

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fuat BİLİCAN

**CMS HADRON KALORİMETRESİNİN PERFORMANS
ANALİZLERİ**

FİZİK ANABİLİM DALI

ADANA,2019

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

CMS HADRON KALORİMETRESİNİN PERFORMANS ANALİZLERİ

Fuat BİLİCAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FİZİK ANABİLİM DALI

Bu tez 22/07/2019 Tarihinde Aşağıdaki Jüri Üyeleri Tarafından
Oybirliği/Üyeeklüğü İle Kabul Edilmiştir.

.....
Prof. Dr. Aysel KAYIŞ TOPAKSU
ÖZDEMİR
DANIŞMAN

.....
Prof. Dr. İsa DUMANOĞLU
ÜYE

.....
Doç. Dr. Kadri
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: FYL201810144

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

ÖZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

CMS HADRON KALORİMETRESİNİN PERFORMANS ANALİZLERİ

Fuat BİLİCAN

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

Danışman : Prof. Dr. Aysel KAYIŞ TOPAKSU
Yıl: 2019, Sayfa: 79
Jüri : Prof. Dr. Aysel KAYIŞ TOPAKSU
: Prof. Dr. İsa DUMANOĞLU
: Doç. Dr. Kadri ÖZDEMİR

CMS detektörü BHÇ'nin dört büyük detektöründen biridir. CMS Hadron kalorimetresi (HKAL) parçacıkların enerji ve yönlerinin ölçülmesini sağlar ve dört alt detektörden oluşur. Bu tezde 2018 yılında CMS detektöründen alınan veriler kullanılarak Hadronik Kalorimetrenin (HKAL) performans analizleri ile ilgili çalışmalar yapıldı. 30 Haziran 2018'de meydana gelen plansız elektrik kesintilerinden dolayı HKAL'ın alt kalorimetresi olan Hadronik Uç Kapak (HE)'nin 15. ve 16. kamalarına karşılık gelen bölgede problemler oluşmuştur. Bu tez çalışmasında da arızadan önceki ve arızadan sonraki veriler farklı kinematik nicelikler kullanılarak kıyaslanmış ve bu sorunun fizik analizlerine etkisinin olup olmadığı araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: CMS, HKAL, HE Arızası, PF, Kalojet, Jet, MET

ABSTRACT

MSc THESIS

PERFORMANCE ANALYSIS OF CMS HADRON CALORIMETER

Fuat BİLİCAN

**ÇUKUROVA UNIVERSITY
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
DEPARTMENT OF PHYSICS**

Supervisor : Prof. Dr. Aysel KAYIŞ TOPAKSU

Year: 2019, Pages: 79

Jury : Prof. Dr. AYSEL KAYIŞ TOPAKSU

: Prof. Dr. İsa DUMANOĞLU

: Assoc. Prof. Dr. Kadri ÖZDEMİR

The CMS detector is one of the four major detectors of the LHC. The CMS Hadron calorimeter (HCAL) measures the energy and direction of the particles and is composed of four sub-detectors. In this thesis, the performance analysis of the Hadronic Calorimeter (HCAL) was carried out using the data collected in 2018. Because of the unplanned power cuts on June 30,2018 some problems occurred in 15. and 16. wedges of HE which is one of the sub-detectors of HCAL. In this thesis, the different kinematic quantities before and after the power failures were compared and their effect on the physics analyzes was investigated.

Key Words: CMS, HCAL, HE Damage, PF, Calojet, Jet, MET

GENİŞLETİLMİŞ ÖZET

Parçacık fiziği bilindiği üzere atom altı parçacıkları ve bunlar arasındaki etkileşimleri incelemektedir. Atom altı parçacıklar arasındaki etkileşimler en iyi Standart Model dediğimiz bir model ile açıklanmaktadır. Bu modele göre evren madde ve karşıt maddeden oluşmaktadır. Madde parçacıkları kuarklar (u, d, s, c, b ve t) ve leptonlar (e^- , μ^- , τ^- , ν_e , ν_μ , ν_τ) olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Ayrıca bu madde parçacıkları arasındaki etkileşimi sağlayan kuvvet parçacıkları vardır (gluonlar, foton, W^+ , W^- , Z^0 ve graviton). Bu temel parçacıklar ve aralarındaki etkileşimlerin incelenmesi için hızlandırıcılar gerekmektedir. Bu hızlandırıcılar farklı büyüklükte olup farklı enerji seviyelerine kadar çıkabilmektedirler. Bunların en büyüğü CERN'de bulunan Büyük Hadron Çarpıştırıcısıdır (BHÇ). BHÇ yaklaşık 27 km uzunluğunda dairesel bir hızlandırıcıdır ve üzerinde dört büyük detektöre ev sahipliği yapmaktadır. Bunlar; CMS, ATLAS, LHC-b ve ALICE detektörleridir. Bu detektörleri birer büyük fotoğraf makinesi gibi düşünebiliriz. Bu detektörler yardımı ile parçacıkların bıraktıkları izler analiz edilerek parçacıkların enerji, momentum ve yönleri tespit edilebilmektedir. CMS detektörü, ATLAS detektörü gibi genel amaçlı fizik araştırmaları yapmaktadır. 4 T'lik manyetik alan üretebilen sarmal bir mıknatısa sahip CMS detektörü soğansı yapıdadır. Soğansı yapıda olması, parçacıkların enerjilerinin ve diğer özelliklerinin daha iyi ölçülmesini sağlamaktadır. CMS detektörü en içte izleyici olmak üzere sırasıyla EKAL, HKAL ve Müon Sistemi alt detektörlerinden oluşmaktadır. HKAL dört bölümden oluşmaktadır; Hadronik Fıçı, Hadronik Uç-Kapak, Hadronik Dış ve Hadronik İleri kalorimetre. Hadronik Fıçı Kalorimetresi, $|\eta| < 1.4$ psüdorapidite aralığında olup mıknatıs bobin içinde yer almaktadır ve 9 m uzunluğunda, 1 m kalınlığında, 6 m dış çapa sahiptir. Hadronik Uç Kapak Kalorimetresi, adından da anlaşılacağı üzere kapak vazifesi görmektedir ve $1.3 < |\eta| < 3.0$ psüdorapidite aralığındadır. Hadronik Dış Kalorimetre, Hadronik fıçının tam olarak ölçemediği

parçacıkları ölçmek için Hadronik Fıçıyı saran mıknatıs bobinin dışında yer almaktadır. Hadronik İleri Kalorimetrenin psüdo-rapidity aralığı $3 \leq \eta \leq 5$ 'tir ve radyasyon yoğunluğundan dolayı radyasyona dayanıklı malzemelerden üretilmiştir. İleri jetlerin analizi için tasarlanmıştır. Jetler, çarpışmada saçılan partonların oluşturduğu yüksek enerjili parçacıkların deneysel imzalarıdır. Bunlar SÜSİ, Higgs bozonu gibi birçok fizik analizlerinin anlaşılması için çok önemlidirler. CMS deneyinde, jetler Kalorimetre, Parçacık Akışı, Jet-Artı-İzleyici ve İzleyici olmak üzere dört farklı şekilde yapılandırılmış olup farklı analizler için amaca uygun olarak farklı jet tipleri kullanılmaktadır. Jetlerin yanı sıra analizler için önemli olan bir diğer ölçek Kayıp Dik Enerjidir. Çarpışmada detektörle etkileşmeden giden veya bazı mekanik problemler gibi sorunlardan dolayı ölçülemeyen parçacık enerjilerine kayıp dik enerji denilmektedir. Kayıp dik enerji, çarpışma öncesi parçacıkların enerjisi ve çarpışma sonrası parçacıkların enerjisinin arasındaki fark alınarak bulunabilmektedir. Bu tezde 2018 yılında CMS detektöründen alınan çarpışma verileri kullanılmıştır. Bu tezin asıl amacı HKAL'ın 2018 yılı verileri kullanılarak genel performansına bakmaktır.

TEŞEKKÜR

Tezim boyunca sürekli yol gösterici olan ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen ve hayatımla ilgili daima yol gösterici olan danışman hocam Prof. Dr. Aysel KAYIŞ TOPAKSU'ya sonsuz teşekkür ederim.

Çalışmalarım için yardımlarını esirgemeyen hocam Prof. Dr. İsa DUMANOĞLU'na teşekkür ederim. Tez çalışmam boyunca desteğini sürekli gördüğüm Yalçın GÜLER'e yazılımla ilgili bilgilerini benimle paylaşan İbrahim Soner ZORBAKIR'a yardımını hiç esirgemeyen Ali Eren ŞİMŞEK'e, analizlerimde nasıl bir yol izlemem gerektiğini gösteren Prof. Dr. Shuichi KUNORI'ye ve yüksek enerji grubundaki diğer tüm arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Lisanstan bu yana hep yanımda olan ve tezim için analizlerimde ve yazımda hep yanımda olan dostum Ümit SÖZBİLİR'e ayrıca teşekkür ederim.

Maddi manevi hep yanımda olan ağabeyim, arkadaşım, can yoldaşım Fırat BİLİCAN'a teşekkür ederim.

Hayatıma girdiğinden bu yana bana mutluluk veren, hep yanımda olan sevgilim, herşeyim, canım doktorum Şeyda HOPLAMAZ'a teşekkürlerimi borç bilirim.

İÇİNDEKİLER	SAYFA
ÖZ	I
ABSTRACT.....	II
GENİŞLETİLMİŞ ÖZET	III
TEŞEKKÜR.....	V
İÇİNDEKİLER	VI
ÇİZELGELER DİZİNİ	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	X
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	XIV
1. GİRİŞ	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	3
2.1. Standart Model.....	3
2.1.1. Fermiyonlar	3
2.1.2. Bozonlar	9
2.2. Büyük Hadron Çarpıştırıcısı	11
2.2.1. ALICE.....	15
2.2.2. ATLAS.....	16
2.2.3. LHC-b	17
2.2.4. CMS	18
3. MATERYAL METOT.....	27
3.1. Hadronik Kalorimetre (HKAL).....	27
3.1.1. Hadronik Fıçı Kalorimetre	30
3.1.2. Hadronik Uç Kapak Kalorimetre	30
3.1.3. Hadronik Dış Kalorimetre.....	33
3.1.4. Hadronik ileri kalorimetre.....	34
3.2. Jet	34
3.3. Kayıp Dik Enerji.....	37
3.4. Elektromanyetik Kesir	39

3.5. Veri Yapıları	40
4. ARAŞTIRMA VE BULGULAR	43
4.1. Jet Analizi	48
4.1.1. Parçacık Akışı Jet Analizi	48
4.1.2. Kalorimetre Jet Analizi	56
4.2. Kayıp Dik Enerji Analizi	63
4.2.1. Parçacık Akışı Kayıp Dik Enerji Analizi	63
4.2.1. Kalorimetre Kayıp Dik Enerji Analizi	67
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	73
KAYNAKLAR	75
ÖZGEÇMİŞ	79

ÇİZELGELER DİZİNİ

SAYFA

Çizelge 2.1. Fermiyon Aileleri	5
Çizelge 2.2. Kuvvet türleri ve özellikleri	10
Çizelge 4.1. HKAL performansı analizinde kullanılan veri setleri.	46
Çizelge 4.2. Analizde kullanılan CMSSW paketleri ve ışıklılık ile birlikte run numaraları.....	47
Çizelge 4.3. HKAL'ın alt detektörlerinin eşik enerji değerleri	56

ŞEKİLLER DİZİNİ

SAYFA

Şekil 2.1.	Standart Modeli oluşturan Fermiyonlar ve Bozonlar.	4
Şekil 2.2.	Büyük Hadron Çarpıştırıcısı.	11
Şekil 2.3.	CMS'teki ışıklılığın zamana göre değişimi.....	13
Şekil 2.4.	CERN hızlandırıcı kompleksi.	14
Şekil 2.5.	ALICE Detektör.....	16
Şekil 2.6.	ATLAS Detektörü.....	17
Şekil 2.7.	LHC-b Detektörü.....	18
Şekil 2.8.	Sıkı Müon Sarmalı.....	19
Şekil 2.9.	CMS'deki Selenoid Mıknatıs.	20
Şekil 2.10.	CMS'nin koordinat sistemi.....	21
Şekil 2.11.	İzleyici detektörün içyapısı. Buna göre TIB (Tracer Inner Barrel, İzleyici İç Fıçı), TOB (Tracer Outer Barrel, İzleyici Dış Fıçı), TID (Tracer Inner Disk, İzleyici İç Disk), TEC (Tracer EndCaps, İzleyici Kapak).	22
Şekil 2.12.	Silikon Şerit Detektör.....	23
Şekil 2.13.	Elektromanyetik Kalorimetre.....	24
Şekil 2.14.	Müon Sistemi z-ekseni doğrultusundaki kesiti.....	26
Şekil 3.1.	Hadronik kalorimetresinin yarı görünümü.	27
Şekil 3.2.	HKAL okuma hücreleri.....	28
Şekil 3.3.	CMS'teki Mega karolar.....	29
Şekil 3.4.	HE'deki kulelere denk gelen hücre bölümleri.....	31
Şekil 3.5.	HE Kalorimetresindeki sintilatör tablaları.....	32
Şekil 3.6.	Hadronik Kalorimetre halka ve katman görünümü.	34
Şekil 3.7.	Partonların çarpışması sonucu oluşan jetleri göstermektedir	35
Şekil 3.8.	Çarpışmada ortaya çıkan jetler.	37
Şekil 3.9.	Kulelerin lego görünümü.....	38
Şekil 3.10.	Veri Analiz şeması.....	40

Şekil 4.1.	CMS Online'dan alınmış, HE'deki arızalı bölgenin temsili bir görüntüsü.....	43
Şekil 4.2.	HE detektörünün önden görünüşü.....	44
Şekil 4.3.	317769 run numarasına ait FEVT veri setinden alınmış arızadan önceki HE histogramı.....	45
Şekil 4.4.	319077 run numarasına ait FEVT veri setinden alınmış arıza esnasındaki HE histogramı.....	45
Şekil 4.5.	321295 run numarasına ait FEVT veri setinden alınmış arızadan sonraki HE histogramı.....	46
Şekil 4.6.	318874 (kırmızı) ve 325170 (mavi) numaralı runların JET AOD veri seti için dik momentum dağılımı.....	50
Şekil 4.7	318874 (kırmızı) ve 325170 (mavi) numaralı runların MET AOD veri seti için dik momentum dağılımı.....	50
Şekil 4.8.	318874(kırmızı) ve 325170(mavi) numaralı runların JET AOD veri seti için η dağılımı.....	51
Şekil 4.9.	318874(kırmızı) ve 325170(mavi) numaralı runların MET AOD veri seti için η dağılımı.....	51
Şekil 4.10.	318874(kırmızı) ve 325170(mavi) numaralı runların JET AOD veri seti için ϕ dağılımı.....	52
Şekil 4.11.	318874(kırmızı) ve 325170(mavi) numaralı runların MET AOD veri seti için ϕ dağılımı.....	52
Şekil 4.12.	Hasarlı bölge için 318874(kırmızı) ve 325170(mavi) numaralı runların JET AOD veri seti için PF Jet dağılımı.....	53
Şekil 4.13.	Hasarlı bölge için 318874(kırmızı) ve 325170(mavi) numaralı runların MET AOD veri seti için PF Jet dağılımı.....	53
Şekil 4.14.	318874 numaralı runun JET AOD veri seti için η - ϕ grafiğine $P_t > 40 \text{ GeV}$, $EMF > 0.1$ kısıtlama koşulunun uygulanması.....	54
Şekil 4.15.	325170 numaralı runun JET AOD veri seti için η - ϕ grafiğine $P_t > 40 \text{ GeV}$, $EMF > 0.1$ kısıtlama koşulunun uygulanması.....	54

Şekil 4.16.	318874 numaralı runın JET AOD veri seti için η - ϕ grafiğine $P_t > 40 \text{ GeV}$, $EMF > 0.05$ kısıtlama koşulunun uygulanması.....	55
Şekil 4.17.	325170 numaralı runın JET AOD veri seti için η - ϕ grafiğine $P_t > 40 \text{ GeV}$, $EMF > 0.05$ kısıtlama koşulunun uygulanması.....	55
Şekil 4.18.	318874 (kırmızı)ve 325170 (mavi) numaralı runların JET AOD veri seti için Kalojet dik momentum dağılımlarının karşılaştırılması.	57
Şekil 4.19.	318874 (kırmızı)ve 325170(mavi) numaralı runların MET AOD veri seti için Kalojet dik momentum dağılımlarının karşılaştırılması.	57
Şekil 4.20.	318874 ve 325170 numaralı runların JET AOD veri seti için Kalojet η dağılımlarının karşılaştırılması.	58
Şekil 4.21.	318874 ve 325170 numaralı runların MET AOD veri seti için Kalojet η dağılımlarının karşılaştırılması.	58
Şekil 4.22.	318874 (kırmızı) ve 325170 (mavi) numaralı runların JET AOD veri seti için Kalojet ϕ dağılımlarının karşılaştırılması.....	59
Şekil 4.23.	318874(kırmızı) ve 325170(mavi) numaralı runların MET AOD veri seti için Kalojet ϕ dağılımlarının karşılaştırılması.....	59
Şekil 4.24.	Hasarlı bölge için 318874(kırmızı) ve 325170(mavi) numaralı runların JET AOD veri seti için KaloJet dağılımları.....	60
Şekil 4.25.	Hasarlı bölge için 318874(kırmızı) ve 325170(mavi) numaralı runların MET AOD veri seti için KaloJet dağılımları.....	60
Şekil 4.26.	318874 numaralı runın JET AOD veri seti için Kalojet η - ϕ grafiğine $P_t > 40 \text{ GeV}$, $EMF > 0.1$ kısıtlama koşulunun uygulanması. ...	61
Şekil 4.27.	325170 numaralı runın JET AOD veri seti için Kalojet η - ϕ grafiğine $P_t > 40 \text{ GeV}$, $EMF > 0.1$ kısıtlama koşulunun uygulanması. ...	62
Şekil 4.28.	318874 numaralı runın JET AOD veri seti için Kalo Jet η - ϕ grafiğine $P_t > 40 \text{ GeV}$, $EMF > 0.05$ koşulunun uygulanması.....	62

Şekil 4.29.	325170 numaralı runın JET AOD veri seti için Kalo Jet η - ϕ grafiğine $P_t > 40 \text{ GeV}$, $EMF > 0.05$ koşulunun uygulanması.	63
Şekil 4.30.	318874(kırmızı) ve 325170(mavi) numaralı runların JET veri seti için PF MET dağılımlarının karşılaştırılması.	64
Şekil 4.31.	318874(kırmızı) ve 325170(mavi) numaralı runların MET AOD veri seti için PF MET dağılımlarının karşılaştırılması.	65
Şekil 4.32.	318874(kırmızı) ve 325170(mavi) numaralı runların JET AOD veri seti için PF MET ϕ dağılımlarının karşılaştırılması.	65
Şekil 4.33.	318874(kırmızı) ve 325170(mavi) numaralı runların MET AOD veri seti için PF MET ϕ dağılımlarının karşılaştırılması.	66
Şekil 4.34.	Hasarlı bölge için 318874(kırmızı) ve 325170(mavi) numaralı runların JET (sol) veri seti için PF MET dağılımları.	66
Şekil 4.35.	Hasarlı bölge için 318874(kırmızı) ve 325170(mavi) numaralı runların MET AOD veri seti için PF MET dağılımları.	67
Şekil 4.36.	318874(kırmızı) ve 325170(mavi) numaralı runların JET AOD veri seti için KaloMET dağılımlarının karşılaştırılması.	68
Şekil 4.37.	318874(kırmızı) ve 325170(mavi) numaralı runların MET AOD veri seti için KaloMET dağılımlarının karşılaştırılması.	68
Şekil 4.38.	318874(kırmızı) ve 325170(mavi) numaralı runların JET AOD veri seti için KaloMET ϕ dağılımlarının karşılaştırılması.	69
Şekil 4.39.	318874(kırmızı) ve 325170(mavi) numaralı runların MET AOD veri seti için KaloMET ϕ dağılımlarının karşılaştırılması.	69
Şekil 4.40.	Hasarlı bölge için 318874(kırmızı) ve 325170(mavi) numaralı runların JET AOD veri seti için Kalo MET dağılımları.	70
Şekil 4.41.	Hasarlı bölge için 318874 (kırmızı) ve 325170 (mavi) numaralı runların MET AOD veri seti için Kalo MET dağılımları.	70

SİMGELER VE KISALTMALAR

SM	: Standart Model
CERN	: Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi
LEP	: Büyük Elektron Pozitron Çarpıştırıcısı
BHÇ	: Büyük Hadron Çarpıştırıcısı
DONUT	: Tau Nötrinosunun Doğrudan Gözlenilmesi
LINAC2	: Doğrusal Hızlandırıcı
PSB	: Proton Sinkrotron Yükseltici
PS	: Proton Sinkrotron
SPS	: Süper Proton Sinkrotron
ATLAS	: Simit Biçimli Büyük Hadron Çarpıştırıcısı Düzenegi
CMS	: Sıkı Müon Sarmalı
ALICE	: Büyük İyon Çarpıştırıcısı Deneyi
LHC-b	: Büyük Hadron Güzellik Çarpıştırıcısı
EKAL	: Elektromanyetik Kalorimetre
HKAL	: Hadronik Kalorimetre
HE	: Hadronik Uç-Kapak
HB	: Hadronik Fıçı
HO	: Hadronik Dış
HF	: İleri Hadronik
SLAC	: Stanford Doğrusal Hızlandırıcı Merkezi
FCC	: Gelecek Dairesel Çarpıştırıcısı
CLIC	: Sıkı Doğrusal Çarpıştırıcısı
KRD	: Kuantum Renk Dinamiği
SÜSİ	: Süpersimetri
TIB	: İzleyici İç Fıçı
TOB	: İzleyici Dış Fıçı
TID	: İzleyici İç Disk

TEC	: İzleyici Kapak
APD	: Silikon Çığ Foto Diyotlar
VPT	: Vakum Foto Triyotları
WLS	: Dalga Boyu Kaymalı Fiber
FÇT	: Foto Çoğaltıcı Tüp
SiPM	: Silikon Foto Çoğaltıcılar
RBX	: Okuma Üniteleri
QF	: Kuvars Fiberler
L1	: Birinci Seviye Tetikleyici
HPD	: Hibrit Foto Diyotlar
MET	: Kayıp Dik Enerji
MB	: Müon Fıçı
ME	: Müon Kapak
DT	: Sürüklenme Tüpleri
CSC	: Katot Şerit Odacıkları
RPC	: Plakalı Direnç Odacıkları
RECOJET	: Yapılandırılmış Jet
GENJET	: Üretilmiş Jet
EMF	: Elektromanyetik Kesir
HP	: Hadronik Parçacıklar
VTTx	: Çok Yönlü İkiz Verici
MeV	: Mega Elektrovolt
GeV	: Giga Elektrovolt
TeV	: Tera Elektrovolt
FEVT	: Tüm Olay Verisi
AOD	: Analiz Nesne Verisi
PF	: Parçacık Akış
P_T	: Dik Momentum
E_T	: Dik Enerji

e^-	: Elektron
μ^-	: Müon
τ^-	: Tau
ν_e	: Elektron Nötrinosu
ν_μ	: Müon Nötrinosu
ν_τ	: Tau Nötrinosu
ϕ	: Phi
η	: Psüdorapidite

1. GİRİŞ

Geçmişten bugüne kadar evrende olan olaylar her zaman insanlığın dikkatini çekmiştir. Bu dikkat ise insanlarda sürekli merak uyandırmıştır. Maddenin varoluşu da bunlardan biridir. “Madde nasıl oluştu?” sorusu bilim insanlarını hep bir adım öne taşımıştır. Geçtiğimiz yüzyılda bu sorunun cevabını bulmak için Büyük Elektron-Pozitron Çarpıştırıcısı (LEP), Fransa ve İsviçre sınırları içerisinde bulunan CERN’de inşa edilmiş ve üzerindeki dört büyük deney yaklaşık 11 yıl boyunca veri almıştır. Daha sonraları bilim insanları bu çalışmalarını daha ileriye taşımak için LEP’in bulunduğu aynı tünel içerisine Büyük Hadron Çarpıştırıcısını (BHÇ) inşa etmişlerdir. Bu çarpıştırıcı yaklaşık 27 km uzunluğunda bir dairesel hızlandırıcı olup yerin ortalama 100 m altındadır. BHÇ, ATLAS, CMS, ALICE ve LHC-b olmak üzere dört büyük detektöre ev sahipliği yapmaktadır. BHÇ’ de protonlar yaklaşık olarak 14 TeV mertebesine ulaşana kadar hızlandırılmaktadır.

Bu tezde 2018 yılında CMS detektöründen alınan veriler kullanılarak Hadronik Kalorimetrenin (HKAL) performans analizleri ile ilgili çalışmalar yapıldı. 30 Haziran 2018’de meydana gelen plansız elektrik kesintilerinden dolayı HKAL’ın alt kalorimetresi olan Hadronik Uç Kapak (HE)’ta problemler oluşmuştur. Bu tez çalışmasında da arızadan önceki ve arızadan sonraki veriler kıyaslanarak toplanan verilerde ne gibi farklılıklar olduğu incelenmiştir.

Bu tezde önceki çalışmalar kısmında Standart Model, Büyük Hadron Çarpıştırıcısı ve üzerinde bulunan deneyler (ALICE, ATLAS, LHC-b, CMS) anlatılmaktadır. Materyal Metot kısmında Hadronik Kalorimetre ve alt kalorimetreleri (HB, HE, HO, HF), Jet, Kayıp Dik Enerji, Elektromanyetik Kesir ve Veri Yapıları bulunmaktadır. Araştırma ve Bulgular kısmında ise 2018 verisinin analizleri tartışılmaktadır. Son kısımda da elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

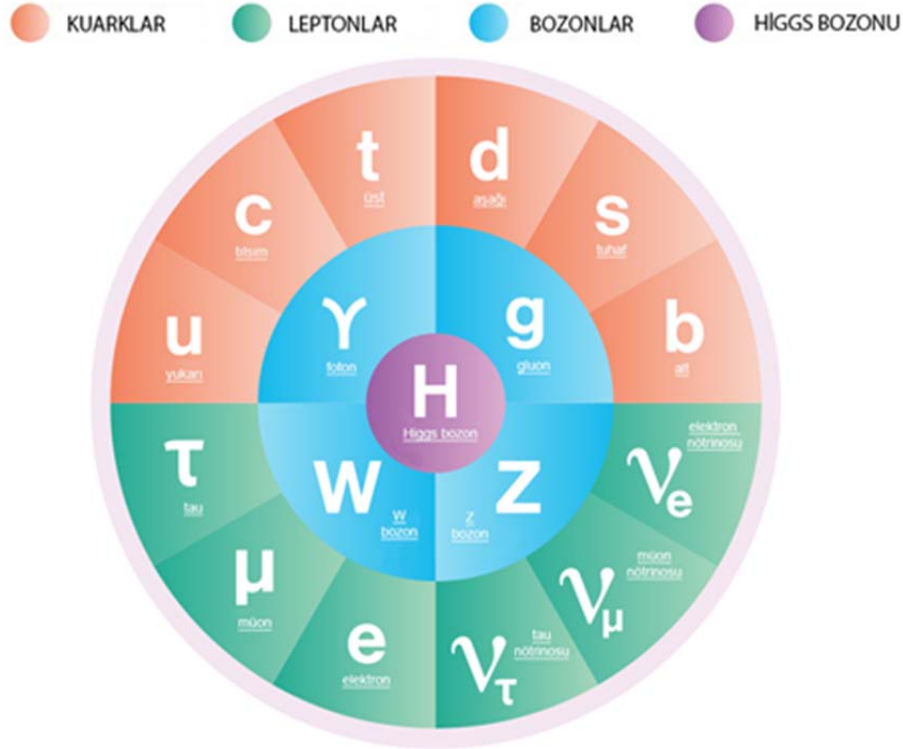
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1. Standart Model

Parçacık fiziği, doğada bulunan atom altı parçacıkları ve aralarındaki etkileşimi inceleyen fiziğin bir alt dalıdır ve atom altı parçacıkların çoğu özelliğine Standart Model (SM) ile açıklık getirilmiştir. SM, maddenin temel yapıtaşları ve bu yapıtaşlarının birbirleri ile olan etkileşimlerini açıklayan teorinin adıdır. Bu teori, maddeyi oluşturan temel yapıtaşlarının fermiyonlar (kuarklar ve leptonlar) ve bunlar arasındaki etkileşimi sağlayan ara parçacıkların bozonlar olduğunu söyler.

2.1.1. Fermiyonlar

Bu parçacıkların yarı tamsayı spin ($1/2, 3/2, 5/2, \dots$) kuantum sayıları vardır ve Pauli Dışarlama İlkesi ile Fermi-Dirac istatistiğine uyarlar. Fermiyonlar 24 temel parçacıktan oluşur. Bunların 12 tanesi madde ve diğer 12 tanesi karşıt maddedir. Şekil 2.1'de görüldüğü gibi madde parçacıkları 6 çeşit kuarktan ve 6 çeşit leptondan oluşur. Karşıt parçacığın madde parçacıkları ile tüm özellikleri neredeyse aynıdır. Aradaki tek fark sadece elektrik yüklerinin zıt olmasıdır.



Şekil 2.1. Standart Modeli oluşturan Fermiyonlar ve Bozonlar (<https://www.symmetrymagazine.org/standard-model/>).

Fermiyonlar üç aileden oluşurlar. Çizelge 2.1’de bu parçacık aileleri gösterilmektedir. Dördüncü aile için araştırmalar ve çalışmalar yapılmaktadır ancak şu ana kadar dördüncü ailenin varlığına dair pozitif bir sonuç bulunamamıştır. Birinci aile en kararlı ve en hafif olanıdır. Evren birinci aileden meydana gelmiştir. Üçüncü aile en kararsız ve en ağır olanıdır. Daha ağır olan ikinci ve üçüncü aile hızlı bir şekilde bozunarak birinci aileye dönüşürler.

Çizelge 2.1. Fermiyon Aileleri

Aileler	Kuarklar	Leptonlar
Birinci Aile	u	e^-
	d	ν_e
İkinci Aile	c	μ^-
	s	ν_μ
Üçüncü Aile	b	τ^-
	t	ν_τ

SM, kuarkların nasıl bir arada bulunduğu KRD (Kuantum Renk Dinamiği) ile önemli bir açıklık getirmiştir. Pauli Dışarlama ilkesine göre iki fermiyon tüm kuantum sayıları aynı olan bir kuantum durumunda bulunamaz. SM'ye göre her bir kuark kırmızı, yeşil, mavi olmak üzere üç farklı renk yükünden birine sahiptir. (Söz konusu olan renk yükü kuarkın sahip olduğu kuantum özelliğine ithafen verilmiştir). Bu renk yükü sayesinde kuarklar aralarında kuvvetli kuvvetin taşıyıcı parçacığı olan gluonlar ile renk alış-verişi yaparak etkileşirler. Renk yükü aynı zamanda kuarklardaki renk hapsi olgusunu da açıklamaktadır. Buna göre kuarklar tek başına gözlemlenemezler ve sadece kuarkların bir araya gelmesi ile oluşan baryon ve mezonlar olarak gözlemlenirler.

Üç kuark (örn; proton yani uud) veya üç anti kuark (örn; anti proton yani $\bar{u}\bar{u}\bar{d}$) bir araya gelerek baryonları var ederler. En çok bilinen baryonlar çekirdeğin yapısını oluşturan proton ve nötrondur. Bir anti kuark ve bir kuarkın (örn; pion yani $u\bar{d}$) bir araya gelmesiyle de oluşan yapıya mezonlar denir. Baryon ve mezona, Yunanca karşılığı olan "ağır parçacık" anlamı taşıyan hadron ismi verilmiştir.

Kuark modeli oluşturulduğundan beri baryon ve mezonların dışında farklı kuark kombinasyonlarına sahip olan egzotik hadronların var olduğu bilinmektedir.

Bunlardan biri olan pentakuarklar ($qqqq\bar{q}$) 2015 yılında CERN-BHÇ halkası üzerindeki deneylerden biri olan LHC-b deneyinde bulunmuştur fakat var olduğu düşünülen tetrakuarklar ($qq\bar{q}\bar{q}$) henüz deneysel olarak gözlenmemiştir (LHCb Collaboration, 2015).

2.1.1.1. Kuarklar

Kuarklar 1964'te birbirinden bağımsız olarak Murray Gell-Mann ve George Zweig tarafından ortaya atılmıştır. Kuark ismi Murray Gell-Mann tarafından verilmiştir. Toplamda altı tane kuark vardır. Bunlar: aşağı (d), yukarı (u), tılsım (c), acayip (s), üst (t), alt (b) olup aynı zamanda karşıtları da bulunmaktadır. Karşıt kuarklar, kuarklarla aynı spine, aynı kütleyle, aynı ortalama ömre sahip olup elektrik yükleri birbirinin zıttıdır ve bunların simgeleri kuarklarla aynı olup üzerine karşıt anlamı veren bir çizgi (\bar{b}, \bar{u} gibi) konulmaktadır.

- Acayip kuark (s), İlk acayip parçacık (Bir acayip kuark içermektedir.) 1947'de keşfedildi. Fakat acayip kuarkın keşfi 1968 yılında SLAC (Stanford Linear Accelerator Center, Stanford Doğrusal Hızlandırıcı Merkezi)'da yapılmıştır. Spini $\frac{1}{2}$, kütlesi 95 MeV ve elektrik yükü $-\frac{1}{3}e$ 'dir.
- Yukarı kuark (u), 1968'de SLAC'da keşfedilip, spini $\frac{1}{2}$, kütlesi 2,3 MeV ve elektrik yükü $\frac{2}{3}e$ 'dir.
- Aşağı kuark (d), 1968'de SLAC'da yukarı kuarkla beraber keşfedilmiş olup, spini $\frac{1}{2}$, kütlesi 4,8 MeV ve elektrik yükü $-\frac{1}{3}e$ 'dir. Yukarı kuark ile birlikte birinci ailenin mensuplarındandır. Aşağı kuark, yukarı kuarktan biraz daha ağırdır. Böyle olmasaydı atom içindeki protonlar bozunacak ve evren çok farklı bir görünüme sahip olacaktı.

- Tılsım kuark (c), 1974'de iki farklı laboratuvarında (Brookhaven & SLAC) deney yapan iki bağımsız grup tarafından keşfedilmiştir. Spini $\frac{1}{2}$, kütlesi 1,275 GeV ve elektrik yükü $\frac{2}{3}e$ olup ikinci ailedendir.
- Alt kuark (b), 1977 yılında Fermilab'da keşfedildi. Spini $\frac{1}{2}$, kütlesi 4,18 GeV ve yükü $-\frac{1}{3}e$ olup üçüncü aileye mensuptur.
- Üst kuark (t), 1995 yılında Fermilab'da keşfedildi. Spini $\frac{1}{2}$, kütlesi 173,21 GeV ve yükü $\frac{2}{3}e$ olup üçüncü ailedendir. En son keşfedilen kuarktır ve ağırlığı altın atomuyla aynıdır.

2.1.1.2. Leptonlar

Elektron (e^-), müon (μ^-), tau (τ^-), elektron nötrinosu (ν_e), müon nötrinosu (ν_μ), tau nötrinosu (ν_τ) ve bunların karşıtları ile beraber toplam 12 tane lepton vardır. Yüklü leptonlar hem zayıf hem de elektromanyetik etkileşirken yüksüz leptonlar sadece zayıf etkileşirler.

- Elektron (e^-), parçacık fiziğinin en önemli temel parçacığı denilebilir. Diyebiliriz ki parçacık fiziği serüveni elektronun J.J. Thomson tarafından 1897 yılında Cavendish Laboratuvarında keşfedilmesiyle başladı. Elektron birinci aile parçacıklarındandır ve yükü $-1e$, spini $\frac{1}{2}$ 'dir. Elektronun bulunması insan hayatında çok önemli bir yere sahiptir.
- Müon (μ^-), Fizikçi Carl D. Anderson ve Seth Neddermeyer tarafından 1937 yılında Caltech ve Harvard'ta keşfedildi. Gezegenimizin atmosferinin kozmik ışınlarla etkileşmesi ile meydana gelirler ve yeryüzüne tıpkı yağmur yağar gibi düşerler. İkinci ailedendir. Spini $\frac{1}{2}$ ve yükü $-e$ 'dir
- Tau (τ^-), 1976'da SLAC'ta keşfedildi. Kütlesi 1776.82 MeV, spini $\frac{1}{2}$ ve yükü $-e$ 'dir. Tau'nun kütlesinin protonun kütlesinden daha büyük olması bilim insanlarını şaşkına uğratmıştır.

Nötrinoların varlığı ilk olarak beta bozunmasında momentum ve enerjinin korunumundan dolayı ileri sürülmüştür. Gelişen teknoloji ve hızlandırıcılar sayesinde şu ana kadar üç tip nötrino (ν_e , ν_μ , ν_τ) keşfedilmiştir. Elektriksel yükü sıfırdır ve ışık hızına çok yakın hızlarla hareket eden temel parçacıklardır. Bu parçacıklar maddeyle neredeyse hiç etkileşmeden hareket edebilirler yani etkileşme tesir kesitleri çok küçüktür. Çok küçük kütlelere sahip parçacıklardır ve SM'nin tam olarak açıklayamadığı konulardan birisidir.

- Elektron nötrinosu (ν_e): İlk kez 1930 yılında Pauli tarafından beta bozunmalarında momentum ve enerjinin korunabilmesi için ileri sürülmüştür. 1956 yılında Cowan ve Reines tarafından keşfedilmiştir. Elektronla beraber leptonların birinci ailesini oluştururlar.
- Müon nötrinosu (ν_μ): 1962'de Lederman, Schwartz ve Steinberg tarafından Brookhaven Ulusal Laboratuvarında keşfedilen bu nötrinin daha önce keşfedilen elektron nötrinosundan farklı olduğu anlaşılmış ve bu deneysel gözlem bu üç fizikçiye 1988 yılı Nobel fizik ödülünü kazandırmıştır. Deneyde pionların bozunumundan elde edilen müon nötrino hüzmesi bir hedef üzerine gönderilmiş ve etkileşme sonucu çıkan leptonun elektron değil de müon olduğu gözlenilmiştir. Müon nötrinosu müonlarla beraber lepton ailesinin ikincisini oluşturur. Elektron nötrinosu gibi müon nötrinosu da $\frac{1}{2}$ spine sahiptir.
- Tau nötrinosu (ν_τ), 1970'li yılların ortalarında tau parçacığının keşfedilmesinden sonra tau nötrinosunun varlığı düşünölmeye başlanmıştır. tau nötrinosunun keşfi ancak 2000 yılında Fermilab'daki DONUT (Direct Observation of the Nu Tau, Tau Nötrinosunun Doğrudan Gözlenilmesi) deneyinde yapılmıştır. Böylelikle son leptonun varlığı deneysel olarak ispatlanmıştır.

2.1.2. Bozonlar

Bozonlar, adını Satyendra Nath Bose ve Albert Einstein'dan alan Bose-Einstein istatistiğine uyarlar. Aynı kuantum durumunda bulunabilirler yani Pauli Dışarlama İlkesine uymazlar. Bu parçacıklar tam spinlidirler. Fermiyonlar maddeyi oluştururken, bozonlar madde oluşumunda rol alan fermiyonlar arasındaki etkileşmeyi sağlamak için aracılık eder. Bu temel parçacıklara etkileşim parçacıkları ya da kuvvet taşıyıcıları da denmektedir. Kuvvet taşıyıcıları kuarklar ve leptonlar arasındaki etkileşimi sağlayarak görünür maddeyi var ederler. Çizelge 2.2'de kuvvetlerin türleri ve özellikleri gösterilmektedir. Dört temel etkileşimin her birinin ara bozonu vardır. Bunlar:

- Foton (Elektromanyetik Etkileşim)
- Gluon (Kuvvetli Etkileşim)
- W^{\pm} ve Z^0 Vektör Bozonları (Zayıf Etkileşim)
- Graviton (Kütle Çekimsel Etkileşim)

Kuvvetli etkileşim, dört temel etkileşim arasında en kuvvetli olanıdır. Kuarkların birbiriyle etkileşmesini sağlamaktadır. Bu sayede kuvvetli etkileşim çekirdeği bir arada tutar. Gluonların kütleleri sıfırdır ve bu yüzden kuvvetli etkileşmenin eriminin sonsuz olması beklenirken renk yükünün varlığından dolayı etkileşmenin erimi sonsuz olmaz. Kabaca kuvvetli etkileşmenin erimi çekirdek yarıçapı kadardır ($R \sim 10^{-13}$ cm). Her etkileşmenin kendine ait bir modeli vardır ki kuvvetli etkileşmenininki Kuantum Renk Dinamiği (KRD)'dir.

Kütle çekimsel etkileşim, dört temel etkileşim arasında şiddeti en zayıf olanıdır. Ayar bozonuna graviton denir. Spini 2 olduğu için diğer ayar bozonlarından farklıdır ve erimi sonsuzdur. Teorik olarak varlığı bilinse de deneysel olarak hala gözlemlenememiştir. Kütleli olan her şeyle etkileşir.

Zayıf etkileşim radyoaktiviteden sorumlu olan kuvvettir ve adından da anlaşılacağı üzere zayıf bir kuvvettir. Taşıyıcı parçacıkları “vektör bozonlar” olarak

adlandırılan Z^0 , W^+ ve W^- parçacıklarıdır. Kuvvet taşıyıcılarının kütlelerinden dolayı kısa erimlidir. Zayıf etkileşmenin dinamik modellemesi “çeşni dinamiği” olarak bilinir.

Elektromanyetik kuvvet, erimi kütle çekimsel kuvvet ile aynıdır yani sonsuzdur fakat etkileşme kuvveti yaklaşık 10^{36} kat daha büyüktür. Ayar bozonu fotondur (γ). Atom ile çekirdeği bir arada tutmakla birlikte Kuantum Elektro Dinamiği ile etkileşimini açıklar.

Çizelge 2.2. Kuvvet türleri ve özellikleri

Kuvvet Türü	Etki Alanı	Bağıl Şiddeti	Menzil	Taşıyıcı Parçacığı
Kütle Çekimsel Kuvvet	Madde	10^{-38}	∞	Graviton
Zayıf Kuvvetler	Lepton, Mezon, Baryon	$10^{-4} - 10^{-12}$	$<10^{-17}$ m	Z^0, W^\pm
Elektromanyetik Kuvvetler	Yüklü Parçacıklar	10^{-2}	∞	Foton
Güçlü Kuvvet	Baryon, Mezon (Hadronlar)	1	10^{-15} m	Gluon

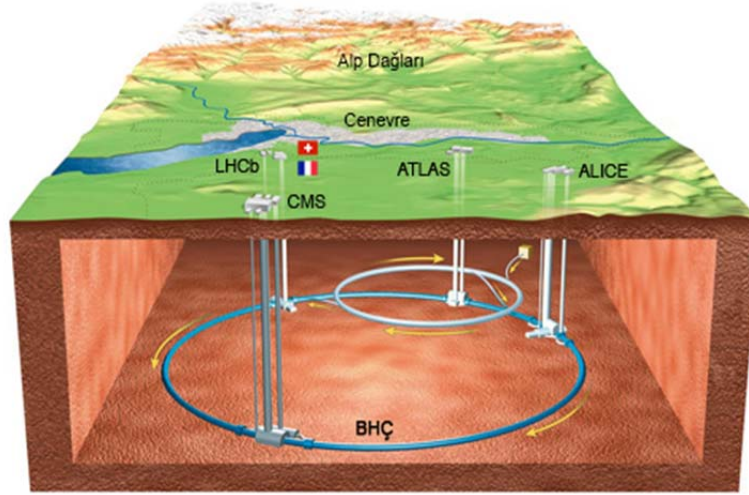
SM çok başarılı bir model olmasına rağmen açıklayamadığı bazı noktalar vardır. Bunlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Kütle çekimin ara parçacığı gravitonun varlığını,
- Karanlık maddeyi ve karanlık enerjiyi,
- SM'ye göre nötrinoların kütlesi yoktur fakat nötrino salınımı deneyleriyle nötrinoların çok küçük de olsa bir kütesinin olmasını,

Büyük patlamadan sonra maddenin karşıt maddeye nasıl üstün geldiği gibi konulara açıklık getirememiştir. Bu sorunlardan dolayı yüksek enerji fiziği SM Ötesi Kuramlara ihtiyaç duymaktadır.

2.2. Büyük Hadron Çarpıştırıcısı

CERN (Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi, Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire), İsviçre ve Fransa sınırları içerisinde bulunan ve temel misyonu evreni anlamak olan dünyanın en büyük yüksek enerji fiziği laboratuvarıdır. 2000'li yıllardan önce LEP hızlandırıcısına ev sahipliği yapan CERN şimdilerde Büyük Hadron Çarpıştırıcısına (BHÇ) ev sahipliği yapmaktadır. 2. Dünya Savaşından sonra, Avrupa'da bilimi daha ileri taşımak amacıyla bir grup Avrupa ülkesinden bilim adamlarının öncülüğüyle 1954 yılında kurulmuştur. BHÇ, 27 km uzunluğunda ve yerin ortalama 100 m altında bir tünel içine inşa edilmiş süper iletken mıknatıs halkalarından oluşur. BHÇ'nin yeryüzündeki görünümü Şekil 2.2'de gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (Woods, 2011).

BHÇ içinde yüksek enerjili ve zıt yönde hareket eden iki proton hüzmesi çarpıştırılmadan önce ışık hızına yakın hızlara çıkartılıp çarpışma noktalarında yani detektör merkezlerinde kafa kafaya 25 ns'de bir çarpıştırılır.

BHÇ'de yapılan çarpışmalarda parçacıkların enerjileri elektrovolt (eV) cinsinden ölçülür. Elektrovolt, bir elektronun bir voltluk potansiyel farkı altında

kazandığı enerjiye denir ($1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$). Çarpışmaların TeV mertebesinde olması, bu mertebelerde sonuç vermesi planlanan çalışmalar için büyük önem arz etmektedir (ekstra boyutlar, süpersimetri (SÜSİ), büyük birleşme kuramı). BHÇ'de hızlandırılan her bir proton hüzmesinin enerjisi 2018 yılı itibarıyla 6,5 TeV'dir. Bu enerji mikro evrende çok büyük enerjiye karşılık gelmekle beraber makro evrende muazzam derecede küçük bir enerjidir.

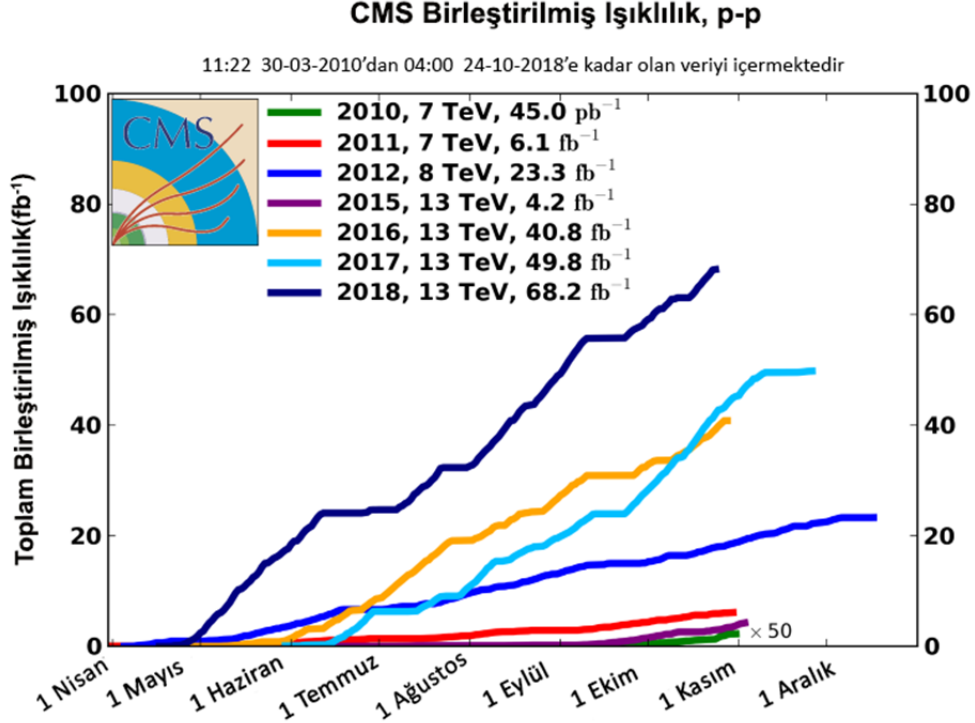
Işıklılık, birim zamanda birim yüzey başına düşen potansiyel çarpışma sayısı olarak tanımlanır. Bir hızlandırıcının performansı için önemli öğelerden biridir. Anlık ışıklılık $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ veya barn cinsinden gösterilir. BHÇ'deki $2.06 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 'e ışıklılık değerine ulaşmıştır. Anlık ışıklılık Denklem 2.1'deki formül ile bulunur.

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

Bu formülde geçen parametreler, N_b her proton kümesi için parçacık sayısı, n_b proton kümesi sayısı, $f_{dön}$ dönme frekansı, γ_r Lorentz dönüşüm faktörü, F etkileşme noktasındaki kesit açısından dolayı geometrik ışıklılık indirgeme etmeni, ϵ_n normalize yayılma (faz uzayındaki demet parçacıklarının ortalama yayılması) ve son olarak β^* çarpışma noktasındaki beta fonksiyonunu temsil eder.

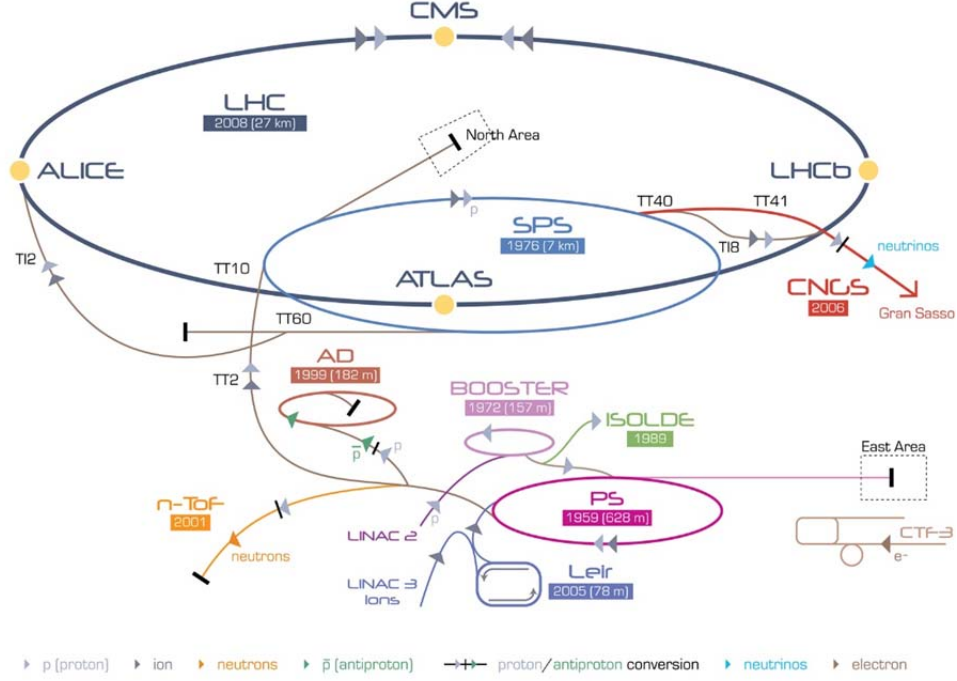
$$N_{olay} = L \sigma_{olay} \quad (2.2)$$

ifadesinde N_{olay} saniyede gerçekleşen olay sayısı, L toplam ışıklılık ($L = \int \mathcal{L} dt$) ve σ tesir kesitini göstermektedir. Şekil 2.3'te BHÇ'nin yıllara göre anlık ışıklılığı gösterilmektedir.



Şekil 2.3. CMS'teki ışıklılığın zamana göre değişimi (<http://aappsbulletin.org/myboard/read.php?Board=featurearticles&id=199>).

BHÇ'de parçacık hüzmeleri istenilen enerjiye aşama aşama hızlandırılmaktadır. İlk olarak hidrojen gazına elektrik alan uygulanarak elektronlar protonlardan ayrıştırılır ve LINAC2 (Doğrusal Hızlandırıcı 2)'de enerjileri 50 MeV'e yükseltilir. Daha sonra 25 m yarıçaplı dört halkası bulunan PSB (Proton Sinkrotron Yükseltici)'de protonların sıkıştırılmasıyla enerjileri yaklaşık olarak 1.4 GeV'e ulaşır. Ardından PS (Proton Sinkrotronu) hızlandırıcısında 25 GeV enerjiye ulaşır ve daha sonra SPS (Süper Proton Sinkrotronu)'nin sayesinde 450 GeV'e ulaşmış olan bu hüzmeler grup halinde ve birbirlerine zıt yönde BHÇ halkasına aktarılır. BHÇ'de protonların enerjisi $\sqrt{s} = 13$ TeV enerjisine kadar çıkarılır. Şekil 2.4'te yukarıda anlatılan hızlandırma aşamalarının gerçekleştiği CERN hızlandırıcı kompleksi gösterilmektedir.



Şekil 2.4. CERN hızlandırıcı kompleksi (ATLAS Collaboration, 2010).

