ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Başak Tuğçe SIRIŞ

CMS DEDEKTÖRÜNÜN HB KALORİMETRESİNDE YENİLENEN KALİBRASYON BİRİMLERİNİN LAZER TESTLERİ ANALİZİ

FİZİK ANABİLİM DALI

ADANA-2020

ÖZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

CMS DEDEKTÖRÜNÜN HB KALORİMETRESİNDE YENİLENEN KALİBRASYON BİRİMLERİNİN LAZER TESTLERİ ANALİZİ

Başak Tuğçe SIRIŞ

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

Danışman : Prof. Dr. Eda EŞKUT
Yıl: 2020, Sayfa: 57
Jüri : Prof. Dr. Eda EŞKUT
: Prof. Dr. Ayşe POLATÖZ
: Doç. Dr. Salim ÇERÇİ

CMS dedektöründeki Hadronik Kalorimetre (HKAL)'nin Hadronik Fıçı (HB) alt kalorimetresinde kullanılan Kalibrasyon Birimleri (CU), Faz-1 yükseltmeleri kapsamında yenilenmiştir. Yeni CU'ların bileşenlerinin montajı yapılarak son aşamada lazer testleri uygulanmıştır. Lazer testlerinden elde edilen veriler ile CU'ların optik bölümlerinin durumu analiz edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: HKAL, HB, CU

ABSTRACT

MSc THESIS

THE ANALYSIS OF THE LASER TESTS OF THE CALIBRATION UNITS OF UPGRADED IN THE HB CALORIMETER OF CMS DETECTOR

Başak Tuğçe SIRIŞ

ÇUKUROVA UNIVERSITY
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
DEPARTMENT OF PHYSICS

Supervisor : Prof. Dr. Eda EŞKUT
Year: 2020, Pages: 57
Jury : Prof. Dr. Eda EŞKUT
: Prof. Dr. Ayşe POLATÖZ
: Assoc. Prof. Salim ÇERÇİ

The Calibration Units (CU) used in the Hadronic Barrel (HB) sub-calorimeter of the Hadronic Calorimeter (HKAL) in the CMS detector have been renewed within the Phase-1 upgrades. The laser tests were applied at the last process by assembling the components of the new CUs. The state of the optical parts of the CUs were analyzed with the data obtained from laser tests.

Key Words: HCAL, HB, CU

GENİŞLETİLMİŞ ÖZET

Evrendeki her şeyin temeli olan maddenin yapısını anlayabilmek için maddeyi oluşturan atom altı parçacıklar ve bu parçacıklar arasındaki etkileşimler bilim insanları tarafından araştırılmaktadır. Günümüzde bu parçacıklar ve aralarındaki etkileşmeler, Standart Model (SM) kuramı ile açıklanmaktadır. Birçok deneyde başarılı gözlemsel kanıtlar elde eden SM'nin açıklayamadığı birtakım parçacık fiziği problemleri bulunmaktadır. Günümüzün en iyi ve en donanımlı hızlandırıcı kompleksine sahip olan CERN (Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi)'de, Parçacık Fiziğinde yanıt bekleyen problemler araştırılmaktadır.

Atom altı parçacık araştırmaları, CERN'de bulunan 27 km'lik çevresi ile Dünyanın en büyük hızlandırıcısı olan BHÇ (Büyük Hadron Çarpıştırıcısı) üzerindeki dedektörler ile yapılmaktadır. BHÇ üzerinde dört çarpışma noktasına yerleştirilmiş olan ve deneyleri ile aynı adı taşıyan dört büyük dedektör (ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS – Büyük Toroidal Dedektör), CMS (Compact Muon Solenoid – Sıkı Müon Solenoid), ALICE (A Large Ion Collider Experiment – Büyük İyon Çarpıştırıcısı Deneyi) ve LHCb (the Large Hadron Collider beauty – Büyük Hadron güzellik Çarpıştırıcısı)) bulunmaktadır.

ATLAS ve CMS deneyleri aynı fizik araştırmalarını yürütmektedir. Her iki deney de SM, Higgs bozonu, Süpersimetri (SÜSİ), madde-anti madde asimetrisi (CP-kırınımı), karanlık madde ve karanlık enerji, kuark-gluon plazma yapısı, evrendeki ekstra boyutlar, ileri fizik ve B-fiziği araştırmaları gibi geniş bir fizik spektrumunu araştırmaktadır. ALICE ve LHCb deneyleri daha özel amaçlı olup ALICE deneyi kuark-gluon plazmasının yapısını, LHCb deneyi ise madde-anti madde asimetrisini araştırmaktadır.

CMS dedektörü 4 Tesla değerinde manyetik alan üretebilen Solenoid Mıknatıs, İzleyici, Hadronik ve Elektromanyetik olmak üzere iki kalorimetre ve Müon Sisteminden oluşmuştur. İzleyici, Piksel ve Şerit dedektör olmak üzere iki alt dedektör sistemine sahiptir ve görevi yüklü parçacıkların izlediği yolları

kaydederek parçacıkları tanımlamaktır. Parçacıkların enerjileri hakkındaki bilgiler kalorimetreler aracılığıyla toplanmaktadır. Elektromanyetik Kalorimetre (EKAL), elektromanyetik etkileşme yapan hafif kütleli parçacıkların (elektron, foton ve pozitron), Hadronik Kalorimetre (HKAL) ise hadron olarak bilinen daha ağır parçacıkların (proton, nötron, pion ve kaon gibi) enerjisini ölçmektedir. EKAL, Elektromanyetik Fıçı (EB) ve Elektromanyetik Uç Kapak (EE) alt dedektör birimlerine sahiptir. HKAL ise Hadronik Fıçı (HB), Hadronik Uç Kapak (HE), Hadronik Dış (HO) ve İleri Hadronik (HF) alt dedektörlerinden oluşmuştur.

HB ve HE kalorimetreleri, soğurucu olarak pirinç, aktif malzeme olarak plastik sintilatör kullanılan örnekleme kalorimetrelerdir. Plastik sintilatörlerden gelen ışık, Dalga Boyu Kaydırıcı (WLS) fiberler tarafından yakalanarak optik fiberler aracılığı ile foto-dedektörlere iletilir. HO kalorimetresi, HB kalorimetresinin tamamlayıcısıdır. Hadronik duşlar için kuyruk yakalayıcı görevini yapmakta ve müon tanımlamada etkin bir rol oynamaktadır. HO da HB ve HE gibi aynı aktif malzeme ve WLS fiber kullanmaktadır. HB, HE ve HO'da foto-dedektör olarak Silikon Foto Çoğaltıcı (SiFÇ)'lar kullanılmaktadır. HF ise çelik bir soğurucu ve aktif malzeme olarak kuvars fiberlerden oluşmuştur. Kuvars fiberlerden gelen ışık Foto Çoğaltıcı Tüp (FÇT)'ler ile toplanmaktadır.

HB, radyal olarak EKAL'in dış kısmı ile solenoidin iç kısmı arasındaki bölgeye yerleştirilmiştir. HB+ ve HB- olarak adlandırılan iki yarım fıçının her birinde 18 adet olmak üzere toplam 36 özdeş kamadan oluşmuştur. Dedektör üzerinde, her bir kama için Okuma Kutusu (RBX) içine yerleştirilen ön-uç elektronikler bulunmaktadır. Plastik sintilatörlerden toplanan ışık, optik fiberler aracılığıyla bu elektroniklere iletilmektedir. Bir RBX içine dört Okuma Modülü (RM), yeni nesil Saat ve Kontrol Modülü (ngCCM) ve bir Kalibrasyon Birimi (CU) monte edilmiştir. CU, SiFÇ'lere LED veya lazer sinyallerini iletmektedir.

