

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ümit SÖZBİLİR

**CMS ALGICININ İYİLEŞTİRİLMESİNDE KULLANILACAK
OLAN ÇOK TANECİKLİ KALORİMETRENİN
PERFORMANS TESTLERİ**

FİZİK ANABİLİM DALI

ADANA, 2019

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**CMS ALGICININ İYİLEŞTİRİLMESİNDE KULLANILACAK OLAN
ÇOK TANECİKLİ KALORİMETRENİN PERFORMANS TESTLERİ**

Ümit SÖZBİLİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FİZİK ANABİLİM DALI

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

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

.....
Prof. Dr. Aysel KAYIŞ TOPAKSU
ÜYE

.....
Doç. Dr. Kadri ÖZDEMİR
ÜYE

Bu tez Enstitümüz Fizik Anabilim Dalında hazırlanmıştır.
Kod No:

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

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 ALGICININ İYİLEŞTİRİLMESİNDE KULLANILACAK OLAN ÇOK
TANECİKLİ KALORİMETRENİN PERFORMANS TESTLERİ**

Ümit SÖZBİLİR

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

Danışman : Prof. Dr. İSA DUMANOĞLU

Yıl: 2019, Sayfa: 157

Jüri : Prof. Dr. İSA DUMANOĞLU

: Prof. Dr. AYSEL KAYIŞ TOPAKSU

: Doç. Dr. KADRİ ÖZDEMİR

BHÇ'nin dört büyük algıcından birisi CMS'dir. Düzenli olarak yapılan yükseltmelerden biri olan Evre-2'de HGAL (Çok Tanecikli Kalorimetre) adlı yeni bir alt algıç yapılması planlanmaktadır. Yapım öncesi bir ön örnek hazırlanmış ve farklı enerjilerdeki çeşitli parçacıklarla teste tabi tutulmuştur. Bu testler esnasında algıcın performansı incelenmiş ve var olan veya oluşabilecek hatalar araştırılmıştır. Bu tez çalışmasında, 2018 yılının Ağustos ve Ekim ayında yapılan demet testlerindeki veriler kullanılmış olup farklı kurulum düzenleri ve yapılandırmaları ile en iyi sonuçların elde edileceği düzenek de araştırılmıştır. Alınan verilerde minimum iyonize parçacık araştırmaları da yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: HGAL, MİP, SiFÇ, CMS, YI-BHÇ

ABSTRACT

MSc THESIS

PERFORMANCE TESTS OF HIGH GRANULARITY CALORIMETER TO BE USED FOR IMPROVEMENT OF CMS DETECTOR

Ümit SÖZBİLİR

ÇUKUROVA UNIVERSITY
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
DEPARTMENT OF PHYSICS

Supervisor : Prof. Dr. İSA DUMANOĞLU

Year: 2019, Pages: 157

Jury : Prof. Dr. İSA DUMANOĞLU

: Prof. Dr. AYSEL KAYIŞ TOPAKSU

: Assoc. Prof. Dr. KADRİ ÖZDEMİR

CMS is one of the four major detectors of LHC. In Phase-2, one of the regular upgrades, a new sub-detector called HGCAL (High Granularity Calorimeter) has been planned. A test setup was prepared and HGCAL tested with various particles with different energies. During these tests, the performance of the detector was examined and any errors that might exist or may arise in the future were investigated. In this thesis, the data from the beam tests which were performed in August and October 2018 were used and different installation setups and configurations were investigated for getting the best results. Minimum ionizing particles studies were also performed in the obtained data.

Key Words: HGCAL, MIP, SiPM, CMS, HL-LHC

GENİŞLETİLMİŞ ÖZET

Evrenin doğasını anlama konusunda parçacık fiziğinin bize sunduğu en iyi açıklama Standart Modeldir. Bu model maddenin parçacıklar ve bu bunlar arasındaki etkileşimlerden oluştuğunu açıklamaktadır. Fermiyon denilen parçacıklar grubu kuarklar ve leptonlar diye ikiye ayrılırken, etkileşimin olabilmesi için gerekli olan parçacıklara bozon denilmektedir. Tüm bu parçacıklar dünyanın farklı yerlerindeki hızlandırıcılar ile incelenmektedir. Bu hızlandırıcılardan birisi olan CERN, İsviçre-Fransa sınırında yer alıp Büyük Hadron Çarpıştırıcısı adlı hızlandırıcıyı içinde barındırmaktadır. Büyük Hadron Çarpıştırıcı 27 km'lik uzunluğuyla şu an dünyanın en büyük dairesel hızlandırıcı olma özelliğine sahiptir. Bu devasa çarpıştırıcı içinde CMS, ATLAS, LHCb ve ALICE adlı dört adet büyük deneyi ihtiva etmektedir. Bu deneylerden birisi olan CMS aynı isimli algıç ile genel amaçlı fizik araştırmaları yapmaktadır. Zaman içerisinde algıcın bazı parçaları yenilenmekte veya iyileştirilmektedir. Yüksek Işıklı-Büyük Hadron Çarpıştırıcısı döneminde yüksek ışıklılık seviyelerine çıkılacak bu da yüksek parçacık yoğunluğu ve ışıınımı meydana getirecektir. Mevcut uç kapak kalorimetreleri bu yüksek parçacık akısı ve ışıınımı karşılayamayacağından mütevellit bu amaçla Evre-2 yükseltmesinde HGCal (Çok Tanecikli Kalorimetre) adlı yeni bir alt algıç yapılması düşünülmektedir. Bu algıç hem elektromanyetik (CE-E) hem de hadronik (CE-H) bölmeleri için daha önce benzeri görüşmemiş enine ve boyuna okuma kesimlemeye sahip bir örnekleme kalorimetresidir. CE-E ve CE-H'nin büyük bir kesimi aktif algıç malzemesi olarak silikon kullanacak olup içerisindeki duyaçlar altıgen şeklindedir. Silikon duyaçlar $\approx 0,5-1 \text{ cm}^2$ 'lik hücrelere sahiptir. Düşük ışıma ortamlarında karo üzerinde SiFç okumasına sahip kırpışım laç karoları, yüksek ışıma bölgelerinde ise silikon duyaçlar kullanılacaktır.

2016 ve 2017'de ilk testleri gerçekleştirilen sistemin 2018'deki verileri bu çalışmada kullanılmıştır. Farklı enerjilerdeki elektron, müon ve pion parçacık hüzmeleriyle alınan veriler sayesinde algıcın performansı test edilmiştir.



TEŞEKKÜR

Tezimde anlayışlı tavrı ve bilgisiyle bana destek olan danışman hocam Prof. Dr. İsa DUMANOĞLU'na teşekkür ederim.

Çalışmalarım esnasında bildiklerini sürekli paylaşan ve araştırmamda bana büyük yol gösteren Ali Eren ŞİMŞEK'e özellikle teşekkür ederim. Sen olmasan bu çalışmayı böyle yapamazdım.

Lisanstan beri birbirimize destek olduğumuz Fuat BİLİCAN'a, çalışmalarımda yardımcı olan Serhan ANAGÜL'e, Zuhal Şeyma DEMİROĞLU'na, Doruk AĞYEL'e, uzakta olsalar da hiç eksikliklerini hissetmediğim dostlarım Samet LEZKİ ve sevgili eşi Merve İNCE LEZKİ'ye teşekkür ederim.

Araştırmalarımda bilgi ve yorumlarını eksik etmeyen Doç. Dr. Shuichi KUNORI'ye, Thorben QUAST'a ve Dr. Bora AKGÜN'e teşekkür ederim.

Son olarak desteklerinden dolayı aileme teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

SAYFA

ÖZ	I
ABSTRACT.....	II
GENİŞLETİLMİŞ ÖZET	III
TEŞEKKÜR.....	V
İÇİNDEKİLER	VI
ÇİZELGELER DİZİNİ	X
ŞEKİLLER DİZİNİ	XII
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	XX
1. GİRİŞ	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	3
2.1. Standart Model.....	8
2.1.1. Bozonlar ve Temel Etkileşimler	8
2.1.1.1. Kütle Çekim Kuvveti.....	8
2.1.1.2. Elektromanyetik Kuvvet.....	9
2.1.1.3. Zayıf Kuvvet.....	9
2.1.1.4. Güçlü Kuvvet	9
2.1.1.5. Higgs Bozonu	10
2.1.2. Fermiyonlar.....	10
2.1.2.1. Kuarklar.....	11
2.1.2.2. Leptonlar	15
2.1.3. Standart Model'in Başarıları	19
2.1.4. Standart Model'in Açıklayamadığı Durumlar.....	19
2.2. CERN ve Büyük Hadron Çarpıştırıcısı	21
2.2.1. ALICE	29
2.2.2. ATLAS.....	31
2.2.3. LHCb.....	34
2.2.4. LHCf	37

2.2.5. MoEDAL	38
2.2.6. TOTEM.....	40
2.2.7. CMS	42
2.2.7.1. Koordinat Sistemi.....	44
2.2.7.2. İzleyici	47
2.2.7.2.1. Benek Algıcı.....	49
2.2.7.2.2. Silikon Şerit İzleyici.....	51
2.2.7.3. Elektromanyetik Kalorimetre	52
2.2.7.4. Hadronik Kalorimetre.....	56
2.2.7.4.1. Hadronik Fıçı Kalorimetresi	57
2.2.7.4.2. Hadronik Uç Kapak Kalorimetresi.....	59
2.2.7.4.3. Hadronik Dış Kalorimetre.....	61
2.2.7.4.4. İleri Hadronik Kalorimetre.....	62
2.2.7.5. Müon Odaları	63
2.2.7.5.1. Sürüklenme Tüpü Odaları	65
2.2.7.5.2. Katot Şerit Odaları	68
2.2.7.5.3. Dirençli Plaka Odaları.....	70
2.2.7.6. Süper İletken Mıknatıs	72
2.2.7.7. Tetikleyici.....	74
2.2.7.7.1. Seviye-1 (S1) Tetikleyici	74
2.2.7.7.2. Yüksek Seviye Tetikleme	76
2.2.7.7.3. Veri İşleme Sistemi	77
2.2.7.8. Yükseltmeler	78
3. MATERYAL METOT.....	81
3.1. Genel Tasarımı.....	84
3.2. Silikon Duyaç.....	88
3.2.1. Duyaç Özellikleri ve Düzeni	88
3.3. Silikon Birim.....	92
3.4. Plastik Kırpışım Laç Ve Foto Algılama	96

3.4.1. Plastik Kırpışımılac Malzeme	96
3.4.2. SiFÇ Foto Algılayıcılar	96
3.5. Yeniden Yapılandırma	98
4. ARAŞTIRMA VE BULGULAR	99
4.1. Demet Testi	99
4.2. HGÇAL'ın Performans Sonuçları.....	114
4.2.1. HGÇAL'ın Haziran Ayındaki Demet Testinin Sonuçları	114
4.2.2. HGÇAL'ın Ekim Ayındaki Demet Testinin Sonuçları	123
4.2.3. MİP ÇALIŞMASI	140
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	143
KAYNAKLAR	145
ÖZGEÇMİŞ	157



ÇİZELGELER DİZİNİ

SAYFA

Çizelge 2.1. Enerji, Momentum ve Kütle Dönüşümleri	7
Çizelge 2.2. Temel kuvvetlerin özellikleri	10
Çizelge 2.3. BHÇ'nin teknik veriler.....	29
Çizelge 2.4. HB'deki kamaların kalınlıkları ve malzeme çeşitleri.....	59
Çizelge 3.1. HGCAL tasarım değişkenleri. Alan, kanal sayısı, birimler ve kısmi birimler için değerler her iki uç kapağın toplamıdır.Ağırlık ve plakaların sayısı ise tek bir uç kapağınkini ifade eder.....	86
Çizelge 3.2. Farklı duyaç türlerinin özellikleri.....	91
Çizelge 3.3. CE-H'de hem silikonlu hem de kırpışımış katmanlardaki duyaçların 3000 fb-1'lık bir bütünleşik parlaklık öncesi ve sonrasındaki bir MİP için hücre büyüklüğü ve S/G bilgileri.....	92
Çizelge 4.1. 2016 yılında FNAL ve CERN'de alınan veriler	101
Çizelge 4.2. CERN'de 2016 yılında yapılan demet testlerinden tek bir silikon duyaç için algılayıcı hücre sayıları ile türleri ve okuma kanalları....	105
Çizelge 4.3. 2018 Haziran ayında alınan verilerdeki parçacıkların türleri ve enerji değerleri.....	115
Çizelge 4.4. 2018 Ekim ayında alınan parçacıkların türleri ve enerji değerleri ...	123



Şekil 2.1.	Kuarkların renk özelliği (Harflerin üzerindeki çizgiler karşı renk yükü anlamı taşımaktadır.).....	13
Şekil 2.2.	Kuark, Lepton ve bozonların özellikleri	18
Şekil 2.3.	BHÇ'nin genel çizimi.....	22
Şekil 2.4.	BHÇ'nin iki kutuplu mıknatısı. Görseldeki bara kelimesi dağıtıcı çubuk anlamına gelmektedir.....	23
Şekil 2.5.	BHÇ'nin hızlandırıcı sisteminin basit bir gösterimi	26
Şekil 2.6.	BHÇ'nin sekiz kısımdan oluşan yapısı ve deneylerin konumları.....	28
Şekil 2.7.	ALICE algıcının tasarımı ve alt bölümleri.....	31
Şekil 2.8.	ATLAS algıcının tasarımı ve alt bölümleri.....	34
Şekil 2.9.	LHCb algıcının yandan görünümü.....	37
Şekil 2.10.	LHCf yapısı	38
Şekil 2.11.	MoEDAL algıcının gösterimi. Kısım 8'de LHCb deneyindeki VELO (Vertex Locator) alt algıcının etrafına yerleştirilmiştir	40
Şekil 2.12.	TOTEM deneyindeki algıçların dizilimi. T1 izleyicileri katot şerit odası, T2 izleyicileri GEM türündedir.....	41
Şekil 2.13.	CMS'deki pp çarpışmaları için toplam ışıklılık seviyesinin yıllara göre değişimi	43
Şekil 2.14.	CMS'deki PbPb çarpışmaları için toplam ışıklılık seviyeleri	43
Şekil 2.15.	CMS'de kullanılan koordinat sistemi	45
Şekil 2.16.	η ve θ arasındaki ilişki.....	46
Şekil 2.17.	CMS izleyici sisteminin r - z düzleminde enine kesit görünümü, her çizgi bir silikon algıç birimini temsil ediyor.	49
Şekil 2.18.	CMS'de bulunan benek algıcının temsili.....	50
Şekil 2.19.	Evre-1 Benek Yükseltme işlemi sırasında benek algıcı fiçisinde (solda) ve uç kapaklarında (sağda) yapılan yükseltmelerin şematik gösterimi	51

Şekil 2.20.	CMS EKAL için $PbWO_4$ kristalleri, (solda) APD ve fiçı (EB) kristalleri ve (sağda) VPT eklenmiş uç kapak (EE) kristali	54
Şekil 2.21.	EKAL tasarımı	55
Şekil 2.22.	HKAL tasarımı (çeyrek dilim)	57
Şekil 2.23.	HB kamasının eş ölçülü görüntüsü.....	58
Şekil 2.24.	HB'nin bitmiş hali.....	59
Şekil 2.25.	(Solda) Etkileşim noktasından bakıldığında HE tablalarının numaralandırması. x yönü BHÇ halkasının ortasını gösterir. (Sağda) İki bitişik kırpışım laç tablasının yapılandırması	60
Şekil 2.26.	CMS algıcındaki tüm HO tablalarının tasarımı	62
Şekil 2.27.	Kuvars liflerle donatılan HF tablalarının genel görünümü.....	63
Şekil 2.28.	CMS Kalorimetreleri.....	63
Şekil 2.29.	CMS müon sisteminin gösterimi. Farklı alt algıçlar farklı renklerle etiketlenmiştir. Çarpışma noktası sol alt köşedir.....	65
Şekil 2.30.	(Yukarıda) Tüplerin konumunu ve yönünü gösteren bir ST odasının şematik görünümü, (Aşağıda) Gaz hacmindeki elektrik alan çizgilerini gösteren bir ST hücresinin yerleşimi	67
Şekil 2.31.	Kurulum esnasındaki bir fiçı tekerleğinin yapısı. Kırmızı renkte olan boyunduruğun çelik plakaları arasındaki alüminyum ST odaları.....	68
Şekil 2.32.	(Solda) CMS'deki KŞO'nun şematik gösterimi, (Sağda) KŞO'ların çalışma prensibi.....	69
Şekil 2.33.	ME4/2 odasının kurulumu.....	70
Şekil 2.34.	(Yukarıda) CMS'deki çift aralıklı DPO'ların çalışma ilkesi, (Aşağıda) Kuruludan sonra DPO'nun görüntüsü. Kırmızı renkteki demir boyunduruktur.....	71
Şekil 2.35.	Bobinin vakum tankına yerleştirilme denemesi	73
Şekil 2.36.	CMS algıcındaki mıknatısın şiddetinin gösterimi	73
Şekil 2.37.	CMS'deki Seviye-1 Tetikleyicisinin çalışma düzeni.....	75

Şekil 2.38.	CMS Tetikleme Sistemi Veri İşleme Sistemi.....	77
Şekil 2.39.	BHÇ yükseltme takvimi	79
Şekil 3.1.	HGCAL'ın üst yarısının uzunlamasına kesiti.	83
Şekil 3.2.	FLUKA programıyla CMS uç kapağında r ve z koordinatları boyunca akı benzetimi. HGCAL'daki 1 MeV eşdeğeri nötronların akısı, 3000 fb ⁻¹ 'lik bir bütünleşik parlaklıktan sonra gösterilmektedir.....	84
Şekil 3.3.	HGCAL'ın uzunlamasına yapısı.....	87
Şekil 3.4.	Üç parçalı elmas yapısının gösterimi. Tetik hücreleri oluşturmak üzere toplanan duyaç hücreleri (Solda) 1,18 cm ² 'lik büyük duyaç hücreleri ve (Sağda) 0,52 cm ² 'lik küçük duyaç hücreleri.	90
Şekil 3.5.	(Solda) 1,18 cm ² 'lik büyük duyaç hücreleri ve (sağda) 0,52 cm ² 'lik küçük duyaç hücrelerin düzeniyle altıgen 8 inçlik silikon plakaların gösterimi.....	90
Şekil 3.6.	İstiflenmiş katmanlarıyla CE-E silikon birimi.	93
Şekil 3.7.	2016 demet testlerinde kullanılan 6 inç boyutundaki p-yal-n altıgen silikon duyaçtaki hücre türleri	94
Şekil 3.8.	432 kanallı duyaç için altıgen plaka ile BDK birimin gösterimi.....	95
Şekil 3.9.	Soldan sağa: a) BDK'den silikona kademeli deliklerden geçen tel bağlantıları; b) teller duyaçın arka düzlemde ön gerilimi sağlamak için Au-Kapton katmanına bağlanır; c) duyaç koruyucu halkalarına birimin köşesinden tel bağlantısı.	96
Şekil 4.1.	FNAL'da 32 GeV elektron ile yapılan demet testinin birimlerden geçerkenki gösterimi	99
Şekil 4.2.	FNAL'da 2016 kurulan demet testi sistemi. 16 adet katman bilgisayarın üst kısmında gözükmektedir. Elektron demeti ise sol tarafтан gelmektedir.....	100
Şekil 4.3.	CMS'de 2016 yılında 250 GeV mertebesindeki elektronlar ile yapılan demet testlerinin görüntüsü.....	102

Şekil 4.4.	2016 yılında CERN'deki demet testi çalışma düzeneği	102
Şekil 4.5.	2016 yılında CERN'deki demet testlerinde kullanılan birimlerin birleştirilme aşamaları. 1: Yapıştırma aparatındaki CuW taban plakası; 2: Araldite 2011 epoksinin eklenmesi; 3: polimid altın kaplama folyo; 4: polimid folyo taban plakasına ve kendi yapışkan katmanına yapıştırılmış halde; 5: silikon duvacın polimid folyoya yapıştırılması ve 6: tüm silikon yüzeye yayılan (BDK eklenmesi hariç) özel bir yapıştırıcının eklenmesi	103
Şekil 4.6.	(Solda) BDK'nın deliklerini gösteren birimin fotoğrafı. (Sağda) İki adet tel bağlı Skiroc2 ASIC'li Omega Grup tarafından üretilen okuma BDK'sı.	104
Şekil 4.7.	Birimden Zedboard'a doğru gerçekleşen veri toplama sistemi.	106
Şekil 4.8.	Asma dosya yapısının genel görünüşü. Sağ tarafta ise bazı birimlerin ve soğurucuların eklenmiş hali gözükmektedir.	107
Şekil 4.9.	7 birimden oluşan CE-H katmanlarından biri	108
Şekil 4.10.	CERN'de 2017 yılın Mayıs ayında kurulan demet testi düzeneği	108
Şekil 4.11.	CERN'de 2017 yılının Temmuz ayında kurulan demet testi düzeneği	109
Şekil 4.12.	2018 Haziran'ında yapılan demet testinin düzeneği. a) çift taraflı kaset, b) Sulu soğutma, c) 28 birimden oluşan 14 mini kaseti göstermektedir.	110
Şekil 4.13.	2018 Ekim'de denenen yapılandırmaların GEANT4 ile benzetimi. (üstte) Yapılandırma-1, (ortada) Yapılandırma-2, (altta) Yapılandırma-3. Üstteki şekilde parçacık demeti sağdan gelirken diğer ikisinde soldan gelmektedir.....	113
Şekil 4.14.	Haziran ayında alınan 10-150 GeV aralığındaki elektron demetinin 1-28 (EE) kanallarında oluşturduğu Enerji Doluluk Oranının birleştirilmiş gösterimi.	117

Şekil 4.15.	Haziran ayında alınan 10-150 GeV aralığındaki elektron demetinin 1-28 (EE) kanallarında oluşturduğu Yonga-Kanal grafiğinin birleştirilmiş gösterimi.....	118
Şekil 4.16.	Haziran ayında alınan 10-150 GeV aralığındaki elektron demetinin 1-28 (EE) kanallarında oluşturduğu Enerji Dağılımlarının birleştirilmiş gösterimi.	119
Şekil 4.17.	(Üstte) 150 GeV elektron demetinin Çarpışma Sayısı-Enerji grafiği, (Altta) parçacık yoğunluğuna sahip yaklaşık olarak seçilen bölgeler.....	120
Şekil 4.18.	3B düşün gösterimi. Sol üstte 3 boyutun genel, sağ üstte z-ekseninden, sol altta y-ekseninden, sağ altta ise x-ekseninden görünümü verilmiştir.	121
Şekil 4.19.	Haziran ayındaki 150 GeV elektron demeti verisiyle gerçekleştirilen 3B düş grafiğinin bir bölgesi. z-ekseni boyunca ilerleyen parçacıkların ileri kısımlarda oluşturduğu düş kanal/duyaç hatasının olduğunu göstermektedir.	122
Şekil 4.20.	Ekim ayında alınan 20-300 GeV aralığındaki elektron demetinin 1-28 (EE) kanallarında oluşturduğu Enerji Doluluk Oranının birleştirilmiş gösterimi.	125
Şekil 4.21.	Ekim ayında alınan 20-300 GeV aralığındaki elektron demetinin 1-28 (EE) kanallarında oluşturduğu Yonga-Kanal grafiğinin birleştirilmiş gösterimi.	126
Şekil 4.22.	Ekim ayında alınan 20-300 GeV aralığındaki elektron demetinin 1-28 (EE) kanallarında oluşturduğu Enerji Dağılımlarının birleştirilmiş gösterimi.	127
Şekil 4.23.	2018 Haziran'da FH yapısında sisteme eklenen 29-40 katmanlarının Enerji Doluluğunu gösteren tekli ve birleştirilmiş grafikleri.	129

Şekil 4.24.	Ekim ayında alınan 20-300 GeV aralığındaki elektron demetinin 29-40 (FH) kanallarında oluşturduğu Enerji Doluluk Oranının birleştirilmiş gösterimi.	130
Şekil 4.25.	Ekim ayında alınan 20-300 GeV aralığındaki elektron demetinin 29-40 (FH) kanallarında oluşturduğu Yonga-Kanal grafiklerinin birleştirilmiş gösterimi.	131
Şekil 4.26.	Ekim ayında alınan 20-300 GeV aralığındaki elektron demetinin 29-40 (FH) kanallarında oluşturduğu Enerji Dağılımının birleştirilmiş gösterimi.	132
Şekil 4.27.	Ekim ayında alınan 20-300 GeV aralığındaki pion demetinin 1-28 (EE) kanallarında oluşturduğu Enerji Doluluk Oranının birleştirilmiş gösterimi.	134
Şekil 4.28.	Ekim ayında alınan 20-300 GeV aralığındaki pion demetinin 1-28 (EE) kanallarında oluşturduğu Yonga-Kanal grafiğinin birleştirilmiş gösterimi.	135
Şekil 4.29.	Ekim ayında alınan 20-300 GeV aralığındaki pion demetinin 1-28 (EE) kanallarında oluşturduğu Enerji Dağılımlarının birleştirilmiş gösterimi.	136
Şekil 4.30.	Ekim ayında alınan 20-300 GeV aralığındaki pion demetinin 29-40 (FH) kanallarında oluşturduğu Enerji Doluluk Oranının birleştirilmiş gösterimi.	137
Şekil 4.31.	Ekim ayında alınan 20-300 GeV aralığındaki pion demetinin 29-40 (FH) kanallarında oluşturduğu Yonga-Kanal grafiklerinin birleştirilmiş gösterimi.	138
Şekil 4.32.	Ekim ayında alınan 20-300 GeV aralığındaki pion demetinin 29-40 (FH) kanallarında oluşturduğu Enerji Dağılımının birleştirilmiş gösterimi.	139
Şekil 4.33.	MİP çalışması için gürültü temizleme öncesi (koyu yerler), ve sonrası (kırmızı yerler) gösterimi	141

Şekil 4.34. 2018 MİP çalışması için 200 GeV'lik müon parçacık hüzmesinin dağılımının Landau-Gaussian Dağılımı ile kıyaslanması.....	141
Şekil 4.35. Monte Carlo benzetimi ile üretilen 200 GeV'lik müon hüzmesinin fit ile karşılaştırılması.....	142





SİMGELER VE KISALTMALAR

ADC	: Örneksele-Sayısal Dönüştürücü
AHCAL	: Örneksele Hadron Kalorimetresi
ALICE Q	: Büyük İyon Çarpıştırıcısı Deneyi
APD	: Silikon Çığ Foto Diyotlar
ASIC	: Uygulamaya Özel Tümüleşik Devre
ATLAS	: Simit Biçimli Büyük Hadron Çarpıştırıcısı Düzenegi
BDK	: Baskılı Devre Kartı
BEH	: Brout-Englert-Higgs
BH	: Arka HKAL
BHÇ	: Büyük Hadron Çarpıştırıcısı
BMT	: Bölgesel Müon Tetikleyicisi
BT	: Bölgesel Tetikleyici
BTÜ	: Basit Tetikleme Üretici
CALICE	: Doğrusal Çarpıştırıcı Deneyi İçin Kalorimetre
CE-E	: Elektromanyetik Kalorimetre
CE-H	: Hadronik Kalorimetre
CERN	: Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi
CMS	: Sıkı Müon Sarmalı
ÇKPT	: Çift-Kız Plaka Taşıyıcı
DONUT	: Direct Observation of the Nu Tau
DPO	: Dirençli Plaka Odası
EB	: Elektromanyetik Fıçı
EE	: Uç Kapak EKAL
EKAL	: Elektromanyetik Kalorimetre
EMCal	: Elektromanyetik Kalorimetre
FÇT	: Foto Çoğaltıcı Tüp
FH	: Ön HKAL

FNAL	: Fermi Ulusal Hızlandırıcı Laboratuvarı
FU	: Filtre Ünitesi
GEM	: Gaz Elektron Çoğaltıcı
GeV	: Milyar Elektron Volt
GTO	: Geciktirme Tel Odası
HB	: Hadronik Fıçı
HE	: Hadronik Uç-Kapak
HF	: İleri Hadronik
HGCROC	: HGCal için tasarlanmış BDK Okuması
HKAL	: Hadronik Kalorimetre
HMPID	: Yüksek Momentum Parçacık Tanımlama Algıcı
HO	: Hadronik Dış
HPD	: Hibrit Foto Diyotlar
ID	: İç Algıç
IT	: İç İzleyici
ITS	: İç İzleyici Sistem
KKT	: Küresel Kalorimetre Tetikleyicisi
KRD	: Kuantum Renk Dinamiği
KŞO	: Katot Şerit Odacıkları
KT	: Küresel Tetikleyici
LAr	: Sıvı Argon
LEIR	: Düşük Enerji İyon Halkası
LEP	: Büyük Elektron-Pozitron Çarpıştırıcısı
LHCb	: Büyük Hadron Güzellik Çarpıştırıcısı
LHCf	: Büyük Hadron Çarpıştırıcı İleri
LINAC 2	: Doğrusal Hızlandırıcı
M1-M5	: Müon Tayfölçerleri
MB	: Müon Fıçı
ME	: Müon Kapak

MeV	: Milyon Elektron Volt
MİP	: Minimum İyonize Parçacık
MoEDAL	: BHÇ'deki Tek Kutup ve Tuhaflıklar Deneyi Algıcı
MWPC	: Çok Telli Orantılı Sayaç
NTD	: Nükleer İz Algıcı
ÖOB	: Ön Uç Okuma Bağlantısı
ÖUSİ	: Ön Uç sistemleri
ÖUSÜ	: Ön Uç Sürücüler
PbWO ₄	: Kurşun Tungsten
PDO	: Plakalı Direnç Odacıkları
PHOS	: Foton Tayfölçeri
PID	: Parçacık Tanıma Algıcı
PS	: Proton Senkrotron
PSB	: Proton Senkrotron Yükseltici
RICH	: Çerenkov Halka Görüntüleme
RPS	: Roman Kapları
S/G	: Sinyal/Gürültü
S1	: Birinci Seviye Tetikleyici
S1K	: Seviye-1 Kabul
SCT	: Yarı İletken İzleyici
SiFÇ	: Silikon Foto Çoğaltıcı
SK	: Süper Katman
SLAC	: Stanford Doğrusal Hızlandırıcı Merkezi
SMP	: Büyük Kütleli Kararlı Parçacık
SPD	: Kırpışan Altlık Algıcı
SPS	: Süper Proton Senkrotron
ST	: Sürüklenme Tüpleri
T1-T3	: Dış İzleyici
TAN	: Yüksüz Hedef Emici

TAS	: Tetikleme Azaltma Sistemi
TDR	: Teknik Tasarım Raporu
TEC	: Uç Kapak İzleyici
TeV	: Trilyon Elektron Volt
TIB	: İç İzleyici Fıçı
TID	: İzleyici İç Disk
ToA	: Varış Zamanı
TOB	: Dış İzleyici Fıçı
TOF	: Uçuş Zamanı Algılayıcı
ToT	: Eşik Aşım Zamanı
TOTEM	: Toplam Elastik ve Kırınımlayıcı Tesir Kesit Ölçümü
TPC	: Zaman İzdüşüm Odası
TRD	: Geçiş Işınım Algıcı
TRT	: Geçiş Işınım İzleyici
TT	: Tetikleyici İzleyicisi
TZK:	:Tetikleyici Zamanlama ve Kontrol
VELO	: Köşe Algıcı
VES	: Veri Edinme Sistemi
VPT	: Vakum Foto Triyotları
WLS	: Dalga Boyu Kaydırıcı
YI-BHÇ	: Yüksek Işıklı Büyük Hadron Çarpıştırıcısı
YST	: Yüksek Seviye Tetikleyici
YYV	: Yeniden Yapılandırılmış Vuruş
e^-	: Elektron
μ^-	: Müon
τ^-	: Tau
ν_e	: Elektron Nötrinosu
ν_μ	: Müon Nötrinosu
ν_τ	: Tau Nötrinosu

φ	: Phi (Fi diye okunur)
η	: Sanal hızlılık
λ_1	: Nükleer Etkileşme Uzunluğu
X_0	: Radyasyon Uzunluğu





1. GİRİŞ

Yüksek enerji fiziğinde maddeyi oluşturan parçacıklar ve bunlar arasındaki etkileşimi açıklayan Standart Modeldir. Parçacıklar lepton ve kuarklar olarak ikiye ayrılırken, etkileşimin olmasını sağlayan ara parçacıklar bozon olarak adlandırılır. Yüksek enerji fiziği ile ilgili çalışmalar çeşitli laboratuvarlarda yapılmaktadır. Bunların en büyüğü olan CERN, İsviçre-Fransa sınırında bulunur. Yerin ortalama 100 metre altında 27 km'lik çevresiyle 14 TeV'e kadar parçacıkları çarpıştırmaktadır. Burada ATLAS, ALICE, CMS, LHCb adlı dört büyük deney yürütülmektedir. CMS deneyi aynı isimde bir algıya sahiptir. Soğansı yapıda olan algıç içten dışa doğru sırasıyla izleyici, elektromanyetik kalorimetre, hadronik kalorimetre ve müon odalarından oluşmaktadır. Algıcın performansını arttırmak ve zaman içerisinde oluşan sorunları çözmek adına düzenli aralıklarla iyileştirmeler yapılmaktadır. Bunlardan birisi olan Evre-2'de HGICAL adlı bir alt algıç yapılması planlanmaktadır.

Bu tez çalışmasında önceki çalışmalar kısmında kuramsal parçacık fiziği bilgilerinden bahsedilmiştir, ardından CMS ve burada yürütülen deneyler anlatılmıştır. Gereç Yöntem kısmında, HGICAL alt algıcısının teknik bilgileri, Araştırma ve Bulgular bölümünde ise demet testleri sonucu elde edilen HGICAL'ın performans testleri sonuçları yer almaktadır. Son kısımda da elde edilen sonuçlar bulunmaktadır.



2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

İnsanoğlu avcı-toplayıcı atalarından sonra yerleşik hayata geçince doğayı gözlemlene imkânı bulmuştur. Maddeyi anlamak doğayı anlamak için en önemli şeydir. Maddenin temeli ile ilgili ilk düşünceler Ege’de Yunanlı filozoflar tarafından ortaya atılmıştır.

Evrende her şeyin ana maddesi olarak görülen *arkhe* fikri ilk çağdaki doğa filozofları tarafından ortaya atıldı. Bu fikri yaratan Thales (MÖ 624-MÖ 546) her şeyin temelini su olduğunu söyledi. Ardından gelen öğrencisi Miletli Anaksimandros (MÖ 610-MÖ 546) ise *arkhe* fikrine Apeiron¹ ile açıklama getirdi. Apeiron fikrini savunan Anaksimandros her şeyin bir zıttı olduğunu düşünüyordu. Daha sonra sahneye Anaksimenes çıktı ve Thales’i örnek alıp modelini biraz değiştirdi ve her şeyin temelini ‘hava’ olduğunu söyledi. İyonya okulundan bu üç filozoftan sadece Anaksimandros *arkhe* için soyut bir kavram üretmiştir. Daha sonra Herakleitos (MÖ 535-MÖ 475) *arkhe* kavramını ele alıp Logos² olarak buna ‘ateş’ açıklamasını getirdi. Daha sonrada Heisenberg bu fikri tekrar gündeme taşımış ve ateşi enerjiye benzetmiş. “Ateş sözcüğü yerine enerji sözcüğünü kullanırsak Herakleitos’un anlatımı, bizim bugünkü görüşümüze kelimesi kelimesine uyar gibi gözükmetedir. Enerji gerçekten de kendisinden tüm temel taneciklerin, tüm atomların ve bundan böyle tüm şeylerin oluştuğu maddedir ve enerji aynı zamanda, hareketi, değişmeyi yaratan kuvvete sahiptir (Heisenberg, çev.2000)”. Bu üç temel *arkhe* fikrinden ilham alan Empedokles (MÖ 490-MÖ 430) doğayı oluşturan dört aday öne sürdü: toprak, su, ateş ve hava. Bunların arasında bir kuvvet/etkileşim olduğunu da önerdi: sevgi ile çatışma. Bir yüzyıl sonra tarih sahnesine çıkan Abderalı Demokritos (MÖ 460-MÖ 370) ise yüzyıllar

¹ Apeiron kelimesini etimolojik olarak incelersek birinci anlamda sınırsızlıktır. Kelimenin kökü *peras*, sınır demektir. Kelimenin başında bulunan *a* ise Yunancada olumsuzluk ekidir.

² Yunancada us ile kavrama anlamında olup etimolojik olarak incelendiğinde kavrama ve seçme anlamına gelen *leg* kelimesinden *legein* olarak türemiştir. Logos ayrıca duyguyla kavrama anlamındaki *pathos* sözcüğü karşılığında kullanılır.

boyu egemen olacak fikri sundu ve maddenin bir noktadan sonra daha fazla bölünemeyeceğini söyledi. Bölünemeyen bu en küçük yapıya ‘atomos’ yani ‘bölünemeyen’ dedi. Bu dâhiyane fikri ortaya atan Demokritos fikrini sınaama girişiminde bulunmadı. Geçen zaman içinde doğa felsefesi bölünüp fizik ve kimya gibi dallara ayrıldı. Bunlar maddenin temeli ile ilgili doğrudan veya dolaylı olarak çeşitli deneyler yaptılar ve gelişen teknoloji ile öngörülerindeki doğruluk artmaya başladı.

Atomlar ile ilgili ilk kuram John Dalton (1766-1844) tarafından ortaya atıldı. Dalton modeline göre atomlar içi dolu kürelerdi ve aynı boydaki atomlar birleşince elementleri, farklı atomlar bir araya gelerek molekülleri oluşturuyordu.

1897 yılında Cambridge’de Cavendish Laboratuvarında katot ışın tüpü ile çalışan Joseph John Thomson’dan (1856-1940) farklı bir açıklama geldi. Atomun içinde negatif yüklü başka bir parçacığın olduğunu keşfeden Thomson bu parçacığa zerre³ ismini taktı lakin 1891 yılında İrlandalı fizikçi George Johnstone Stoney’in önerisiyle ismi elektron⁴ olarak değiştirildi. Thomson’un ardından 1910 yılında Thomson’un öğrencisi olan Rutherford altın plaka deneyi ile yeni parçacık buldu ve buna çekirdek⁵ ismini verdi. Rutherford deneyinden elde ettiği bilgileri çoğalttı ve çekirdeğin atomdan küçük olup elektronların ise bunun etrafında dolandığını söyledi. Takip eden yıllarda Rutherford’un öğrencisi olan James Chadwick nötronu⁶ keşfetti (1931). Fizik dünyasındaki genel kanı artık maddenin atomlardan oluştuğu, atomun içinde çekirdek (proton ve nötron) ile elektronun olduğu yönündeydi. O dönemdeki imkânlarla elde edilen bu bilgiler teknolojinin gelişmesi ile daha da detaylandı ve karmaşıklaştı.

³ (İng.) Corpuscles.

⁴ Etimolojik olarak bakarsak: *electr(ic)* + *(i)on*, daha yakından bakacak olursak aslında Antik Yunandaki kehribar (*amber*) kelimesinden türetilmiştir. Bunun nedeni kehribarın kuru bir bezle ovalandığında hafif nesneleri çekebilmesidir.

⁵ *Nucleus*: Latince *nux* kelimesinden türeyip “minik fındık” anlamındadır.

⁶ İngilizcede “*neutral* + *-on*” ile ilişkili olup buradaki “*neutral*” kelimesi ise Latince *neutralis* kelimesinden türeyip açılımı *ne* (“*not*”) + *uter* (“*either*”) şeklindedir.

1931 yılından sonra birkaç önemli keşif daha oldu: 1928 yılında Paul Dirac tarafından karşı-parçacık varsayımı öne sürülmüştü. Bunlardan biri olan karşı-elektron yani pozitron, Carl D. Anderson tarafından sis odaları deneyiyle 1932 yılında keşfedildi. 1937 yılında Seth Neddermeyer, Carl D. Anderson, J. C. Street ve E. C. Stevenson müon parçacığını keşfetti ve bu süreçte birkaç benzeri parçacık daha keşfedildi. 1947 yılında Pion ve Kaon parçacıkları, 1955 yılında karşı-proton keşfedildi. 1930 yılında Wolfgang Pauli tarafından fikri ortaya atılan nötrino, 1956 da ilk kez California Institute of Technology'de gözlemlendi.

Tüm bu keşifler atom altı parçacıklar hakkında sahip olunan bilginin dağınıklığını arttırıyordu. Günümüzde hala büyük oranda kabul gören Standart Model Kuramı bu parçacıkları sınıflandırıp aralarındaki etkileşimleri belirleyen bir modeldir.

Bu kurama geçmeden önce bilinmesi gereken bazı özelliklerin tanımını yapmalıyız. Parçacıkların belli başlı kuantum özellikleri vardır. Bunlar parçacığın kimliğini oluştururlar. Bunlardan birisi parçacığın elektrik yüküdür. Bildiğimiz üzere doğada artı ve eksi yükler mevcuttur. Bu yükler sayesinde parçacıklar elektromanyetik etkileşime maruz kalır. Elektronu binaen gösterimi "e" şeklindedir.

Bir diğer kuantum özelliği ise dönüdür⁷. Klasik mekanikte cismin kendi eksenini etrafında dönmesinin momentumudur. Dönüşten kaynaklı olarak eğer cisim yüklü ise mıknatıs özelliği gösterir. Fakat bu durum parçacıkların noktasal olarak varsayıldığı kuantum fiziğinde daha başkadır. Buna göre aslında kütle, yarıçap ve hızın çarpımına eşit olan açısal momentum dönünün bir gösterim şeklidir. Ölçülebilir bir nicelik olan açısal momentum korunumludur. Tam sayı ya da yarımlı değerler(0, 1/2, 1, 3/2, 2) alabilir.

Bir diğer önemli nokta kütle gösterimidir. Birçok parçacık hızlandırıcısında parçacıklar elektronun yüküyle hızlandırılır. Bunun için genelde elektron-pozitron

⁷ (İng.) Spin.

ya da proton ile karşı-proton kullanılır. Bir elektron, belli bir voltluk potansiyel fark ile hızlanırsa, o zaman enerji kazanımı şu şekilde verilir:

$$\Delta E = qV \quad (2.1)$$

Bu aynı zamanda elektronun 1 eV enerji kazanmış olması anlamına gelir. Bir elektron-volt (eV), bir elektronun 1 voltluk potansiyel farktan hareket ettiğinde elektron tarafından elde edilen kinetik enerji miktarıdır. Joule ve bir elektron-volt arasında aşağıdaki gibi bir ilişki vardır:

$$1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J} \quad (2.2)$$

Hızlandırıcılar yüklü parçacıklar ve büyük voltajlarla çalışır. Örnek olarak 100 MeV'lik bir ışın enerjisine sahip bir hızlandırıcı, tek birim yüklü parçacıkları alıp bunları 1 MV'lik (1000000 volt) potansiyel fark ile hızlandırır. Bu durumda parçacıkların yeni enerjileri $1,602 \times 10^{-12} \text{ J}$ olmuştur artık ama bunu yazmak yerine 10 MeV yazmak çok daha kolaydır.

Enerji ve kütle arasındaki ilişki de bir diğer önemli husustur. Einstein'ın kütle-enerji denkleminde kütle-yalnız bıraktığımızda şu sonucu buluruz:

$$m = \frac{E}{c^2} \quad (2.3)$$

Normal fizik birimlerinde 1 kg'lık kütle enerjiye dönüştürmek için $9 \times 10^{16} \text{ kg}$ 'a böleriz ve buradan Joule biriminde değer elde ederiz. Parçacık fiziğinde enerjiyi eV olarak alırız ve $\frac{eV}{c^2}$ ile basitçe kütleye dönüştürürüz. Mesela bir elektron $0,51 \text{ MeV}/c^2$ 'lik durağan kütleyle sahiptir ve eğer bu kütle yok edilirse $0,51 \text{ MeV}$ eşdeğerinde enerji verir. Daha düzgün bir şekilde ifade etmek için bunlar

arasında dönüşüm yapılır. Böylece elektronun serbest kütlesi aşağıdaki şekilde yazılır:

$$M_e = 0,51 \times \frac{1,6 \times 10^{-13}}{9 \times 10^{16}} \text{ kg} \quad (2.4)$$

Bir başka önemli birim momentumdur. Denklem 2.2'yi ışık hızına bölersek momentum değerini buluruz.

$$1 \frac{eV}{c} = 5,34 \times 10^{-28} \text{ kg} \frac{m}{s} \quad (2.5)$$

Bunu bir kez daha ışık hızına bölersek kütleye dönüştürmüş oluruz:

$$1 \frac{eV}{c^2} = 1,79 \times 10^{-36} \text{ kg} \quad (2.6)$$

Buna karşın birçok yerde kütleli ifade ederken c^2 ifadesi açıkça kullanılmaz. Aslında sürekli olarak c^2 vardır lakin kısaltma açısından söylenmez. Çizelge 2.1'de enerji, momentum ve kütle arasındaki dönüşüm gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. Enerji, Momentum ve Kütle Dönüşümleri

Enerji	Momentum	Kütle
$1 \text{ eV} = 1,609 \times 10^{-19} \text{ J}$	$1 \frac{eV}{c} = 5,36 \times 10^{-28} \text{ kg} \frac{m}{s}$	$1 \frac{eV}{c^2} = 1,79 \times 10^{-36} \text{ kg}$
$1 \text{ keV} = 1,609 \times 10^{-16} \text{ J}$	$1 \frac{keV}{c} = 5,36 \times 10^{-25} \text{ kg} \frac{m}{s}$	$1 \frac{keV}{c^2} = 1,79 \times 10^{-33} \text{ kg}$
$1 \text{ MeV} = 1,609 \times 10^{-13} \text{ J}$	$1 \frac{MeV}{c} = 5,36 \times 10^{-22} \text{ kg} \frac{m}{s}$	$1 \frac{MeV}{c^2} = 1,79 \times 10^{-30} \text{ kg}$
$1 \text{ GeV} = 1,609 \times 10^{-10} \text{ J}$	$1 \frac{GeV}{c} = 5,36 \times 10^{-19} \text{ kg} \frac{m}{s}$	$1 \frac{GeV}{c^2} = 1,79 \times 10^{-27} \text{ kg}$
$1 \text{ TeV} = 1,609 \times 10^{-7} \text{ J}$	$1 \frac{TeV}{c} = 5,36 \times 10^{-16} \text{ kg} \frac{m}{s}$	$1 \frac{TeV}{c^2} = 1,79 \times 10^{-24} \text{ kg}$

2.1. Standart Model

Standart model temel etkileşimler ve temel parçacıklar olarak iki kısma ayrılır. Bunları sırayla inceleyecek olursak etkileşimler dediğimiz şey aslında kuvvetlerdir.

2.1.1. Bozonlar ve Temel Etkileşimler

Doğada var olduğu söylenen dört adet kuvvet vardır: kütle çekim kuvveti⁸, elektromanyetik kuvvet, güçlü kuvvet ve zayıf kuvvet. Bu kuvvetlerin etki edebilmesi için yardımcı ara parçacıklara ihtiyaçları vardır. Söz konusu parçacıklara bozon diyoruz. Bu parçacıklar Bose-Einstein Dağılımına uymalarına mukabil Pauli Dışarlama İlkesine uymazlar. Dönü değerleri ise tam sayı şeklindedir (0, 1, 2 gibi).

2.1.1.1. Kütle Çekim Kuvveti

İlk olarak 4.yy civarında Aristoteles tarafından konu edilen kütle çekiminin ilk çalışmaları Galileo Galilei tarafından 16.yy sonu 17.yy başlarında yapıldı. Aynı yüzyıl içerisinde Isaac Newton, *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*⁹ adlı yapıtında bu kuvvet ile ilgili matematiksel gösterimleri ve tanımlamaları yaptı. Kuramın eksik kalan kısımlarını ise 1915 yılında Albert Einstein, *Die Feldgleichungen der Gravitation*¹⁰ adlı çalışmasıyla tamamladı. Büyük Patlama Kuramına göre evrende oluşan ilk kuvvet olan kütle çekim kuvvetinin etki alanı dediğimiz erimi sonsuzdur. Büyük nesneler arasında daha çok etkili olur. Özellikle astronomik boyutlarda etkili olan tek kuvvettir. Diğer kuvvetlerle kıyaslandığında atom altı dünyasında etkisi yok denecek kadar azdır. Bu kuvvetin ara parçacığı graviton olup bu parçacık henüz gözlemlenmemiştir. Kuramsal olarak bir kütleye

⁸ Standart model kuramı henüz kütle çekim kuvvetini açıklayamamaktadır.

⁹ Doğa Felsefesinin Matematiksel İlkeleri

¹⁰ Genel Görelilik

sahip olmayıp dönü değeri 2'dir. Graviton skaler bozondur¹¹. Bozonların etkileşim mesafelerine göre kütleleri vardır ve ters orantılıdır. Yani kısa mesafede geçerli ise yüksek kütleli, sonsuz veya uzun erime sahipse kütsüz veya düşük kütlelidir.

2.1.1.2. Elektromanyetik Kuvvet

Atomu bir arada tutan kuvvettir. Elektrik yüküne sahip parçacıklar arasında geçerli olup ara parçacığı fotondur. Foton Yunanca $\phi\omega\varsigma$ (fos diye okunur) kelimesinden türemiş olup ışık anlamına gelir, ilk olarak 1926 yılında G. N. Lewis tarafından kullanılmıştır (<https://arxiv.org/abs/1401.0293>). Kütle çekimi gibi erimi sonsuzdur. Ters yükler kuralına göre çalışır. Yani ters yükler (pozitif-negatif) var ise bu kuvvet çekici, aynı yükler (pozitif-pozitif, negatif-negatif) var ise itici özellik gösterir. Foton herhangi bir kütleyle sahip olmayıp dönü değeri 1'dir.

2.1.1.3. Zayıf Kuvvet

Beta bozunumunda görülür. Taşıyıcı parçacıkları $W^\pm$ ve Z^0 'dır. İsimlerin temelinde $W^\pm$ zayıf bir kuvvet olmasından dolayı *weak* kelimesi ve Z^0 ise yükü olmamasından kaynaklı olarak *zero* kelimesi ile ilişkilendirilmiştir. $W^\pm$ 'nin kütlesi 80 GeV, Z^0 'ın kütlesi ise 91 GeV mertebesinde olup dönüleri 1'dir. 1968 yılında Steven Weinberg, Shaldon Glashow ve Abdus Salam tarafından kuramsal olarak öngörülmüş olup keşfi 1983 yılında CERN'de UA1 ve UA2 deneylerinde yapıldı. Bu bozonlar ara vektör bozonu olarak adlandırılır.

2.1.1.4. Güçlü Kuvvet

Çekirdeği bir arada tutan kuvvettir. Ara parçacığı gluon¹² olup 8 adet çeşidi mevcuttur. 1962 yılında Murray Gell-Mann tarafından ortaya atılan bu parçacık 1978 yılında DESY'de keşfedilmiştir. 8 adet gluon olmasına karşın genelde tekil

¹¹ Dönüsü 1 olan bozonlara vektör bozonlar, dönüsü 0 olanlara ise skaler bozonlar denir.

¹² İngilizcede *glue* kelimesinden gelip aslında tutkal manasındadır. Çekim kuvvetinin çok fazla olmasından dolayı bu isim verilmiştir.

olarak söylenir. Bunun sebebi bu gluonların renk dinamiğidir. Daha iyi anlaşılması için gluonların etki ettiği temel parçacıklara yani kuarklara bakalım. Kuarkların üç farklı renk yükü vardır. Benzer şekilde karşı-kuarkların da üç adet renk yükü vardır ve bunlar karşı-renk yüküdür. Gluonlar ise içerisinde hem normal renk yükü hem de karşı-renk yükünü barındırır.

2.1.1.5. Higgs Bozonu

Brout-Englert-Higgs-Hagen-Guralnik-Kibble ya da kısa olarak BEH (Brout-Englert-Higgs) mekanizmasının çözüm parçacığı olarak ortaya atılmıştır. Görüldüğü üzere bozonların arasında kütleli ve kütesiz parçacıklar bulunmaktadır. Bu durum Higgs bozonu ile açıklanır. Higgs bozonu da diğer bozonlar gibi bir alan yaratır. W-Z bozonları ve fermiyonlar uzaydaki hareketleri esnasında bu alana girip etkileşirse kütle kazanırlar. Foton ve gluonların kütesiz olmalarının nedeni ise alana girmelerine rağmen etkileşmemeleridir. Higgs bozonu da kütleli bir parçacıktır. 2012'de CERN'de hem ATLAS hem de CMS deneylerinde eş zamanlı olarak keşfedilmiş olup kütlesi 125 MeV mertebesinde ve dönüş değeri 0'dır. Higgs parçacığı da kendi alanıyla etkileşip bu kütleyi kazanır.

Çizelge 2.2. Temel kuvvetlerin özellikleri

Kuvvet	Şiddet	Erim	Ara Parçacık
Kütle Çekimi	10^{-38}	Sonsuz	Graviton
Elektromanyetik	10^{-2}	Sonsuz	Foton
Zayıf	10^{-5}	10^{-18} m	$W^{\pm}, Z^0$
Güçlü	1	10^{-15} m	Gluon

2.1.2. Fermiyonlar

Kuvvetler ve bunlarla ilgili bozonlar hariç standart modelde bir de fermiyonlar dediğimiz bir grup vardır. Fermiyon ismi Fermi-Dirac istatistiğinden gelir. Bu istatistiğe uyan parçacıklara fermiyon denilir. Ayrıca bu parçacıklar Pauli

Dışarlama İlkesine uyarlar. Dönü değerleri ise bir tam sayının yarısı şeklindedir ($\frac{1}{2}$, $1\frac{1}{2}$, $2\frac{1}{2}$ şeklinde). Fermiyonlar kendi içinde iki bölüme ayrılır: kuarklar ve leptonlar. Bu iki grup bir araya gelerek evrende görünür maddeyi oluştururlar.

2.1.2.1. Kuarklar

Evrenimizin oluşmasından 10^{-12} saniye sonra ilk kuarkların oluşmasına karşın varlıklarının bilinmesi için 13,7 milyar yıl geçmesi gerekti. 1964 yılına gelindiğinde Murray Gell-Mann ve George Zweig birbirlerinden bağımsız olarak bir parçacık yapısı ile ilgili keşiflerini sundular¹³.

Kuark kelimesi ilk olarak İrlandalı yazar James Joyce (1882-1941)'un Finneganın Vahı ya da Finneganın Uyanması¹⁴ adlı romanında kullanılmıştır. Rüyanın insanlar üzerinde bıraktığı etkiler hakkında olan kitapta bir rüya anlatılıyor. Kitapta 40'tan fazla dilden kelime alınmış olup bunlarla oyunlar oynanmış olması kitabın anlaşılmasını ve tercüme edilmesinin zorlaşmasına sebebiyet vermiş olup günümüzde bile hala anlaşılması en zor olan kitaplardan birisidir. Kitabın ana karakteri olan Humphrey Chimpden Earwicker sarhoş bir martıya bira servis etmesiyle alakalı bir rüya görür. "Bay Mark için 3 dörtlü¹⁵" diye söyleyecek olan martı sarhoş olması sebebiyle "Bay Mark için üç dörklü¹⁶" diyor. İyi bir okuyucu ve fizikçi olan Murray Gell-Mann bu ismi oldukça seviyor. Standart model üzerinde çalışırken bu kuram o dönemlerde sadece üç kuarktan oluşuyordu. Bu durumun yarattığı çağrışımdan ve telaffuz etmesinin hoş olması üzerine Gell-Mann bulduğu parçacıklara bu ismi taktı. Günümüzde 6 çeşit kuark vardır ve bunların isimleri de benzer şekilde pek bir anlam taşımaz: yukarı, aşağı, tuhaf, çekici, üst ve alt.

¹³ Gell-Mann 1969 yılında bu çalışmasından dolayı Nobel Ödülünü almıştır.

¹⁴ Finnegans Wake.

¹⁵ "Three quarts for Mister Mart" diye geçiyor kitapta. Burada *quarts* kelimesi galonun dörtte biri, kuartet manasına gelir.(Ç.N.)

¹⁶ Three quarks for Muster Mark. (Ç.N.)

Kuarklarda kuantum renk dinamiği (KRD) ile açıklanan renk hapsi¹⁷ denilen bir olgu vardır. Bu durumun sebebi kuarkların var olan bir kuantum özellikleridir. Söz konusu kuantum özelliğine renk atfedilmiştir¹⁸ ve üç çeşit renk vardır: kırmızı, yeşil, mavi. Kuarkların belirlenebilmesi için toplam kuantum renk özelliklerinin beyaz yani yüksüz (0) olması gerekmektedir. Newton'un prizma deneylerinden bu yana tüm renklerin birleşiminin beyaz olduğunu biliyoruz. Doğadaki ana renkler olan kırmızı, yeşil ve mavi birleştiğinde beyaz rengini ortaya çıkartır. Beyaz rengi elde etmenin bir başka yöntemi ise karşı-renk kullanımıdır. Buna göre eğer elimizde kuantum renk özelliği kırmızı olan bir kuark varsa bunu beyaza dönüştürmek için karşı-kuark kullanmak gerekecektir. Karşı-kuark karşı-kırmızı rengine sahip olacağından bu ikisinin birleşimi beyaz rengini elde etmemizi sağlar (bkz Şekil 2.1). Bu durumdan dolayı kuarklar ikili veya üçlü yapıda bulunurlar. Üç kuarktan oluşan yapıya baryon¹⁹ denilmekle birlikte iki kuarktan oluşan yapıya mezon²⁰ denilir. Mezonlar bir kuark bir karşı-kuarktan oluşur iken baryonlar 3 kuarktan oluşur. Baryonlara örnek olarak çekirdek (proton ve nötron), Hiperon (kaon, sigma, omega gibi en az bir adet tuhaf kuark içerip çekici kuark, alt ve üst kuark içermeyen parçacıklar) ve egzotik baryonlar verilebilir. Egzotik baryonlardan en meşhuru beşli-kuark yapısında olan pentakuarklar 14 Temmuz 2015'te CERN'de LHCb algıcında gözlemlenmiştir (Kaynak: <https://www.nature.com/news/forsaken-pentaquark-particle-spotted-at-cern-1.17968>). Aslında bir baryon olan Pentakuarklar dört adet kuark ve bir karşı-kuarktan oluşurlar.

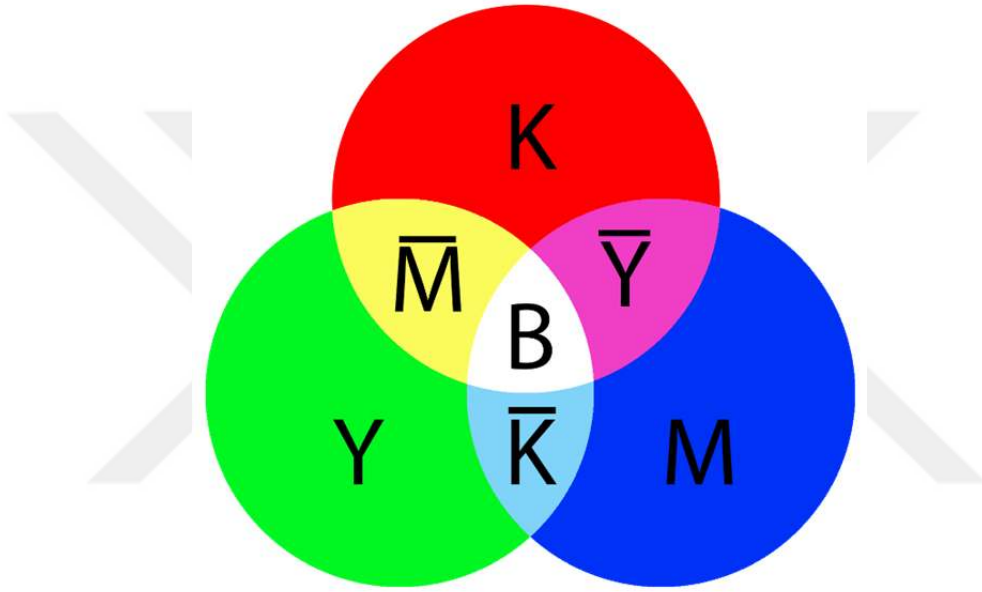
¹⁷ Normalde tüm kuvvetler aradaki mesafenin artmasıyla azalır iken renk kuvvetinde böyle bir durum söz konusu değildir. 2 adet kuarkı birbirinden ayırmak istediğinizde birbirlerine daha sıkı yapışırlar ve ayırmak mümkün olmaz.

¹⁸ Renk yükü olarak da bilinen bu özellik sadece güçlü kuvvette olduğu için aynı zamanda güçlü yük de denilir.

¹⁹ Yunanca βαρύς (varys diye okunur) kelimesinden gelip “ağır” anlamındadır.

²⁰ Yunanca μέσος (mesos diye okunur) kelimesinden gelip “orta” anlamındadır.

Genel olarak ikili ve üçlü şekilde bulunan bu yapılar kalın, sağlam, ağır anlamına gelen hadronlar²¹ olarak bilinir. Bu isim, noktaya benzeyen kuarkların birbirine bağlanma ve belirli bir anlamda "kalın" olan parçacıklar oluşturma yeteneğine işaret eder. Kıyaslama açısından hadronlar leptonlardan çok daha fazla kütleye sahiptir.



Şekil 2.1. Kuarkların renk özelliği (Harflerin üzerindeki çizgiler karşı renk yükü anlamı taşımaktadır.)

6 çeşit kuark 3 farklı kuşaktan oluşur. Her kuark 1/2 dönüye sahip iken elektrik yüklerine baktığımızda üç tanesi (yukarı, çekici ve üst) 2/3, diğer üç tanesi (aşağı, garip ve alt) -1/3 değerine sahiptir.

Yukarı ve Aşağı Kuark

Proton ve nötronun oluşmasını sağladıkları için en meşhur iki kuarktır. Hafif kuarklar olarak da bilinirler. İlk kuşakta yer alırlar. Gösterimleri sırasıyla “u” ve “d” şeklindedir. Her ikisi de 1968 yılında SLAC'da keşfedilmiştir. Yukarı

²¹ Yunancada ἀδρός (adros) diye okunur.

kuarkın kütlesi yaklaşık 2,3 MeV civarında iken aşağı kuarkın kütlesi 4,8 MeV mertebesindedir. Elektrik yükleri sırayla $+2/3$ ve $-1/3$ 'tür.

Tuhaf Kuark

Gösterimi “s” şeklindedir. Garip kuark veya acayip kuark olarak da bilinir. İkinci kuşakta yer alır. Elektrik yükü $-1/3$ olup kütlesi yaklaşık 96 MeV mertebesindedir. İlk tuhaf parçacık 1947 yılında Manchester Üniversitesinde bulut odası algıci ile kozmik ışınlar incelenirken $\pi^\pm$ parçacıklarına bozunan yüksüz bir parçacık keşfedildi. Bu parçacığa Λ^0 (Lambda 0 diye okunur) ismi takıldı fakat kuark yapısına bakıldığında bir aşağı, bir yukarı bir de daha önce görülmeyen bir kuark yapısında olduğu fark edildi. Bu bilinmeyen kuark yapısından kaynaklı olarak Λ parçacığının ömrü hesaplanan ömürden 1000 kat daha uzun oluyordu. Bu tuhaf durumdan ötürü bu parçacığa “tuhaf” ismi takılmıştır. Tuhaf kuark kaynaklı olarak yeni bir korunum yasası daha ortaya çıkmıştır. Buna göre etkileşime giren ve çıkan parçacıkların tuhaf kuark sayısı birbirine eşit olmalıydı. 1964 yılında Murray Gell-Mann ve George Zweig tarafından hadronların Sekiz Katlı Yolu sınıflandırma şemasını açıklamak için ortaya atılan tuhaf kuarkın keşfedilmesi ise 1968 yılında SLAC'da olmuştur.

Çekici Kuark

Çekici kuark olarak da bilinir. Gösterimi “c” şeklindedir. İkinci kuşakta yer alır. Elektrik yükü $2/3$ olup kütlesi 1,29 GeV mertebesindedir. 1974 yılında SLAC'da J/Psi adlı yeni parçacığın keşfi esnasında Burton Richter ve Samuel Ting tarafından bulunmuştur.

Üst Kuark

Doğru-gerçek kuark olarak da bilinir. Gösterimi “t” şeklindedir. Makoto Kobayashi ve Toshihide Maskawa tarafından kaon parçacığının bozunmasında görülen yük-eşlem²² ihlalini açıklamak amacıyla ortaya atılmıştır. Üçüncü kuşakta yer alır. Elektrik yükü $2/3$ iken kütlesi 172 GeV mertebesindedir. 1995 yılında

²² Parite. Doğa yasalarının aynada birbiriyle özdeş olan iki sistem için aynı olacağı ile ilgili bakışma denilir. P ile gösterilir.

Fermilab'da CDF ve DØ deneylerinde gözlemlendi. 2008 yılında kuramcılar Nobel ödülünü almıştır.

Alt Kuark

Gösterimi “b” şeklindedir. Elektrik yükü $-1/3$ olup kütlesi 4,18 GeV mertebesinde. Makoto Kobayashi ve Toshihide Maskawa tarafından kaon parçacığının bozunmasında görülen yük-eşlem ihlalini açıklamak amacıyla ortaya atılmasına rağmen bu ismi 1975 yılında Haim Harari takmıştır. Üçüncü kuşakta yer alır. 1977 yılında Leon M. Lederman tarafından keşfedilmiştir.

2.1.2.2. Leptonlar

Fermiyonların diğer üyesi leptonlar olup, lepton adı Yunanca *λεπτός* (leptos diye okunur “hafif, küçük” anlamına gelir) sözcüğünden gelir. Bunun sebebi hem kuarklardan hafif olmaları hem de kuarkların aksine tek başlarına gözlenebiliyor olmalarıdır²³. 1948 yılında Leon Rosenfeld tarafından önerilmiştir. Tüm Leptonların dönü değeri $1/2$ 'dir. Yüklü ve yüksüz olmak üzere iki çeşitten oluşurlar. Kuarklar gibi renk yükleri yoktur dolayısıyla güçlü etkileşimde bulunmazlar. Kuarklar ile benzer ailelerde yer alırlar. Üç adet yüklü (elektron, müon, tau) ve üç adet de yüksüz lepton (elektron nötrinosu, müon nötrinosu, tau nötrinosu) vardır. Etkileşime giren parçacıklarda lepton korunumu şartı aranır.

Nötrinolar tıpkı nötron gibi yüksüz olup²⁴ ışık hızına yakın hareket etmektedir. Herhangi bir elektrik yükü bulunmadığından ötürü maddeyle sadece zayıf kuvvet aracılığıyla etkileşime girerler. Bundan dolayı tespit edilmeleri çok zordur. Gösterimleri ν (Yunanca bir harf, “nü” şeklinde okunur) şeklindedir. 1930

²³ Çok sonradan keşfedilen tau parçacığı kütlesi bakımından bu kuralı bozmasına rağmen isimde herhangi bir değişiklik yapılmamıştır.

²⁴ Nötrino ismi zaten “küçük nötron” anlamına gelmektedir. İtalyancada bir kelimenin sonuna “-ino” eki getirildiğinde küçük anlamına gelmektedir.

yılında Wolfgang Pauli tarafından ortaya atılmış olup²⁵ ilk keşifleri 1956 yılında yapılmıştır. Pauli nötronun protona ve elektrona bozunduğunu (beta bozunumu) biliyordu fakat bunun incelemesini yaparken enerji, momentum ve açısal momentumun korunmadığını fark etti. Bundan dolayı gözlemleyemediği bir parçacığın olduğunu iddia etmişti. İlk başta kütsüz olduğu düşünölse de 1998 yılında Japonya'daki Süper Kamiokande deneyinde nötrinoların çok küçük de olsa bir kütleyle sahip oldukları bulundu. En çok yıldızlarda üretildikleri için bize en yakın üretim yeri Güneş'tir. Dünyaya doğru gelen bu nötrinoların akısı saniyede santimetre kare başına 65 milyar civarındadır. Nötrinoların bir özelliği de kendi aralarında salınım yapmalarıdır.

Elektron

En eski ve en çok bilinen parçacık olup “e” ile gösterilir. 1874 yılında G. Johnstone tarafından ortaya atılmış olup 1897 yılında Sir John Joseph Thomson tarafından keşfedilmiştir. Katot ışın tüpü ile çalışan Thomson katotta oluşturduğu ışınları anoda doğru yönlendirdi. Anoda bir delik açan Thomson, bu delikten geçen ışınların dışarı çıkmasını ve floresan bir ekrana çarpmasını sağladı. Bu çarpma sonucu ekranda küçük yeşil noktaların oluştuğunu gördü. Bu ışınların elektrik yüklü olup olmadığını merak eden Thomson deney düzeneğine metal levhalar koydu. Bunlara gerilim vererek birisinin artı diğerinin ise eksi yüklenmesini sağladı. Daha sonra levhaya akım verdiğinde ise ışınların katoda yani artı yüke doğru kaydığını gördü. Bu durumda keşfettiği parçacıklar eksi yüklü oluyordu. Kütle 0,510 MeV mertebesinde olup birinci kuşakta yer alır.

Müon

Gösterimi “ μ ” şeklindedir. 1936 yılında Carl D. Anderson kozmik ışınlar üzerine çalışırken gelen parçacıkları bir manyetik alan içerisinde geçirdi. Bu işlemde normalde gelen parçacıklar yüzeyde yükleri ve kütlelerine göre iz

²⁵ O dönemde Pauli buna nötron ismini takmıştı lakin daha sonra James Chadwick de bulduğu bir parçacığa aynı ismi taktı. Aradaki isim karmaşasını çözüp nötrino ismini takan kişi ise Enrico Fermi olmuştur.

bırakırdı. Anderson incelemeleri esnasında elektron ile aynı yönde eğime sahip bir parçacık gördü. Bu parçacık eksi yüklü olmalıydı. Fakat incelmeleri esnasında eğimin elektronun eğimine göre az olduğunu gördü. Bu da kütlenin elektronun kütesinden daha fazla olduğu anlamına geliyordu. Kıyaslama açısından protonun izlerini kontrol eden Anderson öngörülerinin doğru olduğunu gördü. Yeni parçacık protondan ters yöne gitmiş ve ondan daha az eğime sahipti. Bu durumda kütlesi elektrondan fazla ve protondan az olmalıydı. İkisinin ortasında olduğundan dolayı Anderson bu yeni parçacığa mü-mezon demesine karşın bu aslında bir mezon değildi. Daha sonra ismi müon olarak değiştirildi. Sonuç olarak müon -1 elektrik yüküne sahip olup 105 MeV mertebesinde bir kütleyle sahiptir.

Tau

Parçacığın gösterimi “ τ ” şeklindedir. İlk olarak 1971 yılında Yung-Su Tsai tarafından öne sürülmüş olup 1974-1977 yılları arasında Martin Lewis Perl ve Tsai'nin SLAC'daki arkadaşları tarafından gözlemlenmiştir. Eksi bir (-1) elektrik yüküne sahip olup kütlesi 1776 MeV mertebesindedir. Kütesinin çok fazla olmasından ötürü bozunma süresi çok kısadır. Yunanca *τρίτων* (Triton diye okunur) kelimesinden gelip üçüncü anlamındadır. Leptonlarda var olan iki kuşaktan sonra yeni bir kuşak yarattığı için bu isim verilmiştir. Keşfi yapan Martin Lewis Perl 1995 yılında Frederick Reines ile Nobel Ödülünü kazanmıştır.

Elektron Nötrinosu

İsminden de anlaşılacağı üzere elektrona ait olan nötrinodur. Gösterimi “ ν_e ” şeklindedir. Aynı elektron gibi birinci kuşakta yer alır ve bu kuşak evrende bildiğimiz maddeyi oluşturur. İlk kez 1930 yılında Wolfgang Pauli tarafından β bozunumu süreçlerini açıklamak amacıyla ortaya atılmıştır. 1956 yılında Clyde Cowan ve Frederick Reines tarafından ABD'de bir nükleer reaktörde gerçekleştirdikleri deneyde keşfedilmiştir. Kütesi en fazla 2 eV mertebesindedir.

Müon Nötrinosu

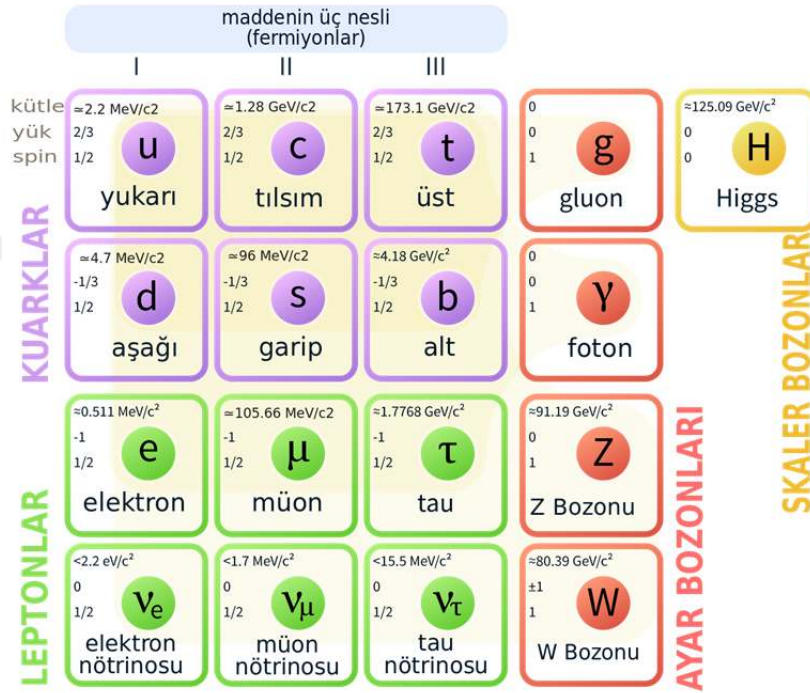
Gösterimi “ ν_μ ” şeklindedir. Müon ile birlikte ikinci kuşakta yer almaktadır. 1940 yılında öne sürülmüş olup 1962 yılında Leon Lederman, Melvin Schwartz ve

Jack Steinber tarafından keşfedilmiştir. Bu keşiflerinden dolayı 1988 yılında Nobel Ödülünü kazanmışlardır. Kütleli yaklaşık olarak 0,19 MeV mertebesindedir veyahut daha azdır.

Tau Nötrinosu

Gösterimi “ ν_τ ” şeklinde olup 1970'li yılların ortalarında öne sürülmüştür. İlk kez 1981 yılında görülmüş olup keşfi 2000 yılında Fermilab'da bulunan DONUT (Direct Observation of the Nu Tau) deneyinde olmuştur. Üçüncü kuşakta yer alır. Kütleli 18,2 MeV mertebesinden daha azdır. Dönü değeri 1/2'dir.

Temel parçacıkların standart modeli



Şekil 2.2. Kuark, Lepton ve bozonların özellikleri

2.1.3. Standart Model'in Başarıları

İkinci dünya Savaşından sonraki yıllarda keşfedilen birçok parçacığın temel parçacık olduğu kanısı yaygındı. Bölüm 2.1.2.1.'de anlatıldığı gibi kuramsal olarak öne sürülen ve sadece hesaplamalarda kullanılan kuark modeline ait kanıt 1969 yılında SLAC'da ilk kez gözlemlendi. Bu gözlem sonucunda proton ve nötronun kuarklardan yapıldığını ilk kez²⁶ ispat eden Jerome Friedman, Henry Kendall ve Richard Taylor 1990 yılında Nobel ödülünü aldılar.

1970'li yıllarda Emilio Picasso ve grubu müonun normal olmayan manyetik çift kutup momentini ölçtü ve takibindeki sürede Gargamel algısında nötrino etkileşimi kanıtlandı.

Nötrinoların esnek olmayan saçılmalarının gözlemlenmesini KRD'nin öngörülerıyla uyumlu çıktı. 1979 yılında e^+e^- çarpıştırıcısında üç jetli olaylar gözlemlendi. Bu gözlem gluona bozunumun ilk doğrudan kanıtıdır.

Elektrozayıf kuram, W ve Z bozonların keşfi, 1974'te Gargamelle deneyinde yüksüz akımların ve son olarak 2012 yılında Higgs bozonunun keşfi yine Standart modelin başarıları arasındadır.

2.1.4. Standart Model'in Açıklayamadığı Durumlar

Standart model şu ana kadar parçacık fiziğinin en iyi kuramı olmasına karşın açıklayamadığı bazı fiziksel durumlar da vardır.

- Standart model kütle çekimini açıklamamaktadır. Bunun sebebi kütle çekim etkileşiminin geometrik kökenli olması ve geometri ile tanımlanıyor olmasıdır. Oysa Standart Model'deki diğer tüm etkileşimler kuantum alanları kökenlidir. Bunun haricinde bozonlar arasında yer alan Graviton kuramsal olarak öne sürülmüş olup hala gözlemlenmemiştir.

²⁶ Sonraki yıllarda birçok gözlem yapıldı. Bunlardan en önemlilerinden birisi 1964 yılında yüksüz kaon parçacıkların sisteminde yük-eşlem bakışımının bozulmasıdır, bir diğer önemli keşif ise $c\bar{c}$ kuarklarından oluşan J/Psi mezonunun 1974 yılındaki keşfidir.

- Standart modelin açıkladığı parçacıklara baktığımızda bunlar evrenin %4'ünü oluşturur. Astrofiziksel gözlemler eğer doğru ise evrenin %27'sinin karanlık madde ve geri kalan %69'luk kısmının ise karanlık enerjiden oluştuğunu görüyoruz. Bu durumları sağlayacak herhangi bir parçacık standart modelde yoktur.
- Standart modele göre nötrinoların kütlesi yoktur. Lakin ilk kez 1957 yılında Bruno Pontecorvo tarafından öne sürülen nötrino salınımları 1998 yılında Japonya'daki Süper Kamiokande deneyinde doğrulandı²⁷ ve kütle ölçümleri en son KATRIN deneyinde 0,2-2 eV aralığında²⁸ ölçülmüştür. (http://www.pro-physik.de/details/physiknews/11069692/Die_Neutrino-Waage_geht_in_Betrieb.html)
- Madde evreninde yaşamamıza rağmen karşı-maddenin durumu, büyük patlama sonra maddenin neden baskın geldiği gibi sorulara açıklama getirememektedir. Bu durum baryon bakışimsızlığı²⁹ olarak adlandırılır ve yük-eşlem kırımını ile ilgilidir.
- Güçlü etkileşmelerde yük-eşlem bakışımının³⁰ ihlali söz konusudur. Lakin yapılan testlerde böyle bir ihlal söz konusu değildir.
- Temel kuvvetler arasındaki etki farkının (Güçlü kuvvet 10^{38} kat kütle çekimin kuvvetinden daha büyüktür) neden büyük olduğu ile ilgili bir açıklama yoktur. Aşama sırası³¹ sorunu olarak adlandırılan bu durum aynı zamanda Higgs bozonunun neden çok hafif olduğuyla da ilgilidir.
- Standart model, Büyük Birleşim Kuramı (Grand Unified Theory) olarak adlandırılan ve üç temel kuvvetin (Güçlü kuvvet, zayıf kuvvet,

²⁷ Bu deney sonucunda Masatoshi Koshiba ve Ray Davis 1998 yılında Nobel ödülü kazanmıştır.

²⁸ 0.23 eV alt değeri WMAP ve Planck uydularının ölçümleri neticesinde bulunan bazı evrensel kısıtlamalar ile belirlenmiştir (<http://arxiv.org/abs/1303.5076>).

²⁹ (İng.) Asymmetry.

³⁰ (İng.) Symmetry.

³¹ (İng.) Hierarchy.

elektromanyetik kuvvet) birleşmesi ile ilgili herhangi bir açıklamada bulunmamaktadır.

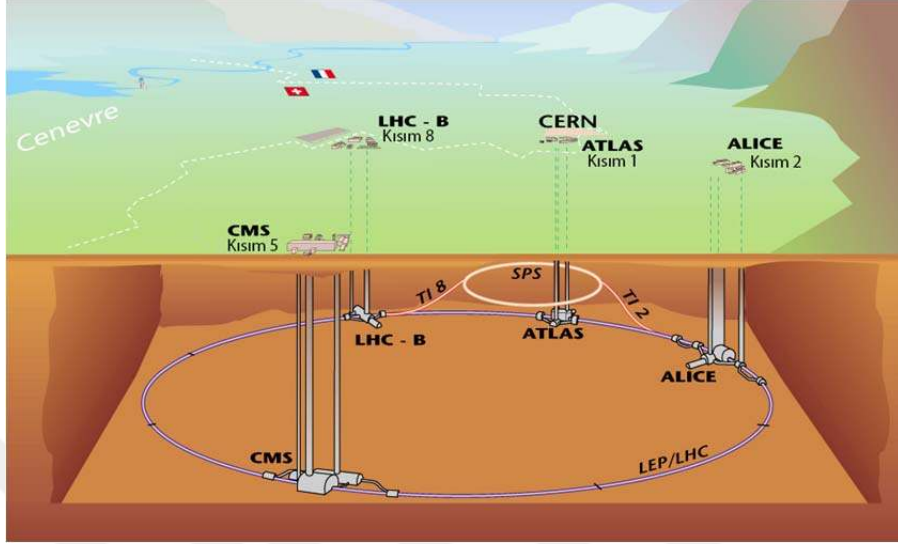
2.2. CERN ve Büyük Hadron Çarpıştırıcısı

Yüksek enerji fiziği ile ilgili kuramsal araştırmalar dünyanın çeşitli yerlerindeki laboratuvarlarda deneylerle test edilmektedir. Evrenin gizemini çözmek için tasarlanan en büyük laboratuvarlardan biri İsviçre ile Fransa sınırında kurulan Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi olan CERN (Conseil européen pour la recherche nucléaire)'dir.

CERN'e 22 ülke tam üye olup bunlara ek olarak 3 ülke (Kıbrıs, Sırbistan, Slovenya) daha katılacaktır. Bunlar dışında 5 adet ortak üye (Hindistan, Litvanya, Pakistan, Türkiye, Ukrayna) ve 6 adet de gözlemci (Avrupa Birliği, Japonya, JINR, Rusya, Unesco, Amerika Birleşik Devletleri) devlet bulunmaktadır. Bunlara ek olarak 35 ülke de üye olmadan araştırmalara katılabilmektedir. (<http://international-relations.web.cern.ch/> ve <https://home.cern/about/member-states>)

600'den fazla enstitü ve üniversitenin bağlı olduğu CERN'de 2500 civarında personel çalışıyor olup 2017 yılı içerisinde 70'den fazla ülkeden 12200 bilim insanını bünyesinde bulundurmıştır. Aynı yıl içerisinde 200 milyon gigabayt veri elde edilmiştir (Annual Report 2017).

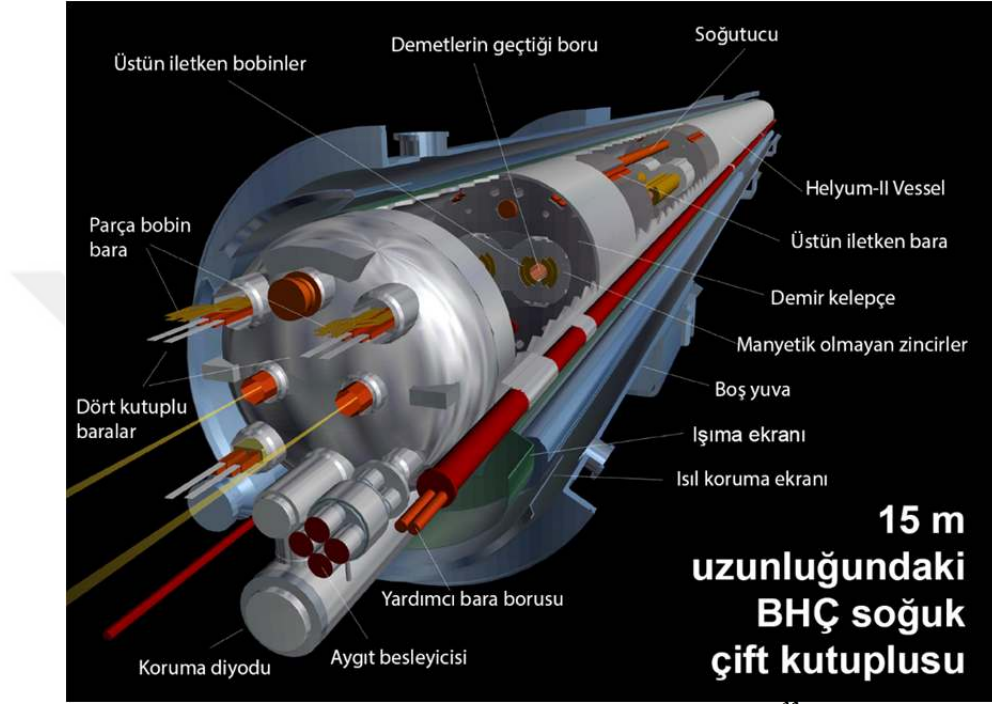
CERN'de dünyanın en büyük parçacık hızlandırıcı olan 27 km uzunluğunda ve yerin yaklaşık 100 metre altında BHÇ (Büyük Hadron Çarpıştırıcısı-Large Hadron Collider) adlı makinesi bulunmaktadır. 2008 yılında çalışmaya başlayan makine iki yüksek enerjili parçacığı zıt yönlerde gönderip çarpışmalarını sağlıyor ve bu çarpışma sonucunda ortaya çıkan verileri inceliyor.



Şekil 2.3. BHÇ'nin genel çizimi (Woods, 2011)

BHÇ'de temel olarak proton-proton çarpıştırmaları yapılmaktadır. Her proton hüzmesinin arasında $\sim 7,5$ metrelik uzaklık olup 2808 proton öbeği içermekle birlikte her öbekte 10^{11} proton vardır (CERN Brochure, 2017). Gönderilen parçacıkların çarpışabilmeleri için iyi bir şekilde yönlendirilebilmeleri gerekmektedir. Bu bağlamda süper iletken elektro mıknatıslar kullanılmaktadır. Kullanılan manyetik alan 8,33 Tesla olup bu değer Dünya'nın sahip olduğu manyetik alanın 100 bin katından fazladır. Bu büyüklükte bir manyetik alan için ortam sıcaklığını düşürmek gerekmektedir. Bu bağlamda BHÇ'de Kriyojenik sistemler kullanılmaktadır. Güçlü manyetik alan yaratan bobinlerin niyobyum-titanyum (NbTi) telleri, kapalı bir sıvı helyum devresi ile muhafaza edilir. Soğutmanın gerçekleşmesi haftalar sürer ve bu işlem üç aşamada gerçekleşir. İlk aşamada Helyum 80 K'e ve daha sonra 4,5 K'e soğutulur. İkinci aşamada mıknatısların kütlelerine soğutulmuş olan helyum yönlendirilir ve son aşamada 1,9 K sıcaklığa soğutulur. İlk aşamada, Helyumun sıcaklığını 80 K'e getirmek için soğutucu donanımlarda ısı değiştiricilerde yaklaşık 10 bin ton sıvı azot kullanılır. Helyum daha sonra türbinler kullanılarak 4,5 K'e ($-268,7^{\circ}\text{C}$) soğutulur. Bu teknik

ile içteki sıcaklık 1,9 K ($-271,3^{\circ}\text{C}$)'e düşürülür ki bu değer 3 K ($-270,5^{\circ}\text{C}$) olan dış uzayın sıcaklığından bile düşüktür.



Şekil 2.4. BHÇ'nin iki kutuplu mıknatısı. Görseldeki bara³² kelimesi dağıtıcı çubuk anlamına gelmektedir. (Rossi, 2010)

Parçacıkların yönlendirilmesi için ayrıca yüksek boşluk (vakum) ortamı gerekmektedir. Bunlar iki adet tüp ile sağlanır. BHÇ, üç ayrı boşluk sistemine sahip olması bakımından sıra dışıdır: biri demet boruları, biri kriyojenik olarak soğutulmuş mıknatısların yalıtımı ve biri de helyum dağıtım hattının yalıtılması içindir. Hızlandırıcı içindeki gaz molekülleriyle çarpışmayı önlemek için, BHÇ'deki parçacıkların demetleri, yıldızlararası boşluk gibi boş bir alanda hareket etmelidir. Kriyomıknatıs ve helyum dağıtım hattında, boşluk farklı bir amaca hizmet eder. Burada, çevreleyen oda sıcaklığı ortamından 1,9 K ($-271,3^{\circ}\text{C}$)'de

³² Aynı gerilimdeki besleme hattı veya çıkışların toplandığı ve dağıtıldığı boru veya iletken çubuk veya lama. (TDK, 2018)

tutulan kriyojenik parçalara sızan ısı miktarını azaltmak için bir ısı yalıtıcı görevi görür. Yalıtım boşluğu yaklaşık 10^{-6} mbar'a eşdeğer olup 15 bin m^3 'lük hacme sahip 50 km'lik borudan oluşur. Boşluk altındaki 54 km'lik boru BHÇ'deki iki ışın demetinin hareket ettiği yerdir. Bu borulardaki basınç 10^{-10} ile 10^{-11} mbar mertebesinde olup Ay'ın yüzeyine denktir. Boşluk sisteminin kurulması için 250 binden fazla kaynaklı eklem ve 18 bin adet boşluk sızdırmazlığı gerekmektedir. Eğmeçlerde³³ ultra yüksek boşluğu sağlamak için 9000 m^3 gazın kriyojenik pompalanması gerekir. Işın boruları aşırı derecede düşük sıcaklıklara soğutulduğundan gazlar yoğunlaşır ve yüzeye tutunarak ışın borularının duvarlarına yapışır. En fazla iki hafta süren bu işlem sonucunda içteki basınç 10^{-13} atm'ye düşer ki bu dış uzaydan bile düşüktür, yani evrenin bilinen en boş yerini oluşturur.

BHÇ 14 TeV'lik kütle merkezi enerjisine göre tasarlanmıştır. Kütle merkezi enerjisi $\sqrt{s}$ ile temsil edilip her bir parçacık demetinin momentumlarının toplamının karesine eşittir. Proton-proton çarpışması için konuşacak olursak her bir protonun dört vektörlerinin toplamıdır.

$$s = (p_1 + p_2)^2 \quad (2.7)$$

Buradaki her bir parçacığa ait momentum değerleri aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\begin{aligned} p_1 &= (E_p, \vec{p}) \\ p_2 &= (E_p, -\vec{p}) \end{aligned} \quad (2.8)$$

Bunları Denklem (2.7)'de yerlerine koyarsak;

$$s = p_1^2 + p_2^2 + 2p_1 \cdot p_2 \quad (2.9)$$

³³ (İng.) arc.

$$\begin{aligned}
&= (E_p^2 - |\vec{p}|^2) + (E_p^2 - |\vec{p}|^2) + 2(E_p^2 + |\vec{p}|^2) \\
&= 4E_p^2
\end{aligned}$$

BHÇ’de 7 TeV’lik protonlar çarpıştırılıyordu. Bunu denklemde yerine yazarsak;

$$\sqrt{s} = \sqrt{4 \times 7^2 TeV} = 14 TeV \quad (2.10)$$

Saniye başına üretilen toplam olay sayısı

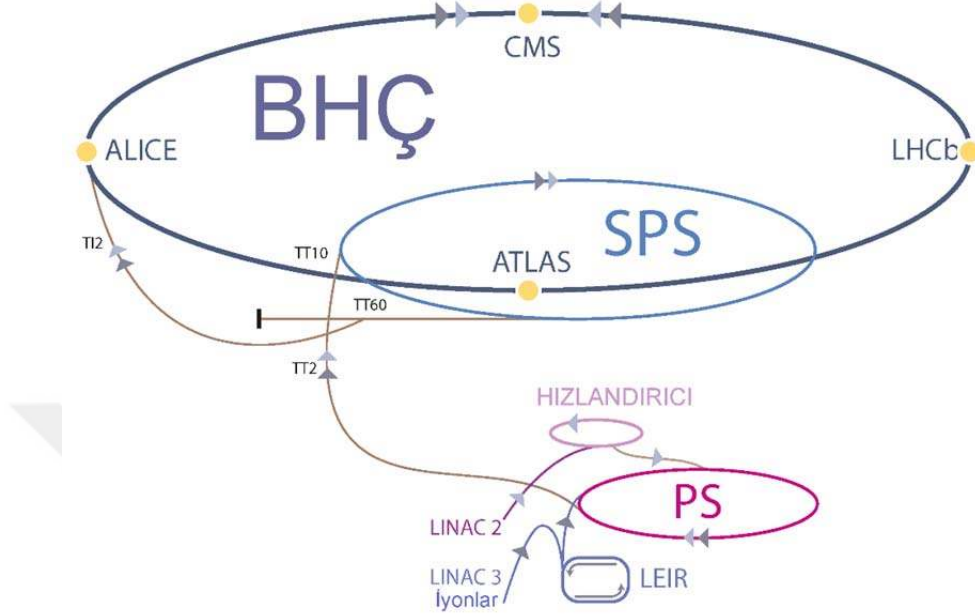
$$N_{olay} = L\sigma_{olay} \quad (2.11)$$

ile hesaplanır. Burada σ_{olay} incelenen olay için tesir kesiti, L makinenin ışıklılığıdır (parlaklık). Beklenen tesir kesiti bir alanı temsil eder ve barn³⁴ birimi ile ifade edilir. Anlık parlaklık birimi ise cm⁻²s⁻¹ ile gösterilir. Makine ışıklılığı sadece hüzme parametrelerine bağlıdır ve bir Gaussian hüzme dağılımı için;

$$L = \frac{N_b^2 n_b f_{dön} Y_T}{4\pi \epsilon_n \beta^*} F \quad (2.12)$$

ifadesi yazılabilir. Burada; N_b : demet başına parçacık sayısı, n_b : hüzme başına demet sayısı, $f_{dön}$: dönme frekansı, Y_T : görelî gama etmeni, ϵ_n : enine hüzme yayma gücü, β^* : çarpışma noktasındaki beta fonksiyonu ve F : etkileşme noktasındaki kesit açısından dolayı geometrik ışıklılık indirgeme etmenidir (LHC Design Report Vol.1, 2004).

³⁴ 10⁻²⁴ cm² değerine tekabül etmektedir.



Şekil 2.5. BHC'nin hızlandırıcı sisteminin basit bir gösterimi (Lipinski, 2019)

BHC'deki bu yüksek çarpışma enerjisine erişmek için parçacıklar bir hızlandırıcı dizisini takip etmektedir. Çarpışma için proton kaynağı olarak hidrojen gazı kullanılmaktadır. Elektrik alan uygulanarak hidrojen atomundan elektronlar koparılır. Daha sonra geriye kalan protonlar Linac 2 adlı hızlandırıcıya giriş yaparlar ve burada 50 MeV'lik enerjiye kadar hızlandırılırlar. Ardından PSB (The Proton Synchrotron Booster-Proton Senkrotron³⁵ Yükseltici)'ye giren proton demetinin enerjisi 1,4 GeV'e çıkar ve devamında PS (Proton Synchrotron- Proton Senkrotron)'e geçiş yapıp 26 GeV enerjisine ulaşır. Enerjiyi daha da arttırmak için bir sonraki adım SPS (Super Proton Synchrotron-Süper Proton Senkrotron)'e giren protonlar burada 450 GeV'e kadar hızlandırılıp son olarak BHC içerisine geçerler ve burada enerjilerini 7 TeV'e kadar çıkartırlar. Her bir proton demeti 7 TeV enerjiye sahip olup kafa kafaya çarpışma sağlandığında 14 TeV'lik enerji elde

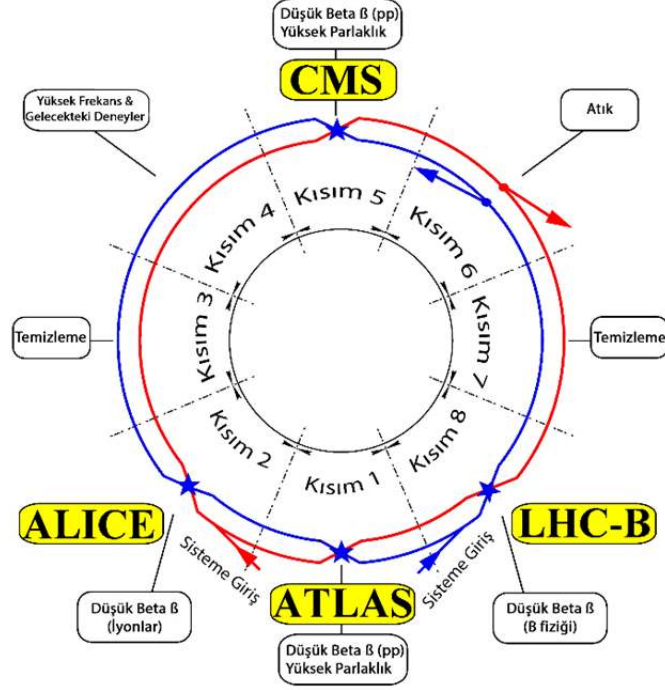
³⁵ Parçacık demetinin bir veya daha fazla RF alanlarla hızlandırıldığı ve mıknatıslarla sabit yarıçaplı bir yörüngede tutulduğu dairesel hızlandırıcılardır. (<http://www.taek.gov.tr/tr/sik-sorulan-sorular/145-hizlandirici-fizigi-sss/906-siklotron-ve-sinkrotron-nedir.html>)

edilir. Bu kafa kafaya çarpışmalar BHÇ üzerindeki 4 noktada meydana gelmekte olup bu noktalarda farklı algıçlar (ALICE, ATLAS, CMS ve LHCb) yer almaktadır (<https://home.cern/about/accelerators>).

Yerin yaklaşık 100 metre altına kurulan bu devasa sistem tam olarak daire şeklinde olmayıp 8 kısımdan³⁶ oluşmaktadır. Her kısımda yaklaşık 300 mıknatıs bulunup teknik sistemler de (soğutma veya elektriksel gibi) birbirlerinden ayrı yapıdadır. Birkaç farklı kısma ayrılan algıç sistemi, yerin altına indirilip birleştirilirken oldukça kolaylık sağlamıştır. Ayrıca bakım-onarım çalışmaları için de bu tasarım oldukça faydalıdır. Parçacık-karşı-parçacık çarpıştırıcılarında tek bir halkanın içinde ortak boşluk içinde aynı yönde dönen hüzmelerin var olmasına karşın bir parçacık-parçacık çarpıştırmışında iki farklı halka olup içindeki hüzmeler zıt yönlerde döndürülmektedir.

Şekil 2.6'da da görüleceği üzere iki farklı bölgeden sisteme giriş yapan parçacık hüzmeleri dört farklı bölgede çarpışırlar. Her deney düzeneği belli bir kısımda yer alıyor olup iki büyük deneyden ATLAS ve CMS sırasıyla 1 ve 5 numaralı kısımlardadır. 4. Kısımdan 5. Kısıma doğru hareket etmekte olan parçacığın konum bilgisi 4-5 olarak verilmektedir. Kısım 3 ve Kısım 7, hüzmelerin temizlenmesi ve/veya güçlendirilmesi için olup Kısım 6 ise söz konusu hüzmeleri durdurmak amacıyla sisteme giren hüzmelerin sistemden çıkartılması içindir.

³⁶ Bazı kaynaklarda sekizlik diye de geçer.



Şekil 2.6. BHÇ'nin sekiz kısımdan oluşan yapısı ve deneylerin konumları (Evans, 2014)

BHÇ’de aynı zamanda kurşun-kurşun (Pb-Pb) çarpıştırmaları da yapılmaktadır. Kurşun iyonları yaklaşık 800°C sıcaklığa ısıtılan yüksek derecede saflaştırılmış bir kurşun numuneden üretilir. Kurşun buharı bir elektron akımı ile iyonize edilir. Birçok farklı yük durumu maksimum Pb^{29+} civarında üretilir. Pb^{54+} ’den ayrılıp seçilen bu iyonlar karbon folyodan geçmeden önce 4,2 MeV/u’ya hızlandırılır. Pb^{54+} hüzmesi toplanır, daha sonra Düşük Enerji İyon Halkası’nda (Low Energy Ion Ring, LEIR) 72 MeV/u değerine çıkartılıp PS’ye aktarılır. PS, gelen hüzmeyi 5,9 GeV/u değerine hızlandırır ve Pb^{82+} ’dan tamamen ayrıldığı ikinci bir folyodan ilk geçişten sonra SPS’ye gönderir. SPS’ye gelen hüzme 177 GeV/u değerine hızlandırılıp 2,56 TeV/u değerine ulaşacağı BHÇ’ye gönderimi sağlanır. Böylelikle iki hüzmeden elde edilen kütle merkezi enerjisi 5,5 TeV olur. Bu çarpışma için beklenen ışıklılık değeri $10^{27} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ’dir.

Çizelge 2.3. BHÇ'nin teknik verileri (CERN Brochure, 2017)

Nicelik	Değer
Çevresi	26.659 m
Çift kutup çalışma sıcaklığı	1.9 K (-271,3°C)
Mıknatısların sayısı	9593
Ana çift kutupların sayısı	1232
Ana dörtlüklerin sayısı	392
Radyo frekans boşlukların sayısı	Her yöne 8 adet
Enerji, proton	6,5 TeV
Enerji, iyon	2,56 TeV/u (Her bir nükleon için)
Tepe manyetik çift kutup alanı	7,74 T
Demetler arası mesafe	~7,5 m
Işıklılık (proton için)	$\sim 1,2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Proton ışını başına demet sayısı	2808
Demet başına proton sayısı (başlangıçta)	$1,2 \times 10^{11}$
Saniyedeki dönüş sayısı	11245
Saniyedeki çarpışma sayısı	1 milyar

BHÇ'de ATLAS, CMS, ALICE, TOTEM, LHCf, MoEDAL ve LHCb adlı deneyler yürütülmektedir. Deneyler birbirleri ile bağlantılı olup farklı konuları araştırmaktadır.

2.2.1. ALICE

ALICE (A Large Ion Collider Experiment, Büyük İyon Çarpıştırıcısı Deneyi) deneyindeki algıç güçlü etkileşim ile ilgili araştırmaları yürütür. BHÇ'deki çarpışma anları güneşin çekirdeğinden 100 bin kat daha fazla sıcaktır. Bu sıcaklıkta büyük patlamanın ilk saniyesinin birkaç milyonda biri ile benzer koşulları yaratmaktadır ve bilim insanları protonların ve nötronların bu sıcaklıkta

eriyebileceğine diğer bir deyişle doğada tek başına gözlenemeyen kuarklar ile gluonlar arasındaki bağların kopabileceğine inanmaktadırlar. Oluşan bu yeni madde yapısına kuark–gluon plazması denilmektedir.

BHÇ’de kurşun iyonlarının yanı sıra daha hafif iyonlar da çarpıştırılır. ALICE bu çarpışmalar sonucu oluşan çok yüksek yoğunluk ile sıcaklıktaki kuark-gluon plazmasını ve dolayısıyla güçlü etkileşen parçacıkların fizikini anlamayı amaçlamaktadır.

ALICE, 42 ülkeden 174 enstitüden 1800'den fazla fizikçi ve mühendisin işbirliğinden oluşmaktadır. Yürütülen deneyin algıcı yerin 56 m altına inşa edilmiştir. Toplam boyutları $16 \times 16 \times 26 \text{ m}^3$ ((yükseklik)×(genişlik)×(uzunluk)) olup 10 bin ton ağırlığındadır. Deney, her biri fiziksel gereklilikler ve BHÇ’de beklenen deney koşulları tarafından yönlendirilen, kendine özgü teknoloji seçimi ve tasarım kısıtlamaları olan 18 farklı algıç sisteminden oluşur.

Merkezi parça hadronları, elektronları ve fotonları ölçerken müonları ölçmek için bir adet ileri tek kollu kütleli tayfölçer ³⁷ vardır. Merkezi fiçı kısmı 45° ile 135° arası kutup açılarını kapsar ve LEP'deki³⁸ L3 deneyinde yeniden kullanılmış büyük bir sarmal mıknatısa gömülür. 4,2 MW güce sahip mıknatıs 0,5 T’lık manyetik alan yaratır. Merkezi fiçı, yüklü parçacıkların manyetik alan içerisindeki kavisli yollarını ölçerek momentumlarını kaydeden bir dizi izleyici algıcı içerir. Bu parçacıklar daha sonra kütle ve parçacık türüne göre bir takım Parçacık Tanıma Algıcı (Particle Identification, PID) daha sonrasında ise foton ve jet ölçümleri için iki tür elektromanyetik kalorimetre ile tanımlanır. İleri müon kolu (2° - 9°) karmaşık bir soğurucu düzeninden, geniş bir çift kutuplu mıknatıstan ve on dört adet izleme düzlemi ile tetikleme odasından oluşur. İçten dışa doğru İç İzleyici Sistem³⁹, Zaman İzdüşüm Odası⁴⁰, Geçiş Işınım Algıcı⁴¹, Yüksek Momentum

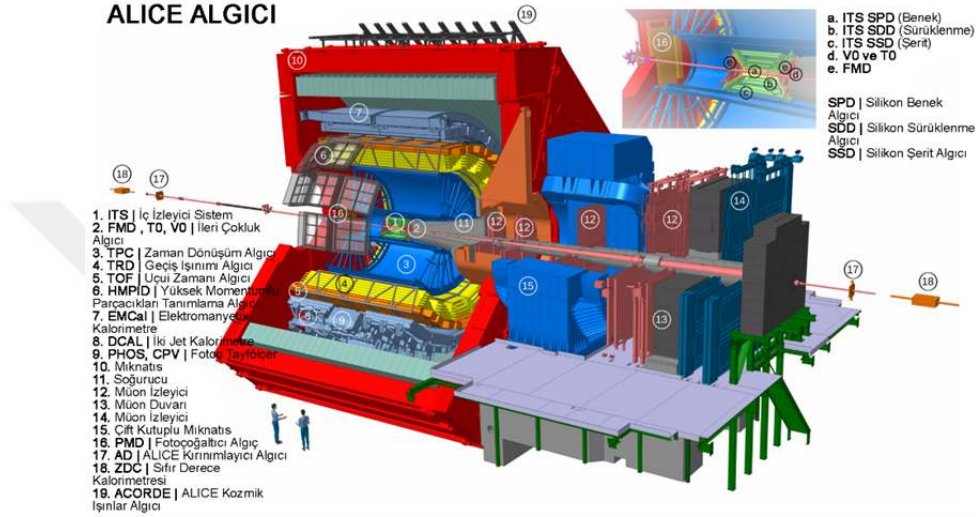
³⁷ (İng.) Single arm spectrometer. ALICE deneyinde merkez algıçların dışındaki ön bölgede ve sadece tek taraflı olarak bulunur. İleri Müon Kolu da denilir.

³⁸ Large Electron–Positron Collider, Büyük Elektron-Pozitron Çarpıştırıcısı.

³⁹ (İng.) Inner Tracking System, ITS.

⁴⁰ (İng.) The Time Projection Chamber, TPC.

Parçacık Tanımlama Algıcı⁴², Uçuş Zamanı Algılayıcı⁴³ ve en sonda iki elektromanyetik kalorimetre olan Foton Tayfölçeri⁴⁴ ile Elektromanyetik Kalorimetre⁴⁵ bulunmaktadır (C. Fabjan ve J. Schukraft, 2011).



Şekil 2.7. ALICE algıcının tasarımı ve alt bölümleri (Noferini, 2018)

2.2.2. ATLAS

ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS, Simit biçimli büyük hadron çarpıştırıcısı düzeneği) yerin 100 metre altına inşa edilmiş algıca sahip BHÇ'de bulunan iki büyük deneyden birisidir. Higgs bozonu, ekstra boyutlar, üst kuark, karanlık madde, karanlık enerji, parçacık-karşı-parçacık bakışımı gibi konuları araştırmaktadır. 38 ülkeden 182 enstitünün toplamda yaklaşık 3000 yazarın katılımı mevcuttur (Ocak 2017). Dünyanın en geniş hacimli algıcı olan ATLAS, 46 metre uzunluğunda, 25 metre yüksekliğinde ve 25 metre genişliğinde olup 7000 ton ağırlığındadır. Devasa büyüklüğünün en önemli özelliği simit şeklindeki mıknatıs

⁴¹ (İng.) Transition Radiation Detector, TRD.

⁴² (İng.) High Momentum Particle Identification, HMPID.

⁴³ (İng.) Time of Flight, TOF.

⁴⁴ (İng.) Photon Spectrometer, PHOS.

⁴⁵ (İng.) Electromagnetic Calorimeter, EMCal.

sistemidir. Algıç üç bileşenden oluşmaktadır; İç Algıç, Kalorimetre, Müon algıcı. Katmanları sırayla tanıtabak olursak;

İç Algıç (Inner Detector, ID): Yüklü parçacıkların algıçtan geçerken konumunu ölçer. BHÇ tarafından üretilen yüksek parçacık yoğunluğuyla başa çıkmak için küçük algıç tanecikleriyle yüksek hassasiyetli ölçümler yapmak üzere tasarlanmıştır. İç algıç, 8000 Amperlik sarmal mıknatıs tarafından sağlanan 2 T değerindeki manyetik alanda çalışır. Bu yapı algıcın yüklü parçacıkların kavisli yörüngelerinin yeniden yapılandırılabilirdiği bir tayfölder görevi görmesini sağlar. İç algıç, Benek Algıcı (Pixel Detector), Yarı İletken İzleyici (Semiconductor Tracker, SCT) ve Geçiş Işınımı İzleyicisi (Transition Radiation Tracker, TRT)nden meydana gelip iki teknoloji kullanılarak oluşturulmuştur: silikon duyaçlar⁴⁶ ve kamış sürüklenme tüpleri⁴⁷. Silikon duyaçlardan geçen yüklü parçacıklar elektron-deşik çiftleri oluşturur ve bunlar uygulanan bir elektrik alan ile toplanır. Bu sayede parçacığın konumu belirlenerek duyaçta yerel olarak kaydedilir. Benzer bir işlem kamış sürüklenme tüplerinde de meydana gelir. Sürüklenme borularından geçen yüklü parçacıklar, kamış içinde bulunan gazı iyonize eder. Uygulanan elektrik alan ile serbest kalan elektronlar sinyal ürettikleri kamışın ortasındaki tele doğru sürüklenir. Silikon benekler benek algıcında kullanılırken Silikon Mikro Şeritte silikon şeritler kullanılır. Geçiş Işınımı İzleyicisi (Transition Radiation Tracker, TRT)nde ise kamış sürüklenme tüpleri kullanılır. Benek algıcı çarpışma eksenine en yakın alt algıçtır. 80 milyondan fazla kanaldan oluşan Benek algıcı, yüklü parçacık başına ortalama üç ölçüm sağlar ve r -Ø düzleminde 10 µm ve z -ekseninde 115 µm konum çözünürlüğüne sahiptir. SCT, benek algıçlarını çevreler. Her bir SCT katmanı, eksenleri birbirine göre eğilmiş olan bir çift silikon şerit katmanından oluşur. Her SCT katmanındaki ölçüm çifti r -Ø düzleminde yüklü parçacıkları 17 µm hassasiyetle ve z -ekseni boyunca 580 µm hassasiyetle bulur. ID içindeki en büyük alt algıç TRT'dir. TRT, fiçidaki r -Ø düzleminde ve uç kapaktaki

⁴⁶ (İng.) Sensor.

⁴⁷ (İng.) Straw Drift tubes.

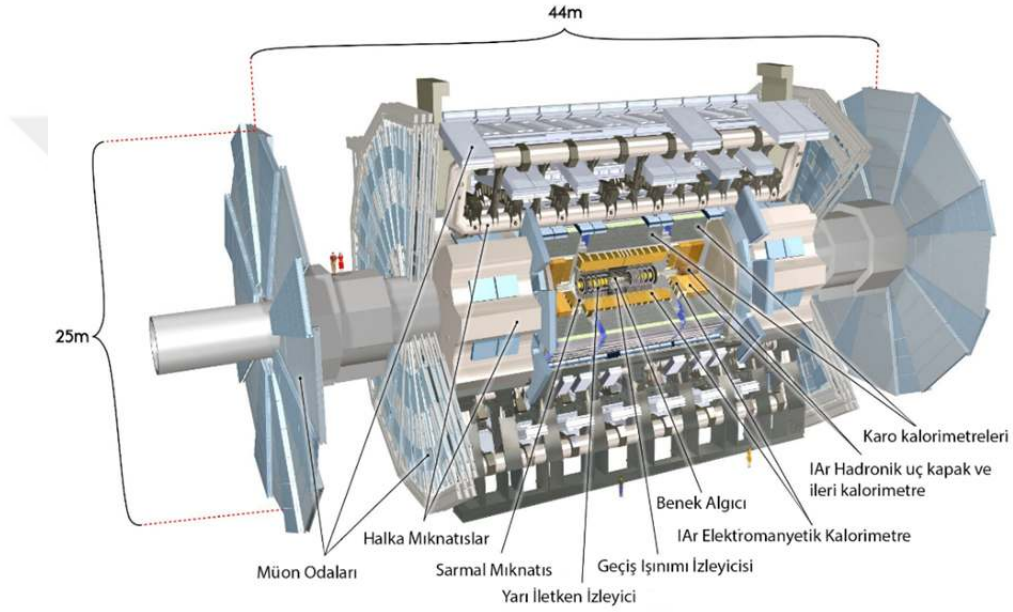
z - $\emptyset$ düzleminde $\approx 130 \mu\text{m}$ hassasiyetle konum ölçümleri sağlayan ≈ 300 bin kamış sürüklenme tüpünden oluşmaktadır. Bir izleyici olmasının yanı sıra TRT ayrıca geçiş ışıınımı tespiti yoluyla parçacıkların tanımlanmasını da sağlar. Yüklü parçacıklar TRT'yi geçerken geçiş ışıınımı fotonları yayar. Geçiş ışıınımı foton yayma olasılığı Lorentz etmenine (γ) ait bir işlevdir. Sabit momentumda elektronlar yüklü hadronlardan daha fazla geçiş ışıınımı fotonu yayar. TRT'de tespit edilen geçiş ışıınımı fotonların sayısı, elektronlar ve yüklü hadronlar arasında ayrılma sağlar.

Kalorimetre Sistemi: Bu sistem hadronların, elektronların ve fotonların enerjisini ölçer. ATLAS kalorimetreleri örnekleme kalorimetreleri⁴⁸ olarak bilinen bir türdür. Gelen parçacıklar kalorimetrede enerji duşları üretir. Tam duşun enerjisi gözlemlenen enerjiden çıkarılabilir. Elektronların ve fotonların enerjileri sıvı-argon (Liquid-Argon, LAr) elektromanyetik fiçı ve uç kapağı kalorimetreleri ile ölçülür. Karo kalorimetreleri ve LAr hadronik uç kapağı kalorimetresi, hadronların enerjisini ölçmek için tasarlanmıştır. Kırpıştırıcı karo kalorimetresi bir fiçı ve iki adet uzatılmış silindire ayrılır (Alison, 2012).

Müon Tayfölder: Müonlar daha az etkileşime girdiğinden dolayı menzili diğer parçacıkların menziline daha fazladır. Bu yüzden de algıçta daha fazla ilerleme kaydederler. Sahip oldukları az miktardaki enerjiye karşın her katmanda görülebilirler. Algıcın en dışında konumlandırılır. Sarmal mıknatıstan sonra konumlandırılan ikinci bir güçlü mıknatısın uyguladığı manyetik alan müonların eğrilerini bükür. Böylece yük ve momentum hesabı yapılabilir. Bu manyetik alan çok büyük halkasal bobinler tarafından üretilir. Odacıkların içinde gaz ile doldurulmuş ortasında bir kablo olan binlerce uzun tüp bulunmaktadır. Gelen

⁴⁸ Bir parçacık madde içerisinden geçerken maddeyi oluşturan atomları iyonize eder ve elektronları uyarıp daha sonra foton yaymalarına neden olur. İyonizasyon ile oluşan yükler toplanarak veya uyarılmanın ardından temel seviyeye dönen elektronların yayınladığı fotonlar toplanarak gelen parçacık hakkında bilgi alabilmemizi sağlayan maddeler aktif madde olarak adlandırılır. Buna mukabil sinyal üretme amacı olmadan sadece parçacıkları durdurmak için kullanılan malzemeye pasif madde denilir. Aktif ve pasif maddelerin sandviçlenmesiyle oluşan kalorimetre türüne ise örnekleme kalorimetresi denilir.

müonlar ortamdaki gaz iyonlarını iyonlaştırıp serbest yük taşıyıcıları meydana getirir. Bu yük taşıyıcıları ya dış duvara doğru ya da tüp ve kablo arasındaki yüksek potansiyel farktan dolayı elektronik olarak okunabilen bir sinyal üretirek kabloya doğru hareket ederler. Üretilen bu sinyal bilgisayarlar tarafından işlenir (https://atlas.physicsmasterclasses.org/tr/zpath_atlas.htm).



Şekil 2.8. ATLAS algıcının tasarımı ve alt bölümleri (ATLAS Collaboration, 2010)

2.2.3. LHCb

Açılımı “Large Hadron Collider beauty” (Büyük Hadron Çarpıştırıcısı güzellik) olup amacı standart modelde yapılan kuark karışım yük-eşlem ihlalleriyle ilgili kuramsal öngörülerini kontrol etmek ve yeni fizik konularını araştırmaktır. LHCb, b-hadronların⁴⁹ bozunmalarında yük-eşlem ihlali değerlerini ölçen özel bir

⁴⁹ B-mezonları olarak bilinen $b + \bar{b}$ parçacıkları

b-fizik deneyidir. Bu tür çalışmalar evrenin madde-karşı madde bakışimsızlığını açıklamaya yardımcı olabilir.

BHÇ içindeki 8. kısımda bulunan deney sistemi yerin 100 metre altında, 21 metre uzunluğunda, 10 metre yüksekliğinde, 13 metre genişliğinde ve 5600 ton ağırlığındadır. 17 ülkeden 77 enstitüden 1200'den fazla üyesi bulunmaktadır. (CERN Brochure, 2017)

İki hadronun ağırlıklı olarak aynı ileri konide üretilmesi, LHCb algıcının tasarımında öncü etken olmuştur. Algıç, yatayda 10 ile 300 mrad ve dikey düzlemde 250 mrad değerinde bir kutup açısal kapsama sahip tek kollu bir ileri tayfölçerdir.

Algıcın birçok alt sistemi bulunmaktadır: köşe algıçları (VELO), Çerenkov halka görüntüleme (RICH 1 ve RICH 2) ile mıknatıs, izleyici (TT ile T1-T3), kalorimetreler (SPD, PS, ECAL, HCAL), müon tayfölçerleri (M1-M5).

Berilyum borusu içerisinden geçen proton hüzmeleri algıç boyunca ilerler. Hüzmelerin çarpıştığı ve b ile karşı-b'nin üretildiği yer olan VELO (Vertex Locator)'nun görevi oluşan parçacıkların izlerini takip edip b-mezonlarını seçmektir. Bu işi yapabilmek için 42 adet silikon algıç elemanı çarpışmanın olduğu noktaya sadece 5 mm mesafeyle yerleştirilmiştir.

RICH (Ring Imaging Cherenkov) ise tıpkı VELO gibi parçacık tanımlaması amacıyla üretilmiştir. Aerojel ve flurobutan (C_4F_{10}) gaz ısıyayalarını içeren yukarı akış algıcı RICH-1, 1-60 GeV/c enerji aralığındaki düşük momentumlu parçacıkları tespit etmekte iken tetraflorometan ısıyayarı içeren aşağı akış algıcı RICH-2, 15-100 GeV/c enerji aralığındaki yüksek momentumlu parçacıkları tespit etmektedir. Bunun için Çerenkov ışıınımını ölçer. Parçacık hareket ederken RICH algıçlarının sahip olduğu aynalar yardımıyla duyaçlara yansıtılan bir ışık konisi yayar. Böylelikle algıçlar b-mezonlarının bozunmasından kaynaklanan pionları, kaonları ve protonları tanımlayabilir.

1450 tonluk çelik çerçeve içerisine yerleştirilen 27 ton ağırlığındaki bobinlerin her biri 3000 metrelik alüminyum kabloya sarılmıştır. Çift kutuplu

mıknatıslar 4 Tm büyüklüğünde manyetik alan sağlayıp parçacığın izlediği yolu bükerek parçacığın kimliğini belirlemeye yardımcı olur.

İzleyici sistemi, Dış İzleyici ve Silikon İzleyici olarak iki kısma ayrılır. Silikon izleyiciler, Tetikleyici İzleyici⁵⁰ ve İç İzleyici⁵¹ olup parçacık hüzmesine yakın yerleştirilmiştir olup geçen parçacıkları tespit etmek amacıyla silikon mikro şerit algıçları kullanılır. Yüklü olan parçacıklar algıç içindeki silikon atomlarıyla çarpışır ve elektronları serbest bırakır. Her bir izleyici tabakasında oluşan sinyaller parçacığın izini belirlemek için kullanılır. Dış izleyiciler (T1-T3) parçacık hüzmesinin uzağına konumlandırılmıştır ve içerisinde Argon (%70) ile CO₂ (%30) gazı karışımı bulunan birimlerdir. Her birimde iç çapı 4,9 mm olan iki aşamalı sürüklenme tüpü tabakası bulunur. Toplamda 72 adet olan birbirinden bağımsız birimler dört adet hareketli alüminyum çerçevede bulunmaktadır. Yüklü bir parçacık ortama girdiğinde gaz moleküllerini iyonize eder ve elektronlar üretir (<http://lhcb-public.web.cern.ch/lhcb-public/en/Detector/Trackers-en.html>).

Kalorimetre sistemi elektronları, fotonları ve hadronları tanımlamak için kullanılır. LHCb'deki Hadronik Kalorimetre⁵² (HKAL) hadronların tanımlanmasında, Elektromanyetik Kalorimetre⁵³ (EKAL) ise fotonların ve elektronların tanımlanmasında kullanılır. Bir diğer kalorimetre olan Parıldayan Altlık Algıcı⁵⁴ sisteme isabet eden yüklü veya yüksüz parçacıkların yapısını belirler. Ön-Duş Algıcı⁵⁵ ise parçacığın elektromanyetik özelliklerini kontrol eder.

Son kısımda bulunan müon sistemleri ise diğer alt algıçlarda durdurulamayan müonların tespitinde yer alır. 5 adet alt bölümden (M1-M5) ve çok telli orantılı sayaçtan (Multi Wire Proportional Chambers, MWPC) oluşur.

⁵⁰ (İng.) Trigger Tracker, TT.

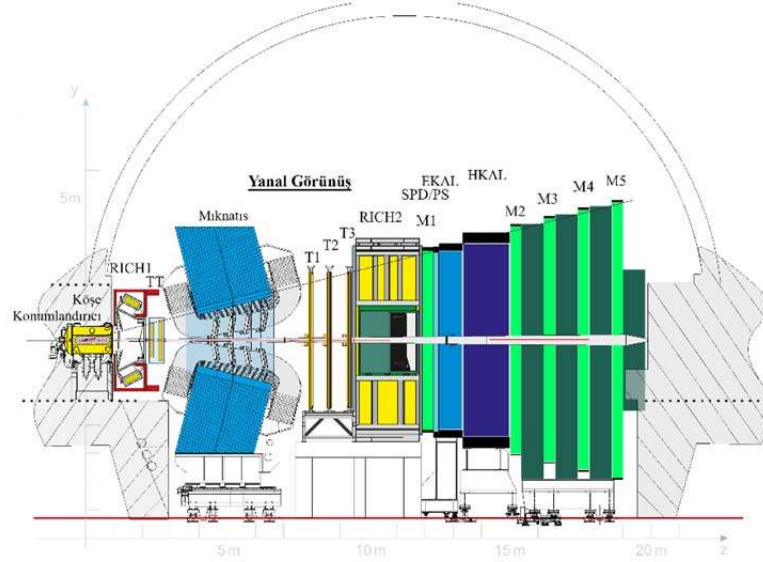
⁵¹ (İng.) Inner Tracker, IT.

⁵² (İng.) Hadron Calorimeter, HCAL.

⁵³ (İng.) Electromagnetic Calorimeter, ECAL.

⁵⁴ (İng.) The Scintillating Pad Detector, SPD.

⁵⁵ (İng.) The Pre-Shower Detector, PS.



Şekil 2.9. LHCb algıcının yandan görünümü (Schmidt, 2016)

2.2.4. LHCf

LHCf (Large Hadron Collider forward, Büyük Hadron Çarpıştırıcı İleri), BHC'de proton-proton ve proton-çekirdek çarpışmalarındaki ışınların doğrultusuna çok yakın olarak üretilen parçacıkları ölçen küçük bir deneydir. Amacı aşırı yüksek enerjili kozmik ışınların birincil enerjisini tahmin etmek için kullanılan modelleri test etmektir. Kozmik ışınlar dış uzaydan gelip Dünya'nın atmosferine çarpıp bir parçacık duşunu tetikler ve çok fazla miktarda yüklü parçacık oluşturur.

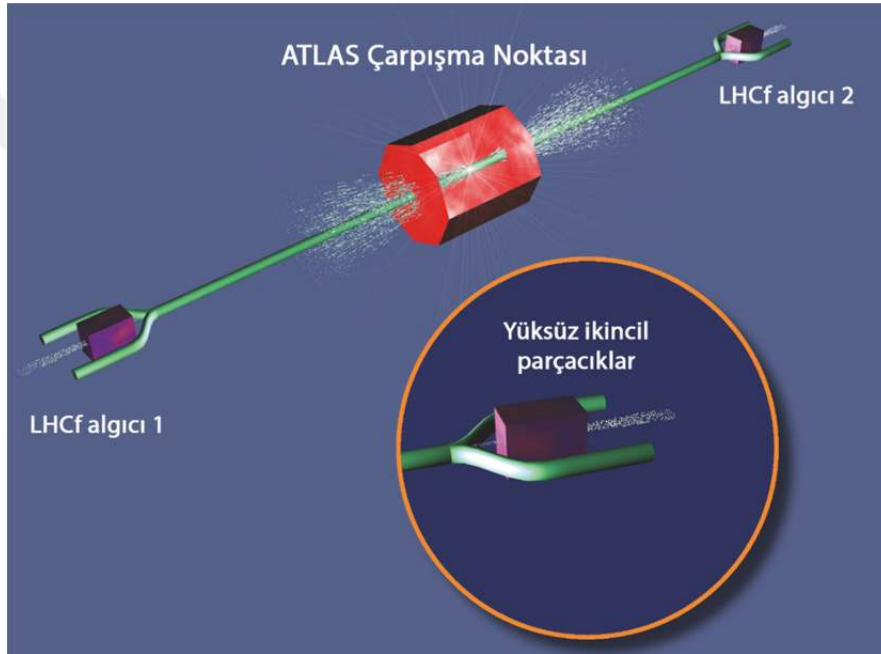
Dört büyük deneyin aksine LHCf, hüzme hattı boyunca demet ekseninin ikiye ayrıldığı yere yerleştirilmiştir. Demet eksenini manyetik alan uygulanarak ikiye ayrılır. Bu manyetik alandan etkilenmeyip yollarına düz şekilde devam eden yüksüz parçacıklar LHCf algıçlarına çarpar.

LHCf, tungsten plakalardan, plastik kırışım laçlardan ve konuma duyarlı duyaçlardan⁵⁶ oluşan Arm-1 ve Arm-2 adlı iki adet görüntüleme kalorimetresinden

⁵⁶ (İng.) Position sensitive sensor. Yüzeydeki ışığın konumu büyük bir doğruluk ve hızla ölçmek için kullanılır. Bu duyaçlar yalnızca birincil olayların enine momentumunu elde

meydana gelir. Bunlar, Yüksüz Emici Hedef ⁵⁷ adı verilen, Kısım 1’de bulunan ATLAS algıcının her iki ucundan 140 metre ötedeki bir yere konumlanmıştır. (<http://hep.fi.infn.it/LHCf/>)

4 ülkeden 14 enstitünün katılımıyla yaklaşık 30 üyesi vardır (2017 Ocak). 40 kilogramlık her bir algıç 30 cm uzunluğunda, 60 cm yüksekliğinde ve 10 cm genişliğindedir.(CERN Brochure, 2017)



Şekil 2.10. LHCf yapısı (CERN Brochure, 2009)

2.2.5. MoEDAL

MoEDAL (the Monopole and Exotics Detector At the LHC, BHÇ’deki Tek Kutup ve Tuhaflıklar Deneyi Algıcı)’ın temel amacı manyetik yüklü bir varsayımsal parçacık olan manyetik tek kutbunun doğrudan aranmasıdır. Bu tek kutuplu algıç, her biri 250 m² olan toplam 10 plaka plastik kırpışımına sahip 400

etmek için değil aynı zamanda kalorimetrelerin kenarlarındaki sızıntı etkisini düzeltmek için de kullanılır. (http://www.isee.nagoya-u.ac.jp/LHCf/About_LHCf.html)

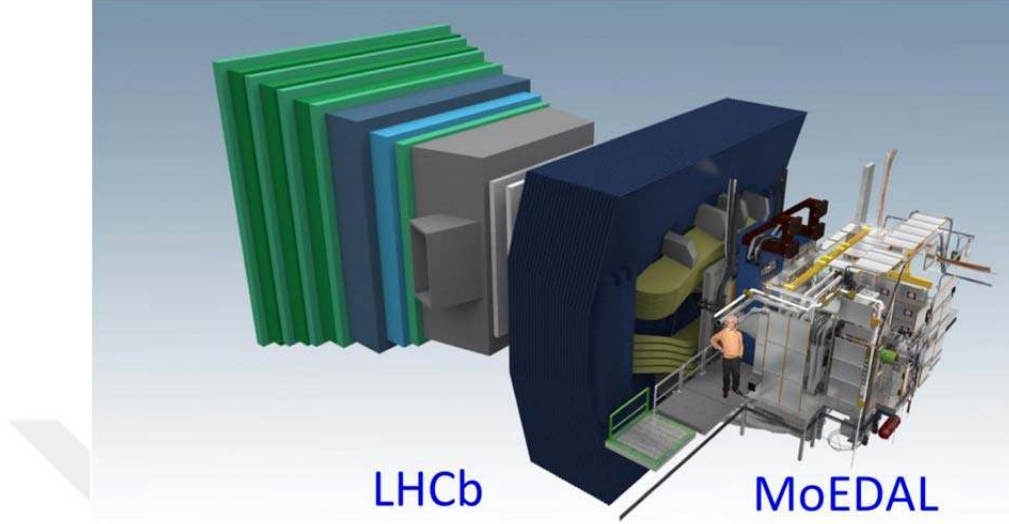
⁵⁷ (İng.) Target Neutral Absorber, TAN.

birimden oluşan bir dizidir. LHCb algıcı ile birlikte Kısım 8'de yer alır. (<https://home.cern/science/experiments/moedal>)

Manyetik tek kutuplar gerçekten mevcutsa BHÇ'deki çarpışmalarda oluşabilirler. Bu tek kutuplar, MoEDAL algıcından geçerek plastik Nükleer İz Algıçlarında (Nuclear Track Detector, NTD) uzun zincirli molekülleri kırar ve 10 plakada oluşan hasarın izi anında oluşturulur. Manyetik tek kutbunun yolunun açık bir göstergesi, çarpışma noktasına geri giden yörüngeyle hizalanmış bir dizi boşluktur. MoEDAL, aynı zamanda, Standart Model'in ötesindeki kuramlar tarafından tahmin edilen, yüksek oranda iyonlaştırıcı Büyük Kütleli Kararlı Parçacıkları (Stable Massive Particles, SMPs) da araştırmaktadır.

Algıç sistemi üç bölümden oluşmaktadır. İlk kısım, yeni fizik konularına odaklı yüksek hızlı tarama mikroskoplarıyla çevrimdışı olarak incelenen plastik Nükleer İz Algıçlarından oluşmaktadır. İkinci kısım, Standart Model ötesi fizik araştırmaları için kullanılabilecek parçacıkları yakalayabilen alüminyum yakalama hacimlerinden oluşur. Üçüncü kısım için planlanan ise parçacıkların geçişi ile oluşan en hafif ışık titremesini (tek foton sinyalleri) tespit edebilen yeni bir aktif algıç elemandır. (<https://moedal.web.cern.ch/content/moedal-detector>)

500 kg kütleyle sahip algıç 0,5×0,75 metrelik 70 adet kutudan oluşmaktadır. 2017 yılı itibari ile 7 ülkeden 15 enstitünün katılımıyla 16 adet üyesi bulunmaktadır. (CERN Brochure, 2017)



Şekil 2.11. MoEDAL algıcının gösterimi. Kısım 8’de LHCb deneyindeki VELO (Vertex Locator) alt algıcının etrafına yerleştirilmiştir (Pinfold, 2014)

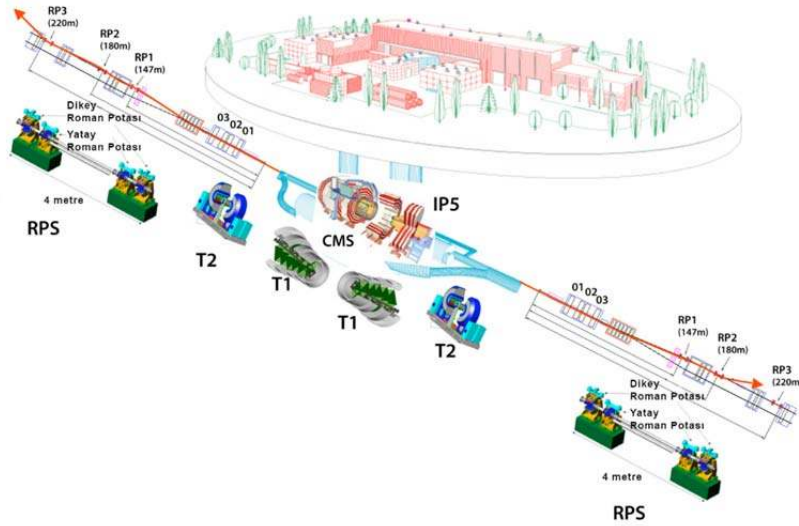
2.2.6. TOTEM

BHÇ’de protonlar kafa kafaya çarpıştıklarında protonların kendisini de içeren birçok olguyu araştırmayı sağlayan bir minik laboratuvar oluşur. TOTEM (Total, elastic and diffractive cross-section measurement, Toplam Elastik ve Kırınımlayıcı Tesir Kesit Ölçümü) deneyi, küçük açılardaki çarpışmalarda ortaya çıkan protonların hassas ölçümlerini (tesir kesiti) yapmak üzere tasarlanmıştır. Parçacıkların tespitini yapabilmesi için BHÇ demetine çok yakın olmalıdır. Deneyin olduğu bölge “ileri” bölge olarak bilinir ve BHÇ deneyleri için erişilmesi zor bir bölgedir.

CERN’in en uzun deneyi olarak bilinen TOTEM deneyinin algıçları CMS’nin çarpışma noktasından itibaren yaklaşık yarım km’lik bir alana yayılmıştır. T1 ve T2 adlı parçacık teleskopları katot şerit odası kullanır ve Gaz Elektron Çoğaltıcılar (Gas Electron Multipliers, GEM) CMS’nin etkileşim noktasındaki çarpışmalarda ortaya çıkan parçacıkları izlemektedir. Roman Kapları/Potaları (Roman Pots, RPS) ise saçılan protonların ölçümlerini gerçekleştiren silikon duyaçlara sahiptir. 1970’li yıllarda Roma’daki fizikçiler tarafından şekilleri

çizilmiştir. “Kap” olarak adlandırılmasının sebebi 1 mm’de (yaklaşık 20 mikrometre hassasiyetle) demete yakın protonların yörüngesini yerelleştirebilen hassas algıçlardan oluşması ve bunların silindirik kaplarda muhafaza edilmesidir. 26 adet olan Roman Kapları aynı zamanda BHÇ’deki demet borusuna bağlanan vakum odalarında bulunan özel bir algıçtır. Her bir Roma Kap istasyonu 4 metre mesafeyle ayrılmış iki üniteden oluşur; her birim yukarıdan ve aşağıdan gelen ışına yaklaşan dikey düzlemde iki kaptan oluşur ve yatay olarak hareket eder. İstasyonlar Kısım 5’teki etkileşim noktasının her iki tarafına, etkileşim noktasından (yaklaşık 147 m ve 220 m) çok uzağa yerleştirilirler. Roman Potaları, duyaçların hem dikey hem de yatay olarak hızlandırıcı vakumda hareket edebilmeleri için eşsizdir. (<http://totem-experiment.web.cern.ch/totem-experiment/>)

TOTEM’in toplam ağırlığı 20 ton civarında olup 8 algıç içermekte ve 440 metreden fazla bir alana yayılmaktadır. 2017 yılı itibari ile 8 ülkeden 11 enstitünün katılımıyla 160’den fazla üyesi bulunmaktadır. (CERN Brochure, 2017)



Şekil 2.12. TOTEM deneyindeki algıçların dizilimi. T1 izleyicileri katot şerit odası, T2 izleyicileri GEM türündedir. (Williams, 2019)

2.2.7. CMS

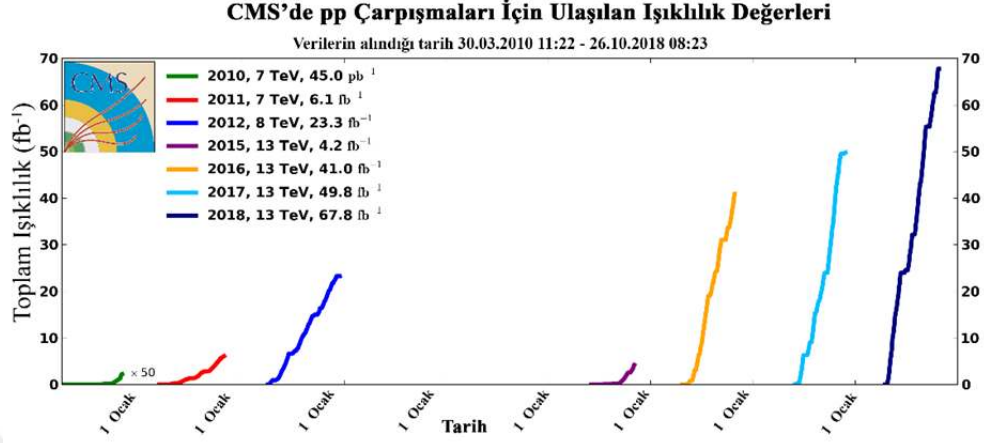
CMS (The Compact Muon Solenoid, Sıkı Müon Sarmalı) deneyi aynı isme sahip algıçla BHÇ'nin genel amaçlı iki deneyinden biridir. Bu isme sahip olmasının nedenleri: içerdiği algıç malzemeleri için oldukça sıkı olması, müon olarak parçacıkları çok doğru şekilde tespit etmek için tasarlanmış olması ve şimdiye kadar yapılmış en güçlü sarmal mıknatısa sahip olmasıdır. Bu tasarımın sebeplerine daha yakından bakacak olursak: en önemli özelliği güçlü mıknatıstır. Yüklü bir parçacığın momentumu ne kadar yüksekse, manyetik alandaki yolu daha az eğimli olur. Tasarlanan bu mıknatıs sayesinde müonlar gibi çok yüksek momentuma sahip parçacıkları doğru şekilde ölçülebiliyor.

CMS'nin mıknatısı, içinden elektrik akımı geçtiğinde manyetik alan oluşturan süper iletken tellerden oluşan bir sarmaldır⁵⁸. Algıçta kullanılan mıknatıs 13 metre uzunluğunda ve 7 metre çapında olup 4 Teslalık⁵⁹ yani Dünya'nınkinin 100 bin katı güçte bir manyetik alana sahiptir. Bu devasa makinede bulunan diğer algıçlar soğansız biçimde olup bu mıknatısın içinde konumlandırılacağından, mıknatıs sıkı bir yapıdadır. Algıcın toplam ışıklılık değeri 2018 itibariyle pp için $67,8 \text{ fb}^{-1}$, PbPb için $1802,7 \text{ } \mu\text{b}^{-1}$ seviyesindedir.

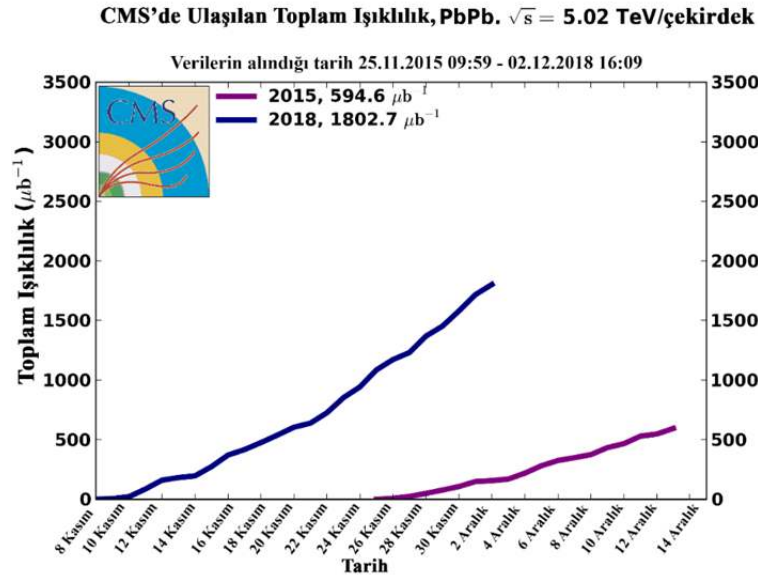
Yerin 100 metre altında bulunan algıç aslında yer üstünde tasarlanıp inşa edilmiş ve 15 parça halinde yerin altına taşınmış ve burada birleştirilmiştir. 21,6 metre uzunluğunda, 15 metre yüksekliğinde ve 15 metre genişliğinde olan algıç 14500 tondur. 36 ülkeden 201 enstitünün 3500'den fazla bilim insanı, mühendis ve öğrenci bu deneyde yer almaktadır. (CERN Brochure, 2017)

⁵⁸ (İng.) solenoid.

⁵⁹ Önlem amaçlı algıç tam güçte çalışmadığından bu değer şu an 3,8 T'dir.



Şekil 2.13. CMS'deki pp çarpışmaları için toplam ışıklılık seviyesinin yıllara göre değişimi
(https://cern.ch/cmslumi/publicplots/int_lumi_cumulative_pp_1.png)



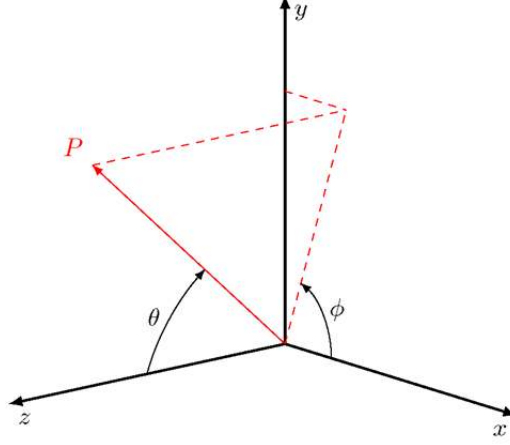
Şekil 2.14. CMS'deki PbPb çarpışmaları için toplam ışıklılık seviyeleri
(https://cern.ch/cmslumi/publicplots/int_lumi_cumulative_pbpb_2_run2.png)

CMS deneyinin araştırdığı konular aşağıdaki şekildedir:

- İleri ve Küçük- x Kuantum Renk Dinamiği Fiziği
- B-Fiziği ve Kuarkonya
- Standart Model Fiziği (Vektör Bozonları ve Jetler)
- Üst Kuark Fiziği
- Higgs Fiziği
- Süpersimetri
- Egzotik Parçacıklar
- İkinci Kuşak Ötesi
- Ağır İyon Fiziği
- Karanlık Madde

2.2.7.1. Koordinat Sistemi

CMS tarafından kabul edilmiş bir koordinat sistemi vardır ve buna göre çarpışma noktası orijini temsil eder. Sağ el koordinat sistemini temel alarak z -ekseni parçacık demetinin doğrultusunu gösterirken, y -ekseni düşey olarak yukarı yönü (yerin altında olduğu için aslında yerin üstüne doğru oluyor), x -ekseni ise BHÇ merkezine doğru olan radyal yönü göstermektedir. Düzlemsel (azimutal) açı olarak gösterilen ϕ , x - y düzlemindeki x ekseninden ölçülür (Şekil 2.15). Bunun haricinde kutupsal açı olarak gösterilen θ pozitif z -ekseninden ölçülür. (CMS TDR, 2006)



Şekil 2.15. CMS'de kullanılan koordinat sistemi

Yüksek enerji fiziğinde sıklıkla kullanılan dikine momentum ve dikine enerji kutupsal açı ile gösterildiğinden oldukça önem arz etmektedir. Bu bağlamda söz konusu nicelikler aşağıdaki yöntemle hesaplanır:

$$\begin{aligned} E_T &= E \cdot \sin(\theta) \\ p_T &= p \cdot \sin(\theta) \end{aligned} \quad (2.13)$$

CMS’de zıt yönlerde hızlandırılan parçacık demetleri sabit bir eksen de değil kafa kafaya çarpıştırılmak istenir. Demet içerisinde iki parçacık düşünüldüğünde bunlar tam olarak kafa kafaya çarpışmayabilir. Kimi parçacıklar hiç çarpışmadan geçebilir, bazen yandan çarpabilir, bazen de tam çarpışma gerçekleşebilir. Çarpışma sonucu saçılan parçacıkların tanımlanmasında en önemli etmen saçılma açısıdır. Çarpışmalarda görelî hızlar kullanıldığından Lorentz dönüşümleri gerekmektedir. Bu hesaplama açısından zorluk çıkardığından Lorentz dönüşümleri altında sabit kalan⁶⁰ bir değer olan y ile gösterilen hızlılık⁶¹ kavramı kullanılıp aşağıdaki şekilde tanımlanır:

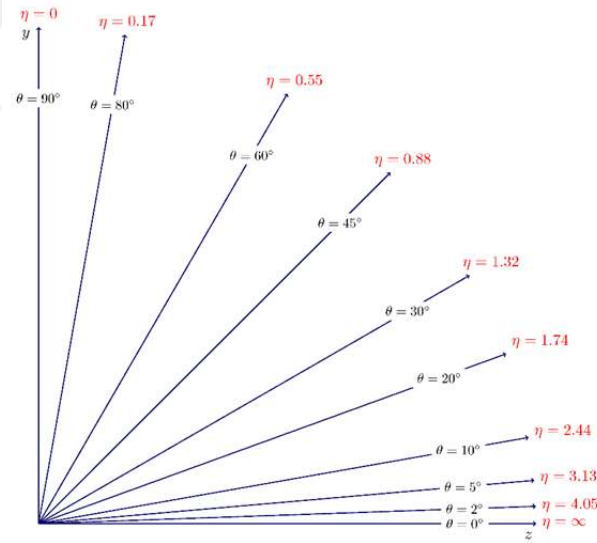
⁶⁰ Bunun ispatı için hızlılığın hızlandırma etkisi altında topluca değiştiğini göstermek kâfidir. https://www.ippp.dur.ac.uk/~krauss/Lectures/QuarksLeptons/Basics/Kin_2.html

$$y = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{E + p_z}{E - p_z} \right) \quad (2.14)$$

Hızlılık hesaplamasında ihtiyaç duyulan toplam momentum değişkeninin görelî hızlarda ölçülmesi zordur⁶². Bu bağlamda ölçülmesi daha basit bir nicelik olan θ ile hesaplanabilen bir kavram kullanılır. Sanal hızlılık⁶³ denilen ve η ile gösterilen bu kavram aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$\eta = -\ln \left[\tan \left(\frac{\theta}{2} \right) \right] \quad (2.15)$$

Parçacık demetine dik olan açılarda sanal hızlılık değeri 0 olurken, daha küçük açılar için bu değer pozitif veya negatif yönde artış gösterir.



Şekil 2.16. η ve θ arasındaki ilişki

⁶¹ (İng.) Rapidity.

⁶² Parçacıklar z -ekseni yönünde hareket ederken sahip oldukları enerji ve momentum değerlerinin bilinmelerine karşın çarpışma sonrasında bu değerler bilinmemektedir.

⁶³ (İng.) Pseudorapidity. Daha fazla bilgi için <http://arxiv.org/abs/hep-ph/9705393v1> ve <https://arxiv.org/pdf/1604.02651.pdf> sayfalarına bakılabilir.

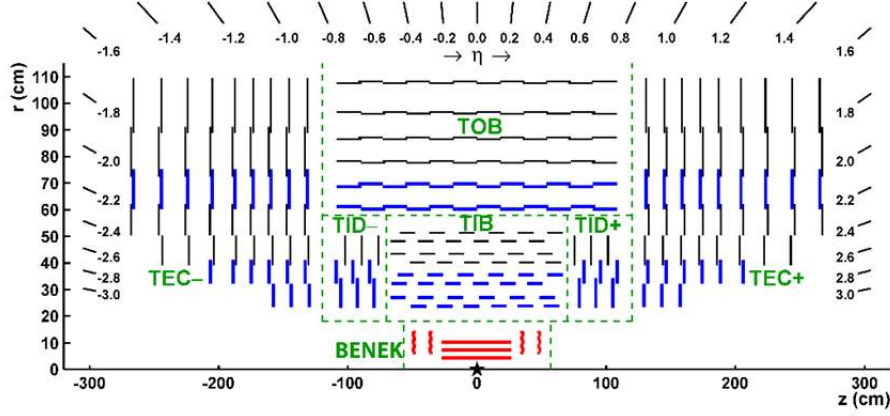
2.2.7.2. İzleyici

Yüksek enerjili müon, elektron, hadron ve b-kuark gibi çok kısa ömürlü parçacıkların algıç içerisindeki hareketleri esnasında enerjilerini kaybederken yönlerinin belirlenmesi ve yeniden yapılandırmayı sağlamak amacıyla oluşturulmuştur. Çarpışmada gerçekleşen olayların resmini oluşturmak için parçacıkların momentumu, yükü ve olay köşesi çok önemlidir. Parçacığın momentumunu hesaplamak için parçacığın manyetik alan etkisi altında yörüngesinin bükülmesine bakarız. Eğer momentum az ise parçacık daha fazla eğilir. Bükülmenin yönü ise bize parçacığın yükü hakkında bilgi sağlar. Bu olgu parçacığın yörüngesinin manyetik alana dik yönde olmasından kaynaklanır. Eğer artı yüklü bir parçacığın yörüngesi saat yönünde bükülmüşse, eksi yüklü parçacığın yörüngesi de saat yönünün tersine doğru bükülür. Parçacığın yükü hakkında bilgi edindikten sonra momentum hesabı da yapılabilir. Bunun için parçacığa etki eden merkezci kuvvet (mv^2/r) ile manyetik kuvvetlerin (qvB) eşit olması ilkesi temel alınır. Parçacığın momentumu ($p = qRB$) formülü ile hesaplanabilir. Burada q elektrik yükü, B manyetik alan ve R eğrilik yarıçapıdır. Temel çalışma mantığı bu şekilde olan izleyicinin toplam uzunluğu 5,8 m, çapı 2,5 m olup $|\eta| < 2,5$ bölgesini kapsar. Tüm hacmi boyunca 3,8 T manyetik alan mevcuttur. İzleyici, etkileşim noktasından dışarıya doğru benek algıcı ve silikon şerit algıcından oluşan merkezi bir fiçı ve uç kapak parçalarından oluşur. Hem benek hem de şerit katmanları farklı boyutlardaki silikon duyaçlardan oluşur. CMS izleyicisi, 200 m²'den fazla aktif silikon alanına sahip dünyanın en büyük silikon izleyicisidir. Yüklü bir parçacık bir silikon duyacıdan geçtiğinde, dış devrede bir vuruş olarak ölçülen elektron deşik çiftlerinin oluşmasına neden olur. Farklı duyaçlardan gelen çok sayıda vuruşun daha sonraki bilgileri, parçacığın izinin yeniden oluşturulmasına yol açar. Bir elektron deşik çifti oluşturmak için gereken enerji küçük olduğundan, bu duyaçların enerji-momentumu çözünürlüğü çok fazladır. Ayrıca, elektronlar dış devreye çok hızlı gittiğinden, zaman çözünürlüğü daha iyidir. Farklı

momentumdaki yüklü parçacıklar, manyetik alanın etkisi altında farklı şekilde kavislidir ve izleyici, çeşitli anahtar noktalarda konumlarını ve eğriliğini bularak parçanın izlerini ve momentumunu kaydeder. (CMS-TDR-5, 1997)

BHÇ'deki ışıklılık ile izleyici hacmindeki her bir buket kesişiminde yani 25 ns'de yaklaşık binden fazla parçacık oluşur. Bu nedenle, yüksek doluluk oranı ile uğraşmanın yanı sıra çok taneciklilik ve hızlı tepki sağlama gibi çok zorlu bir ortamda da çalışabilmelidir. Silikon algıç teknolojisi tüm bu hedefleri çok verimli bir şekilde yerine getirir. İzleyici katmanlarının sayısı, izleme verimliliği ve malzeme bütçesi arasında bir denge oluşturur. Bir tarafta, daha fazla katman daha fazla isabete ve hassas iz yeniden yapılandırmasına⁶⁴ yol açar. Diğer tarafta, izleyicinin içindeki büyük miktarda malzeme birden fazla saçılmaya neden olur ve bu da uygun izlemeyi bozabilir. Vuruşları kullanarak bir parçayı yeniden oluşturmak için en basit yaklaşım en içteki katmandaki bir vuruştan başlayıp radyal yönde bir sonraki katmana bir koni yansıtmaktır. Bir sonraki katman koni içinde hiç bir vuruş içermiyorsa, başlangıç noktası bir gürültü veya çok düşük enerjili bir parçacık olarak düşünülür. Aksi takdirde, son katmana ulaşana kadar işlemi tekrarlamaya devam etmek gereklidir. Daha gelişmiş bir yaklaşım ise aramayı en dış katmandan başlayarak diğer alt algıçlardan ek bilgi alarak başlatır. CMS izleyicinin benek ve şerit katmanlarının bir açıklaması aşağıda verilmiştir. (CMS TDR-5, 1997)

⁶⁴ (İng.) reconstruct.

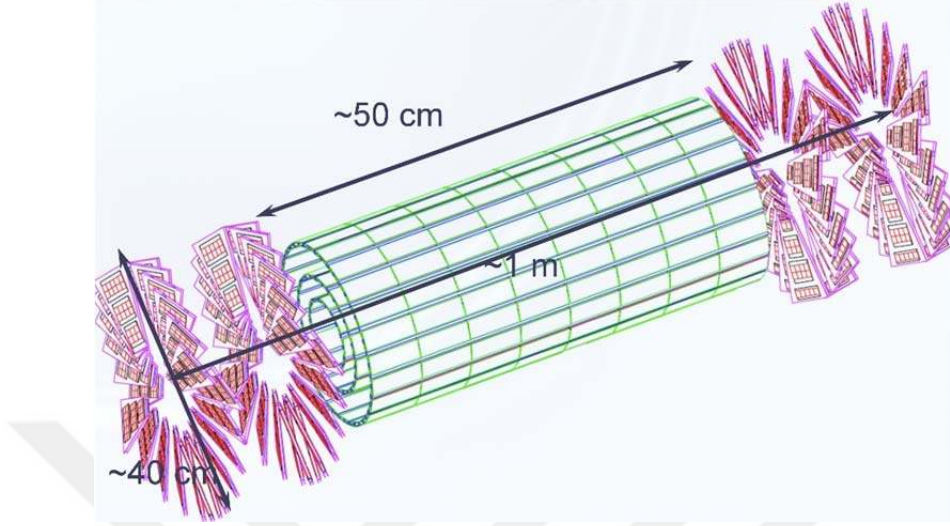


Şekil 2.17. CMS izleyici sisteminin r - z düzleminde enine kesit görünümü, her çizgi bir silikon algıç birimini temsil ediyor.

2.2.7.2.1. Benek Algıcı

Yüksek hassasiyetli benek algıcı, CMS izleyicinin en içteki algıcısıdır. Çarpışma noktasının yakınındaki parçacık akısı çok büyük olduğundan, net bir iz yeniden yapılandırması ve hassas köşe noktası belirlemesi elde etmek için küçük ölçekli bir benek geometrisi oluşturulur. b ve c kuarkları gibi nispeten uzun ömürlü parçacıklar, birincil köşe noktasından kaynaklanır, ancak küçük mesafeler gittikten sonra ikincil köşeler oluşturarak bozular. Benek algıcı, bu ikincil köşeleri birincil çarpışma noktasından ayırt etmek için tasarlanmıştır.

Benek algıcı, üç eş merkezli fıçı katmanından ve her iki taraftaki iki uç kapağındaki diskten oluşur (Şekil 2.18), $\eta < 2,5$ bir sanal hızlilik bölgesini kapsar. Fıçı tabakaları 53 cm uzunluğundadır ve demet hattından 4,4 ile 7,3 ve 10,2 cm yarıçapında bulunur. İki uç kapağı diski yarıçaptan 6 cm ila 15 cm arasında uzatılır ve çarpışma noktasından $\pm 34,5$ ve $\pm 46,5$ cm'de bulunur. Algıç, her biri $100 \times 150 \mu\text{m}^2$ büyüklüğünde toplam 66 milyon benek ile donatılmıştır. Her beneğin doluluk oranı BHÇ demet geçişi başına %0,1 düzeyindedir. (CMS-TDR-11, 2012)



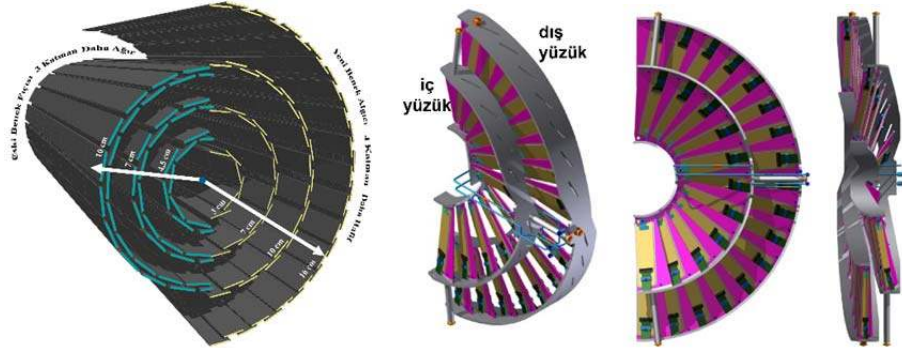
Şekil 2.18. CMS'de bulunan benek algıcının temsili

Benek algıcı, Çalıştırma-1⁶⁵ sırasında son derece iyi bir performans sergiledi, bu, r - ϕ 'de yaklaşık $10 \mu\text{m}$ ve z yönünde $20\text{-}40 \mu\text{m}^2$ 'lik bir çözünürlük ve %99'dan daha fazla bir genel verimlilik sağlar. BHÇ Çalıştırma-2, 2015 yılında 13 TeV'lik kütle merkezi enerjisi ve 25 ns'den daha düşük demet geçiş sıklığı ile başlamıştır. Genel Çalıştırma-2⁶⁶ evresi boyunca, $2 \times 10^{-34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ tepe anlık parlaklığı elde edildi. Aynı zamanda 50'den fazla bir yığılma oranı gördü. Bu koşullar altında, mevcut benek algıcı daha yüksek doluluk oranlarından dolayı artan sahte oranlardan ve düşük çözünürlükten etkilenecektir. Bu nedenle, benek algıcının performansını korumak için, 2016 sonunda teknik durdurma sırasında “Evre-1⁶⁷ Benek Yükseltme” olarak bilinen bir yükseltme yapıldı. Yükseltmiş benek algıcı, 4 fiçı katmanı ve uç kapaklı diskler için türbin benzeri bir birim düzeneğine sahiptir (Şekil 2.19'da gösterildiği gibi). En uygun malzeme bütçesini korumak için hafif destek yapıları ve 2 evreli CO₂ soğutması getirildi. (CMS Collaboration 2014, “Upgrade of the CMS tracker”)

⁶⁵ (İng.) Run-1

⁶⁶ (İng.) Run-2

⁶⁷ (İng.) Phase-1



Şekil 2.19. Evre-1 Benek Yükseltme işlemi sırasında benek algıcı fiçisinde (solda) ve uç kapaklarında (sağda) yapılan yükseltmelerin şematik gösterimi (CMS-TDR-011, 2012)

2.2.7.2.2. Silikon Şerit İzleyici

Silikon şerit izleyici, benek algıcının dışında bulunur ve 15000'den fazla tek veya çift taraflı (Şekil 2.17'de tek ve çift hatlarla gösterilmiştir) birimlerden oluşur. Parçacık akısı, şerit izleyicide azaldığından, şerit birimlerinin boyutları benek algıcının birimlerinden daha büyük tutulur. Doluluk seviyesini %1 civarında tutabilmek için birimlerin boyutu da mesafe ile artar. Birimler fıçı bölgesinde dikdörtgen şeklinde iken uç kapak bölgesinde trapez şeklindedir. Şerit izleyici dört alt sistemden oluşur: İç İzleyici Fıçı (TIB), İç İzleyici Disk (TID), Dış İzleyici Fıçı (TOB) ve Uç Kapak İzleyici (TEC).

TIB ve TID, 55 cm yarıçapa kadar uzatılır ve 4 fiçî+3 uç kapak katmanından oluşur. TIB/TID'deki birimler 320 μm kalınlığındadır ve iç iki tabakada 23 μm ve dış iki tabakada 35 μm konum çözünürlüğü sağlayan $r-\phi$ yönünde 4 ölçüm yapar. Dış fiçî tabakası TOB, $r-\phi$ yönünde 6 ölçüm daha sağlayan, dış yarıçapı 116 cm'ye uzanan 500 μm kalınlığındaki duyaçlardan meydana gelen 6 katmanda oluşur. Bu ilk dört katmanda 53 μm ve son iki katmanda 35 μm çözünürlüğe karşılık gelir. TOB ± 118 cm'ye kadar bir z aralığını kapsar. Bu aralığın dışında $\pm \text{TEC}$ bölgeyi $\pm z$ içinde 124–282 cm ve $\pm r$ içinde 22,5–113,5 cm arasındaki bölgededir. TEC'nin her biri 9 diskten oluşur, böylece yörünge başına $r-\phi$ cinsinden 9 ölçüm yapılır. (CMS Collaboration 2008, “The CMS experiment at the CERN LHC”)

2.2.7.3. Elektromanyetik Kalorimetre

EKAL elektromanyetik etkileşen parçacıkların tespiti için kullanılmaktadır. Bu parçacıkların CMS'deki yüksek manyetik alan, yüksek ısıma seviyeleri ve 25 nanosaniyede bir gerçekleşen çarpışmalara uygun şekilde bulunabilmesi için özel algıç malzemeleri gereklidir. Bu amaç için Kurşun tungsten ($PbWO_4$) kristalleri tercih edilmiştir. Kurşun tungsten aslında metal temelli olup paslanmaz çelikten daha ağırdır lakin içindeki oksijenden kaynaklı olarak elektron ve foton geçişinde parıldama yayan oldukça saydam bir malzemedir. Bu durum parçacığın enerjisiyle orantılı olarak ışık üreteceği anlamına gelir. $PbWO_4$ içeren yüksek yoğunluklu kristaller ışığı oldukça hızlı üretir. Bu yüksek yoğunluklu kristaller, yüksek hassasiyetli, hızlı ve oldukça sıkı yapıda bir algıca izin veren iyi tanımlanmış, çabuk gerçekleşen ve kısa olan foton patlamalarında ışık üretir. Bu üretilen ışık özel ışık algılayıcılar tarafından algılanır.

Işık algılayıcılar yüksek manyetik alan altında çalışabilmek üzere tasarlanmıştır. Bununla birlikte parıldama ışığını tespit edip bunu yükseltir/büyütür. Işık algılayıcılar işleminden geçirdikleri bu parıldama ışığını çözümleme⁶⁸ için gönderilen bir elektrik sinyaline dönüştürebilmek için her bir kristalin arkasına yapıştırılmıştır.

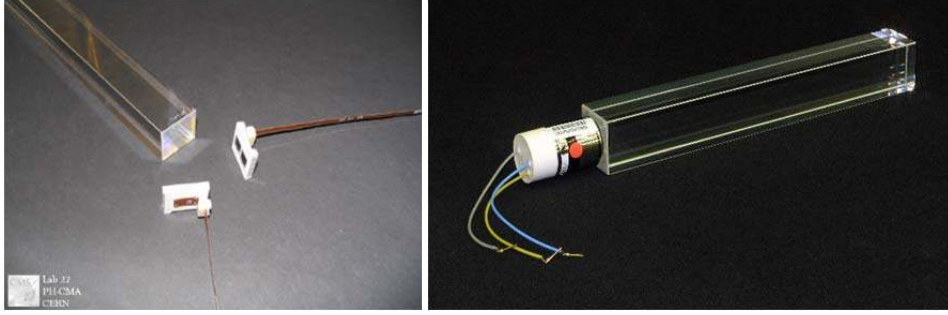
EKAL, fıçı (Barrel, EB) ve uç kapak (Endcap Crystal - Endcap Preshower, EE - ES) adlı iki bölmeye ayrılmıştır. Silindirik yapıda olan fıçı bölmesi iki kısma ayrılmıştır. Her birisinde 18 olmak üzere, toplamda 36 süper birimden oluşur. Süper birimlerin her biri 1700 kristale sahip olurken toplamda 61200 kristal içermektedir. Düz yapıdaki EKAL kapakları, her iki uçta iki adet “D şeklinde” parçaya sahiptir. Her bir D şeklindeki parça 3662 kristal içerirken toplamda 14648 kristal vardır. EKAL daha fazla hassasiyet sağlamak için Ön duş algıçlarını da içerir. Bunlar yüksek enerjili ve düşük enerjili fotonların ayırımını yapmaya olanak

⁶⁸ (İng.) analysis.

sağlar. EKAL'da yaklaşık 80 bin kristal bulunup bu kristallerin her biri 1,5 kilogramdır. (<http://cms.web.cern.ch/news/electromagnetic-calorimeter>)

Kristal kalorimetre malzemesinin olumsuz yanlarından birisi sıcaklık ile olan ilişkisidir. Işığın verimi sıcaklığa bağlıdır ve sistemdeki elektronikler tarafından oldukça fazla sıcaklık artışı olur. Soğutma problemini çözmek için, amaca uygun bir sistem, 100 ton kristalin sıcaklığını 0,1°C'de tutar.

Bir diğer olumsuz yan ise çıkan ışığın veriminin düşük olmasıdır. Sisteme giren parçacığın enerjisinden kaynaklı olarak kristallerde yaratılan parıltı ışığı ışık algılayıcılar tarafından yakalanır, bir elektrik sinyaline dönüştürülür ve sonra da yükseltilir. Yükseltme işlemi sonrası daha da güçlü hale gelen sinyal daha sonra sayısallaştırılır ve optik liflerden uzaklaşır. Işık algılayıcıların da güçlü bir manyetik alan içinde çalışması ve ışımaya karşı dayanıklı olması gerektiğinden seçilen kristal, fıçı için çığ fotodiyotları ya da APD (Avalanche Photo Diodes-Çığ Foto Diyot)'ler ve kapak kısmı için VPT (Vacuum Phototriode-Vakum Foto Triyot)'dir. Çığ Fotodiyotları güçlü elektrik alan uygulanan yarı iletken silikondan yapılmış ışık algılayıcılarıdır. Bir parıltı fotonu silikon içindeki elektrona çarpıp bunu dışarı attığında, elektron elektrik alan içinde hızlanır ve diğer atomlara hızlıca vurup onların da elektronlarını koparır. Bu elektronlar hızlandırıldıkları için aynı zamanda bir elektron çığına sebebiyet verecektir. Bu yöntemle APD'ler kısa bir süre içerisinde çok yüksek bir elektrik akımı üretebilmektedir ki bu elektrik akımı her bir olay parçacığı için nispeten düşük bir ışık verimi olan tungsten kristalleri için gereklidir. Sinyal daha sonra yükseltilir, sayısallaştırılır ve fiber optik kablolarla hemen aktarılır. Böylece çözümleme ışıma alanından uzaklaştırılabilir.

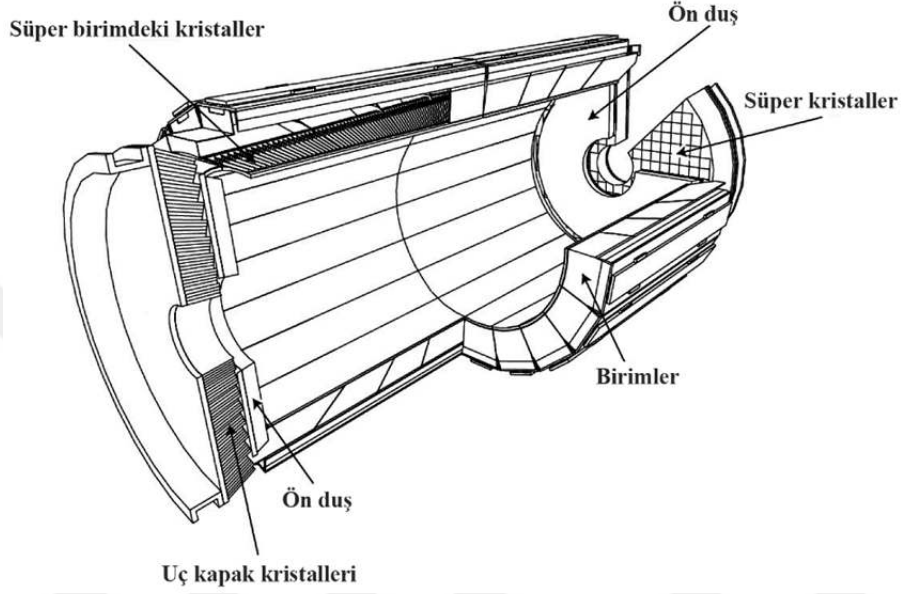


Şekil 2.20. CMS EKAL için PbWO_4 kristalleri, (solda) APD ve fiçı (EB) kristalleri ve (sağda) VPT eklenmiş uç kapak (EE) kristali (Bartoloni ve ark., 2013, <http://hepwww.rl.ac.uk/CMSvpt/bestphotos/Crystal%20Palace/VPT%20and%20Crystal%20Jan%2008.JPG>)

Uç kapaklardaki kristaller, vakum foto triyotlarını (VPT'ler) kullanırlar, çünkü burada ışıma, bir silikon fotodiyodu kullanmak için çok yüksektir. Bir APD'ye karşılık, bir VPT bir vakum içinde üç elektrot içerir. İlk olarak, ışık ilk elektrottaki atomlara normal şekilde vurduğunda elektronlar serbest kalır. Daha sonra elektrotlar arasındaki voltaj farkı, elektronları ikinci elektrota (anot) hızlandırır, daha fazla elektron üretir, bunlar daha sonra üçüncü kısma (dinoda) hızlanır ve ikinci bir elektron kümesi serbest kalır. Böylece bu, sayısal bir sinyale dönüşen ve optik lifler boyunca üst seviye okuma ünitelerine gönderilen küçük bir ilk parıldama ışığından büyük bir akım oluşturur.

Olumsuz yanlarından biri ise ışıma hasarının aslında önlenememesidir. Malzemeyi saflaştırmak için yapılan yoğun araştırmalardan sonra her ne kadar ışımaya karşı dirençli olsalar da, kurşun tungstenin CMS içerisinde sınırlı bir ışıma hasarı yaşayacağı keşfedilmiştir. Ancak, Ar-Ge programı bu zararın nasıl meydana geldiğini daha iyi anlamamıza vesile oldu ve ana sıkıntının ışığın içinden geçişi esnasındaki etkisi ile kristali boyamak olduğunu gördü. Bu olayı çözmek için optik iletim ölçümleri yapılır. Böylece her kristalin içinden ışık sinyalleri gönderimi esnasında "ışık izleme sistemi" kullanılır. Kristaller hızlandırıcı durduğunda (oda

sıcaklığında) doğal olarak atomların tekrar kendi sıralı yapılarına geri döndüğü sırada, ışıma hasarını veya tavlamayı tersine çevirirler.



Şekil 2.21. EKAL tasarımı (CMS TDR 4, 1997)

Malzemenin doğru bir şekilde yapılması EKAL ekibinin zorluklarından sadece biriydi. Çünkü her kristalin kesilmesi, işlenmesi, parlatılması ve bir ışık algıcında test edilmesi gerekir. Daha sonra “süper kristaller”, “birimler” ve “süper birimler” olarak bilinen daha büyük yapılar oluşturmak için kristal grupları cam elyaf veya karbon fiber “cepler” içinde yan yana monte edildi. Söz konusu kristalin teknik özellikleri:

- Fıçı için $2,2 \times 2,2 \times 23$ cm ve uç kapak için $3 \times 3 \times 22$ cm boyutlarında olması,
- EKAL'de 75848 adet kristal bulunması,
- Kurşun tungstenin yoğunluğunun $8,28 \text{ g/cm}^3$ olması

- 2,19 cm gibi kısa bir Molière yarıçapına⁶⁹ sahip olması,
- $X_0=0,89$ cm gibi kısa ışıyım uzunluğuna sahip olmasıdır (<http://cms.web.cern.ch/news/crystal-calorimeter>).

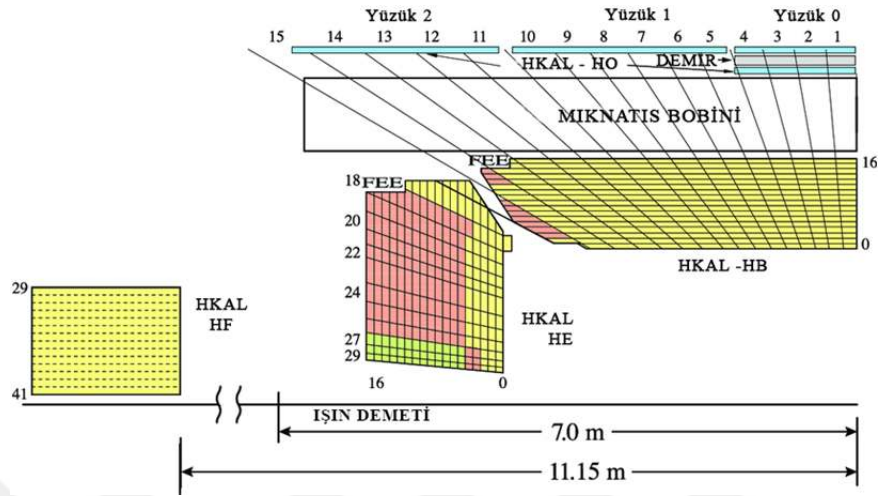
2.2.7.4. Hadronik Kalorimetre

CMS Hadron Kalorimetresi (HKAL) silikon izleyici ve elektromanyetik kalorimetrenin etrafını sarmaktadır. Şekil 2.28’de genel görünümü bulunmaktadır. Dört adet alt algıç sisteminden oluşmaktadır: hadronik fıçı (Hadronic Barrel, HB), hadronik uç kapak (Hadronic Endcap, HE), hadronik dış (Hadronic outer, HO) ve ileri hadronik (Hadronic forward, HF). Hadronik fıçı ve hadronik uç kalorimetreleri süper iletken sarmalın içindeki kriyostatta⁷⁰ konumlanmış olup her ikisi de pirinç gibi bir soğurucu ve plastik gibi aktif ortam⁷¹ kırışımılaçtan oluşan örnekleme kalorimetreleridir. Hadronik dış kalorimetresi süper iletken sarmal kriyostatın dışında bulunan plastik bir kırışımılaç kalorimetredir ve hadronik fıçı kalorimetresinden enerji sızıntısını yakalamak üzere tasarlanmıştır. HF, kuvars lif ve çelikten üretilmiş olup $z=\pm 11,15$ metrede konumlandırılmıştır (CMS TDR, 2006-001).

⁶⁹ Elektromanyetik duşların enine boyutları, Moliere yarıçapı cinsinden en uygun şekilde ölçülür (Leo, 1994).

⁷⁰ Çok düşük sıcaklıkları korumak için bir aygıt.

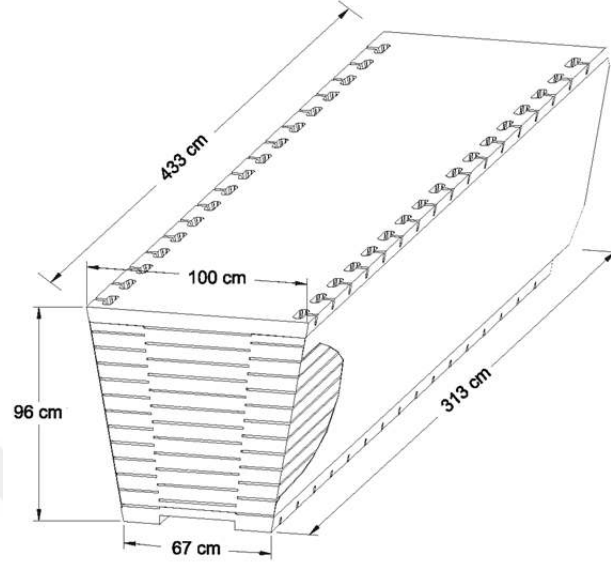
⁷¹ (İng.) Active medium. Geçerli olan ortam anlamına gelmektedir.



Şekil 2.22. HKAL tasarımı (çeyrek dilim) (CMS-CFT-09-019)

2.2.7.4.1. Hadronik Fıçı Kalorimetresi

HB aktif ortam olarak plastik kırışımlaç ve pirinç soğurucudan yapılmış bir örnekleme kalorimetresidir. HB'nin tamamı, her biri 18 pirinç kamadan oluşan iki özdeş silindir yapıdan (toplamda 36 adet) oluşur. Silindir yapıların her biri HB+ ve HB- olarak ifade edilmektedir. HB'nin sanal hızlılık kapsama alanı yaklaşık $\eta=1,4$ 'e ulaşırken ϕ kapsama alanı 360° 'dir. HB'nin kesimlemesi, pirinç kamaların tabakalarına yerleştirilmiş plastik kırışımlaç karoları ile sağlanır. η yönü boyunca 16 kırışımlaç karosu bulunurken ikincisi dört ϕ sektörüne ayrılır. Böylelikle HB'ye sırasıyla η ve ϕ , 0.087×0.087 'de eşdeğer bir kesimleme sağlanır. Her bir kama kalorimetresi 16 kat soğurucu ve 17 kat plastik kırışımlaçtan oluşur; ara katmanlar pirinç soğurucu ve 3 mm plastik kırışımlaçtan yapılırken ilk ve son katmanlar paslanmaz çelikten ve daha kalın olan 9 mm plastik kırışımlaç karolardan yapılır. Elektromanyetik kalorimetre malzemesinde gelişen duşları tespit etmek için ilk katman kırışımlaçtan oluşur. (CMS Collaboration 2008, "The CMS experiment at the CERN LHC")



Şekil 2.23. HB kamasının eş ölçülü görüntüsü (CMS NOTE 2006/138)

Şekil 2.23 HB kamasının şemasını göstermektedir. Her katmanın 16 kırpışım laç karosu, yerleştirilmelerini ve çıkarılmalarını kolaylaştırmak için bir tablaya yerleştirilir. Her karonun kırpışan ışığı, kırpışım laçda yarığa yerleştirilen Kuraray(Y11)⁷² yeşil çift kaplamalı dalga boyu kaydırıcı (wavelength-shifting, WLS⁷³) lifleri tarafından toplanır. Parıldayan karolardan çıktıktan sonra her bir WLS temiz liflerle birleştirilir ve optik bağlantı noktasına gider. Bu noktada, optik kablolar ışığı temiz liften 3,8 Tesla manyetik alan içinde çalışmak üzere tasarlanan 19 beneksel bir hibrit fotodiyot (HPD) içine alır. HB'nin toplam etkileşim uzunlukları (λ_1) sanal hızlılık ile değişir, $\eta=0$ 'da $\lambda_1=5,8$ iken $\eta=1,3$ 'e çıktığında λ_1 değeri de artarak 10,6'ya çıkmaktadır. Son haline getirilmiş HB, Şekil 2.24'te

⁷² Daha fazla bilgi için <http://kuraraypsf.jp/psf/ws.html>.

⁷³ Kırpışım laçta oluşan ışığı foto algıçların algılayabildiği dalga boyuna çevirir. Karolarda üretilen ışığı toplamak üzere optik lifleri kullanır. Bu liflerdeki plastik, ağırlıklı olarak mavi ışığı kırpışım laçtan emen (≈ 410 nm) ve yeşil ışığı (≈ 520 nm) tekrar veren özel boyalarla katlanmışır. Bu yeşil ışığın yaklaşık %6 kadarlık kısmı çekirdek kaplama sınırındaki dâhili yansıma ile lifte yakalanır. Işık liften bir foto çoğaltıcı tüpe iletilir. Işık verimini arttırmak için, lifin diğer ucu cilalanır ve bir ayna yüzeyi oluşturmak için alüminyum ile kaplanır. Böylece ışığın kaçması engellenir.

gösterilmiştir. (CMS Collaboration 2007, “Design, performance, and calibration of CMS hadron-barrel calorimeter wedges”)

Çizelge 2.4. HB'deki kamaların kalınlıkları ve malzeme çeşitleri

Katman	Malzeme	Kalınlık
Ön düzlem	Çelik	40 mm
1-8	Pirinç	50,5 mm
9-14	Pirinç	56,5 mm
Arka düzlem	Çelik	75 mm

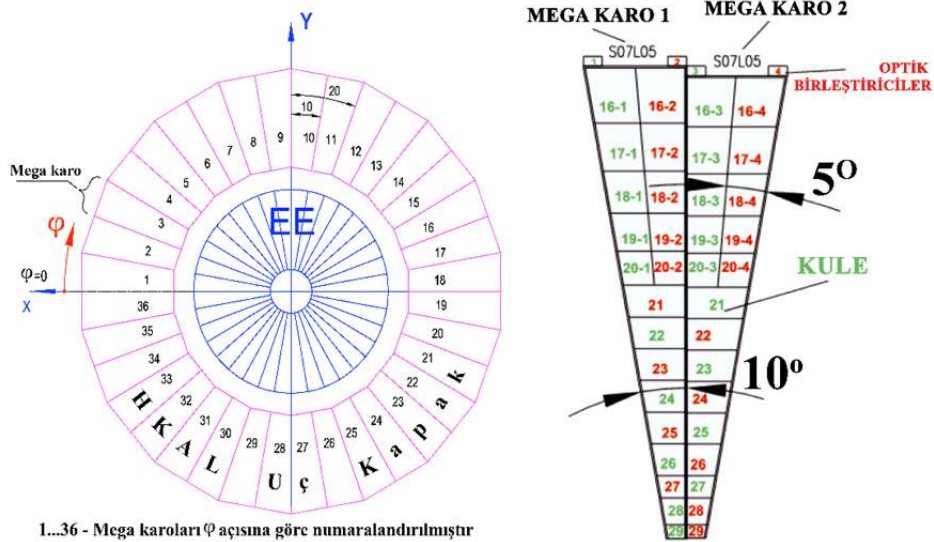


Şekil 2.24. HB'nin bitmiş hali (https://cds.cern.ch/record/622240/files/survey-2003-004_01.jpg)

2.2.7.4.2. Hadronik Uç Kapak Kalorimetresi

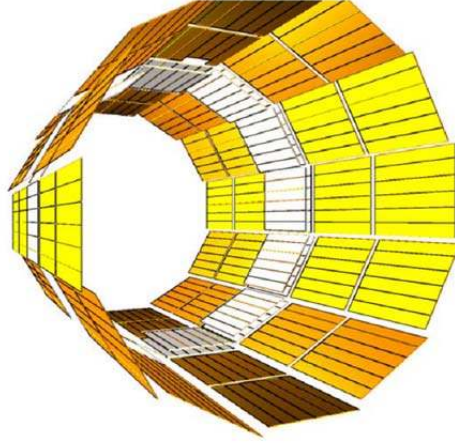
HE, sanal hızlılık aralığı $1,3 < |\eta| < 3$ 'ü kapsayan bir pirinç/plastik kırışımlaç örnekleme kalorimetresidir. HE+ ve HE- olmak üzere algıcın iki

ucunda bulunur. Kırpışım laça uyum sağlamak için 9 mm boşluklu 79 mm kalınlığında pirinç plakalardan oluşur. HE'deki kristalleri içeren toplam malzeme yaklaşık 10 λ 'dır. Plastik kırpışım laçların z-yönü boyunca 18 katmanı vardır: EE'den hemen sonra ilk katman 9 mm, geri kalanı 3 mm kalınlığındadır. Kırpışım laçlar radyal yönde bölümlenir ve kırpışım ışıkları gömülü olan WLS lifleri ile toplanır. Kırpışım laç karoları ve WLS, yamuk bir geometriye sahip tablolara yerleştirilir. Şekil 2.25'te bu tabloların şekli ve dizilimi görülmektedir. WLS, daha sonra optik bir bağlayıcıda sonlandırılan lifleri temizlemek için eklenir. Optik kablolar ışığı optik bağlayıcılardan manyetik alan varlığında çalışabilen HPD'lere taşır. 2018 yılında HPD'ler silikon foto çoğaltıcılar ile değiştirilmiştir. (CMS Collaboration 2019, "First results from the CMS SiPM-based hadronic endcap Calorimeter")



2.2.7.4.3. Hadronik Dış Kalorimetre

Süper iletken sarmalın neden olduğu alan kısıtlamaları, birleşik EB ve HB'nin durdurma gücünü ve dolayısıyla hadronik duşları tamamen içerebilme yeteneklerini sınırladı. Bu sınırlamanın üstesinden gelebilmek için başka bir kalorimetre katmanı olan HO, algıcın orta bölgesinde ($|\eta| < 1,3$) süper iletken sarmalın kriyostatın hemen dışında bulunur. HO, sarmal bobini $\frac{1,4}{\sin(\theta)} \lambda_1$ 'ye eşdeğer bir soğurucu tabaka olarak kullanır. Aktif katman 10 cm kalınlığında plastik kırpışımлаçtır. HO'nun geometrisi, müon sistemiyle sınırlıdır ve bu nedenle z-yönü boyunca 5 halkadan oluşur (her halka yaklaşık 2,52 metredir). HO'nun halkaları sırasıyla -5,342 m, -2,686 m, 0, +2,686 m ve +5,342 m olup z-konumlarında bulunan -2, -1, 0, 1 ve 2 sayıları ile etiketlenir. Merkez halka (halka-0), $r=3,82$ m ve $r=4,07$ m'de yer alan 19,5 cm'lik bir demir levhanın her iki tarafında yer alan 10 cm kalınlığında plastik kırpışımлаç tabakasına sahiptir. Halkaların geri kalanı sadece bir adet 10 cm kalınlıkta kırpışımлаç tabakası içerir ve ilave soğurucu olmaz. Bu, toplam kalorimetre derinliğini, HB ve HE arasındaki sınır dışında (hariç) minimum 12 λ_1 'ye getirir. Her halka 12 aynı ϕ -sektörüne ayrılmıştır; ayrıca, her sektörde ϕ yönünde altı adet kırpışan karo bulunur. Halka-0'daki iki tabaka η yönünde 8 karoya, 1 ve -1 halkaları 6 karoya, 2 ve -2 halkaları 6 karoya sahiptir. Parıldayan karolardan gelen ışık, daha sonra ışığı müon halkalarının dışındaki bir foto algılayıcıya taşıyan saydam lif (bu yaklaşık 4 kat daha uzun bir söndürme uzunluğuna sahiptir) içine eklenmiş gömülü WLS ile taşınır. Son olarak, HO'nun geometrisi Şekil 2.26'da sunulmuştur. (CMS NOTE, 2006/127)



Şekil 2.26. CMS algıcındaki tüm HO tablalarının tasarımı (CMS NOTE, 2006/127)

2.2.7.4.4. İleri Hadronik Kalorimetre

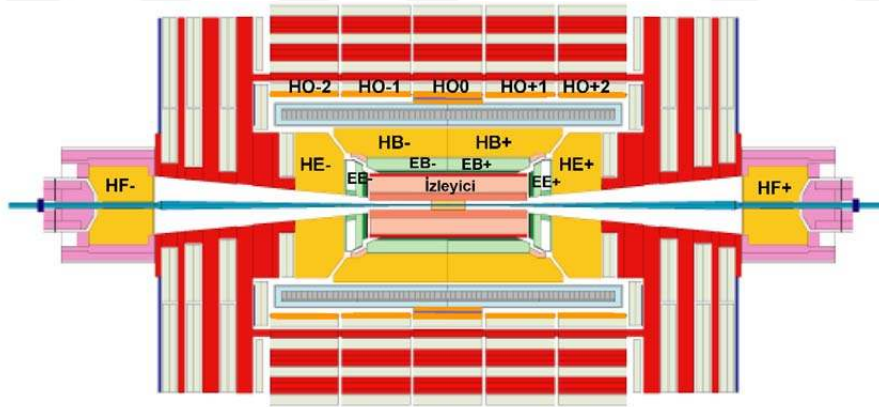
Çarpışma noktasından 11,2 m öteye konumlandırılan HF, $3 < |\eta| < 5,2$ aralığındaki ileri bölgeyi kaplar, böylece önemli miktarda ışıma alır. Bu sert ışıyım ortamı, çelik soğuruculu bir örnekleme kalorimetresinin aktif ortamı olarak ışıyım sertliği özelliklerinden dolayı kuvars liflerinin kullanılmasının ana nedeniydi. HF, 20° 'lik iki kesime bölünmüş (HF+ ve HF- olarak) 18 çelik kamadan oluşan silindirik bir yapıdır (sırasıyla 12,5 cm ve 130 cm iç ve dış yarıçapları olan), her kama z-yönü boyunca gömülü kuvars lifleri içerir. İkincil parçacıklar (çoğunluğu bağlı elektron ve pozitronlar) kuvars liflerin içinden geçerken Cherenkov ışığı yayımlanır. HF'nin ön yüzüne daha yakın üretilme eğiliminde olan elektromanyetik duşların hadronik duşlardan ayrılması için çeliğe iki farklı uzunlukta lif yerleştirilmiştir ve liflerin yarısı HF'nin tüm uzunluğunu ($165 \text{ cm} \approx 10 \lambda_i$) kaplarken, diğer yarı HF'nin ön yüzeyinden 22 cm içeride başlar. Bu iki grup bir borosilikat cam pencerele FÇT⁷⁴ler tarafından ayrı olarak okunur. Şekil 2.27, kuvars liflerle donatılmış HF çelik kamaların bazılarının bir fotoğrafını gösterir.

⁷⁴ Foto çoğaltıcı tüp



Şekil 2.27. Kuvars liflerle donatılan HF tablalarının genel görünümü (<http://cds.cern.ch/record/946271/files/oreach-2005-012.jpg>)

Şimdiye kadar anlatılanlardan sonra genel olarak gördüğümüz alt algıçların konumlandırmaları Şekil 2.28’de gösterilmektedir.



Şekil 2.28. CMS Kalorimetreleri (CMS-PHO-GEN-2012-002)

2.2.7.5. Müon Odaları

CMS müon sistemi, müonları geniş bir kinematik aralıkta tetiklemek, tanımlamak ve onların momentumlarını ölçmek için tasarlanmıştır. İyi bir

momentum çözünürlüğü, müon sisteminin yüksek tanecikliliği ve süper iletken sarmal ile bunun çelik akı dönüşü boyunduruğu tarafından sağlanan nispeten yüksek manyetik alanla sağlanır. Müon sistemi tasarım gereksinimleri aşağıdaki gibidir:

- Birkaç ve 100 GeV arasında eşik değerlere sahip tek ve çoklu müon olayı tetikleme,
- 10 GeV'de %8-15, 1 TeV'de %20-40 müon momentum (sadece müon sistemi) çözünürlüğü elde etmek,
- 10 GeV'de %1-1,5 ile 1 TeV'de %6-17 müon momentum (müon ve izleyici sistemi birlikte) çözünürlüğü,
- 100 GeV'lik müon p_T (kayıp dik momentum)'de %0,1'den az kayıp yük işareti.

Müon sistemi gaz iyonizasyon odası⁷⁵ temeline dayanır. Fizik gereksinimini karşılamak ve geometri kısıtlamalarına uymak için üç farklı teknoloji kullanılır: sürüklenme tüpleri odaları⁷⁶ (ST), katot şerit odaları⁷⁷ (KŞO) ve dirençli plaka odaları⁷⁸ (DPO). 250 ST odası, 540 KŞO ve 610 DPO vardır. Her oda bağımsız olarak çalışır ve müon algıç sistemine yerleştirilir. (CERN-PH-EP/2013-037)

CMS algıcının silindirik geometrisini eşleştirmek amacıyla fiçı kısmı ($|\eta| = 1,2$ bölgesini kapsayan) ve 2 uç kapak kısmı ($0,9 < |\eta| = 2,4$ bölgesini kapsayan) kullanılmıştır. Fıçı kısmı ST odaları ile donatılmıştır, uç kapaklar KŞO'lardan oluşurken, DPO'lar hem fıçı hem de uç nokta bölgelerinde kullanılır. Müon

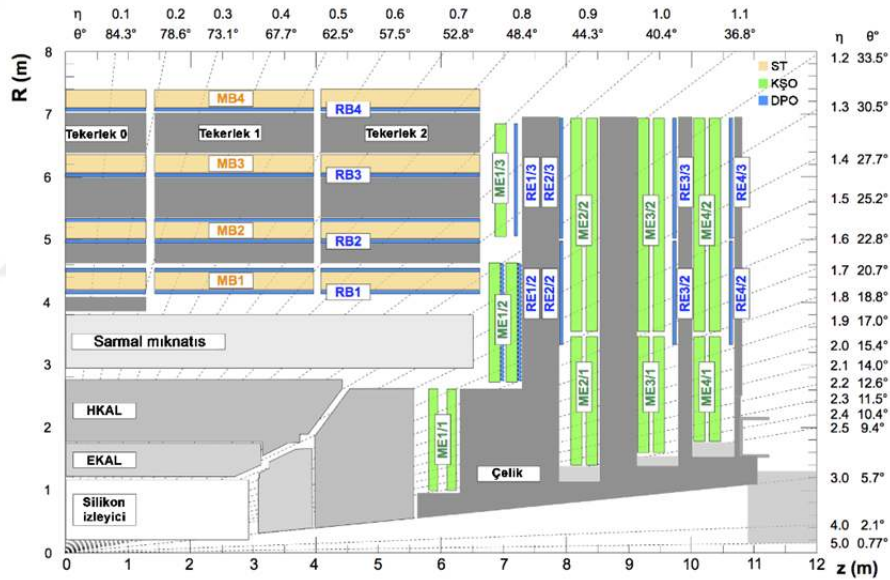
⁷⁵ Gaz dolu bir sistemin merkezindeki anot ve sistemin duvarları (katot) arasına voltaj uygulandığında bu ikisi arasında bir elektrik alan yaratılır. Bir parçacık odacığın içine girdiğinde gaz molekülü içinde iyonize olup negatif elektron ve pozitif iyonlar yaratır.

⁷⁶ (İng.) The Drift Tube Chambers, DT.

⁷⁷ (İng.) The Cathode Strips Chambers, CSC.

⁷⁸ (İng.) The Resistive Plate Chambers, RPC.

istasyonları sırasıyla fıçı ve uç kapak bölgelerindeki sabit r ve z etrafındaki odaların toplamıdır. Fıçı ve uç kapaklarında 4 istasyon vardır, bunlar sırasıyla MB1-MB4 ve ME1-ME4 olarak etiketlenmiştir. Fıçı z -yönü boyunca 5 tekerleğe (Wheel) ayrılır. Tekerlek-0 (wheel-0, W0) $z=0$ 'da ortalanır, W+1 ve W+2 pozitif z bölgesinde bulunurken W-1 ve W-2 negatif z bölgesinde bulunur. Uç kapaklar KŞO'ların ve DPO'ların halkalarını oluşturan r yönünde bölünmüştür. Böylece önceki ME1/n-ME4/n olarak etiketlenir, burada n , radyal olarak dışa doğru artan bir dizindir. Şekil 2.29 farklı algıçları ile müon sisteminin bir düzeninin yanı sıra CMS algıcının diğer sistemlerini de göstermektedir. (CMS TDR 3, 1997)



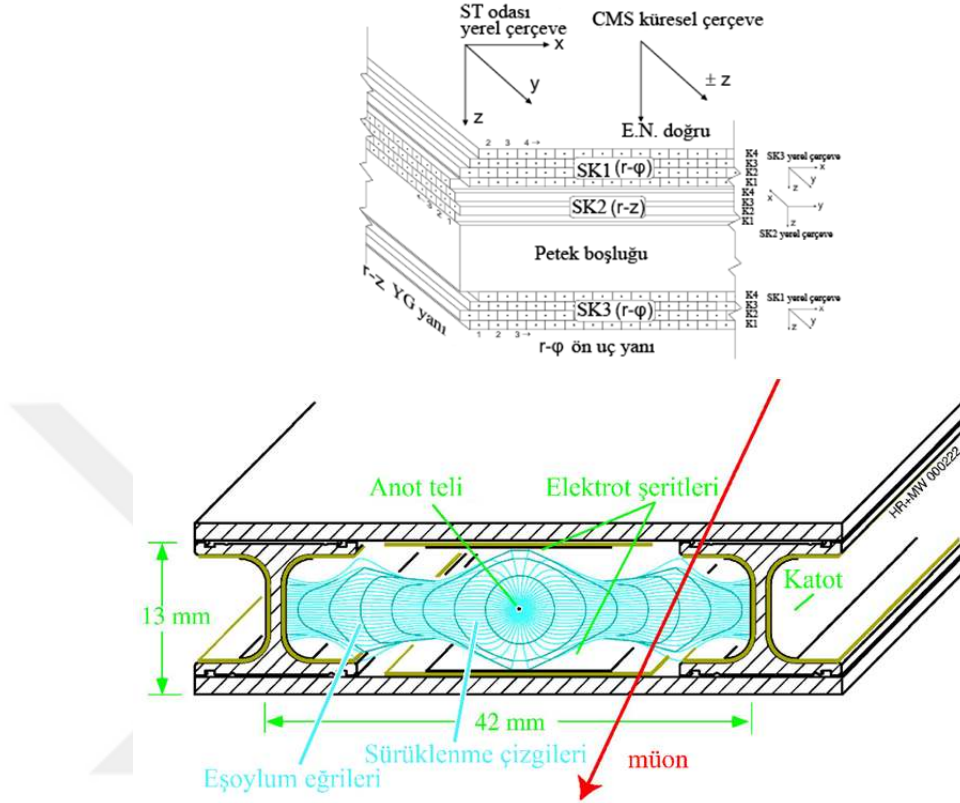
Şekil 2.29. CMS müon sisteminin gösterimi. Farklı alt algıçlar farklı renklerle etiketlenmiştir. Çarpışma noktası sol alt köşedir (CMS TDR 016, 2017).

2.2.7.5.1. Sürüklenme Tüpü Odaları

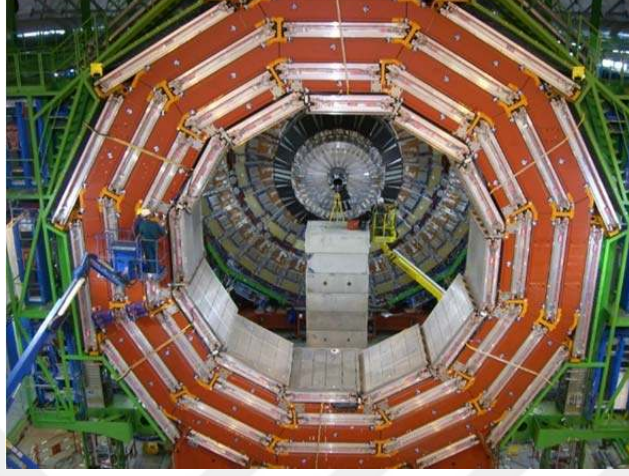
Sürüklenme tüpleri, %85 Ar ve %15 CO₂ gazı karışımı ile doldurulmuş standart dikdörtgen hücrelerden oluşur, bu hücrelere de sürüklenme hücreleri denir. Her hücre enine 42×13 mm² boyutundadır. Merkezde 50 mikrometre çapında bir

altın kaplama paslanmaz çelik anot teli ve elektrik alanı şekillendirmek için hücrenin her bir tarafında dört elektrot (iki katot şeridi içeren) ile donatılmıştır. Anot teli +3600 V'da çalışırken, üst/alt elektrotlar ve yandaki elektrotlar sırasıyla +1800 ve -1800 V'da çalıştırılır. Sürüklenme hücresindeki gaz karışımı, 55 $\mu\text{m/s}$ 'lik bir sürüklenme hızı ve iyi sönümleme özellikleri sağlar. Maksimum sürüklenme süresi 400 ns olarak ölçülmüştür. Sürüklenme hücreleri, bir süper katman⁷⁹ (SK) oluşturmak için 4 paralel ve kademeli katman halinde gruplanır (sıralanır). Tüm sürüklenme tüpleri odaları (MB4'tekiler hariç) z yönünde teller bulunan 2 SK'den oluşur. Böylece $r-\phi$ koordinatlarını ölçülür ve demet borusundan sabit bir mesafede z -yönüne dik çalışan teller ile birlikte bulunan bir SK de $r-z$ koordinatlarının ölçülmesini sağlar. MB4 odalarının sadece bir adet $r-\phi$ SK'si vardır. Şekil 2.30'daki yukarı ve aşağı paneller sırasıyla bir fiçi odası ve bir ST'nin şemalarını göstermektedir. Odalar z -yönünde 2,5 m uzunluğundadır ve enine büyüklükleri MB1 için 1,9 ve MB4 için 4,1 aralığında olup istasyona göre değişmektedir. Şekil 2.31, inşaat sırasındaki fiçi tekerleğinin fotoğrafını gösterir. (CERN-PH-EP/2013-037)

⁷⁹ (İng.) Super layer, SL.



Şekil 2.30. (Yukarıda) Tüplerin konumunu ve yönünü gösteren bir ST odasının şematik görünümü, (Aşağıda) Gaz hacmindeki elektrik alan çizgilerini gösteren bir ST hücresinin yerleşimi (CMS CFT-09-012, 2010 ve CMS-TDR-016, 2017)



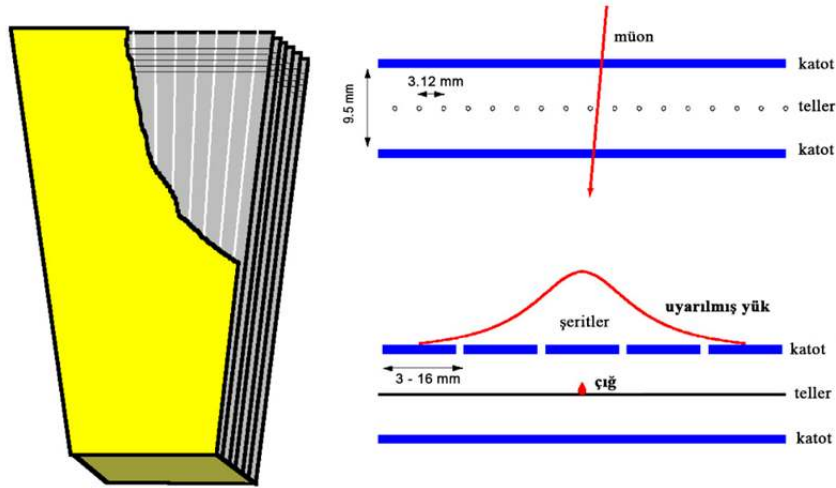
Şekil 2.31. Kurulum esnasındaki bir fiçı tekerleğinin yapısı. Kırmızı renkte olan boyunduruğun çelik plakaları arasındaki alüminyum ST odaları. (http://cds.cern.ch/record/1019185/files/oreach-2007-001_08.jpg)

2.2.7.5.2. Katot Şerit Odaları

Uç kapak bölgelerinde daha yüksek parçacık oranları ve manyetik alanın tek biçimliliğinden dolayı standart sürüklenme tüpleri, bu bölgedeki müonları tespit etmek için iyi bir aday değildir. Bundan dolayı müon uç kapakları katot şerit odalarından oluşur. Bunlar hızlı bir tepkiye sahip olup ince bir şekilde bölünebilir ve düzgün olmayan bir manyetik alanın varlığında çalıştırılabilir (Şekil 2.36 CMS algıcındaki manyetik alan çizgilerini ve yoğunluğunu gösterir). Her bir uç bölge, z -eksenine dik dört disk şeklinde istasyona sahiptir. Uç nokta istasyonları, farklı boyutlarda KŞO'lardan oluşur. KŞO ünitelerinde, her biri r doğrultusunda katot şeritlerine ve şeritlere dik uzanan tellere sahip olan 6 katmana sahiptir. Böylece KŞO birimleri r - ϕ düzleminde 2 boyutlu bir ölçüm sağlar. Bütün KŞO, %50 CO₂, %40 Ar ve %10 CF₄'ten oluşan bir gaz karışımı ile doludur. ME1/1 odaları 2900 V anot voltajında, geri kalanları da 3600 V'da çalışmaktadır. Her bir oda, 2,2 ila 4,7 mradian arasında bir açı yapan 80 katot şeridine sahiptir. ME1/1 anot telleri 30 μ m çapındadır ve 2,5 mm aralıklarla yerleştirilirken, odacık tellerinin geri kalanı 50 μ m

çapındadır ve 3,12 veya 3,16 mm aralıklarla yerleştirilmiştir. (CERN-PH-EP/2013-037)

Odalar arasındaki boşlukları en aza indirmek için alternatif katmanlar kaydırılır. Şekil 2.32’de KŞO’nun şematik gösterimi bulunmaktadır. Buna göre her bir KŞO 7 adet ikizkenar yamuk panelin üst üste bindirilmesi ile oluşur. Paneller, hassas anot tellerinin düzlemleriyle 6 adet gaz boşluğu oluşturur. Üst paneldeki boşluk anot tellerini ve katot şeritlerini ortaya çıkarır. Azimut yönlerini belirtmek için birkaç tel yatay çizgiler halinde gösterilmiştir. İnşaat sırasındaki uç kapaklardan birinin bir fotoğrafı yine Şekil 2.33’de aşağıda gösterilmektedir. (CERN-PH-EP/2013-037)



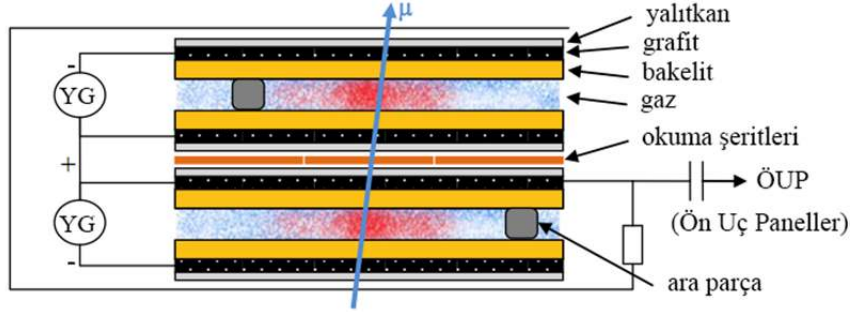
Şekil 2.32. (Solda) CMS'deki KŞO'nun şematik gösterimi, (Sağda) KŞO'ların çalışma prensibi (CMS-TDR-016, 2017)



Şekil 2.33. ME4/2 odasının kurulumu (CMS-TDR-016, 2017)

2.2.7.5.3. Dirençli Plaka Odaları

Müon sisteminin dirençli plaka odaları, BHÇ yüksek parlaklıklarda çalışırken demet geçişini doğru şekilde tanımlamak için mükemmel zaman çözünürlüğüne sahip, tamamlayıcı ve bu işe özel yapılmış bir tetikleme sistemidir. Müon sistemlerinin fiçı ve uç kapakları (Ana sisteme ek olarak sırasıyla ana takip sistemleri, ST odaları ve KŞO'lar) $|\eta| = 1,6$ 'ya kadar daha düşük p_T eşikleri ile bağımsız bir tetikleme sağlayan DPO'larla donatılmıştır. Dirençli plakalar, 2 mm kalınlığındaki bir gaz boşluğu ile ayrılan iki 2 mm kalınlığında dirençli Bakalit plakadan oluşan çift boşluklu bölmelerdir. Gaz karışımı %95,2 Freon (CHClF_2), %4,5 izobütan (C_4H_{10}) ve %0,3 kükürt hekzaflorürdür (SF_6). Dirençli plakaların dış yüzeyi iletken bir grafit katmanla kaplanır ve 9600 V'ta çalıştırılır. (CERN-PH-EP/2013-037)



Şekil 2.34. (Yukarıda) CMS'deki çift aralıklı DPO'ların çalışma ilkesi, (Aşağıda) Kurulumdan sonra DPO'nun görüntüsü. Kırmızı renkteki demir boyunduruktur. (CMS-TDR-016, 2017)

DPO'ların geometrisi, ST odalarını ve KŞO'ları açıkça takip eder, bu nedenle, sırasıyla fıçı ve uç kapakların her birinde 4 ve 3 istasyonda düzenlenir. Fıçıda, ilk iki istasyondaki ST odalarının her iki tarafında iki DPO bulunurken, 3. ve 4. istasyonlarda ST odasının önünde yalnızca bir tane vardır. Uç kapaklarda, her bir istasyon farklı radyal mesafelerde 3 halkaya ayrılır. DPO'lar η 'da 8 veya 3

bölüme ayrılmıştır. Şekil 2.29, mavi etiketli müon sistemindeki DPO'ların yerlerini göstermektedir.

2.2.7.6. Süper İletken Mıknatıs

CMS algıcı büyük bir sarmal mıknatıs etrafına inşa edilmiştir. Çarpışmalardan gelen yüklü parçacıkların kesin ölçümlerini ve çözünürlüklerini elde etmek amacıyla 3,8 T büyüklüğünde bir manyetik alan kullanır. Düzgün bir $\vec{B}$ manyetik alandaki yüklü parçacığa etki eden kuvvet

$$F = qVB\sin\theta \quad (2.16)$$

ile hesaplanır. Burada q parçacığın yükü, $\vec{v}$ parçacığın hızı ve θ ise $\vec{v}$ ile $\vec{B}$ arasındaki açıdır. Bu manyetik alanda parçacık $\frac{mv}{qB \sin \theta}$ yarıçapının eğrisini çapraz geçecektir. Buradaki m parçacığın kütlesini temsil etmektedir. Farklı başlangıç hızlarındaki veya momentumlarındaki parçacıkların $\vec{B}$ alanı içinde farklı şekilde eğrileceği yani kavis çizeceği anlamına gelmektedir. Bundan mütevellit $\vec{B}$ içindeki yüklü parçacıkların eğrilik açısının yarıçapının ölçümü, parçacığın momentumunun bir tahminini yapmak için kullanılabilir. Ayrıca momentum çözünürlüğü $\vec{B}$ manyetik alanın büyüklüğüne ve $\frac{\Delta p}{p} = \frac{p}{BL^2}$ olarak sarmalın uzunluğu olan L 'ye bağlıdır. Dolayısıyla yüksek bir manyetik alanın kullanılmasıyla büyük bir çözünürlük elde edilir.

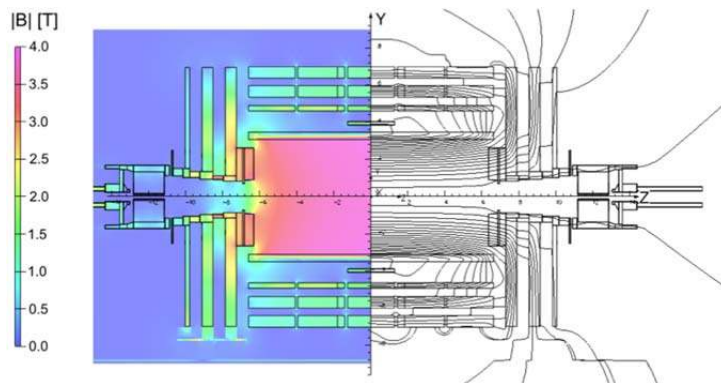
CMS mıknatısı, içinden 19500 A'lık bir akım geçtiğinde 3,8 T'lık yoğun manyetik alan üretebilen Nb-Ti bobinlerinden oluşan 4 katlı sarmal bir mıknatıstır. 220 ton soğutulmuş kütlesi vardır. 13 m uzunluğa ve 5,9 m iç çapa sahip mıknatıs, izleyiciyi ve kalorimetreleri içine alır. Genel olarak üç parçadan oluşur: bobin, vakum tankı ve boyunduruk. Vakum tankı bir kriyostat görevi görür ve sıvı He kullanarak sarmala temel soğutma sağlar. Dönüş boyunduruğu demirden yapılır ve

mıknatıs bobinin dışında 14 m'lik bir dış çapa ulaşır. 2 T'lık bir alanla manyetik akının geri dönüşünden sorumludur.



Şekil 2.35. Bobinin vakum tankına yerleştirilme denemesi (<http://cds.cern.ch/record/43055/files/magnet-2002-021.jpg>)

Boyunduruk 11 diskten, 5 adet fiçiden ve 6 adet uç kapaktan oluşan 12 taraflı bir yapıdır, müon odaları bunun içerisine yerleştirilmiştir. Mıknatıs içinde depolanan toplam enerji yaklaşık 2,6 GJ'dür. (CMS-TDR-1, 1997)



Şekil 2.36. CMS algıcındaki mıknatısın şiddetinin gösterimi (CMS PAPER CFT-09-015)

2.2.7.7. Tetikleyici

BHÇ'deki çarpışmalarda proton demetlerinin 25 ns'de bir kesişmeleri 40 MHz'lik frekansa karşılık gelir. Her bir kesişimde üretilen ham veri yaklaşık 1 MB'tır. Bu da saniyede 40 TB'lık veriye tekabül eder. Böylesine büyük miktardaki veriyi depolamak ve işlemek oldukça zordur. Bundan mütevellit elde edilen verilere bazı işlemler uygulanarak azaltılması yoluna gidilmiştir. CMS'deki tetikleme sistemi bu işlemi yapmaktadır. Bu sistem ardışık fakat birbirinden bağımsız olan yazılım ve donanım tabanlı otomatik bir sistem olup Veri Edinme Sistemi⁸⁰ (VES) ile birlikte tasarlanmıştır. Seviye-1 (S1) tetikleyici⁸¹ denilen birinci katman/aşama donanım tabanlı bir tetikleyici olup ardından gelen Yüksek Seviye Tetikleyici⁸² (YST) yazılım tabanlıdır. VES ise iki tetikleyici katmanını arasında köprü görevi görmektedir. İlk tetikleyici katmandan veriyi toplayıp sayısallaştırır ve iki tetikleyici katmanına iletir. (CMS Collaboration 2008, "The CMS experiment at the CERN LHC")

2.2.7.7.1. Seviye-1 (S1) Tetikleyici

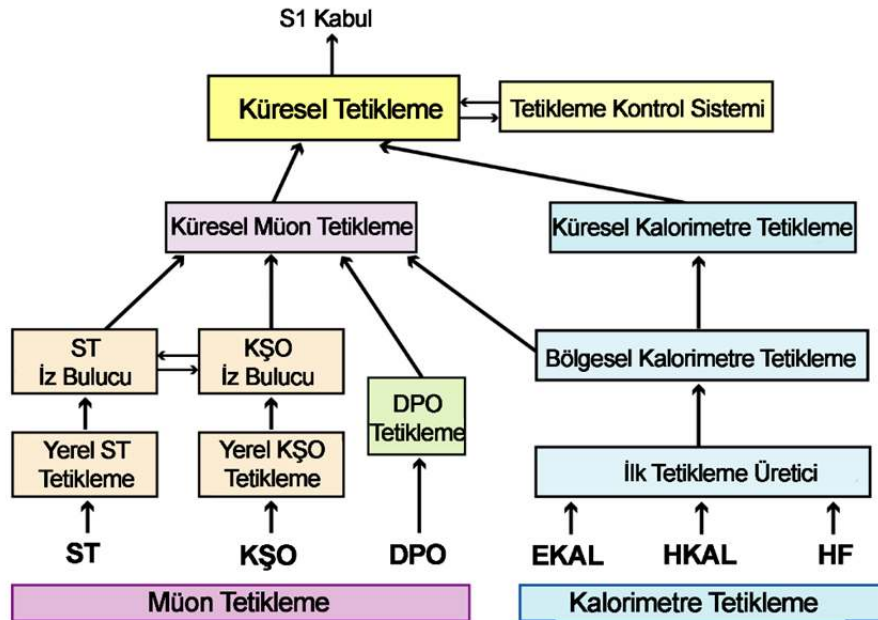
Alanda Programlanabilir Kapı Dizileri (Field Programmable Gate Array, FPGA) ve Uygulamaya Özel Tümlşik Devrelerden (Application Specific Integrated Circuit, ASIC) oluşur. S1 tetikleyicileri özel donanım işlemcileri olarak uygulanırlar. Ön uç elektroniklerde bulunan boru hatlı⁸³ belleklerdeki yüksek çözünürlüklü verileri tutarlar. Buna karşın yalnızca düşük çözünürlüklü EKAL, HKAL ve müon sistemlerinden elde edilen düzgün bölümlenmemiş verileri dikkate alırlar. 40 MHz frekanstaki algıç verilerini alıp bunları 100 kHz'e indirger.

⁸⁰ (İng.) Data Acquisition, DAQ.

⁸¹ (İng.) (Level-1 (L1) Trigger)

⁸² (İng.) High-Level Trigger, HLT.

⁸³ (İng.) pipeline.



Şekil 2.37. CMS'deki Seviye-1 Tetikleyicisinin çalışma düzeni (CMS Collaboration, 2008)

Yerel, bölgesel ve küresel olmak üzere üç bileşenden oluşur. Alınan veriler ilk olarak Basit Tetikleme Üreticileri⁸⁴ (BTÜ) olarak da bilinen yerel tetikleyicilere gelir. Buradan edinilen bilgiler daha sonrasında Bölgesel Tetikleyicilere⁸⁵ (BT) iletilir. Gelen bilgiler burada sıralanıp işlenir ve elektronlar, fotonlar, jetler gibi sıraya koyulmuş tetik nesneleri oluşturur. Bu aşamada Bölgesel Müon Tetikleyicileri⁸⁶ (BMT) fiziksel değerlerin atamasını yapar ve izleri tamamlar. Bir sonraki seviyede, Küresel Kalorimetre Tetikleyici⁸⁷ (KKT) ve Küresel Müon Tetikleyici⁸⁸ (KMT), algıca özgü son tetikleme algoritmalarını uygular. KKT'lerden ve KMT'lerden gelen bu bilgi daha sonra S1 aşama düzeninin en üst

⁸⁴ (Ing.) Trigger Primitive Generator, TPG.

⁸⁵ (Ing.) Regional Calorimeter Trigger, RCT.

⁸⁶ (Ing.) Regional Muon Trigger, RMT.

⁸⁷ (Ing.) Global Calorimeter Trigger, GCT.

⁸⁸ (Ing.) Global Muon Trigger, GMT.

seviyesi olan Küresel Tetikleyicilere⁸⁹ (KT) aktarılır. Burada programlanabilir ilingsel (topolojik) indirgemeler ve enerji eşikleri uygulanır ve S1 Kabul⁹⁰ (S1K) mevcut olayı sürdürme veya sonlandırma kararı verir. S1 Kabul ardından Tetikleyici Zamanlama ve Kontrol⁹¹ (TZK) sistemine taşınır. Böylece TZK sistemi VES'e gideceği ön uçtaki algıca transfer edilir. TZK ayrıca, saat ve yörünge bilgisi sağlamak için BHÇ ile de bağlantı yapar. (CMS-TDR-6, 2002)

2.2.7.7.2. Yüksek Seviye Tetikleme

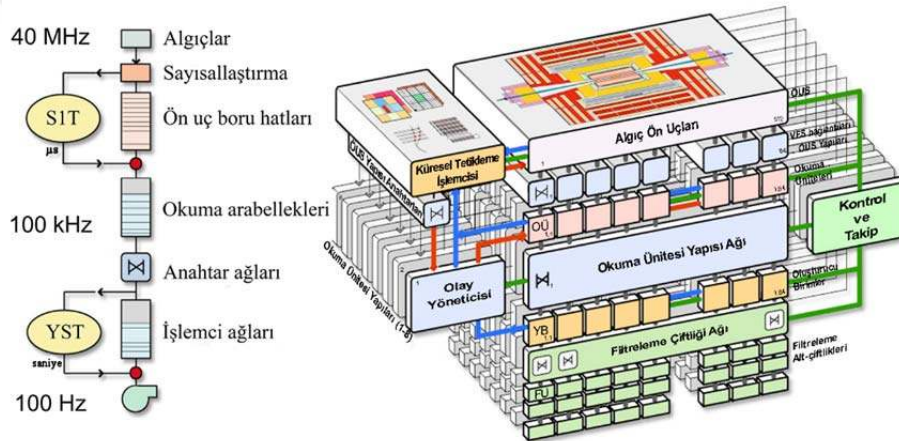
S1 Tetikleyicisinden aldığı 100 kHz'lik verileri 100 Hz'e indirger. Birimsel tarzda olup yazılım tabanlıdır. YST yazılımı yaklaşık 16000 işlemci içeren büyük bir bilgisayar ağında çalışır. Algoritmalar, tam bir ayrıntı düzeyi ve çözünürlük ile izleyici dâhil tüm CMS alt algıçlarından gelen verilere erişebilir. YST kararının zamanı aslında YST'nin hesaplama gücü ve S1 Tetikleyicisinin çıktı oranı ile sınırlıdır. Bu durum YST kararlarının yaklaşık 300 ms'de alınmasına sebebiyet verir ve olasılık dâhilinde sınır aşılsa veriler verimli bir şekilde toplanamayacaktır. YST birimsel tasarımı büyük ölçüde paralel olarak çalıştırılabilecek, mantıksal olarak bağımsız tetikleme yollarına izin verecek şekildedir. Fizik adaylarını (üreticiler olarak bilinir) yeniden yapılandıran ve yeniden inşa edilen nesnelere (filtre olarak da bilinir) çeşitli seçimler uygulayan bir dizi algoritma “tetikleme yolu” olarak bilinir; birkaç tetik yolu bir araya gelerek “YST tetik menüsü” oluşturur. YST birimleri artan bir karmaşıklığa göre düzenlenir, böylece daha hızlı algoritma ilk önce uygulanır ve yine böylece filtreler olayları daha erken bir aşamada iken reddedebilir. Tetikleyici menüdeki tetikleme yollarından herhangi birini geçen olaylar daha ileri çözümlemeler için değerlendirilir ve bunların disklerde depolandığı ve çevrimdışı işleme ve kalıcı depolama için CERN'de bulunan CMS Tier-0 sistemine gönderildiği depolama

⁸⁹ (İng.) Global Trigger, GT.

⁹⁰ (İng.) Level-1 Accept, L1A.

⁹¹ (İng.) Trigger Timing and Control, TTC.

yöneticisine gönderilir. Çevrimiçi olan YST yeniden yapılandırması, hesaplama ve zaman kısıtlamalarını göz önünde bulundurarak çevrimdışı olan YST yeniden yapılandırmasına mümkün mertebe benzer şekilde tutulur. BHÇ'deki veri işleme, olayların diskte depolandığı bant genişliği ile sınırlıdır. Bu genellikle tetikleyici eşiklerinde bir artışa neden olur. Bu sınırlamanın üstesinden gelmek için CMS deneyinde özel tetikleme yolları uygulandı ve olay veri boyutu küçük tutuldu, böylece tahsis edilen bant genişliği zorlanmadan daha fazla olay kaydedebilir hale geldi. (CMS-TDR-6, 2002)



Şekil 2.38. CMS Tetikleme Sistemi Veri İşleme Sistemi (Haloyo, 2013)

2.2.7.7.3. Veri İşleme Sistemi

Veri İşleme Sistemi, algıcın ön uç birimlerinde depolanan verileri toplayan ve daha sonraki işlemler için YST filtre ağına teslim eden bir taşıyıcı olarak çalışır. Bunun için öncelikle Ön Uç Sistemler⁹² (ÖÜSİ) sürekli olarak veri depolar. Ardından bu veriler TZK'ye yoluyla çıkarılır ve Ön Uç Sürücülere⁹³ (ÖÜSÜ) gönderilir. ÖÜSÜ yaklaşık 700 adet olup ortalama 2 kB boyutundaki parçaları

⁹² (Ing.) Front-Ends System, FES.

⁹³ (Ing.) Front-Ends Driver, FED.

okumaktadır. ÖUSÜ'ler verileri bastırır, dönüştürür ve sıfırlar. Daha küçük parça boyutuna sahip ÖUSÜ'ler için Ön Uç Okuma Bağlantılarına⁹⁴ (ÖOB) iki ÖUSÜ'yü okur ve parça boyutlarını dengelemek için parçaları birleştirir. Bu ÖOB'ler olay oluşturmaları olarak da bilinir. ÖOB'lerden gelen veriler daha sonra filtre ünitelerine (Filter Unit, FU) iletilir. YST, FU'ların üzerine monte edilir ve işlemlerini gerçekleştirmek için bilgi işlem gücünü kullanır. Bu ÖUSİ, ÖUSÜ, ÖOB ve FU'ların hepsi VES'nin farklı kısımlarını oluşturur. VES'yi herhangi bir geri basınçtan korumak için bir Tetikleme Azaltma Sistemi⁹⁵ (TAS) de tasarlanmıştır.

2.2.7.8. Yükseltmeler

BHÇ'deki ilk proton demeti Eylül 2008'de harekete başladı. O dönemde iki mıknatista meydana gelen bir arıza neticesinde helyum gazı tünele sızmış ve hasara sebebiyet vermiştir. 2 yıl süren tamirden sonra Mart 2010'da Çalıştırma-1 başladı ve 2012 yılına kadar devam etti. Doğabilecek herhangi bir sorunu önlemek amacıyla cihaz en yüksek güçte çalıştırılmadı. Bunun yerine $\sqrt{s}=7$ TeV'de çalıştırıldı. 2012 yılının sonunda uzun kapanma dönemine girdi ve 2015 yılına kadar bakım-yükseltme çalışmaları yapıldı ve ardından $\sqrt{s}=13$ TeV'e çıkartılmış oldu. Çalıştırma-2 adı verilen bu yeni dönemde, 2016 yılında ilk kez tasarımdaki anlık parlaklığa ulaştı. Evre-1 Yükseltmesi olarak adlandırılan bu dönemde birçok önemli değişiklik yapıldı. Müon sisteminde, tetikleyici için ek girdi sağlamak üzere ek DPO ve KŞO istasyonları kuruldu. VES'nin bant genişliği artırıldı. En içteki benek katmanının çapının küçülmesini sağlamak için, 58 mm'den 45 mm'ye düşürülen bir çapa sahip yeni bir demet hattı yerleştirildi. HF'ye daha ince optik pencerelere sahip yeni çok anotlu foto tüpler yerleştirildi. HO kalorimetresindeki hibrit foto algıçlar daha çok verim sağlayan silikon foto çoğaltıcılarla değiştirildi. 2017/2018 yılındaki duraklamada aynı foto çoğaltıcılar HE kalorimetresine

⁹⁴ (İng.) Front-end Read-out Link, FRL.

⁹⁵ (İng.) Trigger-Throttling System, TTS.

yerleştirildi. 2019-2020 yılında ise HB kalorimetresine yerleştirilmesi planlanmıştır. Yükseltmenin ardından ışıklılık değeri artacağından bu daha fazla veri girdisine ve ışımaya sebebiyet verecekti. İş bu gereklilikleri karşılamayacak olan benek algıcının okuma yongaları verimsizliğe yol açacağından yeni bir benek algıcı kurulmuştur.

Ekim 2018 itibari ile BHÇ'deki çarpışmalar durdurulmuştur. 2019 yılına kadar algıç veri alımına devam etmiş olup yükseltme işlemleri için veri alımının bitişiyle 2,5 yıllık bir araya girilmiştir. Çalıştırma-3⁹⁶ için başlama tarihi 2021 olarak belirlenmiş olup $\sqrt{s}=14$ TeV'lik enerji ile başlayacaktır. Bu çalışma süresi üç yıl olup 2024 yılında tekrardan yükseltme işlemleri için durdurma gerçekleşecektir.



Şekil 2.39. BHÇ yükseltme takvimi (Apollinari, G.ve ark, 2017)

Evre-2⁹⁷ yükseltmesinin 2023 yılında bitmesi beklenmektedir. Bu süreç içerisinde hem benek algıcı hem de şerit izleyici değiştirilecektir. Artan ışıklılıktan kaynaklı olarak çok fazla yığılma olacaktır. Bununla baş edebilmek için yüksek tanecikli yapıya sahip hale getirileceklerdir. EKAL ve HKAL'daki uç kapak kalorimetreleri de çok tanecikli sürümleriyle (HGCAL) değiştirilecektir. EKAL'daki fiçı kısmında bulunan kristaller ve APD'ler korunacak ancak okuma

⁹⁶ (İng.) Run-3

⁹⁷ (İng.) Phase-2

elektronığı tamamen değiştirilecektir. HKAL'da kırpışım laçlar, lifler ve silikon foto çoğaltıcılar değiştirilmeyip arka uç elektronik değiştirilecektir. Müon sisteminde bulunan ST ve KŞO'ların okuma elektronikleri de tetikleme gecikmesinin önüne geçmek amacıyla değiştirilecektir. Uç kapaklarda ise $1,6 < |\eta| < 2,2$ Aralığında yeni bir Gaz Elektron Çarpanı (Gas Electron Multiplier, GEM) katmanı kurulacaktır. (CMS-TDR-014, 2017)



3. MATERYAL METOT

Bu bölümde yazılan tüm yazılar ve paylaşılan görseller aksi belirtilmedikçe CMS TDR 019, 2017 kaynağından alınmıştır.

CMS’de hem düzenli hem de ihtiyaç dâhilinde yapılan yükseltmelerin nihai amaçlarından birisi de CMS algıcını daha yüksek ışıklılık değerlerinde çalışabilecek duruma getirmektir. BHÇ’nin anlık ışıklılık değeri YI-BHÇ⁹⁸ evresiyle yaklaşık 2026 yılından sonra $5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ değerine çıkacaktır. 2030 yılının ortalarında ise toplam ışıklılık değerinin 3000 fb^{-1} ’a ulaşması beklenmektedir. Bu yüksek değer beraberinde daha yüksek parçacık akılarına, ışıma seviyelerine ve yığılmalara kapı açmaktadır.

Mevcut kalorimetreler, PbWO_4 tabanlı elektromanyetik kalorimetre ve plastik kırpışım laç tabanlı hadronik kalorimetre, 500 fb^{-1} ’lık dâhili bir parlaklık için tasarlanmıştır. Kalorimetrenin algılayabileceği parlaklık seviyesinin çok daha üstüne çıkılması performans düşüşü yaratıp, kabul edilemez bir fizik performansı kaybına da yol açar. Ayrıca uğradıkları ışımadan kaynaklı bazı kısımlar fiziki hasara da uğrarlar. Durumu çözmek adına CMS işbirliği, mevcut kalorimetrelerini “HGCal⁹⁹” olarak bilinen yeni bir, çok tanecikli uç kapak kalorimetresi ile değiştirmeye karar verdi. Bu yeni parça hem elektromanyetik hem de hadronik bölümleri içerip daha önce benzeri görülmemiş uzamsal çözünürlüğe sahip olacaktır. Toplamda 52 adet uzunlamasına katmanı, ince silikon duyaçları ve kırpışım laçları bulunan HGCal’ın Şekil 3.1’de üst yarısının uzunlamasına kesiti gösterilmektedir. Şekil 3.2’de ise FLUKA¹⁰⁰ programı ile YI-BHÇ’nin koşullarının akı benzetimi yapılmıştır. Akının konumla hızlı bir şekilde değiştiği ve farklı bölgelerde farklı duyaç teknolojilerinin olasılığına yol açtığı görülmektedir.

⁹⁸ Yüksek Işıklı-Büyük Hadron Çarpıştırıcı.

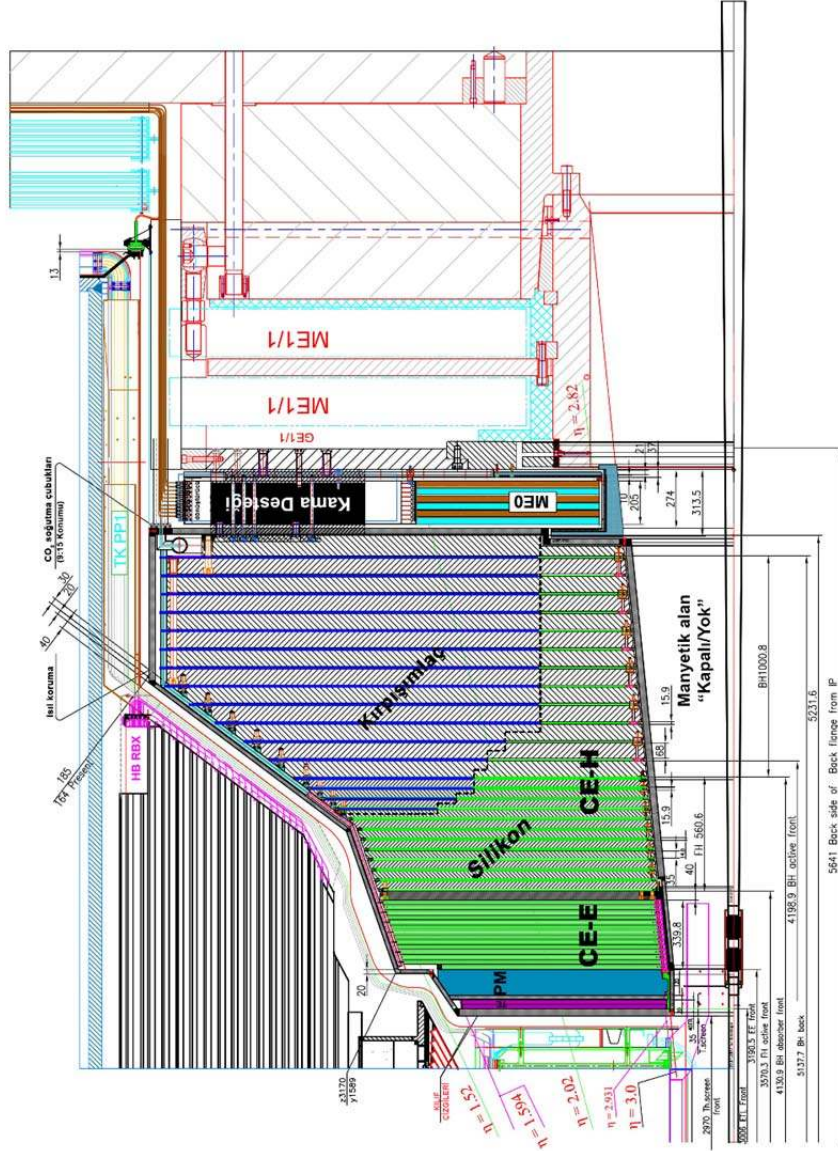
⁹⁹ High-Granularity Calorimeter, Çok Tanecikli Kalorimetre.

¹⁰⁰ FLUKA, parçacık taşınması ve parçacıkların madde ile etkileşmelerini hesaplamak için oluşturulmuş çok amaçlı bir Monte Carlo benzetim kodudur. Daha fazla bilgi için: <http://www.fluka.org/>

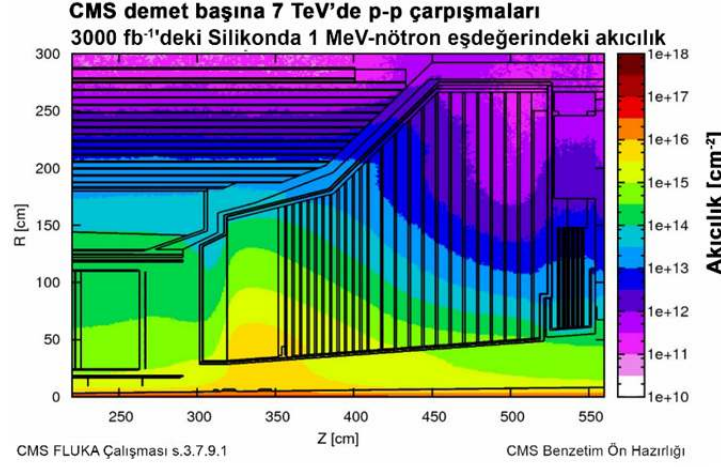
HGCAL yükseltmesinin diğer sebepleri aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- Yüksek ışıklılık yanında yüksek ışımayı da ihtiva etmektedir. Algıç 3000 fb^{-1} 'dan sonraki enerji çözünürlüğünü tamamen korumalı ve de bu yüksek gereksinimlere sahip algıcın kanallarının tek tek minimum iyonize parçacıklarla (MİP) ayarlanması gerekmektedir.
- YI-BHÇ'nin sıkışmış ortamında parçacık akış yöntemlerinin kullanımı için örneklerin tanımlanması kolaylaştırılmalı ve bunun için de duşların yanal uzantısını sınırlayabilecek yoğunlukta olmalıdır.
- MİP ayarlamasına izin verecek kadar yüksek bir sinyal/gürültü (S/G) oranına olanak sağlayacak şekilde ince yanal tanecikli olmalıdır. Ayrıca özellikle silikon bölümünde direnci ve dolayısıyla elektronik ve kaçak akım gürültüsünü sınırlamak için hücre boyutlarının küçük olması gerekir.
- Uzunlamasına duş gelişimini örneklemek amacıyla ince boyuna tanecikli yapıda olmalıdır. Bu, biriktirilen enerjinin tahmin edilmesine ya da belirlenmesine, duşların yönünün ölçülmesine olanak sağlar.
- Önemli miktarda birikmiş enerjiye sahip her bir hücre, hassas zamanlama bilgisi verebilir. Artan enerji birikimi ile hassaslık da artar. Hassas zamanlama, yığılma¹⁰¹ etkisinin azaltılmasına ve seçilen yani tetiklenen etkileşimin köşe noktasının belirlenmesine yardımcı olur.
- YI-BHÇ'de ilginç fizik olaylarının seçimi özellikle uç kapak bölgelerinde çok sayıda yığılma etkileşimi nedeniyle çok zorlayıcıdır. HGCAL, bu seçim işlemini yapan Seviye-1 tetikleyicisine de katkıda bulunacaktır.

¹⁰¹ (İng.) pileup. Algıcın aynı anda birçok olaydan etkilenme durumu. Algıcın okuma süresine ve kapasitesine bağlı olarak okumalar gerçekleşirken diğer olaylar okunmaz. Okunmayan bu olaylar ayrıca kapasitenin üstüne çıkarsa yanlış okumaya da sebebiyet verir.



Şekil 3.1. HGCAL'ın üst yarısının uzunlamasına kesiti (CMS TDR 019, 2017).



Şekil 3.2. FLUKA programıyla CMS uç kapağında r ve z koordinatları boyunca akı benzetimi. HGCal'daki 1 MeV eşdeğeri nötronların akısı, 3000 fb⁻¹'lik bir bütünleşik parlaklıktan sonra gösterilmektedir (CMS TDR 019, 2017).

3.1. Genel Tasarımı

Çok Tanecikli Uç Kapak Kalorimetresi aktif parçaları silikon ve plastikten olan bir örnekleme kalorimetresidir. Elektromanyetik (CE-E) ve hadronik (CE-H) bölüm olmak üzere iki kısma ayrılır. Elektromanyetik bölümde ana soğurucu olarak bakır (Cu), bakır-tungsten (Cu:%25, W:%75), kurşun (Pb) kullanılırken aktif malzeme olarak da silikon duyaçlar kullanılır. Bu silikon duyaçlar hadronik bölümün çok yüksek ışımaya maruz kalan bölgelerinde de kullanılacaktır. Hadronik bölümün dış bölgesi için silikon foto çoğaltıcı (SiFÇ) plastik kırpışım laç karolar kullanılacaktır. Hadronik kalorimetrede kullanılacak olan soğurucu ise çeliktir. Kalorimetrenin tamamı elektronik gürültü ve kaçak akımları yeterince düşük tutup etkin bir şekilde çalışması için iki evreli CO₂ sistemle soğutulup -30°C'lik bir tek soğuk hacme yerleştirilecektir. Bu kalorimetre tasarımı

sayesinde parçacık akış yeniden yapılandırma¹⁰² algoritmaları için gereken yüksek enine ve boyuna taneciklik sağlanır. (Onel, 2018)

CE-E yaklaşık olarak $26 X_0$ $1,7 \lambda_0$ derinlikli olup 34 cm toplam kalınlığındaki 28 adet örnekleme katmanından oluşmaktadır. Aktif algıç elemanı 163 mm genişliğindeki altıgen silikon duyaçtır. Bu duyaçlar 8 inç boyutundaki bir plaka¹⁰³, 1,4 mm kalınlığındaki CuW taban plakası ve bir silikon birim oluşturmak için ön-uç elektronikleri taşıyan baskılı devre kartı¹⁰⁴(BDK) arasına sıkıştırılmıştır. Işıma alanına bağlı olarak duyaçların farklı tüketme kalınlıkları olacaktır. Buna göre silikon kısımdaki en düşük ışıma bölgesinde 300 μm , orta bölgede 200 μm ve en yüksek bölgede 120 μm 'dir. Birimler iki CuW taban plakası ile birlikte bir soğurucu tabaka oluşturan 6 mm'lik bir Cu soğutma plakasının her iki tarafına döşenir. Alternatif soğurucu tabaka, birim soğutma plakası sandviçinin her iki tarafına yerleştirilen 0,3 mm kalınlığındaki paslanmaz çelik tabakalarla kaplanmış iki adet 2,1 mm kalınlıktaki kurşun düzlemden oluşur. Bu yapının her düzlemi kasetler adı verilen 60°'lik birimlere bölünmüştür.

CE-H'deki soğurucu 35 mm kalınlığındaki 12 adet paslanmaz çelik plaka ve bunu takip eden 68 mm kalınlığındaki bir başka 12 adet paslanmaz çelik plakadan oluşur. Toplamda 24 adet örnekleyici hadronik bölüm $9 \lambda_0$ değerinde bir etkileşim uzunluğuna sahiptir. Bu soğurucu plakalar arasında, 30°'lik geniş kasetler oluşturmak için 6 mm kalınlığında bakır soğutma plakalarına monte edilmiş silikon birimleri ve kırpışım laç karo levhaları bulunur. Bu kasetler elektromanyetik bölmelerdekine benzemelerine mukabil soğutma plakasının sadece bir tarafındaki duyaçları içerir ve ayrı bir mekanik yapı olarak oluşturulan soğurucuları içermez. Bu durum CE-E ve kalorimetrenin önündeki nötron yönlendirici tabakasının da içinde olduğu 10,7 λ değerinde bir toplam kalınlığa yol açar. İzleyicideki nötron

¹⁰² (İng.) reconstruction.

¹⁰³ (İng.) Wafer. Herhangi bir ham maddenin kusursuz bir disk şeklinde kesilerek ortaya çıkarılan plaka.

¹⁰⁴ (İng.) Printed circuit board, PCB.

akısını azaltmak amacı olan polietilen (C_2H_4) nötron yönlendirici 120 mm kalınlığa sahiptir. Bütün tabakalar enerji ölçümünde kullanılmak üzere okunur lakin CE-E ve CE-H'deki alternatif tabakalar S1 tetikleyici için kullanılır. CE-H'nin düşük ışıma bölgelerinde karo üzerine SiFÇ okuma ile parıldayan karolar kullanılır.

Şekil 3.1'de de gözüktüğü üzere CE-H'deki yarıçap, ışıma seviyesine göre değişmektedir. Nötron akısı $8 \times 10^{13} \text{ n}_{eq}/\text{cm}^2$ 'yi¹⁰⁵ geçmezken, kırpışım laçlarda ışıma dozunun da sebebiyet verdiği ışık kaybının %50'yi geçmemesi sağlanır. Bu sayede SiFÇ'nin artan kaçak akımı ve ışık kaybı nedeniyle elektronik gürültünün enerji eşdeğeri MİP yanıtının iyi bir şekilde ölçülmesini sağlayacak kadar düşük tutulur.

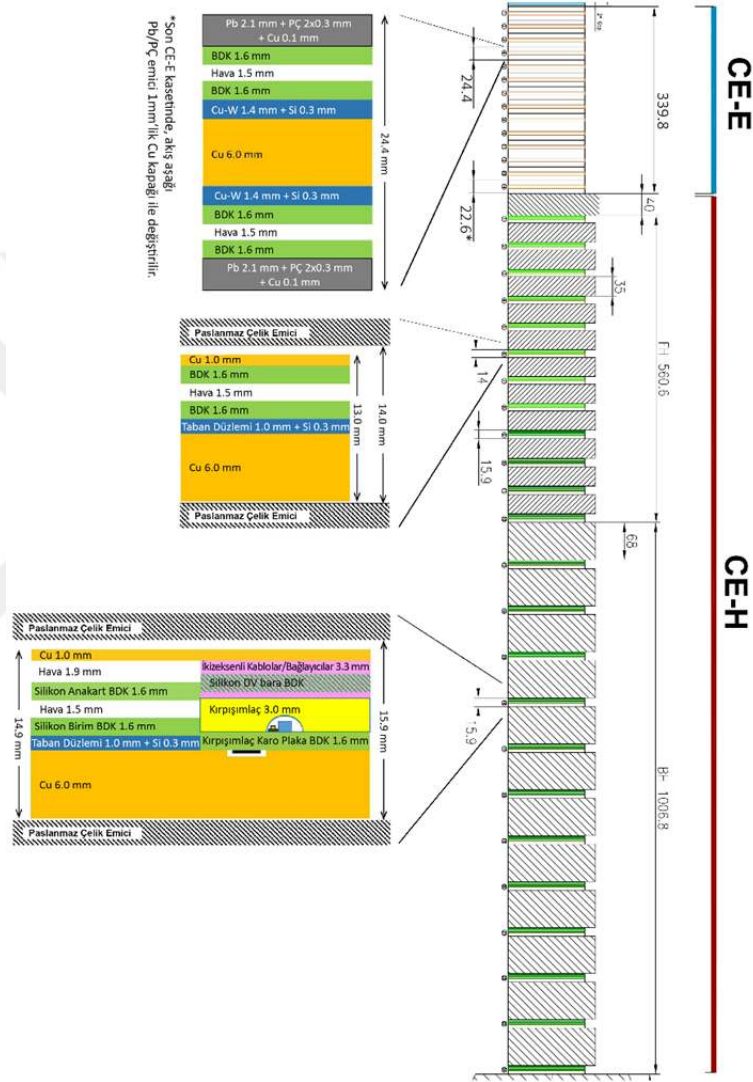
Çizelge 3.1. HGCAL tasarım değişkenleri. Alan, kanal sayısı, birimler ve kısmi birimler için değerler her iki uç kapağın toplamıdır. Ağırlık ve plakaların sayısı ise tek bir uç kapağınkini ifade eder (CMS TDR 019, 2017).

	CE-E	CE-H	
	Si	Si	Kırpışım laç
Alan (m^2)	368	215	487
Kanallar (k)	3916	1939	389
Si birimler (Karo levhalar)	16008	8868	(3960)
Kısmi birimler	1008	1452	-
Ağırlık (t)	23	205	
Sadece Si plakalar	28	8	
Birleşik (Si+Kırpışım laç) plakalar		16	

Yaklaşık 6 milyon silikon kanalı ve 0,4 milyon SiFÇ kanalı içerecek olan HGCAL'daki silikon duyaçlardaki aktif alan 0,5 veya 1,2 cm^2 olan altıgen

¹⁰⁵ $\text{n}_{eq}/\text{cm}^2$ birimi santimetre kare başına 1 MeV eşdeğeri nötron sayısını belirtir.

altlıklara¹⁰⁶ bölünecektir (daha yüksek sanal hızlılık değerlerinde daha küçük hücreler olacaktır).



Şekil 3.3. HGCal'ın uzunlamasına yapısı (CMS TDR 019, 2017)

¹⁰⁶ (İng.) pad.

3.2. Silikon Duyaç

BHÇ deneylerinde mevcut silikon izleyicileri için yapılan Ar-Ge çalışmaları esnasında duyaçların tam tüketme geriliminin¹⁰⁷ çok daha üstünde çalıştırılması gerektiği tespit edilmiştir. Buna benzer yüksek gerilimlerde bile, dökme¹⁰⁸ silikondaki ışımaya maruz kalmış tuzaklardan toplanan yük önemli ölçüde azalır. Ayrıca duyaçlardaki kaçak akım, akıyla doğru orantılıdır. Bu da gürültünün artmasına sebebiyet verir ve çok yüksek öngerilimler¹⁰⁹ söz konusu olduğunda, duyaçların içinde önemli güç kaybına yol açar. Bu gibi gözlemler neticesinde BHÇ'ye binaen YI-BHÇ'de beklenen daha yüksek akı seviyelerinin zorlukları ile başa çıkabilmek amacıyla şimdiye kadar kullanılan 300 μm 'den daha ince duyaçların araştırılma çalışmaları başlamıştır.

İzleyici ve HGICAL arasındaki en temel fark, izleyicide ince parçalara bölünmüş $\approx 90 \mu\text{m}$ aralıklı şeritler kullanılırken HGICAL'da $\approx 1 \text{ cm}^2$ 'lik geniş alan altlıkları kullanılmaktadır ve izleyicide akıya etki edenler yüklü hadronlar olurken HGICAL için nötronların olmasıdır.

3.2.1. Duyaç Özellikleri ve Düzeni

CE-E'nin silikon duyaçları ve CE-H'nin iç kısımları 8 inçlik plakalar üzerinde üretilen düzlemsel DC bağlantılı¹¹⁰ altıgen silikon duyaçlardan oluşacaktır. Duyaçların şeklinin altıgen olmasının nedeni daha kullanışlı olmasıdır. Dairesel yapıda olan tabakalarda altıgen yapı kare veya dikdörtgen şeklindeki yapılara kıyasla daha kullanışlıdır. Ayrıca altıgen duyaçların köşeleri birleştirme/sabitleme sistemi için boşluk bırakmaya izin verir ki bu durum plaka yüzeyinin kullanımını daha da artırır. Bir başka üstünlüğü ise daha önceden hem altıgen hem de kare duyaçların tasarımları incelenmiş ve farklı geometrilerin sistem

¹⁰⁷ (İng.) depletion voltage. Ters ön gerilim uygulayarak serbest yük taşıyıcılarını bitiren gerilim türü. Yük taşıyıcılarını tüketmekten ötürü bu ismi almıştır.

¹⁰⁸ (İng.) bulk.

¹⁰⁹ (İng.) bias.

¹¹⁰ (İng.) planar DC-coupled.

üzerindeki etkileri dikkate alınıp karşılaştırması yapıldığında silikon plakaların kullanılması ve altıgen duyaçların yerleştirilmesiyle ciddi bir maliyet düşüşü sağlanmıştır.

HGCAL'ın çalışma süresi boyunca yük toplama ve çalışma koşullarını en iyi seviyede tutabilmek için duyaçlar 300 µm, 200 µm ve 120 µm aktif kalınlığa sahip olacaktır. Bunlardan 300 µm ve 200 µm kalınlığındaki duyaçların temel alttaş¹¹¹ malzemesi fiziksel olarak inceltilmiş p-tipi FZ silikon¹¹² plakadır. 120 µm kalınlığındaki duyaçlar için ise saplı plaka¹¹³ üzerindeki p-tipi epitaksiyeldir. P-tipi duyaçların tercih edilmesinin sebebi ise ısımaya bağlı yüzey yükü etkileri nedeniyle Gaussian olmayan gürültüye karşı daha dayanıklı olmasıdır. Yine de maliyet tasarrufu açısından alt akış bölgelerinde n-tipi 300 µm'lik duyaçların olası kullanımı halen araştırılmaktadır.

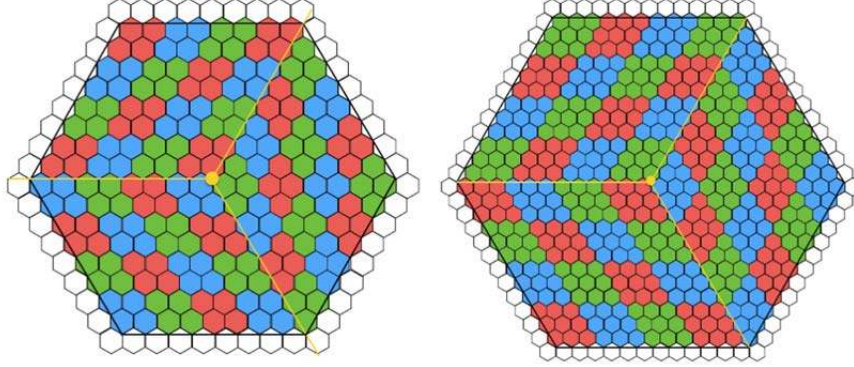
Farklı duyaç hücre geometrisi ve karolama seçenekleri incelenmiş olup sonuç olarak Şekil 3.4'te gösterilen “üç parçalı elmas”¹¹⁴ yapılandırması tercih edilmiştir. Bunun nedeni 2×2 ve/veya 3×3 yapısındaki komşu hücrelerin, tıpkı şekildeki farklı renk kümelenmeleri gibi, basit tetikleyici oluşturması ve birim okuma BDK düzenini basitleştirerek birimin okuma yongaları için bakışım alanlara bölmesi. Üç parçalı elmas yapılandırmasını kullanan silikon plakaların düzenleri Şekil 3.5'te gösterilmektedir.

¹¹¹(İng.) Substrate.

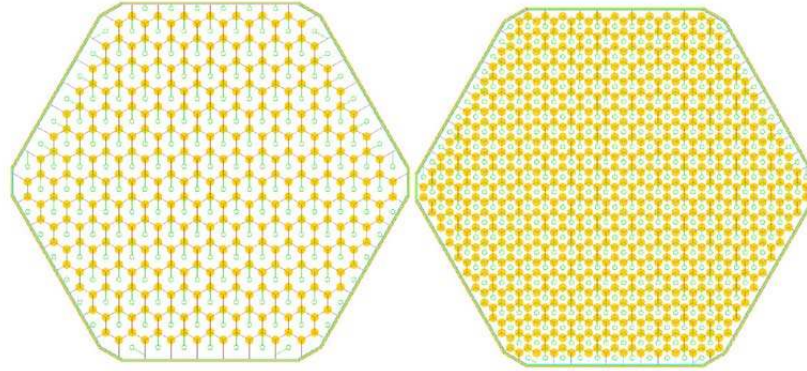
¹¹²(İng.) Float-zone silicon. Yüzen bölge silikonu, dikey alan erimesiyle elde edilen son derece saf silikondur. Bu yöntem, Czochralski silikonuna yüksek saflıkta bir seçenek üretir. http://meroli.web.cern.ch/Lecture_silicon_floatzone_czochralski.html

¹¹³(İng.) Handle wafer.

¹¹⁴(İng.) Three-fold diamond.



Şekil 3.4. Üç parçalı elmas yapısının gösterimi. Tetik hücreleri oluşturmak üzere toplanan duyaç hücreleri (Solda) 1,18 cm²'lik büyük duyaç hücreleri ve (Sağda) 0,52 cm²'lik küçük duyaç hücreleri (CMS TDR 019, 2017).



Şekil 3.5. (Solda) 1,18 cm²'lik büyük duyaç hücreleri ve (sağda) 0,52 cm²'lik küçük duyaç hücrelerin düzeniyle altıgen 8 inçlik silikon plakaların gösterimi (CMS TDR 019, 2017).

Hücre ebadı hem elektromanyetik duşların yanal yayılması gibi fizik performansları hem de hücre sığasını yönetilebilir bir aralıkta tutma ihtiyacının getirdiği kısıtlamalarla çalışır. Özünde bu 65 pF'lık bir maksimum hücre sığasına karşılık gelen, 300 μ m ve 200 μ m aktif kalınlık duyaçları için ≈ 1 cm² ve 120 mm aktif kalınlık duyaçları için $\approx 0,5$ cm² hücre boyutlarına yol açar. Her duyaç, duyaç hücresi görevi gören 192 veya 432 ayrı diyottan oluşur.

Çizelge 3.2, üç duyaç tipine ve özelliklerine detaylı bir bakış sunmaktadır. Çizelge 3.3, CE-H'de hem silikonlu hem de kırışımışlaçlı katmanlardaki duyaçların 3000 fb^{-1} 'lık bir bütünleşik parlaklık öncesi ve sonrasındaki bir MİP için hücre büyüklüğü ve S/G bilgilerini gösterir. Bu çizelgedeki alan bilgisi iki uç kapağın toplamıdır.

Çizelge 3.2. Farklı duyaç türlerinin özellikleri (CMS TDR 019, 2017)

Aktif kalınlık (μm)	300	200	120
Alan (m^2)	245	181	72
Plakaların sayısı	13164	8712	3000
Kısmi plakaların sayısı	1284	144	324
En büyük yaşam süresi dozu (Mrad)	3	20	100
Hücre sığası (pF)	45	65	50
En büyük yaşam süresi akısı ($n_{\text{eq}}/\text{cm}^2$)	$0,5 \times 10^{15}$	$2,5 \times 10^{15}$	7×10^{15}
En büyük dış yarıçap (cm)	≈ 180	≈ 100	≈ 70
En küçük iç yarıçap (cm)	≈ 100	≈ 70	≈ 35
Hücre boyu (cm^2)	1,18	1,18	0,52
MİP için ilk S/G	11	6	4,5
MİP için 3000 fb^{-1} 'dan sonraki en küçük S/G	4,7	2,3	2,2

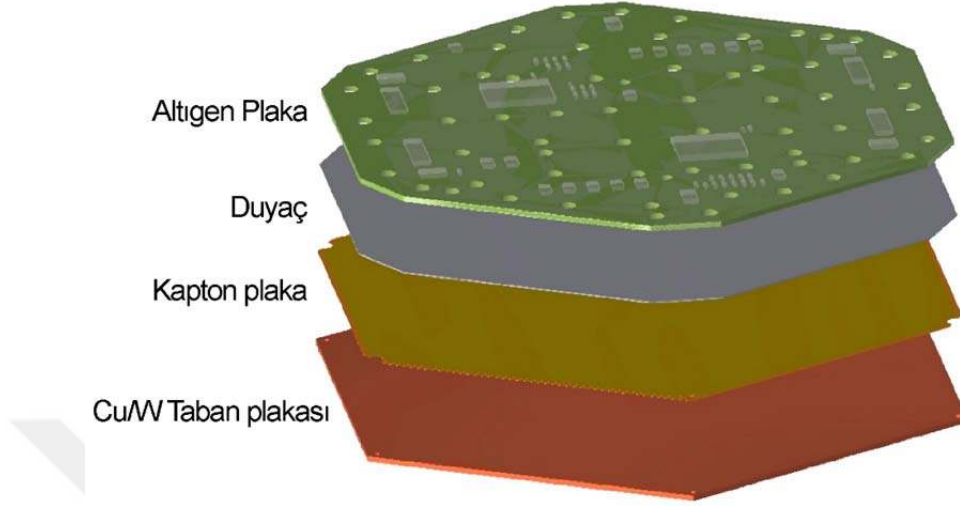
Çizelge 3.3. CE-H’de hem silikonlu hem de kırpışım laçlı katmanlardaki duyaçların 3000 fb^{-1} ’lık bir bütünleşik parlaklık öncesi ve sonrasındaki bir MİP için hücre büyüklüğü ve S/G bilgileri (CMS TDR 019, 2017)

Duyaç kalınlığı	Kırpışım laç 3 mm	Silikon 300 μm	Silikon 200 μm
Alan (m ²)	480	71	15
En büyük yaşam süresi dozu (Mrad)	<0,3	30	100
En büyük yaşam süresi akısı ($n_{\text{eq}}/\text{cm}^2$)	8×10^{13}	5×10^{14}	2.5×10^{15}
En büyük dış yarıçap (cm)	≈ 235	≈ 160	≈ 100
En küçük iç yarıçap (cm)	≈ 90	≈ 80	≈ 45
Hücre boyu (cm ²)	2×2’den 5,5×5,5	1.18	1.18
MİP için ilk S/G	>>5	11	6
MİP için 3000 fb^{-1} ’dan sonraki en küçük S/G	5	4,7	2,3

3.3. Silikon Birim

HGCAL, elektromanyetik (CE-E) bölümünde ve hadron (CE-H) bölümünün bir bölümünde toplanmak ve monte edilmek üzere yaklaşık 27000 silikon algıç birimini gerektirir. Bir CE-E birimi Şekil 3.6’da da görüldüğü üzere aslında altıgen yapıdaki bir bileşen yığıdır. Bu bileşenler en alttan üste doğru sırasıyla: taban plakası, Kapton altın sac (polimid folyo), silikon duyaç ve baskılı devre kartıdır (BDK). Bu bileşenlerin tümü kabaca duyaçla aynı alana sahiptir.

Ön örnek yapımı ve test ışınları ölçümlerinde 8 inç birimler yerine 6 inç birimler kullanılmıştır. Şekil 3.6’da kullanılan birimin örneği gösterilmektedir.



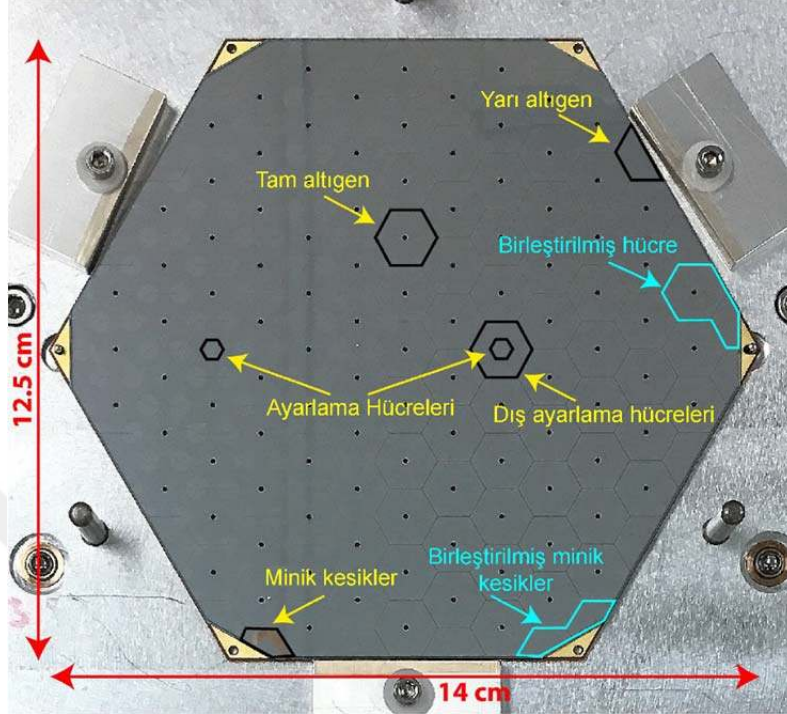
Şekil 3.6. İstiflenmiş katmanlarıyla CE-E silikon birimi (CMS TDR 019, 2017).

Taban plakasının kasetlere yerleştirilmesi ve hassas bir şekilde birleştirmesi için hassas kesinlikte referans delikleri vardır. CE-E taban plakası malzemesi toplaşmış (sinterlenmiş¹¹⁵) bir CuW metal yapılı karmadır¹¹⁶. Yapıda kullanılan bakır iyi bir ısı iletkenliği sağlarken tungsten ise ısıl genleşme katsayısını azaltır. Bu ikisinin birlikte kullanılmasıyla CE-E soğurucunun önemli bir bileşeni olan kısa ışıma uzunluğuna sahip malzeme oluşur. CE-H birimleri için taban plakası malzemesi yüksek ısı iletkenliği olan karbon liftir.

İnce bir altın tabakası ile kaplanmış 105 mm kalınlığındaki Kapton folyo, taban plakasına epoksi olarak kaplanır ve neredeyse yüzeyi tamamen sarar. Kapton'un açık tarafındaki ince altın tabakası, iletken bir epoksi bağı vasıtasıyla duyacın arka düzlemine yüksek voltaj ön gerilim bağlantısını sağlamak için kullanılır. Kapton ayrıca duyaç arka düzleminin, toprakta tutulan taban plakasından elektriksel olarak yalıtılmasını sağlar.

¹¹⁵ Baskılanmış parçayı oluşturan tozların yüksek sıcaklıkta birbirine bağlanarak parçanın mukavemet kazandığı bir ısıl işlemdir.

¹¹⁶ (İng.) Metal matrix composite.

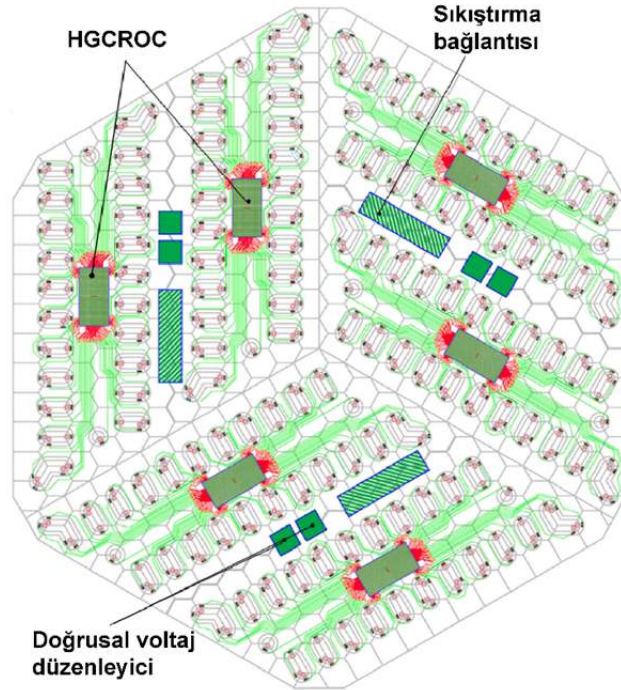


Şekil 3.7. 2016 demet testlerinde kullanılan 6 inç boyutundaki p-yal-n altıgen silikon duyağındaki hücre türleri (Akchurin, 2018)

Silikon duyağlar ve altıgen plaka altı köşesinde de minik kesikleri olan altıgen yapılardır. Minik kesikler, taban plakasındaki konumlandırma ve birleştirme deliklerine erişim sağlar. Minik kesikler ayrıca altıgen plakalara kablo bağlantıları için Kapton-Au'nun bir kısmına erişebilme imkânı sağlar. Bu sayede duyağın arka düzlemine ön gerilim uygulanır. Altıgen plaka HGCROC¹¹⁷ ön uç okuma ASIC'lerini içerecektir. Duyağ altlıklarından gelen sinyaller dâhili sinyal sayısallaştırması için HGCROC'a yönlendirilir. Altıgen plakalardaki delikler, bölgeyi dört altıgenin altındaki grupların kesişme noktalarına maruz bırakır. 432 kanal duyağ için altıgen plaka birim düzeni ve döner halkaların yakınlaştırılmış bir görüntüsü, Şekil 3.8'de gösterilmiştir.

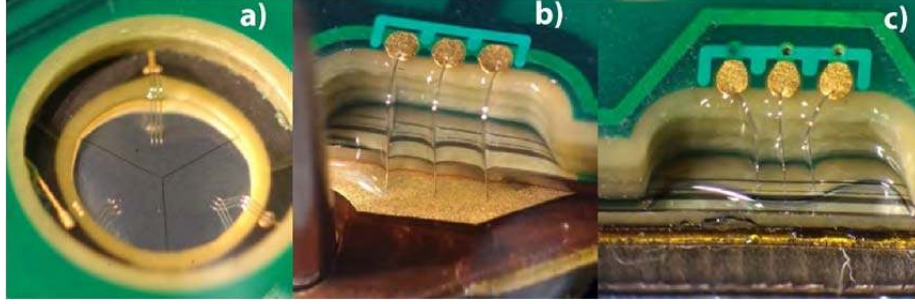
¹¹⁷ readout ASIC designed for HGCAL.

Taban plakası, Kapton, silikon duyaç ve altıgen plaka, tek bir fiziksel ünite oluşturmak üzere epoksi ile birleştirilir. Altıgen plaka üzerindeki bir Au yapıştırma althığı ve her bir duyaç althığı; arka düzlem ön gerilimi sağlayan Au-Kapton katmanı ve duyaç koruyucu halkaları¹¹⁸ arasında çoklu tel bağlantı kümeleri yapılır. Tel kümeleri şeffaf ve ışımaya karşı korumalı silikon elastomer ile kaplanıp korunur. Demet testleri için ön örnek birimlerinde tel örgülerin bir örneği, Şekil 3.9'da gösterilmiştir.



Şekil 3.8. 432 kanallı duyaç için altıgen plaka ile BDK birimin gösterimi (CMS TDR 019, 2017).

¹¹⁸ (İng.) Sensor guard ring.



Şekil 3.9. Soldan sağa: a) BDK'den silikona kademeli deliklerden geçen tel bağlantıları; b) teller duyaçın arka düzlemde ön gerilimi sağlamak için Au-Kapton katmanına bağlanır; c) duyaç koruyucu halkalarına birimin köşesinden tel bağlantısı (CMS TDR 019, 2017).

3.4. Plastik Kırpışımılac Ve Foto Algılama

HGCAL'ın kırpışımılac bölümü özellikleri, algıcın ömrü boyunca MİP'ler kullanılarak ayarlanmasının mümkün olması şartı ile çalışacaktır.

3.4.1. Plastik Kırpışımılac Malzeme

İyonlaştırıcı ışımanın mevcut HE üzerindeki etkisi mor ötesi lazer, radyoaktif kaynaklar ve demet verileri kullanılarak detaylı olarak incelenmiştir. Ölçümler kırpışımılaca verilen hasar ile doz oranı arasında doğrusal bir ilişkinin olduğunu gösterdi. Doz oranına bağlılığın daha düşük bir doz oranından kaynaklanan artan hasarla kırpışımılac kimyası ve oksijen difüzyonunun bir etkisi olduğu anlaşılmaktadır. Bunlara ek olarak kırpışımılacın çalışma sıcaklığı -30°C 'ye yakın olmalıdır. (CMS TDR 19, 2018)

3.4.2. SiFÇ Foto Algılayıcılar

Parıldama plakalarından gelen ışık SiFÇ foto algılayıcılar tarafından okunur. Evre-1 HKAL yükseltmesi dâhil birçok sistemde kullanılan bu foto algılayıcılar, çok yüksek bir kazanç (10^5 'ten büyük) ve mükemmel bir ışık algılama verimliliği ($>30\%$) sağlar.

Kırpışım laç kalorimetresinin soğutma, kablo vb. donatıların sıkı yapıda olması ve kalorimetrenin dış kenarında çok fazla yer kaplamaması gerekmektedir. Bu hususta birkaç tasarım dikkate alınmış olup aralarından CALICE¹¹⁹ AHCAL¹²⁰ ön örneklerinde kullanılan karo tabanlı SiFÇ teknolojisi seçildi. Bu seçimin temel sebebi parçacık takibinin ve tanımlanması için yeterli performansı en uygun maliyetle sunmasıdır.

Karo tabanlı SiFÇ teknolojisi, kırpışım laç karosundan ışığın doğrudan okunmasını kullanır. Bu okuma karonun yüzeyindeki çukur¹²¹ aracılığıyla ışığı toplayan SiFÇ ile gerçekleştirilir. Bahsi geçen çukur, SiFÇ'nin birleştirilmesi için mekanik alan sağlar ve daha büyük mesafelerdekilere kıyasla SiFÇ'nin çok yakınından geçen parçacıkların tepkisini azaltarak karo boyunca tepkinin düzenliliğini geliştirir.

3 cm×3 cm×3 mm boyutlarındaki sağlam bir karodan geçen MİP'in CALICE İşbirliği tarafından 20'den fazla foto elektron ürettiği gösterilmiştir. Demet testi çalışmaları bu başarıyı desteklemiş ve birkaç önemli geometrik ilişkiyi de göstermiştir:

- MİP sinyalinin büyüklüğü $\frac{1}{\sqrt{A_{karo}}}$ ile doğru orantılıdır. Yani karo yüzey alanının ters kareköküdür. Bu durumda karo ne kadar küçükse bir MİP'den elde edilecek foto elektron verimi de o kadar fazla olur.
- Foto elektron veriminin SiFÇ alanıyla doğrusal olarak arttığı gösterilmiştir.

Kırpışım laç karolarının düzenlenmesinde bu geometrik etkiden yararlanılır. Her karonun ortasındaki kutup genişliği ile aynı olduğu radyal boyutun $r-\varphi$ ızgarası içinde düzenlenirler. Sonuç olarak küçük çaplardaki daha küçük boyutlu karolar,

¹¹⁹ CAlorimeter for Linear Collider Experiment

¹²⁰ Analogue Hadron Calorimeter

¹²¹ (İng.) dimple.

kırpışım laçlara ve SiFÇ gürültüsüne ışım a hasarının en büyük olacağı yerlerde daha büyük sinyaller verir. Hasar ve gürültünün daha az olduğı daha büyük yarıçaplarda, kanal sayısı ve toplam kalorimetre maliyetini azaltmak için hücreler daha büyüktür.

Hücrelerin $\Delta\phi$ açıs al boyu, hadronik fiç i kalorimetresinin 5° lik hücrelerine eş olabilecek şekilde seç ilir. Ayrıca kırpışım laç hücresinin boyunu, kırpışım laç ile silikon arasındaki sınırda bulunan silikon tetikleyici hücrelerinin (toplamda 4 adet 1cm^2 lik hücreler) fiziksel boyutuna benzer tutacak şekilde olmalıdır. Bu eşleş me yeniden yapılanma algoritmaları için iki bölge arasındaki kaçınılmaz ayrılmanın etkisini en aza indirir.

Kalorimetrenin silikon ve kırpışım laç bölümleri arasındaki sınır, algıc ın ömrü boyunca MİP sinyal-gürültü oranını en az 5 olacak şekilde ölçmesi koşuluyla belirlenir. Sınır, $|\eta| > 2,4$ için silikon kapsama sağılamak amacıyla mümkün olan minimum alana göre yarıçap boyunca bir miktar uzatılmış tır. Sınır aynı zamanda, sınırda sadece altıgen veya yarım altıgen duyaçlara ihtiyaç duyup bunlar hariç çeş itli boyutlarda silikon duyaçlara ihtiyaç duyulmayacak şekilde ayarlanmış tır.

3.5. Yeniden Yapılandırma

HGCAL'da parçacık akış yeniden yapılandırmasını oluşturmak için beş boyutlu bilgi (enerji, x , y , z ve zaman) kullanılır. Yeniden yapılandırma hadronik ve elektromanyetik duşlar olarak iki kısımdan oluşur. Tanımlamanın ardından yüklü hadronlar izleyicide yeniden yapılandırılan izlerle eşleştirilir. Jetler ve eksik enerjiyi ölçmenin yolu en iyi enerji ve momentum tahminlerini kullanmaktır. Bununla ilgili bilgiler yüklü hadronlar için izleyiciden ve yüksüz hadronlar ile fotonlar için kalorimetreden elde edilir.

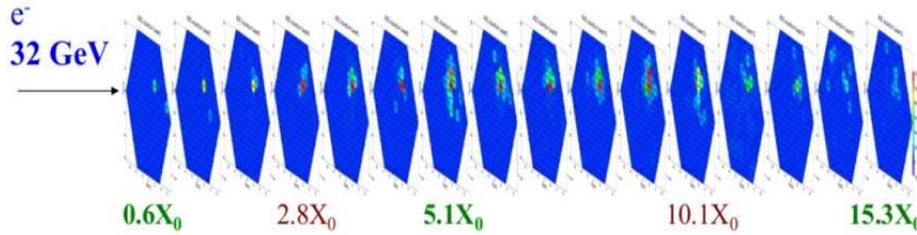
Algıc ın tasarım önerisinin¹²² ardından CMSSW ile daha iyi benzetim yapılabilmesi amacıyla birkaç değışiklik yapıldı.

¹²² CMS Collaboration, "Technical Proposal for the Phase-II Upgrade of the Compact Muon Solenoid", Technical Report CERN-LHCC-2015-010, LHCC-P-008, 2015

4. ARAŞTIRMA VE BULGULAR

4.1. Demet Testi

2016 yılından bu yana HGCal tasarımının performansını ölçmek amacıyla birkaç demet testi çalışması yapılmıştır. Yapılan demet testleri ayrıca Monte Carlo benzetimlerinde kullanılan modellerin geliştirilmesinde de önemli rol oynamaktadır. İlk yapılan demet testlerindeki birimlerde, her okuma BDK'sine iki adet 64 kanallı Skiroc2 ASIC monte edilmiştir. Bu birimleri esnek bir şekilde yerleştirmek için asma dosya¹²³ yapısı kullanıldı (bkz Şekil 4.8). Bu yapının kullanılmasının amacı farklı kurulumları da araştırmaya elverişli olmasıdır. Böylelikle katmanlar veya birimler daha kolay bir şekilde değiştirilebilecektir. FNAL¹²⁴'da kurulan ilk sistem 16 adet örnekleme katmanından oluşup $0,6-15,3 X_0$ aralığındaki derinliğe sahip tungsten soğurucular kullanılmıştır. Sistemde kullanılan parçacık türü elektron olup (yani sadece EE¹²⁵ kısmı test edilmiştir) enerji aralığı 4-32 GeV'dir. 6 inç boyutundaki p-yal-n¹²⁶ silikon plakaları HPD¹²⁷ tarafından üretilmiştir. 320 μm kalınlığındaki plakanın 128 adet hücresi bulunmaktadır. Altıgenlerin alanı ise $\approx 1,1\text{cm}^2$ olup ayarlama için kullanılan protonların enerjileri 120 GeV mertebesindeydi.



Şekil 4.1. FNAL'da 32 GeV elektron ile yapılan demet testinin birimlerden geçerkenki gösterimi (Chatterjee, 2016)

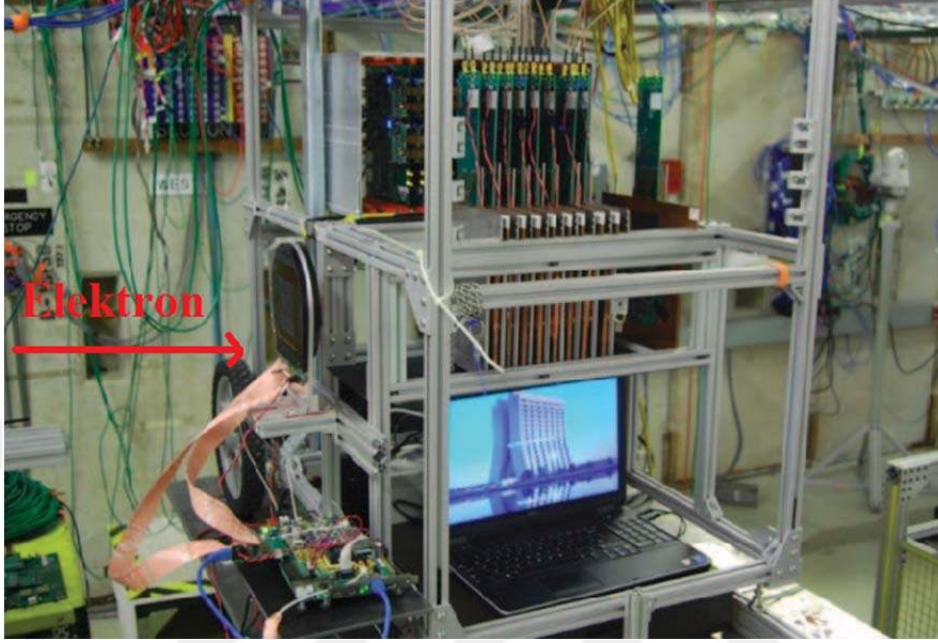
¹²³ (İng.) hanging-file.

¹²⁴ Fermi National Accelerator Laboratory, Fermi Ulusal Hızlandırıcı Laboratuvarı

¹²⁵ Endcap ECAL, Uç Kapak EKAL.

¹²⁶ (İng.) p-in-n. P-yalıtkan-n yapısı.

¹²⁷ Hamamatsu Photonics K.K.



Şekil 4.2. FNAL'da 2016 kurulan demet testi sistemi. 16 adet katman bilgisayarın üst kısmında gözükmemektedir. Elektron demeti ise sol taraftan gelmektedir (Rubinov, 2016).

CERN’de de iki farklı kurulum araştırıldı. Her iki kurulum da 8 katmandan oluşuyordu. İlk kurulumdaki birimler 6-15 X_0 , ikinci kurulum düzeninde 5-27 X_0 konumlarına yerleştirilmiştir ve tungsten soğurucular kullanılmıştır. 125 GeV enerjisindeki müon ve pionlar ile ayarlamalar¹²⁸ yapıldı. Ayrıca 250 GeV mertebesinde elektron hüzmesi ile de veriler alındı. Çizelge 4.1’de hem FNAL hem de CERN’de alınan verilerin parçacıklara ve enerjilere göre özellikleri gösterilmektedir. Her iki kurulum da GEANT4 benzetimi ile desteklenmiştir. Bu çalışmalar sonucunda benzetim ile deney çalışmaları kıyaslandı ve sonuçların iyi olduğu gözlemlendi. Skiroc2 ön duyaçların kullanımındaki güvenilirlik sınıandı ve başarılı oldu. Silikondaki sinyallerden kaynaklanan atım şeklini ölçmek için özel bir hızlı sayısallaştırıcı kullanıldı.

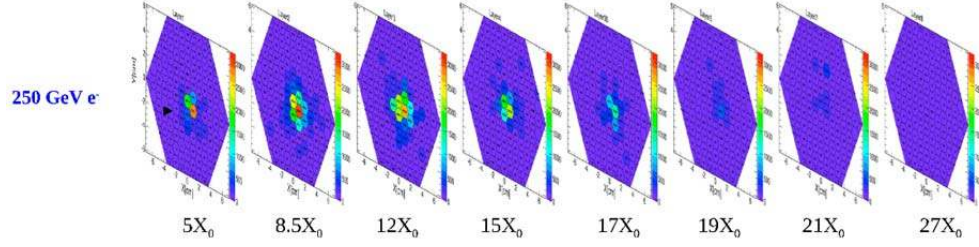
¹²⁸ (İng.) calibration.

Çizelge 4.1. 2016 yılında FNAL ve CERN'de alınan veriler (Akchurin, 2018)

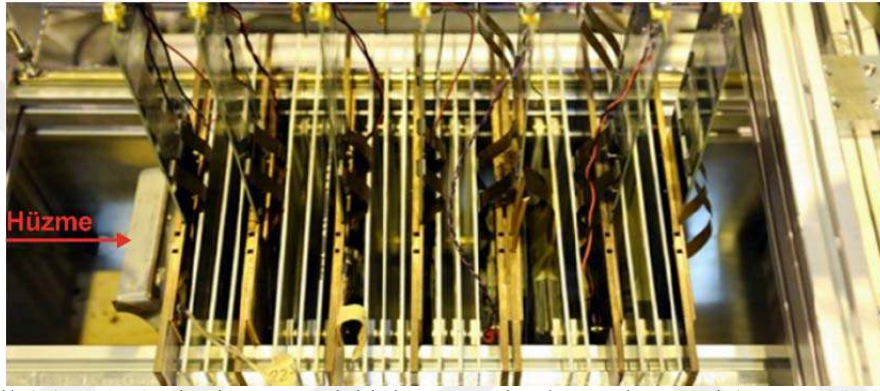
	Enerji (GeV)	FNAL	CERN
e^-	4	✓	
	6	✓	
	8	✓	
	16	✓	
	20	✓	✓
	24	✓	
	32	✓	✓
	70		✓
	100		✓
	150		✓
	200		✓
	250		✓
π^-	125		✓
p^+	120	✓	
μ^-	30-120		✓

Her iki deney merkezinde de ana tetik kaynağı plastik kırpışım laç idi. FNAL'da iki adet SiFÇ ile okunan bir tane $2 \times 2 \text{ cm}^2$ kırpışım laç kullanılırken CERN'de ise FÇT ile okunan iki adet $4 \times 4 \text{ cm}^2$ ardışık kırpışım laç kullanılmıştır. Bunlara ek olarak kurulumun yaklaşık 1,5 ve 2,7 m yukarısında geciktirme tel odaları¹²⁹ (GTO) bulunmaktadır. GTO'lar sayesinde demet parçacıklarının yörüngesi yaklaşık 1 mm'lik doğrulukla ölçülebilmektedir. (Ackhurin, 2018)

¹²⁹ (İng.) Delay wire chambers, DWC.



Şekil 4.3. CMS'de 2016 yılında 250 GeV mertebesindeki elektronlar ile yapılan demet testlerinin görüntüsü (Maier, 2017)



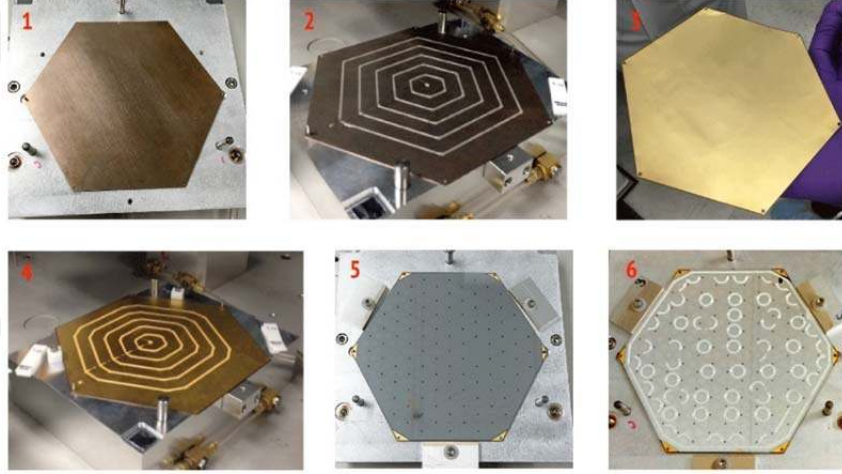
Şekil 4.4. 2016 yılında CERN'deki demet testi çalışma düzeneği (Wang, 2018)

2016 yılında CERN'de yapılan demet testi esnasında kullanılan CuW plakasının üç işlevi vardı: birim mekanik destek yani sağlamlık sağlamıştır, BDK üzerindeki ASIC'lerin ısı yüküne silikon aracılığıyla birimi destekleyen bakır soğutma plakasına doğru ısı bir yol sağladı ve kalorimetrenin soğurucu parçası oldu. Testlerde kullanılan taban plakaları 0,8 mm ($\approx 0,15 X_0$), 1,2 mm ($\approx 0,25 X_0$) ve 1,6 mm ($\approx 0,5 X_0$) kalınlıklarındadır.

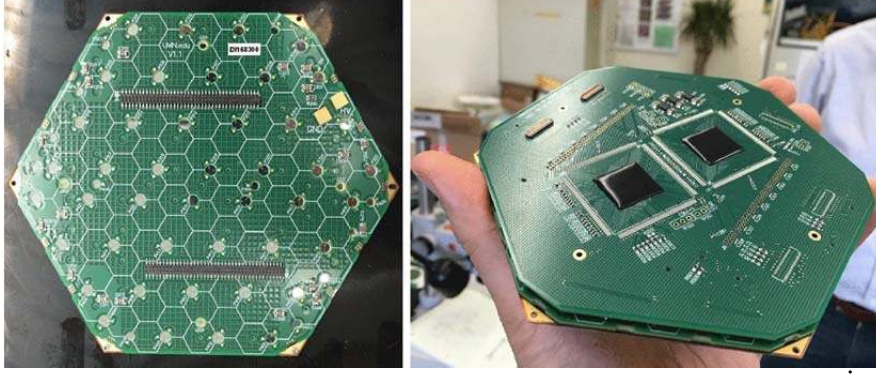
Taban plakası, polimid levha, silikon ve ilk BDK, Araldite 2011¹³⁰ epoksi kullanılarak birbirlerine yapıştırılmıştır. Bu birleştirme, parçaları tutmak ve en uygun hale getirilmiş yapıştırıcı kalıplarını dağıtmak için yarı otomatik bir portal sistem kullanılarak yapıldı. Tutkal oda sıcaklığında 24 saat içerisinde sertleştirildi,

¹³⁰ Araldite 2011, çok amaçlı kullanabilen iki bileşenli, oda sıcaklığında sertleşen, yüksek mukavemet ve tokluğa sahip macun yapıştırıcısıdır.

bu da üç yapıştırma basamağı için yaklaşık üç günlük bir toplam montaj süresine yol açtı. Birleştirme aşamaları Şekil 4.5'te özetlenmiştir. Bu işlemlerden sonra silikon altlıklar, delikler için derin erişimli bir tel yapıştırma makinesi gerektiren alüminyum tel bağları kullanılarak BDK üzerindeki sinyal hatlarına bağlandı. Tel bağları ayrıca BDK'yi iletken epoksi kullanarak silikonun arka tarafına yapıştırılmış olan polimid tabakanın altın olan üst yüzeyine bağladı. Son olarak da okuma BDK'si Şekil 4.5'teki birinci yere bağlandı ve birimler test edildi (Ackhurin, 2018).



Şekil 4.5. 2016 yılında CERN'deki demet testlerinde kullanılan birimlerin birleştirilme aşamaları. 1: Yapıştırma aparatındaki CuW taban plakası; 2: Araldite 2011 epoksinin eklenmesi; 3: polimid altın kaplama folyo; 4: polimid folyo taban plakasına ve kendi yapışkan katmanına yapıştırılmış halde; 5: silikon duyacın polimid folyoya yapıştırılması ve 6: tüm silikon yüzeye yayılan (BDK eklenmesi hariç) özel bir yapıştırıcının eklenmesi (Ackhurin, 2018)



Şekil 4.6. (Solda) BDK'nın deliklerini gösteren birimin fotoğrafı. (Sağda) İki adet yonga bağlı Skiroc2 ASIC'li Omega Grup tarafından üretilen okuma BDK'sı. (Ackhurin, 2018)

Şekil 3.7'de gösterilen silikon duyaç bu deneyde kullanılmış olup 200 μm tüketme kalınlığına¹³¹ sahip olup fiziksel kalınlıkları 320 μm idi. Duyaçların büyük çoğunluğu $\approx 1,1 \text{ cm}^2$ boyutlarındaydı. Burada iki parçaya bölünmüş iki altıgen hücre vardır: büyük (tam) altıgen hücrenin alanının yaklaşık 1/9'luk kısmına sahip bir iç “ayarlama altlığı” ve çevresindeki “dış ayarlama hücresi”. Bunlardan ilki standart bir hücrenin S/G oranını ışınlamanın ardından minimum iyonize parçacıkları kullanarak ayarlamayı kolaylaştırır. Bu ayarlama S/G oranı, tek minimum iyonize parçacıkları verimli bir şekilde tespit etmek için çok küçük olursa yapılmaktadır. Daha küçük alan daha küçük bir sığaya neden olur, bu da MİP sinyal boyutu aynı kalırken hücrenin iç gürültüsünü azaltır. Duyaçın köşelerinde yarı altıgen hücreler vardır ve bunlara minik kesikler¹³² denilir. Her duyaçta 134 ayrı hücre bulunmaktadır. Bu, ön uç CuW çiftlerinde bulunan elektronik kanal sayısını aştığından mütevellit duyaç çevresindeki bazı hücre çiftleri “birleştirilmiş minik kesikler” ve “birleştirilmiş hücreler” oluşturmak üzere BDK'ye elektriksel olarak bağlandı ve toplamda 127 okuma kanalı elde edildi.

¹³¹ (İng.) depletion length. PN eklemine ters ön gerilim uygulayarak yüklerden arındırılmış bölgenin kalınlığı.

¹³² (İng.) Mousebite cells.

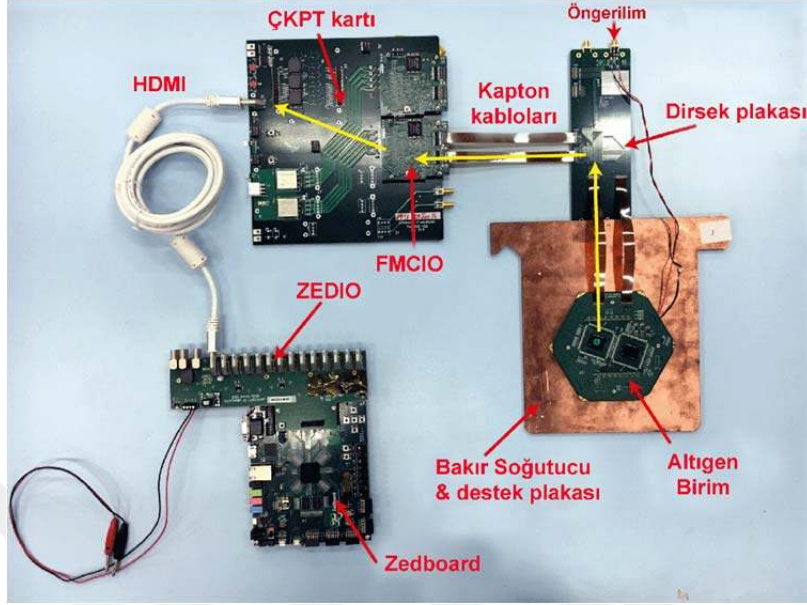
Çizelge 4.2. CERN'de 2016 yılında yapılan demet testlerinden tek bir silikon duyaç için algılayıcı hücre sayıları ile türleri ve okuma kanalları (Ackhurin, 2018)

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

CE'nin sıkı yapısını sağlamak amacıyla ardışık soğurucular/kasetler arasındaki boşluğu en düşük seviyede tutmak gerekiyordu. Bu gereksinimden dolayı esnek polimid kablolar ve bunlara karşılık gelen yüzeye monte edilebilen birleştiriciler kullanıldı. Söz konusu kullanım düşük profilli bağlantı sağlamıştır. Skiroc2'lerden gelen sayısal veriler iki adet esnek kablo aracılığıyla pasif dik açılı BDK'ye ve oradan da yine başka bir çift kablo ile ÇKPT¹³³ kartına yani Çift-Kız Plaka Taşıyıcı Kartına aktarılır. Daha sonra veriler standart bir HDMI kablosu ile Zedboard¹³⁴'a aktarılır. ZEDIO olarak bilinen başka bir pasif özel pano ile 14 adet ÇKPT'den gelen veri toplandı. Son basamakta ise Zedboard'tan gelen tüm bilgiler Ethernet aracılığı ile bilgisayara yönlendirildi.

¹³³ (İng.) Dual-Daughterboard Carrier, DDC.

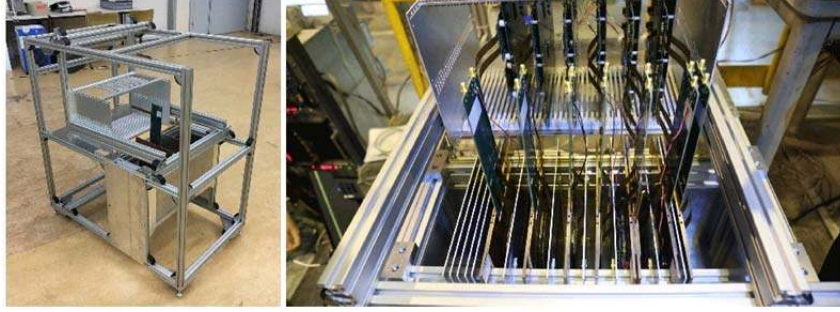
¹³⁴ Daha fazla bilgi için: <http://zedboard.com/product/zedboard>



Şekil 4.7. Birimden Zedboard'a doğru gerçekleşen veri toplama sistemi (Akchurin, 2018).

Birimler Şekil 4.7’de gösterildiği gibi 6 mm ($0,4 X_0$) kalınlığındaki bakır plakalara tutturuldu. Bu plakalar 2016 yılında kullanılmamasına rağmen, soğutma akışkanının akışını sağlamak için gömülü kanallara sahipti. Bakır levhanın her iki tarafına bir birim yerleştirilebilir. Bu, yaklaşık 25 ile 100 birimden oluşan grupların, "kasetler" oluşturmak için kama şeklindeki soğutma plakalarına monte edileceği nihai HGCal tasarımına benziyordu.

Soğutma plakalarına takılı olan birimlerin ve farklı kurulumların keşfedilmesine olanak tanıyan soğurma plakalarının kolay yerleştirilmesi için “asma dosya” tasarımı kullanılarak esnek bir mekanik destek sistemi inşa edildi. Sistemde soğurucu olarak üç farklı kalınlıktaki (2 mm: $\approx 0,57 X_0$; 2,8 mm: $\approx 0,87 X_0$; 4 mm: $\approx 1,14 X_0$) tungsten plakaları destekleyen alüminyum çerçeveler kullanılmıştır.



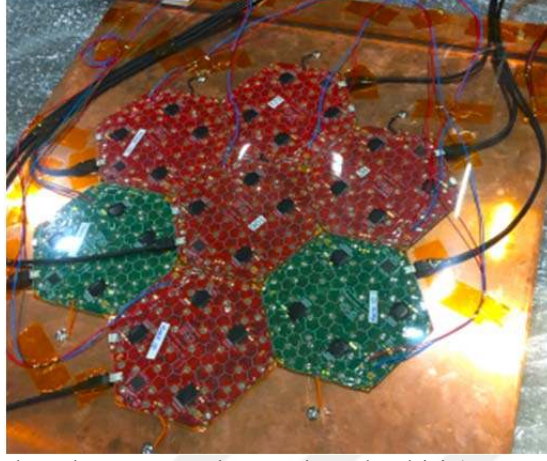
Şekil 4.8. Asma dosya yapısının genel görünüşü. Sağ tarafta ise bazı birimlerin ve soğurucuların eklenmiş hali görülmektedir (Ackhurin, 2018).

2017 yılında ise ilk demet testlerinde artık her birime 4 adet yonga gelecek şekilde tasarlanan Skiroc2-CMS ASIC'ler kullanılmaya başlandı. CALICE Skiroc2 tabanlı olan parçaların her biri 64 kanaldan oluşuyordu. Bunların kullanım amaçları silikon duyaçlardan gelen sinyalleri şekillendirmek, büyütmek ve sayısallaştırmaktır.

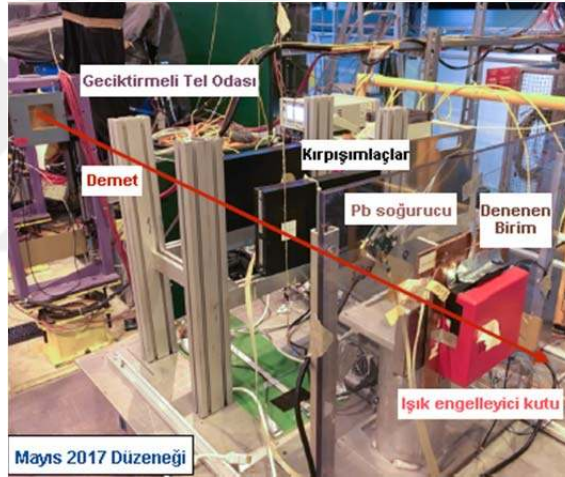
Şekil 4.7'de gözüken bakır soğutucu plaka bu yılda kuruluma eklendi. Aynı zamanda çelik soğuruculardan oluşan 12 katmanlı ve her biri 7 birimli hadronik bölüm eklendi. Bu işlemden sonra algıcın genel düzeni CALICE AHCAL Ön Örneği adındaki $EE+FH^{135}+BH^{136}$ şeklini aldı. EE demet testleri bir silikon birimi ile Mayıs, EE+FH demet testleri 10 silikon birimi ile Haziran, EE+FH+BH demet testleri ise önce 17 daha sonra 20 silikon birimiyle Temmuz ayında yapıldı.

¹³⁵ Front HCAL, Ön HKAL.

¹³⁶ Backing HCAL, Arka HKAL.



Şekil 4.9. 7 birimden oluşan CE-H katmanlarından biri (Quast, 2019)



Şekil 4.10. CERN'de 2017 yılın Mayıs ayında kurulan demet testi düzeneği (Quast, 2017)

Sisteme yüksek ve düşük kazanç, ToT^{137} (Time over Threshold) ve ToA (Time of Arrival) olmak üzere dört özellik daha eklenmiştir.

Bu zamana kadar EE ön örnekleri ile yapılan denemelerde farklı soğurucu kurulumları hakkında bilgi edinildi, asma dosya yapısı sisteminin iyi bir şekilde

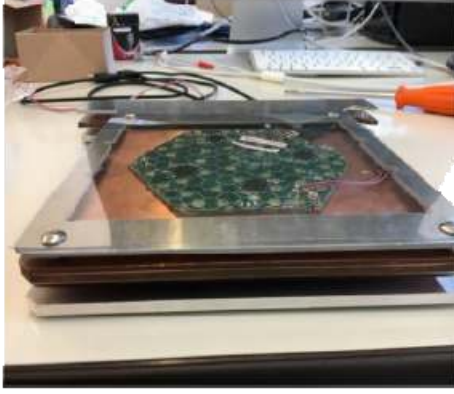
¹³⁷ ToT, sinyal atımının genliğinin bir ölçüsüdür.

çalıştığı görüldü. Son olarak 4 yongalı Skiroc2-CMS ASIC'lerin verimli bir şekilde çalıştığı görüldü.



Şekil 4.11. CERN'de 2017 yılının Temmuz ayında kurulan demet testi düzeneği (Quast, 2017)

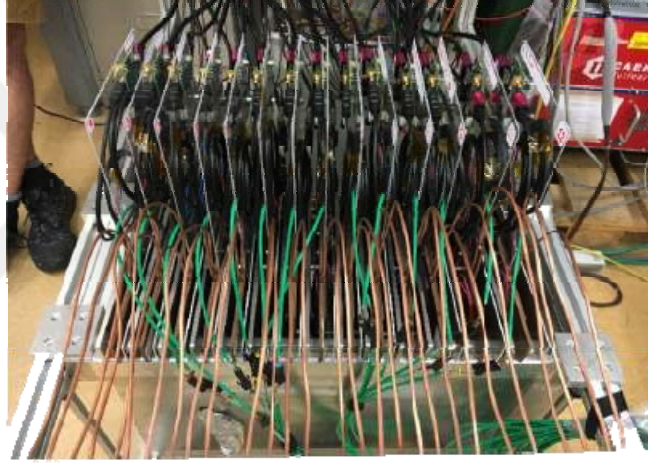
2018 yılında üç demet testi gerçekleştirildi. Bunların ilki DESY'de Mart ayında oldu ve tek silikon birimlerinin düşük enerjili elektronlara karşı tepkisini inceledi. Demet teleskopuyla hassas izleme kullanarak etki/çarpışma konumunda 10 μm 'ye kadar hassasiyet sağlandı. Haziran ayında CERN'deki SPS'de EKAL bölümünün 28 adet tek birim katmanını içeren büyük bir kurulum gerçekleşti. Birimlerin dizilimi öngörülen algıç tasarımına benzer şekilde yapılmıştır. Bu bağlamda aktif soğutma ile çift taraflı kasetler kullanılmıştır. 10-150 GeV aralığında müon, elektron demetleri ile veriler alınmıştır.



a.) Çift taraflı kaset



b.) Sulu Soğutma



c.) 14 kasetteki 28 birim

Şekil 4.12. 2018 Haziran'ında yapılan demet testinin düzeneği. a) çift taraflı kaset, b) Sulu soğutma, c) 28 birimden oluşan 14 mini kaseti göstermektedir (Liu, 2018).

Ekim ayında tek birimden oluşan 28 katman içeren CE-E'nin ardına 12 katman (62 birim) içeren CE-H devamında ise 39 katmandan oluşan SiFÇ bölümü eklenmiştir. CE-E ve CE-H'nin toplam birim sayısı 94'tür (Demet testinin sonlarına doğru birkaç arızalanmıştır). Hadronik bölümün kırpışım laç kısmı için CALICE AHCAL algıcının ön örnek tasarımı kullanılmıştır. Birinci ve ikinci demet testlerinde 200 μm 'lik duyaçlar kullanılırken son demet testinde duyaçların

doksan tanesi 300 μm , geriye kalan dört tanesi 200 μm 'dir. Duyaçlardaki hücrelerin çoğu $\approx 1,1 \text{ cm}^2$ 'dir.

Elektromanyetik kalorimetre ön örneği 14 mini kasetten oluşmaktadır. Her bir kaset 4 mm kalınlığında kurşun plaka ve 2 birim ile tutulan 6 mm kalınlığında bir bakır plakadan meydana gelmektedir. Mini kasetler alüminyum çerçeve ve Mylar® levha ile kapatılmıştır. Bakır plakanın içinde bulunan bir oluk sayesinde bakır soğutma borusu yerleştirilir. Demet testi sırasında, ön örnek silikon birimlerini soğutmak ve onları sabit bir sıcaklıkta tutmak için 28°C'de su kullanıldı. Elektromanyetik kalorimetresinin toplam derinliği yaklaşık 50 cm olup radyasyon uzunluğu $24 X_0$ 'dır.

CE-E ön örneğinin hemen arkasına konumlandırılan CE-H ön örneği 12 katmandan meydana gelmektedir. Katmanlar, bir tarafa 7'ye kadar birimin ve diğer tarafa bir bakır soğutma borusunun bağlandığı 6 mm kalınlığında bir bakır plakadan yapılmıştır. Bakır plakanın üstüne Makrolon® plakası yerleştirilmiştir. Bu plaka, birimleri VES panellerine bağlamak için gerekli olan aracı panelleri tutar. Katmanlar, aynı zamanda 4 cm kalınlığında çelik soğutma plakaları tutan iki mekanik yapıdan birine yerleştirilir. Silikon hadronik kalorimetre ön örneğinin toplam derinliği yaklaşık olarak 4 λ_1 'dir. Silikon CE-H ön örneğinin çevre birimleri, kısa teller vasıtasıyla bakır soğutma plakalarına topraklanır. Aynı şema merkezi birimler için de denenmiştir lakin daha uzun kabloların kullanılması nedeniyle iyi performans göstermemiştir. Merkezi birimler için topraklama, çevre birimlerinden birinin topraklama altlığına bir topraklama altlığının bağlanmasıyla yapılmıştır.

Farklı topraklama yöntemleriyle iki çeşit birim inşa edilmiştir. Her ikisi de Kapton folyo üzerindeki altın katman ile bakır soğutma plakası arasına bir toprak katmanı yerleştirmeye dayanır. İlk yöntem, ikinci bir Kapton folyonun taban plakası üzerinde bir altın tabakası ile yapıştırılmasından oluşur. Üstteki folyo yüksek gerilimi bağlamak için kullanılır ve alt folyoya erişebilmek için birimin köşelerinde kesilir. Daha sonra alt folyonun altın tabakası altıgen plakanın

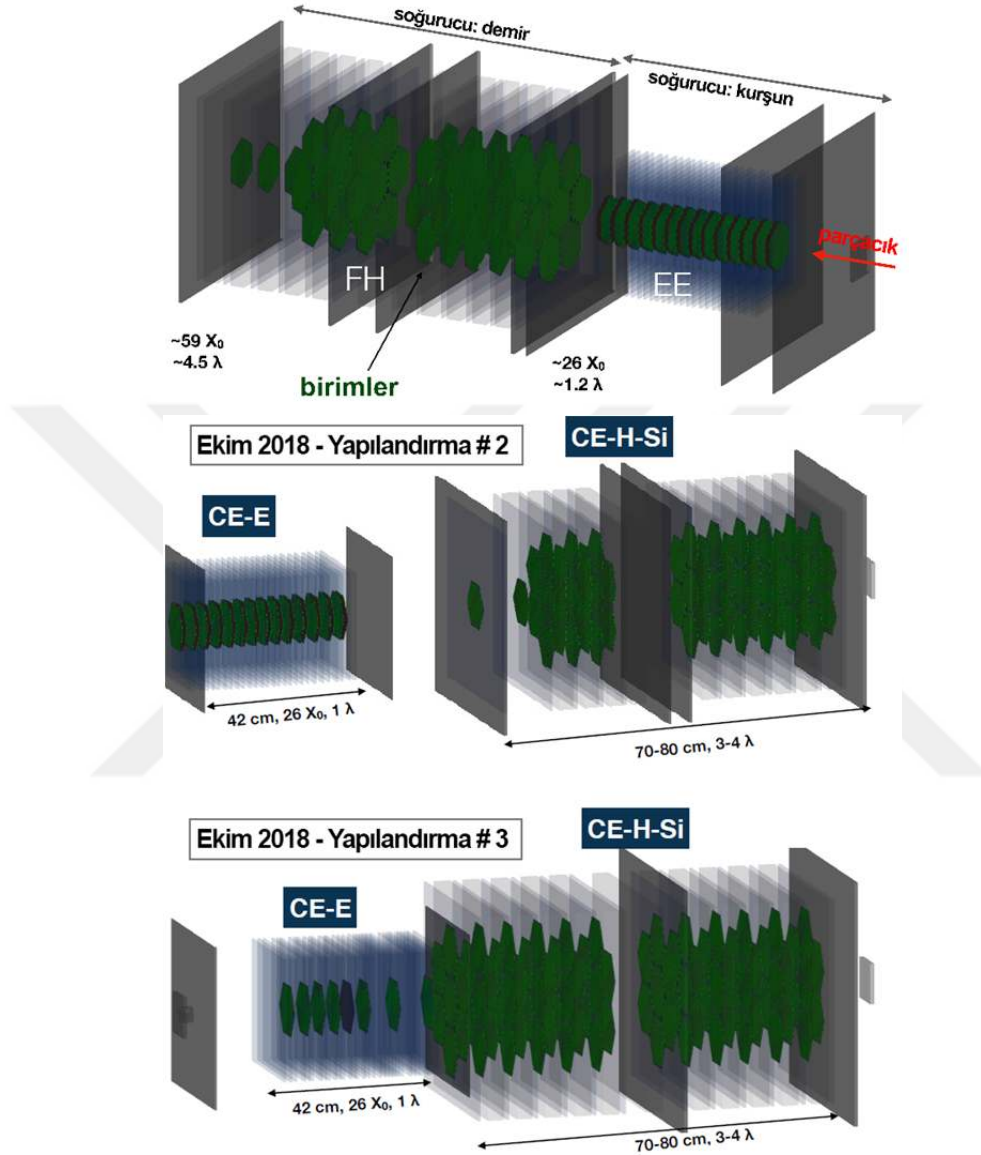
zeminine bağlanır. Bu yöntem kullanılarak yedi adet birim inşa edildi ve aynı silikon CE-H katmanına yerleştirildi. İkinci yöntem, üç altın katmana sahip taban plakası olarak bir BDK kullanılmasıdır. En üstte olanı silikon üzerine yüksek voltaj uygulamak için kullanılır.

2017 yılında kullanılan Skiroc2-CMS ASIC'lerin BDK tasarımları değiştirilerek burada da kullanılmıştır. Ayrıca bazı birimlerin temel şekilleri farklı oldu: bazıları için BDK (2016 ile aynı bazıları normal bazıları standart), bazıları için çift Kapton kullanıldı. Buna karşın taban plakalarında herhangi bir değişiklik yapılmamıştır (Cu ve CuW kullanılmıştır).

Ekim ayındaki kurulum düzeninde üç farklı yapılandırma denenmiştir.

- Yapılandırma 1: Elektromanyetik kısım 14×2 katman + Hadronik $7 \times 9 + 3 \times 1$ katman, FH soğurucuları tüm katmanların arasındadır.
- Yapılandırma 2: Elektromanyetik kısım 14×2 katman + Hadronik $2 \times 1 + 7 \times 9$ katman, 2×1 katmanları arasında FH soğurucuları yoktur.
- Yapılandırma 3: Elektromanyetik kısım 5×2 katman + Hadronik 7×12 , FH soğurucuları tüm katmanların arasındadır.

Bu tez çalışması boyunca elde edilen veriler hep Yapılandırma 1 ile toplanmıştır. Yapılandırma 3 yeterli zamanın olmaması ve bazı diğer sebeplerden ötürü başarılı olmamıştır. Yapılandırmaların gösterimi Şekil 4.13'te gösterilmektedir. 20-300 GeV aralığında müon, elektron, kaon, proton ve pion demetleri ile veriler alınmıştır.



Şekil 4.13. 2018 Ekim'de denenen yapılandırmaların GEANT4 ile benzetimi. (üstte) Yapılandırma-1, (ortada) Yapılandırma-2, (altta) Yapılandırma-3. Üstteki şekilde parçacık demeti sağdan gelirken diğer ikisinde soldan gelmektedir. (Quast, 2019).

4.2. HGCAL'ın Performans Sonuçları

Bu tez çalışması boyunca 2018 Haziran ve Ekim verileri kullanılmıştır. 2018 Haziran-Ekim verileri ile HGCAL'ın verimlilik durumu izlenmiştir. İnceleme esnasında, Yonga-Kanal¹³⁸, Enerji Dağılımı¹³⁹, Enerji Doluluğu¹⁴⁰ grafiklerine bakıldı.

4.2.1. HGCAL'ın Haziran Ayındaki Demet Testinin Sonuçları

HGCAL'ın altıgen yapıdaki tek birimden oluşan ve EE yapısında veri alınan Haziran ayının sonuçlarında, gelen parçacık demetinin katmanlar tarafından ne kadar verimlilikle okunduğu incelendi. 28 katmanın sıralı şekilde oluşturduğu yapıda katmanlar hem tek tek hem de tüm katmanlar üst üste konulup incelenmiştir. Birleştirilmiş adı verilen ve tüm katmanların üst üste konulup birleştirilmesi anlamına gelen yöntemin sonuçları tezde paylaşılmıştır. Bu sayede algıcın genel algılama performansı bir seferde görülebilecektir. Tüm verilerde en çok olayı içeren run numaraları seçilmiştir.¹⁴¹ Bu çözümlemede sadece her enerji seviyesindeki e^- demeti incelenmiş olup müon demeti incelenmemiştir. Bu veri alımında parçacıklar birimlerin tam ortasına gelecek şekilde gönderilmiştir. Bundan dolayı orta kısımlarda daha fazla parçacık yoğunluğu beklenirken merkez noktasından uzaklaşıp uç kısımlara ilerledikçe daha az parçacık yoğunluğu beklenmektedir.

120 GeV'lik parçacık demetinin run alımı esnasındaki bazı teknik problemlerden ötürü verimli bir ölçüm yapılamamıştır. Fakat hem 100 GeV hem de 150 GeV'de herhangi bir sorun gözükmediğinden dolayı 120 GeV'lik run alımının tekrarına ihtiyaç duyulmamıştır.

¹³⁸ Chip vs Channels.

¹³⁹ Energy Distributions.

¹⁴⁰ Energy Occupancy.

¹⁴¹ HGCAL demet testlerindeki Run numaraları hakkında detaylı bilgi için: <https://docs.google.com/spreadsheets/d/15Ojo2FBbfeqcTVxGl9hQl8mbvAiBwPCLx6DgHTVSrfl/edit#gid=0>

Çizelge 4.3. 2018 Haziran ayında alınan verilerdeki parçacıkların türleri ve enerji değerleri.

	e^-	μ^-
10 GeV	✓	
30 GeV	✓	
50 GeV	✓	
80 GeV	✓	
100 GeV	✓	
120 GeV		✓
150 GeV	✓	

Paylaşılan tüm görsellerde (Enerji Doluluk ve Yonga-Kanal) bulunan z -ekseni (grafığın sağında maviden sarıya doğru değişen renk aralığını belirten ve doluluk olarak gösterilen) ise parçacıkların sayısını göstermektedir. Logaritmik olarak değişen z -ekseninin değeri parçacığın enerjisiyle doğru orantılıdır. Ayrıca YYV kısaltması “yeniden yapılandırılmış vuruş¹⁴²” anlamına gelmektedir.

Paylaşılan tüm Enerji Dağılımı grafiklerinde gözüken y -ekseni yeniden yapılandırılmış çarpışma sayısını göstermektedir. x -ekseni ise minimum iyonlaştırıcı bir parçacığın diyotta bıraktığı enerji eşdeğerini ayarlayan sinyaldir. Başka bir deyişle bir hücrede ne kadar enerji biriktiğine dair en iyi tahmini verir. Eksenin değerleri 86 keV ile çarpıldığı takdirde elektron volt karşılığı bulunur. Tüm Enerji Dağılım grafiklerinde düzgün dağılımda azalan bir eğri görmeyi beklemekteyiz.

Şekil 4.14’te birimin altıgen yapısı belirgin şekildedir. x -ekseni 6 inçlik birimin genişliğine karşılık gelip yatay kısmını¹⁴³, y -ekseni boyuna karşılık gelip

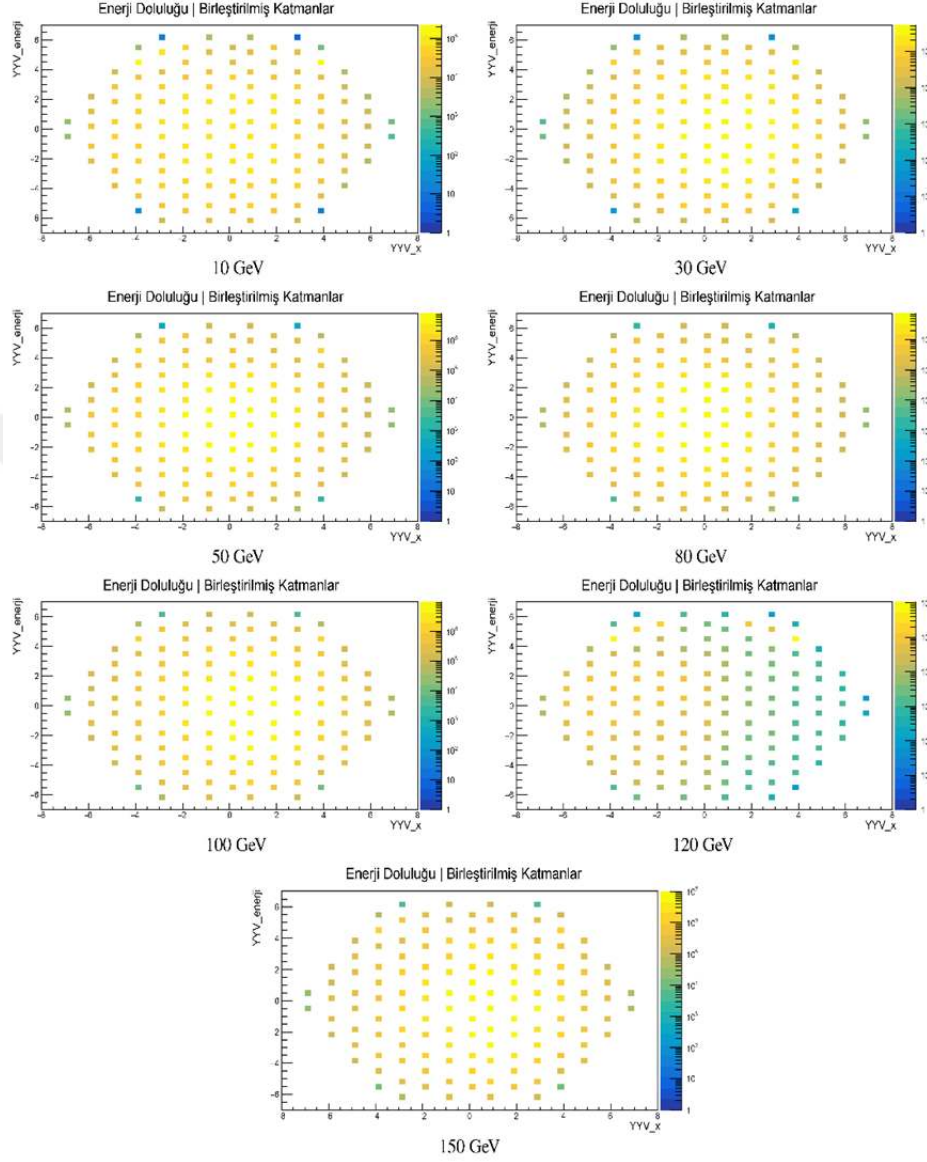
¹⁴² (İng.) rechit.

¹⁴³ Görselde x -ekseni cm cinsinden yazılmıştır. 6 inç=15.24 cm olup birimlerin etrafındaki boşluklar da hesaba katılmıştır. Bu yüzden toplam x -ekseni uzunluğu 16 cm olarak ayarlanmıştır.

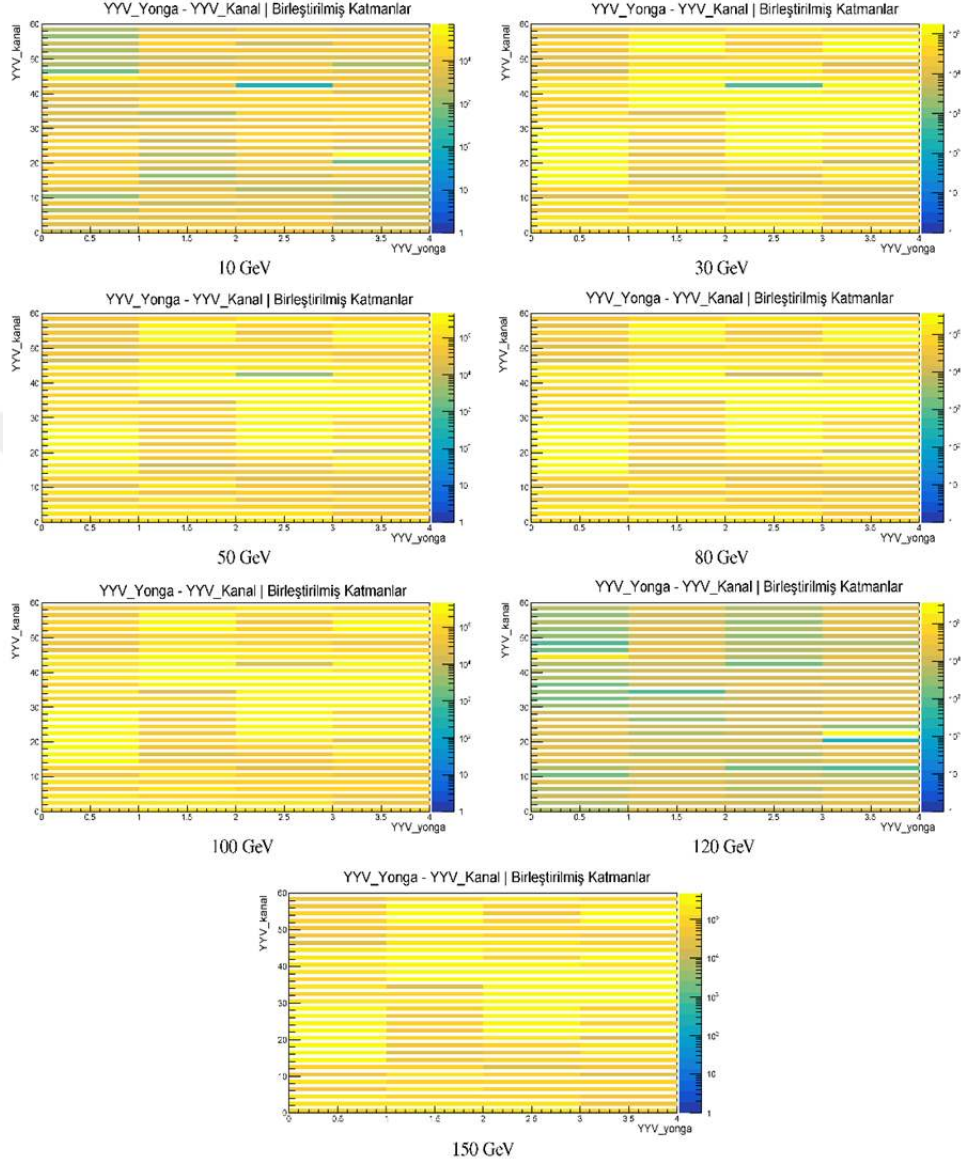
dikey kısmını göstermektedir. Bu bağlamda 10 GeV ile 30 GeV'lik parçacık demetinin doluluk oranının üst limiti 10^5 , 50, 80, 100 ve 120 GeV'lik parçacık demetinin doluluk oranının üst limiti 10^6 , 150 GeV'lik parçacık demetinin doluluk oranının üst limiti 10^7 'dir. Şeklin genel görüntüsüne baktığımızda ise hem düşük hem de yüksek enerjilerde birimlerin parçacıkları algılama performansının iyi olduğu gözükmektedir.

Şekil 4.15'te x -ekseni yonga sayısını, y -ekseni kanal sayısını göstermektedir. HGCal demet testlerinde birim başına 4 adet yonga, 64 adet kanal kullanılmıştır. Logaritmik olarak değişen z -ekseninin değeri parçacığın enerjisiyle doğru orantılıdır. Bu bağlamda 10 GeV'lik parçacık demetinin doluluk oranının üst limiti 10^4 iken geriye kalan parçacık demetlerinin doluluk oranının üst limiti 10^5 'tir. Hem düşük hem de yüksek enerjilerde birimlerin parçacıkları algılama performansının iyi olduğu gözükmektedir.

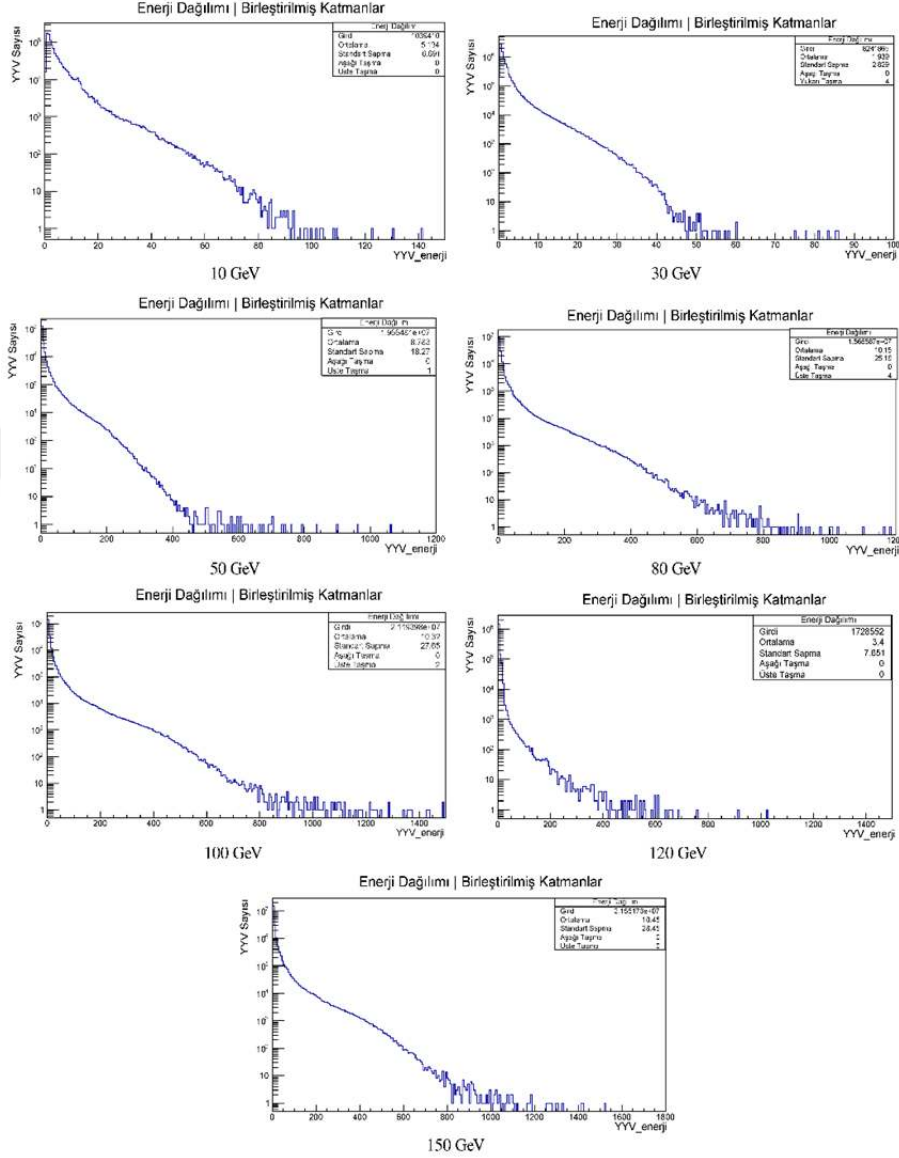
Şekil 4.17'de genel olarak parçacık demetinin artan enerjisiyle diyottaki enerjinin de arttığı gözükmektedir.



Şekil 4.14. Haziran ayında alınan 10-150 GeV aralığındaki elektron demetinin 1-28 (EE) kanallarında oluşturduğu Enerji Doluluk Oranının birleştirilmiş gösterimi.



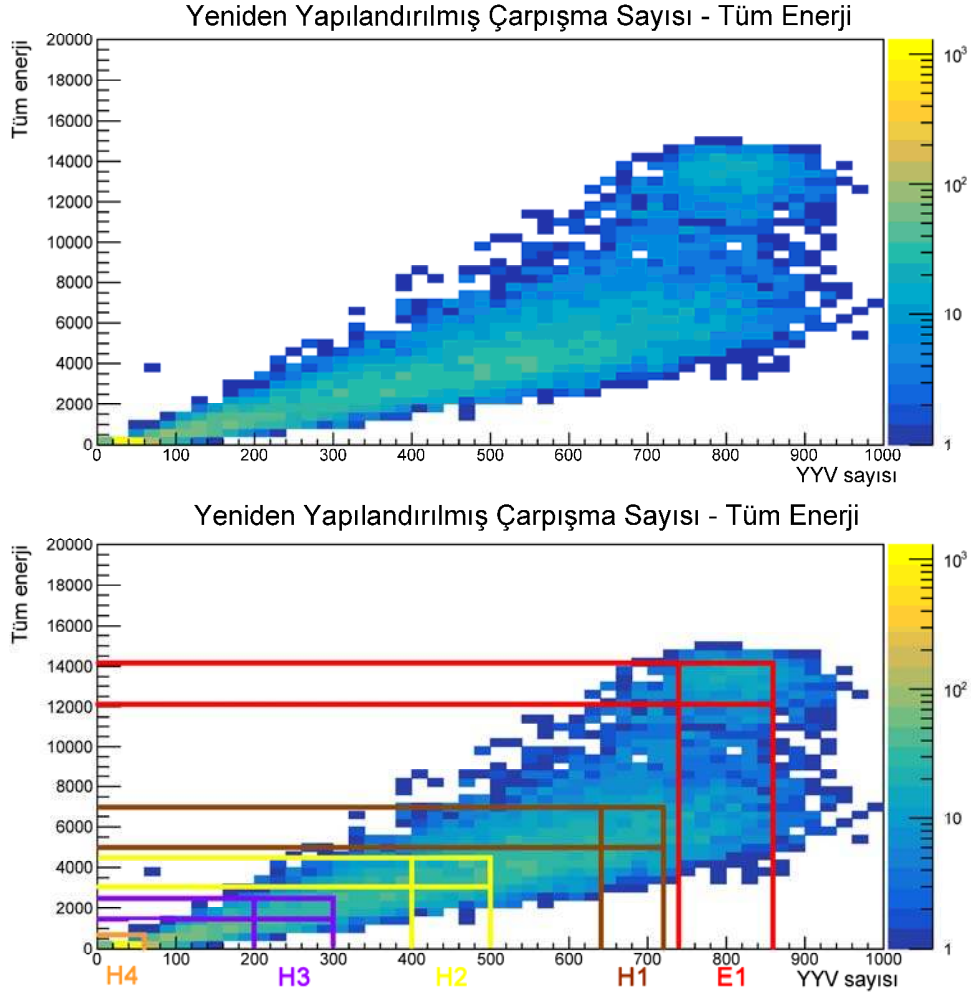
Şekil 4.15. Haziran ayında alınan 10-150 GeV aralığındaki elektron demetinin 1-28 (EE) kanallarında oluşturduğu Yonga-Kanal grafiğinin birleştirilmiş gösterimi.



Şekil 4.16. Haziran ayında alınan 10-150 GeV aralığındaki elektron demetinin 1-28 (EE) kanallarında oluşturduğu Enerji Dağılımlarının birleştirilmiş gösterimi.

Performans çözümlemesi esnasında gelen parçacık demetinin oluşturduğu duşta yaratılan farklı tipteki parçacıkların çözümleme sonucuna etkisini incelemek

amacıyla “Yeniden yapılandırılmış çarpışma sayısı-Tüm Enerji”¹⁴⁴ grafiğinde (bkz Şekil 4.17) bazı yüksek akılı bölgeler seçildi.



Şekil 4.17. (Üstte) 150 GeV elektron demetinin Çarpışma Sayısı-Enerji grafiği, (Altta) parçacık yoğunluğuna sahip yaklaşık olarak seçilen bölgeler.

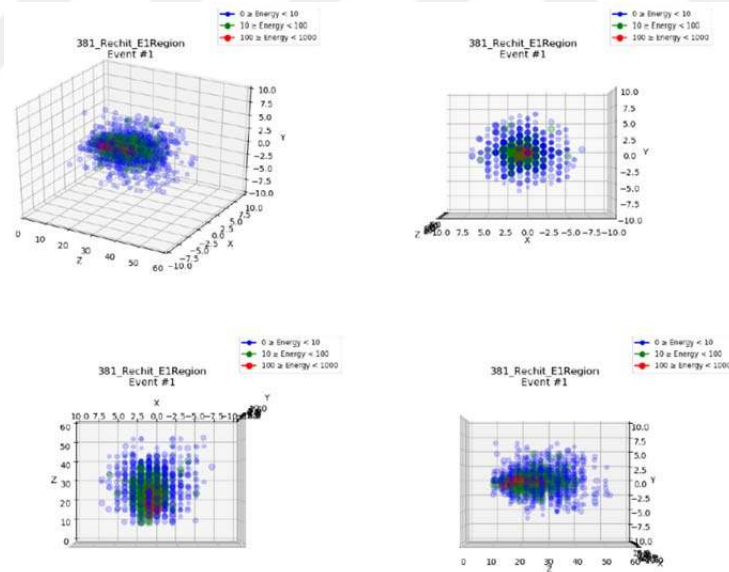
Bu veri (Run numarası: 381) için seçilen bölgelerin sayısal değerleri şu şekildedir:

¹⁴⁴ (İng.) Number of Rechits vs All Energy.

- E1 Bölgesi için YYV Sayısı: 740 – 860, Tüm Enerji: 12000 – 14000,
- H1 Bölgesi için YYV Sayısı: 640 – 720, Tüm Enerji: 5000 – 7000,
- H2 Bölgesi için YYV Sayısı: 400 – 500, Tüm Enerji: 3000 – 4500,
- H3 Bölgesi için YYV Sayısı: 200 – 300, Tüm Enerji: 1500 – 2500,
- H4 Bölgesi için YYV Sayısı: 0 – 60, Tüm Enerji: 0 – 500.

Seçilen bölgelerin her birisi için 3B duş grafikleri oluşturulmuştur. Her bölge için 100 adet olayla sınırlandırılan çözümlemenin bir örneği Şekil 4.18'deki gibidir. Bu şekle göre parçacıkların enerji seviyesi şu şekildedir:

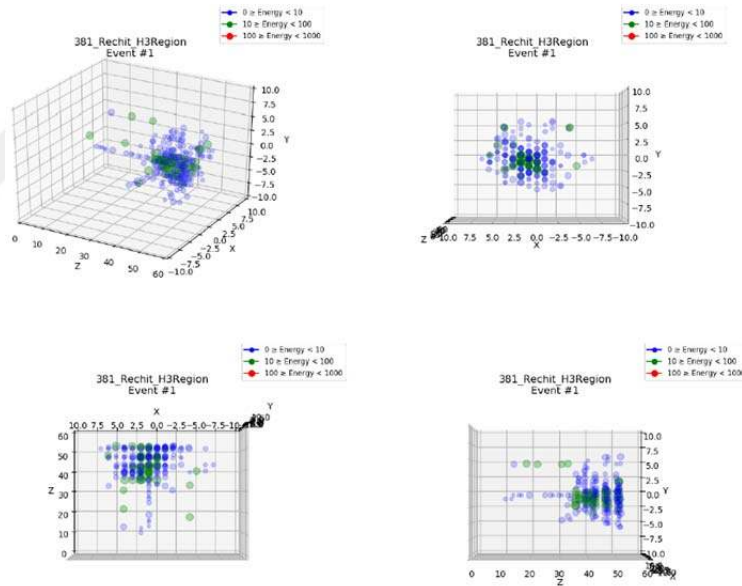
- Mavi renk 0-10 aralığında
- Yeşil renk 10-100 aralığında
- Kırmızı renk 100-1000 aralığında



Şekil 4.18. 3B duşun gösterimi. Sol üstte 3 boyutun genel, sağ üstte z-ekseninden, sol altta y-ekseninden, sağ altta ise x-ekseninden görünümü verilmiştir.

Bir duş incelemesi şu şekilde yapılmaktadır: z-ekseni boyunca ilerleyen parçacık demeti algıçla etkileşime girdiğinde bir parçacık duşu meydana gelir. Parçacıklar bozunuma uğrayıp enerjilerinin izin verdiği ölçüde yol katederler. Dolayısıyla malzeme ile etkileşimin olduğu ilk yerde yüksek enerjili parçacıklar gözlemlenirken mesafe arttıkça ortaya çıkan parçacıkların enerjileri azalır.

Seçilen bölgeler üzerine yapılan inceleme esnasında H3 bölgesindeki grafiklerde bir problem tespit edilmiştir. Bu görsele göre ortam içerisine giren çok az ve düşük enerjideki parçacık ardından büyük ve kendisinden daha yüksek enerjili parçacıkların da olduğu bir duş oluşturmaktadır. Duş sonucu oluşan parçacık veya parçacıkların enerjileri kendisini oluşturan parçacıktan daha büyük olamayacağından dolayı bu grafiklerdeki problem kesinleşmiştir.



Şekil 4.19. Haziran ayındaki 150 GeV elektron demeti verisiyle gerçekleştirilen 3B duş grafiğinin bir bölgesi. z-ekseni boyunca ilerleyen parçacıkların ileri kısımlarda oluşturduğu duş kanal/duyaç hatasının olduğunu göstermektedir.

Haziran ayında alınan 381 numaralı Run dosyasından seçilen bölgenin incelenmesi sonucu yanlış okuma tespit edilmiştir. Konu ile ilgili yapılan araştırmanın ardından 22. kanalda bir arızanın olduğu onaylanmıştır. Arızanın sebebi 22. kanal üzerindeki mikro-HDMI bağlantısı esnasında hücrenin zarar görmesidir. Bundan mütevellit oradaki kanaldan düzgün sinyal alabilmek mümkün olmamaktadır. Çalışmaların daha doğru yürütülebilmesi adına ilerleyen süreçlerde 22. kanal çözümlemelerde dışarılanmıştır.

4.2.2. HGCAL'ın Ekim Ayındaki Demet Testinin Sonuçları

Haziran ayındaki 28 katmandan oluşan EE yapısındaki bölüm aynı şekilde kalırken Ekim ayında sisteme 7 birimden oluşan 9 katman ve tek birimden oluşan 3 katman FH olarak eklenmiştir. Toplamda artık 40 katmandan oluşan düzenekte öncelikle EE ardından ise FH bölümleri incelenmiştir. İlk 28 katmanın tek birimden oluştuğu düzenekte sinyallerin okunma verimliliği incelendi. Tüm verilerde en çok olayı içeren run numaraları seçilmiştir. Bu çözümlemede her enerji seviyesindeki elektron, müon ve pion demetleri incelenmiş olup müonun sonuçları teze eklenmemiştir.

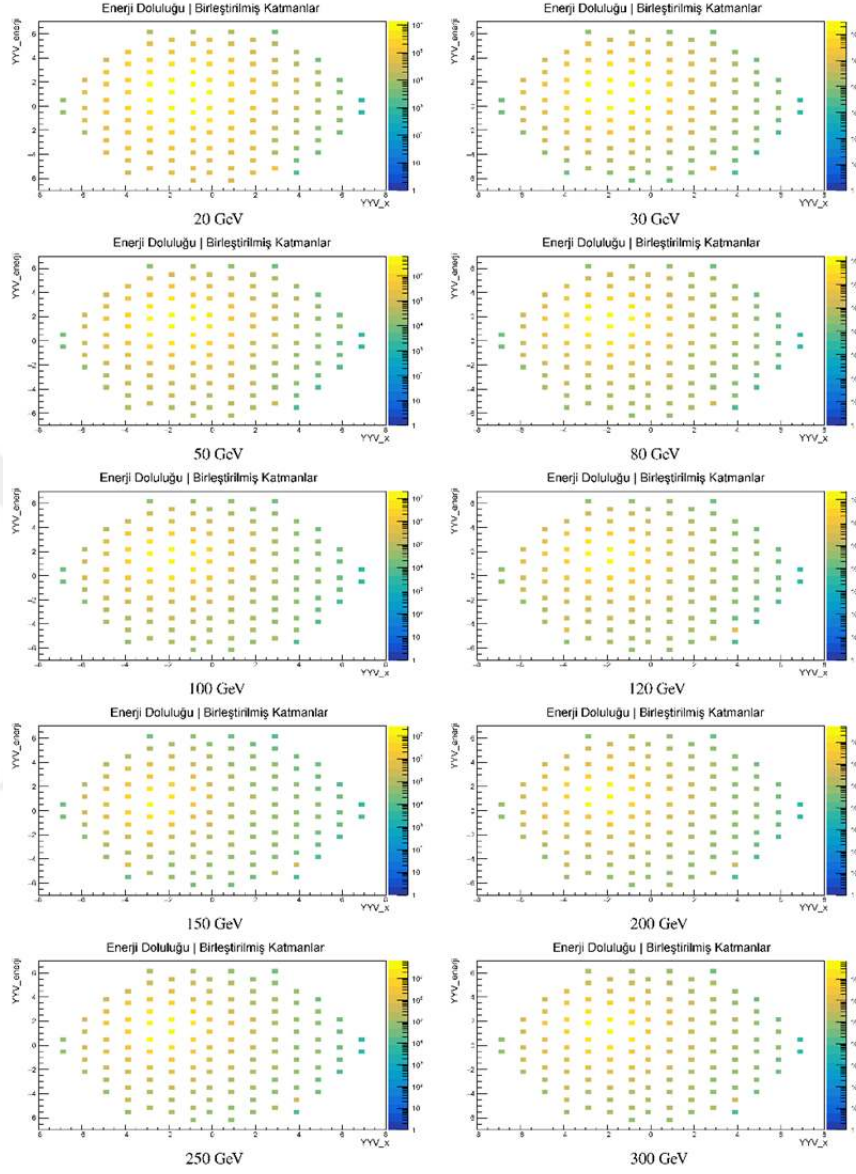
Çizelge 4.4. 2018 Ekim ayında alınan parçacıkların türleri ve enerji değerleri.

	e^-	μ^-	π
20 GeV	✓		✓
30 GeV	✓		✓
50 GeV	✓		✓
80 GeV	✓		✓
100 GeV	✓		✓
120 GeV	✓		✓
150 GeV	✓		✓
200 GeV	✓	✓	✓
250 GeV	✓		✓
300 GeV	✓	✓	✓

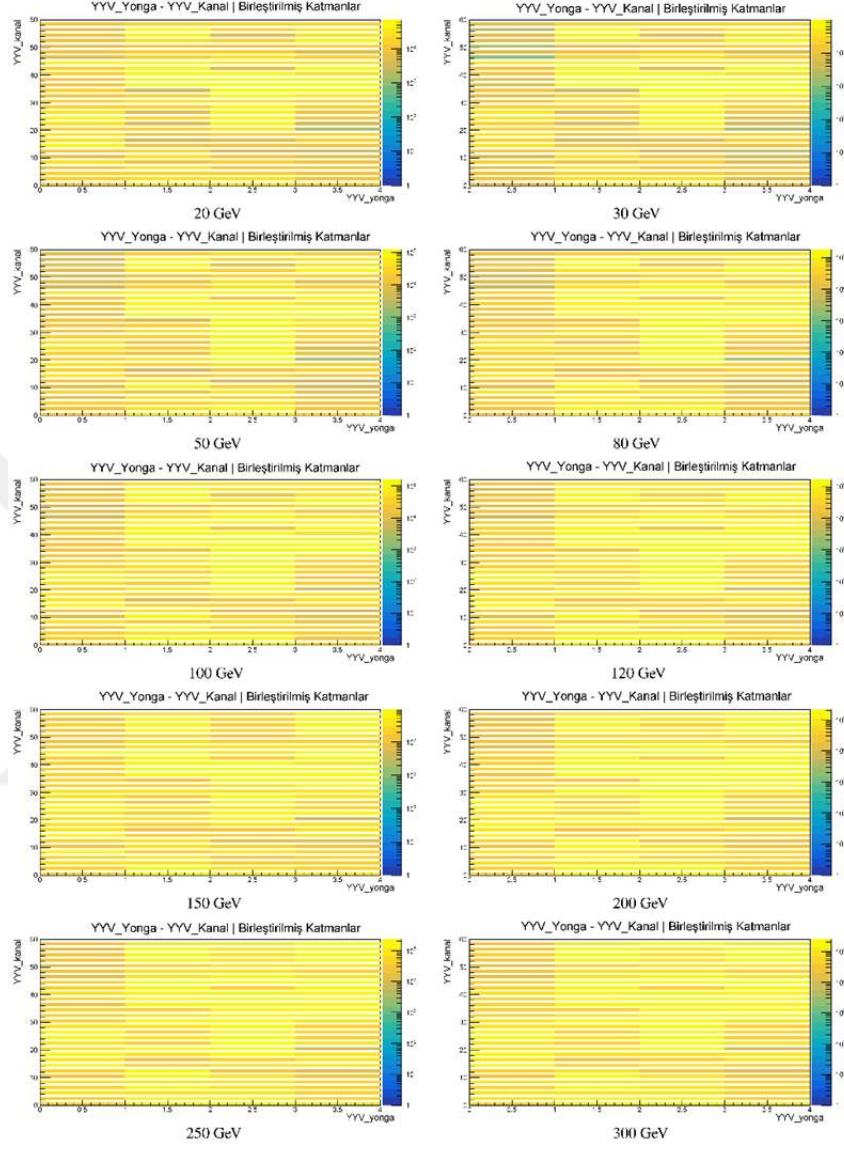
Şekil 4.20’de x -ekseni 6 inçlik birimin yatay kısmını, y -ekseni dikey kısmını göstermektedir. 20, 30 ve 50 GeV’lik parçacık demetinin doluluk oranının üst limiti 10^6 iken geriye kalan parçacık demetlerinin doluluk oranının üst limiti 10^7 ’dir. Hem düşük hem de yüksek enerjilerde birimlerin parçacıkları algılama performansının iyi olduğu gözükmemektedir.

Şekil 4.21’de x -ekseni yonga sayısını, y -ekseni kanal sayısını göstermektedir. HGCal demet testlerinde birim başına 4 adet yonga, 64 adet kanal kullanılmıştır. Bu bağlamda 20, 30 ve 150 GeV’lik parçacık demetinin doluluk oranının üst limiti 10^4 iken geriye kalan parçacık demetlerinin doluluk oranının üst limiti 10^5 ’tir. 150 GeV’lik parçacık demetinin doluluk seviyesinin 10^4 olmasının nedeni seçilen run numarasından kaynaklanmaktadır ve herhangi bir sorun teşkil etmemektedir. 150 GeV’den daha düşük ve daha yüksek enerjili parçacık demetlerinin iyi ölçülmesi ve veri alımı esnasında yaşanan teknik sorunun bilinmesi nedeniyle bu düşük değer önemsizdir. Genel olarak hem düşük hem de yüksek enerjilerde birimlerin parçacıkları algılama performansının iyi olduğu gözükmemektedir.

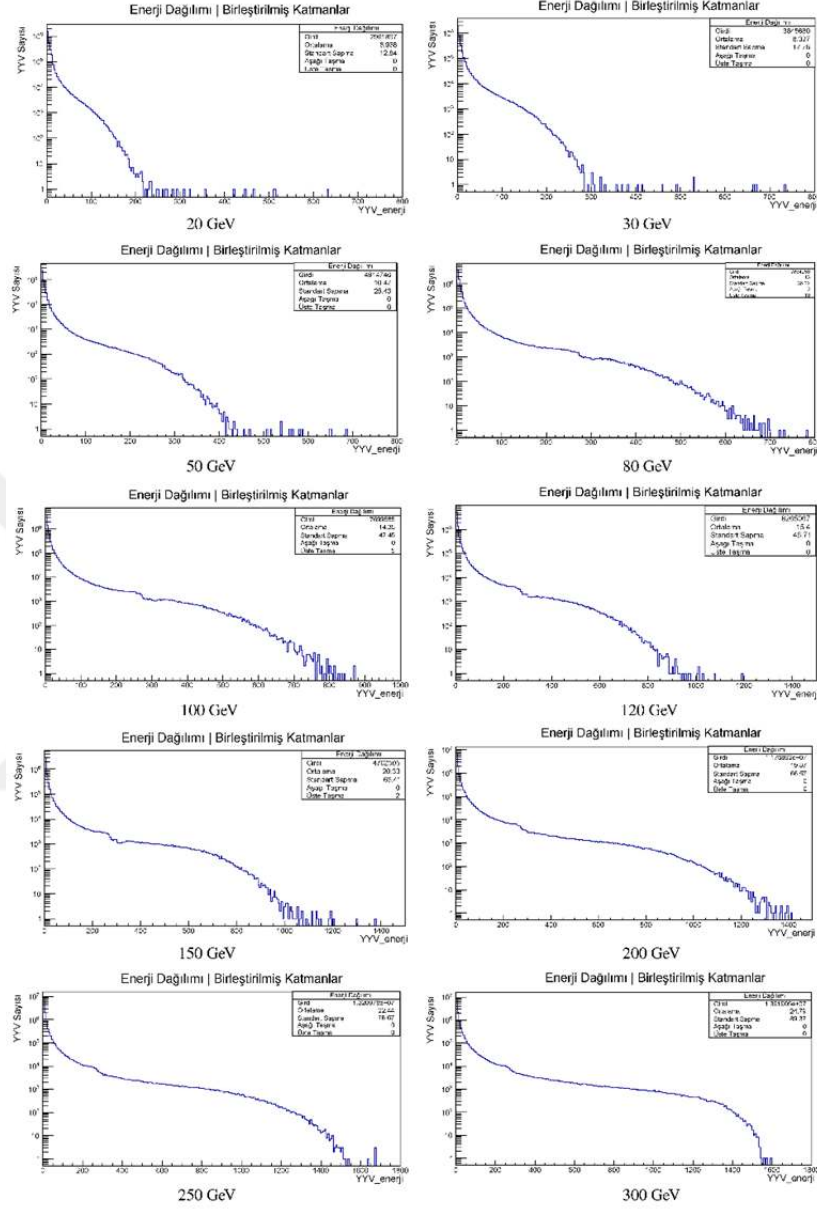
Şekil 4.22’de x -ekseni enerjinin değerini (MİP), y -ekseni yeniden yapılandırılmış çarpışma sayısını göstermektedir. Parçacık sayısının enerjiyle orantılı olarak düzgün bir şekilde azalması bize yine algıcın iyi şekilde ölçüm yaptığını göstermektedir. Şayet uzayan bir kuyruk yerine ani azalmalar veya artışlar gözükseydi bu durumda algılamanın kötü veya yetersiz olduğu yorumu yapılabilirdi.



Şekil 4.20. Ekim ayında alınan 20-300 GeV aralığındaki elektron demetinin 1-28 (EE) kanallarında oluşturduğu Enerji Doluluk Oranının birleştirilmiş gösterimi.



Şekil 4.21. Ekim ayında alınan 20-300 GeV aralığındaki elektron demetinin 1-28 (EE) kanallarında oluşturduğu Yonga-Kanal grafiğinin birleştirilmiş gösterimi.



Şekil 4.22. Ekim ayında alınan 20-300 GeV aralığındaki elektron demetinin 1-28 (EE) kanallarında oluşturduğu Enerji Dağılımlarının birleştirilmiş gösterimi.

Ekim ayında eklenen FH katmanlarının çözümlemeleri EE'den bağımsız olarak yapılmıştır. Bunun sebebi 7 birimden oluşan katmanlara sahip olmasıdır. 7

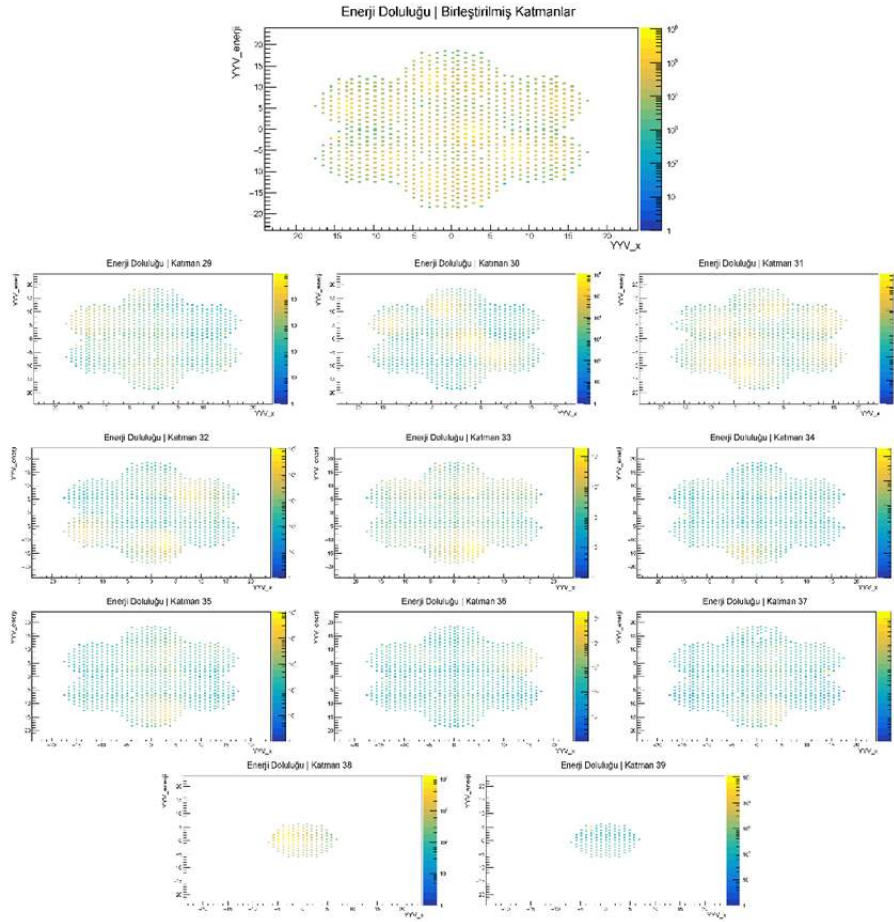
birim yine bir petek yapısı oluşturacak şekilde birleştirilmiştir. Son iki katmanın 3 birimden oluşmasına karşın yine de FH yapısında olduğundan beraber çözümleme yapılmıştır. Bu bağlamda her katman ayrı ayrı ve birleştirilmiş olarak incelenmiş olup Şekil 4.23 hariç geri kalan grafiklerde birleştirilmiş gösterimler kullanılmıştır. FH yapısının katmanlarının ayrı ayrı incelendiği örnek çözümlemesini Şekil 4.23'te görebilirsiniz. Normalde 40 katmanın olması gerekirken seçilen run numarasında düşün erken bitmesinden dolayı 39 katman gözükmemektedir. Yine de bu durum genel durumu etkilememektedir. Ayrıca bu bölümün algıcın daha arka tarafında olması gelen parçacık enerjisini etkilememektedir. Bundan dolayı EE (ilk 28 katman) kısmındaki gibi yüksek akılar gözükmemektedir. Bu beklenen durum grafiklerdeki düşüşün genel açıklamasıdır.

Şekil 4.24'te x -ekseni ≈ 36 cm'lik 7 birimden oluşan büyük birimin genişliğini yani yatay kısmını, y -ekseni de ≈ 36 cm yüksekliğini gösteren dikey kısmını göstermektedir. 20, 30, 50, 80 ve 100 GeV'lik parçacık demetinin doluluk oranının üst limiti 10^4 iken 150 GeV'lik parçacık demetinin doluluk oranı 10^6 , geriye kalan parçacık demetlerinin doluluk oranının üst limiti 10^5 'tir. Şekil 4.20'de 150 GeV'lik parçacık demeti için gözlenen problem bu grafikte de gözükmemektedir lakin genel için bir sorun teşkil etmemektedir. Bu bağlamda hem düşük hem de yüksek enerjilerde birimlerin parçacıkları algılama performansının iyi olduğu gözükmemektedir.

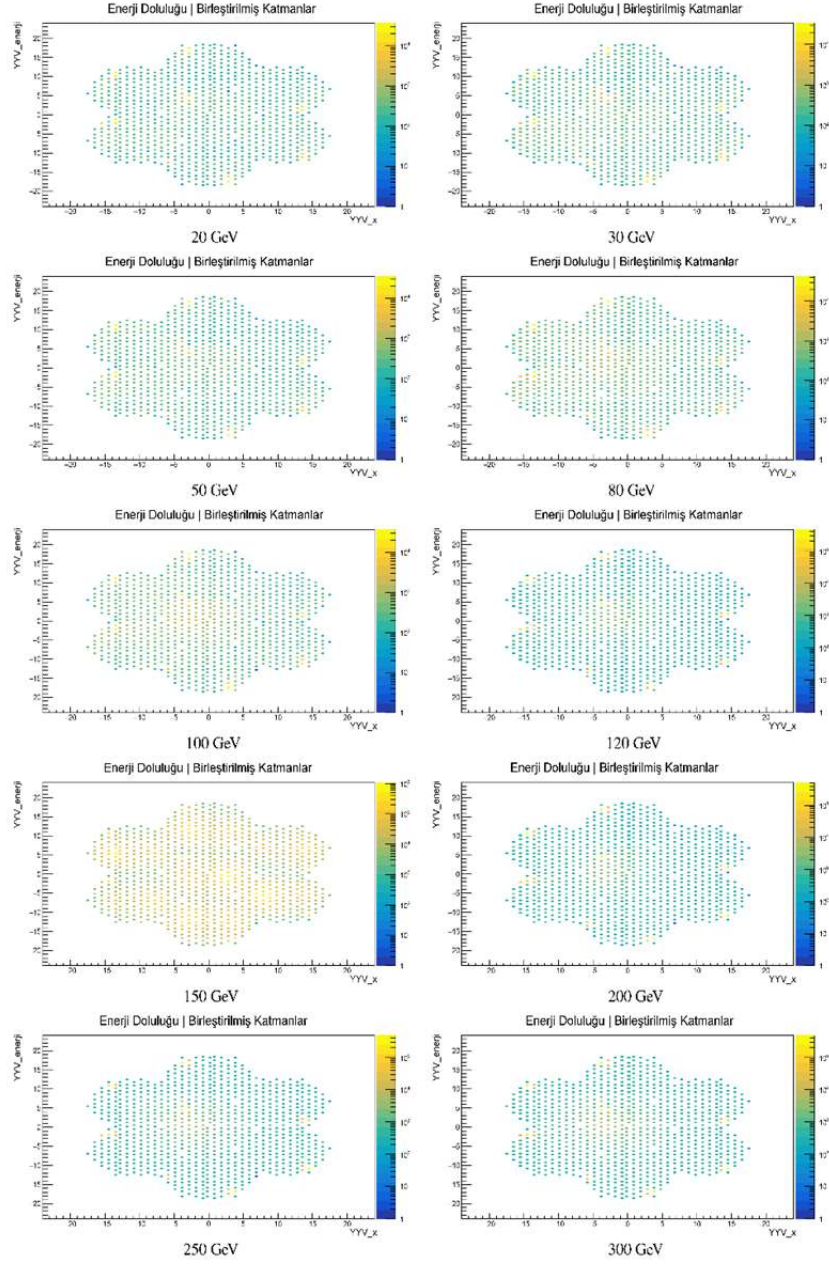
Şekil 4.25'te x -ekseni yonga sayısını, y -ekseni kanal sayısını göstermektedir. HGCal demet testlerinde birim başına 4 adet yonga, 64 adet kanal kullanılmıştır. Logaritmik olarak değişen z -ekseninin değeri parçacığın enerjisiyle doğru orantılı olmasına karşın tüm enerjilerdeki parçacık demetlerinin doluluk oranının üst limiti 10^5 'tir. 150 GeV'lik parçacık demetinin farklılığı burada da devam etmektedir. Düşük enerjiden yüksek enerjiye doğru doluluk miktarının da kanallarda yaygın olmaya başladığını yani kanalların genel itibariyle yüksek yoğunluğa karşılık gelen renge doğru geçiş yaptığını görmekteyiz. Bu durum da

bize hem düşük hem de yüksek enerjilerde birimlerin parçacıkları algılama performansının iyi olduğu göstermektedir.

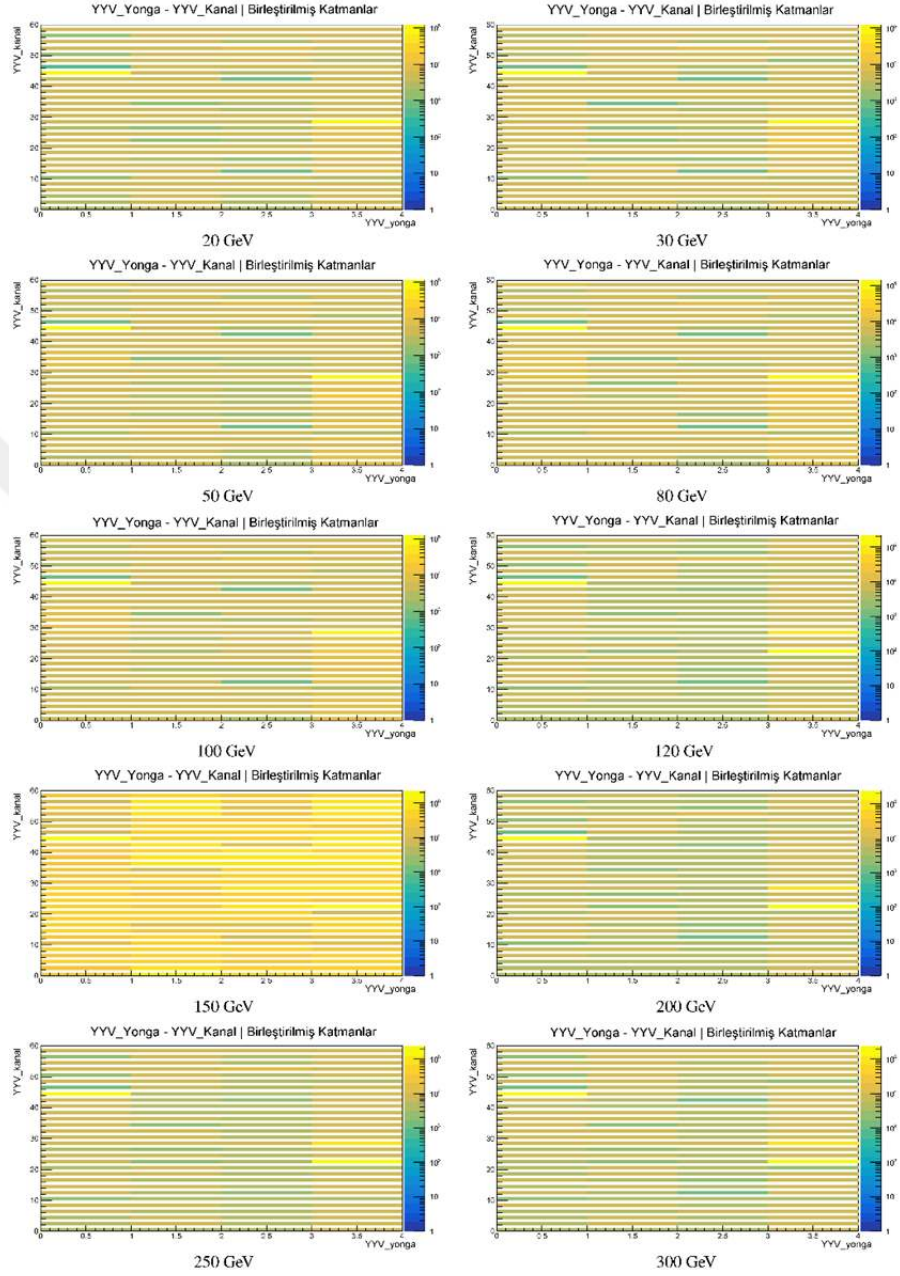
Şekil 4.26'da x -ekseni enerjinin değerini (MİP), y -ekseni çarpışma sayısını göstermektedir. Bazı tam olmayan ölçümlere rağmen genel olarak algıcın iyi şekilde ölçüm yaptığı gözükmemektedir.



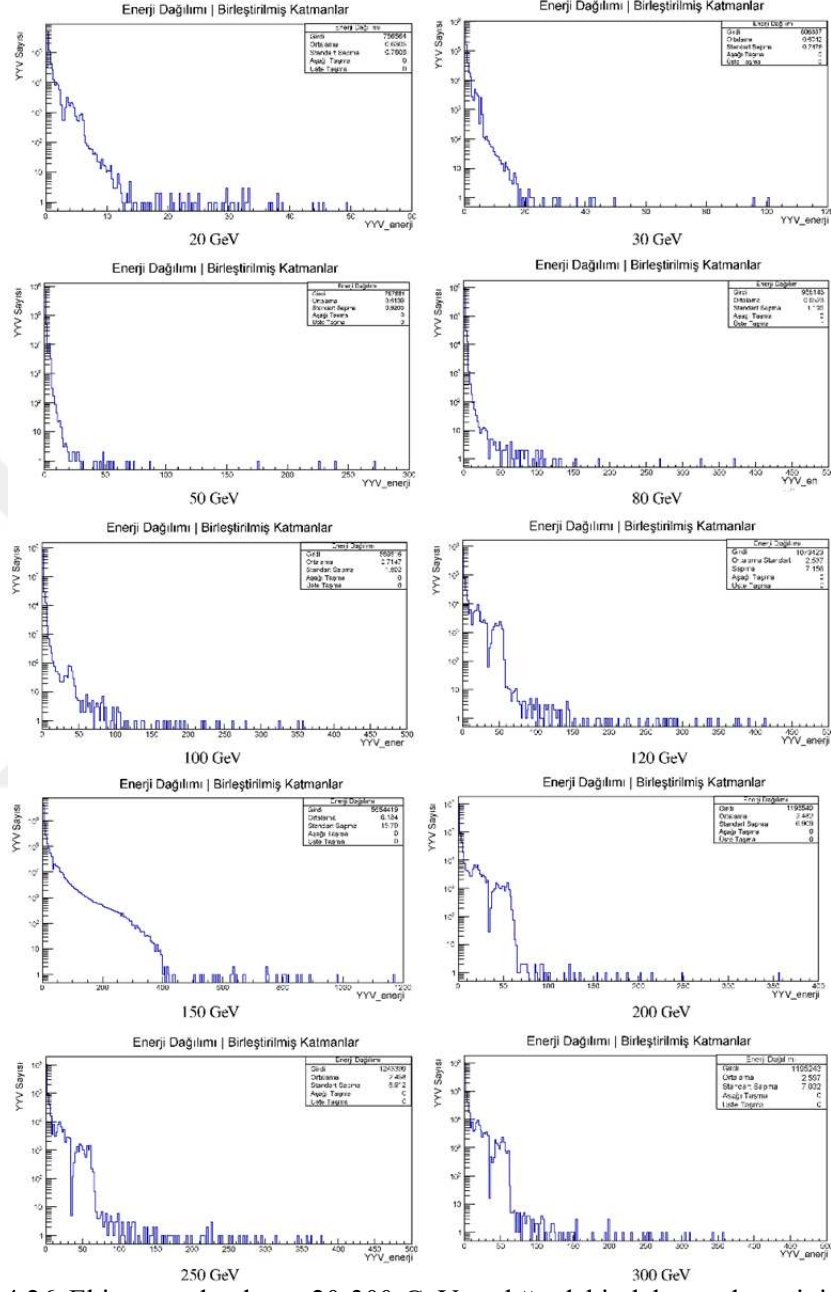
Şekil 4.23. 2018 Haziran'da FH yapısında sisteme eklenen 29-40 katmanlarının Enerji Doluluğunu gösteren tekli ve birleştirilmiş grafikleri.



Şekil 4.24. Ekim ayında alınan 20-300 GeV aralığındaki elektron demetinin 29-40 (FH) kanallarında oluşturduğu Enerji Doluluk Oranının birleştirilmiş gösterimi.



Şekil 4.25. Ekim ayında alınan 20-300 GeV aralığındaki elektron demetinin 29-40 (FH) kanallarında oluşturduğu Yonga-Kanal grafiklerinin birleştirilmiş gösterimi.



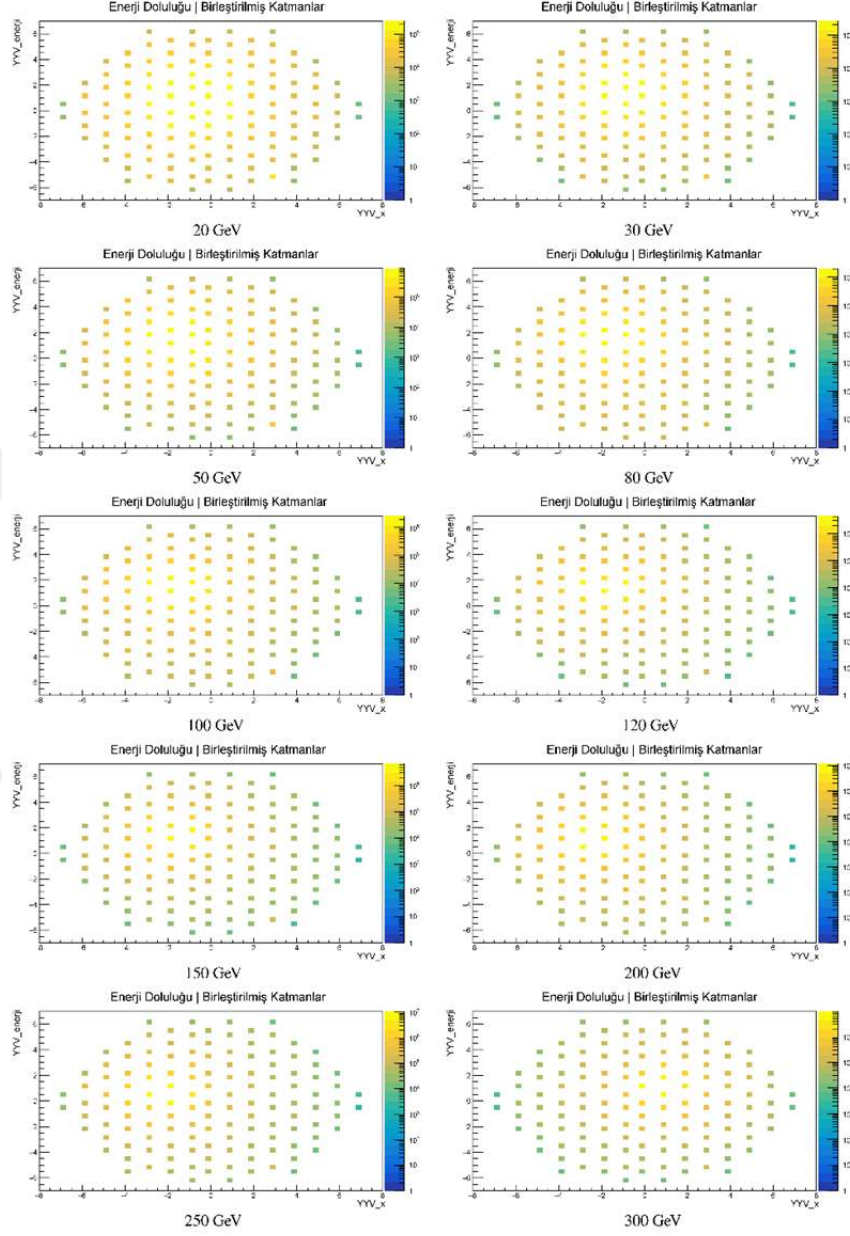
Şekil 4.26. Ekim ayında alınan 20-300 GeV aralığındaki elektron demetinin 29-40 (FH) kanallarında oluşturduğu Enerji Dağılımının birleştirilmiş gösterimi.

Ekim ayında kullanan parçacıklardan birisi de pion idi. Pion parçacık demetinin Çizelge 4.4'te de belirtildiği enerji seviyelerindeki ölçümleri yapılmıştır.

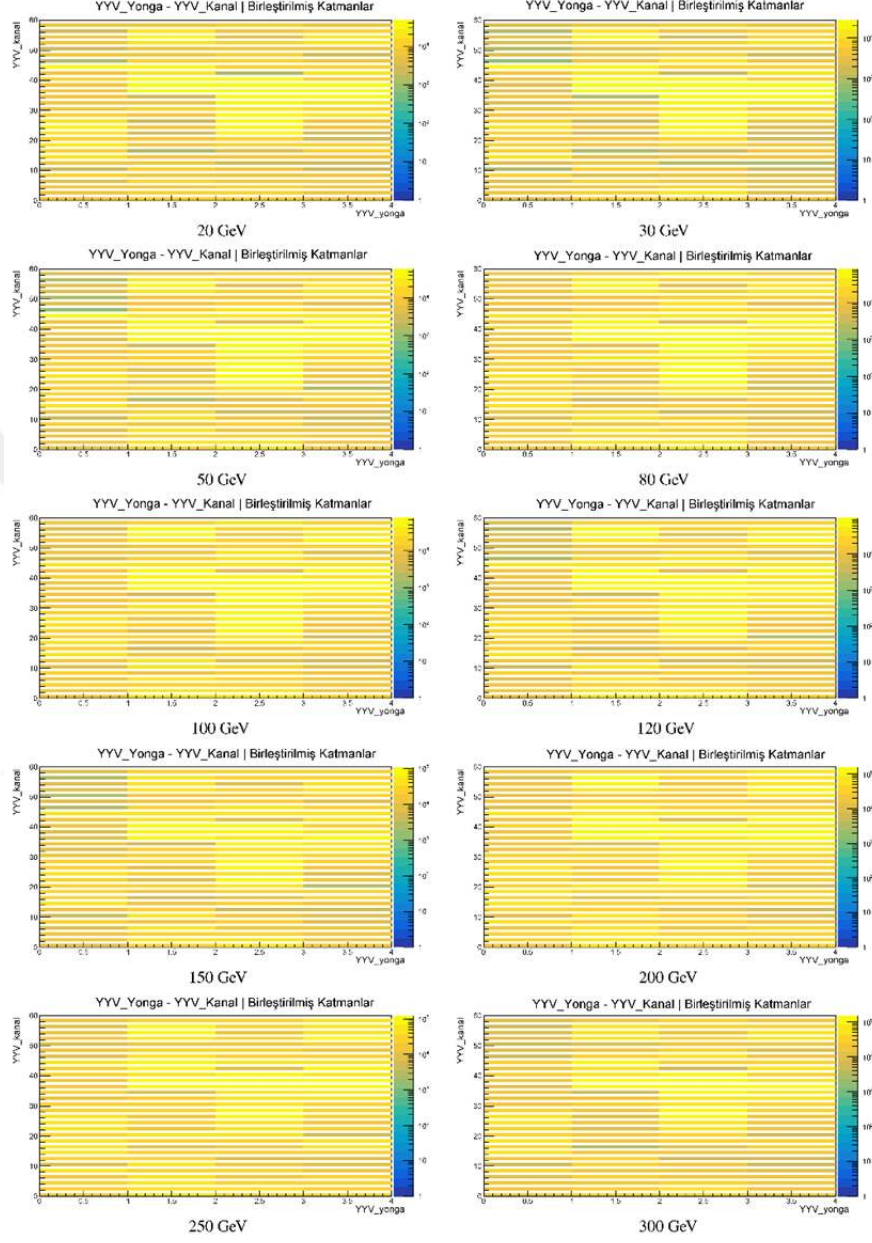
Şekil 4.27'de x -ekseni 6 inçlik birimin yatay kısmını, y -ekseni dikey kısmını göstermektedir. 20, 30 ve 50 GeV'lik parçacık demetinin doluluk oranının üst limiti 10^5 iken 80, 100, 120, 150 ve 300 GeV'lik parçacık demetlerinin doluluk oranının üst limiti 10^6 'dır. Geriye kalan 200 ve 250 GeV'lik parçacık demetlerinin doluluk oranının üst limiti 10^7 'dir. 300 GeV'deki parçacık demeti ile yapılan veri alımı esnasında neden düşük bir doluluk oranının çıktığı tam olarak bilinmemekle birlikte bu bir sorun olarak görülmemektedir. Hem düşük hem de yüksek enerjilerde birimlerin parçacıkları algılama performansının iyi olduğu gözükmemektedir.

Şekil 4.28'de x -ekseni yonga sayısını, y -ekseni kanal sayısını göstermektedir. HGCal demet testlerinde birim başına 4 adet yonga, 64 adet kanal kullanılmıştır. Bu bağlamda 20, 30, 50, 80, 100 ve 120 GeV'lik parçacık demetlerinin doluluk oranının üst limiti 10^4 iken geriye kalan 150, 200, 250 ve 300 GeV'lik parçacık demetlerinin doluluk oranının üst limiti 10^5 'tir. Hem düşük hem de yüksek enerjilerde birimlerin parçacıkları algılama performansının iyi olduğu gözükmemektedir.

Şekil 4.29'da genel olarak algıcın iyi şekilde ölçüm yaptığı gözükmemektedir.

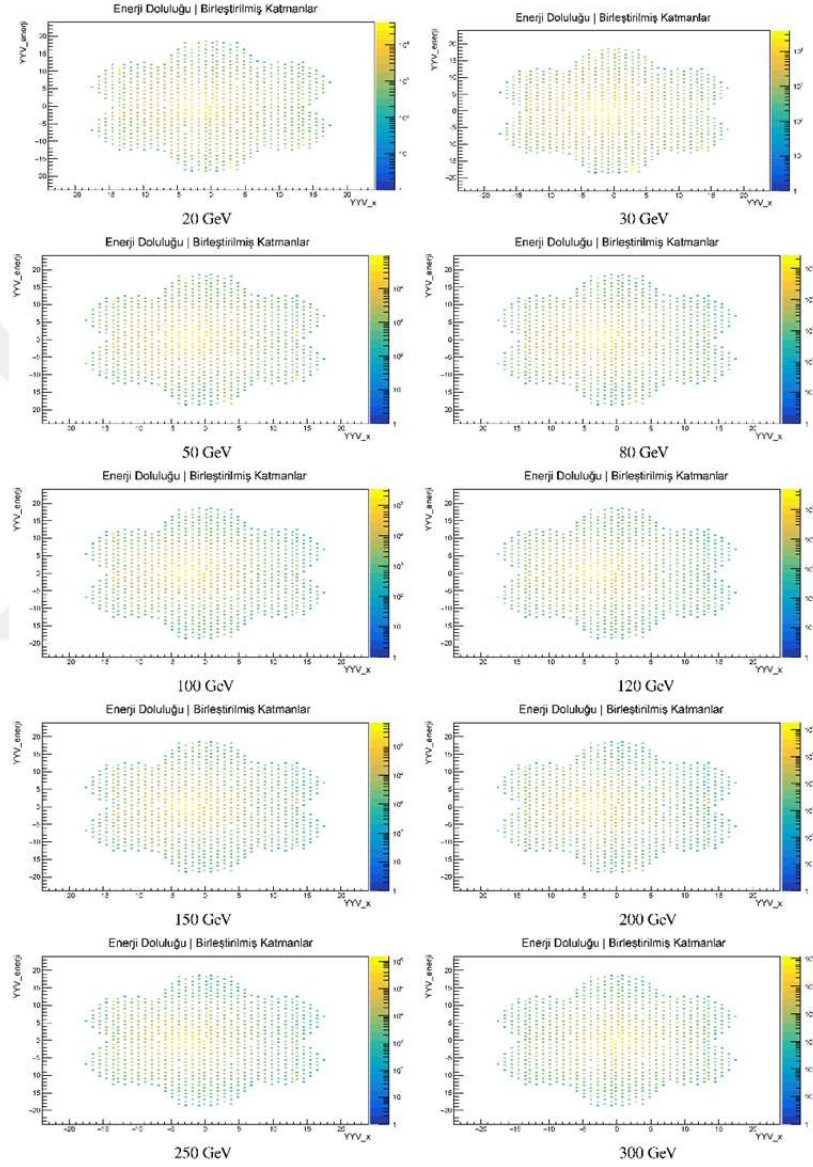


Şekil 4.27. Ekim ayında alınan 20-300 GeV aralığındaki pion demetinin 1-28 (EE) kanallarında oluşturduğu Enerji Doluluk Oranının birleştirilmiş gösterimi.

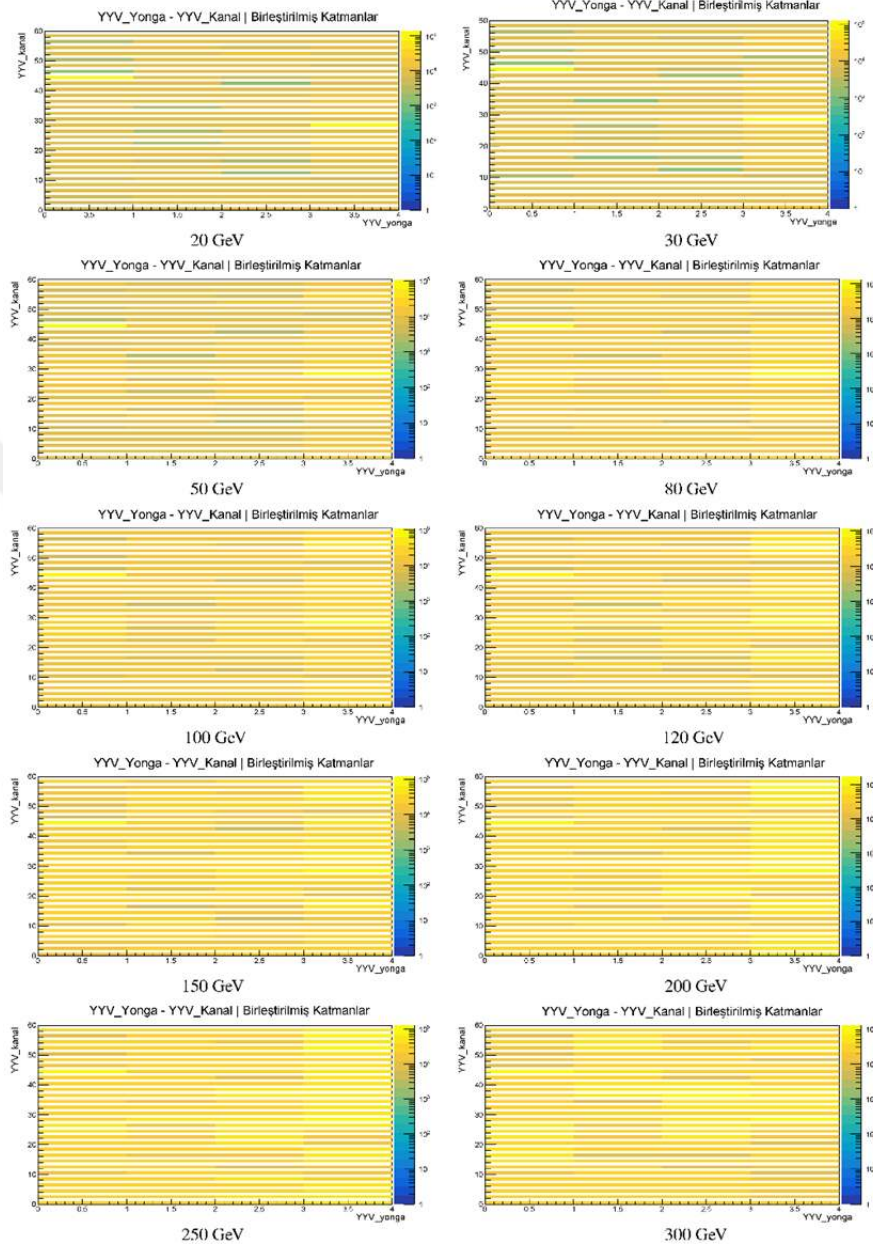


Şekil 4.28. Ekim ayında alınan 20-300 GeV aralığındaki pion demetinin 1-28 (EE) kanallarında oluşturduğu Yonga-Kanal grafiğinin birleştirilmiş gösterimi.

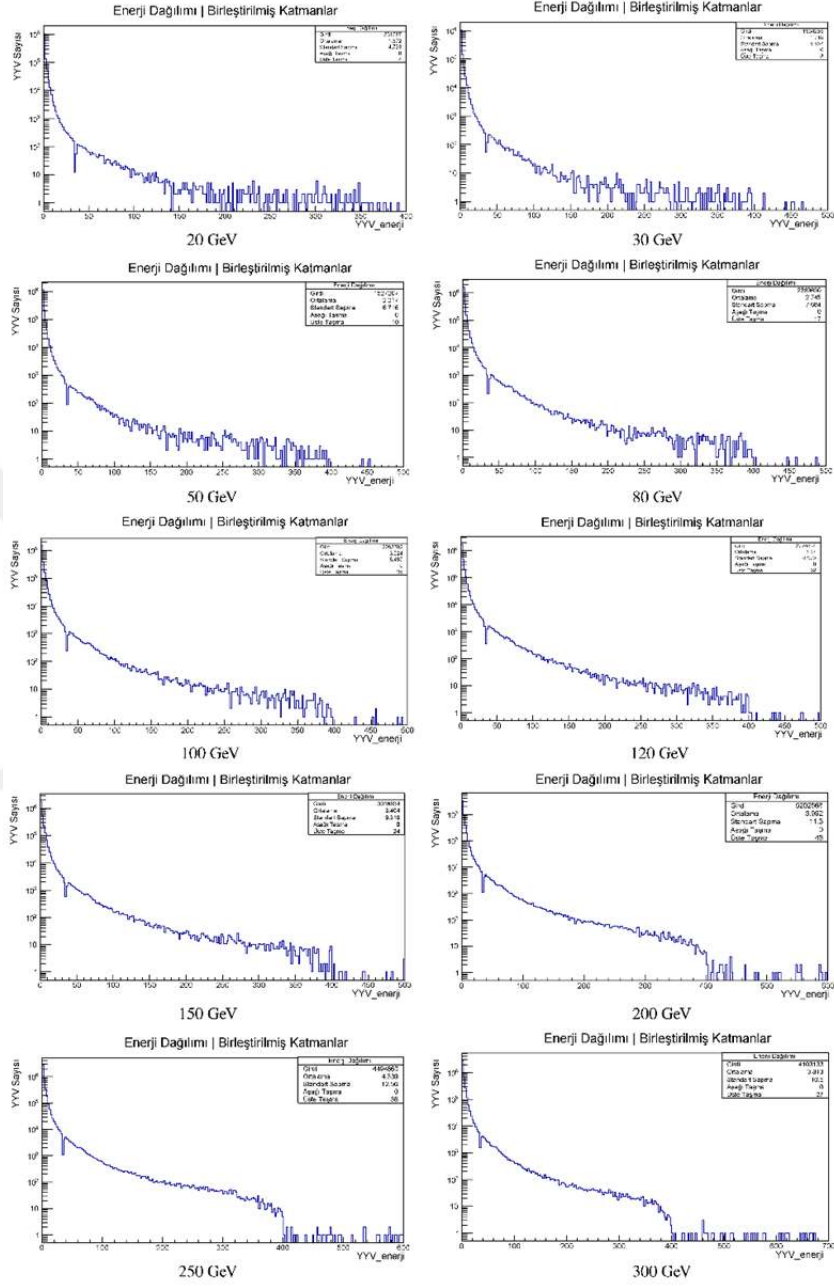
Aynı çalışmalar FH kısmı için de yapılmış ve yine algıç performansının iyi olduğunu gösteren sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 4.30. Ekim ayında alınan 20-300 GeV aralığındaki pion demetinin 29-40 (FH) kanallarında oluşturduğu Enerji Doluluk Oranının birleştirilmiş gösterimi.



Şekil 4.31. Ekim ayında alınan 20-300 GeV aralığındaki pion demetinin 29-40 (FH) kanallarında oluşturduğu Yonga-Kanal grafiklerinin birleştirilmiş gösterimi.



Şekil 4.32. Ekim ayında alınan 20-300 GeV aralığındaki pion demetinin 29-40 (FH) kanallarında oluşturduğu Enerji Dağılımının birleştirilmiş gösterimi.

4.2.3. Mip Çalışması

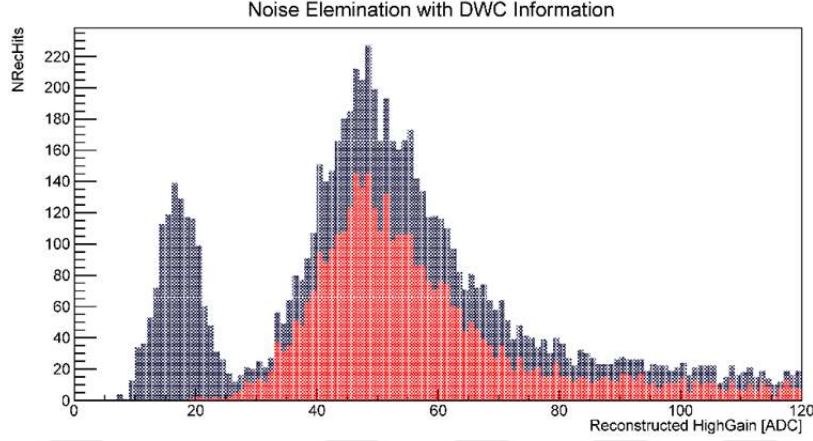
Bu tez çalışması boyunca bir algıcın verimliliğini izleme yöntemlerinden en elzemlerinden birisi olan MİP çalışmaları da yapılmıştır. MİP, minimum iyonize parçacık anlamına gelip ortamda nadir olarak etkileşime giren veya hiç girmeyen parçacıkları temsil etmek için kullanılır. Bu parçacıklardan en önemlileri müon ve bazı yüklü hadronlardır. Algıç, gelen parçacık hüzmesindeki minimum iyonize parçacıkları algılayabilecek şekilde ayarlanmalıdır. Mesela müon hüzmesi gönderildiğinde, algıç, hem gönderilen parçacık sayısına (parçacık hüzmesindeki parçacık sayısı) hem de enerjisine yakın bir ölçüm yapmalı. Ayarlamalar bu ölçüme en yakın değeri elde edene kadar devam etmektedir. Böylelikle algıcın hangi parçacığı algıladığının doğruluğu artmaktadır.

Çözümlemede, MİP'lerin algıç tarafından iyi veya iyiye yakın şekilde algılanabildiğini görmek gerekmektedir. Bunun için iki yöntem bulunmaktadır: Monte Carlo benzetimleri ile kıyaslamak ve katmanlarda ölçülen MİP'lerin yeniden yapılandırılmış yüksek kazanç¹⁴⁵ grafiklerini kontrol etmektir.

Bu tez çalışmasında Çizelge 4.4'deki 200 GeV'lik müon için araştırma yapılmıştır. Her enerji için yine en yüksek olay sayısına sahip olan run numaraları seçilmiştir.

Analize ilk olarak 2018 yılında yapılan demet testlerinde alınan veriler ile başlandı. Alınan verilerde gürültü olduğundan mütevellit geciktirmeli tel odası donanımından sağlanan verilerle gürültü elemesi yapılmıştır. Gürültü öncesi ve sonrası grafiği Şekil 4.33'de gösterilmiştir.

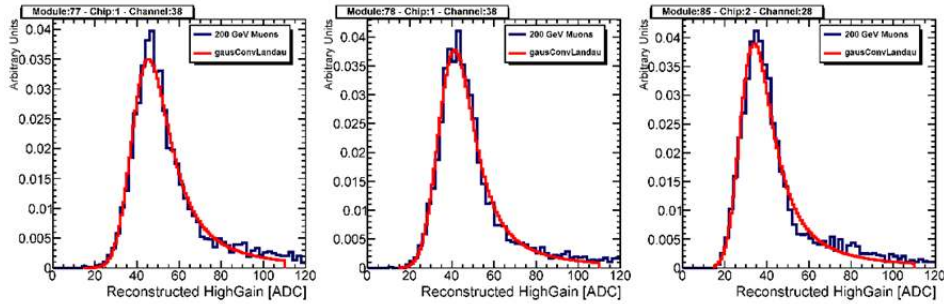
¹⁴⁵ (İng.) Reconstructed High Gain.



Şekil 4.33. MİP çalışması için gürültü temizleme öncesi (koyu yerler), ve sonrası (kırmızı yerler) gösterimi

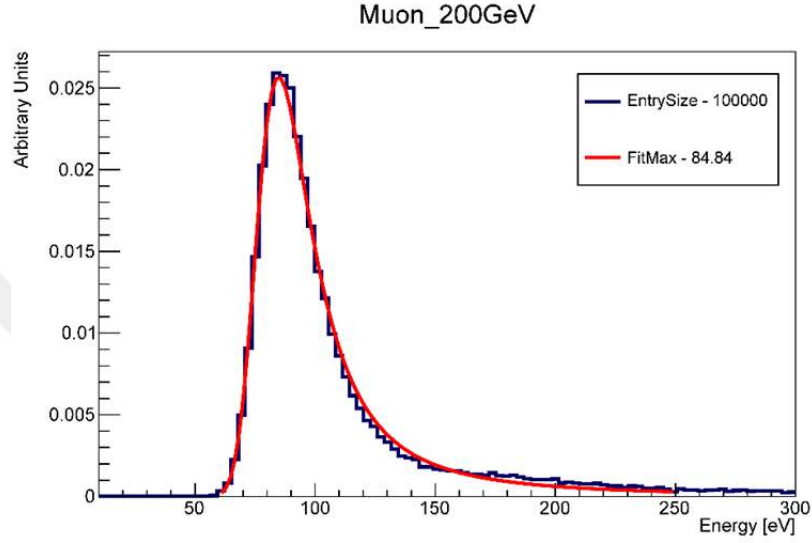
Gürültü çıkarımı sonrası elde edilen veri öncelikle normalize edilmiştir. Bunun nedeni elde edilen verilerin parçacık sayısından bağımsız olarak kontrol edilmesi içindir.

Normalize işlemi sonrası alınan verilerin doğruluğu Gaussian Landau Fit modeli ile kontrol edilmiştir. Bu işlemin amacı en olası sinyal değerini ve dağılım genişliğini çıkarmaktır. Kullanılan bu fit fonksiyonunun dağılımı ile HGAL'da alınan verilerin birbirleriyle uyum içerisinde olduğu gözükmemektedir (Şekil 4.34).



Şekil 4.34. 2018 MİP çalışması için 200 GeV'lik müon parçacık hüzmesinin dağılımının Landau-Gaussian Dağılımı ile kıyaslanması

Sonuçların doğruluğunun kontrolü için bu fit fonksiyonun Monte Carlo benzetimi ile de kıyaslaması yapılmıştır. Şekil 4.35’de, elde edilen sonuçların Monte Carlo ile de uyumlu olduğu gözükmemektedir.



Şekil 4.35. Monte Carlo benzetimi ile üretilen 200 GeV'lik müon hüzmesinin fit ile karşılaştırılması

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada 2018 yılı içerisinde HGICAL'ın Haziran ve Ekim aylarında alınan verilerindeki Enerji Doluluğu, Enerji Dağılımı ve Yonga-Kanal grafiklerine ayrıca MİP performansına bakıldı. Performans kontrolündeki çözümlemenin güvenilir sonuçlar vermesi için olay sayısı fazla olan run numaraları seçildi. Algıcın genel çalışmaları CERN'deki HGICAL Test Beam grubu ile birlikte yapıldı ve yorumlandı. Haziran ayı için yapılan çözümlemenin ardından EE kısmının iyi çalıştığının gözlenmesine mukabil 22. kanaldaki arızadan dolayı iyi ölçüm yapılamadığı tespit edilmiş ve diğer çözümlemelerde bu kanal dışarılanmıştır.

Ekim ayında yapılan demet testinin çözümlemesinde FH ve EE kısımları ayrı ayrı incelendi. EE kısmının yine iyi çalıştığı FH kısmının ise iyi çalışmasına rağmen ilerideki yükseltmeler düşünülüp farklı yapılandırma ile tekrar denemesine karar verildi. Yapılandırma-2 ve Yapılandırma-3 ile ilgili çözümlemeler de yapılmış olup bazı teknik sorunlardan dolayı Yapılandırma-1 gibi bilgi sağlanamamıştır. Genel olarak en yüksek verimlilik Yapılandırma-1'de sağlanmıştır.

Ekim ayından sonra MİP çalışmalarına başlanılmış olup ayarlama çözümlemeleri sonucunda HGICAL'ın minimum iyonize parçacıkları en iyi algılayabilecek şekilde ayarlamaları yapılmıştır.

2018 Ekim ayından sonra CERN'deki Demet Testi düzeneği DESY'e taşınmış olup farklı yapılandırma ile veri alımı devam etmektedir.



KAYNAKLAR

- Acharya, B. ve ark., 2006. “The CMS Outer Hadron Calorimeter”, CMS-NOTE-2006-127, https://cds.cern.ch/record/973131/files/NOTE2006_127.pdf, (Erişim Tarihi: 9 Temmuz 2019).
- Agostino, L., 2009. “Commissioning of the CMS High Level Trigger”, JINST 4 (2009) P10005, FERMILAB-PUB-09-542-CMS, <https://cds.cern.ch/record/1199930/files/arXiv:0908.1065.pdf>, (Erişim Tarihi: 9 Temmuz 2019).
- Akchurin, N., 2018. “First beam tests of prototype silicon modules for the CMS High Granularity Endcap Calorimeter”, FERMILAB-CONF-18-595-CMS, JINST 13 (2018) P10023, <https://cds.cern.ch/record/2646748/files/pdf.pdf>, (Erişim Tarihi: 9 Temmuz 2019).
- ALICE Collaboration, 2008. “The ALICE experiment at the CERN LHC”, JINST 3 (2008) S08002, https://cds.cern.ch/record/1129812/files/jinst8_08_s08002.pdf, (Erişim Tarihi: 9 Temmuz 2019).
- Alison, J., 2012. “The Road to Discovery: Detector Alignment, Electron Identification, Particle Misidentification, WW Physics, and the Discovery of the Higgs Boson”, PhD thesis. University of Pennsylvania, <https://cds.cern.ch/record/1536507/files/CERN-THESIS-2012-295.pdf>, (Erişim Tarihi: 9 Temmuz 2019).
- Apollinari, G.ve ark, 2017. “High-Luminosity Large Hadron Collider (HL-LHC) : Technical Design Report V. 0.1”, CERN-2017-007-M, <https://cds.cern.ch/record/2284929/files/40-39-PB.pdf>, (Erişim Tarihi: 9 Temmuz 2019).

- 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, (Erişim Tarihi: 9 Temmuz 2019).
- Bartoloni, A. ve ark., 2013. “The CMS ECAL Barrel HV System”, JINST 8 (2013) C02039, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/8/02/C02039/pdf>, (Erişim Tarihi: 9 Temmuz 2019).
- Brüning, E. ve ark., 2004. “LHC design report. Vol. I: The LHC main ring”, CDS, <https://cds.cern.ch/record/782076/files/CERN-2004-003-V1-ft.pdf>, (Erişim Tarihi: 9 Temmuz 2019).
- CERN Annual report, 2017. https://cds.cern.ch/record/2624296/files/18030409_CERN_rapport_2017EN.pdf, (Erişim Tarihi: 9 Temmuz 2019).
- CERN Brochure, 2017. <https://cds.cern.ch/record/2255762/files/CERN-Brochure-2017-002-Eng.pdf>, (Erişim Tarihi: 9 Temmuz 2019).
- CMS Collaboration, 1997. “The CMS electromagnetic calorimeter project : Technical Design Report”, CERN-LHCC-97-033 ; CMS-TDR-4, https://cds.cern.ch/record/349375/files/ECAL_TDR.pdf, (Erişim Tarihi: 9 Temmuz 2019).
- CMS Collaboration, 1997. “The CMS magnet project : Technical Design Report”, CERN-LHCC-97-010; CMS-TDR-1, https://cds.cern.ch/record/331056/files/Magnet_TDR_complete.pdf, (Erişim Tarihi: 9 Temmuz 2019).
- CMS Collaboration, 1997. “The CMS muon project: Technical Design Report”, CERN-LHCC-97-032; CMS-TDR-3, <https://cds.cern.ch/record/343814/files/LHCC-97-032.pdf>, (Erişim Tarihi: 9 Temmuz 2019).
- CMS Collaboration, 1997. “The CMS tracker system project : Technical Design Report”, CMS-TDR-5, CERN-LHCC-98-006.

- CMS Collaboration, 2002. “CMS The TriDAS Project : Technical Design Report, Volume 2: Data Acquisition and High-Level Trigger”, CERN-LHCC-2002-026 ; CMS-TDR-6, <https://cds.cern.ch/record/578006/files/cer-2336481.pdf>, (Erişim Tarihi: 9 Temmuz 2019).
- CMS Collaboration, 2006. “Detector Performance and Software”, CMS Physics, Technical Design Report, Volume 1, CERN- LHCC 2006-001, <http://cds.cern.ch/record/922757/files/lhcc-2006-001.pdf>, (Erişim Tarihi: 9 Temmuz 2019).
- CMS Collaboration, 2006. “Physics Performance”, CMS Physics, Technical Design Report, Volume 2, CERN- LHCC 2006-021, <http://cds.cern.ch/record/942733/files/lhcc-2006-021.pdf>, (Erişim Tarihi: 9 Temmuz 2019).
- CMS Collaboration, 2008. “The CMS experiment at the CERN LHC”, JINST 3:S08004, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/3/08/S08004/meta>, (Erişim Tarihi: 9 Temmuz 2019).
- CMS Collaboration, 2009. “Identification and Filtering of Uncharacteristic Noise in the CMS Hadron Calorimeter”, CMS-CFT-09-019 ; CMS-CFT-09-019, <https://cds.cern.ch/record/1223941/files/fermilab-pub-10-155-cms.pdf>, (Erişim Tarihi: 9 Temmuz 2019).
- CMS Collaboration, 2010, “Technical Proposal For The Phase-I Upgrade Of The Compact Muon Solenoid”, 1 June 2015, CERN-LHCC-2015-10, <https://cds.cern.ch/record/2020886/files/LHCC-P-008.pdf>, (Erişim Tarihi: 9 Temmuz 2019).
- CMS Collaboration, 2010. “Precise Mapping of the Magnetic Field in the CMS Barrel Yoke using Cosmic Rays”, JINST 5:T03021,2010, CMS-CFT-09-015, <https://arxiv.org/pdf/0910.5530.pdf>, (Erişim Tarihi: 9 Temmuz 2019).

- CMS Collaboration, 2012, “Cms Technical Design Report For The Phase 1 Upgrade Of The Hadron Calorimeter”, 26 September 2012, CERN-LHCC-2012-015, <https://cds.cern.ch/record/1481837/files/CMS-TDR-010.pdf>, (Erişim Tarihi: 9 Temmuz 2019).
- CMS Collaboration, 2013. “The performance of the CMS muon detector in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV at the LHC”, CMS-MUO-11-001 ; CERN-PH-EP-2013-072 ; arXiv:1306.6905 ; CMS-MUO-11-001 ; CERN-PH-EP-2013-072, https://cds.cern.ch/record/1558674/files/jinst_8_11_P11002.pdf, (Erişim Tarihi: 9 Temmuz 2019).
- CMS Collaboration, 2015. “Technical Proposal for the Phase-II Upgrade of the CMS Detector”, CERN-LHCC-2015-010 ; LHCC-P-008 ; CMS-TDR-15-02, <https://cds.cern.ch/record/2020886/files/LHCC-P-008.pdf>, (Erişim Tarihi: 9 Temmuz 2019).
- CMS Collaboration, 2017. “The Phase-2 Upgrade of the CMS Endcap Calorimeter”, CERN-LHCC-2017-023; CMS-TDR-019, <https://cds.cern.ch/record/2293646/files/CMS-TDR-019.pdf>, (Erişim Tarihi: 9 Temmuz 2019).
- CMS Collaboration, 2017. “The Phase-2 Upgrade of the CMS Muon Detectors”, CERN-LHCC-2017-012; CMS-TDR-016, <https://cds.cern.ch/record/2283189/files/CMS-TDR-016.pdf>, (Erişim Tarihi: 9 Temmuz 2019).
- CMS Collaboration, 2017. “The Phase-2 Upgrade of the CMS Tracker”, CERN-LHCC-2017-009; CMS-TDR-014, <https://cds.cern.ch/record/2272264/files/CMS-TDR-014.pdf>, (Erişim Tarihi: 9 Temmuz 2019).

- CMS Collaboration, 2017. “The upgrade of the CMS hadron calorimeter with silicon photomultipliers”, Topical Workshop on Electronics for Particle Physics, 26–30 September 2016, <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/12/01/C01080>
- CMS Collaboration, 2019. “First results from the CMS SiPM-based hadronic endcap Calorimeter”, J. Phys.: Conf. Ser. 1162 012009, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1162/1/012009>, (Erişim Tarihi: 9 Temmuz 2019).
- CMS HCAL Collaboration, 2007. “Design, Performance, and Calibration of CMS Hadron-Barrel Calorimeter Wedges”, CMS-NOTE-2006-138, https://cds.cern.ch/record/1049915/files/NOTE2006_138.pdf, (Erişim Tarihi: 9 Temmuz 2019).
- CMS HCAL Collaboration, 2007. “Design, Performance, and Calibration of CMS Hadron-Barrel Calorimeter Wedges”, CMS-NOTE-2006-138, https://cds.cern.ch/record/1049915/files/NOTE2006_138.pdf, (Erişim Tarihi: 9 Temmuz 2019).
- CMS HCAL Collaboration, 2008. “Design, Performance, and Calibration of CMS Hadron Endcap Calorimeters”, CMS-NOTE-2008-010, https://cds.cern.ch/record/1103003/files/NOTE2008_010.pdf, (Erişim Tarihi: 9 Temmuz 2019).
- Collins, J., 1997. “Light cone variables, rapidity and all that”, Penn State University, <https://arxiv.org/abs/hep-ph/9705393v1>, (Erişim Tarihi: 9 Temmuz 2019).
- Denergi, D., Guyot, C., Hoecker, A., Roos, L., 2018. Higgs ve CERN. Alfa Yayınları, İstanbul, 438s.
- Dominguez, A., 2012. “CMS Technical Design Report for the Pixel Detector Upgrade”, CMS-TDR-11, CERN-LHCC-2012-016, <https://cds.cern.ch/record/1481838/files/CMS-TDR-011.pdf>, (Erişim Tarihi: 9 Temmuz 2019).

- Evans, L., 2014. "The Large Hadron Collider, a personal recollection", Prog. Theor. Exp. Phys. 2014, 02A102, <https://academic.oup.com/ptep/article-pdf/2014/2/02A102/9719394/ptt117.pdf>, (Erişim Tarihi: 9 Temmuz 2019).
- Fabjan, C. ve Schukraft, J., 2011. "The Story of ALICE: Building the dedicated heavy ion detector at LHC", The Large Hadron Collider: A marvel technology', EPFL-Press Lausanne, Switzerland, 2009 (Editor: L. Evans), chapter 5.4, <https://arxiv.org/abs/1101.1257>, (Erişim Tarihi: 9 Temmuz 2019).
- Falconer, I., 1987. "Corpuscles, Electrons and Cathode Rays: J J Thomson and the 'Discovery of the Electron'", British Journal for the History of Science,"
- Fallavollita, F., 2019. "Triple-Gas Electron Multiplier technology for future upgrades of the CMS experiment: construction and certification of the CMS GE1/1 detector and longevity studies", CERN-THESIS-2018-349, <https://cds.cern.ch/record/2658126/files/CERN-THESIS-2018-349.pdf>, (Erişim Tarihi: 9 Temmuz 2019).
- Garg, B., 2018. "Search for Quark Compositeness in gamma+jet final states in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the CMS Detector at the Large Hadron Collider", CMS-TS-2018-026 ; CERN-THESIS-2018-246, http://cds.cern.ch/record/2647949/files/TS2018_026_2.pdf, (Erişim Tarihi: 9 Temmuz 2019).
- Halyo, V., 2013. "GPU Enhancement of the Trigger to Extend Physics Reach at the LHC", JINST 8 (2013) P10005, http://cds.cern.ch/record/1550044/files/1748-0221_8_10_P10005.pdf,
- Heisenberg, W., 2000. Fizik ve felsefe. Belge Yayınları, İstanbul, 291s.
- Joyce, J., 1939. "Finnegans Wake". Penguin Books. ISBN 978-0-14-006286-1.
- Kragh, H., 2014. "Photon: New light on an old name", Center Sci. Stud. Dept. Physics Astronomy Aarhus Univ. Denmark, <https://arxiv.org/abs/1401.0293>, (Erişim Tarihi: 9 Temmuz 2019).

- Leo, W., 1994. “Techniques for nuclear and particle physics experiments : a how-to approach”, 2nd ed., DOI: 10.1007/978-3-642-57920-2, <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-57920-2>, (Erişim Tarihi: 9 Temmuz 2019).
- LHCb Collaboration, 2008. “The LHCb Detector at the LHC”, LHCb-DP-2008-001; CERN-LHCb-DP-2008-001, https://cds.cern.ch/record/1129809/files/jinst8_08_s08005.pdf, (Erişim Tarihi: 9 Temmuz 2019).
- LHCb Collaboration, 2015. “Observation of J/ψ resonances consistent with pentaquark states in $\Lambda^0_b \rightarrow J/\psi K^- p$ decay”, Phys.Rev.Lett. 115 (2015) 072001, <https://arxiv.org/abs/1507.03414>, (Erişim Tarihi: 9 Temmuz 2019).
- Lipinski, M., 2019. “System Tests and Qualification of Pixel Modules and DC-DC Converters for the Phase-1 Upgrade of the CMS Pixel Detector”, CMS-TS-2019-002 ; CERN-THESIS-2019-011, https://cds.cern.ch/record/2666514/files/TS2019_002.pdf, (Erişim Tarihi: 9 Temmuz 2019).
- Liu, Y., 2018. “Progress of CMS HGCal”, The 4th China LHC Physics Workshop (CLHCP 2018), <https://indico.ihep.ac.cn/event/8414/session/8/contribution/130/material/slides/0.pdf>, (Erişim Tarihi: 9 Temmuz 2019).
- Maier, A., 2017. “Sensors for the CMS High Granularity Calorimeter”, Instrumentation for Colliding Beam Physics (INSTR-17), <https://indico.inp.nsk.su/event/8/session/5/contribution/9/material/slides/0.pdf>, (Erişim Tarihi: 9 Temmuz 2019).
- Noferini, Francesco, 2018. “ALICE results from Run-1 and Run-2 and perspectives for Run-3 and Run-4”, J. Phys. : Conf. Ser. 1014 (2018) 012010, <http://cds.cern.ch/record/2681000/files/pdf.pdf>, (Erişim Tarihi: 9 Temmuz 2019).

- Onel, Y., 2018. “Status of the CMS High Granularity Calorimeter”, CMS CR - 2018/414, https://cds.cern.ch/record/2653018/files/CR2018_414.pdf, (Erişim Tarihi: 9 Temmuz 2019).
- Particle Data Group, 2016. “Review of Particle Physics”, Chinese Physics C Vol. 40, No. 10 (2016) 100001, <http://pdg.lbl.gov/2017/download/rpp2016-Chin.Phys.C.40.100001.pdf>, (Erişim Tarihi: 9 Temmuz 2019).
- Peña, C., 2017. “Searches for New Physics at the Compact Muon Solenoid Experiment and Precision Timing Calorimetry”, CERN-THESIS-2017-410, https://cds.cern.ch/record/2633294/files/thesis_cpena_2.pdf, (Erişim Tarihi: 9 Temmuz 2019).
- Pinfold, J L., 2014. “The MoEDAL Experiment at the LHC – a New Light on the Terascale Frontier”, J. Phys.: Conf. Ser. 631 (2015) 012014, http://cds.cern.ch/record/2159143/files/1742-6596_631_1_012014.pdf, (Erişim Tarihi: 9 Temmuz 2019).
- Planck Collaboration, 2013. “Planck 2013 results. XVI. Cosmological parameters”, Astron.Astrophys. 571 (2014) A16, <https://arxiv.org/abs/1303.5076>, (Erişim Tarihi: 9 Temmuz 2019).
- Quast, T., 2017. “Construction and beam-tests of silicon-tungsten prototype modules for the CMS High Granularity Calorimeter for HL-LHC, JINST 13 (2018) C02044, arXiv:1712.05638, <https://cds.cern.ch/record/2298247/files/arXiv:1712.05638.pdf>, (Erişim Tarihi: 9 Temmuz 2019).
- Rossi, L., 2010. “Superconductivity: Its Role, Its Success and Its Setbacks in the Large Hadron Collider of CERN”, CERN-ATS-2010-006, <https://cds.cern.ch/record/1235168/files/CERN-ATS-2010-006.pdf>, (Erişim Tarihi: 9 Temmuz 2019).

- Rubinov, P., 2016. “Development of flexible, scalable, low cost readout for beam tests of the high granularity calorimeter for the CMS endcap”, CMS-CR-2016-453, https://cds.cern.ch/record/2266438/files/CR2016_453.pdf, (Erişim Tarihi: 9 Temmuz 2019).
- Sahoo, R., 2016. “Relativistic Kinematics”, Indian Inst. of Technology Indore, <https://arxiv.org/abs/1604.02651>, (Erişim Tarihi: 9 Temmuz 2019).
- Schmidt, B., 2016. “The High-Luminosity upgrade of the LHC: Physics and Technology Challenges for the Accelerator and the Experiments”, J. Phys.: Conf. Ser. 706 (2016) 022002, https://cds.cern.ch/record/2263093/files/10.1088_1742-6596_706_2_022002.pdf, (Erişim Tarihi: 9 Temmuz 2019).
- Tricomi, A., 2014. “Upgrade of the CMS Tracker”, 13th Topical Seminar On Innovative Particle And Radiation Detectors, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/9/03/C03041/pdf>, (Erişim Tarihi: 9 Temmuz 2019).
- Wang, F., 2018. “Detector performance studies for the CMS High Granularity Calorimeter”, Asian Linear Collider Workshkop 2018, Fukuoka International Congress Center, Japan, https://agenda.linearcollider.org/event/7826/contributions/41680/attachments/33214/50699/ALCW2018_v2.pdf, (Erişim Tarihi: 9 Temmuz 2019).
- Williams, J., 2019. “Prospects For Photon-Photon Measurements with CMS PPS”, PPS results and prospects from CMS/TOTEM 2019, <https://indico.cern.ch/event/783891/contributions/3435507/attachments/1867347/3073071/prospects.pdf>, (Erişim Tarihi: 9 Temmuz 2019).
- 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, (Erişim Tarihi: 9 Temmuz 2019).

<http://aliceinfo.cern.ch/Public/en/Chapter2/Chap2Experiment-en.html>
<http://cms.web.cern.ch/news/crystal-calorimeter>
<http://cms.web.cern.ch/news/electromagnetic-calorimeter>
<http://hep.fi.infn.it/LHCf/>
<http://home.cern/about/experiments/cms>
<http://home.cern/topics/large-hadron-collider>
<http://international-relations.web.cern.ch/>
<http://lhcb-public.web.cern.ch/lhcb-public/en/Detector/Trackers-en.html>
http://meroli.web.cern.ch/Lecture_silicon_floatzone_czochralski.html
<http://totem-experiment.web.cern.ch/totem-experiment/>
http://www.felsefe.gen.tr/felsefe_sozlugu/l/logos_nedir_ne_demektir.asp
[http://www.felsefe.gen.tr/filozoflar/anaksimandros_apeiron_sonsuzluk_nedir_ne_d
emektir.asp](http://www.felsefe.gen.tr/filozoflar/anaksimandros_apeiron_sonsuzluk_nedir_ne_d
emektir.asp)
http://www.isee.nagoya-u.ac.jp/LHCf/About_LHCf.html
<http://www.lppp.lancs.ac.uk/annihilation/pop-ups/units.html>
https://atlas.physicsmasterclasses.org/tr/zpath_atlas.htm
<https://gitlab.cern.ch/cms-hgcal-tb/TestBeam/wikis/home>
<https://home.cern/about/accelerators>
<https://home.cern/about/member-states>
<https://home.cern/science/experiments/moedal>
[https://indico.desy.de/indico/event/16161/session/8/contribution/47/material/slides/
0.pdf](https://indico.desy.de/indico/event/16161/session/8/contribution/47/material/slides/
0.pdf)
<https://moedal.web.cern.ch/content/moedal-detector>
<https://physics.info/standard/>
<https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CMSPublic/LumiPublicResults>
<https://www.merriam-webster.com/words-at-play/quark>
<https://www.pro-physik.de/nachrichten/die-neutrino-waage-geht-betrieb>
https://www-donut.fnal.gov/web_pages/standardmodelpg/TheStandardModel.html

https://indico.cern.ch/event/633975/contributions/2686742/attachments/1514860/2363997/HGCALTestbeams_Quast_08_29.pdf

https://indico.cern.ch/event/783429/contributions/3379687/attachments/1829609/2995879/HGCAL_VitoPalladino_CepC.pdf

<https://indico.desy.de/indico/event/16161/session/8/contribution/47/material/slides/0.pdf>

https://twiki.cern.ch/twiki/pub/CLIC/TerascaleDW19/CMS_HGCal_TerascaleWS2019_final.pdf





ÖZGEÇMİŞ

08.10.1991 yılında Almanya’da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Adana’da 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. 2013-2014 yılları arasında Erasmus Programı ile Bremen Üniversitesinde eğitim gördü. 2016 yılında Fizik bölümünden mezun oldu ve aynı yıl Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde Fizik Anabilim Dalında tezli yüksek lisans programına başladı.