BHÇ'de çarpışmaların meydana geldiği dört büyük detektör şunlardır;

- ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS, Simit Biçimli Büyük Hadron Çarpıştırıcısı Düzeneği)
- ALICE (A Large Ion Collider Experiment, Ağır İyon Çarpıştırıcı Deneyi)
- CMS (Compact Muon Solenoid, Sıkı Müon Sarmalı)
- LHC-b (Large Hadron Collider beauty)

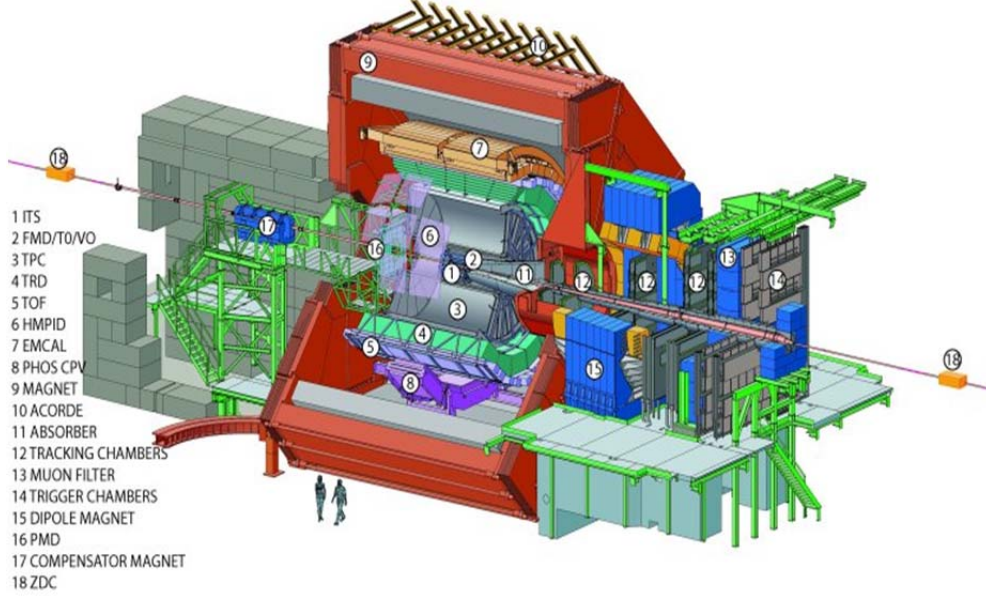
BHÇ gibi devasa büyüklükteki hızlandırıcıların yapılması birkaç on yılı alabilmektedir. Bu yüzden BHÇ'nin tasarımına LEP hala varken 1984 yılında başlanmış ve inşası 2008'de bitirilebilmiştir. Şimdilerde ise bilim insanlarının katkılarıyla yeni hızlandırıcılar tasarlanmaktadır. Bu hızlandırıcılar için en önemli koşul ışıklılık seviyelerini arttırmaktır. BHÇ'den sonra planlanan ikinci nesil BHÇ

hızlandırıcısının 2025 yılında bitmesi umuluyor. Hatta CERN bilim insanları 2040 yılında yapılması planlanan FCC (Gelecek Dairesel Çarpıştırıcısı) veya CLIC (Sıkı Doğrusal Çarpıştırıcısı) gibi hızlandırıcılar üzerinde de çalışmalarına devam ediyor.

2.2.1. ALICE

ALICE (A Large Ion Collider Experiment, Büyük İyon Çarpıştırma Deneyi), BHC'nin dört büyük detektöründen biridir. Detektör, Fransa'nın St. Genius Pouilly kasabasına yakın bir yerde bulunan çarpışma noktalarından birine yerleştirilmiştir. Yerin yaklaşık 56 m derinliğindedir ve 18 alt detektörden oluşmaktadır. Yüksekliği 16 m, uzunluğu 26 m, çapı 16 m ve son olarak kütlesi 10000 tondur. ALICE detektörünün görünümü Şekil 2.5'te gösterilmektedir. Bu detektör Büyük Patlamanın akabindeki koşulların ne olduğunu nasıl olduğunu bulmak yani kısaca teorik olarak tanımlanmış olan kuark-gluon plazma yapısını anlamaya çalışmak için tasarlanmıştır.

Proton ve nötronlar içindeki kuarklar, gluonlar tarafından birbirlerine sınıksı bir şekilde bağlıdır. Bildiğimiz gibi doğada kuarklar yalnız başlarına bulunmazlar. BHC'de yapılan çarpışmalarda oluşan sıcaklık Güneş'in merkezinden 100000 kat daha sıcaktır. Bu sıcaklık sayesinde protonların ve nötronların eriyeceği düşünülüp kuarklar ve gluonlar arasındaki bağın kopması beklenmektedir ki bu da kuark-gluon plazmasının oluşmasını sağlayacaktır. Bu durum evrenin büyük patlamadan çok kısa bir süre içerisinde hangi durumda olduğunu daha iyi anlamamıza yardımcı olacaktır.



Şekil 2.5. ALICE

Detektörü

(<http://aliceinfo.cern.ch/Public/Objects/Chapter2/DetectorComponents/alice2.jpg>).

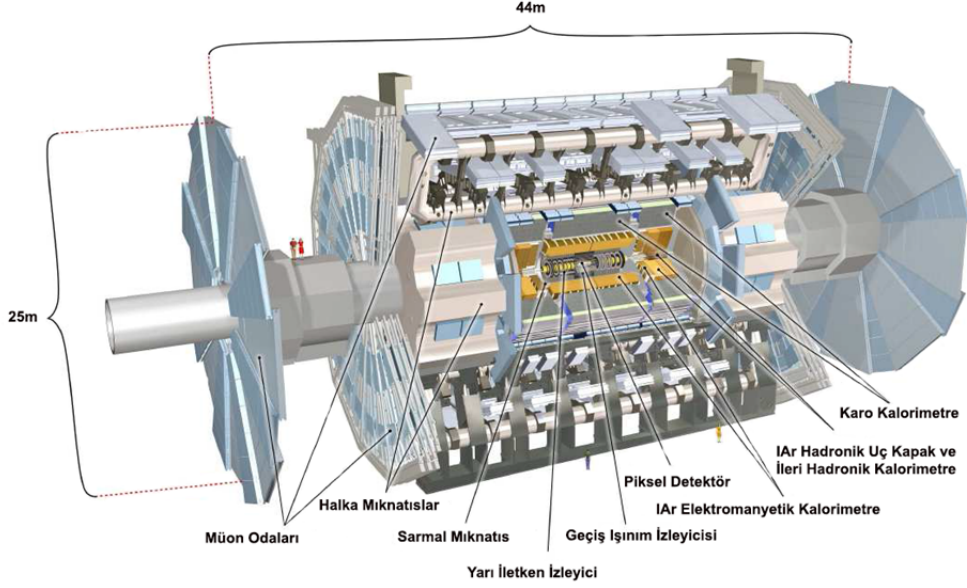
2.2.2. ATLAS

ATLAS, BHC'nin dört büyük deneyinden biridir. Detektörün uzunluğu 45 m, yüksekliği 25 m, çapı 25 m ve son olarak kütlesi 7000 tondur. Deneyde 38 ülke ve bu ülkelerden toplam 174 enstitü bulunmaktadır. ATLAS deneyi için 3000'den fazla bilim insanı çalışmaktadır(<https://home.cern/science/experiments/atlas>).

Bu detektörün diğer detektörlerden farklı olarak öne çıkan en önemli özelliği devasa büyüklükteki mıknatıslara sahip olmasıdır. 25 metre uzunluğunda süper iletken 8 adet mıknatıs bobinden oluşur ve manyetik alanı 2,6 T ve 4,1 T arasında değişmektedir. Bu mıknatıslar sayesinde deneyin merkezinde gerçekleşen çarpışmalardan çıkan parçacıklar bükülerek momentumları ölçülebilmektedir.

Şekil 2.6'da gösterilen ATLAS detektörü, dört büyük deneyden biri olan CMS detektörü ile birlikte Higgs bozonunu deneysel olarak gözlemlemiştir (<https://arxiv.org/pdf/1503.07589>). Deneyde çalışılan belli başlı fizik konuları

şunlardır: SÜSİ, karanlık madde, karanlık enerji, ekstra boyutlar, parçacık-karşıt parçacık simetrisi araştırmalarıdır.

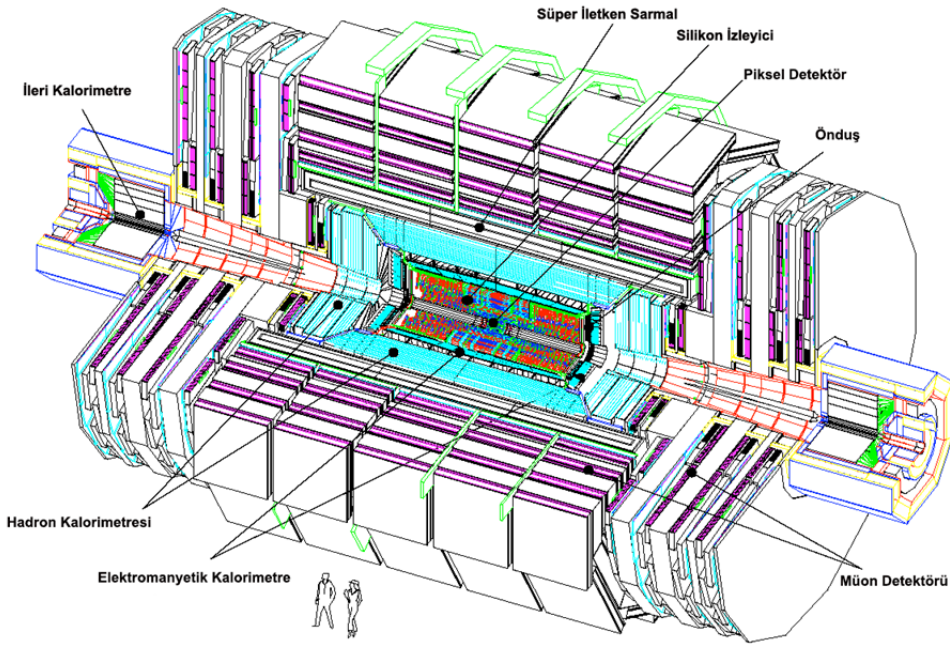


Şekil 2.6. ATLAS Detektörü (ATLAS Collaboration, 2010).

2.2.3. LHC-b

LHC-b deneyi, BHC halkası üzerindeki dört büyük detektörden biridir ve ana amacı b-fiziği araştırmaları yapmaktır. Deneyin 4500 tonluk detektörleri özel olarak bu parçacıkları ve onların bozunum ürünlerini varlamak için dizayn edilmiştir. Çarpışan proton hüzmeleri tarafından oluşturulan B mezonları tüm doğrultulardan fırlayıp çıkmak yerine hüzmeye borusu hattına yakın kalarak özel olarak dizayn edilmiş detektör içerisine girerler. Diğer BHC deneyleri bir soğan gibi alt detektör katmanlarıyla tüm çarpışma noktasını çevrelerken LHC-b detektörünün alt detektörleri bir raftaki kitaplar gibi birbirinin arkasına dizilmiştir. Bu detektör hüzmeye borusunu 20 metre boyunca sarar. LHC-b'nin alt detektörlerinden her biri çarpışan protonlar tarafından üretilen parçacıkların farklı karakteristiklerinin ölçümüne göre özelleştirilmiştir. Detektörün bileşenleri,

CMS detektörü, 4 T'lık silindirik bir mıknatısa sahiptir. Bu mıknatısın oluşturduğu manyetik alan gezegenimizinkinden yaklaşık 100000 kat daha büyüktür. Detektör 14500 ton kütleyle sahiptir ve 28.7 metre uzunluğunda, 15 metre genişliğinde ve 15 metre yüksekliğindedir. Şekil 2.8'de CMS detektörü gösterilmektedir.



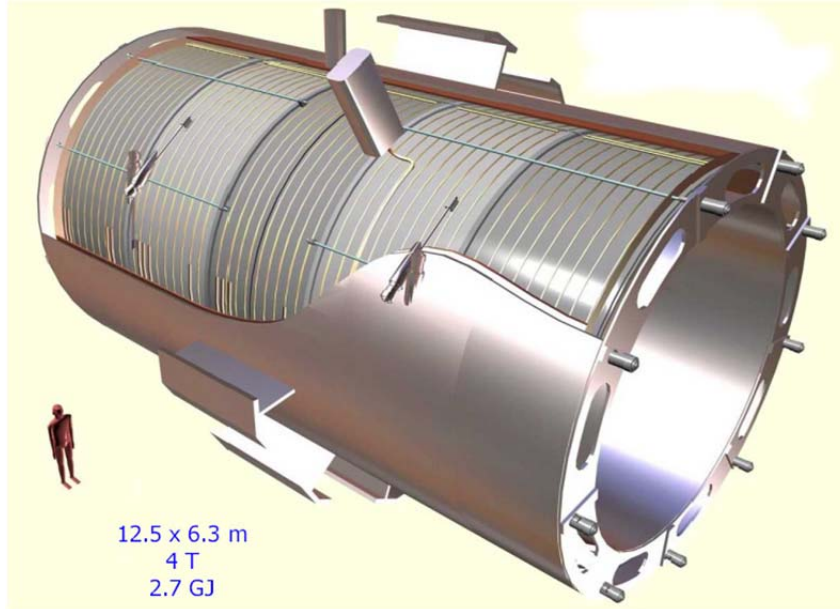
Şekil 2.8. Sıkı Müon Sarmalı (CMS TDR, 2006).

Detektörün soğansı yapıdaki katmanlarının her biri parçacıkların özelliklerine göre tasarlanmıştır. CMS, müonların tespiti için yüksek performans sistemine, elektronları ve fotonları tespit etmek ve ölçmek için yüksek çözünürlüklü elektromanyetik kalorimetreye, hassas momentum ölçümü yapmak için yüksek kaliteli merkezi izleyiciye ve hadronların enerjisini ölçmek için bir hadronik kalorimetreye sahiptir (<http://cms.web.cern.ch/news/cms-detector-design>).

CMS'nin ana amaçlarından bir tanesi müon ve diğer yüklü parçacıkların momentumlarını ve yörüngelerini hassas bir şekilde hesaplamaktır. Bunu yapabilmesi için de yukarıda bahsedildiği gibi parçacıkların yörüngelerini bükebilmesi gerekmektedir. CMS deneyindeki 4 T'lık süper iletken bobin detektörün şekline göre (Şekil 2.9) tasarlanmıştır ve parçacıkların yörüngelerini bükerek tüm enerjilerini detektör içerisinde bırakmasını sağlayıp dik momentumlarını hassas bir şekilde ölçülmesine olanak verir. Dik momentum Denklem 2.3'teki eşitlikten de görüldüğü gibi manyetik alana bağlıdır.

$$P_T = 0.3 \times B \times R \quad (2.3)$$

P_T parçacığın dik momentumunu, B manyetik alanını, R eğrilik yarıçapını temsil etmektedir. Dik momentumun 0,9 GeV/c'den küçük olması durumunda parçacık kalorimetrelere ulaşmadan tüm enerjisini tüketecektir.

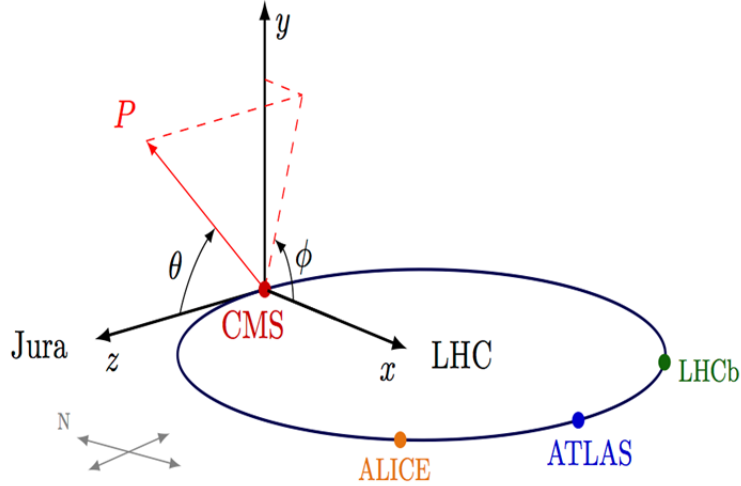


Şekil 2.9. CMS'deki Selenoid Mıknatıs (<http://newsline.linearcollider.org/wp-content/uploads/2011/05/CMS-solenoid-magnet.jpg>).

Detektörden alınan verilerin iyi anlaşılması için bir koordinat sistemine ihtiyaç duyulur. CMS detektörünün koordinat sisteminde orijin, parçacıkların çarpışma merkezidir. Şekil 2.10'daki koordinat sisteminde x -ekseni hızlandırıcının yarıçapı doğrultusundadır (radyal), y -ekseni merkezden yukarı doğrudur, z -ekseni ise parçacık demetlerinin geldiği doğrultuyu gösterir. Bu koordinat sisteminde iki farklı açı vardır. İlki azimutal açı, x - y düzlemindeki x -ekseninden hesaplanmaktadır. İkincisi polar açı, z -ekseni üzerinde ölçülmektedir. Phi dönüşümünde bulunan, alt detektör konumları verilirken sıkça kullanılan psüdorapidite Denklem 2.4'teki gibi hesaplanmaktadır.

$$\eta = -\ln\left[\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)\right] \quad (2.4)$$

Böylece dik momentum (P_T) ve dik enerji (E_T) x - y bileşenlerinden bulunur. Bulduğumuz teorik enerji ve deneysel enerji farkı bize kayıp dik enerjiyi (MET) vermektedir.

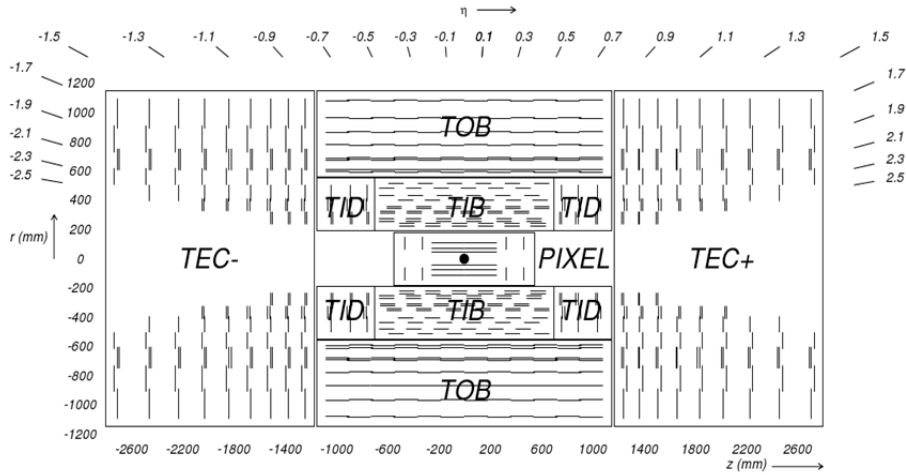


Şekil 2.10. CMS'nin koordinat sistemi
(https://wiki.physik.uzh.ch/cms/_media/latex:cms_coordinate_system.png?cache=).

CMS'i oluşturan alt detektörler sırasıyla izleyici sistem, elektromanyetik kalorimetre, hadronik kalorimetre ve son olarak müon sistemidir. Bu alt detektörler ölçümü yapılan parçacıkların özelliklerine göre tasarlanmıştır.

2.2.4.1. İzleyici Detektör

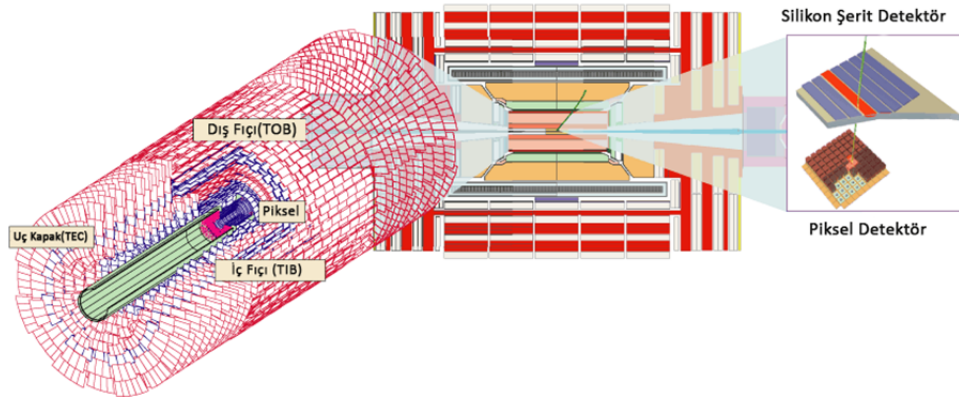
İzleyici, CMS'nin ilk katmanını oluşturan alt detektördür (Şekil 2.11). Parçacıkların dik momentumunu (P_T), parçacığın konumunu ve yörüngesini saptamak için dizayn edilmiştir. Bu sebeple yüksek çözünürlüklü ve hızlı duyarlılığa sahip bir detektör olmalıdır. CMS izleyicisi, $-2,5 < |\eta| < 2,5$ psüdorapidite aralığında konumlandırılmıştır. Silindirik yapıda olan izleyici, 5,4 m uzunluğunda ve 1,2 m yarıçapındadır. 3,8 T'lık manyetik alan sayesinde parçacıklar dairesel bir şekilde bükülüp yükleri ve momentumları hesaplanır. İzleyici, CMS'nin en iç katmanı olması sebebiyle en çok radyasyona maruz kaldığından, radyasyona karşı dayanıklılığı yüksek malzemelerden yapılmıştır. Sistem piksel detektör ve silikon şerit detektörlerinden oluşmaktadır.



Şekil 2.11. İzleyici detektörün iç yapısı. Buna göre TIB (Tracer Inner Barrel, İzleyici İç Fıçısı), TOB (Tracer Outer Barrel, İzleyici Dış Fıçısı), TID (Tracer Inner Disk, İzleyici İç Disk), TEC (Tracer EndCaps, İzleyici Kapak) (Sprenger,2010).

Piksel detektörü, çarpışma merkezine en yakın parçadır. Bu detektör sisteminde 1440 tane $100 \times 150 \mu\text{m}^2$ boyutunda detektör modülü vardır. Buna ilaveten 66 milyon piksel ve yaklaşık 1600 veri okuma kanalına sahiptir. Bu detektör üç fiç katmanına sahiptir. Sırasıyla bu fiçler 4,4 cm, 7,3 cm ve 10,2 cm çapında olup iç içe geçmiştir. Detektörün her iki ucunda 6 cm ve 15 cm yarıçaplarında bir adet kapak bulunmaktadır.

Silikon şerit detektörü, iz detektörünün ara bölgesindedir. Şekil 2.12’de de görüldüğü gibi iç bölümünde dört fiç tabaka ve üç ileri tabaka, dış bölümde ise altı fiç tabaka ve dokuz diskten oluşmaktadır. Piksel detektörü ile birlikte parçacıkların momentumlarını ölçer.

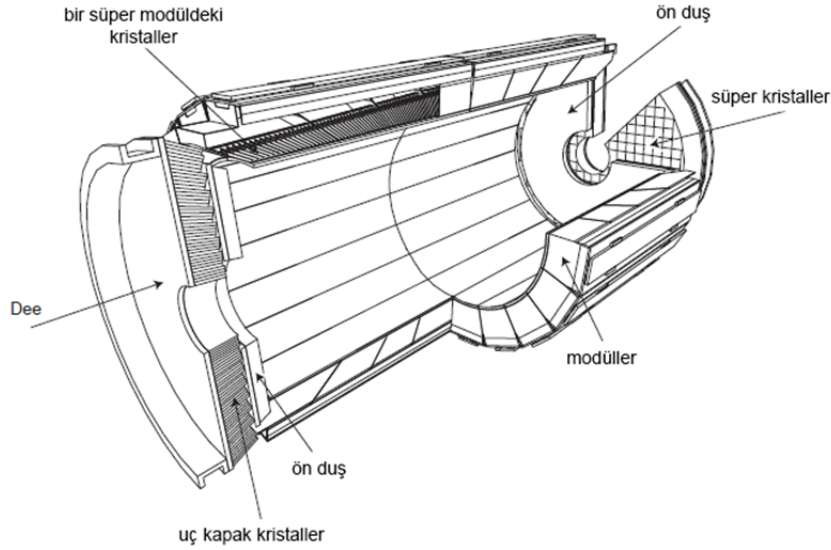


Şekil 2.12. Silikon Şerit Detektör (Dragicevic, 2010).

2.2.4.2. Elektromanyetik Kalorimetre

Elektromanyetik kalorimetre (EKAL), yüksek çözünürlükte elektronlar ve fotonların enerjilerini ölçmek için tasarlanan hermetik homojen bir kalorimetredir (Şekil 2.13). EKAL’de merkez fiç etrafında 61200 kurşun tungsten (PbWO_4) kristal kullanılmış olup kapak kısımlarının her ikisinde 7324 kristal bulunmaktadır. Kurşun tungsten kristal seçilmesinin sebebi kısa radyasyon uzunluğu ($X_0 = 0,89$ cm) ve küçük Moliere yarıçapına (2,2 cm) sahip olmasıdır. Ayrıca var olan özelliği ile 25 ns’lik süreçte ışığın %80’ini yayımlamakla birlikte radyasyon dayanıklılığı

10 Mrad'tır. Bununla birlikte, görelî olarak düşük ışık verimi (foton başına yaklaşık 30 MeV), bir manyetik alan içinde çalışabilen yüksek kazançlı foto detektörlerin kullanılmasını gerektirir. Dedektörün fiçî kısmında Silikon Çiğ Foto diyotları (APD), uç kapak kısmında Vakum Foto Triyotları (VPT) kullanılmaktadır. Ek olarak, kristallerin ve APD'lerin oluşabilecek sıcaklık değişimlerine karşı hassasiyetinin yüksek olması gerekir (0,1°C). PbWO₄ kristallerinin kullanımı yüksek radyasyon dayanıklılığı, yüksek tanecikli yapı ve hızlı tepki süresine imkân tanımıştır.



Şekil 2.13. Elektromanyetik Kalorimetre (CMS Collaboration, 2009).

Fiçî kısmının (EB) iç yarıçapı 129 cm'dir ve bu yapı 36 adet süper modüle sahip olup bunların her biri, fiçî uzunluğunun yarısını kaplayıp $0 < |\eta| < 1,479$ aralığında bulunmaktadır. Kristaller $22 \times 22 \text{ mm}^2$ tesir kesitine ve 230 mm'lik uzunlukta bir ön yüze karşılık gelen $25,8 X_0$ 'a sahiptir. Uç kapaklar (EE), köşeden 314 cm mesafede ve $1,479 < |\eta| < 3,0$ psüdorapidite aralığını kapsayan iki adet D şeklindeki yapıdan oluşur. Süper kristal olarak bilinen bu yapılar 5×5 yapıdaki

kristalleri destekleyen yarı dairesel alüminyum plakalardan oluşur (CMS-TDR, 2006).

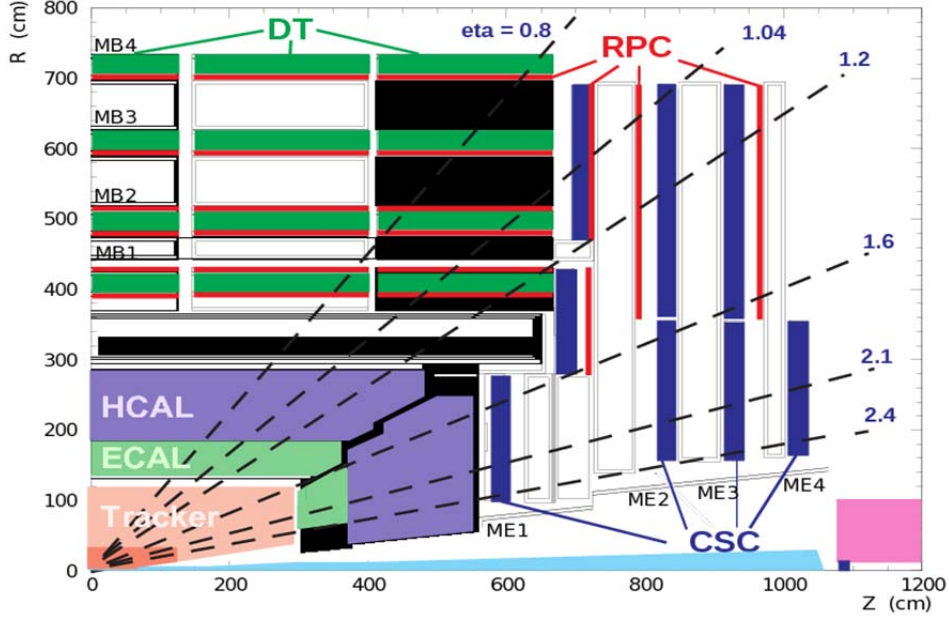
EKAL'ın her iki ucunda bir adet ön duş detektörü bulunmaktadır. Yüksek tanecikli yapısı ile fotonların ve elektronların konumlarını belirlemeye yardımcı olur. Ön duş detektörü 2 katmanlı bir örnekleme kalorimetre olup kurşun radyatör gelen foton ve elektronlardan elektromanyetik duşu başlatır. Silikon şerit duyaçları ise her bir radyatörde depo edilen enerji ve enine duş kesitini ölçerler (CMS-TDR, 2006).

Ön duş detektörünün toplam kalınlığı 20 cm'dir. Ön duş detektörünün $\eta = 1,653$ 'de malzeme kalınlığı birinci duyaç yüzeyine ulaşmadan önce 2 X_0 , takip eden ikinci yüzeye ulaşmadan önce ise 1 X_0 'dır (CMS TDR, 2006).

2.2.4.3. Müon Sistemi

Lepton ailesinden ve uzun ömürlü (10^{-6} s) parçacık olan müonlar için tasarlanmıştır. Müonlar minimum iyonize parçacıklar oldukları için diğer alt detektörlerden (izleyici, EKAL, HKAL) geçerken enerjilerini çok az tüketirler. Bu yüzden detektörün en sonuna müon odacıkları yerleştirilmiştir. Bu sistem müonların momentumlarını ve yüklerini ölçmekle mükelleftir. Bu kısım Müon Fıçısı (MB) ve Müon Kapak (ME) olmak üzere iki bölgeden oluşur. Bu bölgelerin psödorapidite aralıkları aşağıdaki gibidir;

- MB, $|\eta| \leq 1,2$
- ME, $0,9 \leq |\eta| \leq 2,4$



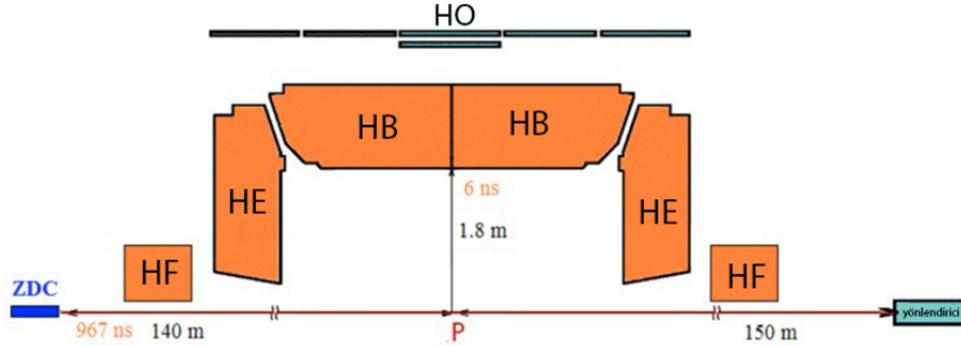
Şekil 2.14. Müon Sistemi z-ekseni doğrultusundaki kesiti (LHC REFERENCE VOLUME, 2012).

Şekil 2.14'den görüldüğü gibi müon sistemi sürüklenme tüpleri (DT), Katot Şerit Odacıkları (CSC) ve Plakalı Direnç Odacıkları (RPC) olmak üzere üç alt detektörden oluşur. DT ve CSC detektörleri, müonların konumunu ve momentumunu hesaplarken RPC detektörü ise birinci seviye (L1) tetikleyiciye bilgi akışını sağlayıp parçacığın izini takip eder. Sisteme genel olarak baktığımızda toplamda 250 tane DT, 540 tane CSC ve müon verilerini kaydedip hızlı bir şekilde karar veren yedek tetikleme sistemini oluşturan 610 tane RPC detektörü bulunur.

3. MATERYAL METOT

3.1. Hadronik Kalorimetre (HKAL)

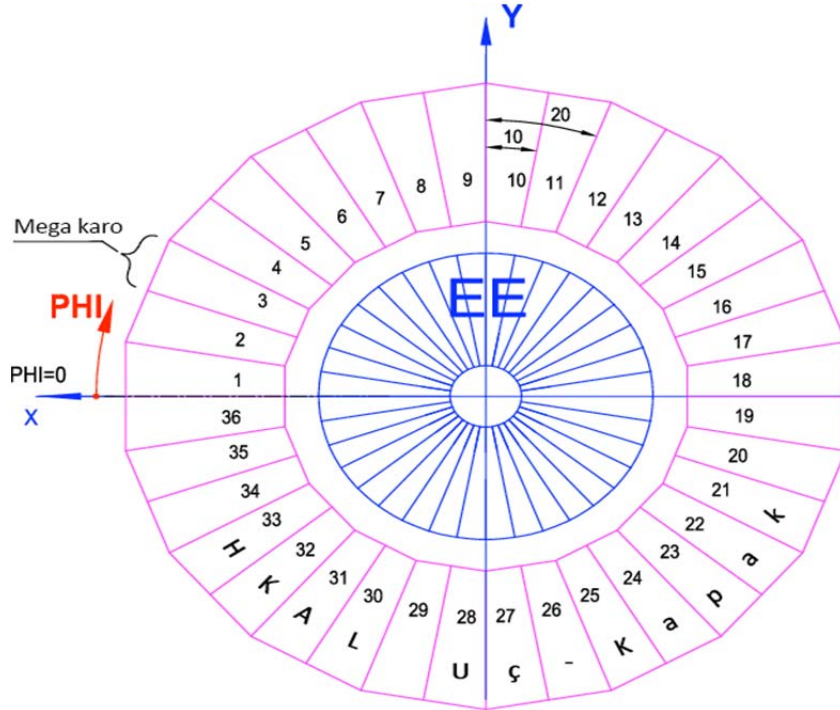
HKAL $p - p$ çarpışmalarında meydana gelen hadronların enerjilerini ve yönlerini tespit etmek için tasarlanmıştır. Kalorimetre, saçılan parçacıkların enerjilerinin mümkün olduğunca doğru ölçülmesi için kat kat olup hermetik (hava geçirmez, sıkı, boşluksuz) yapıdadır. CMS'nin hadronik kalorimetresi bir örnekleme kalorimetresidir. Örnekleme kalorimetreleri, birbirini izleyen emici katmanlar ve floresan sintilatör malzemeleri kullanarak parçacıkların enerji ve yönlerinin ölçülmesini sağlar. Parçacıklar kalorimetrenin içinden geçtiği zaman hızlı bir ışık atımı üretir. Özel optik fiberler bu ışığı toplar ve okuma ünitelerine geçmesini sağlar. Burada foto detektörler sinyali yükseltip elektriksel sinyale dönüştürür. Daha sonra bu sinyal çeşitli aşamalardan geçerek analiz için veri oluşturur.



Şekil 3.1. Hadronik kalorimetresinin yarı görünümü (Grachov, 2010).

Şekil 3.1’de görüldüğü gibi HKAL, Hadronik Fıçı (HB), Hadronik Uç Kapak (HE), Hadronik Dış Fıçı (HO) ve son olarak Hadronik İleri (HF) olmak üzere dört bölümün birleşiminden oluşur. HB, etkileşim noktasına 1,8 m uzaklıkta ve mıknatıs bobin içindedir. HO mıknatısın dışında yer alıp HB’den tespit edilmeyen parçacıkların sızmasını önler ve enerjilerini ölçer. HF kalorimetresi

Şekil 3.2’de görülen HKAL okuma hücreleri η ve ϕ açılarının iz düşümü alınarak hayali bir kule modeli ortaya çıkarmıştır. HB bölgesi hücreleri $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0.087 \times 0.087$ bölümler arasında olup HE’ye ve HF’ye gidildikçe bu hücre boyutları detektörün geometrik yapısından dolayı büyümektedir. Elektromanyetik ve hadronik kalorimetre hücrelerinde depo edilen enerji kullanılarak kalorimetre kuleleri oluşur. Kulelerde depo edilen enerji çeşitli jet kümeleme algoritmaları için veri olarak kullanılır. (CMS-TDR-8.1, 2006)



Şekil 3.3. CMS’teki Mega karolar (CMS NOTE 010, 2008).

Mega karo (Şekil 3.3), karo katmanlarından oluşur. Ebatları detektördeki konuma ve çarpışmadaki yönelime bağlıdır. Karoları ayıran kanallar içine optik fiberler yerleştirilir. Fiberler aracılığıyla algılanan toplam ışık, enerji ölçümünü verir. Karolar arasındaki boşluk ışığın sızmasını engellemek için yansıtıcı boya ile doldurulur. Elde edilen sinyal okuma ünitelerine ulaşır. Karolardan art arda gelen

sinyaller kuleleri oluşturmak için üst üste bindirilir. Bu optik toplama, HKAL boyunca gelen tüm parçacıkları içerir ve parçacığın kimliğini belirlemeye yardımcı olur. Toplanan optik sinyaller Hibrit Foto Diyotlar (HPD) olarak adlandırılan fotosensörler tarafından hızlıca elektronik sinyallere dönüştürülür. Daha sonra özel elektronikler ve kodlar ile bu sinyaller bütünleştirilir. 2018 yılı itibariyle HPD'lerin yerini Silikon Foto Çoğaltıcılar (SiFC) almıştır.

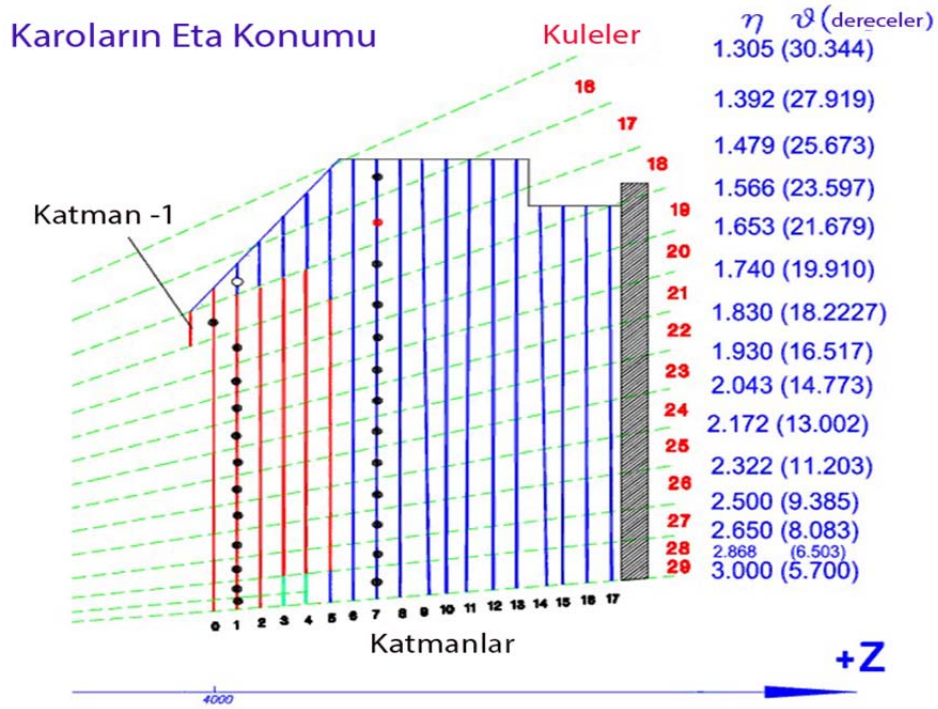
3.1.1. Hadronik Fıçı Kalorimetre

Silindirik şekliinden dolayı bu örnekleme kalorimetresine Hadronik Fıçı (HB) denilmiştir. $|\eta| < 1.4$ psüdorapidite arasında olup mıknatıs bobin içinde yer almaktadır. 9 m uzunluğunda, 1 m kalınlığında, 6 m dış çapa sahiptir. Düz soğurucu plakalardan oluşan toplam 36 kamadan oluşmaktadır. Bu soğurucuların %70'i bakır, %30'u çinko olup 15 pirinç soğurucu plaka ve paslanmaz özellikli çeliklerden yapılmaktadır. Bu soğurucuların yapımında 40 mm kalınlığında çelik ön tabaka, sekiz tane 50,5 mm kalınlığa sahip pirinç levha, altı tane 56,5 mm kalınlıkta pirinç levha ve son olarak 75 mm kalınlıkta çelik arka plaka kullanılmaktadır. Bunlar pasif yani soğurucu malzemeler olup HB'de aktif malzeme olarak plastik sintilatör kullanılır. Kamalar 20 derecelik düzlemsel açıyla yan yana 2 mm'den az boşluk olacak bir şekilde dizilerek HB'yi oluştururlar ve her bir kama özdeş olmakla beraber dört sektöre ayrılmaktadır. Sektörün azimutal açısı 5 derecedir ($\Delta\phi=5^\circ$) ve 16 kuleden oluşmaktadır. Toplam kule sayısı 2304 tanedir.

3.1.2. Hadronik Uç Kapak Kalorimetre

İsminden de anlaşılın Hadronik Uç Kapak (HE) kalorimetresi, HB'nin her iki ucunda bulunup kapak görevi görmektedir. HB gibi bu da örnekleme kalorimetresidir. Soğurucu kısmı manyetik alandan fazla etkilenmediği için manyetik olmayan C26000 kartuş pirinç (%70 Cu, %30 Zn) malzemesinden üretilmiştir. Soğurucu tabaka $8,83 \text{ g/cm}^3$ yoğunluğunda, 1,5 cm radyasyon uzunluğuna ve 16,4 cm etkileşme uzunluğuna sahiptir. CMS'teki konumu

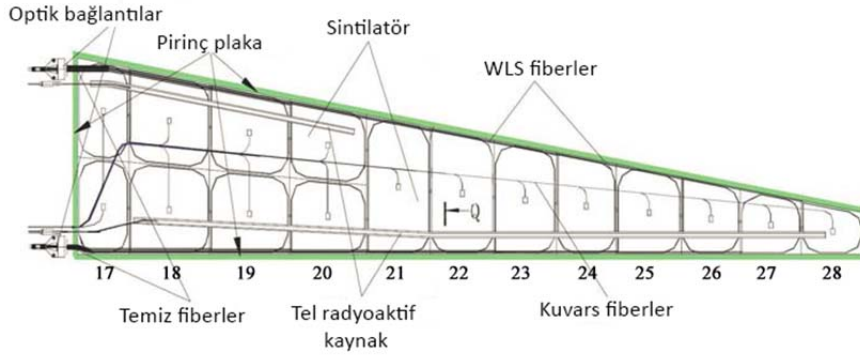
$1.3 < |\eta| < 3.0$ psüdorapidite aralığındadır. $p - p$ çarpışmalarında parçacıkların yaklaşık %34'lük bir kısmı bu bölgede yer alır. Ön yüzünde, ön duş detektörü ve elektromanyetik kalorimetre vardır. HE+ ve HE- diye iki kısma ayrılır ve her bir kısmı $\Delta\phi=20^\circ$ 'lik açılı 18 tane kamaya sahiptir. Bu kamalar $\Delta\phi=5^\circ$ 'lik açılara sahip 14 η kulesinden oluşmaktadır. HE'deki toplam kule sayısı 2304'tür. Şekil 3.4'te hücre bölümleri gösterilmektedir.



Şekil 3.4. HE'deki kulelere denk gelen hücre bölümleri (Khachatryan ve ark., 2016).

HE'nin aktif malzemesi, kartuş pirinç soğurucu plakalar arasında olan tablalar içine yerleştirilmiş sintilatör karolarıdır. Pirinç plakalar 79 mm kalınlığındadır ve bu plakalar arasına sintilatörler yerleştirilebilsin diye birbirleri arasında 9 mm'lik bir aralık bulunmaktadır. Detektörün $10^\circ \phi$ dilimini okuyan bu tabla megakaro (Megatile) olarak adlandırılır. İki megakaro kalorimetrenin bir kamasını oluşturur.

HE kalorimetresi için tablaların toplam sayısı, 36 kamada 1368 tanedir. Sintilasyon ışığı 0,94 mm çaplı WLS fiberler tarafından toplanır. WLS fiberler elmas uçlu fiberler tarafından işlenmiştir ve bir ucuna ışığın toplanmasını arttırmak için alüminyum püskürtülmüştür. Diğer ucu 0,94 mm çaplı temiz fibere bağlamıştır. Foto-çoğaltıcılar ve ön-uç elektronikler kalorimetrenin 10 cm kalınlığında paslanmaz çelikten yapılmış dış plakasına monte edilmiştir. Soğurucu yerleştirildikten sonra optik parçaları sabitlenir. Sintilasyon ışığı, WLS fiberler tarafından toplandıktan sonra uygun dalga boyuna getirilir. Bunun amacı, ölü bölgeyi minimize etmek ve ışığı fiberler ile fotodetektöre yönlendirip dalga boyunu dijital sinyallere dönüştürmektir.



Şekil 3.5. HE Kalorimetresindeki sintilatör tablaları (Khachatryan ve ark., 2016).

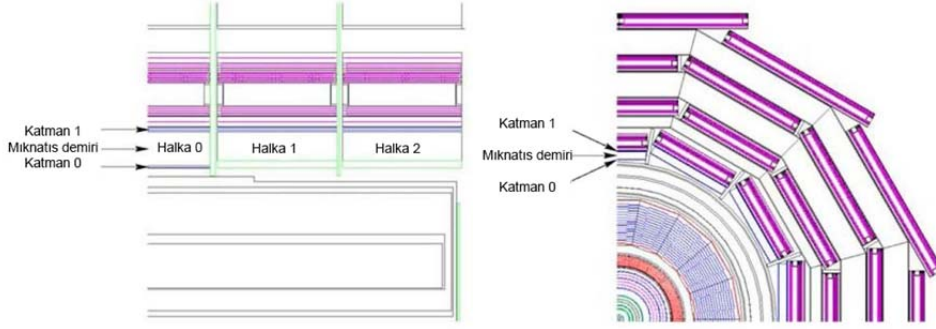
İkizkenar yamuk şekilli sintilatörler, etkileşim noktasına en yakın olan sıfırıncı katman için 3.7 mm kalınlığa sahip Kuraray SCSN81 veya 9 mm kalınlığa sahip Bicon BC408'den oluşur. Sintilatör karolar tabla oluşturmak için bir çerçeve (Şekil 3.5) içine yerleştirir ve dar kenarları beyaza boyanır. Tablalar dayanıklı, güvenilir ve sert bir yapıya sahiptirler. Morötesi (UV) nitrojen lazer ile bu tablaların kalite kontrolü yapılır. Üretilen ışığın yüklü bir parçacık tarafından indüklenen sinyale benzemesinden dolayı kontrol için UV kullanılır. Bu kontrol HE'deki radyasyon hasarından kaynaklanan sinyallerdeki azalmaları tespit etmek için yapılır. Okuma

üniteleri (RBX) kalorimetrenin arkasında bulunmaktadır. RBX'lerin içinde foto detektörler ve ön yüz elektronikleri vardır. Manyetik alandan az etkilendiğinden ve geniş aralıklara sahip olduğundan fotodetektör olarak Hibrit Foto Diyotları (HFD) kullanılır.

3.1.3. Hadronik Dış Kalorimetre

CMS deneyi için hadronik duşların analizinde HB kalorimetresi yeterli olmadığından mıknaşın dışında ekstra bir kalorimetreye ihtiyaç duyulduğundan, Hadronik Dış (HO) Kalorimetre tasarlanmıştır. HO'nun konumu mıknaşın dışında müon detektöründen hemen önce gelir. Sarmal yapıdan oluşup iki kısma ayrılır. $|\eta| < 1.26$ psüdorapidite aralığında konumlandırılmıştır. HO $(1.4/\sin\theta)\lambda$ kalınlığında olup soğurucu gibi davranır. HO, η 'ya göre beş halkadan oluşmaktadır $(-2, -1, 0, 1, 2)$. Halkaların üçü Şekil 3.6'da gösterilmektedir. Müon detektörü ile aynı yapıya sahiptir. -2 'den 2 'ye gittikçe η değerinde yükselme meydana gelir. 0 numaralı halka iki katmana diğerleri ise tek katmana sahiptir. 0 numaralı halkanın iki katmanlı olması, HB kalorimetresinde $\eta=0$ 'da en düşük soğurucu derinliğine sahip olmasından kaynaklıdır. HO'nun her bir halkası koordinat sisteminin $x-y$ düzleminde 12 sektöre sahiptir. Bu sektörler $\phi=30^\circ$ 'lik açılara sahip olup her biri kendi içerisinde $\Delta\phi=5^\circ$ 'lik açıyla altı eşit parçaya ayrılır. Aktif malzeme olarak sintilatör tabakalar kullanılır. Bu tabakalar megakaro şeklinde bir araya getirilerek HO'nun iki katmanı arasına yerleştirilir. Merkez halka olan 0 numaralı halka 8 tane η değerine, ± 1 numaralı halkalar 6 tane η değerine ve ± 2 numaralı halkalar ise 5 tane η değerine sahiptir. η değerlerinin eşit sayıda olmamasının sebebi kalorimetrenin silindirik yapıda olmasından kaynaklıdır. Eşit olması için kalorimetrenin küresel olması gerekecekti. Halkaların her biri 75 mm kalınlığında paslanmaz çelik kirişler tarafından ayrılmıştır. 10 mm kalınlığındaki sintilatörden yayınlanan sintilasyon ışığı 0.94 mm çapında olmakla beraber WLS'ler aracılığıyla toplanıp temiz fiberlerle fotodetektörlere dağıtılır. HO, kayıp dik enerjilerin ölçülmesi ve süper simetrik parçacıkların araştırılması için gerekli hassas enerji

ölçümüne büyük katkı sağlar. HB'den kaçan parçacıkların müon detektörüne sızmasını önler.



Şekil 3.6. Hadronik Kalorimetre halka ve katman görünümü (<https://sciencedocbox.com/docs-images/75/72021148/images/35-2.jpg>).

3.1.4. Hadronik ileri kalorimetre

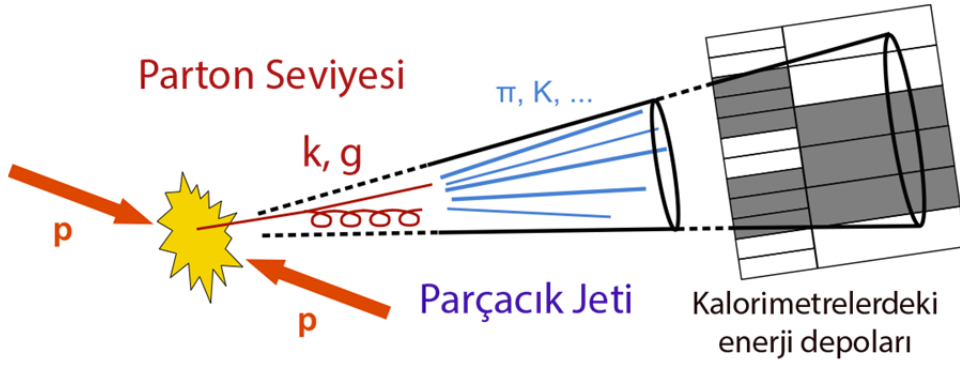
Hadronik İleri Kalorimetre (HF) de diğer kalorimetreler gibi HF+ ve HF- olmak üzere iki modülden oluşmaktadır. Psüdo-rapidity sınırı $3 \leq \eta \leq 5$ aralığındadır. HF kalorimetresi, her iki taraflı olarak çarpışma merkezinden yaklaşık 11,2 m uzaklıktadır. Yüksek radyasyon yoğunluğundan dolayı radyasyona dayanıklı materyallerden üretilmiştir. Toplamda 36 tane çelik kamaya sahiptir. Aktif materyal olarak çelik soğurucu levhalar içine konulmuş kuvars fiberler (QF) kullanılmaktadır. 1728 adet okuma kanalına sahip olan HF, okunan sinyaller için Foto Çoğaltıcı Tüp (FÇT) kullanır. HF kalorimetresi ileri jetler hakkında bilgi edinmek ve kayıp dik enerjilerin hesaplanması için önemlidir.

3.2. Jet

Jetler, p-p çarpışmalarındaki partonların saçılmasıyla (Şekil 3.7) oluşan yüksek enerjili parçacıkların deneysel imzalarıdır. BHÇ'de yapılan birçok fizik analizinin (SÜSİ, Higgs bozonu) anlaşılması için jetlere ihtiyaç duyulmaktadır. Jet

analizi yapılırken, yapılandırılmış jetler (Recojet) ve üretilmiş jetler (Genjet) olmak üzere iki kavram üzerine durulmaktadır. Çarpışma sonrasında oluşan bu jetlerin yapılandırılması farklı algoritmalarla yapılmaktadır. Üretim aşamasındaki jetlere GenJet (Generated jet) denir. Parçacıkların detektörle etkileşmesi sonucunda oluşan jetlere RecJet (Reconstructed Jet, Yeniden yapılandırılmış jet) denir. Recojetler farklı jet algoritmaları birleştirilerek oluşturulurlar. Bu algoritmalar;

- Iterative Cone (IC) Algoritması,
- Seedless Infrared Stable Cone(SISCone) Algoritması,
- Anti-kT Algoritması.



Şekil 3.7. Partonların çarpışması sonucu oluşan jetleri göstermektedir (http://cms.web.cern.ch/sites/cms.web.cern.ch/files/styles/large/public/filed/image/Sketch_PartonParticleCaloJet.png?itok=oNwUWhmK).

CMS deneyinde dört farklı recojet çeşidi bulunmaktadır; kalorimetre jetleri, jet-artı-izleyici jetleri, parçacık akışı jetleri, izleyici jetler.

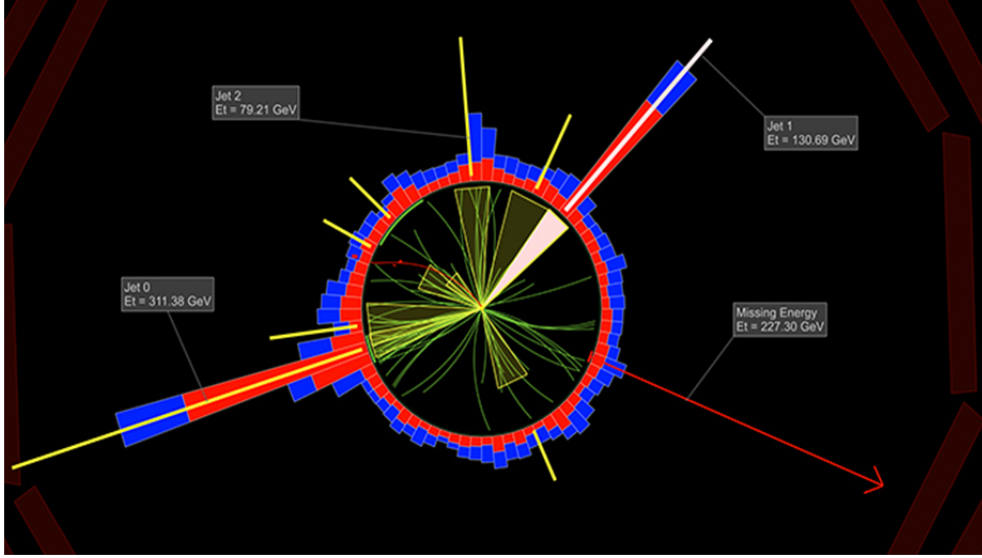
- Kalorimetre jetleri (Kalojet), elektromanyetik ve hadronik kalorimetre hücrelerinde depo edilen enerji kullanılarak yeniden yapılandırılır. Bir kalorimetre kulesi, bir veya daha fazla HKAL hücresinden ve geometrik olarak karşılık gelen EKAL kristalinden oluşur. Kalorimetrelerin fiçı bölgesinde ($\eta < 1.4$) bir HKAL hücresi ve 5×5 EKAL kristalinin ağırlıksız toplamı, yansıtıcı bir kalorimetre kulesi oluşturur. HKAL hücreleri ve EKAL kristalleri arasındaki ilişki, elektromanyetik

kalorimetrenin uç kapak bölgelerinde daha karışıktır ($1.4 < \eta < 3.0$). Kalorimetre okuma elektroniği gürültüsünden gelen katkıyı bastırmak için jet ve MET yapılandırılmasında her hücre içi eşik enerji kısıtı uygulanır. Bu eşik enerji seviyeleri Bölüm 4.1.2 de gösterilmektedir. Ek olarak, olay yığılmasından (event pile-up) gelen katkıyı bastırmak için $E_T < 0.3$ GeV 'den küçük dik enerjiye sahip kalorimetre kuleleri jet yapılandırılmasında kullanılmaz (<http://cds.cern.ch/record/1279362/files/JME-10-003-pas.pdf>).

- Jet-Artı-İzleyici Jetleri (JPT), izleyiciden gelen bilgileri kullanarak Calojet'lerin enerjisini ve yönünü düzgün bir şekilde ölçer. İzler, kalorimetre yüzeyinde jet eksenine etrafındaki jet konisinin içine doğru bulunuyorsa *koni içi izler*, manyetik alandan kaynaklı koni dışına doğru ise *koni dışı izler* denir. Yüklü izlerin momentumu kalorimetre jetlerinin hesaplanmasını düzeltmek için kullanılır.

- Parçacık Akışı Jetleri (PF Jet), olaylardaki bütün görünür parçacıkları (müonlar, elektronlar, fotonlar, yüklü ve yüksüz hadronlar) yapılandırmak ve tanımlamak için CMS'nin bütün alt detektörlerinden alınan bilgiler kullanılarak oluşturulur. Yüklü hadronlar, elektronlar ve müonlar izleyicideki parçacık izleri kullanılarak yapılandırılmaktadır. Fotonlar ve yüksüz hadronların enerji kümelerini yeniden yapılandırmak için sırasıyla EKAL ve HKAL'daki izlerinin konumları belirlenir. Yüksüz parçacıkların kendileri ile ilişkili iz momentumlarının toplamı kalorimetredeki enerji fazlalığı olarak tanımlanmaktadır (http://iopscience.iop.org/1748-0221/6/11/P11002/pdf/17480221_6_11_P11002.pdf).

- İzleyici Jetler, yalnızca izleyiciden gelen bilgileri içeren kalorimetrenin diğer bileşenlerinden bağımsız jetlerdir. Yüklü parçacıkların yeniden yapılandırılmasıyla elde edilir.

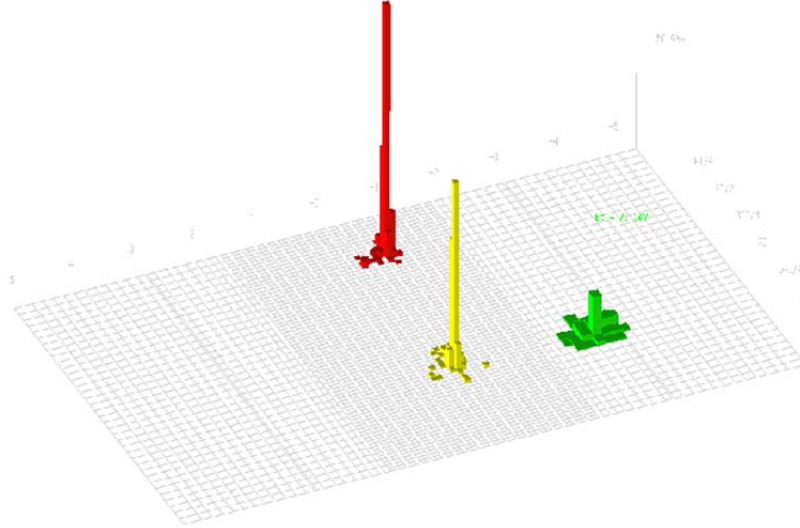


Şekil 3.8. Çarpışmada ortaya çıkan jetler
(<https://3c1703fe8d.site.internapcdn.net/newman/gfx/news/hires/2013/1-sdscsgordons.jpg>).

3.3. Kayıp Dik Enerji

Nötrinolar gibi zayıf etkileşen parçacıklar detektör ile doğrudan etkileşmeden kaçarlar. Böyle parçacıkların varlığı toplam momentum dengesizliğini ortaya çıkarır. Hüzme doğrultusu için dik düzlemde vektör momentum dengesizliği (özellikle $p - p$ ve $p - \bar{p}$ çarpışmalarında) olur ve bu Kayıp Dik Enerji (MET) olarak adlandırılır. MET arka plan olaylarında W bozonları ve üst kuarkların leptonik bozunumlarını ayırmak için en önemli kinematik niceliklerden biridir. Çoğu SM Ötesi senaryolar (Süpersimetri, ek boyutlar ve karanlık madde gibi) büyük kayıp dik enerji ile tahmin edilmektedir. MET'in yapılandırılması, ölçülemeyen parçacıkların (parçacığın enerjisinin yanlış tanımlanması, detektör çözünürlüğünün yetersizliğinden dolayı ölçülemeyen parçacıklar, detektörün zayıf bölgelerine çarpan parçacıklar, kozmik ışın parçacıkları ve son olarak beam halo parçacıkları) momentumları için çok önemlidir (CERN-PH-EP, 2011).

Bir kalorimetre kulesi, bir veya daha fazla HKAL hücresinden ve geometrik olarak karşılık gelen EKAL kristalinden oluşur. Kuleler, hadron kalorimetresinin tanecikliğine göre tanımlanmıştır. Toplamda 4176 tane kalorimetre kulesi vardır. Yüksek enerjili parçacıklar koni algoritmalarıyla yapılandırılarak jetler seçilir ve bu jetler kalorimetre kulelerini kullanarak kalorimetre enerji kulelerini oluştururlar. Bu enerji kuleleri jetlerin görünür halidir. Enerji kuleleri içerisinde hem hadronik hem de elektromanyetik parçacıklar bulunmaktadır. Kalorimetre enerji kulelerinin görünümü Şekil 3.9'ta gösterilmektedir.



Şekil 3.9. Kulelerin lego görünümü.

MET vektörü enerji (E_n), kutupsal açı (θ_n) ve azimutal açı (ϕ_n) nicelikleri kullanılarak Denklem 3.1'deki gibi hesaplanır. (CMS-TDR-8.1)

$$E_T^{kayıp} = \sum E_n \sin \theta_n \cos \phi_n \mathbf{i} + E_n \sin \theta_n \sin \phi_n \mathbf{j} = E_x^{kayıp} \mathbf{i} + E_y^{kayıp} \mathbf{j} \quad (3.1)$$

MET hesaplanırken üç farklı metot kullanılır;

- Kalorimetre Kayıp Dik Enerji (CaloMET, Calorimeter Missing Energy Transverse), kalorimetre bilgisini kullanır.

- İz-Düzeltilmiş Kayıp Dik Enerji (TCMET, Track-Corrected Missing Energy Transverse), izleyici bilgisini kullanarak kalorimetre bilgisini düzeltir.

- Parçacık Akışı Kayıp Dik Enerji (PFMET, Particle Flow Missing Energy Transverse), tüm alt detektörlerin bilgisini kullanır.

MET'in çok fazla olması (≈ 250 GeV) genellikle çarpışmada çok fazla nötrino olduğu anlamına gelir.

3.4. Elektromanyetik Kesir

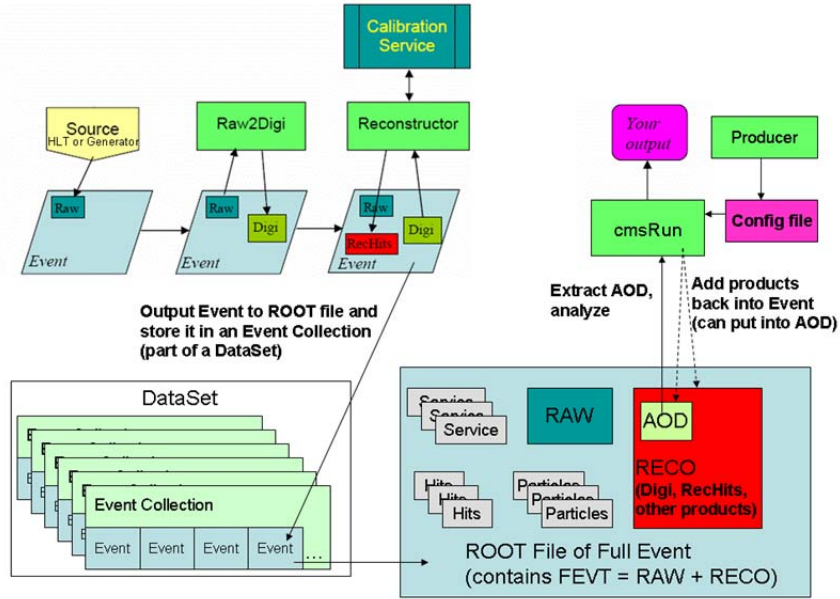
Jetler içerisinde hem hadronik parçacıklar hem de elektromanyetik parçacıklar bulundurmaktadır. Analiz yapılırken jetin içerisinde hadronik veya elektromanyetik parçacıkların hangi oranda olduğu Elektromanyetik Kesir (*EMF*) yardımıyla öğrenilebilir. *EMF*, elektromanyetik parçacıkların tüm parçacıklara (elektromanyetik ve hadronik parçacıklar) oranına eşit olup 0 ve 1 aralığında bir değer alır (Denklem 3.2).

$$EMF = \frac{EMP}{EMP+HP} \quad (3.2)$$

Denklem 3.2'de *EMP*, elektromanyetik parçacıklar *HP* ise, hadronik parçacıkları göstermektedir. *EMF* kısıtı amaca uygun şekilde uygulandığı takdirde jet içerisindeki hadronik parçacıkların oranı azaltılabilir. *EMF*, başka bir deyişle jetin hadronik kaynaklı mı yoksa elektromanyetik kaynaklı mı olduğunu gösterir. Bu kesir, analizlerde istenilmeyen olayların kesilmesi için de kullanılır. Böylece daha güvenilir sonuçlar elde edilir. Örnek verilecek olursa bir olayda ortaya çıkan bir jetin gerçek jet mi yoksa sahte jet mi olduğu bu kesir sayesinde öğrenilebilir.

3.5. Veri Yapıları

Daha önce bahsedildiği üzere saniyede 40 milyon defa birbiri ile karşılaşan $p - p$ demetlerinin etkileşmesi sonucu açığa çıkan parçacıklar detektör içine saçılırlar. Saçılan bu parçacıklar detektör materyalleriyle etkileşerek detektör içerisinde sinyaller bırakırlar. Bu sinyaller ön karar verici okuma kartları yardımıyla işlenmemiş (ham) veri olarak kaydedilirler. Ham veri gerekli veya gereksiz birçok veriyi içermektedir ve bu veriler istenilen amaca uygun bir şekilde çeşitli işlemlerden geçirilerek filtre edilir ve yeniden yapılandırılır. Bu veriye ilgili kalibrasyon çarpanları uygulanır ve böylelikle yüksek seviye fizik nesnelere üretilir. Fizik analistleri bu sayede istediği analizi daha kolay yapar. Veri setleri içeriğine göre birçok olayın olduğu bir Olay Dosyası (Event File) içinde gruplandırılır. Olaylar birden fazla etkileşen parçacıktan gelen sinyallerden oluşmaktadır. Her bir parçacığın kinematik özelliği farklı olduğundan bunlar yeniden yapılandırılır.



Şekil 3.10. Veri Analiz şeması

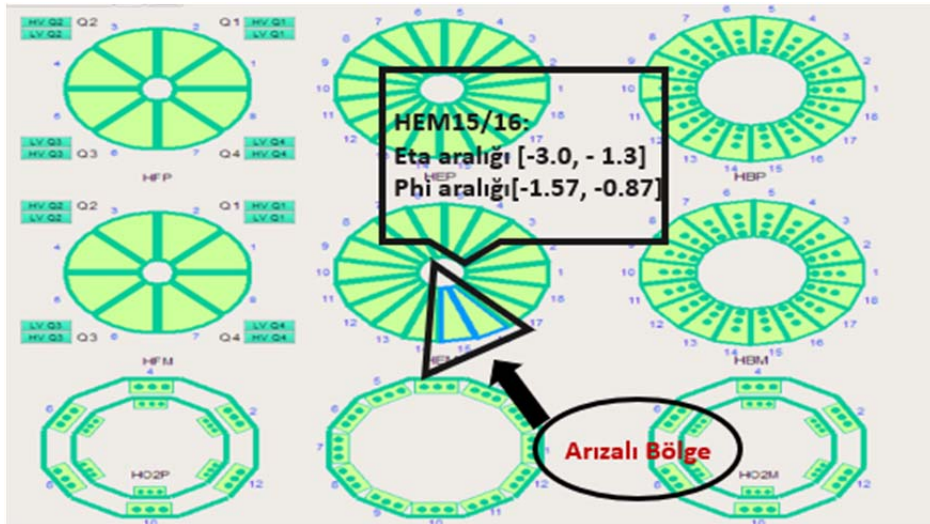
(<https://twiki.cern.ch/twiki/pub/CMSPublic/WorkBookCMSSWFramework/framework.gif>).

CMSSW, tüm veri yapılarını analiz edebilmek için oluşturulmuş temel paket kodlarından oluşur. CMSSW paketi için verinin yapılandırma aşamaları RAW, DIGI, GEN, SİM ve RECO'dur. Şekil 3.10 veri yapılandırma şemasını göstermektedir. Genel olarak analizlerde kullanılan veri yapıları şunlardır;

- RAW(Ham); olaylar detektörden gelen tüm kayıtlı bilgileri (gerekli ve gereksiz) içerir. Olay başına 1.5 MB yer kaplar.
- RECO (Reconstructed, Yeniden yapılandırma); olaylar, detektöre özel yeniden yapılandırma algoritmaları uygulanarak elde edilir. Bu algoritmalar detektöre özel dijitalleştirilmiş verinin doğrulanması ve filtrelendirilmesi, birinci ve ikinci köşelerin (vertex) yeniden yapılandırılması, izleme ve parçacık tanımlama gibi özellikleri içinde barındırır.
- AOD (Analysis Object Data, Analiz Nesne Verisi), RECO'dan türetilmiş ve doğrudan fizik analizlerinde kullanılabilen bir veri yapısıdır. Diğer verilere kıyasla daha az yer kaplamaktadır ve ortalama olay başına 50 kB yer kaplamaktadır.

4. ARAŞTIRMA VE BULGULAR

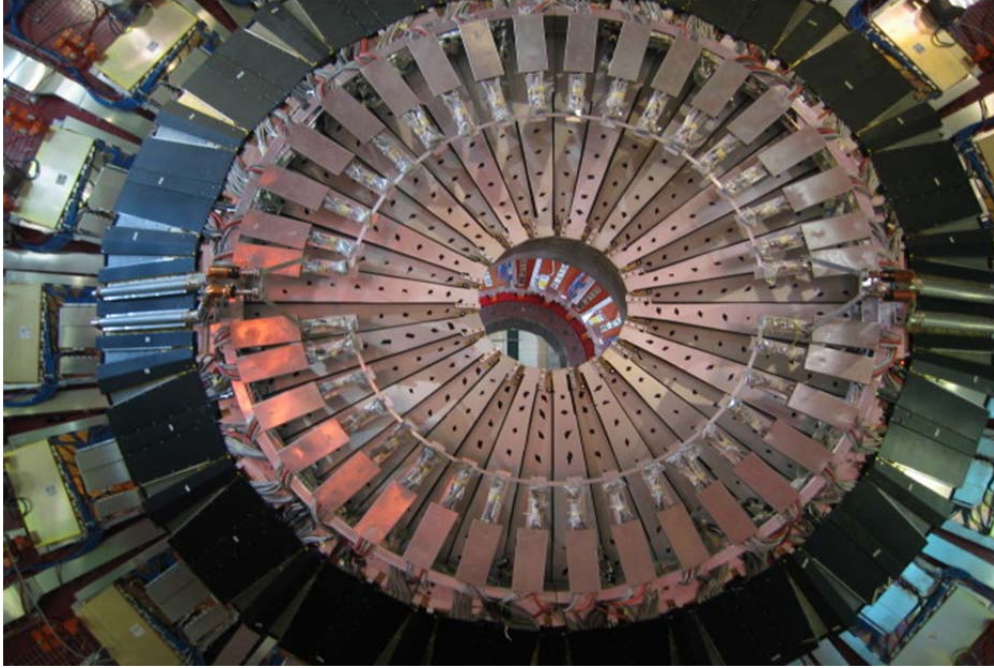
Tezin bu bölümünde, HKAL detektörünün alt bölümlerinden olan HE'nin performans analizleri bulunmaktadır. Bu çalışma kapsamında CMS deneyinde 2018 yılında alınan FEVT (Full Event) ve AOD verileri kullanılmıştır. Olay seçimi için ise $anti - k_T$ algoritması ile yeniden yapılandırılmış Parçacık Akışı jetleri ve Kalorimetre jetleri seçilmiştir. Koni yarıçapı $R = 0.4$ olan AK4 olarak adlandırılan kümelenmiş jetler kullanılmıştır. Rutin haftalık verilerin performans analizleri yapılırken bazı veri setlerinde beklenilmeyen sonuçlar gözlemlenmiştir (Şekil 4.5). Detaylı analizler sonucu bu beklenmeyen sonuçların 30 Haziran 2018 tarihinde meydana gelen plansız elektrik kesintisinden kaynaklandığı sonucuna varılmıştır (Şekil 4.4). Hasarlı bölge HKAL'ın $-3 < \eta < -1.3$ ve $-1.57 < \phi < -0.87$ aralığında olup bu bölge HE detektörünün 15. ve 16. kamalarına karşılık gelmektedir. Şekil 4.1'de CMS Online'dan alınmış ve bu elektrik kesintisi sonucu HE'de oluşan arızanın olduğu bölgeleri gösteren bir görüntü gösterilmektedir.



Şekil 4.1. CMS Online'dan alınmış, HE'deki arızalı bölgenin temsili bir görüntüsü.

Şekil 4.2’de HE detektörünün ön görünüşü gösterilmektedir. HE’deki bu sorunun okuma ünitelerinden kaynaklı olduğu düşünülüp bu üniteler değiştirilmiş olsa da sorun çözülememiştir. Bu kısmın analizleri ne kadar etkilediğini tespit etmek amacıyla özel olarak bu alan için analizler yapılmıştır.

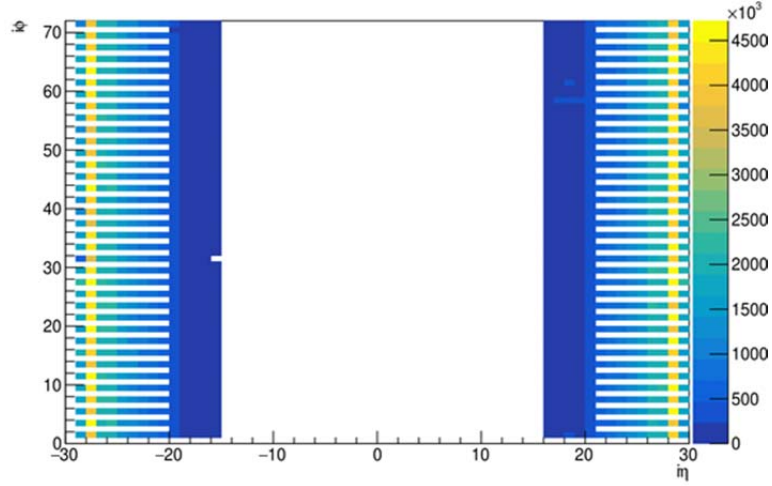
İlk olarak bölgedeki hasarın ne boyutta olduğunu bulmak için hangi verilerin ve olay seçimlerinin kullanılması gerektiği tespit edildi. Yukarıda da bahsedildiği gibi 2018 yılı çarpışma verileri kullanıldı.



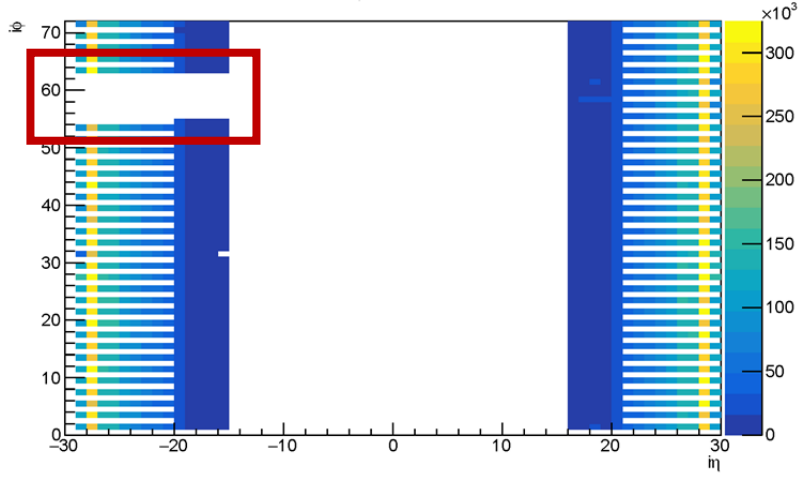
Şekil 4.2. HE detektörünün önden görünüşü.

İlk olarak HE detektörünün genel performansını gösteren doluluk histogramı çizdirildi. Şekil 4.3’de elektrik kesintisinden önce HE detektörünün doluluk (occupancy) histogramı gösterilmektedir. Bu histogramlar, silindirik şekilli CMS detektörünü iki boyutlu bir düzleme açtığımızda çarpışma sonrası oluşan jet sayısına göre haritalanmasını göstermektedir. Histogramın sağ tarafındaki ölçek ise jet sayısını vermektedir. Şekil 4.4’te ise elektrik kesintisinin olduğu esnada alınan

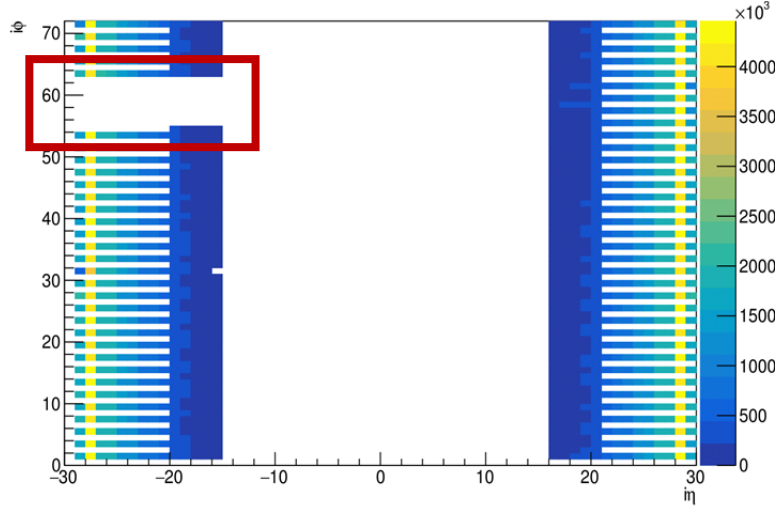
run numarasına ait HE doluluk histogramı gösterilmekte olup Şekil 4.5'te ise kesintinin ardından alınan run numarasına ait histogramı gösterilmektedir. Bu üç şekil incelendiğinde meydana gelen farklılıklar gözle görülür biçimde ortaya çıkmaktadır.



Şekil 4.3. 317769 run numarasına ait FEVT veri setinden alınmış arızadan önceki HE histogramı.



Şekil 4.4. 319077 run numarasına ait FEVT veri setinden alınmış arıza esnasındaki HE histogramı.



Şekil 4.5. 321295 run numarasına ait FEVT veri setinden alınmış arızadan sonraki HE histogramı.

Bu histogramlardan da anlaşılacağı üzere hasarlı bölgede verinin okunamadığı açıkça ortadadır. Bu histogramların oluşturulmasında kullanılan veri setleri Çizelge 4.1’de, kullanılan analiz paketleri ve run numaraları özellikleriyle beraber Çizelge 4.2’de gösterilmektedir.

Çizelge 4.1. HKAL performansı analizinde kullanılan veri setleri.

VERİ SETLER
/ExpressPhysics/Commissioning2018B-Express-v1/FEVT
/ExpressPhysics/Commissioning2018C-Express-v1/FEVT
/ExpressPhysics/Commissioning2018D-Express-v1/FEVT
/MET/Run2018A-PromptReco-v2/AOD
/MET/Run2018B-PromptReco-v1/AOD
/MET/Run2018B-PromptReco-v2/AOD
/MET/Run2018D-PromptReco-v2/AOD
/JetHT/Run2018B-PromptReco-v2/AOD
/JetHT/Run2018D-PromptReco-v2/AOD

Çizelge 4.2. Analizde kullanılan CMSSW paketleri ve ışıklılık ile birlikte run numaraları.

RUN NUMARASI	CMSSW VERSİYONU	İŞIKLILIK
314650	CMSSW_10_1_1	0.663893 pb ⁻¹
315488	CMSSW_10_1_2_patch2	232.770016 pb ⁻¹
316723	CMSSW_10_1_4	10.998375 pb ⁻¹
316758	CMSSW_10_1_4	439.795750 pb ⁻¹
316944	CMSSW_10_1_4	477.091563 pb ⁻¹
317661	CMSSW_10_1_4	377.497125 pb ⁻¹
317696	CMSSW_10_1_7	223.092594 pb ⁻¹
318874	CMSSW_10_1_7	94.792141 pb ⁻¹
318877	CMSSW_10_1_7	152.885063 pb ⁻¹
318984	CMSSW_10_1_7	0.032253 pb ⁻¹
318984	CMSSW_10_1_7	0.032253 pb ⁻¹
319077	CMSSW_10_1_9_patch1	16.714002 pb ⁻¹
319300	CMSSW_10_1_7	0.811253 pb ⁻¹
319449	CMSSW_10_1_7	243.252656 pb ⁻¹
320065	CMSSW_10_1_7	217.863469 pb ⁻¹
321295	CMSSW_10_1_9_patch1	206.595938 pb ⁻¹
322625	CMSSW_10_1_10	342.059000 pb ⁻¹
322633	CMSSW_10_1_10	52.160656 pb ⁻¹
323474	CMSSW_10_1_10	78.565344 pb ⁻¹
323857	CMSSW_10_1_10	97.403906 pb ⁻¹
324245	CMSSW_10_1_10	420.919594 pb ⁻¹
324420	CMSSW_10_1_10	202.465195 pb ⁻¹
325170	CMSSW_10_1_10	265.164055 pb ⁻¹

Çizelge 4.2'deki tüm run numaraları test edilmiş olup bu tezde sadece 318874, 319077 ve 325170 numaralı runlara ait sonuçlara yer verilmiştir. Bu run

numaralarından 318874 arızadan önce alınan bir run numarası, 319077 arıza sırasında alınan run numarası ve 325170 arızadan sonra alınan run numarasıdır. Söz konusu run numaralarında FEVT, Jet AOD ve MET AOD veri setleri incelenmiştir. Alınan bu veriler ile parçacık akışı jetler, parçacık akışı kayıp dik enerji, kalorimetre jetleri ve kalorimetre kayıp dik enerji gibi kinematik niceliklere bakılarak HKAL'ın performansıyla ilgili bilgi sahibi olundu.

4.1. Jet Analizi

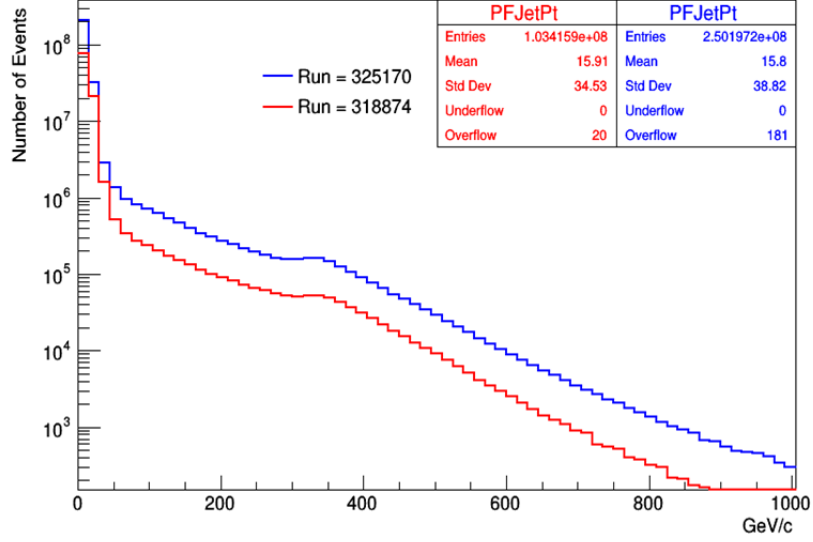
4.1.1. Parçacık Akışı Jet Analizi

Tüm detektörden gelen verilerin HE detektörünün performansı üzerinde nasıl bir etkisi olduğunu anlayabilmek için parçacık akışı (PF) jetlerin dik momentumuna, eta değerine ve phi değerlerine bakıldı. PF jet analizi yapılırken PF algoritması kullanılmaktadır. Bu algoritma, tüm detektörden gelen bilgiyi en uygun şekilde kullanıp parçacıkların tümünü ayrı ayrı tanımlamaktadır ve yeniden yapılandırmaktadır. Jetlerin performansı KRD çoklu-jet olayları ile ölçülmektedir. PF jetler analiz edilecek olan fizik konusuna göre jet kümeleme algoritmaları seçilerek tanımlanmaktadır. Bu analizde sadece $R = 0.4$ yarıçaplı koni parametresine sahip *anti- k_T* algoritması kullanılarak parçacıklar yeniden yapılandırılmıştır. *Anti- k_T* algoritması, PF algoritması tarafından yeniden yapılandırılan tüm parçacıkları (PF jetler), kalorimetre kulelerinde (Kalojet) depolanan EKAL ve HKAL enerjilerinin tümünü ve olay üretici tarafından üretilen tüm parçacık (nötrinolar hariç) sinyallerini toplayabilmektedir. Bu çalışmada sahte ve gerçek jet ayırımı daha rahat yapabilmek adına genellikle 40 GeV'den büyük jetleri içeren olaylar seçildi.

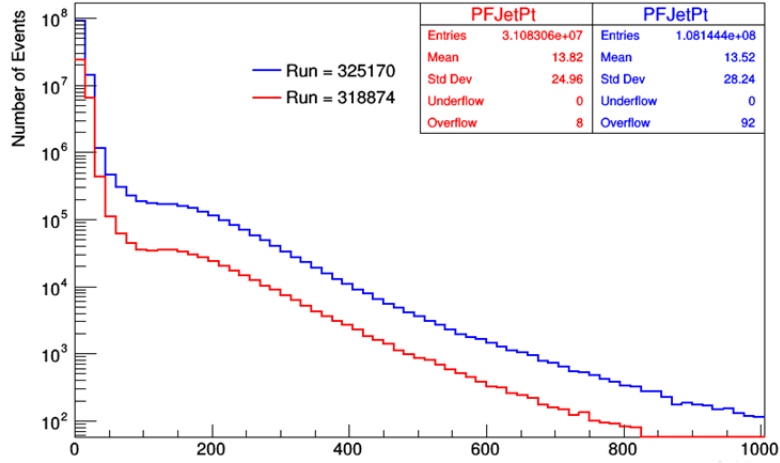
PF için düzeltilmiş açisal çözünürlük, çoğunlukla yüklü hadronların yönünün ve momentumunun hassas bir şekilde belirlenmesini sağlamaktadır. Bu yüzden tezde PF jetlerin çeşitli kinematik özelliklerine bakılmaya gerek duyulmuştur.

Parçacık akışı jetlerin yeniden yapılandırmasının amacı tüm durgun parçacıkları tanımlamakla beraber bir olayın eksiksiz tanımını sağlamaktır. Bu da PF algoritmasının PF adaylarını oluşturmak için bir olayda (İzler, HKAL enerji depoları, EKAL kümeleri vs.) yeniden yapılandırılan nesnelerin tümünü analiz eder. PF adayları yeniden yapılandırmada kullanılan alt detektörlerin işlevine bağlı olarak yüklü hadron, yüksüz hadron, elektron, müon, foton, HF hadronik parçacık, HF elektromanyetik parçacık olmak üzere yedi farklı tipe ayrılır. Şekil 4.6 ve Şekil 4.7 PF Jet için ayrı ayrı JET ve MET AOD veri setleri kullanılarak dik momentum başına düşen jet sayılarını, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9 yine ayrı ayrı JET ve MET AOD veri setleri kullanılarak η 'ya karşılık gelen olay sayısını, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de JET ve MET AOD veri setleri kullanılarak ϕ 'ya karşılık gelen jet sayısını, Şekil 4.12 ve Şekil 4.13 yine hem JET hem de MET AOD veri setleri kullanılarak hasarlı bölgede dik momentum başına düşen jet sayısını göstermektedir. Bu histogramların her biri arıza öncesi bir run numarası ile arıza sonrası bir run numarasının kıyaslanması için çizdirilmiştir. Bu histogramlara bakıldığında, arıza öncesi ve sonrası bu kinematik niceliklerde büyük farklılıklar gözlenmedi. Bundan dolayı farklılığı gözlemleyebilmemiz adına aynı run numaraları için η değerlerine karşılık ϕ değerlerinin histogramları çizdirildi ve daha sonra EMF ve enerji kısıt şartları uygulanmıştır. Şekil 4.14 ve Şekil 4.15'de JET AOD veri seti için η - ϕ grafikleri PF jetlerin doluluk oranını göstermektedir. Bu grafiklerde 40 GeV'den büyük enerjili olaylar alınıp 0.1 oranından büyük EMF koşulu uygulanmıştır. Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'deki grafiklerde ise diğer iki grafikten farklı olarak sadece 0.05 oranından büyük EMF koşulu uygulanmıştır. Şekil 4.15 ve Şekil 4.17'de arızalı bölge için jet sayısının fazla olduğu gösterilmektedir. Normal şartlarda bu bölgede jet sayısının sıfıra yakın olması yani okuma üniteleri bu bölgede çalışmadığı için verinin alınmaması gerekmektedir. Algoritma izleyiciden başlayarak EKAL'deki verileri yapılandırdıktan sonra HKAL'de arızalı bölgede olan olayları EKAL'den gelen verinin devamı sanıp

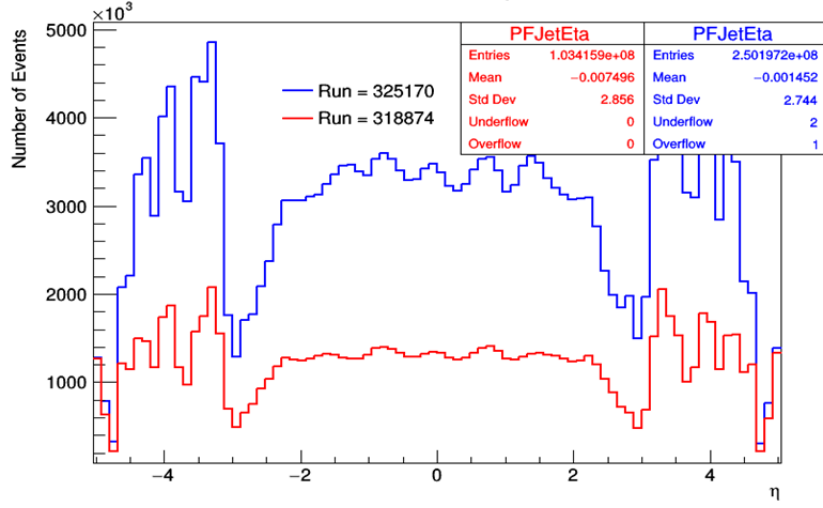
hepsini jet olarak tanımlamaktadır. Böylece problem yaşandıktan sonraki grafiklerde arızalı bölgede çok fazla jet görülmektedir.



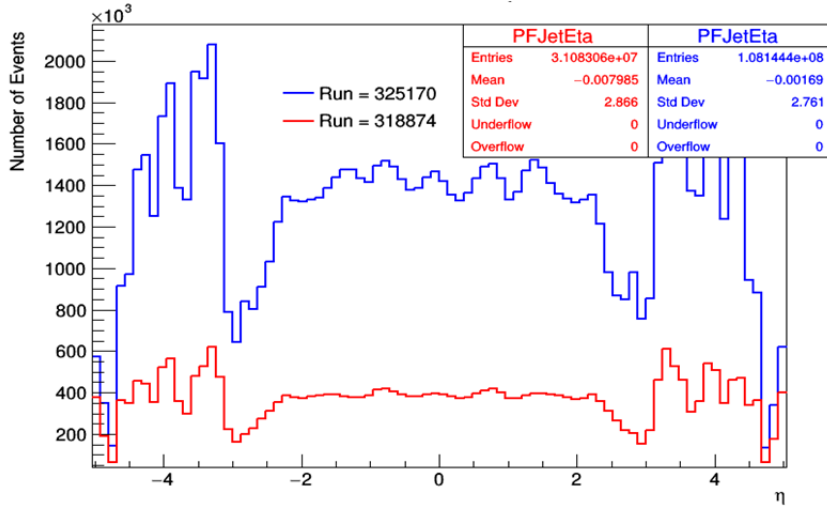
Şekil 4.6. 318874 (kırmızı) ve 325170 (mavi) numaralı runların JET AOD veri seti için dik momentum dağılımı.



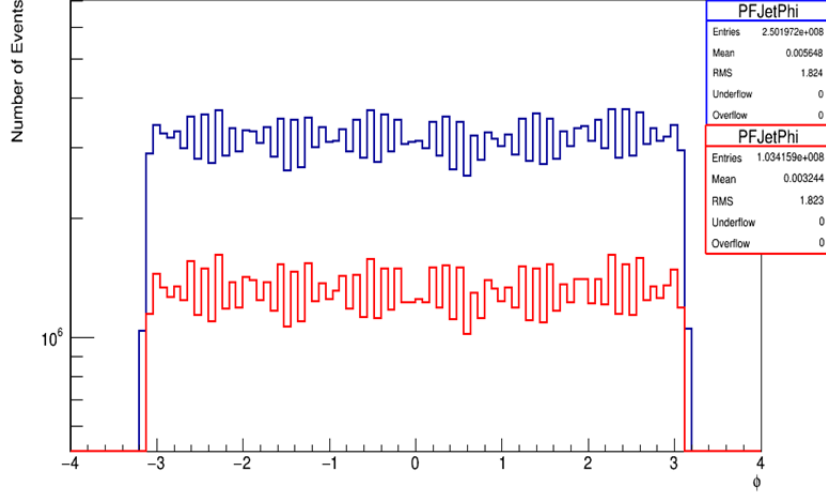
Şekil 4.7 318874 (kırmızı) ve 325170 (mavi) numaralı runların MET AOD veri seti için dik momentum dağılımı.



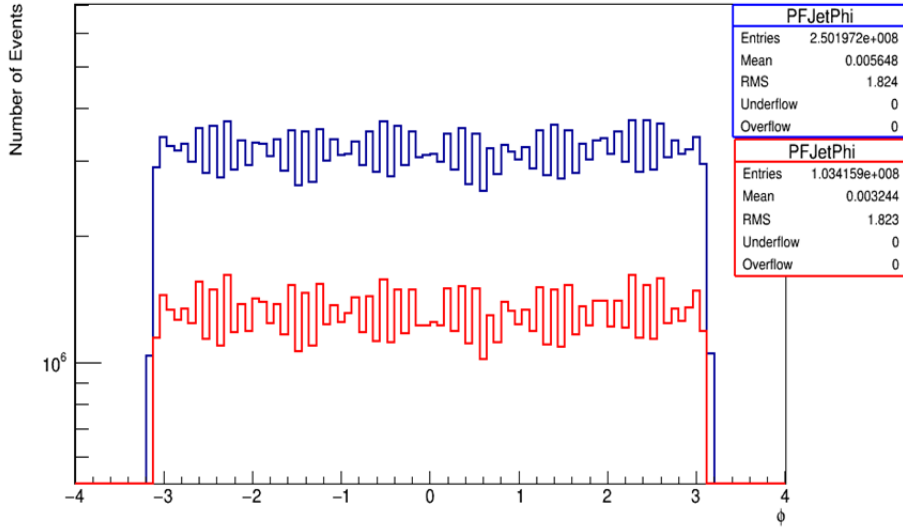
Şekil 4.8. 318874(kırmızı) ve 325170(mavi) numaralı runların JET AOD veri seti için η dağılımı



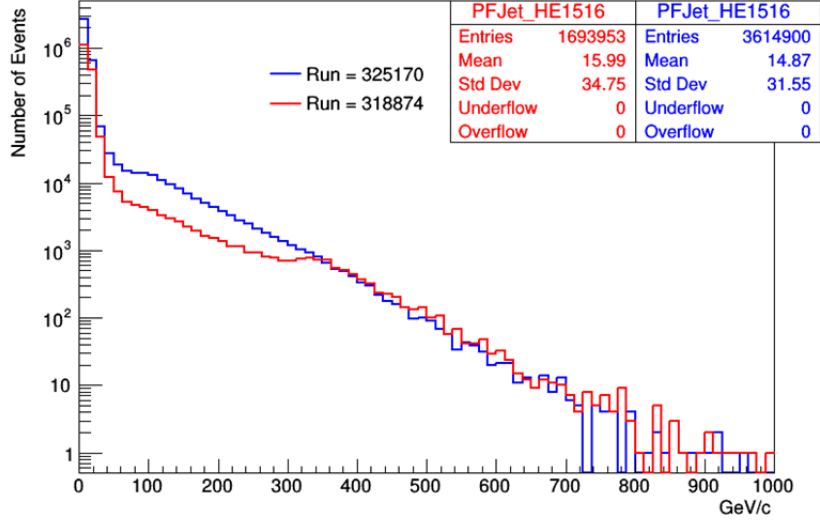
Şekil 4.9. 318874(kırmızı) ve 325170(mavi) numaralı runların MET AOD veri seti için η dağılımı.



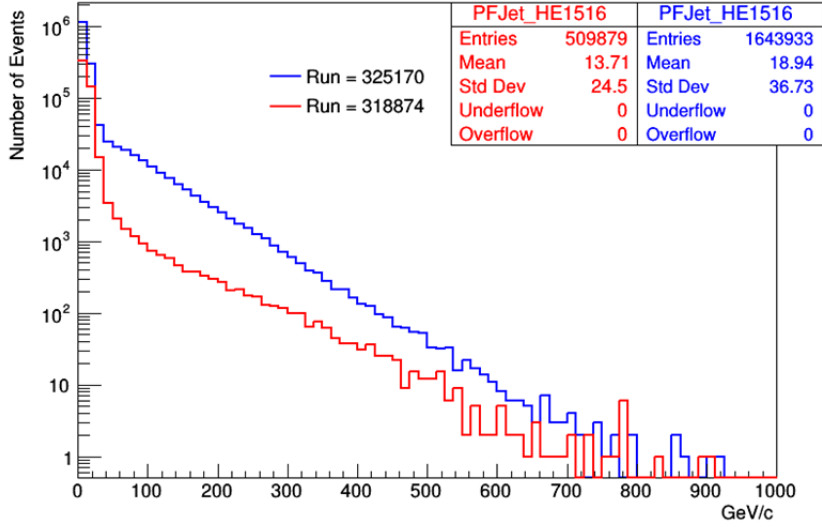
Şekil 4.10. 318874(kırmızı) ve 325170(mavi) numaralı runların JET AOD veri seti için ϕ dağılımı.



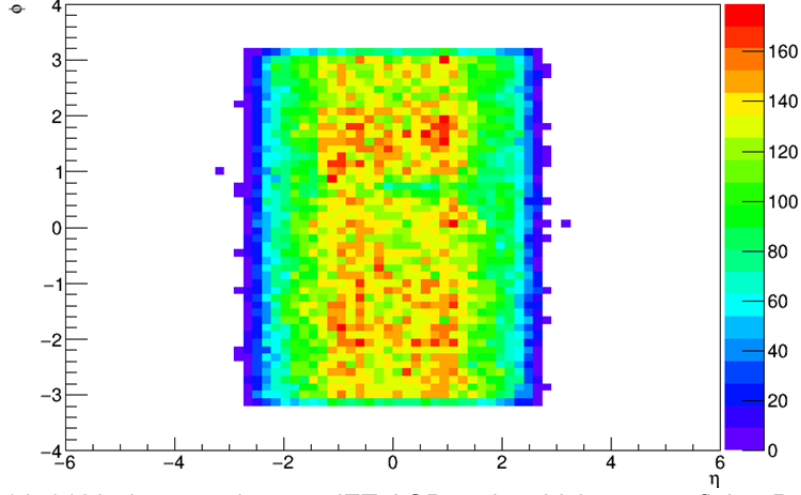
Şekil 4.11. 318874(kırmızı) ve 325170(mavi) numaralı runların MET AOD veri seti için ϕ dağılımı.



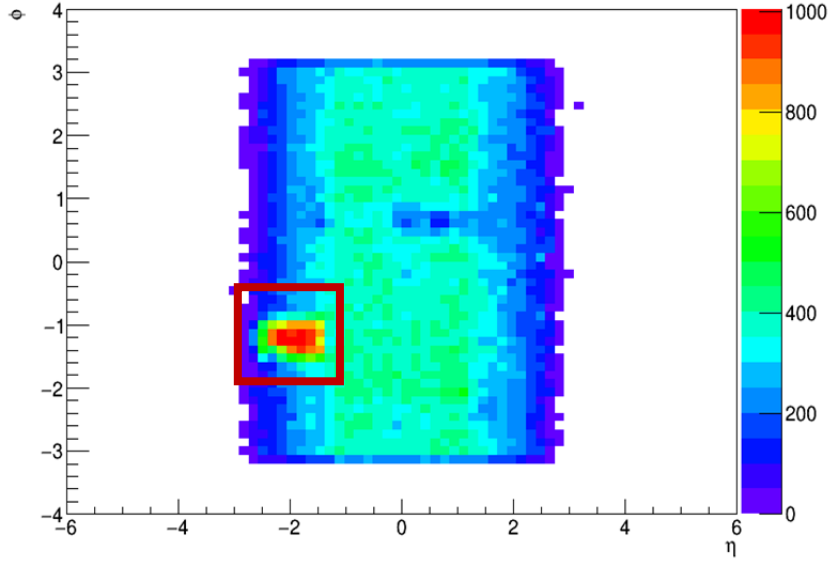
Şekil 4.12. Hasarlı bölge için 318874(kırmızı) ve 325170(mavi) numaralı runların JET AOD veri seti için PF Jet dağılımı.



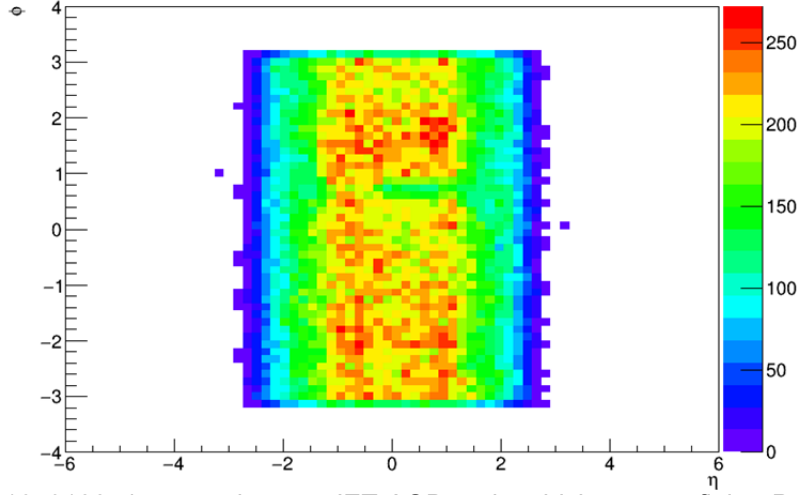
Şekil 4.13. Hasarlı bölge için 318874(kırmızı) ve 325170(mavi) numaralı runların MET AOD veri seti için PF Jet dağılımı.



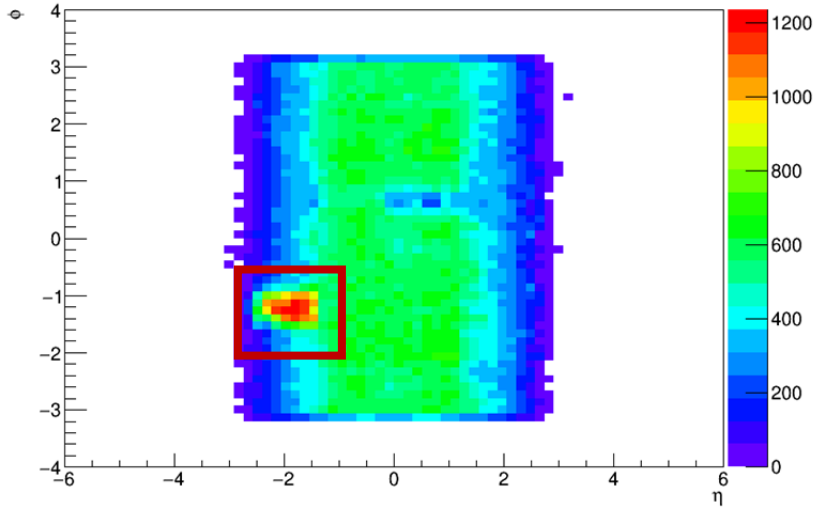
Şekil 4.14. 318874 numaralı runın JET AOD veri seti için η - ϕ grafiğine $P_t > 40 \text{ GeV}$, $EMF > 0.1$ kısıtlama koşulunun uygulanması.



Şekil 4.15. 325170 numaralı runın JET AOD veri seti için η - ϕ grafiğine $P_t > 40 \text{ GeV}$, $EMF > 0.1$ kısıtlama koşulunun uygulanması.



Şekil 4.16. 318874 numaralı runın JET AOD veri seti için η - ϕ grafiğine $P_t > 40 \text{ GeV}$, $EMF > 0.05$ kısıtlama koşulunun uygulanması.



Şekil 4.17. 325170 numaralı runın JET AOD veri seti için η - ϕ grafiğine $P_t > 40 \text{ GeV}$, $EMF > 0.05$ kısıtlama koşulunun uygulanması.

Şekil 4.14 ve Şekil 4.15'deki η - ϕ grafikleri JET AOD veri setinde PF jetlerin doluluk oranını göstermektedir. Bu grafiklerde 40 GeV'den büyük enerjili olaylar alınıp 0.1 oranından büyük EMF koşulu uygulanmıştır. Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'deki grafiklerde ise diğer iki grafikten farklı olarak sadece 0.05 oranından

büyük EMF koşulu uygulanmıştır. Şekil 4.15 ve Şekil 4.17’de de arızalı bölge için jet sayısının fazla olduğu görülmektedir.

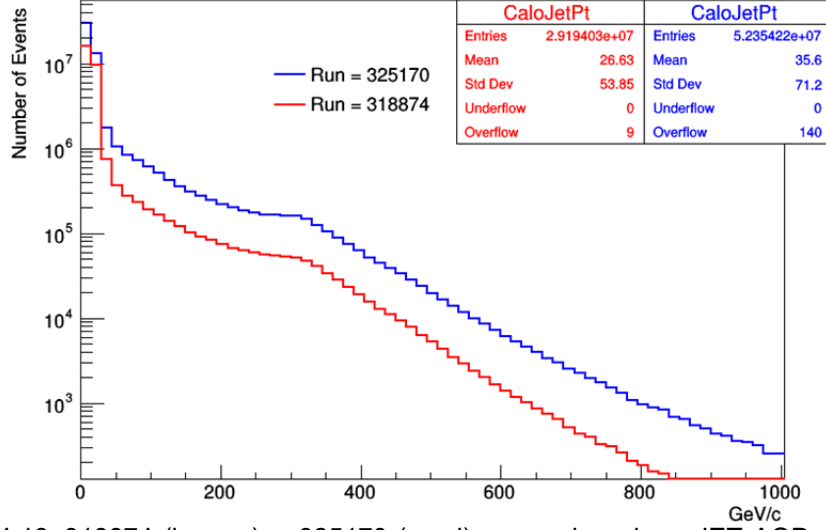
4.1.2. Kalorimetre Jet Analizi

Kalorimetre jetleri, kalorimetre kulelerindeki enerji depolarını yeniden yapılandırılan jetlerdir. Bir kalorimetre kulesi, EKAL kristallerine karşılık gelen ve bir veya daha fazla HKAL hücresinden oluşmaktadır. Herbir kalorimetre kulesi jet yapılandırma algoritması için veridir. Kalorimetre kuleleri için kalorimetre okuma ünitelerinden gelen gürültüyü azaltmak için eşik enerji değeri uygulanmıştır. Bu eşik enerji değerleri HKAL’ın tüm alt detektörleri için Çizelge 4.3’de gösterilmektedir. (CMS AN-024, 2010).

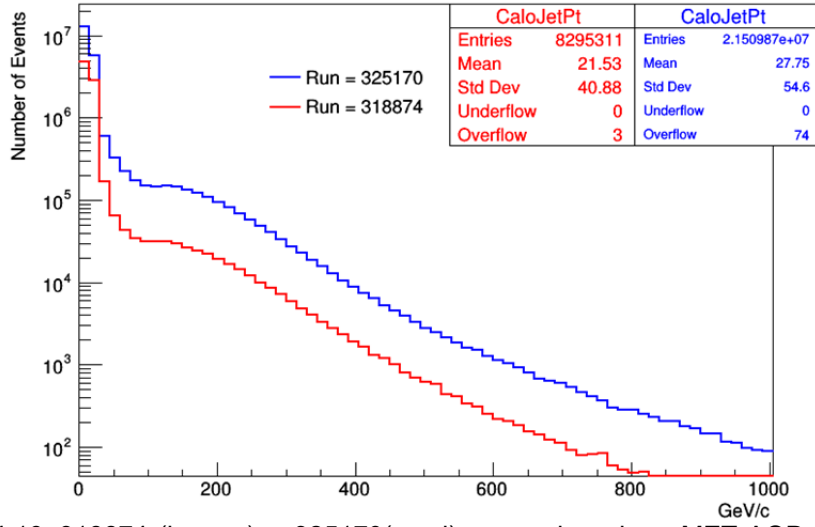
Çizelge 4.3. HKAL'ın alt detektörlerinin eşik enerji değerleri

Bölüm	Eşik Enerji (GeV)
HB	0.7
HE	0.8
HO	1.1/3.5(Halka 0/ Halka1-2)
HF(uzun)	0.5
HF(kısa)	0.85

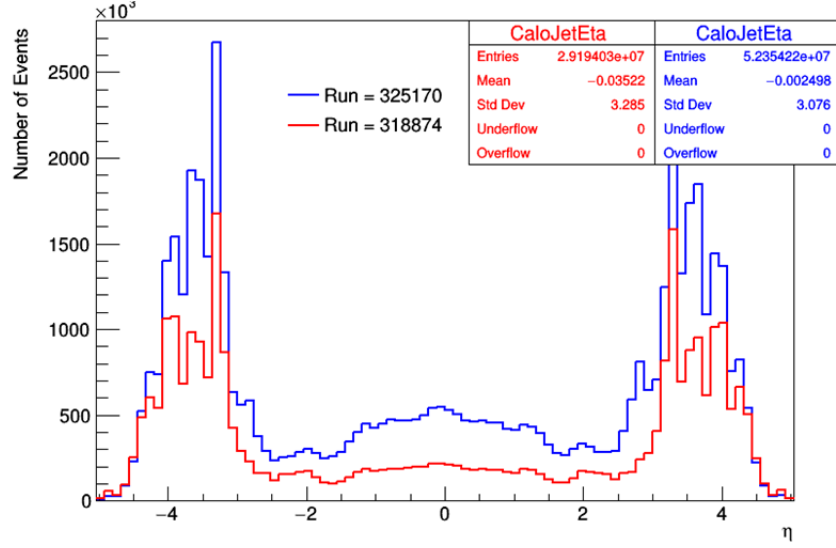
Kalojetler, analiz edilecek olan fizik konularına göre jet kümeleme algoritmaları kullanılarak belirlenmektedir. PF jet analizindeki gibi Kalojet analizinde de $R = 0.4$ yarıçaplı koni parametresine sahip *anti* – k_T algoritması kullanılarak parçacıklar yapılandırılmıştır. PF jet için yapılan arıza öncesi ve sonrası kıyaslamalar Kalojet içinde yapıldı. Daha kaliteli ve doğru jetler bulmak için 40 GeV’den büyük jetlere bakıldı ve PF analizde olduğu gibi farklı EMF kısıtlamaları uygulandı.



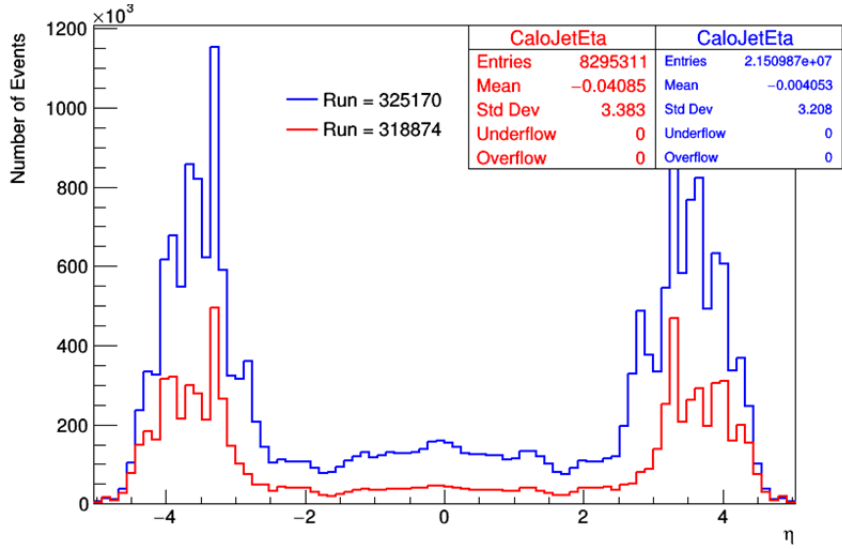
Şekil 4.18. 318874 (kırmızı)ve 325170 (mavi) numaralı runların JET AOD veri seti için Kalojet dik momentum dağılımlarının karşılaştırılması.



Şekil 4.19. 318874 (kırmızı)ve 325170(mavi) numaralı runların MET AOD veri seti için Kalojet dik momentum dağılımlarının karşılaştırılması.

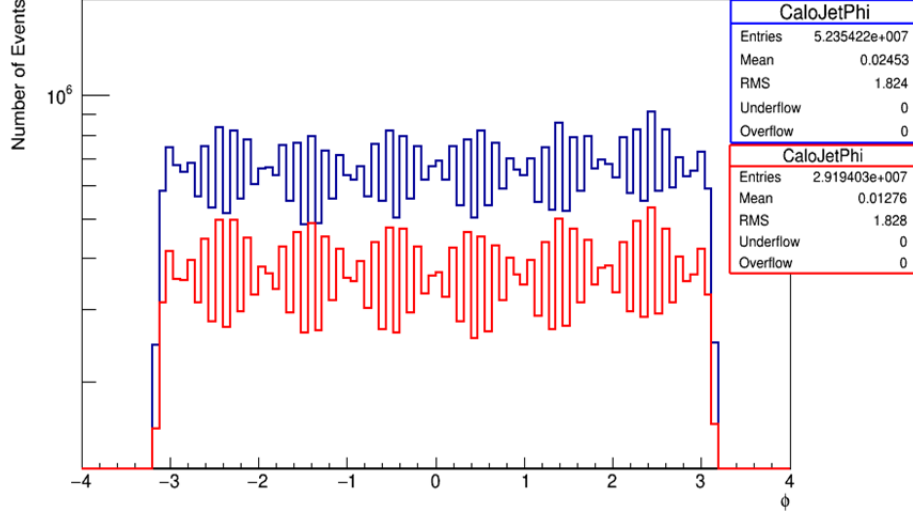


Şekil 4.20. 318874 ve 325170 numaralı runların JET AOD veri seti için Kalojet η dağılımlarının karşılaştırılması.

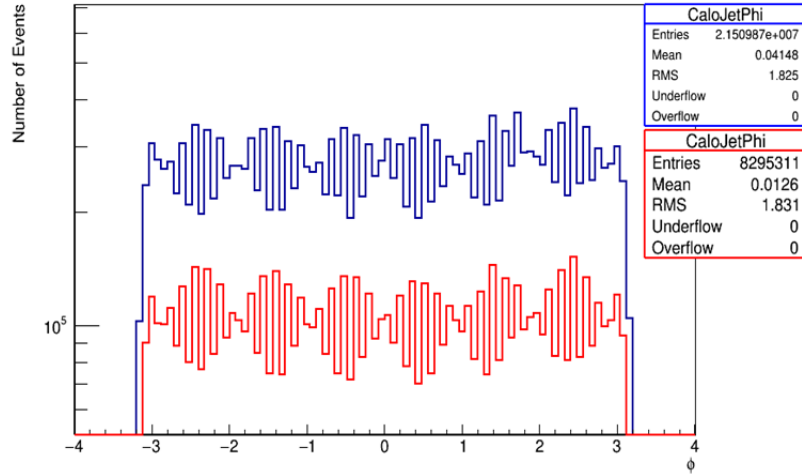


Şekil 4.21. 318874 ve 325170 numaralı runların MET AOD veri seti için Kalojet η dağılımlarının karşılaştırılması.

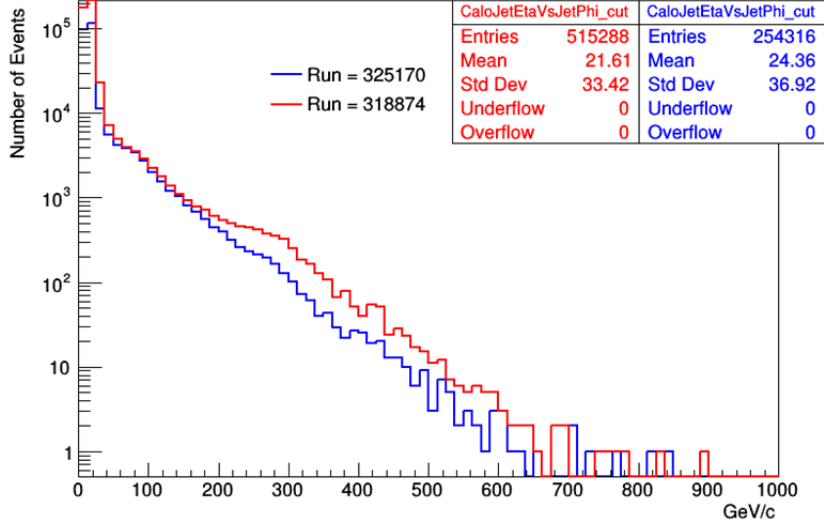
Şekil 4.18, Şekil 4.19, Şekil 4.20, Şekil 4.21, Şekil 4.22, Şekil 4.23, Şekil 4.24 ve Şekil 4.25'deki histogramlar, Kalojet analizi için elde edilmiştir.



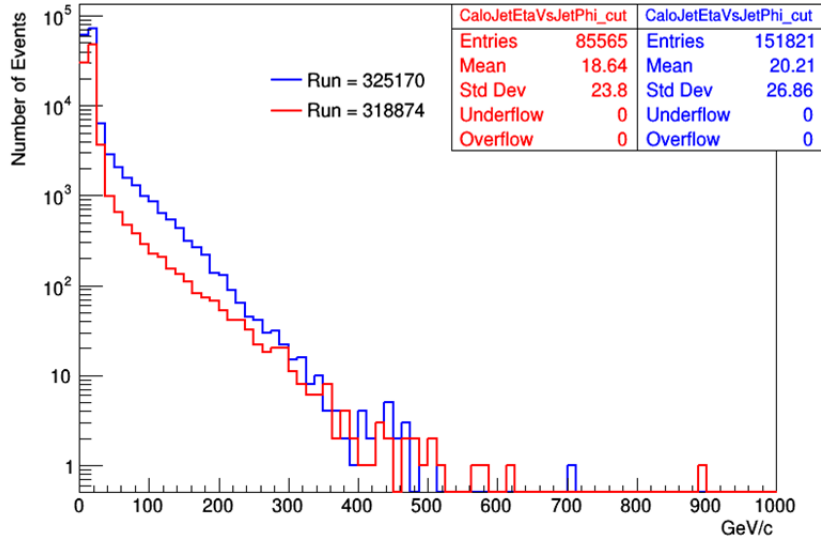
Şekil 4.22. 318874 (kırmızı) ve 325170 (mavi) numaralı runların JET AOD veri seti için Kalojet ϕ dağılımlarının karşılaştırılması.



Şekil 4.23. 318874(kırmızı) ve 325170(mavi) numaralı runların MET AOD veri seti için Kalojet ϕ dağılımlarının karşılaştırılması.



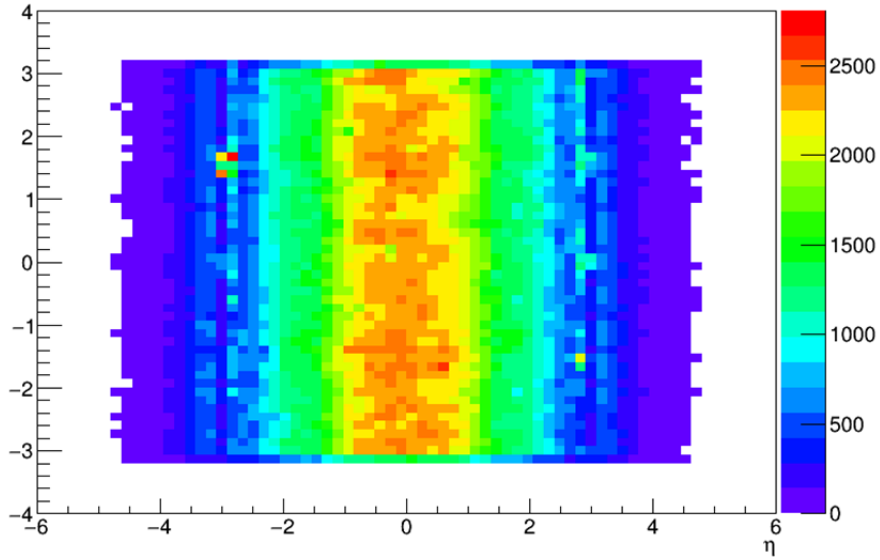
Şekil 4.24. Hasarlı bölge için 318874(kırmızı) ve 325170(mavi) numaralı runların JET AOD veri seti için KaloJet dağılımları.



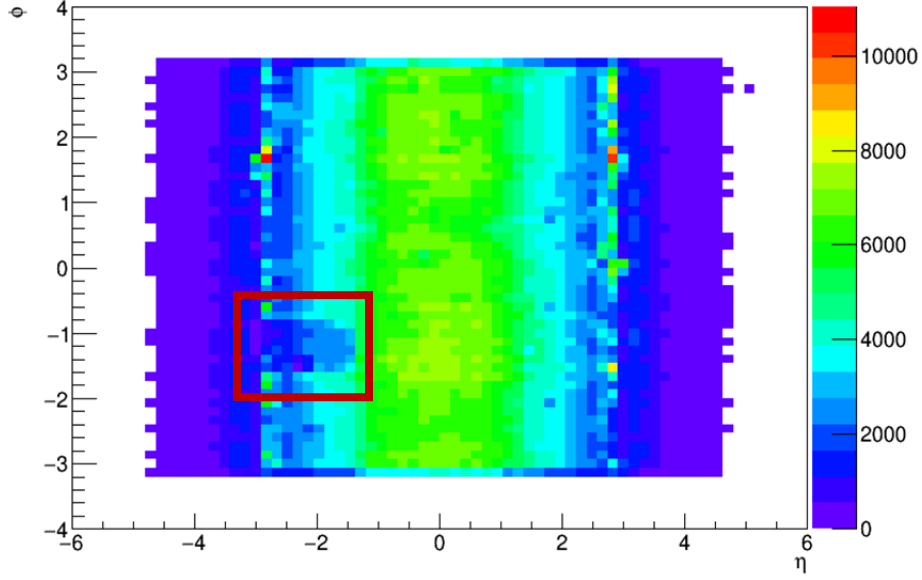
Şekil 4.25. Hasarlı bölge için 318874(kırmızı) ve 325170(mavi) numaralı runların MET AOD veri seti için KaloJet dağılımları.

Şekil 4.18 ve Şekil 4.19 sırasıyla JET ve MET AOD veri setinde Kalojet için dik momentuma karşılık gelen jet sayılarını, Şekil 4.20 ve Şekil 4.21 ayrı ayrı

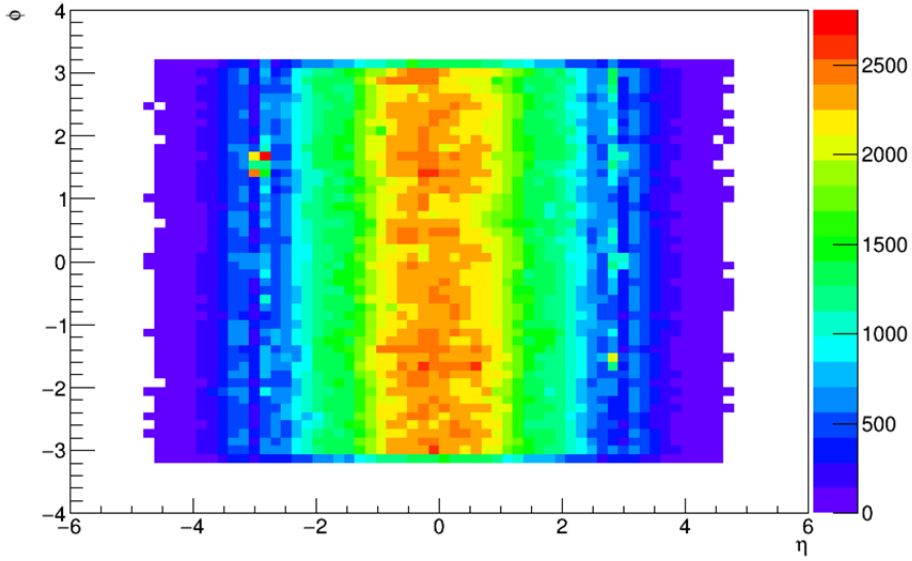
JET ve MET veri setinde eta değerine karşılık gelen jet sayısını, Şekil 4.22 ve Şekil 4.23'deki grafiklerde ise sırasıyla JET ve MET AOD veri setlerinde phi değerine denk gelen jet sayısını ve son olarak Şekil 4.24 ve Şekil 4.25'te de aynı şekilde JET ve MET AOD veri setlerinde arızalı bölgede dik momentum başına düşen jet sayısını göstermektedir. Bu histogramlara bakıldığında olay sayılarındaki farklılık hariç, net bir şekilde bir farklılık görülememektedir. Detaylı analiz için eta değerine karşılık gelen phi değerlerinin doluluk grafikleri incelendi.



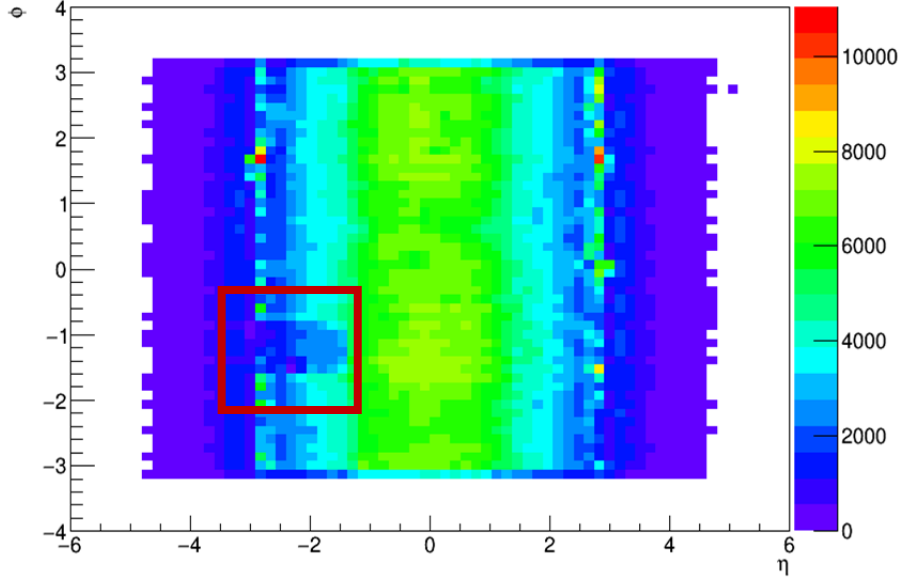
Şekil 4.26. 318874 numaralı runın JET AOD veri seti için Kalojet η - ϕ grafiğine $P_t > 40 \text{ GeV}$, $EMF > 0.1$ kısıtlama koşulunun uygulanması.



Şekil 4.27. 325170 numaralı runın JET AOD veri seti için Kalojet η - ϕ grafiğine $P_t > 40 \text{ GeV}$, $EMF > 0.1$ kısıtlama koşulunun uygulanması.



Şekil 4.28. 318874 numaralı runın JET AOD veri seti için Kalo Jet η - ϕ grafiğine $P_t > 40 \text{ GeV}$, $EMF > 0.05$ koşulunun uygulanması.



Şekil 4.29. 325170 numaralı runın JET AOD veri seti için Kalo Jet η - ϕ grafiğine $P_t > 40 \text{ GeV}$, $EMF > 0.05$ koşulunun uygulanması.

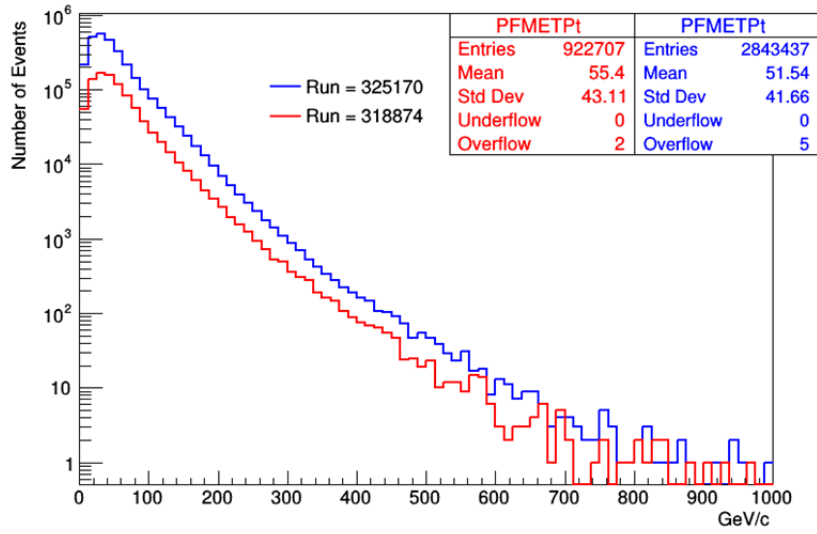
Yukarıdaki η - ϕ grafikleri JET AOD veri setinde Kalojetlerin doluluk haritalanmasını göstermektedir. Bu grafiklerde 40 GeV'den büyük olaylar alınmıştır. Şekil 4.26 ve Şekil 4.27'de 0.1 oranından büyük EMF koşulu uygulanmıştır. Şekil 4.28 ve Şekil 4.29'da ise 0.05 oranından büyük EMF kısıtı kullanılmıştır. Arıza sonrası run (325170) numarasına bakıldığında arızalı bölgedeki jetlerin az olduğu görülmektedir. Bu da beklenen bir sonuçtur. Çünkü Kalojet algoritması sadece kalorimetredeki veriyi yeniden yapılandırmaktadır ve kalorimetredeki bu bölgedeki okuma üniteleri çalışmadığı için beklenildiği gibi sifıra yakın jet sayısı görülmektedir.

4.2. Kayıp Dik Enerji Analizi

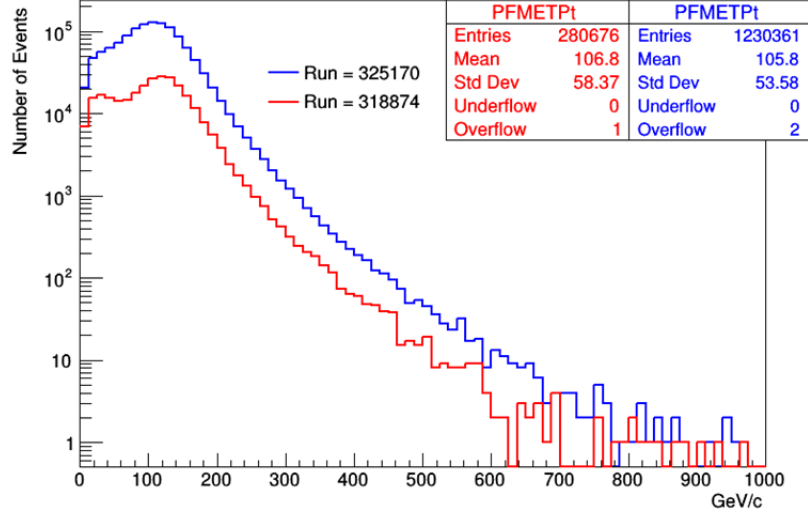
4.2.1. Parçacık Akışı Kayıp Dik Enerji Analizi

Bölüm 3.3'tede anlatıldığı gibi kayıp dik enerji momentum dengesizliğinden kaynaklıdır. Bu çalışmada HKAL performansının olmazsa olmazı

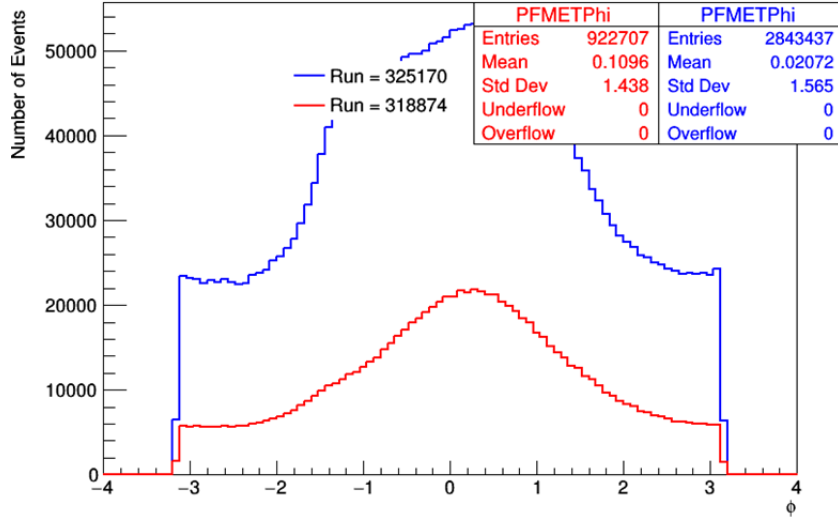
olan MET'e de bakıldı. HKAL, HE kalorimetresinin $-3 < \eta < -1.3$ ve $-1.57 < \phi < -0.87$ aralığındaki arızalı bölgesindeki jetlerin enerjisini ölçmemektedir. Analizin bu kısmında detektör için arıza öncesi ve sonrası run numaralarının kayıp dik enerjilerine bakılmıştır. Şekil 4.30 ve Şekil 4.31'de sırasıyla JET ve MET AOD veri setinde PF için kayıp dik enerji başına düşen olay sayısının grafikleri gösterilmektedir.



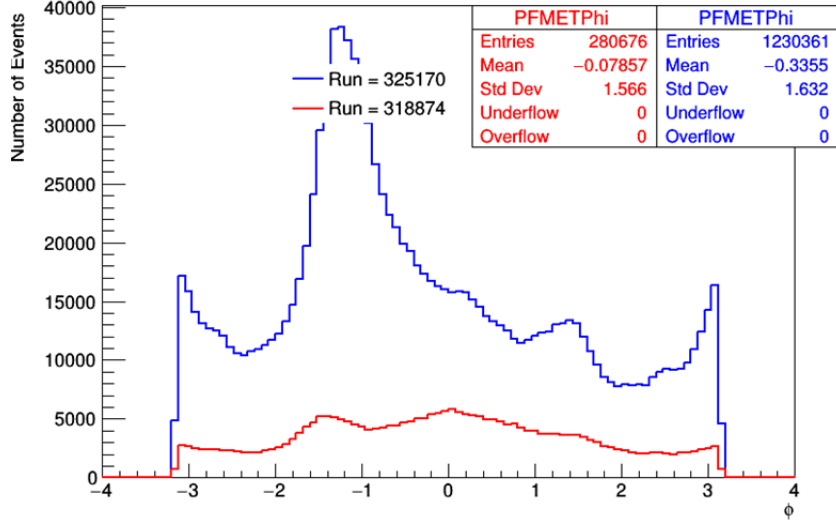
Şekil 4.30. 318874(kırmızı) ve 325170(mavi) numaralı runların JET veri seti için PF MET dağılımlarının karşılaştırılması.



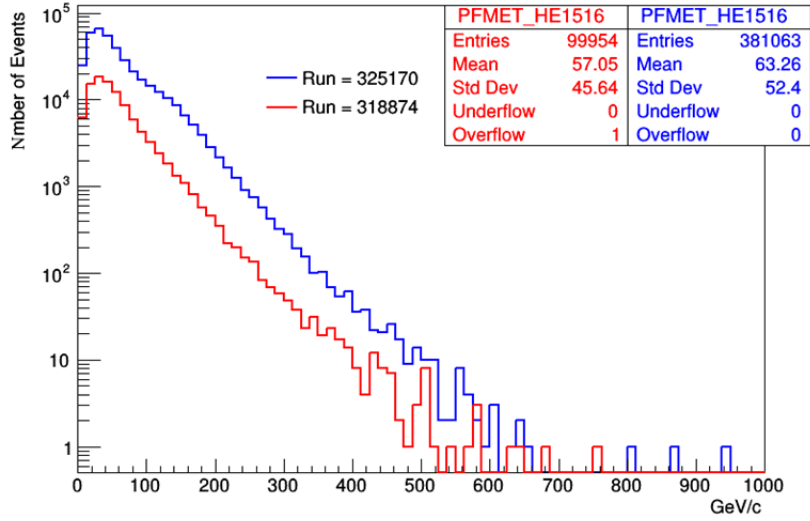
Şekil 4.31. 318874(kırmızı) ve 325170(mavi) numaralı runların MET AOD veri seti için PF MET dağılımlarının karşılaştırılması.



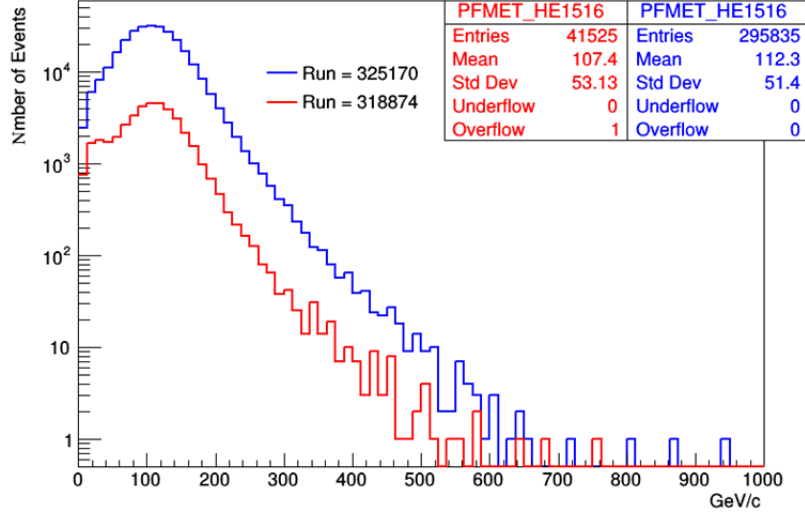
Şekil 4.32. 318874(kırmızı) ve 325170(mavi) numaralı runların JET AOD veri seti için PF MET ϕ dağılımlarının karşılaştırılması.



Şekil 4.33. 318874(kırmızı) ve 325170(mavi) numaralı runların MET AOD veri seti için PF MET ϕ dağılımlarının karşılaştırılması.



Şekil 4.34. Hasarlı bölge için 318874(kırmızı) ve 325170(mavi) numaralı runların JET (sol) veri seti için PF MET dağılımları.

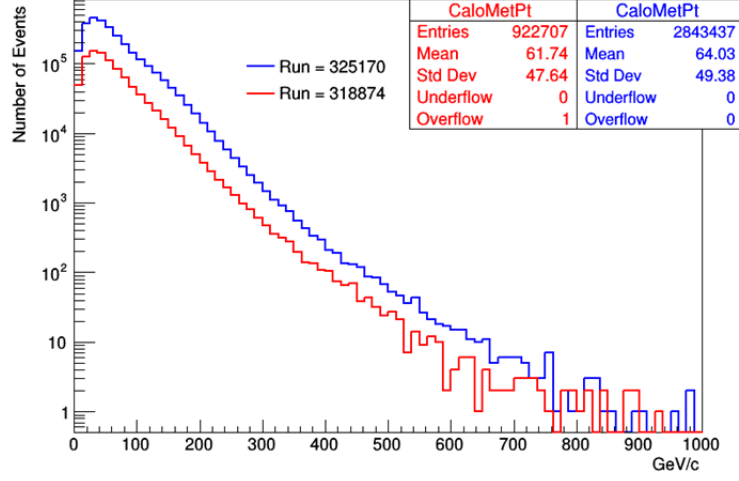


Şekil 4.35. Hasarlı bölge için 318874(kırmızı) ve 325170(mavi) numaralı runların MET AOD veri seti için PF MET dağılımları.

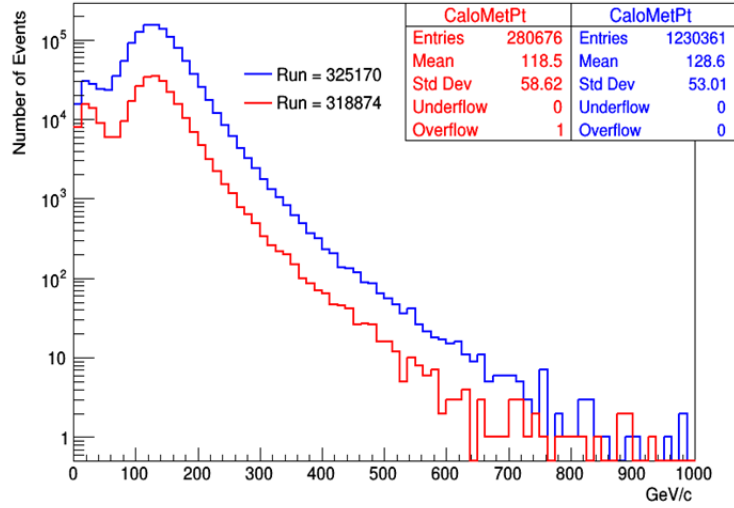
Şekil 4.32 ve Şekil 4.33’de sırasıyla JET AOD ve MET AOD veri setinde PF MET için ϕ eksenine düşen olay sayılarını göstermektedir. Şekil 4.34 ve Şekil 4.35’te de JET ve MET AOD veri setinde arızla bölge aralığı için kayıp dik enerji başına düşen olay sayısını göstermektedir. PF MET ϕ grafiğinde, JET AOD ve MET AOD veri setine baktığımızda $-1.57 < \phi < -0.87$ aralığına denk gelen kısımda olay sayısının fazla olduğu görülmektedir. Bunun nedeni yukarıda bahsedildiği gibi PF algoritmasının o bölgelerde fazla olay olduğunu kabul etmesinden kaynaklıdır.

4.2.1. Kalorimetre Kayıp Dik Enerji Analizi

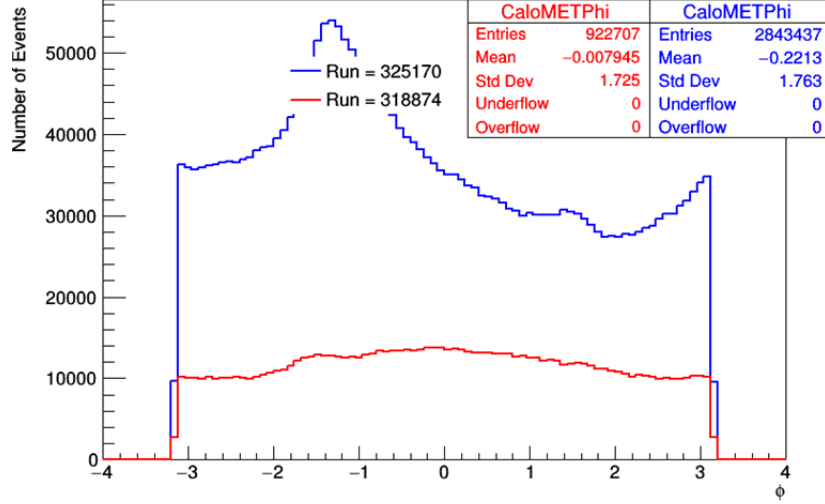
CMS’teki arıza, HKAL’ın alt detektörü olan HE’de meydana geldiği için kalorimetre kayıp dik enerjilerine de bakıldı. Kalorimetre algoritmasının bu bölgede sonuçlarını inceleyebilmek için PF MET için üretilen grafikler Kalo MET için de üretildi. Bu bulunan sonuçlar ile HKAL’ın performansı ile ilgili daha net sonuçlar elde edildi. Şekil 4.36 ve Şekil 4.37 JET ve MET AOD veri setinde Kalo MET dağılımını göstermektedir.



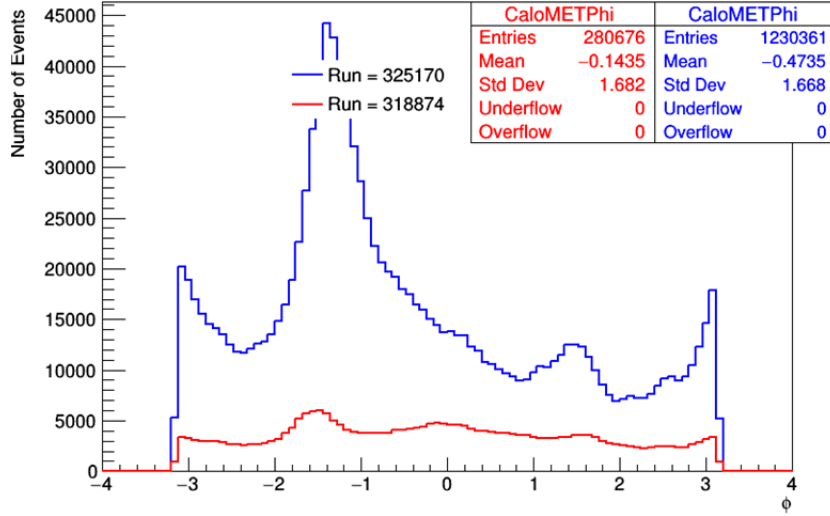
Şekil 4.36. 318874(kırmızı) ve 325170(mavi) numaralı runların JET AOD veri seti için KaloMET dağılımlarının karşılaştırılması.



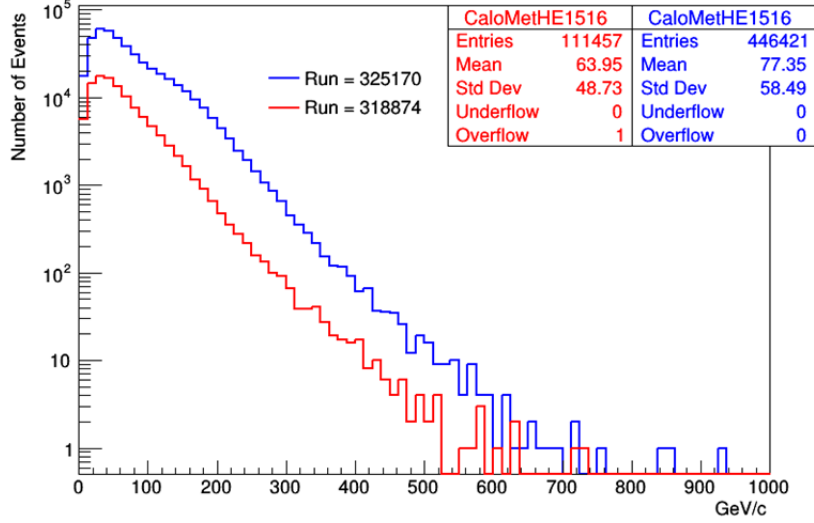
Şekil 4.37. 318874(kırmızı) ve 325170(mavi) numaralı runların MET AOD veri seti için KaloMET dağılımlarının karşılaştırılması.



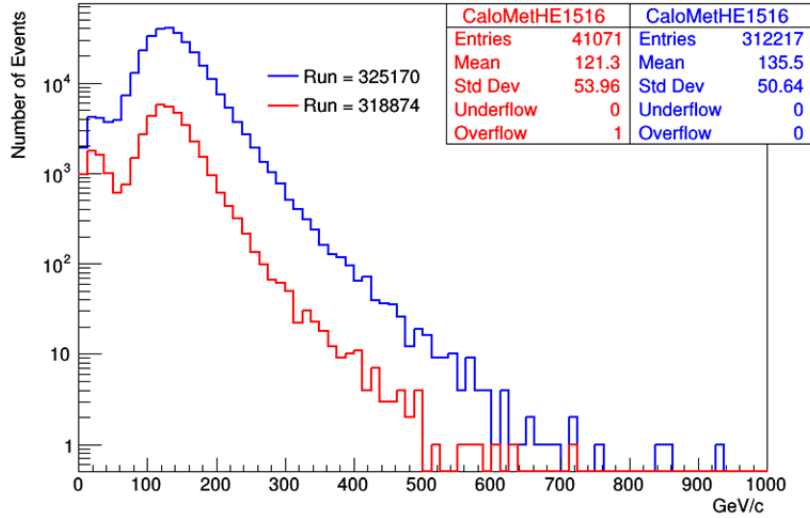
Şekil 4.38. 318874(kırmızı) ve 325170(mavi) numaralı runların JET AOD veri seti için KaloMET ϕ dağılımlarının karşılaştırılması.



Şekil 4.39. 318874(kırmızı) ve 325170(mavi) numaralı runların MET AOD veri seti için KaloMET ϕ dağılımlarının karşılaştırılması.



Şekil 4.40. Hasarlı bölge için 318874(kırmızı) ve 325170(mavi) numaralı runların JET AOD veri seti için Kalo MET dağılımları.



Şekil 4.41. Hasarlı bölge için 318874 (kırmızı) ve 325170 (mavi) numaralı runların MET AOD veri seti için Kalo MET dağılımları.

Şekil 4.38 ve Şekil 4.39’da JET AOD ve MET AOD veri setinde KaloMET ϕ dağılımları karşılaştırılmıştır. Bu histogramlara baktığımızda $-1.57 < \phi < -0.87$ aralığındaki bölgede olay sayısının fazla olduğu görülmektedir. Nedeni o bölgedeki

veri okunamadığı için burayı kayıp enerji olarak görmektedir. HE arıza öncesi ve sonrası için JET ve MET AOD veri setinde hasarlı bölgedeki kayıp dik enerji dağılımları Şekil 4.40 ve Şekil 4.41'de gösterilmektedir. Bu histogramlara bakıldığında arızadan kaynaklı bölgedeki farklılıklar görülmemektedir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada CMS HKAL detektörünün 2018 yılı çarpışma verileri kullanılarak rutin haftalık performans analizleri yapılmıştır. Analizler devam ederken bazı veri setlerinde beklenilmeyen sonuçlar gözlemlenmiştir. Bu beklenilmeyen sonuçların 30 Haziran 2018'de aşırı voltajdan kaynaklı olarak meydana gelen elektrik kesintisinden olduğu anlaşılmıştır. Arıza, CMS alt detektörlerinden HE'nin $-3 < \eta < -1.3$ ve $-1.57 < \phi < -0.87$ bölgelerinde bulunan 15. ve 16. kamalarına karşılık gelmektedir. Okuma ünitelerinin arızalanması nedeniyle bu bölgedeki veri okunamamıştır. Bu tezde arızalı bölgenin HKAL'ın performansını ve dolayısıyla fizik analizlerini nasıl etkilediğini tespit etmek amacıyla analizler yapıldı. PF Jet ϕ , PF Jet η , PF Jet PT, PF MET, PF MET ϕ , Kalo Jet PT, KaloJet ϕ , KaloJet η , KaloMET, KaloMET ϕ dağılımlarına bakıldı. Elde edilen sonuçlar ile farklı bir bakış için PF Jet η - ϕ ve KaloJet η - ϕ grafiklerine de bakıldı. Arızanın daha iyi anlaşılması için detektörün doluluk oranını gösteren iki boyutlu grafikler incelendi. Bir boyutlu MET ϕ grafiklerinde hem Parçacık Akışı için hem de Kalorimetre için farklılıklar gözlemlendi. Bu arızanın daha iyi anlaşılması için arıza öncesi ve sonrası çarpışma verileri kıyaslanmış oldu. Analiz için çok sayıda run numarası (veri) analiz edildi ve genellikle benzer sonuçlar alındı. Analizin güvenilir sonuçlar vermesi için olay sayısı (ışıklılığı büyük olan) fazla olan run numaraları seçildi.

Yapılan analizler sonucunda hasarlı bölgeden gelen jetler ve MET'lerde farklılıklar gözlemlendi. Bir boyutlu enerji grafiklerine baktığımızda çok büyük farklılıklar gözlemlenmemektedir. Bunun da sebebi söz konusu bölgenin detektörün çok küçük kısmını temsil etmesidir ve bulunduğu konumun detektörün çarpışma merkezinden uzak olmasıdır. PF için doluluk oranlarını gösteren grafiklere bakıldığında arızalı bölgede çok az olması beklenen jet sayısının beklenenden fazla olduğu görüldü. PF algoritması veriyi yapılandırırken izleyici

detektörden başlayıp müon detektörüne kadar tüm detektör verisini kullanmaktadır. Algoritma veriyi yapılandırırken HKAL'de olan olayların hepsini izleyici ve EKAL'ın devamı sanıp bütün olayı (gürültü vb. olaylar dahil) jet olarak tanımlanmaktadır. Bu da grafiklerde o bölgede çok fazla jet sayısı varmış gibi göstermektedir. Kalo jet grafiklerine baktığımızda, arızalı bölgedeki verinin sıfır veya sıfıra yakın olduğunu görmekteyiz. Bu da beklenen sonucu vermektedir. Bir boyutlu PF ve Kalo MET ϕ grafiklerinde de farklılıklar gözlemlendi. PF MET ϕ grafiğindeki farklılık yine PF algoritmasından kaynaklıdır. Arızalı bölgede çok jet varmış gibi gösterdiğinden, MET'in tanımından o bölgedeki MET'in de fazla olduğunu anlaşılmaktadır. Kalo MET ϕ 'da beklenildiği gibi arızalı bölgedeki veri okunmadığı için oradaki MET'i fazla göstermektedir. Bu grafikler bize kalorimetre algoritmasının doğru çalıştığını göstermektedir. Arızanın devam ettiği dönem boyunca alınan verilerde PF algoritması kaynaklı problem fizik analizlerini etkileyebileceğinden, analizlerde bu bölge analistler tarafından dışarılanmıştır. Bu saf dışı edilme kararı CERN'deki JET-MET gruplarının ortak kararıdır.

KAYNAKLAR

- ATLAS Collaboration, 2010. “The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider”, *JINST* 3 (2008) S08003, http://cds.cern.ch/record/1129811/files/jinst8_08_s08003.pdf
- CMS Collaboration 2006, “Detector Performance and Software”, CMS Physics, Technical Design Report, Volume 1, CERN- LHCC 2006-001,
- CMS Collaboration, 2009, “Performance and Operation of the CMS Electromagnetic Calorimeter”, CMS PAPER CFT-09-004, <https://arxiv.org/pdf/0910.3423.pdf>
- CMS Collaboration, 2010, “Jet Performance in pp Collisions at $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$ ”, CMS Physics Analysis Summary, CMS PAS JME-10-003, <https://cds.cern.ch/record/1279362/files/JME-10-003-pas.pdf>
- CMS Collaboration, 2010, “Jet Performance in pp Collisions at $\sqrt{s}=7 \text{ TeV}$ ”, CMS PAS JME-10-003, <http://cds.cern.ch/record/1279362/files/JME-10-003-pas.pdf>
- CMS Collaboration, 2010, “Technical Proposal For The Phase-I₁ Upgrade Of The Compact Muon Solenoid”, CERN-LHCC-2015-10, <https://cds.cern.ch/record/2020886/files/LHCC-P-008.pdf>
- CMS Collaboration, 2010, “Validation of Kalman Filter alignment algorithm with cosmic-ray data using a CMS silicon strip tracker endcap”, CMS-NOTE-2010-002, <http://cds.cern.ch/record/1256099/files/JINST5.P06007.pdf?version=1>
- CMS Collaboration, 2011, “Missing transverse energy performance of the CMS detector”, *JINST* 6 (2011) P09001, https://cds.cern.ch/record/1361632/files/1748-0221_6_09_P09001.pdf

CMS Collaboration, 2011., “Determination of Jet Energy Calibration and Transverse Momentum Resolution in CMS”, CMS-JME-10-011, <https://arxiv.org/pdf/1107.4277.pdf>

CMS Collaboration, 2013, “CMS Technical Design Report for the Level-1 Trigger Upgrade”, CMS-TDR-12, <http://cds.cern.ch/record/1556311/files/CMS-TDR-012.pdf>

CMS Collaboration, 2012, “Performance of CMS muon reconstruction in pp collision events at $\sqrt{s} = 7$ TeV”, JINST 7 P10002, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/7/10/P10002/pdf>

V. Khachatryan, 2016, “Dose rate effects in the radiation damage of the plastic scintillators of the CMS hadron endcap calorimeter”, INST 11 T10004, http://cds.cern.ch/record/2210752/files/10.1088_1748-0221_11_10_T10004.pdf

CMS Collaboration, 2010, “The New Silicon Strip Detectors for the CMS Tracker Upgrade”, CERN-THESIS-2010-093, <http://cds.cern.ch/record/1277920>

Grachov, O., 2010. “Commissioning of the CMS Zero Degree Calorimeter using LHC beam”, CMS-CR-2010-122 https://cds.cern.ch/record/1285574/files/CR2010_122.pdf

CMS HCAL Collaboration, “Design, Performance, and Calibration of CMS Hadron Endcap Calorimeters”, CMS NOTE-2008/010 http://inspirehep.net/record/785992/files/NOTE2008_010.pdf

HCAL-CMS Collaboration, 2010, “Commissioning of CMS zero degree calorimeter using LHC beam”, <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1008/1008.1157.pdf>

LHCb Collaboration, 2015., “Observation of J/ψ resonances consistent with pentaquark states in $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi K^- p$ decays”, CERN-PH-EP-2015-153 <https://journals.aps.org/prl/pdf/10.1103/PhysRevLett.115.072001>

LHCb Collaboration, 2003. “LHCb reoptimized detector design and performance : Technical Design Report”, CERN-LHCC-2003-030, <https://cds.cern.ch/record/630827/files/lhcc-2003-030.pdf>

Mans, J., 2012, “CMS Technical Design Report for the Phase 1 Upgrade of the Hadron Calorimeter”, CERN-LHCC-2012-015, <https://cds.cern.ch/record/1481837/files/CMS-TDR-010.pdf>

Strobbe, N., 2017, “The upgrade of the CMS hadron calorimeter with silicon photomultipliers FERMILAB-CONF-16-501-CMS-E, <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/12/01/C01080>

CMS Collaboration, 2011. “Determination of Jet Energy Calibration and Transverse Momentum Resolution in CMS”, JINST 6 (2011) P11002, http://cds.cern.ch/record/1369486/files/1748-0221_6_11_P11002.pdf

Woods, K., 2011. “Energy resolution on trigger jets in the ATLAS experiment at the Large Hadron”, http://www.physics.mcgill.ca/xhep/en/resources/thesis/2011_Woods_MSc_Atlas_Energy.pdf

<http://home.cern/about/experiments/cms>

<http://home.cern/about/experiments/alice>

<http://home.cern/about/experiments/atlas>

<http://home.cern/about/experiments/lhcb>

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

https://indico.cern.ch/event/743148/contributions/3070267/attachments/1685079/2709295/jetmet_2018_endcap_hem1516.pdf

<http://cds.cern.ch/record/1279362/files/JME-10-003-pas.pdf>

<http://lhcatome.web.cern.ch/about>

<https://cms.cern/detector>

<https://home.cern/about>

<https://home.cern/about/physics/standard-model>

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

<https://www.symmetrymagazine.org/standard-model/>
<http://aappsbulletin.org/myboard/read.php?Board=featurearticles&id=199>
<https://sciencedocbox.com/docs-images/75/72021148/images/35-2.jpg>
<http://newslines.linearcollider.org/wp-content/uploads/2011/05/CMS-solenoid-magnet.jpg>
<http://home.cern/topics/large-hadron-collider>
<http://aliceinfo.cern.ch/Public/Objects/Chapter2/DetectorComponents/alice2.jpg>
<http://cms.web.cern.ch/news/cms-detector-design>
https://wiki.physik.uzh.ch/cms/_media/latex:cms_coordinate_system.png?cache=
http://cms.web.cern.ch/sites/cms.web.cern.ch/files/styles/large/public/field/image/Sketch_PartonParticleCaloJet.png?itok=oNwUWhmK
<https://3c1703fe8d.site.internapcdn.net/newman/gfx/news/pires/2013/1-sdscsgordons.jpg>
<http://cds.cern.ch/record/922757/files/lhcc-2006-001.pdf>
<http://cds.cern.ch/record/942733/files/lhcc-2006-021.pdf>
<https://twiki.cern.ch/twiki/pub/CMSPublic/WorkBookCMSSWFramework/frameworkork.gif>
<https://arxiv.org/pdf/1503.07589>

ÖZGEÇMİŞ

05.06.1993 yılında Muş'ta doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Mersin'in Tarsus ilçesinde tamamladı. 2011 yılında Çukurova Üniversitesi Yabancı Diller Yüksekokuluna başladı. Burada İngilizce eğitimini tamamladıktan sonra Çukurova Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü'nde Lisans eğitimine başladı. 2016 yılında Fizik bölümünden mezun oldu. 2017 yılında Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde Fizik Anabilim Dalında tezli yüksek lisans programına başladı. 2019 yılında Pamukkale Üniversitesinde Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı ve hala devam etmektedir.