Bu tez çalışmasında, HB'de kullanılan CU'ların Faz-1 kapsamındaki yenilenme çalışmaları anlatılmıştır. CU'lar elektronik ve optik olmak üzere iki bölümden oluşmuştur. CERN'ün Prevessin yerleşkesinde bulunan 904 numaralı

binada önce CU'ların elektronik bölüm montajı yapılmıştır ve CU'lar güç döngüsü testi, iletişim testi, JTAG pulser testi, bağlantı testi ve JTAG köprü testinden geçirilmiştir. Daha sonra elektronik testlerden başarı ile geçen CU'ların optik bölüm montajı yapılmış ve Laser to SiPM, Laser to Megatile 2, Laser to Megatile 3, Laser to Megatile 4 ve Laser to Megatile 5 lazer testleri uygulanmıştır. Tüm testlerden sorunsuz geçen 36 adet CU, HB'deki RBX'lere yerleştirilmiştir. Çalışmada sonuç olarak, HB kalorimetresinde kullanılmak üzere hazırlanan CU'ların lazer testleri analizi sunulmuştur.

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisansımın her aşamasında bilgi ve tecrübeleri ile yol gösteren danışman hocam Prof. Dr. Eda EŞKUT'a teşekkürlerimi sunarım.

Bilgi ve deneyimlerini paylaşan Zühal Şeyma DEMİROĞLU'na, Dr. Çağlar ZORBİLMEZ'e ve Doç. Dr. Salim ÇERÇİ'ye teşekkürlerimi sunarım.

Tezimi okuyup değerli yorumlarını yaptıkları için jüri üyelerine (Prof. Dr. Eda EŞKUT, Prof. Dr. Ayşe POLATÖZ ve Doç. Dr. Salim ÇERÇİ) teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek Lisans eğitimim süresince desteğini her zaman hissettiğim arkadaşım Özlem ÇELİKEL'e teşekkür ederim.

Her zaman beni destekleyen değerli aileme sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER **SAYFA**

ÖZ I
ABSTRACT II
GENİŞLETİLMİŞ ÖZET III
TEŞEKKÜR VII
İÇİNDEKİLER VIII
ÇİZELGELER DİZİNİ X
ŞEKİLLER DİZİNİ XII
SİMGELER VE KISALTMALAR XIV
1. GİRİŞ 1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR 3
2.1. Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi (CERN) 3
2.2. Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (BHÇ) 4
2.2.1. ALICE 7
2.2.2. LHCb 8
2.2.3. ATLAS 9
2.2.4. CMS 10
2.2.4.1. İzleyici 11
2.2.4.2. Elektromanyetik Kalorimetre (EKAL) 13
2.2.4.3. Hadronik Kalorimetre (HKAL) 15
2.2.4.4. Süper İletken Solenoid 19
2.2.4.5. Müon Sistemi 20
3. MATERYAL VE METOT 21
3.1. Hadronik Fıçı (HB) Kalorimetresi 21
3.2. HB Kalorimetresindeki Yükseltmeler 25
3.2.1. Silikon Foto Çoğaltıcı (SiFÇ) 29
3.2.2. QIE Kartları 30
3.2.3. Okuma Modülü (RM) 31

3.2.4. Kalibrasyon Birimi (CU) 32
4. ARAŞTIRMA VE BULGULAR 33
4.1. CU Mekanizması 33
4.1.1. Elektronik Bölüm Montajı ve Testleri 33
4.1.2. Optik Bölüm Montajı ve Testleri 34
4.2. HB904 Lazer Testi Düzeneği ve Veri Alımı 35
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 51
KAYNAKLAR 53
ÖZGEÇMİŞ 57

ÇİZELGELER DİZİNİ **SAYFA**

Çizelge 4.1. Dedektöre yerleştirilen CU'ların ID'si 49

ŞEKİLLER DİZİNİ **SAYFA**

Şekil 1.1. BHÇ proje planlaması 2
Şekil 2.1. CERN hızlandırıcı zinciri 4
Şekil 2.2. BHÇ tüneli 6
Şekil 2.3. ALICE dedektörü 7
Şekil 2.4. LHCb dedektörü 8
Şekil 2.5. ATLAS dedektörü 9
Şekil 2.6. CMS dedektörü 10
Şekil 2.7. Piksel dedektör 12
Şekil 2.8. Şerit dedektör 12
Şekil 2.9. EB kalorimetresi 14
Şekil 2.10. EE kalorimetresi 14
Şekil 2.11. HB, HE, HO ve HF kalorimetrelerinin CMS dedektöründeki konumları 15
Şekil 2.12. HB kalorimetresi 16
Şekil 2.13. HE kalorimetresi 16
Şekil 2.14. HO'da kullanılan bir sintilatör tabla 17
Şekil 2.15. HF kamaları 18
Şekil 2.16. Süper iletken solenoid 19
Şekil 2.17. Müon sistemi 20
Şekil 3.1. HB'nin montajı 21
Şekil 3.2. HB kama yapısı 22
Şekil 3.3. Sintilatör tabla yapısı 23
Şekil 3.4. HB kule bölümlemesi ve yükseltmeler ile mümkün duruma gelen derinlik bölümlemesi 24
Şekil 3.5. RBX 25
Şekil 3.6. HB ve HE için yükseltilmiş okuma zinciri 26
Şekil 3.7. L=4500 fb^{-1} için HB sintilatör katmanlarında beklenen doz oranları 28

Şekil 3.8. L=4500 fb^{-1} için HB sintilatör katmanlarında beklenen doz oranları 28
Şekil 3.9. RM'ye yerleştirilmiş SiFÇ'ler 30
Şekil 3.10. RM 31
Şekil 3.11. HB'de kullanılan bir CU 32
Şekil 4.1. (a) QIE11 kartı (b) QIE11 adaptör kartı (c) Pulser kartı (d) JTAG konnektör kartı 34
Şekil 4.2. Optik bileşenlerin CU içerisindeki konumları 35
Şekil 4.3. CU'da bulunan SMA Konnektörler. 36
Şekil 4.4. Veri alımı sırasında kablo bağlantılarının bir görünümü. 37
Şekil 4.5. CU'da kullanılan PIN diyotların numaralandırılması. 38
Şekil 4.6. CU1'e ait beş farklı veri alma yöntemiyle elde edilen ADC sinyallerinin dağılımları 39
Şekil 4.7. CU1'e ait beş farklı veri alma yöntemiyle elde edilen sinyallerin fC cinsinden dağılımları 40
Şekil 4.8. CU5, CU8, CU29, CU30, CU34, CU41 ve CU50'nin Laser to SiPM testi verisinden elde edilen ADC sinyallerinin dağılımları. 42
Şekil 4.9. CU46'ya ait beş farklı veri alma yöntemiyle elde edilen ADC sinyallerinin dağılımları. 43
Şekil 4.10. Beş farklı veri yöntemi için CU1, CU2, CU44 ve CU46'ya ait PIN diyotların maksimum ADC değerleri. 44
Şekil 4.11. Beş farklı veri yöntemi için tüm CU'lardaki PIN diyot 1'e ait maksimum ADC değerleri 45
Şekil 4.12. Beş farklı veri yöntemi için tüm CU'lardaki PIN diyot 2'ye ait maksimum ADC değerleri 46
Şekil 4.13. Beş farklı veri yöntemi için tüm CU'lardaki PIN diyot 3'e ait maksimum ADC değerleri 47

SİMGELER VE KISALTMALAR

ADC : Analog Sayısal Dönüştürücü
ALICE : Büyük İyon Çarpıştırıcısı Deneyi
APD : Çığ Foto Diyot
ASIC : Uygulamaya Özel Toplayıcı Devre
ATCA : İleri Telekomünikasyon Bilişim Mimarisi
ATLAS : Büyük Toroidal Dedektör
BCP : Fıçı Kalorimetre İşlemcisi
BHÇ : Büyük Hadron Çarpıştırıcısı
CERN : Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi
CMS : Sıkı Muon Solenoid
CSC : Katot Şerit Odaları
CU : Kalibrasyon Birimi
DT : Sürüklenme Tüpü
EKAL : Elektromanyetik Kalorimetre
EB : Elektromanyetik Fıçı
EE : Elektromanyetik Uç Kapak
ES : Elektromanyetik Ön Duş
FÇT : Foto Çoğaltıcı Tüp
FEE : Ön Uç Elektronik
FPGA : Alan Programlayabilir Kapı Dizisi
GBT : Gigabit Alıcı-Verici
HL-LHC : Yüksek Işıklılık-BHÇ
HKAL : Hadronik Kalorimetre
HB : Hadronik Fıçı
HE : Hadronik Uç Kapak
HF : İleri Hadronik Kalorimetre

HO : Hadronik Dış
HGCAL : Yüksek Tanecikli Kalorimetre
HFD : Hibrit Foto Diyot
ID : Tanımlama
JTAG : Ortak Test Eylem Grubu
L : Işıklılık
L1 : Seviye-1
LED : Işık Yayan Diyot
LEP : Büyük Elektron-Pozitron Çarpıştırıcısı
LHCb : Büyük Hadron güzellik Çarpıştırıcısı
LHCf : İleri Büyük Hadron Çarpıştırıcısı
LINAC2 : Doğrusal Hızlandırıcı
LS1 : İlk Uzun Mola
LS2 : İkinci Uzun Mola
LS3 : Üçüncü Uzun Mola
MoEDAL : BHÇ'de Tek Kutup ve Egzotik Parçacıklar Dedektörü
ngCCM : yeni nesil Saat ve Kontrol Modülü
ODU : Optik Kod Çözücü Birim
PS : Proton Sinkrotron
PSB : Proton Sinkrotron Yükseltici
QIE : Yük Toplayıcı Kodlayıcı
RBX : Okuma Kutusu
RM : Okuma Modülü
RPC : Dirençli Plaka Odaları
SC : Sinkrosiklotron
SiFÇ : Silikon Foto Çoğaltıcı
SM : Standart Model
SPS : Süper Proton Sinkrotron

SÜSİ : Süpersimetri
T : Tesla
TOTEM : Toplam Esnek ve Difraktif Tesir Kesiti Ölçümü
TS : Zaman Dilimi
UV : Ultraviyole
VPT : Vakum Foto Triyot
VTTx : Çok yönlü Çift Verici
WLS : Dalga Boyu Kaydırıcı
MeV : Milyon Elektron Volt
GeV : Milyar Elektron Volt
TeV : Trilyon Elektron Volt
µTCA : Mikro Telekomünikasyon Bilişim Mimarisi
µs : Mikro Saniye
ns : Nano Saniye
fC : Femto Coulomb
fb^{-1} : Femto Barn
kV : Kilo Volt
V : Volt
GJ : Giga Joule
Nb-Ti : Niyobyum-Titanyum
Cu : Bakır
Zn : Çinko
Cs^{137} : Sezyum-137
Co^{60} : Kobalt-60
$PbWO_4$: Kurşun Tungstat

1. GİRİŞ

En küçükten en büyüğe tüm fizik olaylarını anlamayı hedefleyen bilim insanları, evrendeki her şeyin dört temel kuvvet (Güçlü, Zayıf, Elektromanyetik ve Kütle çekim) tarafından yönetilen temel parçacıklardan (Fermiyonlar ve Bozonlar) oluştuğunu keşfetmişlerdir. Temel parçacıklar ve aralarındaki etkileşmeler, günümüzde Standart Model (SM) kuramı ile açıklanmaktadır. SM'nin başarılı birçok gözlemsel kanıtları bulunmasına rağmen, kütle çekim kuvvetinin SM'ye dahil edilememesi, evrenin %96'sı olan karanlık madde ve karanlık enerji, madde-anti madde asimetrisi ve nötrino kütleleri gibi açıklayamadığı bazı durumlar vardır. SM'deki eksiklikler ve Parçacık Fiziğinin diğer bilinmeyenleri Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi (CERN)'nde en gelişmiş teknoloji kullanılarak araştırılmaktadır.

Atom altı dünyasının gizemini çözmek için kullanılan, günümüzün en iyi ve en donanımlı hızlandırıcı kompleksi, CERN'de bulunmaktadır. İsviçre-Fransa sınırını kapsayan, yerin 100 m altında bulunan ve çevresi 27 km olan Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (BHÇ)'nda parçacıklar, aşamalı olarak hızlandırılıp demetler hâlinde çarpıştırılmaktadır. Çarpışma sonrasında ortaya çıkan fizik olayları, BHÇ halkası üzerindeki dört çarpışma noktasına yerleştirilmiş olan dedektörler (ALICE, LHCb, ATLAS ve CMS) aracılığıyla incelenmektedir.

BHÇ ilk olarak 2008 yılında çalışmaya başlamıştır. Ancak teknik bir arıza sebebiyle, 7 TeV kütle merkezi enerjisindeki ilk fizik verileri 2009 yılında alınmıştır. 2012 yılında 8 TeV kütle merkezi enerjisindeki fizik verileri toplanmıştır. 2013 yılında deneysel veri alımı sonlandırılarak dedektörlerin yenilenmesi ve iyileştirilmesi için ilk Uzun Mola (LS1) dönemine geçilmiştir. 2015-2018 yılları arasında kütle merkezi enerjisi 13 TeV'e kadar arttırılmıştır. 2019 yılında ise BHÇ ve üzerindeki dedektörleri tekrar yenileme amacı ile ikinci Uzun Mola (LS2) dönemine girilmiştir. LS2 döneminde Faz-1 yükseltme çalışmaları, LS3 döneminde ise Faz-2 yükseltme çalışmalarının yapılması

planlanmaktadır. Yükseltme çalışmalarından sonra, BHÇ'de anlık ışıklılık $5 \times 10^{34}\ \mathrm{cm^{-2}s^{-1}}$, toplam ışıklılık 3000 $\mathrm{fb^{-1}}$ değerine çıkacaktır. Yüksek Işıklılık-BHÇ (HL-LHC) projesinin temel amacı, BHÇ deneylerinde fizik için çok daha büyük bir veri kümesinin sağlanmasıdır. Bu yükseltme çalışmalarına ilişkin proje planlaması Şekil 1.1'de gösterilmektedir.



Şekil 1.1. BHÇ proje planlaması (CMS Collaboration, 2017)

Bu tez, CMS'de bulunan Hadronik kalorimetre (HKAL)'nin, Hadronik Fıçı (HB) alt kalorimetresindeki Kalibrasyon Birimleri (CU)'nin Faz-1 kapsamındaki yenilenme çalışmalarını içermektedir.

Tezin önceki çalışmalar bölümünde, CERN ve BHÇ hakkında bilgi verilerek BHÇ üzerindeki deneyler ve özellikle CMS deneyi anlatılmıştır. Materyal ve metot bölümünde, HB kalorimetresinin tasarımı ve HB kalorimetresinde yapılan yükseltme çalışmaları özetlenmiştir. Araştırma ve bulgular bölümünde, HB kalorimetresinde kullanılan CU'ların mekanizması hakkında bilgi verilerek yapılan lazer testleri anlatılmış ve lazer testleri analizi tartışılmıştır. Sonuçlar ve öneriler bölümünde ise analiz sonuçları özetlenmiştir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1. Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi (CERN)

İkinci Dünya Savaşından sonra Avrupalı birçok bilim insanı ABD'ye göç etmiş ve Avrupa bilimi Dünya standartlarına göre geride kalmıştır. Az sayıda girişimci bilim insanı, bu durumu düzeltmek ve Avrupalı bilim insanlarını tekrar bir araya getirmek için bir atom fiziği laboratuvarı kurmak istemiştir. 1949-50 yıllarında yapılan girişimler sonucunda, geçici bir Avrupa Nükleer Araştırma Konseyi oluşturulmuş ve 1954 yılında 12 ülkenin onayı ile Avrupa Nükleer Araştırma Örgütü resmen kurulmuştur (https://timeline.web.cern.ch/timeline-header/89#371).

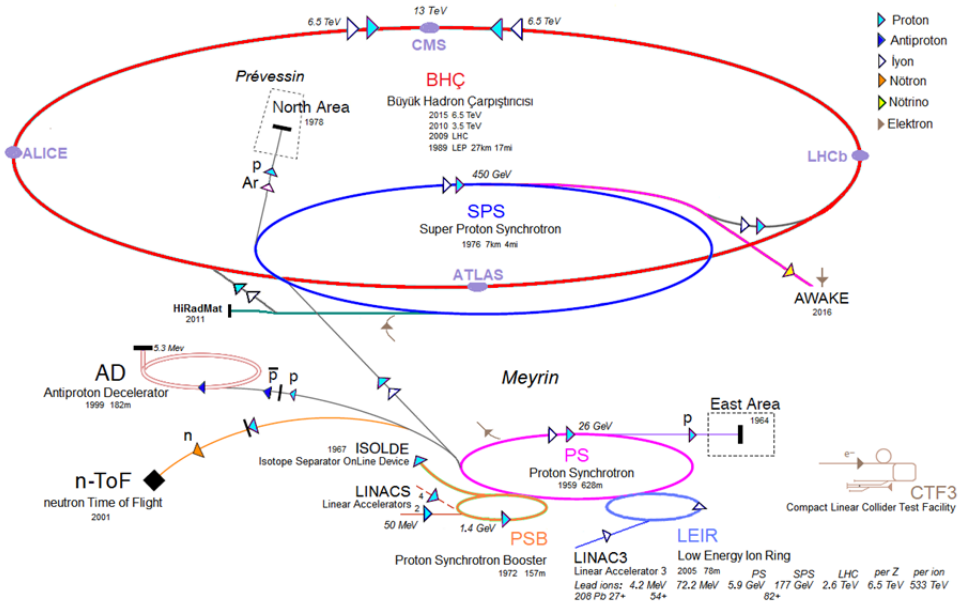
CERN, ilk adı Nükleer Araştırmalar için Avrupa Konseyi anlamına gelen, Fransızca "Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire" in baş harflerinden doğmuştur ve adı sonradan Avrupa Nükleer Araştırma Örgütü anlamında değişse de CERN kısaltması değişmemiştir. Günümüzde dünyanın en büyük parçacık fiziği laboratuvarı olan CERN, İsviçre-Fransa sınırında, İsviçre'de 108 hektar ve 1965'ten beri Fransa'da 517 hektar alanda bulunan çok yönlü tesislere sahiptir. CERN, kurulduğundan bu yana dünyanın dört bir yanından destek alarak düzenli bir şekilde büyümeye devam etmektedir (https://www.britannica.com/topic/CERN).

CERN'de bilim insanları maddenin yapısını anlayabilmek için atom altı parçacıkları incelemektedir. Atom altı seviyeye ulaşabilmek için hızlandırıcılar ve çok yüksek enerjiler gereklidir. CERN'deki ilk hızlandırıcı, 1957'de kurulan 600 MeV enerjili Sinkrosiklotron (SC)'dur. 1959 yılında, hüzme enerjisi 28 GeV'e ulaşan Proton Sinkrotron (PS) çalışmaya başlamıştır. 1976'da ise Süper Proton Sinkrotron (SPS) açılmıştır ve günümüzde 450 GeV enerjide çalışmaktadır. 1989'da hızlandırıcı zincirine katılan Büyük Elektron-Pozitron Çarpıştırıcısı (LEP), 27 km'lik çevresiyle en büyük hızlandırıcı olmuştur. Kütle merkezi enerjisi 209 GeV'e kadar çıkan LEP, 2000 yılında kapatılmış ve tünelini Büyük Hadron Çarpıştırıcısı inşasına bırakmıştır (https://timeline.web.cern.ch/timeline-header/89#371).

2.2. Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (BHÇ)

Yerin 100 m altında çevresi 27 km'lik bir tünele yerleştirilen BHÇ, parçacıkları ışık hızına en yakın hızda ve çok yüksek enerjilerde çarpıştırarak evrenin nasıl oluştuğunu anlamak üzere tasarlanmış, Dünyadaki en büyük dairesel hızlandırıcıdır. Fizikçiler, BHÇ ilk çalışmaya başladığında önceden keşfedilmiş olan parçacıkları araştırmışlardır. Bilinen birçok parçacığın tekrar gözlenmesi, daha önceki sonuçları onaylamakla kalmayıp, bilinen fiziğin BHÇ'de nasıl göründüğünü de göstermiştir. Böylece, güvenilir bir şekilde yeni parçacıkları keşfetmenin kapıları da açılmıştır (https://atlas.physicsmasterclasses.org/tr/zpath_lhcphysics1.htm).

BHÇ, parçacık hızlandırıcı kompleksinin bir parçasıdır. Parçacıklar, BHÇ halkasına girmeden önce Şekil 2.1'de gösterildiği gibi birkaç adımda hızlandırılmaktadır.

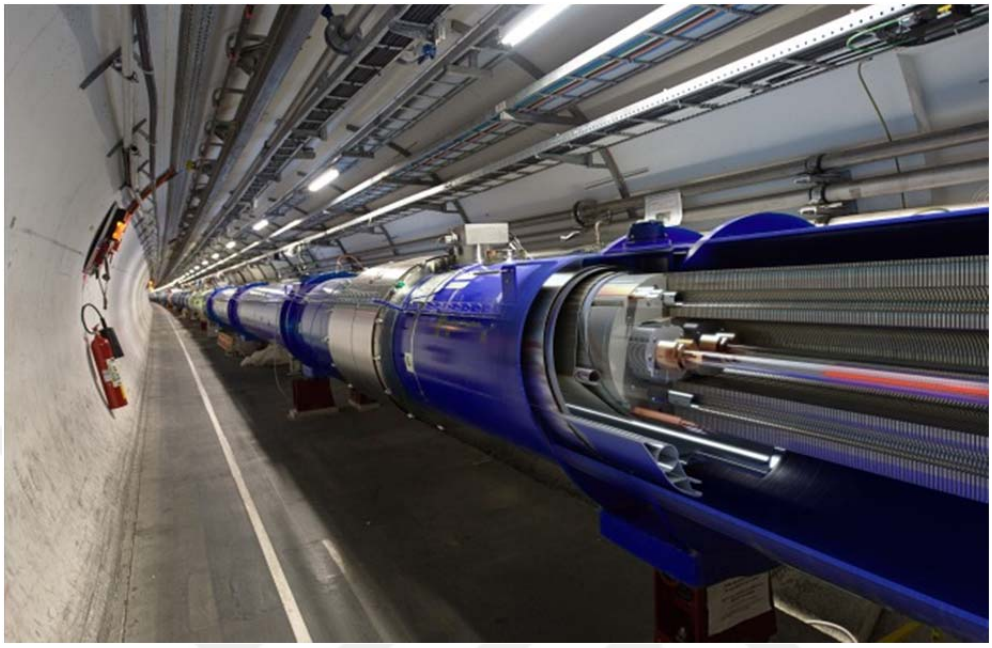


Şekil 2.1. CERN hızlandırıcı zinciri (http://maalpu.org/lhc/LHC.main.htm)

BHÇ'de protonlar ve yılda yaklaşık bir ay boyunca kurşun iyonları çarpıştırılmaktadır. Protonları ve kurşun iyonlarını hızlandırmak, farklı işlemler gerektirir. Protonlar, elektrik alan uygulanan hidrojen gazı atomlarından elektronların ayrıştırılması ile elde edilir. Daha sonra proton demetleri, Doğrusal Hızlandırıcı (LINAC2)'da 50 MeV, Proton Sinkrotron Yükseltici (PSB)'de 1,4 GeV, PS'de 25 GeV ve SPS'de 450 GeV enerjiye ulaşarak BHÇ'nin iki ayrı hüzme borusuna zıt yönde aktarılır. Protonlar BHÇ'de, hüzme başına 6,5 TeV enerjiye kadar yükseltilerek toplam 13 TeV'lik çarpışma enerjisine ulaşmaktadır.

Kurşun iyonları 82 proton içerdiğinden daha ağırdır ve bu hüzmeyi hizalamak için hızlandırıcılarda daha hassas ayarlamaların yapılması gerekmektedir. Ağır iyonların hızlandırıcılarda ulaştıkları enerji seviyeleri de farklıdır. BHÇ'de ağır iyon çarpışmalarında 5,5 TeV (nükleon başına 2,56 TeV/u) enerjiye kadar ulaşılmıştır. Bu enerji seviyeleri noktasal parçacıkların boyutunda önemli derecede yüksek, insanların yaşam boyutunda ise önemsizdir.

Parçacık demetleri, çok yüksek vakumlu boruların içinden geçmektedir. Bunun nedeni, daha iyi sonuçlar alabilmek için çarpıştırılacak parçacıkların çarpışma noktasına kadar başka tip parçacıklarla karşılaşmasını engellemektir. Işıklılık olarak bilinen birim zamanda birim alandaki olay sayısını arttırmak amacıyla parçacıkları birbirine yaklaştırarak sıkıştırmak ve bu demetleri hizalamak için boruların etrafına çok sayıda farklı tip ve büyüklükte süper iletken mıknatıs yerleştirilmiştir. Bu mıknatıslardan -271,3 ℃'de verim sağlanmakta ve bu derecede bir soğutma için sıvı helyum dağıtım sisteminden yararlanılmaktadır. Hüzme borularını, sıvı helyum sistemini ve dipol mıknatısları içeren mavi silindirlerin BHÇ tüneldeki görüntüsü Şekil 2.2'de gösterilmektedir.



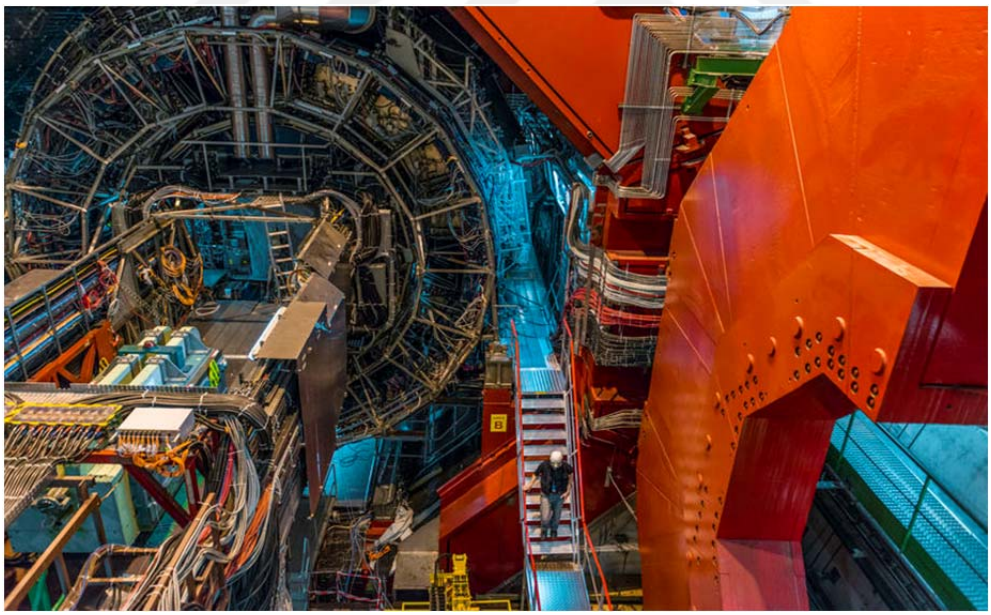
Şekil 2.2. BHÇ tüneli (https://home.cern/resources/image/accelerators/lhc-images-gallery)

Birbirine zıt yönde hızlanan hüzmeler, BHÇ üzerinde dört noktaya yerleştirilmiş olan dedektörlerin merkezinde buluşarak çarpışmaktadır. Bu dedektörler, deneyleri ile aynı adı taşıyan ALICE (A Large Ion Collider Experiment – Büyük İyon Çarpıştırıcısı Deneyi), LHCb (the Large Hadron Collider beauty – Büyük Hadron güzellik Çarpıştırıcısı), ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS – Büyük Toroidal Dedektör) ve CMS (the Compact Muon Solenoid – Sıkı Müon Solenoid)'dir. Bu dedektörlere yakın yerlere yerleştirilen daha küçük dedektörler ise MoEDAL (Monopole and Exotics Detector at the LHC – BHÇ'de Tek Kutup ve Egzotik Parçacık Dedektörü), LHCf (the Large Hadron Collider forward – İleri Büyük Hadron Çarpıştırıcısı) ve TOTEM (TOTal Elastic and diffractive cross section Measurement – Toplam Esnek ve difraktif tesir kesiti Ölçümü)'dir. BHÇ bünyesindeki bu yedi deneyin her biri farklı fizik konularını araştırmaktadır (CERN Brochure, 2017).

2.2.1. ALICE

Atom çekirdeğinde bulunan protonlar ve nötronlar, güçlü etkileşmeyle birbirine bağlanan kuarklardan oluşurlar. Büyük Patlamanın hemen sonrasında, enerji yoğunluğunun ve sıcaklığın çok yüksek değerlerinde, protonların ve nötronların henüz oluşmadığı, kuark ve gluonların serbest dolaştığı öngörülmekte ve maddenin bu durumu kuark-gluon plazması olarak adlandırılmaktadır. BHÇ'de yapılan kurşun iyonu çarpışmalarında, Büyük Patlama sonrasındaki benzer koşulların sağlanması ile oluşması beklenen kuark-gluon plazmasının araştırılması özellikle ALICE iş birliği tarafından yapılmaktadır.

Şekil 2.3'te gösterilen ALICE dedektörü, 26 m uzunluğunda, 16 m yüksekliğinde, 16 m genişliğinde ve 10.000 ton ağırlığındadır (https://home.cern/science/experiments/alice).



Şekil 2.3. ALICE dedektörü (https://www.news.uct.ac.za/article/-2018-07-24-upgrading-the-largest-experiment-on-earth)

2.2.2. LHCb

Büyük patlamadan sonraki ilk evrelerde madde ile anti madde sayısının eşit olduğuna, hızla genişleyen ve soğuyan evrende anti maddenin kaybolarak maddenin baskın olduğu bir ortamın oluştuğuna inanılmaktadır. LHCb deneyi, b kuark'ını temel alarak, SM ile açıklanamayan madde-anti madde asimetrisini araştırmaktadır.

LHCb dedektörü, çarpışma noktasını çevreleyen kapalı bir dedektör olmayıp 21 m uzunluğunda, 10 m yüksekliğinde, 13 m genişliğinde ve 5600 ton ağırlığındadır (https://home.cern/science/experiments/lhcb). LHCb dedektörü Şekil 2.4'te gösterilmektedir.

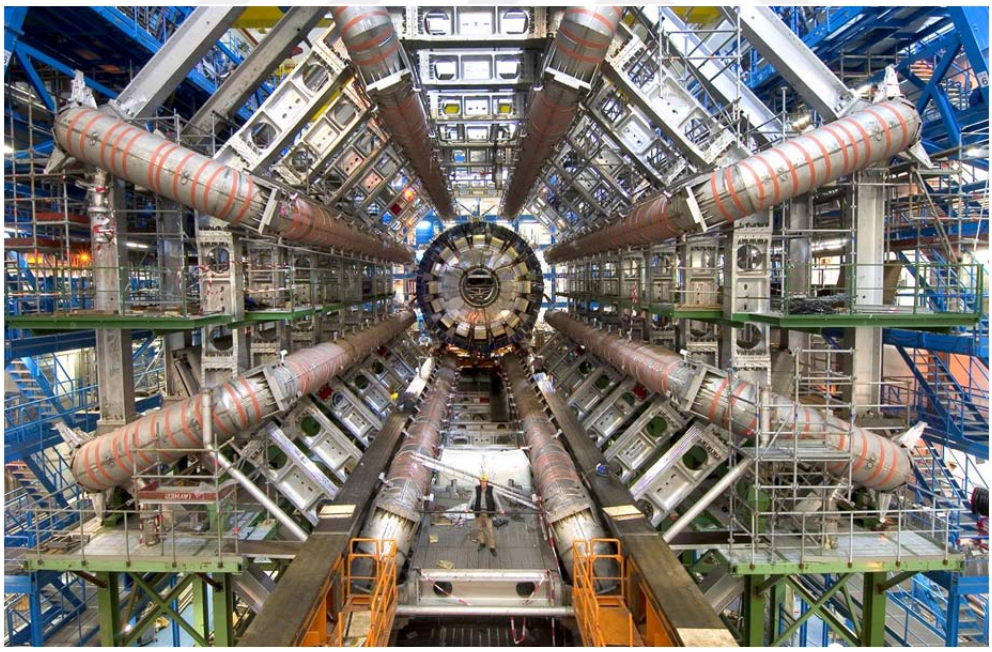


Şekil 2.4. LHCb dedektörü (https://home.cern/sites/home.web.cern.ch/files/2018-06/lhcb-detector-2018.jpg)

2.2.3. ATLAS

ATLAS deneyinin amacı, SM ile açıklanamayan durumlara odaklanarak Süpersimetri (SÜSİ), Higgs bozonu, madde-anti madde asimetrisi, karanlık madde ve karanlık enerji ve daha birkaç fizik konusunu geniş kapsamlı olarak araştırmaktır.

ATLAS dedektörü, 46 m uzunluğunda, 25 m yüksekliğinde, 25 m genişliğinde ve 7000 ton ağırlığındadır. Oldukça büyük bir hacim değerine sahip olan ATLAS, çarpışma noktasını katmanlar hâlinde çevreleyen belirleyici alt detektörlerden ve parçacıkların yörüngelerini bükerek momentumlarının ölçülmesini sağlayan çok büyük bir toroid mıknatıs sisteminden oluşmaktadır (https://home.cern/science/experiments/atlas). ATLAS dedektörü Şekil 2.5'te gösterilmektedir.

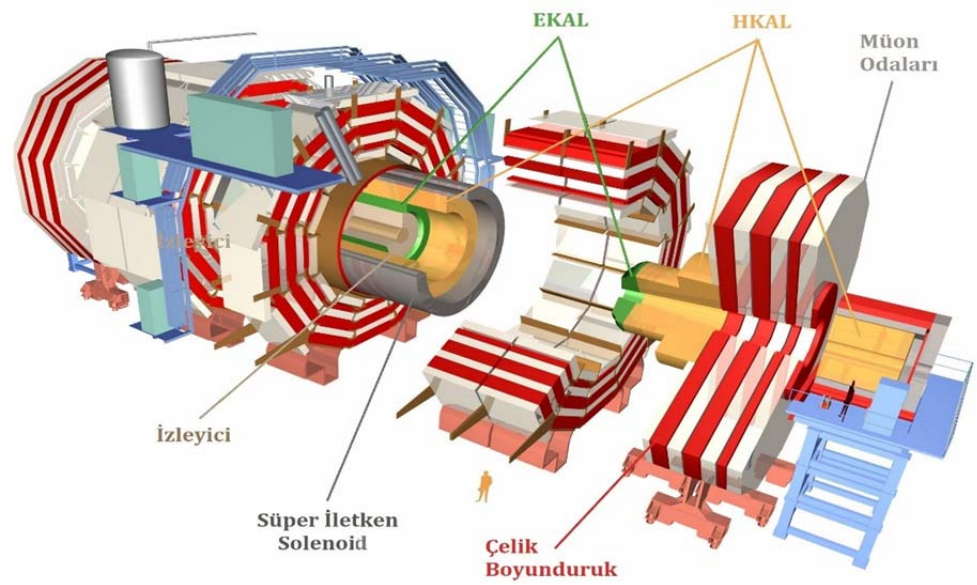


Şekil 2.5. ATLAS dedektörü
(https://www.tech-worm.com/wp-content/uploads/2019/05/cern-lhc-atlas-cms-clic-alice-nedir.jpg)

2.2.4. CMS

CMS deneyi de ATLAS deneyi gibi SM ve Higgs bozonu, ağır iyon çarpışmalarında kuark-gluon plazma yapısı, evrendeki ekstra boyutlar, SÜSİ, ileri fizik ve B-fiziği konularını araştırmaktadır (https://cms.cern/physics).

CMS dedektörü, 28,7 m uzunluğunda, 15 m yüksekliğinde, 15 m genişliğinde ve 14.000 ton ağırlığındadır. Dedektör Sıkı Müon Solenoid ismini, içerdiği materyallerin oldukça sıkı olmasından, müon parçacıklarını en iyi şekilde tespit etmek için tasarlanmasından ve şimdiye kadar yapılmış en güçlü solenoid mıknatısa sahip olmasından almaktadır. Çarpışma noktasından saçılan parçacıkların yollarını bükmek için 4 T civarında manyetik alan üretebilen süper iletken solenoid, bu solenoidin içine yerleştirilmiş izleyici ve kalorimetreler, solenoidi çevreleyen çelik boyunduruk ile birleştirilmiş müon odaları, CMS dedektörünü oluşturmuştur (https://cms.cern/detector). CMS dedektörü Şekil 2.6'da gösterilmektedir.



Şekil 2.6. CMS dedektörü (https://cds.cern.ch/record/1433717)

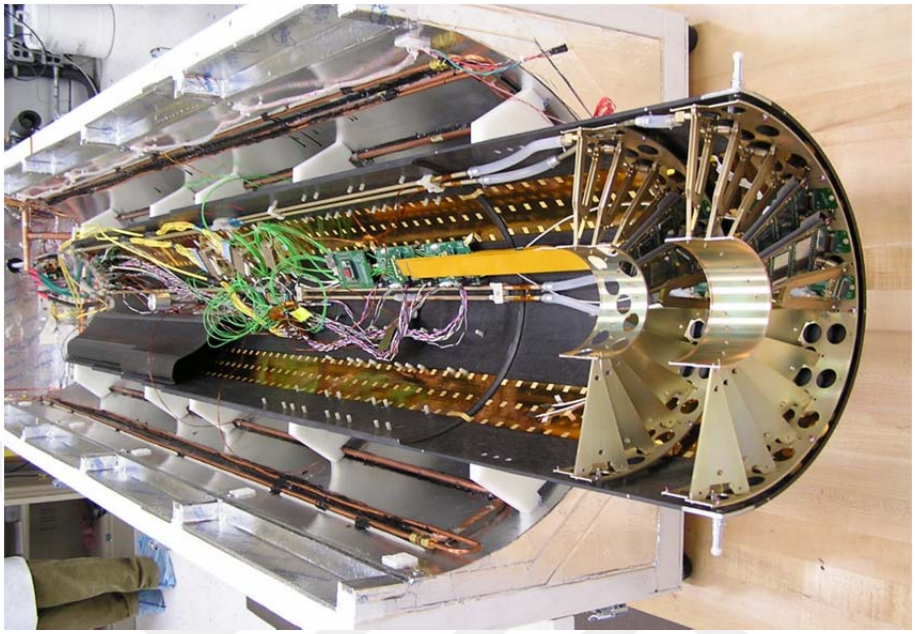
2.2.4.1. İzleyici

Çarpışmadan sonra ortaya çıkan olayları yorumlamak için bakılan önemli niceliklerden biri, parçacıkların momentumlarıdır. Bir parçacığın momentumu, parçacığın manyetik alandaki yolu izlenerek hesaplanabilir. Parçacığın yolunun çok eğri olması, momentumunun az olduğunu göstermektedir. İzleyicinin görevi, yüklü parçacıkların izlediği yolları kaydetmektir.

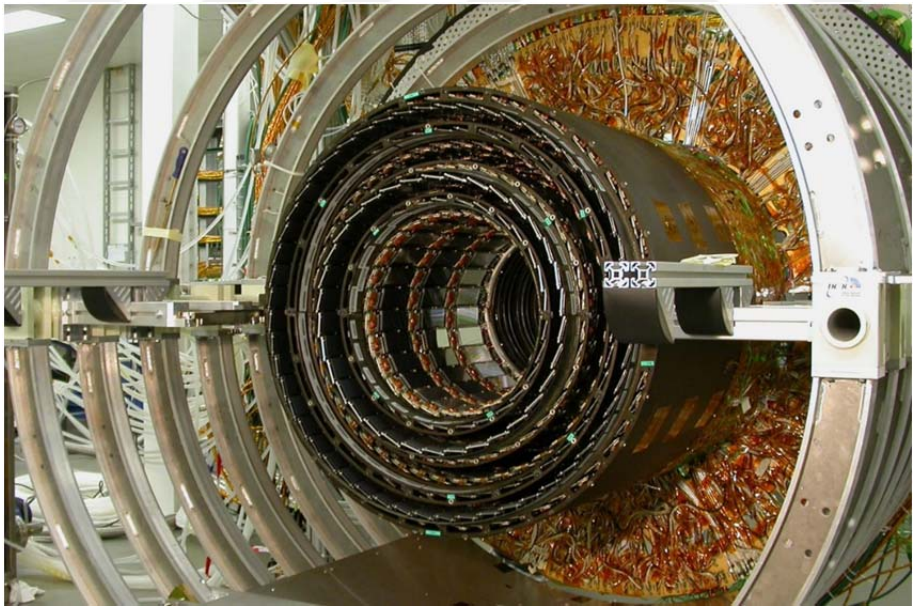
CMS'in ilk tasarım taslağında izleyici bölümü boş bırakılmıştır. Çarpışmada ortaya çıkacak parçacık yoğunluğuna dayanabilecek bir izleyici yapmanın imkânsız olduğu, çok yüksek radyasyon ortamında çalışabilecek bir okuma elektroniği yapmanın zor olacağı düşünülmüştür. ABD ordusunun, uzay yolculuğu ve nükleer savaş başlıkları için radyasyona dayanıklı elektroniklere ihtiyaç duyulduğuna dair imaları üzerine bu alan keşfedilmiştir (https://cms.cern/detector/identifying-tracks).

Tamamı silikondan oluşan CMS İzleyici, dedektörün en iç tabakası olduğundan çok yüksek radyasyonun etkisi altındadır. İzleyicinin iki önemli bileşeni bulunmaktadır. Birincisi, hüzme eksenine en yakın olan piksel dedektördür (Şekil 2.7). Üç fıçı katmanı ve iki uç kapak diski olan ilk piksel dedektör, Faz-1 kapsamında 2016-2017'deki yıl sonu teknik durdurma esnasında, dört fıçı katmanı ve üç uç kapak diski olan piksel dedektör ile değiştirilmiştir. İzleyicinin ikinci bileşeni ise piksel dedektörün etrafında bulunan şerit dedektördür (Şekil 2.8). Silikondaki radyasyon hasarını en aza indirmek için dedektörün bu kısmı -20 ℃'de çalıştırılmaktadır (CMS Collaboration, 2015).

İzleyici şimdiye kadar, anlık ışıklılık olarak tasarım değerinin üzerinde, çok iyi bir performans göstermiştir. Bununla birlikte İzleyicinin performansı, radyasyon hasarı nedeniyle bozulmaktadır. Gelecek yıllarda daha da artması beklenen radyasyon miktarı ve ışıklılık oranlarına uygun bir performans için piksel ve şerit dedektörlerinden oluşan tüm silikon izleyicinin değiştirilmesi planlanmaktadır. Bu değişikliğin Faz-2 yükseltmesi olarak üçüncü Uzun Mola (LS3) sırasında yapılması planlanmaktadır (CMS Collaboration, 2015).



Şekil 2.7. Piksel dedektör (https://cds.cern.ch/record/1431466)



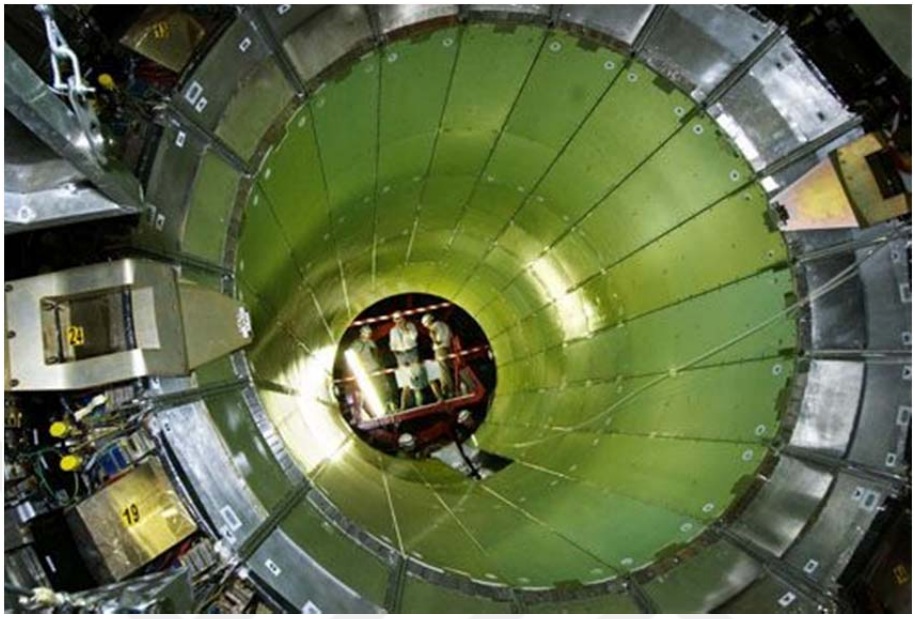
Şekil 2.8. Şerit dedektör (https://cds.cern.ch/record/1431467)

2.2.4.2. Elektromanyetik Kalorimetre (EKAL)

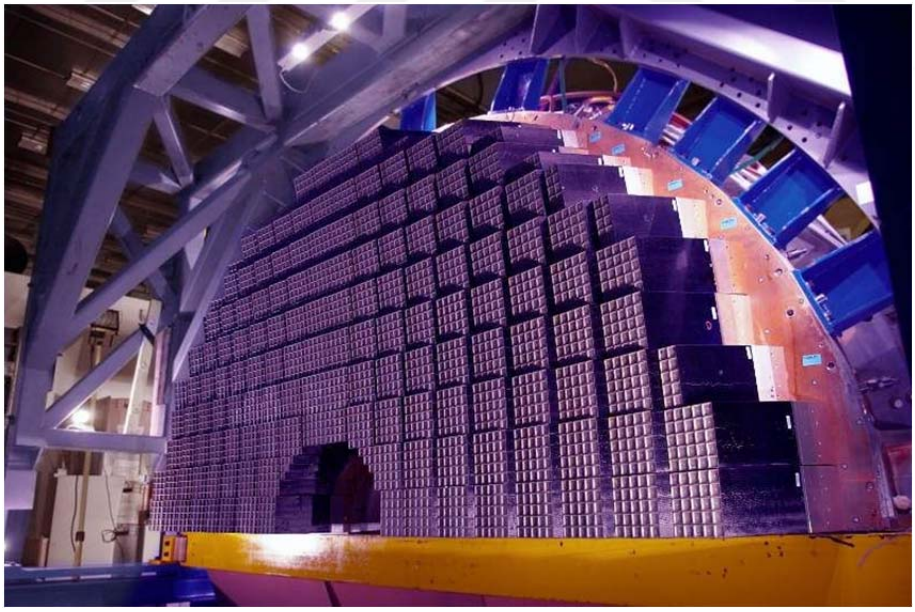
Çarpışmalarda oluşan parçacıkların enerjisi hakkındaki bilgi, kalorimetrelerden toplanmaktadır. EKAL, elektromanyetik etkileşim yapan hafif kütleli parçacıkların (elektron, foton ve pozitron) enerjisini ölçmektedir.

EKAL, Elektromanyetik Fıçı (EB) ve Elektromanyetik Uç Kapak (EE) bölümlerinden oluşmuştur. EE bölümünde yüksüz pionları tanımlamak üzere uç kapakların önüne Elektromanyetik Ön-duş (ES) dedektörleri yerleştirilmiştir. Ön-duş dedektörleri, izleyicide kullanılanlara benzeyen iki kurşun düzlem ve onu izleyen silikon dedektörlerden oluşmuştur. Bu silikon dedektörlerin sıcaklığı -10 ℃ ile -15 ℃ arasında olmalıdır. Ancak EKAL'in sıcaklığı kristaller açısından 0,1 ℃'de tutulmak zorunda olduğundan ön-duş dedektörleri iç kısımda soğuk, dış kısımda sıcak tutan bir sistem bulunmaktadır (https://cms.cern/detector/measuring-energy/ecal-preshower).

EKAL, EB ve EE için farklı boyutlarda kesilmiş her biri 1,5 kg ağırlığında olan 75.848 adet kurşun tungstat ($PbWO_4$) kristalinden oluşmuştur. $PbWO_4$, yüksek yoğunluklu şeffaf bir malzemedir. Elektronlar ve fotonlar bu kristallerin içinden geçtiğinde parlar ve bu durum parçacığın enerjisi ile doğru orantılı olarak ışığın üretildiği anlamına gelmektedir. Üretilen ışığın verimi düşüktür. Parıldamayı ölçmek için bu ışık, foto-dedektörler tarafından yakalanarak güçlendirilmektedir. Yüksek manyetik alanda çalışmaya uygun tasarlanmış olan foto-dedektörler, parıldamayı tespit etmek ve onu analiz edebilmek için bir elektrik sinyaline dönüştürmek üzere her bir kristalin arkasına yapıştırılmıştır. Foto-dedektör olarak, EB bölümünde yarı iletken silikondan yapılmış Çığ Foto Diyot (APD), EE bölümünde ise buradaki radyasyon seviyesine daha uygun olan Vakum Foto Triyot (VPT) kullanılmıştır (https://cms.cern/detector/measuring-energy/crystal-calorimeter). Şekil 2.9'da EB kalorimetresi, Şekil 2.10'da ise EE kalorimetresi gösterilmektedir.



Şekil 2.9. EB kalorimetresi (https://cds.cern.ch/record/1431477)

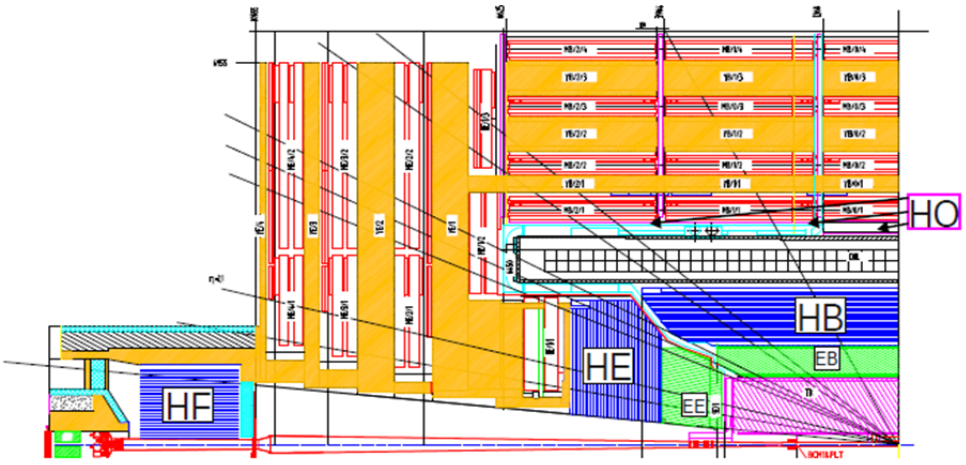


Şekil 2.10. EE kalorimetresi (http://www.digitaljournal.com/image/88389)

2.2.4.3. Hadronik Kalorimetre (HKAL)

HKAL'de, hadron olarak bilinen, kuark ve gluonlardan yapılmış parçacıkların (proton, nötron, pion ve kaon gibi) enerjisi ölçülmektedir.

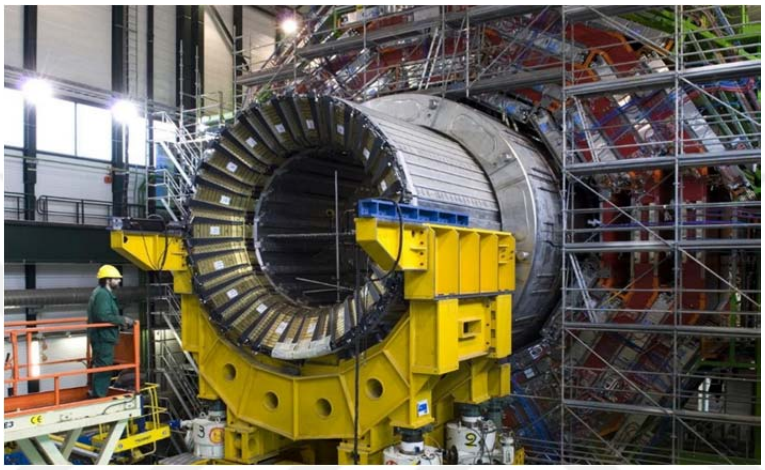
HKAL; Hadronik Fıçı (HB), Hadronik Uç Kapak (HE), Hadronik Dış (HO) ve İleri Hadronik (HF) alt kalorimetrelerinden oluşmuştur. HKAL'in alt kalorimetrelerinin konumları, CMS dedektörünün dörtte birinin şematik çizimi ile Şekil 2.11'de gösterilmektedir.



Şekil 2.11. HB, HE, HO ve HF kalorimetrelerinin CMS dedektöründeki konumları (CMS Collaboration, 2012)

HB ve HE, soğurucu olarak pirinç, aktif malzeme olarak plastik sintilatör kullanılan örnekleme kalorimetrelerdir. Plastik sintilatörlerden gelen ışık, Dalga Boyu Kaydırıcı (WLS) fiberler ile yakalanır. Yakalanan ışık, okunmak üzere optik fiberler aracılığı ile foto-dedektörlere iletilir. HB ve HE kalorimetrelerinin ilk orijinallerinde Hibrit Foto Diyot (HFD) foto-dedektörleri kullanılmıştır. Bu foto-dedektörler, Faz-1 yükseltmesinden sonra Silikon Foto Çoğaltıcı (SiFÇ)'lar ile değiştirilmiştir. HB kalorimetresinde, foto-dedektör ve elektronikler ile ilgili sorunlar Faz-1 yükseltmesi ile çözülmüştür (CMS Collaboration, 2015). Aktif malzemenin değiştirilmesi ise gerekli görülmemektedir (CMS Collaboration,

2017). HE kalorimetresinin gelecekte artması beklenen ışıklılık ve radyasyon seviyelerine uygun yeni Yüksek Tanecikli bir örnekleme Kalorimetre (HGCAL) ile değiştirilmesi planlanmaktadır (CMS Collaboration, 2015). