğitim-öğretim hayatım boyunca maddi-manevi her konuda beni destekleyen, sabır gösteren başta sevgili annem ve babam olmak üzere değerli aileme sonsuz teşekkür ederim.

Hayatıma girdiği günden beri her zaman yanımda olan ve bana ikinci bir amaç veren en iyi arkadaşım ve nişanlım Merve İNCE'ye çok teşekkür ederim. Merve, iyi ki varsın iyi ki hayatımdasın...

Benimle arkadaşlıklarını paylaşan tüm Yüksek Enerji Fiziği grubu arkadaşlarıma teşekkür ederim

Ayrıca CERN'deki çalışmalarımı maddi olarak destekleyen TAEK'e (Türkiye Atom Enerjisi Kurumu) teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

SAYFA

ÖZ	I
ABSTRACT	II
TEŞEKKÜR	III
İÇİNDEKİLER	IV
ÇİZELGELER DİZİNİ	VI
ŞEKİLLER DİZİNİ	VIII
SİMGELER VE KISALTMALAR	XII
1. GİRİŞ	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	3
2.1. Büyük Hadron Çarpıştırıcısı	3
2.1.1. Sıkı Müon Solenoidi	5
2.1.1.1. Koordinat Kuralları	7
2.1.1.2. İç İzleyici Sistem	8
2.1.1.2.(1). Pıksel Detektör	8
2.1.1.2.(2). Silikon Şerit Detektör	9
2.1.1.3. Kalorimetre Sistemleri	10
2.1.1.3.(1). Elektromanyetik Kalorimetre	11
2.1.1.3.(1).a. Elektromanyetik Fıçı Kalorimetresi	12
2.1.1.3.(1).b. Elektromanyetik Kapak Kalorimetresi	13
2.1.1.3.(1).c. Elektromanyetik Ön Duş Detektörü	13
2.1.1.3.(2). Hadronik Kalorimetre	13
2.1.1.3.(2).a. Hadronik Fıçı Kalorimetresi	15
2.1.1.3.(2).b. Hadronik Kapak Kalorimetresi	17
2.1.1.3.(2).c. Hadronik Dış Kalorimetresi	18
2.1.1.3.(2).d. İleri Hadron Kalorimetresi	19
2.1.1.4. Süperiletken Mıknatıs	19
2.1.1.5. Müon Sistemi	20
2.1.1.5.(1). Sürüklenme Tüpleri	22
2.1.1.5.(2). Katot Şerit Odaları	23

2.1.1.5.(3). Dirençli Paralel Levhalı Odalar	24
2.1.1.6. Tetikleme Sistemi.....	25
2.1.1.6.(1). Seviye-1 Tetikleme	25
2.1.1.6.(2). Yüksek Seviye Tetikleme	26
3. MATERYAL VE METOD	27
3.1. İleri Hadron Kalorimetresi	27
3.2. Foto-Çoğaltıcı Tüp	33
3.2.1. Temel Yapısı ve Çalışma Prensibi	33
3.2.1.1. Foto-Katot	34
3.2.1.2. Elektron Çoğaltıcılar	35
3.2.1.3. Anot.....	35
4. ARAŞTIRMA VE BULGULAR	37
4.1. Gürültülü Olayların Belirlenmesi	38
4.1.1. Topolojik Temelli Filtreler	39
4.1.1.1. HFLongShort Filtresi	39
4.1.1.2. HFPET Filtresi	41
4.1.1.3. HFS8S1Ratio Filtresi	43
4.2.1. Zaman Temelli Filtreler	45
4.2.1.1. HFDigiTime Filtresi.....	45
4.2.1.2. HFInTimeWindow Filtresi.....	46
4.2. Veri Analizi	47
4.2.1. $\sqrt{s} = 8$ TeV Çarpışma Verilerinin Analizi	47
4.2.2. $\sqrt{s} = 13$ TeV Çarpışma Verilerinin Analizi	50
4.2.2.1. 50 ns’de alınan $\sqrt{s} = 13$ TeV Çarpışma Verilerinin Analizi	51
4.2.2.2. 50 ns’de alınan $\sqrt{s} = 13$ TeV Çarpışma Verilerinin Analizi	52
4.2.3. 25 ns $\sqrt{s} = 13$ TeV Sanal Çarpışma Verilerinin Analizi.....	54
5. SONUÇLAR	57
KAYNAKLAR	59
ÖZGEÇMİŞ	63

Çizelge 3.1. HF kuleleri için sanal koordinatlar	29
Çizelge 4.1. 8 TeV’de alınan verilerin analiz sonuçlarına göre, her bir $i\emptyset$ konumunda bulunan FÇT’ler için enerjisi 300 GeV’den büyük olan sinyallerin sayısı	49
Çizelge 4.2. 8 TeV’de alınan verilerin analiz sonuçlarına göre, her bir $i\emptyset$ konumunda bulunan FÇT’ler için enerjisi 300 GeV’den büyük olan gürültülü olaylardan kaynaklanan sinyallerin sayısı	50
Çizelge 4.3. 8 TeV’de alınan verilerin analiz sonuçlarına göre, her bir $i\emptyset$ konumunda bulunan FÇT’ler için enerjisi 300 GeV’den büyük olan gürültülü olaylardan kaynaklanan sinyallerin yüzdesi	50
Çizelge 4.4. 50 ns ve 13 TeV’de alınan verilerin analiz sonuçlarına göre, her bir $i\emptyset$ konumunda bulunan FÇT’ler için HF kalorimetresinden alınan sinyallerin sayısı	52
Çizelge 4.5. 50 ns ve 13 TeV’de alınan verilerin analiz sonuçlarına göre, her bir $i\emptyset$ konumunda bulunan FÇT’ler için gürültülü olaylardan kaynaklanan sinyallerin sayısı	52
Çizelge 4.6. 50 ns ve 13 TeV’de alınan verilerin analiz sonuçlarına göre, her bir $i\emptyset$ konumunda bulunan FÇT’ler için gürültülü olaylardan kaynaklanan sinyallerin yüzdesi	52
Çizelge 4.7. 25 ns ve 13 TeV’de alınan verilerin analiz sonuçlarına göre, her bir $i\emptyset$ konumunda bulunan FÇT’ler için HF kalorimetresinden alınan sinyallerin sayısı	53
Çizelge 4.8. 25 ns ve 13 TeV’de alınan verilerin analiz sonuçlarına göre, her bir $i\emptyset$ konumunda bulunan FÇT’ler için gürültülü olaylardan kaynaklanan sinyallerin sayısı	54
Çizelge 4.9. 25 ns ve 13 TeV’de alınan verilerin analiz sonuçlarına göre, her bir $i\emptyset$ konumunda bulunan FÇT’ler için gürültülü olaylardan kaynaklanan sinyallerin yüzdesi	54

Çizelge 4.10. Benzetim programları ile 25 ns ve 13 TeV için üretilen verilerin analiz sonuçlarına göre, her bir $i\emptyset$ konumunda bulunan FÇT'ler için HF kalorimetresinden alınan sinyallerin sayısı	56
Çizelge 4.11. Benzetim programları ile 25 ns ve 13 TeV için üretilen verilerin analiz sonuçlarına göre, her bir $i\emptyset$ konumunda bulunan FÇT'ler için gürültülü olaylardan kaynaklanan sinyallerin sayısı	56
Çizelge 4.12. Benzetim programları ile 25 ns ve 13 TeV için üretilen verilerin analiz sonuçlarına göre, her bir $i\emptyset$ konumunda bulunan FÇT'ler için gürültülü olaylardan kaynaklanan sinyallerin yüzdesi	56
Çizelge 5.1. 8 TeV'de alınan verilerin analiz sonuçlarına göre, her bir $i\emptyset$ konumunda bulunan FÇT'ler için enerjisi 300 GeV'den büyük olan gürültülü olaylardan kaynaklanan sinyallerin miktar ve yüzdesi.....	58
Çizelge 5.2. 50 ns ve 13 TeV'de alınan verilerin analiz sonuçlarına göre, her bir $i\emptyset$ konumunda bulunan FÇT'ler için gürültülü olaylardan kaynaklanan sinyallerin miktar ve yüzdesi.....	58

ŞEKİLLER DİZİNİ

SAYFA

Şekil 2.1. BHÇ üzerinde bulunan dört büyük deney.....	5
Şekil 2.2. CMS Detektörü	7
Şekil 2.3. Piksel detektörünün bir örneği	9
Şekil 2.4. İç İzleyici Sistem psüдорapidite şeması. Her bir bölme bir detektör parçasını temsil etmektedir	10
Şekil 2.5. EKAL şeması	12
Şekil 2.6. HB, HE, HO ve HF kalorimetrelerinin yerleşkesini gösteren CMS şeması.....	15
Şekil 2.7. HB kamasının izometrik görünümü	16
Şekil 2.8. Kapak demir boyunduruğuna yerleştirilen HE	17
Şekil 2.9. HB, HO ve HE detektörlerinin HKAL'daki kule ve derinlik bölümleri	19
Şekil 2.10. CMS'de yer alan Süperiletken Mıknatıs	20
Şekil 2.11. CMS Müon Sistemi.....	21
Şekil 2.12. Sürüklenme Tüpleri.....	22
Şekil 2.13. CSC görünümü.....	23
Şekil 2.14. RPC görünümü.....	24
Şekil 2.15. CMS seviye-1 tetikleme sisteminin şeması.....	26
Şekil 3.1. HF'in tek bir parçasının (HF+) gösterimi	28
Şekil 3.2. HF okuma ünitesinin şematik gösterimi	30
Şekil 3.3. HF kalorimetresinin teknik çizimi	31
Şekil 3.4. Kuvars fiberlerin yerleştirildiği HF kamalarının bir fotoğrafı	32
Şekil 3.5. Foto-çoğaltıcı tüpün yapısı.....	33
Şekil 4.1. HF kalorimetresinde uzun ve kısa fiberlerde gözlenen enerjiler için oran (R) grafiği.....	40
Şekil 4.2. HFLongShort filtresi uygulanmadan önce (kırmızı) ve uygulandıktan sonra (mavi), (a) $i\phi=43$ konumundaki yeni ve (b) $i\phi=39$, (c) $i\phi=41$, (d) $i\phi=45$ konumlarındaki eski FÇT'lerden elde edilen enerji dağılım grafikleri.....	41

Şekil 4.3. HFPET filtresi uygulanmadan önce (kırmızı) ve uygulandıktan sonra (mavi), (a) $i\phi=43$ konumundaki yeni ve (b) $i\phi=39$, (c) $i\phi=41$, (d) $i\phi=45$ konumlarındaki eski FÇT'lerden elde edilen enerji dağılım grafikleri.....	43
Şekil 4.4. HFS8S1Ratio filtresinin hesaplanması için kullanılan yöntemin şematik gösterimi. Burada L uzun fiberleri, S kısa fiberleri temsil etmektedir.....	44
Şekil 4.5. HFS8S1Ratio filtresi uygulanmadan önce (kırmızı) ve uygulandıktan sonra (mavi), (a) $i\phi=43$ konumundaki yeni ve (b) $i\phi=39$, (c) $i\phi=41$, (d) $i\phi=45$ konumlarındaki eski FÇT'lerden elde edilen enerji dağılım grafikleri.....	45
Şekil 4.6. HFDigiTime filtresi uygulanmadan önce (kırmızı) ve uygulandıktan sonra (mavi), (a) $i\phi=43$ konumundaki yeni ve (b) $i\phi=39$, (c) $i\phi=41$, (d) $i\phi=45$ konumlarındaki eski FÇT'lerden elde edilen enerji dağılım grafikleri.....	46
Şekil 4.7. HFInTimeWindow filtresi uygulanmadan önce (kırmızı) ve uygulandıktan sonra (mavi), (a) $i\phi=43$ konumundaki yeni ve (b) $i\phi=39$, (c) $i\phi=41$, (d) $i\phi=45$ konumlarındaki eski FÇT'lerden elde edilen enerji dağılım grafikleri.....	47
Şekil 4.8. 8 TeV'lik çarpışma verilerinin analizi ile HF gürültü filtrelerinin uygulanmadan önce (sol) ve uygulandıktan sonra (sağ) elde edilen E_S 'nin E_L 'ye karşı grafikleri.....	48
Şekil 4.9. Tüm HF gürültü filtreleri uygulanmadan önce (kırmızı) ve uygulandıktan sonra (mavi), (a) $i\phi=43$ konumundaki yeni ve (b) $i\phi=39$, (c) $i\phi=41$, (d) $i\phi=45$ konumlarındaki eski FÇT'lerden elde edilen enerji dağılım grafikleri.....	49
Şekil 4.10. 50 ns'de alınan 13 TeV'lik çarpışma verilerinin analizi ile HF gürültü filtrelerinin uygulanmadan önce (sol) ve uygulandıktan sonra (sağ) elde edilen E_S 'nin E_L 'ye karşı grafikleri.....	51

Şekil 4.11. 25 ns’de alınan 13 TeV’lik çarpışma verilerinin analizi ile HF gürültü filtrelerinin uygulanmadan önce (sol) ve uygulandıktan sonra (sağ) elde edilen E_S ’nin E_L ’ye karşı grafikleri.....	53
Şekil 4.12. Benzetim programları ile 25 ns ve 13 TeV için üretilen çarpışma verilerinin analizi ile HF gürültü filtrelerinin uygulanmadan önce (sol) ve uygulandıktan sonra (sağ) elde edilen E_S ’nin E_L ’ye karşı grafikleri.....	55





SİMGELER VE KISALTMALAR

SM	: Standart Model
CERN	: Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi
BHÇ	: Büyük Hadron Çarpıştırıcısı
LEP	: Büyük Elektron Pozitron Çarpıştırıcısı
LINAC2	: Doğrusal Hızlandırıcı
PSB	: Proton Sinkrotron Yükseltici
PS	: Proton Sinkrotron
SPS	: Süper Proton Sinkrotron
CMS	: Sıkı Müon Solenoidi
ATLAS	: Büyük Toroidal Detektör
ALICE	: Büyük İyon Çarpıştırma Deneyi
LHCb	: LHCb Fiziği Deneyi
LHCf	: Büyük İleri Hadron Çarpıştırıcısı
TOTEM	: Toplam Elastik ve Difraktif Tesir Kesit Ölçüm Detektörü
CASTOR	: Centauro ve Acayip Cisim Araştırmaları
ZDC	: Sıfır Derece Kaorimetre
LS	: Uzun Mola
CP	: Yük Eşlenikliği – Parite
EKAL	: Elektromanyetik Kalorimetre
EE	: Elektromanyetik Uç Kapak
EB	: Elektromanyetik Fıçı
ES	: Elektromanyetik Ön Duş
HKAL	: Hadronik Kalorimetre
HB	: Hadronik Fıçı
HE	: Hadronik Uç Kapak
HO	: Hadronik Dış
HF	: İleri Hadronik Kalorimetre
SST	: Silikon Şerit İzleyici
TIB	: İç izleyici Fıçı

TID	: İç Diskler
TOB	: Dış İzleyici Fıçı
TEC	: İzleyici Kapağı
CSC	: Katot Şerit Odaları
DT	: Sürüklenme Tüpleri
RPC	: Dirençli Paralel Levhalı Odalar
FÇT	: Foto Çoğaltıcı Tüp
APD	: Çığ Foto Diyot
VPT	: Vakum Foto Triyot
HFD	: Hibrit Foto Diyot
WLS	: Dalga Boyu Kaydırıcı
SiFÇ	: Silikon Foto Çoğaltıcı
η	: Psüdorapidite
θ	: Polar Açısı
ϕ	: Azimutal Açısı
E_T	: Dik Enerji
PbWO_4	: Kurşun Tungsten
eV	: Elektron Volt
MeV	: Milyon Elektron Volt
GeV	: Milyar Elektron Volt
TeV	: Trilyon Elektron Volt
L	: Işıklılık
$\sqrt{s}$	: Kütle Merkezi Enerjisi
Cu	: Bakır
Zn	: Çinko
λ_1	: Nükleer Etkileşme Uzunluğu

1. GİRİŞ

Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (BHÇ), fiziğin henüz çözülmemiş problemlerine ışık tutacak olan eşi benzeri görülmemiş bir çalışmadır. Kütle merkezi enerjisi 14 TeV ve ışıklılığı $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ olacak şekilde tasarlanmıştır. BHÇ'deki dört büyük deneyden biri olan Sıkı Müon Selenoidi (CMS), fizik teorilerini geniş çerçevede araştırmak için fizikçilere olanak sağlar.

CMS'nin önemli bir parçası olan ileri hadron kalorimetresi (HF) detektörü, $3.0 < |\eta| < 5.0$ psüdorapidite bölgesinde, kayıp dik enerjinin ve jetlerin belirlenmesi için önemli rol oynar. HF detektörü çelik soğurucular içine gömülü kuvars fiberlerden oluşur. HF ile etkileşen parçacıklar Çerenkov ışığı oluşturur. Oluşan bu ışık fiberler tarafından toplanarak, foto çoğaltıcı tüp (FÇT)'ler aracılığıyla elektrik sinyaline çevrilir. Bu sinyaller de veri edinim sistemiyle kaydedilir. Bunun yanı sıra geç gelişen çığlardan kaynaklanan bazı yüksek enerjili parçacıklar (özellikle de müonlar) HF'de durdurulamayıp FÇT pencerelerine çarparak sorunlara yol açarlar.

FÇT'lerin pencerelerine çarpıp Çerenkov ışınlamı yapan bu yüksek enerjili parçacıklar ölçülmesi gerekenden daha yüksek enerjili olaylar olarak algılanırlar. Bunlar belirlenmesi ve elenmesi zor olan yüksek enerjili gürültülü olayların oluşmasına neden olurlar. Müonların böyle sinyaller ürettiği 2004 yılından beri bilinmektedir. Fakat daha sonra yapılan analizler geç gelişen duşların da böyle sorunlara yol açtığını gösterdi. Bu sorunların başlıca kaynağının daha sonra anlatılacağı gibi kullanılan FÇT'ler olduğu düşünüldü. Bu sorunu araştırmak için, 2012'de birinci yıl sonu teknik durdurma sırasında, HF detektöründe $i\phi = 43$ konumunda yer alan 24 adet FÇT, yeni dört-anotlu FÇT'ler ile değiştirildi. Bu tez çalışmasında, topolojik ve zaman temelli gürültü filtreleri kullanılarak eski ve yeni FÇT'lerin ve kullanılan gürültü filtrelerinin performans analizleri yapıldı ve kıyaslandı. Bu performans analizi, 8 TeV'de ve 13 TeV'de alınan veriler ile yapıldı.

Bu tezin Önceki Çalışmalar bölümünde BHÇ'nin kısa tanıtımı ve CMS deneyinin detayları yer almaktadır. Tezin Materyal ve Metot kısmında ileri hadron kalorimetresi ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır. Tezin Araştırma Bulgular kısmında eski ve yeni FÇT'ler ile kullanılan gürültü filtrelerinin 8 TeV ve 13 TeV çarpışma

verileri ile yapılan performans analizleri yer almaktadır. Tezin sonuçlar kısmında ise HF'deki eski ve yeni FÇT'ler ile kullanılan gürültü filtrelerinin, çarpışma verileri ile yapılan analiz sonuçlarına göre verimlilikleri özetlenmiştir.



2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1. Büyük Hadron Çarpıştırıcısı

Avrupa'nın en önemli ve en büyük yüksek enerji fiziği laboratuvarı, İsviçre ve Fransa sınırında bulunan Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi (CERN-Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire)'dir. Dünya'nın en güçlü p - p hızlandırıcısı olan BHÇ yerin 100 m altında CERN'de inşa edilmiştir. Hızlandırıcının uzunluğu 27 km, çapı ise 8.6 kilometredir. BHÇ, daha önce elektron-pozitron çarpıştırıcısı olarak bilinen LEP tüneline inşa edilmiştir.

Yeni parçacıklar keşfetmek için tasarlanan BHÇ'de p - p ve ağır iyonlar detektörlerde kafa kafaya çarpıştırılarak maksimum kütle merkezi enerjisi elde edilmeye çalışılmaktadır. BHÇ'de p - p çarpışmaları için hedeflenen kütle merkezi enerjisi $\sqrt{s} = 14$ TeV'dir ve ışıklılık $L = 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 'dir. $\sqrt{s} = 5.5$ TeV kütle merkezi enerjisi ve $10^{27} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ışıklılıkta ise ağır iyonlar çarpıştırılmaktadır. Işıklılık, birim zamanda ve birim alanda meydana gelen çarpışma sayısı olarak adlandırılır. Işıklılık aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$L = \frac{N_b^2 n_b f_{dön} \gamma_r}{4\pi \epsilon_n \beta^*} F. \quad (2.1)$$

Burada N_b her demetteki parçacık sayısı, n_b hüzmeye başına demet sayısı, $f_{dönme}$ dönme frekansı, γ_r Lorentz faktörü, ϵ_n hüzmeyin enine yayılma faktörü, β^* etkileşim noktasındaki betatron fonksiyonu, F çarpışma açısından kaynaklanan azaltma faktörüdür (Evans L. ve P. Bryant, 2008).

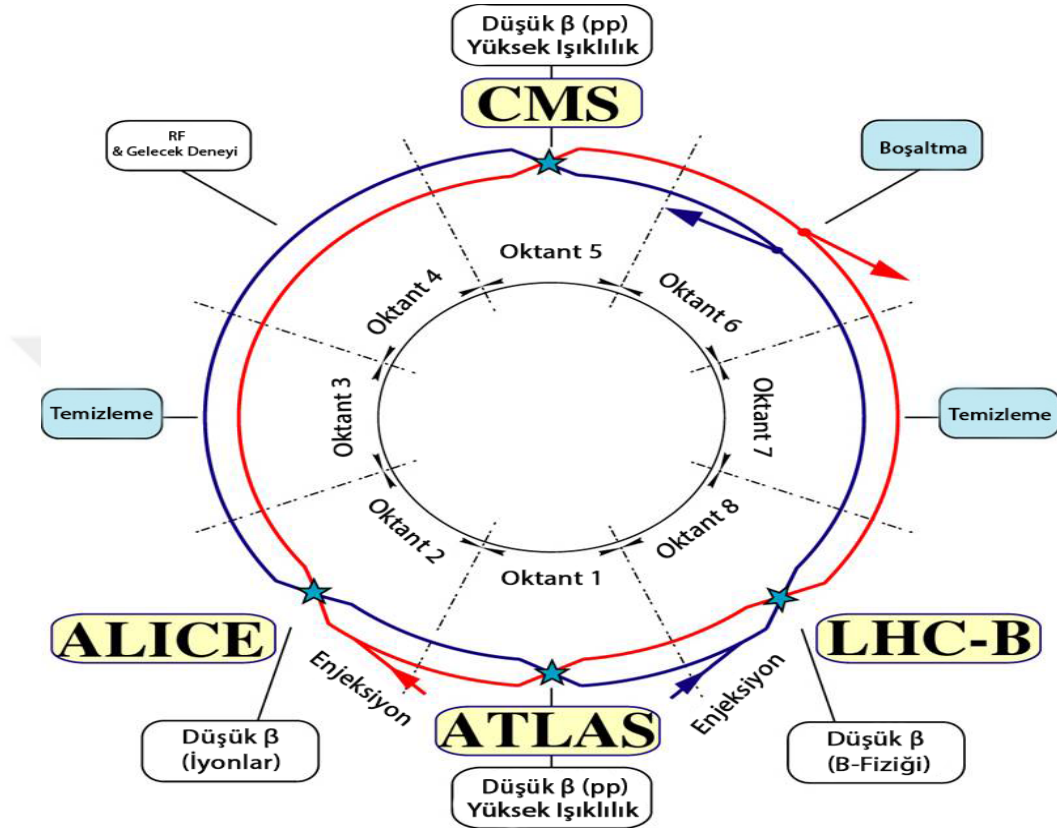
BHÇ'de parçacık demetleri dairesel halka boyunca zıt yönlerde hareket ederler. BHÇ halkası boyunca parçacıkları yörüngede tutmak için hızlandırıcı yapının büyük bir bölümü süperiletken elektro mıknatıslarla çevrelenmiştir. Bu mıknatısların yaklaşık olarak -271 °C de olması gerekmektedir. Bundan dolayı mıknatısların ve diğer sistemlerin materyallerinin soğutulması için sıvı helyum kullanılmaktadır. BHÇ'nin her bir bölümünde 154 çift kutuplu ve 54 adet dört

kutuplu süper iletken elektro mıknatıs bulunmaktadır. Çift kutuplu elektro mıknatıslar parçacık demetlerini vakum tüp içerisinde yörüngede tutarlar. Parçacık demetleri dört kutuplu elektro mıknatıslarla odaklanmaktadırlar. (<http://home.web.cern.ch/topics/large-hadron-collider>).

BHÇ’de ilk $p-p$ çarpışmaları Kasım 2009’da kaydedilmiştir ve 2012’de $\sqrt{s} = 8$ TeV’e ulaşmıştır. BHÇ’de parçacık hüzmeleri birbirleri ile çarpışmadan önce farklı hızlandırıcı sistemlerinden geçerler. İlk olarak, protonlar doğrusal bir hızlandırıcıda (LINAC2) hızlandırılarak, enerjileri 50 MeV’e çıkarılır. Daha sonra hüzmelerin enerjisi proton sinkrotron yükseltici (PSB) tarafından 1.4 GeV seviyesine kadar çıkarılmaktadır. Bunu takiben proton sinkrotronda (PS) 26 GeV’e kadar hızlandırılan hüzmelerin enerjisi daha sonra süper proton sinkrotronda (SPS) 450 GeV’lik bir enerji seviyesine ulaşır. Bu aşamadan sonra protonlar BHÇ’ye aktarılır ve burada enerjileri 7 TeV’e kadar çıkarılabilir. Çarpışmalar BHÇ halkası üzerinde bulunan dört etkileşim noktasında 25 ns’de bir meydana gelir.

BHÇ’de dördü çarpışma noktalarına yerleştirilmiş altı deney bulunmaktadır. Bunlar; ATLAS, CMS, ALICE ve LHCb olarak adlandırılmaktadır. Ayrıca TOTEM ve LHCf özel fizik analizleri için veri alan küçük deneylerdir. CMS, ATLAS, ALICE ve LHCb detektörleri yerin 100 metre altına uzanan dört devasa kuyuya yerleştirilmiştir. BHÇ halkası üzerinde bulunan deneylerden ATLAS ve CMS deneyleri genel amaçlı ve daha kapsamlı deneylerdir. Her iki deneyin fizik araştırma konuları ve amaçları aynıdır. Bu deneylerde Standart Model (SM), Higgs bozonu, karanlık madde, süper simetri gibi fizik konuları araştırılmaktadır. Fakat bu deneylerin tasarımlarında farklı detektör teknolojileri kullanılmaktadır. Parçacıkların enerji ve momentumlarının hassas bir şekilde ölçülebilmesi için birden fazla detektörün bir arada çalışması gerektiğinden her iki deney de soğansı yapıda tasarlanmıştır. İki deney arasındaki en büyük farklılık ATLAS deneyinde toroidal mıknatıs, CMS deneyinde ise selenoid mıknatısın kullanılmasıdır. Ayrıca CMS kütle bakımından en ağır, ATLAS ise boyutları bakımından en büyük detektördür. Diğer iki deneyden daha küçük deneyler olan ALICE evrenin oluşumu sırasında meydana gelen kuark – gluon plazmanın yapısını ve LHCb ise b kuarklı yapıları

araştırmaktadır. Bu deneylerde ileri yönlü parçacıklar incelenmektedir (<https://home.web.cern.ch/about/experiments>).



Şekil 2.1. BHÇ üzerinde bulunan dört büyük deney (<http://lhc-machine-outreach.web.cern.ch/lhc-machine-outreach/images/lhc-schematic.jpg>).

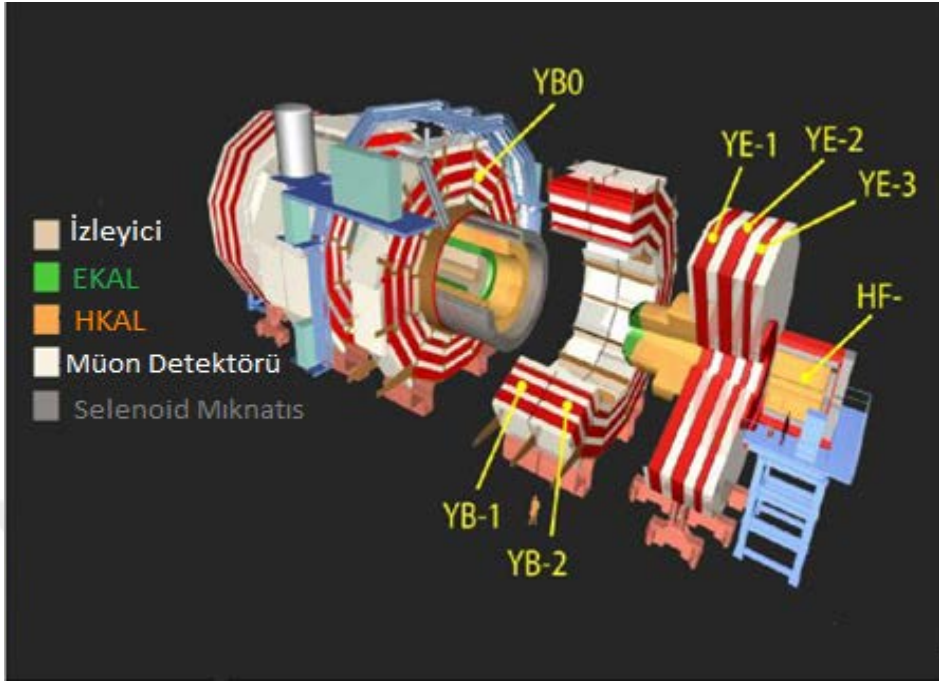
2.1.1. Sıkı Müon Selenoidi

CMS detektörü $L = 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ışıklılık ve $\sqrt{s} = 14 \text{ TeV}$ kütle merkezi enerjisinde çalıştırmak için tasarlanmış genel amaçlı iki detektörden biridir. Yerin 100 m altına inşa edilmiştir ve Fransa'nın Cessy kasabası yakınlarında yer almaktadır. CMS temel kuvvetlerin birleşimi, süper simetri, karanlık madde, karanlık enerji, SM ötesi gibi fizik konularını araştırmaktadır. Yeni fiziği keşfetmek için ise CMS farklı özelliklerdeki çeşitli detektör sistemlerini kullanmaktadır. CMS detektörünün gereklilikleri ise;

- ◆ Geniş bir açı ve momentum aralığında yüksek çözünürlükte iyi müon kimliklendirmesi ve momentum çözünürlüğünün iyi olması,
- ◆ Yüksek duyarlılıkta çift-müon kütle çözünürlüğünün iyi olması (100 GeV de %1), müonların yükünü belirleme kabiliyetinin olması,
- ◆ İç izleyici sistemde yüklü parçacıklar için momentum çözünürlüğünün iyi olması ve yeniden yapılandırmanın yüksek verimlilikte yapılması ve τ ve b jetleri için etiketleme ve tetikleme etkin bir şekilde yapılması.
- ◆ Yüksek verimlilikte çift-foton ve çift-elektron değişmez kütle çözünürlüğünün 100 GeV için en az %1 mertebesinde olması. İyi bir π^0 dışarlama sistemine sahip olması,
- ◆ Kayıp dik enerjinin ve çift-kütle çözünürlüğünün hassas bir şekilde hesaplanması için hadronik kalorimetrenin geometrik kapsamının büyük olmasıdır.

CMS detektörü farklı katmanlardan oluşan silindirik yapısı sayesinde farklı özelliklerdeki parçacıkları algılar ve bu parçacıkların enerji ve momentumlarını hassas bir şekilde ölçer. CMS detektörünün ana parçasını şimdiye kadar yapılmış en büyük mıknatıs olan süperiletken selenoid mıknatıs oluşturmaktadır. 3.8 T'lik manyetik alan üreten süperiletken selenoid mıknatıs yüklü parçacıkların momentumlarını ölçmesini sağlar. Selenoid mıknatısın içinde, dıştan içeri doğru sırasıyla sıkı bir yapıya sahip olan hadronik kalorimetre (HKAL), kurşun tungsten ($PbWO_4$) kristallerinden oluşan elektromanyetik kalorimetre (EKAL) ve silikon izleyici bulunmaktadır. Selenoid mıknatısın dışında ise hadronik dış kalorimetre (HO) ve müon odacıkları bulunmaktadır.

CMS detektörü 28.7 m uzunluğunda, 15 m yüksekliğinde, 15 m genişliğinde ve 14000 ton ağırlığındadır. CMS deneyinde 43 ülkeden, 193 enstitüden gelen 3500'den fazla bilim insanı ve mühendis çalışmaktadır.



Şekil 2.2. CMS Detektörü

(http://ippog.web.cern.ch/sites/ippog.web.cern.ch/files/import/cms3d_black_detector_jul10.jpg).

2.1.1.1. Koordinat Kuralları

CMS detektörü silindirik koordinat sistemi kullanır (θ, ϕ, z) . CMS'te kullanılan sağ el koordinat sistemine göre çarpışma noktası merkez olarak kabul edilir. X-ekseni yatay olarak BHÇ'nin merkezini, y-ekseni dikey olarak yukarı yönü ve z-ekseni ise parçacık hüzmesinin doğrultusunu gösterir. CMS'te θ ve ϕ olmak üzere iki açı tanımlanır. Azimutal açı ϕ , x-y düzlemindeki x-ekseninden, polar açı θ ise z ekseninden ölçülür. Genel olarak polar açısı yerine psüdo-rapiditye (η) kullanılmaktadır. Psüdo-rapiditye $\eta = -\ln(\theta / 2)$ denklemi ile tanımlanır. Parçacıkların dik momentumları P_T ve dik enerjileri E_T x ve y eksenlerinden hesaplanır.

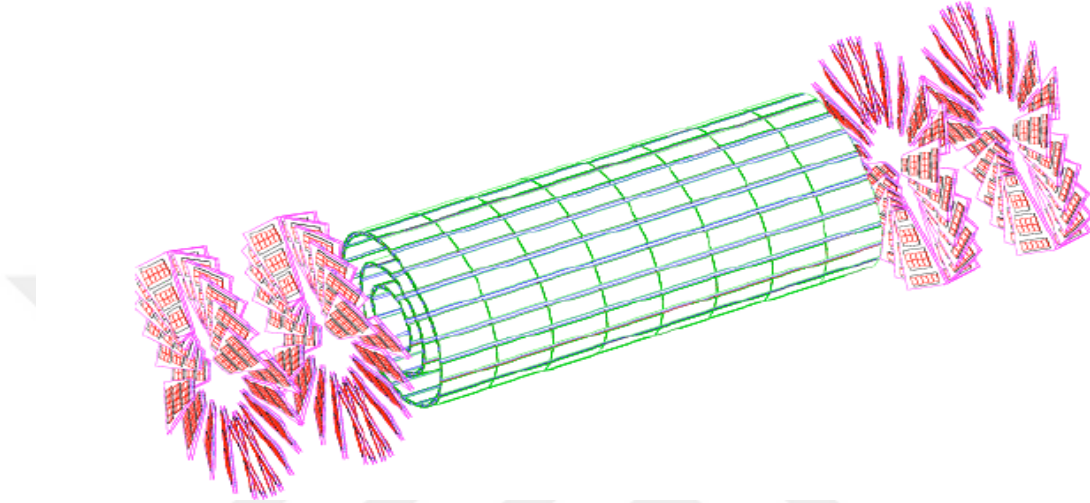
2.1.1.2. İç İzleyici Sistem

İç izleyici sistemi etkileşim noktasına en yakın olan alt detektördür. CMS'in iç izleyici sisteminin amacı, etkileşme noktasında çarpışma sonrası oluşan yüklü parçacıkların momentumunu ve varsa ikincil bozunum köşelerini belirlemek ve parçacıkların yörüngelerinin hassas ve verimli bir şekilde ölçümünü sağlamaktır. Parçacıkların momentumu, parçacık kimliklendirmesi için önemli rol oynamaktadır. Yüklü parçacıklar manyetik alana girdikleri zaman Lorentz kuvveti tarafından yörüngeleri bükülür. Düşük momentumlu parçacıklar daha fazla, yüksek momentuma sahip parçacıklar ise daha az bükülür. Parçacıkların momentumlarını bulmak için kullanılan metotlardan biri de detektör içerisinde bükülen yörüngelerini bulmaktır. Bundan dolayı, yüksek momentumlu parçacıkların bükülmelerini ölçmek için yüksek çözünürlüklü izleyici sistemden yararlanılır. $|\eta| < 2.6$ psüdorapidite aralığında bulunan iç izleyici sistem 5.8 m uzunluğunda ve 1.2 m yarıçapında olup etkileşim noktasını saran bir silindirdir. CMS'in izleyici sistemi 3 katmanlı silikon piksel detektör ve 10 katmanlı silikon mikro şerit detektöründen oluşur. Her bir sistem fiçinin iki tarafında bulunan iki piksel ve oniki şerit detektörü içeren kapak diskleriyle tamamlanır. İz detektörü etkileşim noktasına en yakın olan detektördür ve yüksek miktarda radyasyona maruz kalmaktadır. Bu nedenle yüksek radyasyona dayanıklı olacak şekilde tasarlanmıştır.

2.1.1.2.(1). Piksel Detektör

Piksel detektör sistemi ince parçalara ayrılmış, hücre ebatları $100 \times 150 \times 300 \mu\text{m}^3$ olan, silikondan yapılmış 66 milyon pikselden oluşmaktadır. Yüksek duyarlılıkla 3 boyutlu köşe yapılanmasını sağlamak ve τ ve b jetlerinin tanımlanmasını mümkün kılmak için tasarlanmıştır. Etkileşim bölgesine en yakın olan parçadır. $|\eta| < 2.5$ psüdorapidite aralığını kapsamaktadır. Piksel detektör 3 fiçi tabakası ve 2 kapak diskinden oluşur. Silindirik fiçi tabakaların uzunluğu 53 cm, yarıçapları ise sırasıyla 4.4 cm, 7.3 cm ve 10.2 cm olacak şekilde etkileşim bölgesini kapsamaktadır. Yarıçapları 6 cm'den 15 cm'ye kadar değişen 20° eğimle türbin

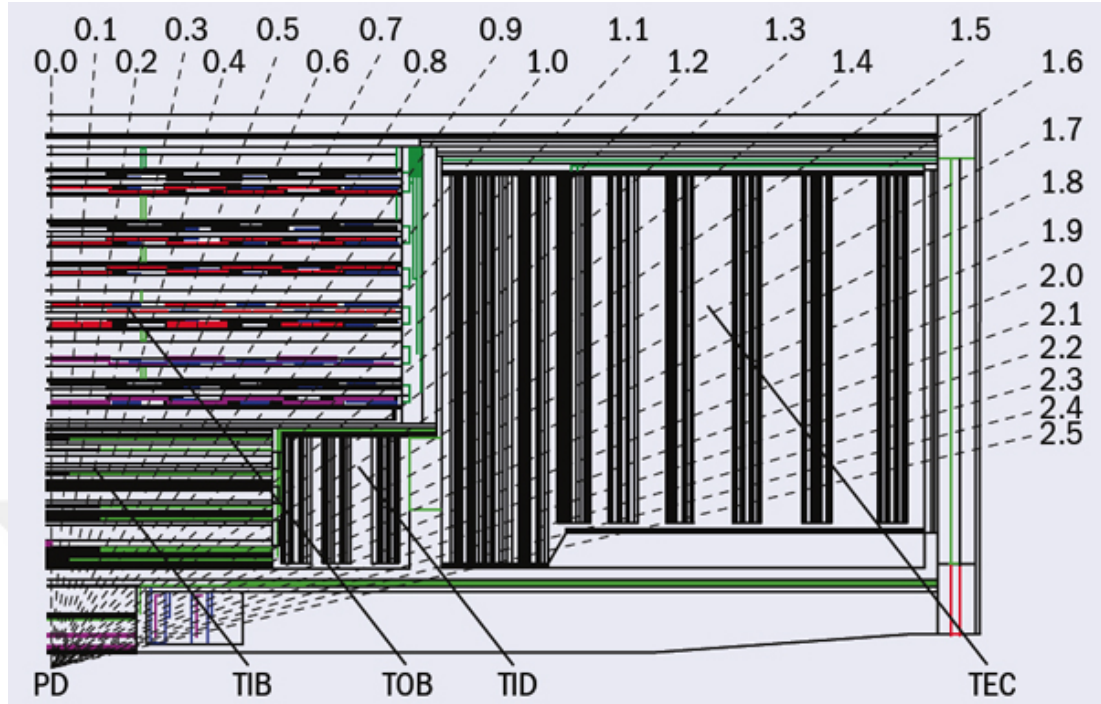
şeklinde dizilmiş iki kapak diski ise $z = 34,5$ cm ve $46,5$ cm'de yerleştirilmiştir. Pıksel detektör sisteminde 1440 adet detektör parçası ve 16000 veri okuma kanalı bulunmaktadır (CMS Collaboration, 2008, JINST 3 S08004).



Şekil 2.3. Pıksel detektörünün bir örneği (CMS TDR, 2006).

2.1.1.2.(2). Silikon Şerit Detektör

Silikon şerit detektörü, pıksel detektörün etrafını saran şimdiye kadar yapılmış en büyük silikon detektörüdür. Silikon şerit detektörü, iki eş merkezli iç izleyici fıçı (TIB), dış izleyici fıçı (TOB), iç diskler (TID) ve izleyici kapağı (TEC) olmak üzere dört alt detektörden oluşmaktadır. Toplam aktif yüzey alanı 207 m^2 'dir. TID katmanının ilk üç katmanı sırasıyla $z = \pm 7.67$ cm, $z = \pm 62$ cm ve $z = \pm 103.57$ cm olacak şekilde detektörün her iki tarafına yerleştirilmiştir. TEC katmanları $z = \pm 46$ cm olmak üzere izleyici sisteme yerleştirilmiştir.



Şekil 2.4. İç İzleyici Sistem psüдорapidite şeması. Her bir bölme bir detektör parçasını temsil etmektedir
(<http://cerncourier.com/cws/article/cern/32915>).

2.1.1.3. Kalorimetre Sistemleri

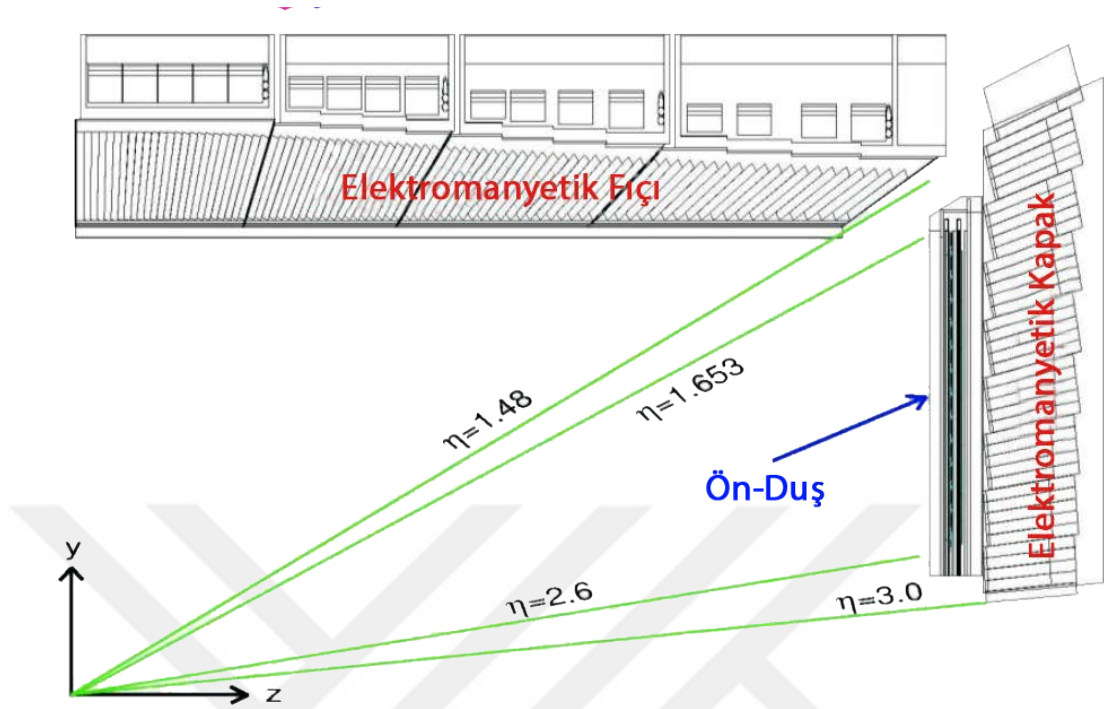
Kalorimetreler, çarpışmalardan gelen elektron, proton ve nötron gibi birincil parçacıkları durdurmak ve bu parçacıkların enerjilerini hassas bir biçimde ölçmek amacıyla tasarlanmıştır. CMS deneyinde enerji ölçümleri için tasarlanmış kalorimetreler parçacıkların kimliğini belirlemek ve izleyici sistemde algılanamayan yüksüz hadronların hassas ölçümlerini yapmak için oldukça önemli sistemlerdir.

CMS kalorimetre sisteminin ana parçaları elektromanyetik kalorimetre (EKAL) ve hadronik kalorimetre (HKAL)'dir. İleri bölgede ise centauro ve acayıp cisim araştırmaları (CASTOR) ve sıfır derece kalorimetre (ZDC) bulunmaktadır. EKAL, elektromanyetik etkileşmeler vasıtasıyla elektron ve fotonların enerjilerini ölçmek için kullanılır. HKAL, güçlü etkileşmeler vasıtasıyla yüklü ve yüksüz hadronların enerjilerini ölçmek için kullanılır.

2.1.1.3.(1). Elektromanyetik Kalorimetre

Elektromanyetik kalorimetre p - p çarpışmalarından gelen elektron ve foton gibi elektromanyetik etkileşen parçacıkların enerjilerini yüksek hassasiyetle ölçmek için tasarlanmıştır. EKAL, Higgs bozonu için en önemli kanallardan biri olan $H \rightarrow \gamma\gamma$ ($m_H < 150$ GeV) bozunum kanalını ve $125 \text{ GeV} < m_H < 700$ GeV için $H \rightarrow ZZ$ ve $H \rightarrow WW$ bozunum zincirlerinden gelen elektronları ve pozitronları en iyi şekilde algılayabilmek için tasarlanmış bir kalorimetredir. Higgs'in iki fotona bozunum kanalı ($H \rightarrow \gamma\gamma$) yüksek verimlilik ile fotonların belirlenmesi için mükemmel bir kanaldır ve EKAL'ın enerji çözünürlüğünü optimize etmek için kullanılmaktadır.

İzleyicinin hemen dışında ve mıknatısın içinde yer alan EKAL 76000 kurşun tungsten (PbWO_4) kristalinden yapılmış sıkı bir yapıya sahip homojen bir kalorimetredir. Kristallerin boyutları $22 \times 22 \times 230 \text{ mm}^3$ 'tür. Radyasyona dayanıklı olduğundan dolayı PbWO_4 kristalleri seçilmiştir. PbWO_4 kristallerinin seçiminde yüksek yoğunluğa (8.28 g/cm^3), kısa radyasyon uzunluğuna ($X_0=0.89 \text{ cm}$) ve küçük Moliere yarıçapına ($r=2.2 \text{ cm}$) sahip olmaları temel alınmıştır. Kütlece %98'i metal olan bu kristaller tamamen saydamdır. Ayrıca kristaller çok hızlıdır (sintilasyon ışığının %80'i 25 ns içinde yayımlanır). EKAL, elektromanyetik fıçı (EB), elektromanyetik kapak (EE) ve elektromanyetik ön duş (ES) olmak üzere üç ana kısımdan oluşmaktadır (CMS Collaboration, 2008, JINST 3 S08004).



Şekil 2.5. EKAL şeması

(<http://www.brunel.ac.uk/~eestprh/pghep/CalorimeterCaseStudyCMS.pdf>).

2.1.1.3.(1).a. Elektromanyetik Fıçı Kalorimetresi

Elektromanyetik fıçı (EB) $|\eta| < 1.49$ psüdo-rapidity aralığını kapsamaktadır. Fıçı kısmı 129 cm iç yarıçapa sahiptir ve her biri 1700 kristal içeren 36 adet süper parçaya sahiptir. Kullanılan kristaller yamuk prizmaya benzemektedir. Kristaller ön yüzeyde $22 \times 22 \text{ mm}^2$ arka yüzeyde ise $26 \times 26 \text{ mm}^2$ bir kesit alanına sahiptir. Kristaller $25.8X_0$ 'a karşılık gelen 23 cm uzunluğa sahiptir. Burada X_0 parçacığın içinden geçtiği malzemenin radyasyon uzunluğudur. Fıçı kısmının toplam hacmi 8.14 m^3 , kütlesi 67.4 tondur ve çözünürlüğü $\Delta\theta \times \Delta\eta = 0.0175 \times 0.0175$ 'dir. Fıçı kısmında kristaller tarafından yayılan ışık çığ foto diyot (APD)'lar tarafından toplanır. Her bir APD $5 \times 5 \text{ mm}^2$ aktif alana sahiptir ve kristale çiftler halinde yerleştirilmiştir.

2.1.1.3.(1).b. Elektromanyetik Kapak Kalorimetresi

Elektromanyetik kapak (EE) $1.479 \leq |\eta| \leq 3$ psüdorapidite aralığını kapsamaktadır ve çarpışma noktasından 3.17 m uzaklıkta bulunmaktadır. Kapak kısmı süper kristal olarak adlandırılan 5×5 kristal bloklardan oluşmuştur. Kapak kısmı 7324 adet kristale sahiptir ve kristallerin boyutu $28.6 \times 28.6 \times 220 \text{ mm}^3$ 'tür. Kristallerin uzunluğu 22 cm'dir. Bu uzunluk yaklaşık $24.7 X_0$ 'a karşılık gelmektedir. Sintilasyon ışığı, kapak kısmında radyasyona dayanıklı olan vakum foto triyot (VPT)'lar ile okunmaktadır. VPT'ler tek kazanç basamağına sahip foto çoğaltıcılardır. Bu özel aygıtlar CMS için geliştirilmiştir. Her bir VPT 25 mm yarıçapında olup yaklaşık 280 mm^2 bir kesit alanına sahiptir. Her bir kristalin arkasına bir VPT yerleştirilmiştir (CMS TDR).

2.1.1.3.(1).c. Elektromanyetik Ön Duş Detektörü

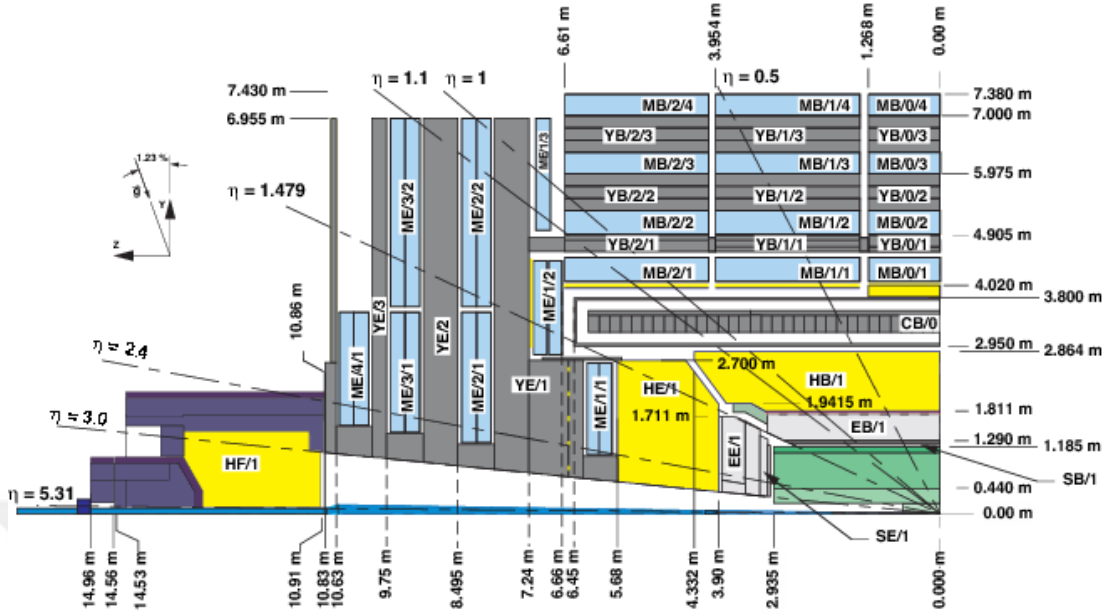
Ön duş detektörü (ES), EE yüzeyini kaplamaktadır. Kurşun ve silikon şeritlerden yapılmıştır ve $3X_0$ radyasyon uzunluğuna sahiptir. CMS ön duş detektörünün amacı $1.653 < |\eta| < 2.6$ psüdorapidite aralığında kapak bölgesindeki yüz­süz pionları (π^0) tespit etmektir. Ayrıca elektronların minimum iyonize parçacıklardan ayırt edilmesi için kullanılır. İnce tanecikli yapılmalarından dolayı elektron ve fotonların konumlarının belirlenmesini sağlar. (CMS TDR, 2006)

2.1.1.3.(2). Hadronik Kalorimetre

CMS kalorimetre sistemi hadronik kalorimetre (HKAL) ile tamamlanır. Elektromanyetik kalorimetrenin hemen dışında süper iletken selenoid mıknatısın içinde yer alır ve $|\eta| < 5.0$ psüdorapidite bölgesini kapsar. Hadronik kalorimetre $p-p$ etkileşmelerinden üretilen proton, nötron, kaon, pion gibi hem yüklü hem de yüksüz hadronların enerjilerini ölçmek için tasarlanmıştır. Ayrıca hadronik duşların, jetlerin enerjilerinin ve yönlerinin belirlenmesinde ve kayıp dik enerjinin belirlenmesinde rol oynamaktadır.

Hadronik kalorimetre, hadronik fiçı (HB), hadronik kapak (HE), hadronik dış (HO) ve ileri hadron kalorimetresi (HF) olmak üzere dört alt detektörden oluşmaktadır. Etkileşim noktası referans alındığında HB ve HE kalorimetreleri süper iletken selenoid mıknatısın içindedir ve EKAL'ın hemen arkasında yer almaktadır. $|\eta| < 3.0$ psüdorapidite bölgesini kapsamaktadır. HB kalorimetresi EKAL ile selenoid mıknatıs arasında yer aldığı için hadronik duşları tam olarak soğurmada yetersiz kalmaktadır. Bundan dolayı, HO selenoid mıknatısın hemen dışında yer alır ve fiçı kısmından gelen hadronik duşları soğurur. HF kalorimetresi ise etkileşim noktasından 11.2 m uzaklıkta yer alır ve $3.0 < |\eta| < 5.0$ psüdorapidite aralığını kapsamaktadır. Selenoid mıknatısın dışında yer alan HF, ileri enerjik jetlerin varlanması ve kayıp dik enerjinin ölçülmesi için tasarlanmış bir kalorimetredir.

Hadronik kalorimetre pirinç ve paslanmaz çelik soğurucu ve aktif plastik sintilatörden oluşan bir örnekleme kalorimetredir. Kalorimetrenin farklı bölgelerinden birçok sinyal gelmektedir. Gelen bu sinyallerin yerlerini belirlemek amacıyla bir izdüşümsel geometri oluşturulmuştur. Bundan dolayı kalorimetre katmanlara ve kulelere ayrılarak bir harita sistemi oluşturulmuştur. Ayrıca HKAL büyüklüğünden dolayı farklı derinliklere bölünmüştür. Bunun sebebi, meydana gelebilecek aksaklıklardan kalorimetrenin bütününe etkilenmesini önlemektir. Böylece aksaklık hangi kısımda ise sadece o kısım etkilenmektedir.

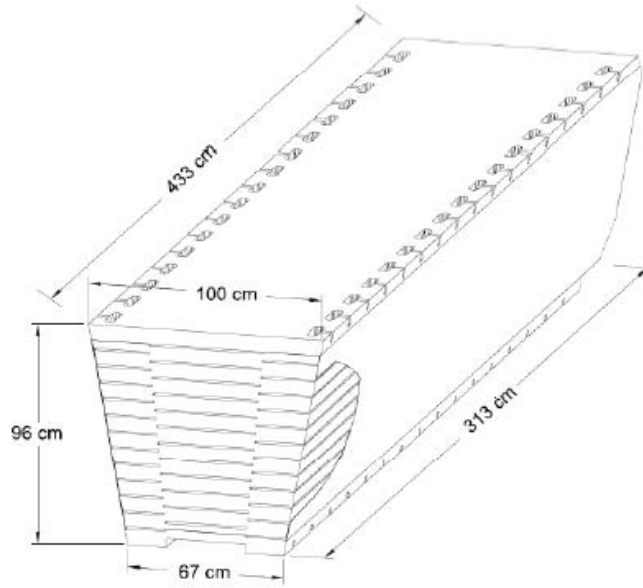


Şekil 2.6. HB, HE, HO ve HF kalorimetrelerinin yerleşkesini gösteren CMS şeması (<https://inspirehep.net/record/837874/files/CMSview1.png>).

2.1.1.3.(2).a. Hadronik Fıçı Kalorimetresi

Hadronik fıçı (HB) EKAL ile süper iletken mıknatıs arasında yer alan bir örnekleme kalorimetredir ve $|\eta| < 1.3$ psüdorapidite bölgesini kapsar. HB kalorimetresi HB+ ve HB- olmak üzere iki yarım fıçıdan oluşmaktadır. Her bir yarım fıçı 20°'lik açılara bölünmüş 18 özdeş kamadan oluşmaktadır ve 26 ton ağırlığındaki her bir kama dört azimutal ($\Delta\phi = 5^\circ$) sektöre ayrılmıştır. Her bir sektör ise kule olarak isimlendirilen 16 tane η değerine bölünmüştür. Kamaların arasındaki mesafe 2 mm'den azdır ve birbirlerine civata ile bağlanmışlardır. Kamalar C26000 pirinç kartuş olarak bilinen pirinç soğurucu tabakalardan oluşmaktadır ve hüzmeye eksenine paralel yerleştirilmiştir. Bu pirinç soğurucu tabakalar %70 Cu, %30 Zn elementlerinden oluşmuştur ve yoğunluğu $\rho = 8,53 \text{ g/cm}^3$, radyasyon uzunluğu $X_0 = 1.49 \text{ cm}$ ve etkileşme uzunluğu $\lambda_1 = 16.42 \text{ cm}$ 'dir. En iç ve en dıştaki soğurucular yapısal sağlamlık için paslanmaz çelikten yapılmıştır. HB'de soğurucu yapının ilk katmanı 40 mm kalınlığındaki çelik tabakadan oluşmaktadır. Onun arkasında 8 adet 50.5 mm kalınlığında pirinç plaka, 6 adet 56.5 mm kalınlığında pirinç plaka yer almaktadır. En sonda ise 75 mm kalınlığına sahip çelik tabakalar bulunmaktadır.

Aktif materyal olarak kullanılan plastik sintilatörlerin içine dalga boyu kaydırıcı (WLS) fiberler yerleştirilmiştir. Bunlar paslanmaz çelik ve soğurucu pirinç tabakaların arasına sandviç şeklinde konulmuştur. Her sintilatörün boyutu $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0.087 \times 0.087$ olacak şekilde tasarlanmıştır ve sintilasyon ışığı 0.94 mm çapındaki WLS fiberler tarafından toplanır. WLS fiberleri sintilatörde oluşan ışığı foto-detektörlerin algılayabildiği dalga boyuna çevirir. WLS fiberlerinin bir ucu ışığın kaçmasını engellemek için alüminyum ile kaplanır. Bu alüminyum yansıtıcı görevi görür. WLS'nin diğer ucu, ışığı hibrit foto diyot (HPD)'lara taşıyan temiz fiberlere bağlanır. Bu temiz fiberler de ışığı HPD'ye taşıyan optik fiberlere bağlanır. HPD'ler üzerlerine düşen ışığı elektrik akımına dönüştüren aletlerdir.



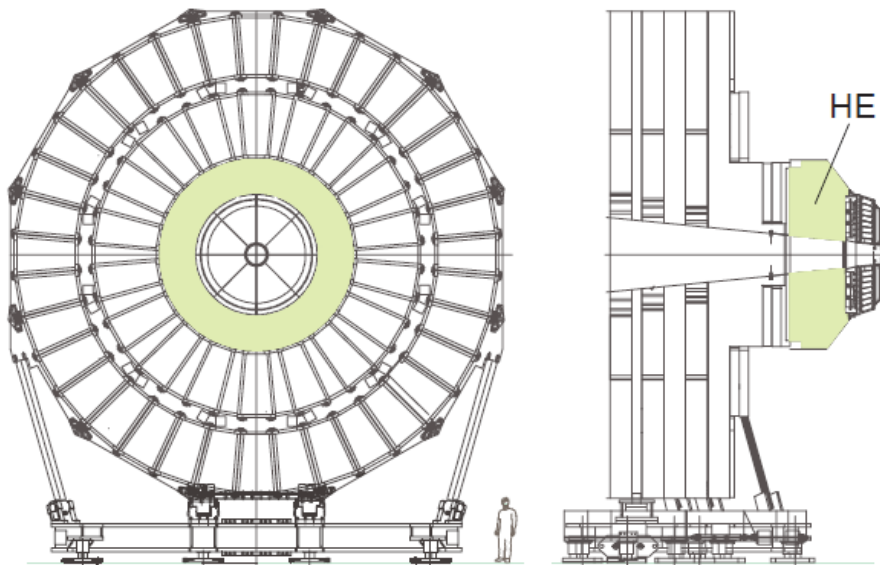
Şekil 2.7. HB kamasının izometrik görünümü (CMS TDR, 2006).

HB kalorimetresinde 16 adet kule bulunmaktadır. 1 ile 14 arasındaki kuleler tek derinliğe sahiptir. 15. ve 16. kuleler ise iki derinliğe sahiptir. HB kalorimetresi 16. kulede HE kalorimetresi ile çalışmaktadır (CMS Collaboration, 2008, JINST 3 S08004).

2.1.1.3.(2).b. Hadronik Kapak Kalorimetre

Hadronik kapak (HE) kalorimetresi süper iletken mıknatısın iki ucunda yer alan bir örnekleme kalorimetredir. Kalorimetre $1.3 < |\eta| < 3.0$ psüdorapidite aralığını kapsayan bölgede bulunmaktadır. Detektörün bulunduğu bu bölgede son durum parçacıklarının yaklaşık %34'ü okunmaktadır. HKAL'ın kapak kısımlarına yerleştirilen HE kalorimetresi HE+ ve HE- olmak üzere iki parçadan oluşmaktadır. Ayrıca HE kalorimetresinin her bir parçası eşit açılı ($\Delta\theta=20^\circ$) 18 adet kamadan oluşmaktadır ve her bir kama ise eşit açıyla bölünmüş ($\Delta\phi=5^\circ$) 4 sektöre sahiptir. HE'nin sintilatör boyutu ($\Delta\eta\times\Delta\phi=0.087\times0.087$), $1.3 < |\eta| < 1.74$ psüdorapidite bölgesinde HB ile aynıdır. $|\eta| > 1.74$ 'den büyük bölgede sintilatör boyutu iki katına çıkar. HE kalorimetresinde soğurucu olarak, HB kalorimetresinde kullanılan malzeme kullanılmıştır. Bunun nedeni bu maddenin manyetik olmamasıdır. Çünkü kapak bölgesindeki manyetik alan oldukça güçlüdür. HE'de sintilasyon ışığını toplama sistemleri HB'yle neredeyse aynıdır.

HE kalorimetresi 18 katmandan oluşmaktadır. Ayrıca 14 tane kuleye ve 3 farklı derinliğe sahiptir.



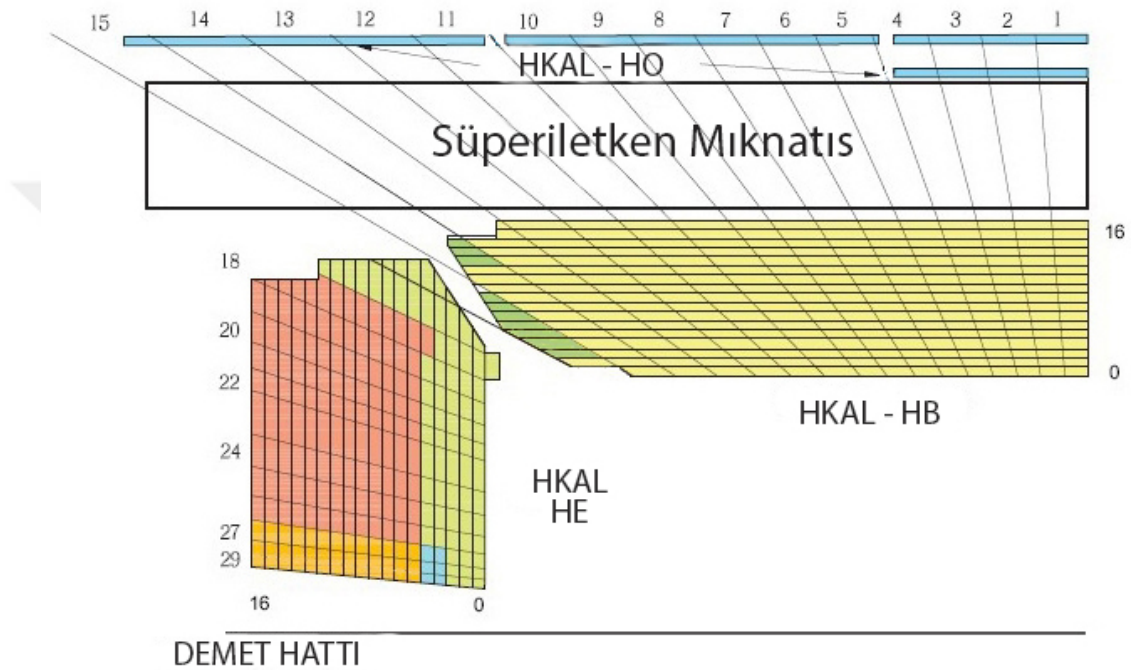
Şekil 2.8. Kapak demir boyunduruğuna yerleştirilen HE (CMS HCAL Collaboration, 2008, CMS Note 2008/010).

2.1.1.3.(2).c. Hadronik Dış Kalorimetresi

Merkezi psüdorapidite bölgesinde süper iletken mıknatıs içerisinde bulunan elektromanyetik fıçı (EB) ve hadronik fıçı (HB) kalorimetreleri yeterli kalınlığa sahip olmadıklarından dolayı, bu iki kalorimetrenin bileşik durdurma gücü hadron düşlerini durdurmakta yetersizdir. $|\eta| < 1.3$ psüdorapidite bölgesinde yeterli örnekleme sağlanmak, hadronik düşleri tamamen durdurmak ve kayıp dik enerji ölçümünü daha hassas bir biçimde yapmak için selenoid mıknatısın hemen arkasına hadronik dış kalorimetre (HO) eklenmiştir. HO, $1/4 \sin \theta$ etkileşim uzunluğuna sahip ek bir soğurucu gibi ve geç başlayan düşleri tanımlamak için kullanılır. Ayrıca HB'den sonra depolanan düş enerjilerini ölçmek için de HO kalorimetresi kullanılır. Müon detektörünün hemen önünde yer alan HO kalorimetresi, müon detektörü veya sarmal mıknatıs gibi, halka şeklinde 5 kısımdan oluşmaktadır: -2, -1, 0, +1, +2. HO kalorimetresi beş halkanın her birine ilk hassas tabaka olarak yerleştirilmiştir. Bu numaralandırma müon detektörü ile aynıdır ve z-ekseni boyunca artmaktadır. Beş halkanın z-eksenindeki konumları sırasıyla -5.342 m, -2.686 m, 0, +2.686 m ve +5.342 m'dir. 0 numaralı halka iki katmana, ± 1 ve ± 2 numaralı halkalar tek katmana sahiptir. $\eta=0$ 'da HB kalorimetresi minimum soğurucu derinliğine sahip olduğu için merkezi halka iki katmanlı HO sintilatörüne sahiptir. Merkezi halkada soğurucu malzeme olarak demir plakalar kullanılmıştır. Demir plakalar 19.5 cm kalınlığındadır ve detektörün merkezinden sırasıyla 3.82 m ve 4.07 m uzaklığa yerleştirilmiştir. Diğer tüm halkalar 4.07 m radyal uzaklıktadır ve tek bir HO katmanına sahiptir.

HO kalorimetresinin geometrik yapısı müon sisteminin geometrik yapısına uygun olarak tasarlanmıştır. HB kalorimetresi gibi HO x - y düzleminde sektörlere ayrılmıştır. Her bir HO halkası 12 sektöre ayrılmıştır. 12 özdeş sektör, 75 mm kalınlığına sahip paslanmaz çelik kirişler ile birbirinden ayrılmaktadır. HO kalorimetresinde bir sektör $\varnothing=30^\circ$ 'ye karşılık gelir ve her bir sektör kendi içerisinde $\varnothing=5^\circ$ 'lik altı dilime ayrılmıştır. Altı dilimin her biri η kulelerine bölünmüştür. HO kalorimetresinde fıçı müon detektörünün ilk katmanının önüne yerleştirilmiş tek veya çift katmanlı sintilatör döşemeler bulunmaktadır. Döşemelerden gelen sintilasyon ışığı 0.94 mm çapına sahip olan WLS aracılığıyla toplanır ve foto-detektörlere

taşınır. HO kalorimetresinin kurulumunun daha basit olması için sintilatör döşemeler tabla olarak isimlendirilen tek bir birim içerisine paketlenir. Her bir tabla 5° genişliğinde bir ϕ dilimine karşılık gelir. Ayrıca z (η) doğrultusunda bir tabla müon halkasının tüm zincirini kapsar.



Şekil 2.9. HB, HO ve HE detektörlerinin HKAL'daki kule ve derinlik bölümleri (CMS HCAL Collaboration, 2006, CMS Note 2006/138).

2.1.1.3.(2).d. İleri Hadron Kalorimetresi

İleri hadron kalorimetresinin detayları materyal metot kısmında yer almaktadır.

2.1.1.4. Süperiletken Mıknatıs

CMS detektörünün ana amaçlarından biri yeni keşifler için yüksek enerjili parçacıkların ve müonların momentumunu ölçmektir. Yüksek hassasiyetli momentum ölçümünü sağlamak için kuvvetli bir manyetik alan gerekmektedir. Bu nedenle CMS deneyinde yüksek manyetik alan sağlayan selenoidin kullanılmasına

karar verilmiştir. CMS süperiletken mıknatısı, yüksek çözünürlükte momentum ölçümlerinin yapılabilmesi için 4 T'lık manyetik alan sağlayabilecek şekilde tasarlanmıştır. 12.5 m uzunluğunda, 6.3 m çapında ve kütlesi 12.000 t olan süperiletken mıknatıs her biri 2.5 m olan beş modülden oluşmaktadır. Bugüne kadar inşa edilen en büyük ve en güçlü mıknatısıdır. $-268.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de çalışmaktadır ve depolama kapasitesi 2.6 Gj'dur. CMS detektörünün selenoid mıknatısı, izleyici sistem ve kalorimetreleri kapsayıp CMS'nin merkezinde yer alır ve müon detektörü tarafından çevrelenir. Ayrıca mıknatıs detektörün diğer parçalarına destek görevi üstlenmektedir (<http://cms.web.cern.ch/news/superconducting-magnet>).



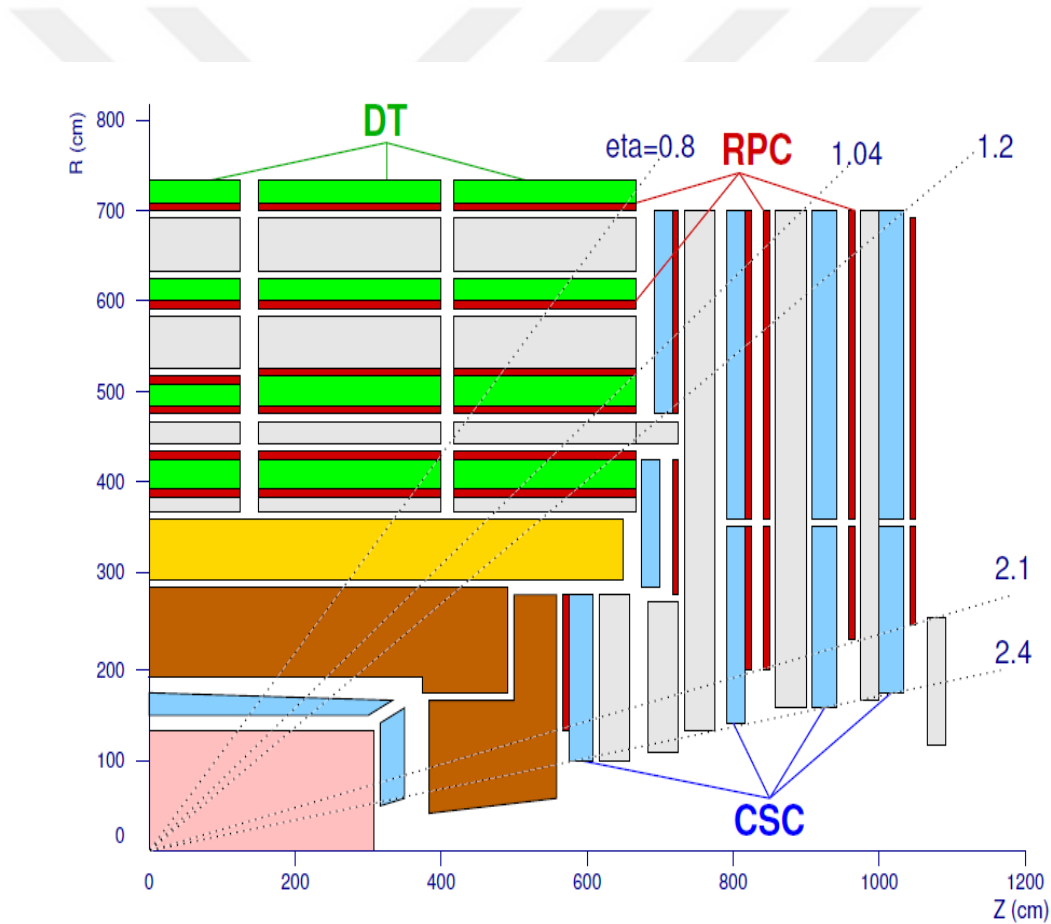
Şekil 2.10. CMS'de yer alan Süperiletken Mıknatıs
(<http://cms.web.cern.ch/news/superconducting-magnet>).

2.1.1.5. Müon Sistemi

Müon sistemi, CMS detektörünün en önemli kısımlarından biridir. İzleyici sistem ile birlikte müonları belirlemek ve momentumlarını hassas bir şekilde ölçmek için tasarlanmıştır. Kalorimetrelerin ve selenoid mıknatısın dışına yerleştirilen müon sistemi $|\eta| < 2.4$ psüdorapidite bölgesini kapsamaktadır. Müonlar, elektronlar ve pozitronlar gibi -1 yüklü lepton ailesine ait olan parçacıklardır fakat daha fazla

kütleye sahip olup herhangi bir etkileşime girmeden, detektör boyunca çok fazla enerji kaybetmeden yol alabilen iyonize parçacıklardır. Diğer parçacıklar müon çemberlerine ulaşmadan önce durdurulmaktadır. Birçok parçacığın aksine müonlar, kalorimetrelerde durdurulamazlar ve elektromanyetik duş oluşturmazlar. Bu nedenle müonları belirleyebilmek için silindirik fiçı biçimindeki müon çemberleri CMS detektörünün en dış bölgesinde yer alır.

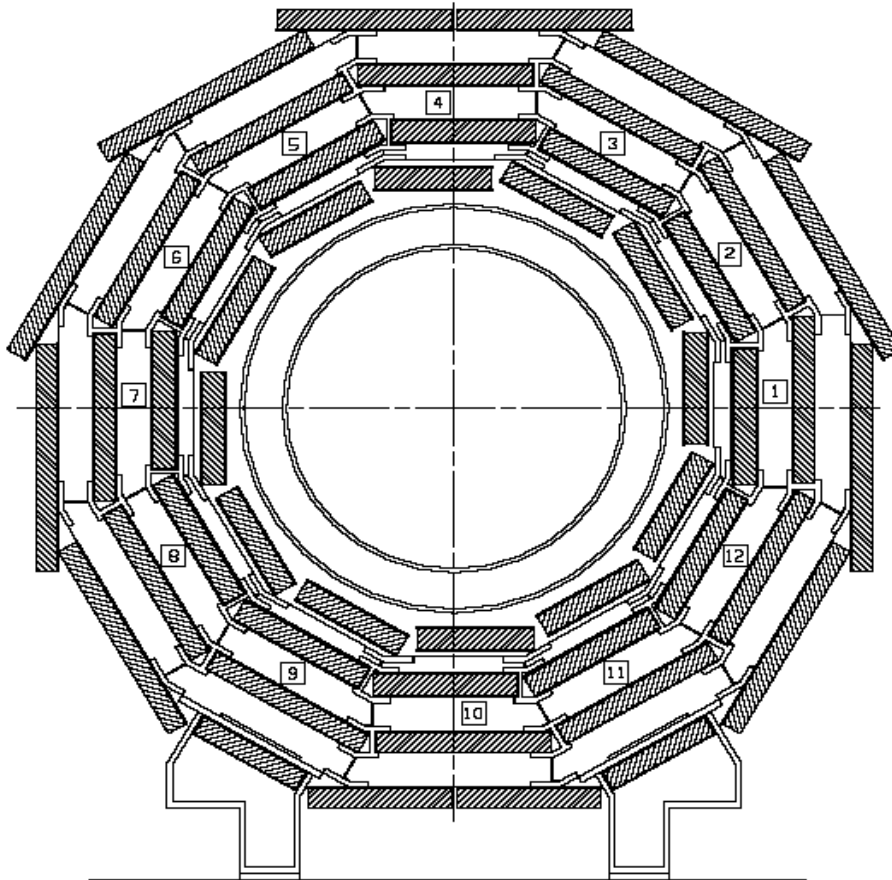
CMS deneyinde müonların belirlenmesi için sürüklenme tüpleri (DT), katot şerit odaları (CSC) ve dirençli paralel levhalı odalar (RPC) olmak üzere üç farklı gaz detektörü kullanılmaktadır.



Şekil 2.11. CMS Müon Sistemi (CMS TDR, 2006).

2.1.1.5.(1). Sürüklenme Tüpleri

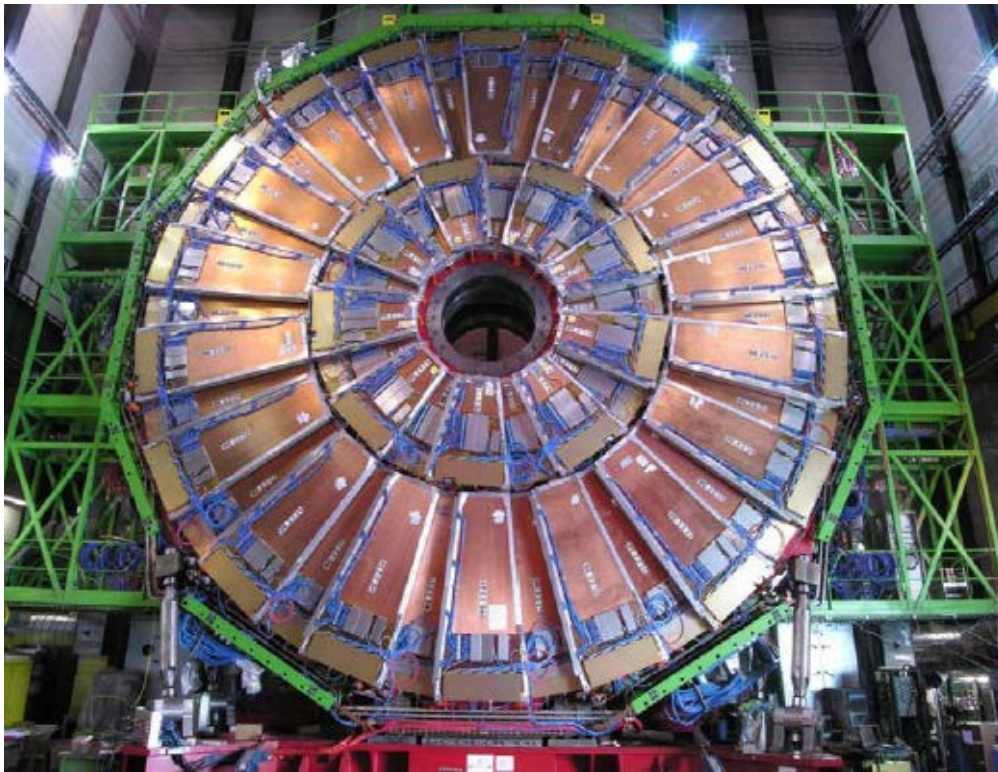
Sürüklenme tüpleri $|\eta| < 1.2$ psüdorapidite bölgesinde yer alır ve fıçı bölgesinde müonların konumlarını hassas bir şekilde ölçmek için kullanılır. 4 cm genişliğindeki tüplerden yapılmıştır. Her bir tüp içerisinde %85 oranında Ar, %15 oranında CO_2 gaz karışımı olan gergin teller içerir. Her DT çemberi ortalama $2 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$ boyutunda, 4 yatay ve 3 düşey olacak şekilde düzenlenmiş her birinde 60 tüp bulunan süper katman olarak adlandırılan 12 adet alüminyum katmandan oluşmaktadır. Fıçı bölgesi demet ekseninden 4.0 m, 4.9 m, 5.9 m ve 7.0 m yarıçaplarında bulunan dört eş merkezli istasyondan (MB1, MB2, MB3, MB4) ve 250 müon odacığından oluşmaktadır. İçteki ilk üç silindirde 60 sürüklenme odası, dış silindirde ise 70 sürüklenme odası bulunmaktadır. Detektörün bu kısmında 172000 adet duyarlı tel kullanılmaktadır.



Şekil 2.12. Sürüklenme Tüpleri (<http://cms.pd.infn.it/tdr/general.html>).

2.1.1.5.(2). Katot Şerit Odaları

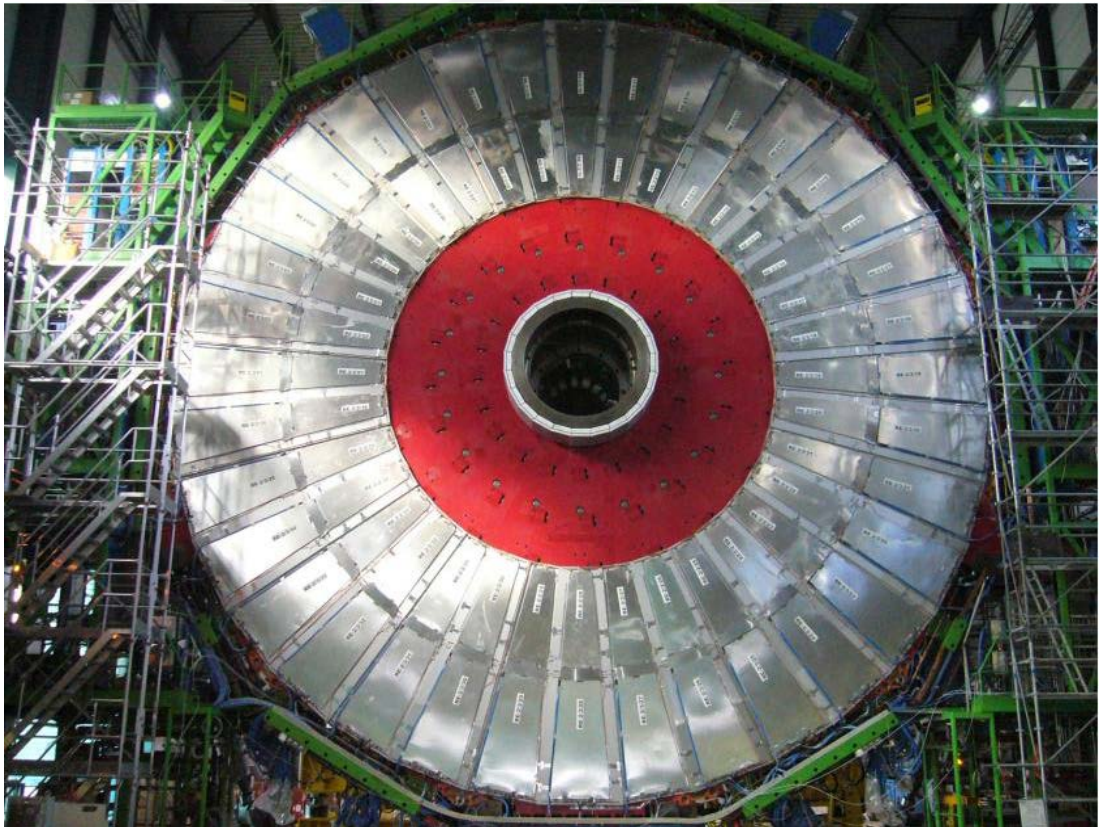
Tepki süresi hızlı ve radyasyona karşı dayanıklı olan CSC şeritleri manyetik alanın değişken parçacık miktarının yüksek olduğu kapak bölgesinde bulunmaktadır. $0.8 < |\eta| < 2.4$ psüdorapidite bölgesini kapsamaktadır. Her bir kapak bölgesi ME1, ME2, ME3, ME4 şeklinde adlandırılan dörtlü gruplar halindeki istasyonlardan meydana gelmektedir. Bu istasyonlar, demet eksenine dik olacak şekilde selenoid mıknatısı kapatan disk üzerine yerleştirilmiştir. Müon sisteminde 468 tane CSC kullanılmaktadır. Müonlar odacığın içinden geçtiği zaman gaz atomlarını iyonize eder ve elektron-iyon çifti üretir. İyonlar katot, elektronlar ise anot tarafından toplanır. Anot telindeki elektron yığını elektron çığı yaratır ve bakır katottaki iyon çığı ise şeritlerde bir sinyal yaratır. CSC’de şeritler ve teller birbirine dik olarak yerleştirilmiştir, bu yüzden odacıklardan iki koordinat bilgisi alınır. Hemen hemen aynı aralığa sahip tellerden dolayı kapak bölgesindeki müonların izlerinin belirlenmesi için hassas zaman ve uzay çözünürlüğü sağlamaktadır.



Şekil 2.13. CSC görünümü (CMS colaboration, 2008, JINST 3 S08004, 2008).

2.1.1.5.(3). Dirençli Paralel Levhalı Odalar

RPC'ler müon sisteminin $|\eta| < 1.6$ psüdorapidite bölgesini kapsamaktadır ve müon sisteminde 610 RPC kullanılmaktadır. Özel olarak tasarlanmış bir tetikleme sisteminden oluşan RPC, müon sisteminin fıçı ve kapak kısımlarına tamamlayıcı nitelikte eklenmiştir. RPC'ler 2 mm genişliğine sahip ikili gaz odalarıdır. Kötü bir momentum çözünürlüğüne rağmen çok hızlı bir tepki süresine sahip olduğu için hangi müonun hangi çarpışma zamanından geldiği, mükemmel bir zamanlama ile RPC'ler tarafından belirlenmektedir. Hızlı zamanlamaya sahip olan RPC odacıkları 1. Düzey tetikleme için bilgi vermektedir.



Şekil 2.14. RPC görünümü (<https://inspirehep.net/record/1184948/plots>).

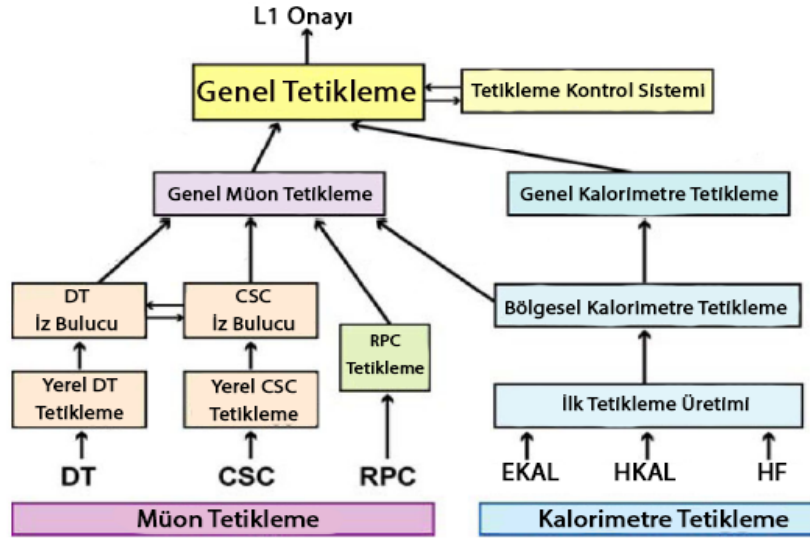
2.1.1.6. Tetikleme Sistemi

BHÇ'deki proton-proton ve ağır iyon çarpışmaları yüksek etkileşim oranlarında meydana gelmektedir. Her 25 ns'de gerçekleşen $p-p$ çarpışmalarının frekansı 40 MHz'dir. Ayrıca BHÇ için beklenen ışıklılık değeri olan $10^{34} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ değerinde yaklaşık 20 $p-p$ çarpışmaları gerçekleşmektedir. Bu etkileşimlerden gelen parçacıklar BHÇ'deki detektörlerde büyük miktarda bilgi üretmektedirler. Yaklaşık 1.5 MB'lık boyuta sahip olan verileri depolamak oldukça zordur ve zaman almaktadır. Gelen olayların tümü fiziksel olarak ilginç değildir ve veriye güçlü bir filtreleme uygulanmalıdır. Bundan dolayı, istenilen fizik olaylarını seçmek ve istenmeyen olaylar ile uğraşmamak için bir tetikleme sistemine ihtiyaç duyulur. CMS, iki seviyeye sahip bir tetikleme sistemi kullanmaktadır. Bunlar, seviye-1 tetikleme (L1T) ve yüksek seviye tetikleme (HLT) olarak adlandırılmaktadır.

2.1.1.6.(1). Seviye-1 Tetikleme

Seviye-1 tetikleme sistemi olay oranını 40MHz'den 100 kHz'e düşüren donanım temelli tetikleme sistemidir. L1T, foton, elektron, müon ve jetler gibi ilk-nesneleri seçimini yapmaktadır. Sadece L1T sistemi tarafından kabul edilen olaylar HLT sistemi tarafından işlenmektedir. L1T sistemine ait elektronikler CMS detektöründen 90 m uzağa yerleştirilmiştir. Detektörün ön ve arka elektroniklerinden gelen veriye tepki verebilmesi için zaman aralığı yaklaşık $3.2 \mu\text{s}$ 'dir. L1T sistemi, L1 kalorimetre tetiklemesi, L1 müon tetiklemesi ve L1 genel tetikleme olarak üç temel alt sistem şeklinde düzenlenmiştir.

L1 kalorimetre tetikleme ve L1 müon tetikleme sistemlerinden gelen bilgiler son kabul veya ret kararı yapan L1 genel tetikleme sistemine iletilir. L1 müon tetikleme sistemi DT, CSC ve RPC'den gelen bilgileri içermektedir (Şekil 2.15.).



Şekil 2.15. CMS seviye-1 tetikleme sisteminin şeması.

2.1.1.6.(2). Yüksek Seviye Tetikleme

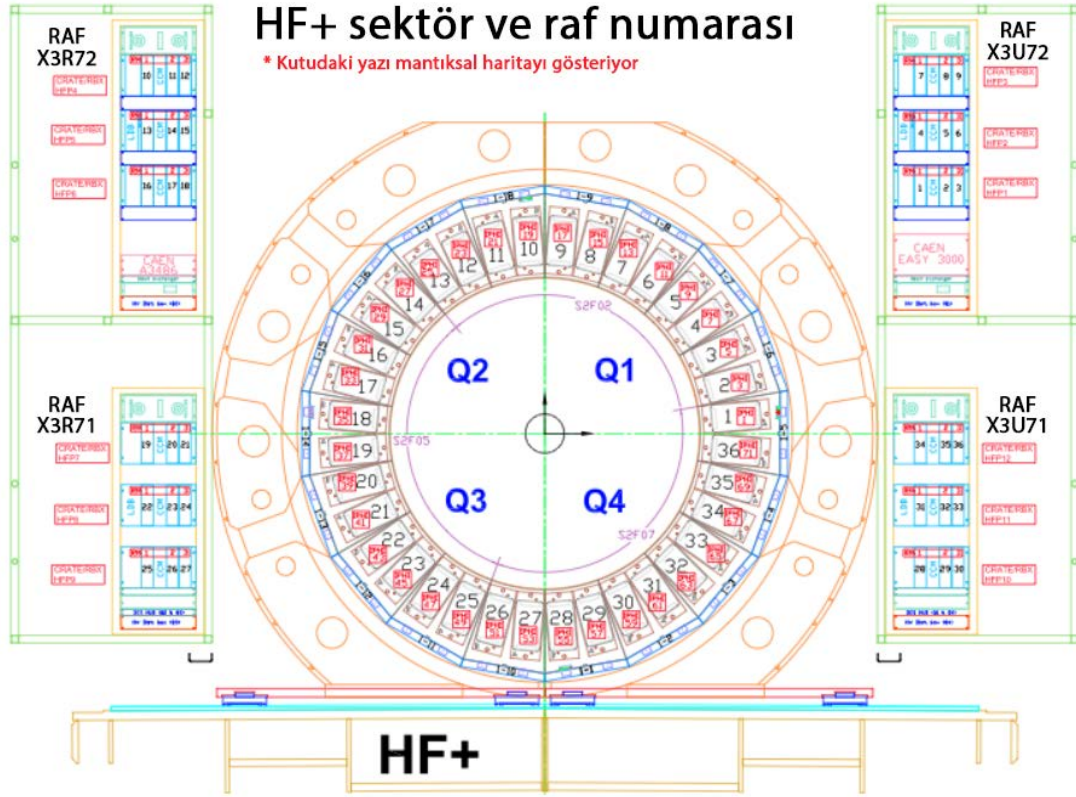
HLT, yazılım temelli bir tetikleme sistemidir ve olay oranını 100 kHz'den 100 Hz'e düşürür. HLT sistemi, olay boyutunu azaltmak için veri sıkıştırma tekniğini kullanan ön-uç elektroniklerden gelen tüm detektör bilgisini okur. L1T ile kıyaslandığında HLT, müonlar ve jetler gibi fizik nesnelerinin yeniden yapılandırılmasını sağlar. Bu aşamada yüklü parçacıkların momentum çözünürlüğünü daha iyi elde edebilmek için iç izleyici sistemden gelen bilgileri kullanır. HLT sisteminin tamamen yazılım temelli olduğu göz önüne alındığında, detektörün daha iyi anlaşılmasına bağlı olarak geliştirilebilir. HLT sisteminden geçen tüm olaylar, veri kalite görüntüleme (DQM) sistemine iletilir ve sınıflandırılarak saklanır.

3. MATERYAL VE METOD

3.1. İleri Hadron Kalorimetresi

İleri hadron kalorimetresi (HF), CMS detektörünün çok ileri bölgesine yerleştirilmiştir ve demet hattı ile çok küçük açılar yaparak saçılan parçacıkların enerjilerini ölçer. HF, $3 \leq |\eta| \leq 5$ (hüzme eksenine 0.7° ile 6° 'lik açılar yapan) psüdorapidite aralığında yer alıp ileri bölgede hadronik jetlerin varlanması ve kayıp dik enerjinin daha iyi bir şekilde ölçülmesi için tasarlanmıştır.

HF kalorimetresi çarpışma noktasının her iki tarafına simetrik olarak yerleştirilen HF+ ve HF- olmak üzere iki ayrı parçadan oluşmaktadır. Modüller etkileşim noktasından ± 11.2 m uzaklıkta bulunmaktadır. HF kalorimetresinin temel olarak dış yarıçapı 130 cm, iç yarıçapı hüzme merkezi referans alındığında 12.5 cm'dir. HF'nin her bir parçasında azimutal olarak $\Delta\phi = 20^\circ$ 'lik açılara karşılık gelen 18 kama bulunmaktadır. Dolayısıyla HF kalorimetresi toplamda 36 çelik kamadan oluşmaktadır. Her bir kama da 24 adet kuleden oluşur (Şekil 3.2). Her bir kule ise iki adet FTC ile okunmaktadır. HF'nin her bir kaması A ve B olmak üzere iki tane okuma ünitesi tarafından okunur. HF'nin her bir parçasında toplamda 36 tane okuma ünitesi yer almaktadır ve gelen sinyallerin tam olarak HF'in hangi kısmından geldiğini belirleyebilmek için tam sayılarla ifade edilen bir etiketleme sistemi $i\phi$ kullanılmıştır. $i\phi = 2(n - 1) + 1$, $n = 1, 2, \dots, 36$. Burada n ; her okuma ünitesinin numarasıdır.

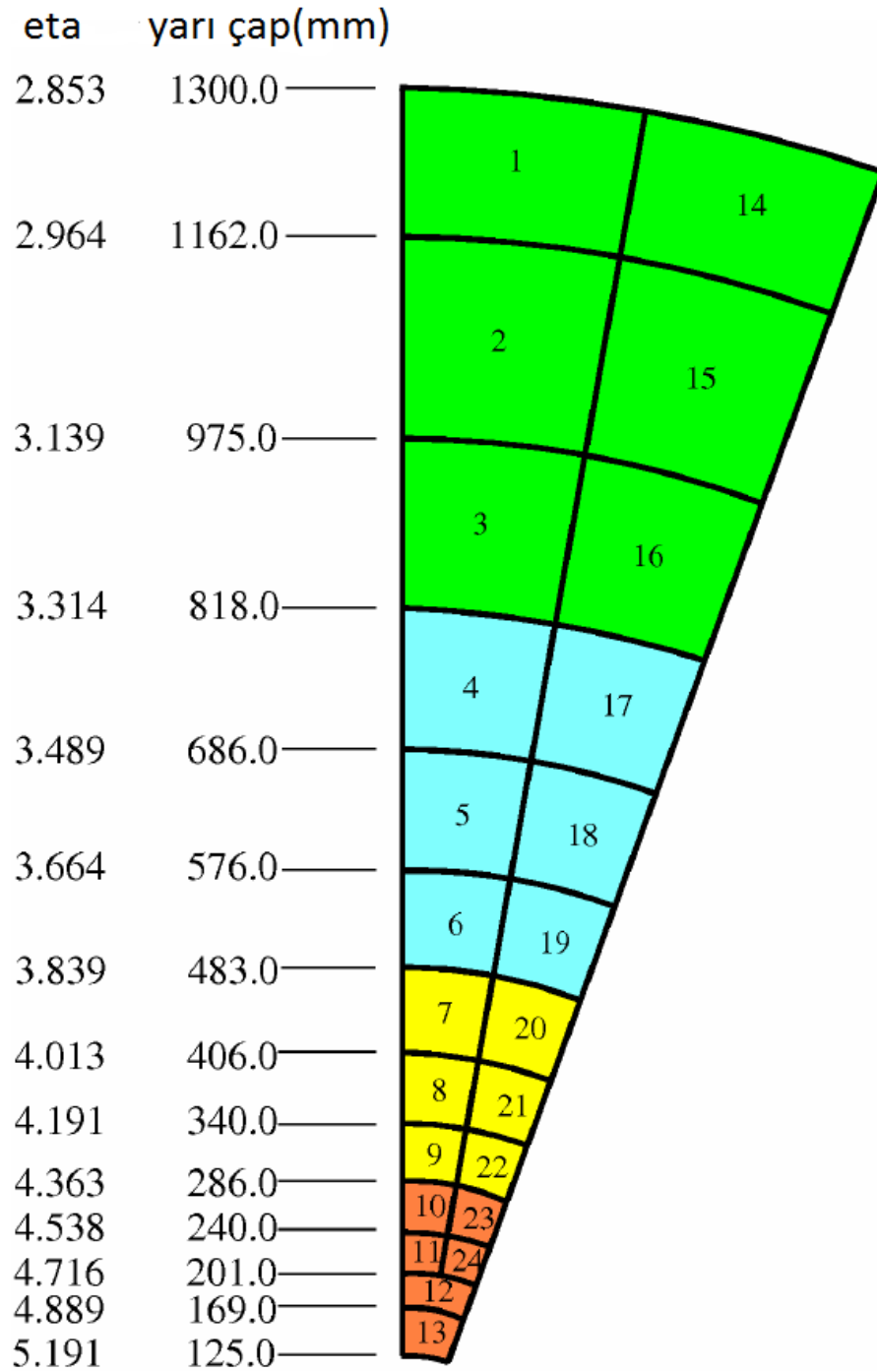


Şekil 3.1. HF'in tek bir parçasının (HF+) gösterimi (CMS DN -2012/011).

Her okuma ünitesinde ise 24 tane foto çoğaltıcı tüp (FÇT) bulunmaktadır. Gelen sinyallerin hangi okuma ünitelerinde gözlemlendiğinin belirlenmesinden sonra, hangi FÇT'lerden geldiğini belirleyebilmek için de $i\eta$ etiketi kullanılmıştır. $i\eta$, 29-41 değerleri arasında birer artarak değişir. Her $i\phi \times i\eta$ kesişimi bir HF kulesine karşılık gelir.

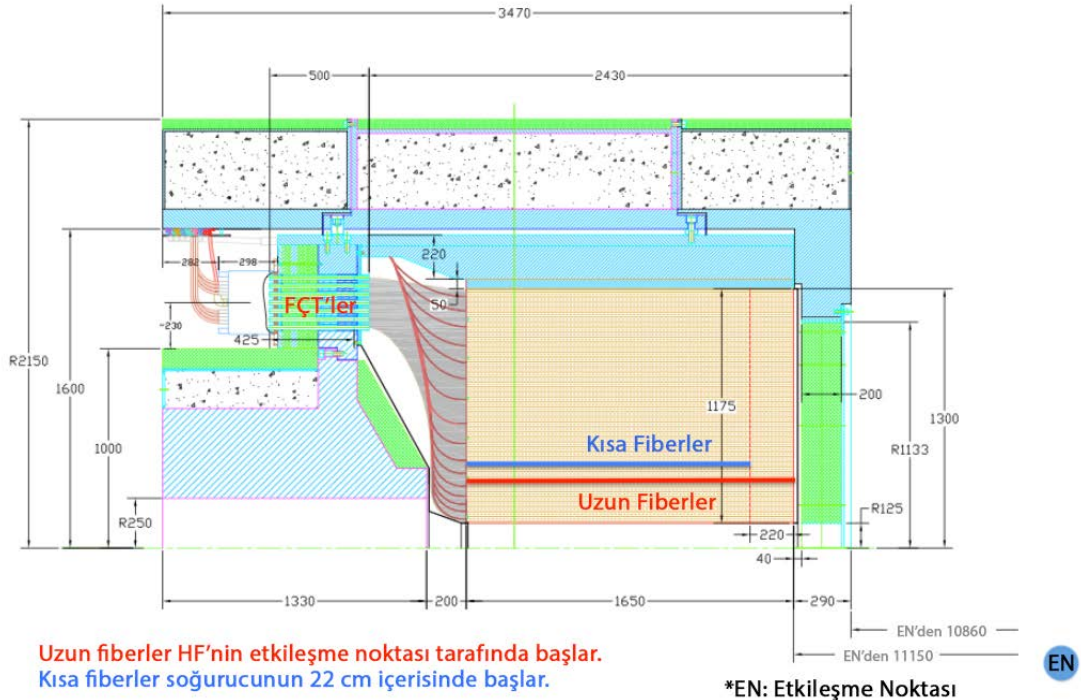
Çizelge 3.1. HF kuleleri için sanal koordinatlar.

$i\eta$	$i\eta$ aralığı		Boyut	
			$\Delta\eta$	$\Delta\emptyset$ (derece)
29	2.853	2.964	0.111	10
30	2.964	3.139	0.175	10
31	3.139	3.314	0.175	10
32	3.314	3.489	0.175	10
33	3.489	3.664	0.175	10
34	3.664	3.839	0.175	10
35	3.839	4.013	0.174	10
36	4.013	4.191	0.178	10
37	4.191	4.363	0.172	10
38	4.363	4.538	0.175	10
39	4.538	4.716	0.178	10
40	4.716	4.889	0.173	20
41	4.889	5.191	0.302	20



Şekil 3.2. HF okuma ünitesinin şematik gösterimi (CERN/LHCC 2006-001, CMS TDR 8.1).

HF kalorimetresi bulunduğu psüdo rapidite bölgesinden dolayı yüksek radyasyona maruz kalmaktadır. Her $p-p$ çarpışmasında HF'nin her iki parçasında biriken enerji değeri, detektörün diğer kısımlarına göre çok daha fazladır. Bundan dolayı kalorimetrede pasif eleman olarak çelik soğurucular ve aktif eleman olarak da bu soğurucular içerisine yerleştirilmiş radyasyona dayanıklı kuvars fiberler kullanılmaktadır (Şekil 3.4.). Kuvars fiberler, gelen $p-p$ demetine paralel olacak şekilde çelik soğurucuya yerleştirilmiştir. HF kalorimetresinde uzun ve kısa fiber olarak iki farklı boyutta kuvars fiberler kullanılmıştır. Bu uzun ve kısa fiberler HF'nin derinliklerini temsil ederler. Konumlarından dolayı uzun fiberler 1. derinlik, kısa fiberler ise 2. derinlik olarak isimlendirilir. Uzun fiberin boyu 1.65 m'dir. Bu fiber HF'nin elektromanyetik kısmını oluşturur ve hem elektromanyetik hem de hadronik etkileşen parçacıklara duyarlıdır. Kısa fiberleri ise 1.43 m uzunluğundadır ve çelik soğurucuların içinde, çelik soğurucuların ön kısmından 22 cm içeride başlar (Şekil 3.3.). Kısa fiberler HF'nin hadronik kısmını oluşturur. Hadronik kısım, elektromanyetik etkileşen parçacıkları hadronlardan ayırmak ve uzun fiberlerle hadronların enerjilerini ölçmek için kullanılır.



Şekil 3.3. HF kalorimetresinin teknik çizimi (CMS DN -2012/011).



Şekil 3.4. Kuvars fiberlerin yerleştirildiği HF kamalarının bir fotoğrafı (CMS colabration, 2008, JINST 3 S08004, 2008).

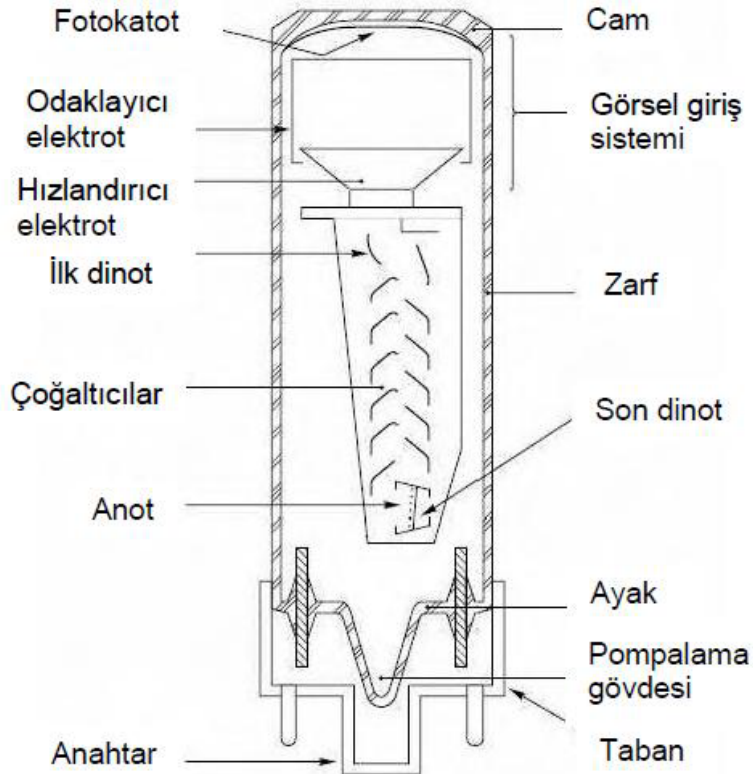
HF kalorimetresinin çalışma prensibi Çerenkov ışımaya dayalıdır. Hadronik kalorimetreye gelen parçacıklar çelik soğurucu ile etkileşir ve ikincil parçacıklar oluşur. Oluşan ikincil parçacıklar da enerjilerinin yettiği miktarda tekrar etkileşir ve yeni parçacıklar oluşur. Bu olay, oluşan yeni parçacıkların enerjisi yeni parçacık oluşmasına yetmeyene kadar devam eder. Bu şekilde birçok yeni parçacık oluşumuna düş denir. Elektromanyetik etkileşme yapan parçacıklar elektromanyetik düş, hadronik etkileşme yapan parçacıklar hadronik düş oluşturur. Etkileşmeler oluşurken parçacıklar kuvars fiberlerden geçerler. Parçacıkların hızları ışığın kuvars fiber içerisindeki hızından büyük olduğu zaman Çerenkov ışması yaparlar ve oluşan ışıktan tam yansıma şartını sağlayan kuvars fiberler aracılığıyla FČT'lere ulaşırlar. Uzun ve kısa fiberler FČT'lere bağlıdır ve gelen ışık sinyali FČT'ler tarafından okunur. FČT'ler ışığı ölçülebilir elektrik akımına dönüştüren aletlerdir. (CMS Note 2006/044)

3.2. Foto-Çoğaltıcı Tüp

Foto-çoğaltıcı tüp(FÇT)'ler, fotonları ölçülebilir bir elektrik akımına dönüştüren aygıtlardır. Duyarlılıkları çok yüksektir ve yüksek enerji fiziğinde daha çok sintilatörlerle birlikte kullanılırlar. Çeşitli kullanım alanları vardır.

3.2.1. Temel Yapısı ve Çalışma Prensibi

FÇT'ler, foto duyarlılığı yüksek materyalden yapılmış bir katot, elektron toplayıcı sistem, elektron çoğaltıcı kısım (dinotlar) ve sonunda da sinyalin toplandığı bir anottan meydana gelmektedir. Bütün parçalar vakumlanmış bir cam tüpe yerleştirilmiştir. Şekil 3.5.'te bir FÇT'nin yapısı gösterilmektedir.



Şekil 3.5. Foto-çoğaltıcı tüpün yapısı.

FÇT çalıştığı zaman katot, dinot ve anoda yüksek voltaj uygulanır. Gelen bir foton foto-katot ile etkileştiğinde, fotoelektrik olay gerçekleşir ve bir elektron yayımlanır. Uygulanan yüksek voltajdan dolayı, elektron ilk dinota doğru hızlanmaya başlar. Bu elektron, ilk dinota çarptığında enerjisinin bir kısmını dinottaki elektronlara aktararak ikincil elektronların yayımlanmasını sağlar. Bu elektronlar da hızlanarak bir sonraki dinota yönelir ve bu dinota çarparak başka elektronların yayımlanmasını sağlarlar. Bu olay, bu şekilde devam ederek, son dinottan yayımlananlarla birlikte bir elektron demeti anota düşer ve ölçülebilir bir akım olarak anottan toplanırlar.

Foto-çoğaltıcılar sürekli veya atım modunda çalıştırılabilirler. Eğer katot ve dinot sistemini doğrusal bir sistem olarak kabul edersek, FÇT'nin çıkışında oluşan akım doğrudan gelen fotonların sayısı ile orantılı olacaktır. FÇT'ler sintilatörle birlikte kullanılarak sintilatörden geçen parçacıkları varlamak ve de enerjisi ile ilgili bilgi elde etmek için kullanılabilirler.

3.2.1.1. Foto-Katot

Gelen fotonlar foto-katoda çarparak fotoelektrik olay sonucu elektron akımı oluştururlar. Bu fotonların geçişini kolaylaştırmak için foto-çoğaltıcının camının içine ince bir katman halinde foto duyarlılığı yüksek bir materyal konulur. Bu materyal genellikle kuvars ya da camdan yapılır. Foto-çoğaltıcılarda kullanılan yarı-saydam ve saydam olmayan olmak üzere iki tür foto-katot vardır:

Yarı-saydam katot: Oldukça çok kullanılan yarı saydam katotlar giriş penceresinin içerisine yerleştirilir. Gelen fotonların karşısında bulunan yarı-saydam foto-katottan elektronlar yayımlanır. Katot 10 ile 100 mm çaplı, düz veya bombeli cam üzerine yerleştirilir.

Saydam olmayan katot: Metal bir elektrot olarak FÇT içerisine yerleştirilir ve elektronlar aydınlatılmış yerlerden yayımlanır. Toplama elektrotlarının büyüklüğünden dolayı bu alan birkaç cm^2 ile sınırlıdır.

3.2.1.2. Elektron Çoğaltıcılar

Bir FÇT'nin elektrot yapısı ve potansiyel dağılımı en ideal performansı sağlayacak şekilde ayarlanır. Elektron çoğaltıcıları oluşturan dinotlar, dinotlardan yayımlanan elektronların bir sonraki dinota birkaç 100 eV enerji ile çarpmasını sağlayacak şekilde ayarlanır. İkincil yayının sonucu olarak bir dinottan diğer dinota giden elektronların sayısı, istenilen yükseltme faktörünü verecek şekilde artar. Elektron yörüngelerinin aşırı eğrilmesinden dolayı diğer dinotlara nazaran genellikle ilk iki ya da üç dinot arasına daha yüksek voltaj uygulanır. Dinotlar için ikincil yayılım materyalleri olarak berilyum oksit (Be-O), magnezyum-oksit (Mg-O), galyum-fosfat (Ga-P), galyum-arsenik fosfat kullanılır. Bu materyaller bakır, berilyum ya da paslanmaz çelik, nikelden yapılan bir alt katmanın üstünü kaplamak için kullanılır.

3.2.1.3. Anot

FÇT'nin çıkışında bulunan elektrotların yapısı FÇT'nin tekrarlanan kısımlarından farklı olur. Yapı, şu durumlar dikkate alınarak ayarlanır:

- Son dinottan yayımlanan bütün elektronların toplanması,
- Anot empedansının çıkış bağlantısının karakteristik empedansı ile uyumlu olması.

Anot, sadece son dinottan yayımlanan ikincil elektronları toplamak için son dinota çok yakın olarak ızgara şeklinde yerleştirilir. Bu düzenleme son dinot ve anot arasında yüksek bir elektrik alan oluşturup diğer yüklerin etkisini azaltılır. Ayrıca son dinot, anot çevresinde bir nevi elektrostatik ekran formundadır.



4. ARAŞTIRMA VE BULGULAR

2013-2014 yılında verilen uzun moladan önce HF kalorimetresinde R7525 FÇT'leri kullanılmaktaydı. Bu FÇT'ler için 2011 yılında kazanç testleri yapıldı. Mayıs ve Ekim ayları arasında yapılan bu testlerde, bazı FÇT'lerin ölçülen kazançlarında bulundukları konumlara göre %5 ile %14 arasında değişen düşüş gözlemlendi. Temmuz 2012'ye gelindiğinde, bazı FÇT'ler için bu kayıp %40 seviyesine kadar çıkarken bazı FÇT'ler içinse kazanç kaybının değişmediği gözlemlendi.

R7525 FÇT'lerinin camlarının kalınlığından dolayı, HF'de durdurulamayıp FÇT'lerin camlarına çarpan yüksek enerjili parçacıklar, cam içinde Çerenkov ışımaya sebep olmaktadır. Bu nedenle, R7525 FÇT'lerinin camlarının kalınlığından dolayı fazla gürültülü sinyallere sebep olması diğer bir problem olarak görüldü.

2012 yılında gerçekleşen yılsonu teknik durdurma sırasında HF kalorimetresinin $i\phi=43$ konumunda yer alan 24 tane R7525 FÇT'leri yeni R7600U-200-M4 FÇT'leri ile değiştirildi. R7600U-200-M4 FÇT'lerinin avantajlarından biri; R7525 FÇT'lerinin camlarına kıyasla daha ince camlara sahip olmalarıdır. Diğer bir avantaj ise; R7600U-200-M4 FÇT'leri için 2012 yılında Temmuz ayına kadar yapılan testlerin sonucunda kazanç kayıplarının %1 civarında olmasıdır. R7600U-200-M4 FÇT'leri $i\phi=43$ konumuna yerleştirildikten sonra alınan çarpışma verileri ile hem R7525 hem de R7600U-200-M4 FÇT'lerinin performans analizleri yapıldı. Analiz sonuçları, R7600U-200-M4 FÇT'lerin R7525 FÇT'lerden daha iyi olduğunu gösterdi. Bu sonuçlar doğrultusunda, 2013-2014 yılında verilen uzun mola sırasında HF'de yer alan tüm R7525 FÇT'leri yeni R7600U-200-M4 FÇT'leri ile değiştirildi. 2015 yılında alınan 13 TeV kütle merkezi enerjili çarpışma verileri ile performans analizlerine devam edildi. Yapılan analizler sonucu, gürültülü olayları belirlemek için kullanılan filtrelerinin bazılarının 25ns ile alınan veriler için sağlıklı çalışmadığı gözlemlendi (CMS DN-2012/011).

4.1. Gürültülü Olayların Belirlenmesi

Gürültülü olayların belirlenip temizlenmesi, gerçek fizik olaylarının sağlıklı analizinin yapılabilmesi için çok önemlidir. Bu tür gürültülü olaylar, HF kalorimetresinden alınan çarpışma verilerinin topolojik ve sinyallerin varış zamanlarının dağılımına bakılarak belirlenebilir. Özellikle, gürültülü olayların çoğu, yüksek enerjili bazı parçacıkların, çoğunlukla müonların, HF kalorimetresinde durdurulamayıp FÇT pencerelerine çarpmalarından kaynaklıdır. Bu olaylar normal olaylardan daha yüksek enerji ölçümlerine sebep olur ve bunların ürettikleri sinyaller normal olaylardan daha önce ulaşır.

Bu tür olayları belirlemek için, L1T ve HLT tetikleme sistemlerine ek olarak yazılım tabanlı filtreler kullanıldı. Bunların üç tanesi topolojik temelli ve iki tanesi de zaman temellidir. Bu gürültü filtreleri CMS kütüphanesinde aşağıdaki isimlerle yer almaktadır:

❖ Topolojik Temelli Filtreler:

- HFLongShort
- HFPET
- HFS8S1Ratio

❖ Zaman Temelli Filtreler:

- HFDigiTime
- HFInTimeWindow

HF kalorimetresinden alınan çarpışma verilere bu filtreler uygulanılarak FÇT'lerin ve kullanılan bu gürültü filtrelerinin performans analizleri yapıldı.

4.1.1. Topolojik Temelli Filtreler

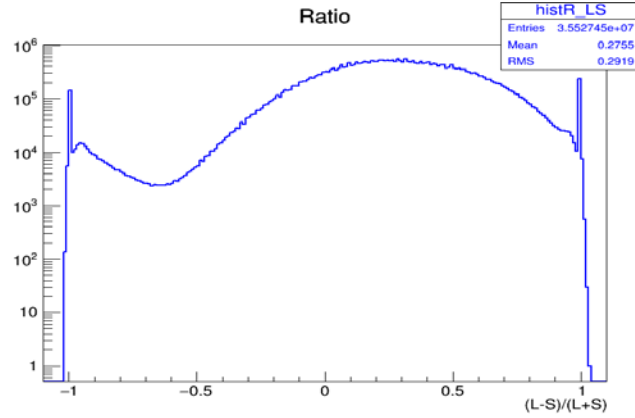
HF kalorimetresi için kullanılan topolojik temelli filtrelerin çalışma prensibi genel olarak kalorimetrenin çelik soğurucularına gömülü uzun ve kısa fiberlere dayanır. Gerçek olaylar, HF kalorimetresinde yer alan hem uzun fiberlerde hem de kısa fiberlerde birbirine yakın sinyaller bırakmaktadırlar. Kısa fiberde sinyal görülüp uzun fiberde sinyal görülmemesinin nedeni kısa fiberlerin bağlı olduğu FTÇ'ye çarpan parçacıklardan kaynaklanır ve bunlar gürültülü olaylar olarak adlandırılır. Bu ve buna benzer kıstaslardan yararlanarak gürültüleri yok edecek filtreler geliştirilmiştir.

4.1.1.1. HFLongShort Filtresi

HFLongShort filtresi direkt olarak uzun ve kısa fiberlerde ölçülen enerjileri kıyaslayarak gürültülü olayları belirlemektedir. Bunun için Eşitlik 4.1 ile hesaplanan oran incelenir.

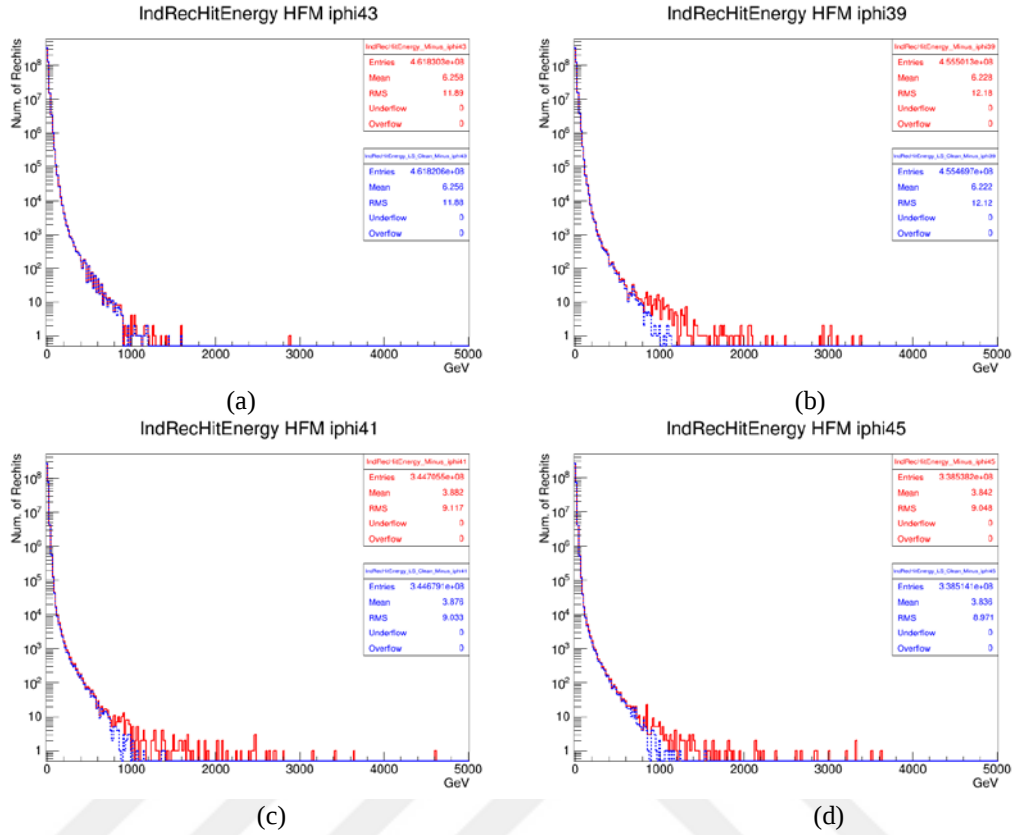
$$R = \frac{E_L - E_S}{E_L + E_S}. \quad (4.1)$$

Burada; E_L uzun fiberlerde gözlenen enerji, E_S kısa fiberlerde gözlenen enerjidir. Bu oranın 1 olması sadece uzun fiberde -1 olması ise sadece kısa fiberde enerji ölçüldüğünü gösterir. Sadece kısa fiberlerde enerji ölçülmesi ($R=-1$) bu olayın gürültüden kaynaklandığını gösterir. Hadronik duşlar için bu oran yaklaşık olarak sıfır ($R \sim 0$) olmalıdır. Bu durumlar Şekil 4.1'den görülebilir.



Şekil 4.1. HF kalorimetresinde uzun ve kısa fiberlerde gözlenen enerjiler için oran (R) grafiği

HF kalorimetresinden 2012 yılında alınan veriler, sadece HFLongShort filtresi kullanılarak analiz edilerek $i\phi=43$ konumunda yer alan yeni FÇT'ler ile $i\phi=39, 41, 45$ konumlarında yer alan eski FÇT'ler kıyaslanmıştır. Bu filtrenin etkinliği Şekil 4.2'den görülebilir.



Şekil 4.2. HFLongShort filtresi uygulanmadan önce (kırmızı) ve uygulandıktan sonra (mavi), (a) $i\phi=43$ konumundaki yeni ve (b) $i\phi=39$, (c) $i\phi=41$, (d) $i\phi=45$ konumlarındaki eski FCT'lerden elde edilen enerji dağılım grafikleri.

4.1.1.2. HFPET Filtresi

Eğer uzun fiberde büyük bir sinyal ölçüp kısa fiberde çok küçük bir sinyal ölçülüyorsa ($R \sim 1$ durumu) bu durum gürültü kaynaklı olabileceği gibi elektromanyetik etkileşen parçacıkların sadece uzun fiberde sinyal üretmelerinden de kaynaklanabilir. Çünkü elektromanyetik etkileşen parçacıklar enerjilerinin tamamını kısa fibere ulaşmadan depo edebilir. $R \sim 1$ durumlarının gürültüden kaynaklanıp kaynaklanmadığını ayırt edebilmek amacıyla HFPET filtresi geliştirilmiştir.

HFPET filtresi hem uzun fibere hem kısa fibere ayrı ayrı R ve enerji kısıtlaması uygulamaktadır.

HFPET filtresinin temel algoritması:

$i\eta$ ilgili kulenin koordinat indeksi, R Eşitlik 4.1 ile verilen oran ve $R_L(\sim 0.8)$ ve $R_S(\sim -0.8)$ sırayla uzun ve kısa fibere uygulanan R kısıtları ve E_L ve E_R de enerji kısıtları olmak üzere

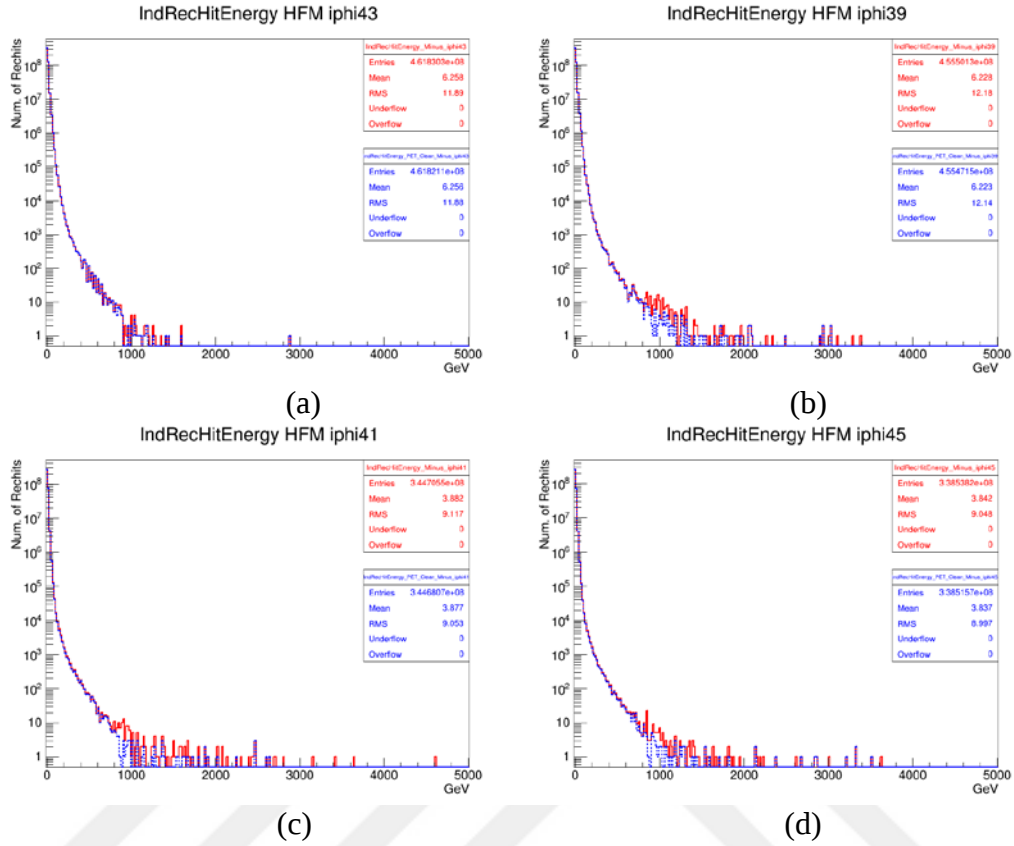
- Uzun fiberler için;

$$R > R_L \text{ ve } E_L > E_{PET,L}(|i\eta|) = 162.4 - 10.19|i\eta| + 0.21(|i\eta|)^2$$

- Kısa fiberler için;

$$R < R_S \text{ ve } E_S > E_{PET,S}(|i\eta|) = 129.9 - 6.61|i\eta| + 0.1153(|i\eta|)^2$$

şartlarını sağlayan sinyallerin gürültüden kaynaklandığı düşünülür. Bu filtrenin etkinliği Şekil 4.3'ten görülebilir.

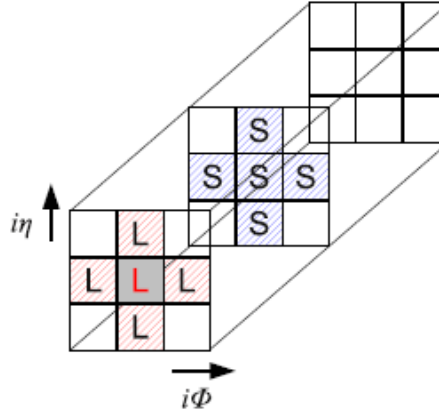


Şekil 4.3. HFPET filtresi uygulanmadan önce (kırmızı) ve uygulandıktan sonra (mavi), (a) $i\phi=43$ konumundaki yeni ve (b) $i\phi=39$, (c) $i\phi=41$, (d) $i\phi=45$ konumlarındaki eski FCT'lerden elde edilen enerji dağılım grafikleri.

4.1.1.3. HFS8S1Ratio Filtresi

HFS8S1Ratio filtresi sadece uzun fiberlerde ölçülen enerjiler için kullanılır. Bu filtrede ilgili kulenin kısa fiberlerinde ölçülen enerji ile bu kuleye komşu olan dört kuledeki toplam (uzun ve kısa fiberler) enerji toplanır ve ilgili kulenin uzun fiberlerinde ölçülen enerjiye oranı hesaplanır (Şekil 4.4. ve Eşitlik 4.2).

$$\left(\frac{S9}{S1}\right)_L = \frac{E_S + \sum_{i=1}^4 E_{L,i} + \sum_{i=1}^4 E_S}{E_L}. \quad (4.2)$$

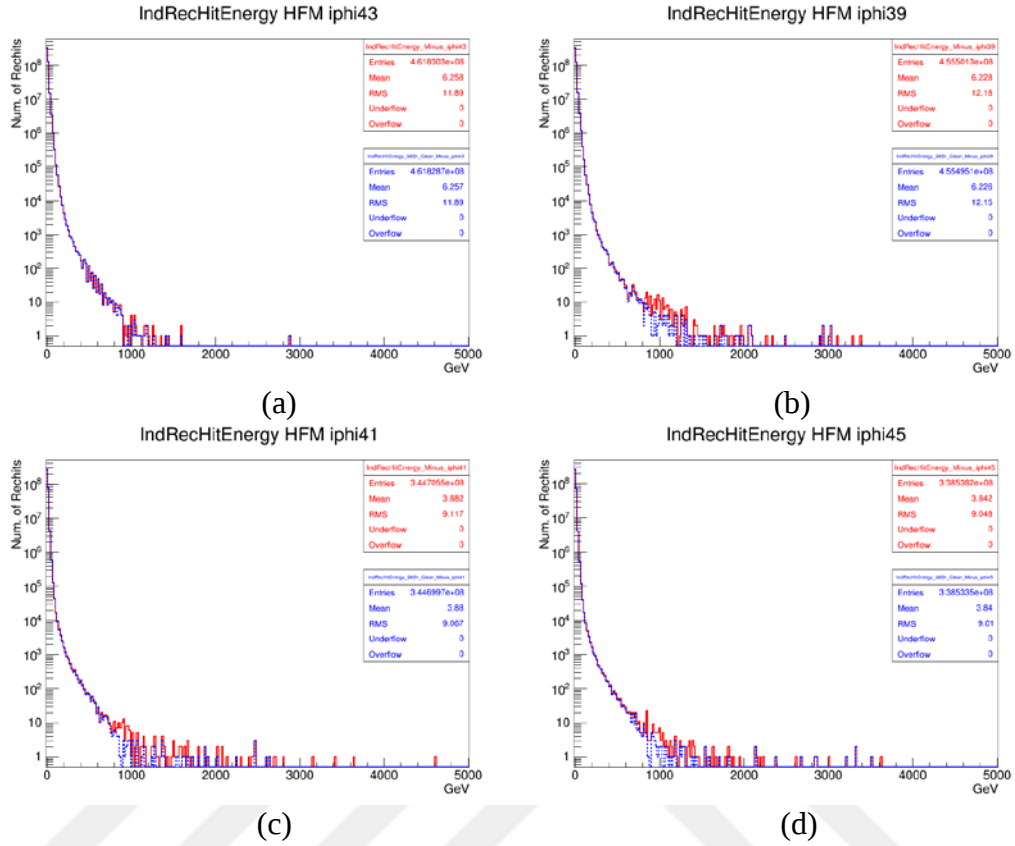


Şekil 4.4. HFS8S1Ratio filtresinin hesaplanması için kullanılan yöntemin şematik gösterimi. Burada L uzun fiberleri, S kısa fiberleri temsil etmektedir.

HFS8S1Ratio filtresinin temel algoritması:

- Eğer $E_L > E_{PET,L}(|i\eta|)$ ve $S9/S1 < Y(E_L, i\eta) = a(i\eta) \ln(E_L/b(i\eta))$ ise ölçülen sinyalin gürültülü bir olaydan kaynaklandığı düşünülür, burada $Y(E_L, i\eta)$ uzun fiberde gözlenen enerjiye ve $i\eta$ bağlı değişken eşik değer, $a(i\eta)$ $i\eta$ -bağımlı eğim parametresi, $b(i\eta)$ $i\eta$ -bağımlı kesişim parametresidir.

HFS8S1Ratio filtresinin etkinliği Şekil 4.5'ten görülebilir.

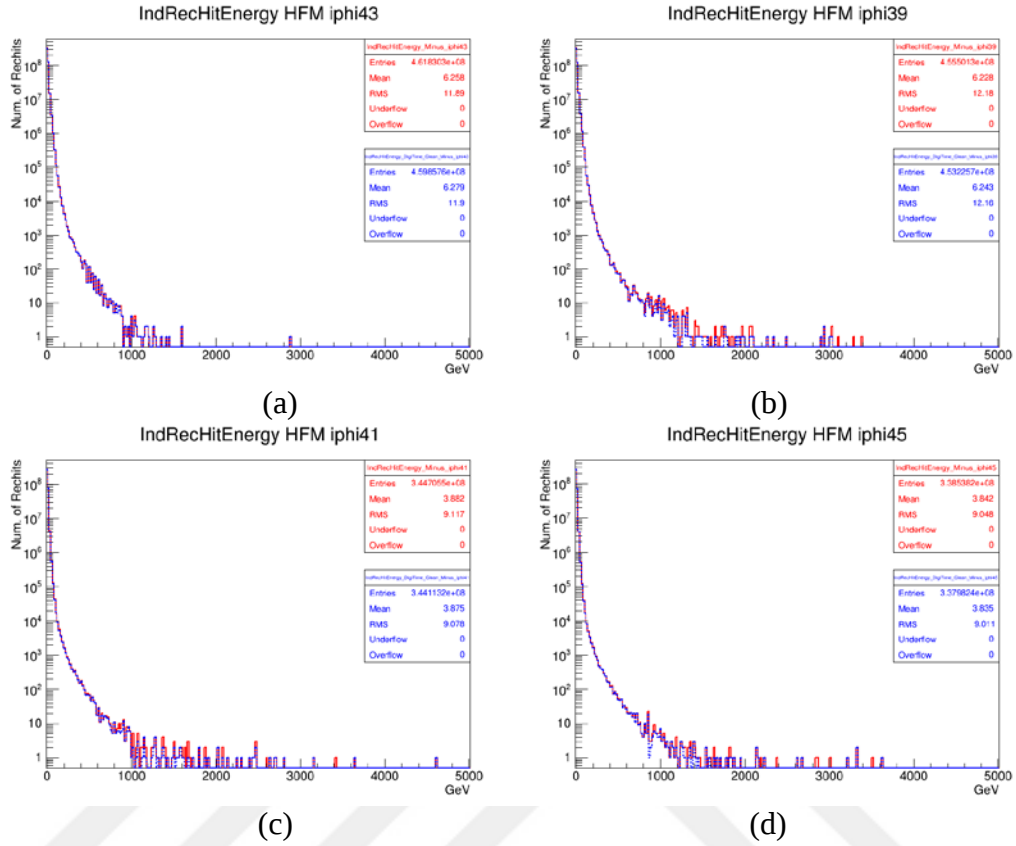


Şekil 4.5. HFS8S1Ratio filtresi uygulanmadan önce (kırmızı) ve uygulandıktan sonra (mavi), (a) $i\phi=43$ konumundaki yeni ve (b) $i\phi=39$, (c) $i\phi=41$, (d) $i\phi=45$ konumlarındaki eski FÇT'lerden elde edilen enerji dağılım grafikleri.

4.1.2. Zaman Temelli Filtreler

4.1.2.1. HFDigiTime Filtresi

Gürültülü olayların sinyalleri, gerçek olaylara kıyasla FÇT'lere daha kısa sürede ulaşmaktadır. HFDigiTime filtresi, 25 ns'den daha kısa sürede gelen tüm sinyalleri eler. Bu tür sinyallerin çoğunlukla yüksek enerjili olaylardan kaynaklandığını Şekil 4.6'da görülebilir.



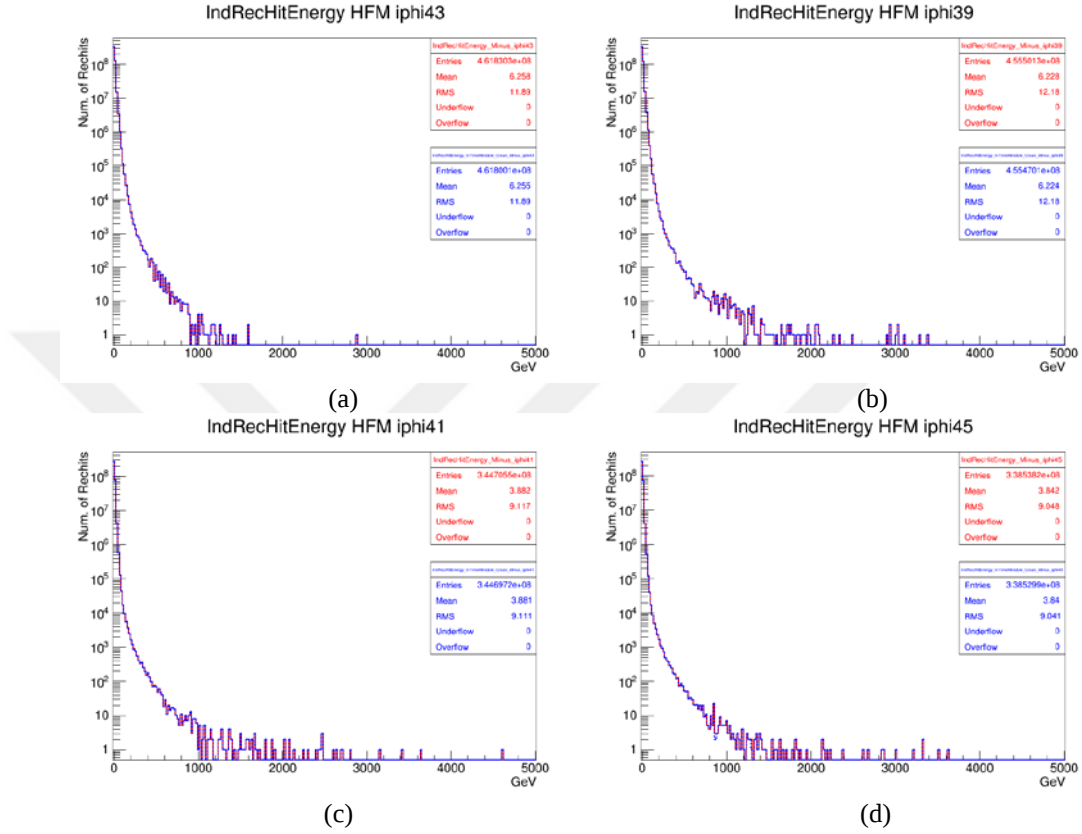
Şekil 4.6. HFDigiTime filtresi uygulanmadan önce (kırmızı) ve uygulandıktan sonra (mavi), (a) $i\phi=43$ konumundaki yeni ve (b) $i\phi=39$, (c) $i\phi=41$, (d) $i\phi=45$ konumlarındaki eski FÇT'lerden elde edilen enerji dağılım grafikleri.

4.1.2.2. HFInTimeWindow Filtresi

Bazen gerçek olaylar gürültülü olaylar gibi beklenen süreden daha erken FÇT'lere ulaşabilir ve bu tür durumlarla nadiren karşılaşılır. Bu tür durumlar için HFInTimeWindow filtresi kullanılır. HFInTimeWindow filtresi uzun ve kısa fiberlere ayrı ayrı uygulanır. HFInTimeWindow filtresinin temel algoritması:

- Uzun fiberlerden gelen sinyaller için; eğer $E > 40$ GeV ve $t < -10$ ns veya $t > 10$ ns ise gelen sinyalin gürültülü bir olaydan kaynaklandığı belirlenir.
- Kısa fiberlerden gelen sinyaller için; eğer $E > 40$ GeV ve $t < -12$ ns veya $t > 10$ ns ise gelen sinyal gürültülü bir olaydan kaynaklandığı belirlenir.

Burada t sinyalin gelme zamanını temsil etmektedir. Bu filtrenin elelediği sinyallerin azlığı şekil 4.7’den görülebilir.



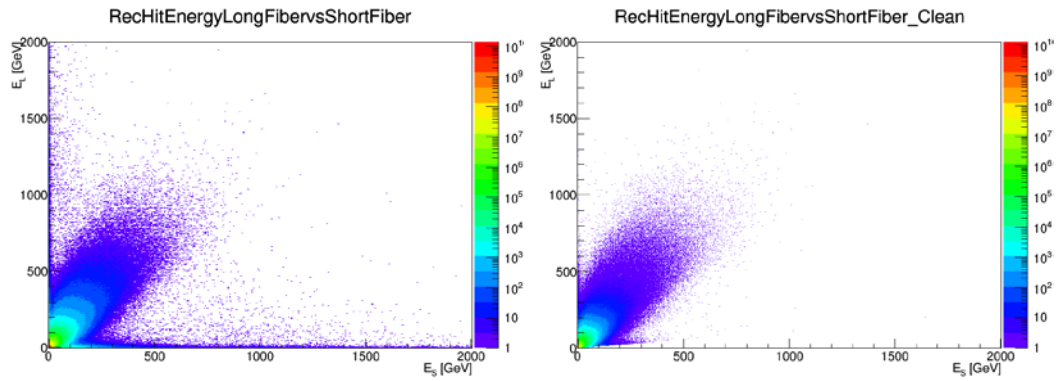
Şekil 4.7. HFIInTimeWindow filtresi uygulanmadan önce (kırmızı) ve uygulandıktan sonra (mavi), (a) $i\phi=43$ konumundaki yeni ve (b) $i\phi=39$, (c) $i\phi=41$, (d) $i\phi=45$ konumlarındaki eski FÇT’lerden elde edilen enerji dağılım grafikleri.

4.2. Veri Analizi

4.2.1. $\sqrt{s} = 8$ TeV Çarpışma Verilerinin Analizi

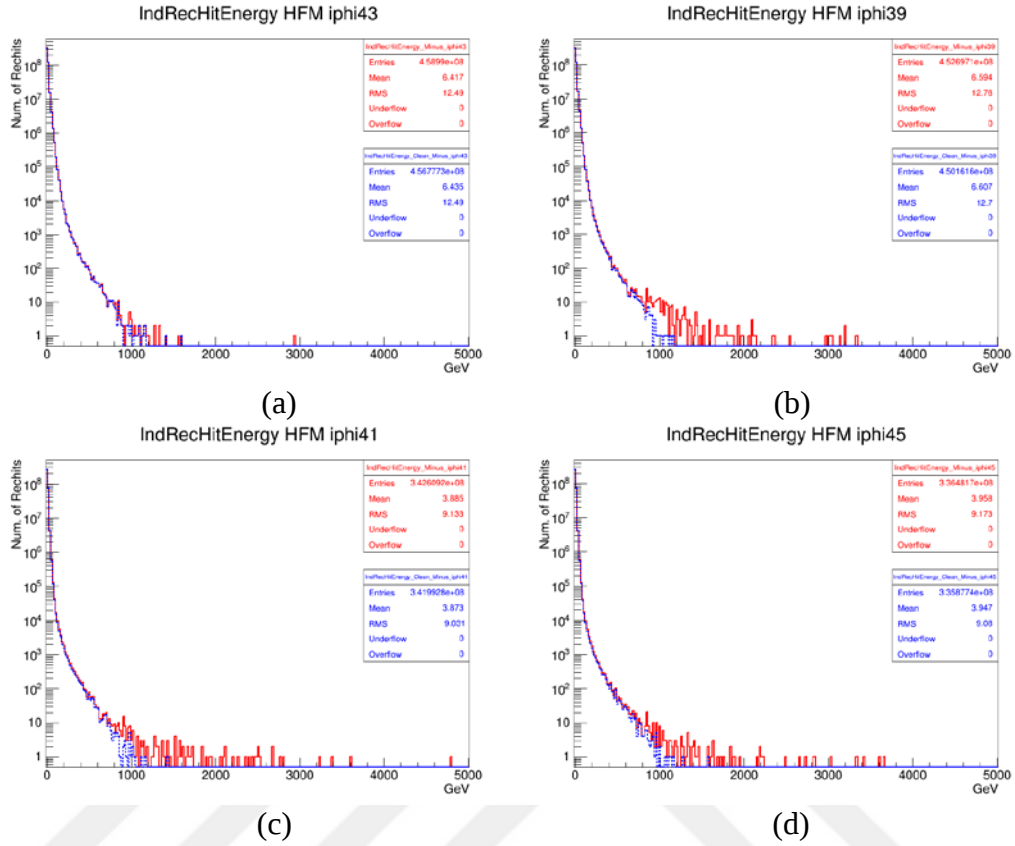
Yeni FÇT’lerin 2011 yıllarında yapılan kazanç testlerinde eski FÇT’lere göre daha iyi performans sergiledikleri gözlemlendi. Bu FÇT’lerin genel performanslarının karşılaştırılması için 2012 yılında kütle merkezi enerjisi 8 TeV olan çarpışmalardan toplanan veriler kullanıldı.

İlk aşamada, uzun fiberlerde ölçülen enerjinin kısa fiberlerde ölçülen enerjiye karşı grafikleri oluşturuldu. Bu grafiklerde x ve y eksenlerine yakın olan sinyaller, sadece kısa veya sadece uzun fiberlerde ölçülen sinyalleri göstermektedir. Bu tür sinyalleri elemek için bu analiz yapılırken, Bölüm 4.1.'de bahsedilen gürültü filtreleri kullanıldı ve elde edilen grafiklerde bu tür sinyallerin elendiği görüldü (Şekil 4.8.).



Şekil 4.8. 8 TeV'lik çarpışma verilerinin analizi ile HF gürültü filtrelerinin uygulanmadan önce (sol) ve uygulandıktan sonra (sağ) elde edilen E_S 'nin E_L 'ye karşı grafikleri.

$i\phi=43$ konumunda yer alan yeni FÇT'lerin performanslarını, $i\phi=39, 41, 45$ konumlarında yer alan eski FÇT'leriyle karşılaştırmak için bu konumlardaki FÇT'lerin enerji dağılımları filtreli ve filtresiz olarak bakıldı. Yeni FÇT'lerden elde edilen filtreli ve filtresiz enerji dağılımlarında önemli bir farklılık görülmezken eski FÇT'lerin enerji dağılımlarında önemli farklılıklar görüldü. (Şekil 4.9.). Bu durumun enerji kısıtlaması uygulandığında nasıl değiştiğini gözlemek için filtrelere ek olarak 300 GeV'lik enerji kısıtlaması uygulandı. Enerji kısıtlaması uygulandıktan sonra kalan sinyal sayıları Çizelge 4.1'de her bir filtre için ayrı ayrı verilmektedir. Çizelge 4.2'de gürültülü sinyallerin sayıları ve Çizelge 4.3'te ise gürültülü sinyallerin yüzdesi verilmektedir. Çizelge 4.3'ten görülebileceği gibi yeni FÇT'lerin enerji kısıtlamasından sonraki gürültü yüzdeleri her filtre için %3 ile %4 arasında değişirken bu yüzde eski FÇT'ler %14 ile %16 arasında değişmektedir. Bu da eski FÇT'lerde gürültülü olay sayısının yüksek olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.9. Tüm HF gürültü filtreleri uygulanmadan önce (kırmızı) ve uygulandıktan sonra (mavi), (a) $i\phi=43$ konumundaki yeni ve (b) $i\phi=39$, (c) $i\phi=41$, (d) $i\phi=45$ konumlarındaki eski FÇT'lerden elde edilen enerji dağılım grafikleri.

Çizelge 4.1. 8 TeV'de alınan verilerin analiz sonuçlarına göre, her bir $i\phi$ konumunda bulunan FÇT'ler için enerjisi 300 GeV'den büyük olan sinyallerin sayısı.

$i\phi$	43	39	41	45
Toplam Sinyal	3710	4160	2550	2487
HFLongShort	3607	3576	2149	2148
HFS8S1Ratio	3660	3807	2293	2266
HFPET	3634	3771	2278	2256
HFDigiTime	3633	3934	2418	2379
HFInTimeWindow	3701	4138	2543	2474
Gerçek Sinyallerin Sayısı	3565	3515	2132	2126

Çizelge 4.2. 8 TeV’de alınan verilerin analiz sonuçlarına göre, her bir $i\emptyset$ konumunda bulunan FÇT’ler için enerjisi 300 GeV’den büyük olan gürültülü olaylardan kaynaklanan sinyallerin sayısı.

$i\emptyset$	43	39	41	45
HFLongShort	103	584	401	339
HFS8S1Ratio	50	353	257	221
HFPET	76	389	272	231
HFDigiTime	77	226	132	108
HFInTimeWindow	9	22	17	13
Gürültülü Sinyallerin Sayısı	145	645	418	361

Çizelge 4.3. 8 TeV’de alınan verilerin analiz sonuçlarına göre, her bir $i\emptyset$ konumunda bulunan FÇT’ler için enerjisi 300 GeV’den büyük olan gürültülü olaylardan kaynaklanan sinyallerin yüzdesi.

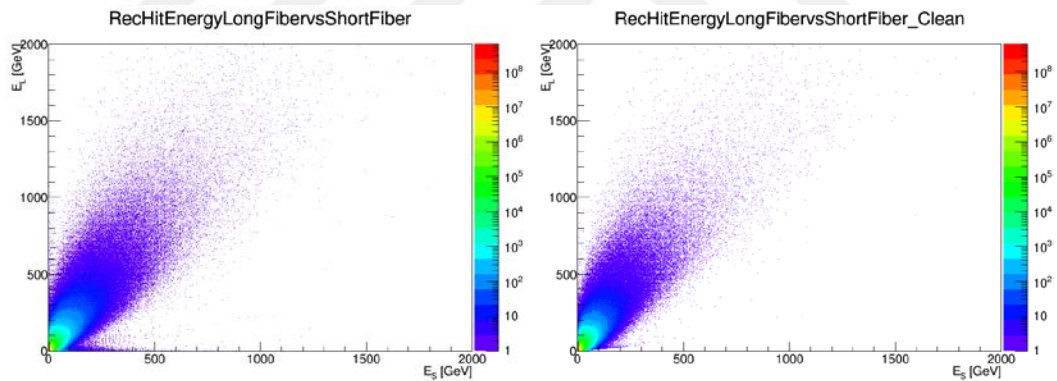
$i\emptyset$	43	39	41	45
HFLongShort	2,78	14,04	15,72	13,63
HFS8S1Ratio	1,35	8,48	10,08	8,88
HFPET	2,05	9,35	10,66	9,29
HFDigiTime	2,07	5,43	5,17	4,34
HFInTimeWindow	0,24	0,53	0,27	0,52
Gürültülü Sinyallerin Yüzdesi	3,91	15,50	16,39	14,50

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

2013-2014 yıllarında arasında verilen uzun mola döneminden önce BHÇ’de çarpıştırılan proton hüzmelerinin kütle merkezi enerjisi 8 TeV’di ve CMS detektörü çarpışmalar her 50 ns’de bir gerçekleştiriyordu. Uzun mola döneminden sonra 2015 yılında BHÇ tekrar çalışmaya başladığında çarpışmaların kütle merkezi enerjisi 13 TeV’e arttırıldı, fakat çarpışmalar arasındaki süre yine 50 ns olarak kaldı. BHÇ 1 ay çalıştıktan sonra çarpışmalar arasındaki süre 25 ns’ye düşürüldü. Yeni şartlarda filtrelerin hala etkin olup olmadığını test etmek hem 50 ns hem de 25 ns verilerinin analizleri yapıldı. İlk aşamada, 50 ns’de alınan 13 TeV’lik çarpışma verilerinin analizleri yapıldı ve bu analizlerin tamamlanmasından sonra 25 ns’de alınan 13 TeV’lik çarpışma verilerinin analizi yapıldı. Bu bölümde bu analizlerin sonuçları verilecektir.

4.2.2.1. 50 ns'de alınan $\sqrt{s} = 13$ TeV Çarpışma Verilerinin Analizi

2013-2014 yıllarında gerçekleşen uzun mola dönemi sırasında, HF kalorimetresinde bulunan tüm eski R7525 FÇT'leri, yeni R7600U-200-M4 FÇT'leri ile değiştirildi. 13 TeV çarpışma verileri yeni FÇT'ler ile alındı. 8 TeV'de alınan verilerinin analizlerinin sonucunda, yeni FÇT'lerin performanslarının eski FÇT'lerin performanslarına göre daha iyi olduğu gözlenmişti. Bu durumu doğrulamak için tüm HF'de uzun fiberlerde ölçülen enerjinin kısa fiberlerde ölçülen enerjiye karşı grafikleri incelendi. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, gürültü filtreleri uygulanmadan önce sadece uzun fiberlerden veya sadece kısa fiberlerden gelen çok fazla gürültülü olay sinyalinin olmadığı gözlemlendi (Şekil 4.10'nu Şekil 4.8 ile karşılaştırabilirsiniz). Az miktarda olan bu tür sinyallerin de gürültü filtreleri tarafından elendiği görüldü (Şekil 4.10.).



Şekil 4.10. 50 ns'de alınan 13 TeV'lik çarpışma verilerinin analizi ile HF gürültü filtrelerinin uygulanmadan önce (sol) ve uygulandıktan sonra (sağ) elde edilen E_S 'nin E_L 'ye karşı grafikleri.

Gürültü filtreleri uygulandıktan sonra kalan sinyal sayıları Çizelge 4.4'te her bir filtre için ayrı ayrı verilmektedir. Çizelge 4.5'te gürültülü sinyallerin sayıları ve Çizelge 4.6'da ise gürültülü sinyallerin yüzdesi verilmektedir. Çizelge 4.6'dan görülebileceği gibi tamamı yeni olan FÇT'lerin gürültü yüzdeleri %0,02 ile %0,04 arasında değişmektedir.

Çizelge 4.4. 50 ns ve 13 TeV’de alınan verilerin analiz sonuçlarına göre, her bir $i\emptyset$ konumunda bulunan FÇT’ler için HF kalorimetresinde ölçülen sinyallerin sayısı.

$i\emptyset$	43	39	41	45
Toplam Sinyal	112143330	112143330	94890510	91536336
HFLongShort	112131337	112138867	94886952	91527764
HFS8S1Ratio	112143146	112143215	94890368	91536201
HFPET	112131386	112138921	94886983	91527820
HFDigiTime	112101209	112124059	94876035	91517907
HFInTimeWindow	112141411	112142631	94890364	91536167
Gerçek Sinyallerin Sayısı	112093623	112120527	94873411	91511157

Çizelge 4.5. 50 ns ve 13 TeV’de alınan verilerin analiz sonuçlarına göre, her bir $i\emptyset$ konumunda bulunan FÇT’ler için gürültülü olaylardan kaynaklanan sinyallerin sayısı.

$i\emptyset$	43	39	41	45
HFLongShort	11993	4463	3558	8572
HFS8S1Ratio	184	115	142	135
HFPET	11944	4409	3527	8516
HFDigiTime	42121	19271	14475	18429
HFInTimeWindow	1919	699	146	169
Gürültülü Sinyallerin Sayısı	49707	22803	17099	25179

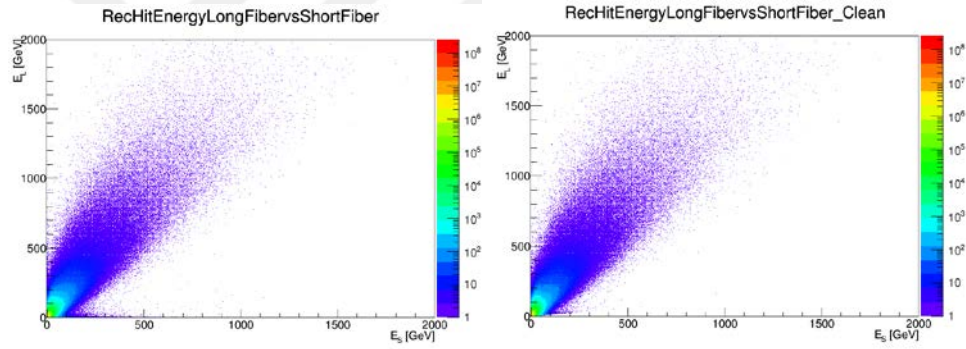
Çizelge 4.6. 50 ns ve 13 TeV’de alınan verilerin analiz sonuçlarına göre, her bir $i\emptyset$ konumunda bulunan FÇT’ler için gürültülü olaylardan kaynaklanan sinyallerin yüzdesi.

$i\emptyset$	43	39	41	45
HFLongShort	0,011	0,004	0,004	0,009
HFS8S1Ratio	0,0002	0,0001	0,0001	0,0002
HFPET	0,011	0,004	0,004	0,009
HFDigiTime	0,04	0,02	0,02	0,02
HFInTimeWindow	0,002	0,001	0,001	0,001
Gürültülü Sinyallerin Yüzdesi	0,04	0,02	0,02	0,02

4.2.2.2. 25 ns’de alınan $\sqrt{s} = 13$ TeV Çarpışma Verilerinin Analizi

25 ns’de alınan veriler kullanılarak filtrelerin performans analizleri yapıldı. HF için uzun fiberlerde ölçülen enerjinin kısa fiberlerde ölçülen enerjiye karşı grafiklerine bakıldığında, gürültü filtreleri uygulanmadan önce elde edilen sonuçlarda, sadece uzun fiberlerden veya sadece kısa fiberlerden gelen çok fazla gürültülü olay sinyalinin olmadığı gözlemlendi. Az miktarda olan bu tür sinyallerin de

gürültü filtreleri tarafından elendiği görüldü (Şekil 4.11.). Gürültü filtreleri uygulandıktan sonra kalan sinyal sayıları Çizelge 4.7’de her bir filtre için ayrı ayrı verilmektedir. Çizelge 4.8’de gürültülü sinyallerin sayıları ve Çizelge 4.9’te ise gürültülü sinyallerin yüzdesi verilmektedir. Gözlenen gürültülü ve gerçek olaylardan kaynaklı sinyal miktarlarına bakıldığında, zaman temelli filtrelerin (HFDigiTime ve HFInTimeWindow) beklenenden çok daha fazla sinyal ellediği ve bu elenen sinyaller arasında gerçek olaylardan kaynaklı sinyallerin de çok miktarda olduğu gözlemlendi. Çizelge 4.9.’a bakıldığında, HFDigiTime ve HFInTimeWindow filtrelerinin, beklenenden çok daha fazla sinyal eledikleri görülebilir. Bu filtrelerin 25 ns’de işlev görmediği anlaşıldığı için sadece çizelgelere bilgi amaçlı konulmuş fakat hiçbir toplam gürültü miktarlarına dâhil edilmemişlerdir.



Şekil 4.11. 25 ns’de alınan 13 TeV’lik çarpışma verilerinin analizi ile HF gürültü filtrelerinin uygulanmadan önce (sol) ve uygulandıktan sonra (sağ) elde edilen E_S ’nin E_L ’ye karşı grafikleri.

Çizelge 4.7. 25 ns ve 13 TeV’de alınan verilerin analiz sonuçlarına göre, her bir $i\emptyset$ konumunda bulunan FÇT’ler için HF kalorimetresinde ölçülen sinyallerin sayısı.

$i\emptyset$	43	39	41	45
Toplam Sinyal	48267076	48267076	40841372	36480653
HFLongShort	48246888	48255419	40839187	36475151
HFS8S1Ratio	48266860	48266964	40841218	36480522
HFPET	48247358	48256069	40839207	36475180
HFDigiTime	45518705	45778719	40380938	36187000
HFInTimeWindow	48064813	48068842	40827824	36471695
Gerçek Sinyallerin Sayısı	48246888	48255419	40839187	36475151

Çizelge 4.8. 25 ns ve 13 TeV’de alınan verilerin analiz sonuçlarına göre, her bir $i\emptyset$ konumunda bulunan FÇT’ler için gürültülü olaylardan kaynaklanan sinyallerin sayısı.

$i\emptyset$	43	39	41	45
HFLongShort	20188	11657	2185	5502
HFS8S1Ratio	216	112	154	131
HFPET	19718	11007	2165	5473
HFDigiTime	2748371	2488357	460434	293653
HFInTimeWindow	202263	198234	13548	8958
Gürültülü Sinyallerin Sayısı	20188	11657	2185	5502

Çizelge 4.9. 25 ns ve 13 TeV’de alınan verilerin analiz sonuçlarına göre, her bir $i\emptyset$ konumunda bulunan FÇT’ler için gürültülü olaylardan kaynaklanan sinyallerin yüzdesi.

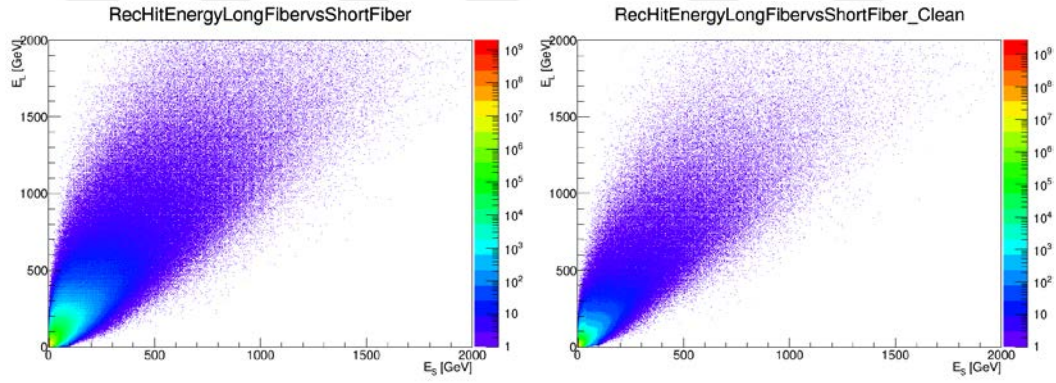
$i\emptyset$	43	39	41	45
HFLongShort	0,04	0,02	0,01	0,02
HFS8S1Ratio	0,001	0,001	0,001	0,001
HFPET	0,04	0,02	0,01	0,02
HFDigiTime	5,69	5,16	1,13	0,81
HFInTimeWindow	0,42	0,41	0,03	0,03
Gürültülü Sinyallerin Yüzdesi	0,04	0,02	0,01	0,02

4.2.3. 25 ns’de $\sqrt{s} = 13$ TeV Benzetim Programlarıyla Üretilen Çarpışma Verilerinin Analizi

25 ns’de alınan 13 TeV’lik çarpışma verilerinin analiz sonuçlarında zaman temelli filtrelerin beklenenden daha fazla sinyal elemelerinden dolayı sağlıklı çalışmadıkları düşünüldü. Bu durumu doğrulamak için, 25 ns’de 13 TeV’lik sanal çarpışma verileri kullanılarak gürültü filtrelerinin performans analizlerinin yapılmasına karar verildi.

Benzetim programlarıyla üretilen sanal çarpışma verileri, HF’de durdurulamayan müonların ve geç gelişen çığların FÇT pencerelerine çarparak oluşmasına neden olduğu yüksek enerjili gürültülü olayları içermemektedir. Bu nedenle, yüksek enerjili gürültülü olaylardan kaynaklanan sinyallerin yüzdelere çok düşük olması beklenir.

Bu kısımda da önceki kısımlarda elde edilen grafik ve çizelgeler hazırlandı. Çizelge 4.10’de her bir filtre için ayrı ayrı verilmektedir. Çizelge 4.11’de gürültülü sinyallerin sayıları ve Çizelge 4.12’te ise gürültülü sinyallerin yüzdesi verilmektedir. Şekil 4.12’de HF’deki uzun fiberlerde ölçülen enerjinin kısa fiberlerde ölçülen enerjiye karşı grafiği görülmektedir. Beklenildiği gibi x ve y ekseninde herhangi bir gürültülü olay görülmemektedir. Fakat Çizelge 4.12’e bakıldığında ise HFDigiTime ve HFInTimeWindow olaylardan kaynaklanan sinyallerin yüzdeleri oldukça yüksektir. Topolojik temelli filtrelerle bakıldığında ise yüzdelerin oldukça makul olduğu ve bu filtrelerin sağlıklı çalıştıkları gözlemlendi. HFDigiTime ve HFInTimeWindow filtrelerinin yüzdeleri ise %1 ile %26 arasında değişmekte ve 25ns için sağlıklı olmadıkları görülmektedir. Bir önceki kısımda olduğu gibi çizelgelere bilgi amaçlı konulmuş fakat hiçbir toplam gürültü miktarlarına dâhil edilmemişlerdir. Bu nedenle 25 ns’de alınan çarpışma verileri için zaman temelli filtrelerin kullanılmamasına karar verildi.



Şekil 4.12. Benzetim programları ile 25 ns ve 13 TeV için üretilen çarpışma verilerinin analizi ile HF gürültü filtrelerinin uygulanmadan önce (sol) ve uygulandıktan sonra (sağ) elde edilen E_S 'nin E_L 'ye karşı grafikleri.

Çizelge 4.10. Benzetim programları ile 25 ns ve 13 TeV için üretilen verilerin analiz sonuçlarına göre, her bir $i\theta$ konumunda bulunan FÇT'ler için HF kalorimetresinde ölçülen sinyallerin sayısı.

$i\theta$	43	39	41	45
Toplam Sinyal	195164066	196728720	160121126	159416360
HFLongShort	195163045	160121126	160120159	159415367
HFS8S1Ratio	195163708	196727672	160120775	159415996
HFPET	195163347	196728331	160120455	159415667
HFDigiTime	145615082	146478854	132050350	131027071
HFInTimeWindow	188626944	190109984	157824896	157152261
Gerçek Sinyallerin Sayısı	195163045	196727672	160120159	159415367

Çizelge 4.11. Benzetim programları ile 25 ns ve 13 TeV için üretilen verilerin analiz sonuçlarına göre, her bir $i\theta$ konumunda bulunan FÇT'ler için gürültülü olaylardan kaynaklanan sinyallerin sayısı.

$i\theta$	43	39	41	45
HFLongShort	1021	1048	967	993
HFS8S1Ratio	358	389	351	364
HFPET	719	730	671	693
HFDigiTime	49548984	50249866	28070776	28389289
HFInTimeWindow	6537122	6618736	2296230	2264099
Gürültülü Sinyallerin Sayısı	1021	1048	967	993

Çizelge 4.12. Benzetim programları ile 25 ns ve 13 TeV için üretilen verilerin analiz sonuçlarına göre, her bir $i\theta$ konumunda bulunan FÇT'ler için gürültülü olaylardan kaynaklanan sinyallerin yüzdesi.

$i\theta$	43	39	41	45
HFLongShort	0,0005	0,0005	0,0006	0,0006
HFS8S1Ratio	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
HFPET	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004
HFDigiTime	25,38	25,54	17,53	17,80
HFInTimeWindow	3,35	3,36	1,43	1,42
Gürültülü Sinyallerin Yüzdesi	0,0005	0,0005	0,0006	0,0006

5. SONUÇLAR

HKAL'ın alt detektörlerinden biri olan HF kalorimetresinin en önemli birimi olan FÇT'ler, okuma ünitelerinin içinde bulunmaktadır. HF kalorimetresinde toplam 72 tane okuma ünitesi vardır. HF Kalorimetresinden gelen foton sinyalleri, okuma ünitelerinde bulunan FÇT'ler aracılığıyla ölçülebilir elektrik akımına dönüştürülür. HF kalorimetrelerindeki okuma ünitelerinde toplam 1728 adet FÇT bulunmaktadır.

HF kalorimetresinin $i\phi=43$ konumunda bulunan 24 adet R7525 FÇT, yeni R7600U-200-M4 FÇT'ler ile değiştirildi. Bunun sebepleri;

- Bazı eski R7525 FÇT'lerinin %40 gibi büyük bir oranda kazanç kaybına sahip olmaları,
- 2012 yılında yeni FÇT'ler için yapılan testlerde ise kazanç kaybının %1 oranında olduğu gözlenmesi,
- Yeni R7600U-200-M4 FÇT'lerinin camlarının, R7525 FÇT'lerinin camlarına göre daha ince olmaları dolayısıyla müonların FÇT'nin camında ürettikleri Çerenkov ışınım miktarının önemsiz olması.

8 TeV ve 13 TeV kütle merkezi enerjisinde alınan çarpışma verilerinin analizi yapılarak eski ve yeni FÇT'ler ile analiz için kullanılan gürültü filtrelerinin performansları kıyaslandı. Bu kıyaslama için geç gelişen duşlardan kaynaklanan bazı yüksek enerjili parçacıkların HF'de durdurulamayıp FÇT pencerelerine çarpmasıyla oluşturdukları gürültü sinyallerin oranlarına bakıldı. Bu tür sinyalleri belirlemek için üçü topolojik ikisi zaman temelli olmak üzere beş adet yazılım tabanlı gürültü filtresi kullanıldı.

8 TeV'de çarpışma verilerinin analiz sonuçlarına göre, yeni FÇT'lerin gürültü oranları %3 ile %4 arasında değişirken, eski FÇT'ler gürültü oranları %14 ile %16 arasında değişmektedir (Çizelge 5.1.).

Çizelge 5.1. 8 TeV’de alınan verilerin analiz sonuçlarına göre, her bir $i\emptyset$ konumunda bulunan FÇT’ler için enerjisi 300 GeV’den büyük olan gürültülü olaylardan kaynaklanan sinyallerin miktar ve yüzdesi.

$i\emptyset$	43	39	41	45
Toplam Sinyal	3710	4160	2550	2487
Gürültülü Sinyallerin Sayısı	145	645	418	361
Gürültülü Sinyallerin Yüzdesi	3,91	15,50	16,39	14,50

13 TeV’de çarpışma verilerinin tamamı yeni FÇT’ler ile alındı. 50 ns ve 13 TeV’de çarpışma verilerinin analiz sonuçlarına bakıldığında, tüm FÇT’lerin %0,02 ile %0,04 arasında değişen az miktarda gürültü oranlarına sahip oldukları görüldü (Çizelge 5.2.).

Çizelge 5.2. 50 ns ve 13 TeV’de alınan verilerin analiz sonuçlarına göre, her bir $i\emptyset$ konumunda bulunan FÇT’ler için gürültülü olaylardan kaynaklanan sinyallerin miktar ve yüzdesi.

$i\emptyset$	43	39	41	45
Toplam Sinyal	112143330	112143330	94890510	91536336
Gürültülü Sinyallerin Sayısı	49707	22803	17099	25179
Gürültülü Sinyallerin Yüzdesi	0,04	0,02	0,02	0,02

25 ns ve 13 TeV’de çarpışma verilerinin analiz sonuçlarına bakıldığında, topolojik temelli filtrelerin sağlıklı çalıştığı görüldü. Fakat zaman temelli filtrelerin iyi olan sinyalleri de büyük oranda eledikleri gözlemlendi ve işlevsiz olduklarına karar verildi. 25 ns ve 13 TeV’de benzetim programlarıyla üretilen verilerin analizleri yapılarak bu durum doğrulandı. Topolojik filtreler (HFLongShort, HFS8S1Ratio ve HFPET) %0,0002 ile %0,04 arasında değişen oranlarda eleme yaparken, zaman temelli filtrelerin (HFDigiTime ve HFInTimeWindow) %1 ile %26 arasında değişen oranlarda eleme yaptığı gözlemlendi. HFDigiTime ve HFInTimeWindow filtreleri, beklenenden çok daha fazla sinyal eledikleri için sadece gösterim amaçlı Çizelgelere eklenmiştir ve toplam gürültülü sinyallerin sayısı belirlenirken filtreleme işlemlerine eklenmemişlerdir (Çizelge 4.9. ve Çizelge 4.12.).

Bu sonuçlar doğrultusunda, zaman temelli filtrelerin kullanılmamasına karar verilmiştir.

KAYNAKLAR

- CERN Brochure, 2009. <http://cds.cern.ch/record/1194057/files/CERN-Brochure-2009-007-Eng.pdf>.
- CERN Brochure, 2009 <http://cds.cern.ch/record/1183425/files/CERN-Brochure-2009-006-Eng.pdf>.
- CERN Brochure, 2010. <http://cds.cern.ch/record/1324123/files/CERN-Brochure-2010-007-Eng.pdf>.
- CERN Brochure, 2012. <http://cds.cern.ch/record/1485019/files/CERN-Brochure-2012-004-Eng.pdf>.
- DUMANOGLU, I., GULER, Y., GURPINAR, E., KUNORI, S., LEZKI, S., TALI, B., 2015. “Noise Filter Performance studies for CMS HF by comparing new and old PMTs using Collection of data taken in 2012”, CMS Detector Note, CMS DN-2015/024, http://cms.cern.ch/iCMS/jsp/openfile.jsp?type=DN&year=2015&files=DN2015_024.pdf.
- BARBARO, P., EPSHTEYN, V., VISHNEVSKIY, D., SEN, S., ONEL, Y., OZOK, F., PASTIKA, J., YETKIN, T., 2012. “Gain stability of the CMS Hadron Forward (HF) Calorimeter photo-multipliers during 2011 and 2012 LHC operations”, CMS Detector Note, CMS DN-2012/011, http://cms.cern.ch/iCMS/jsp/openfile.jsp?type=DN&year=2012&files=DN2012_011.pdf.
- CHLEBANA, F., VODOPIYANOV, I., GAVRILOV, V., FERENCK, D., SANTANASTASIO, F., TEMPLE, J., 2010. “Optimization and Performance of HF PMT Hit Cleaning Algorithms Developed Using pp Collision Data at $\sqrt{s} = 0.9, 2.36$ and 7 TeV”, CMS Detector Note, CMS DN-2010/008, http://cms.cern.ch/iCMS/jsp/openfile.jsp?type=DN&year=2010&files=DN2010_008.pdf.
- CMS Collaboration, 2006. “Detector Performance and Software”, CMS Physics, Technical Design Report, Volume 1, CERN - LHCC 2006-001, <http://cds.cern.ch/record/922757/files/lhcc-2006-001.pdf>.

- CMS Collaboration, 2006. “Physics Performance”, CMS Physics, Technical Design Report, Volume 2, CERN - LHCC 2006-021.
- CMS Collaboration, 2008. “The CMS experiment at the CERN LHC”, The CERN Large Hadron Collider: Accelerator and Experiments, 122 p., http://iopscience.iop.org/1748-0221/3/08/S08004/pdf/1748-0221_3_08_S08004.pdf.
- CMS Collaboration, 2011. “Technical Proposal for The Upgrade of The CMS Detector Through 2020”, CMS UG-TP-1, <https://cds.cern.ch/record/1355706/files/LHCC-P-004.pdf>.
- CMS Detector Posters, 2000. CMS Document 4227 - v1, <https://cms-docdb.cern.ch/cgi-bin/PublicDocDB/ShowDocument?docid=4227>, <https://cms-docdb.cern.ch/cgi-bin/PublicDocDB/RetrieveFile?docid=4227&version=1&filename=ECALncol.pdf>.
- CMS Detector Posters, 2000. CMS Document 4227 - v1, <https://cms-docdb.cern.ch/cgi-bin/PublicDocDB/ShowDocument?docid=4227>, <https://cms-docdb.cern.ch/cgi-bin/PublicDocDB/RetrieveFile?docid=4227&version=1&filename=HCALncol.pdf>.
- CMS Detector Posters, 2000. CMS Document 4227 - v1, <https://cms-docdb.cern.ch/cgi-bin/PublicDocDB/ShowDocument?docid=4227>, <https://cms-docdb.cern.ch/cgi-bin/PublicDocDB/RetrieveFile?docid=4227&version=1&filename=MagnetField.pdf>.
- CMS Detector Posters, 2000. CMS Document 4227 - v1, <https://cms-docdb.cern.ch/cgi-bin/PublicDocDB/ShowDocument?docid=4227>, <https://cms-docdb.cern.ch/cgi-bin/PublicDocDB/RetrieveFile?docid=4227&version=1&filename=Musystem.pdf>.

CMS Detector Posters, 2000. CMS Document 4227 - v1, <https://cms-docdb.cern.ch/cgi-bin/PublicDocDB/ShowDocument?docid=4227;>
<https://cms-docdb.cern.ch/cgi-bin/PublicDocDB/RetrieveFile?docid=4227&version=1&filename=MuDectors.pdf>.

CMS HCAL Collaboration, 2006. “Design, Performance, and Calibration of CMS Hadron-Barrel Calorimeter Wedges”, CMS Note, CMS NOTE 2006/138.

CMS HCAL Collaboration, 2008. “Design, Performance, and Calibration of CMS Hadron Endcap Calorimeters”, CMS Note, CMS NOTE 2008/010, https://cds.cern.ch/record/1103003/files/NOTE2008_010.pdf.

<http://public.web.cern.ch/public/en/lhc/HowLHC-en.html>.

<http://public.web.cern.ch/public/en/LHC/LHCExperiments-en.html>.

<http://public.web.cern.ch/public/en/lhc/ALICE-en.html>.

<http://public.web.cern.ch/public/en/lhc/ATLAS-en.html>.

<http://public.web.cern.ch/public/en/lhc/LHCb-en.html>.

<http://public.web.cern.ch/public/en/lhc/LHCf-en.html>.

<http://totem-experiment.web.cern.ch/totem-experiment/physics/> .

<http://public.web.cern.ch/public/en/lhc/TOTEM-en.html>.

<http://lhc-machine-outreach.web.cern.ch/lhc-machine-outreach/images/lhc->



ÖZGEÇMİŞ

01.01.1988 tarihinde Adana’da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Adana’da tamamladı. 2005 yılında Çukurova Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü’nde Lisans öğrenimine başladı. 2011 yılında Fizik bölümünden mezun oldu. 2014 yılında Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde Fizik Anabilim Dalında tezli yüksek lisans programına başladı. 2014 yılının Temmuz – Ekim, 2015 yılının Nisan – Eylül ve 2016 yılının Mayıs – Temmuz ayları arasında CERN’ deki CMS deneyinde yapılan çalışmalara katıldı.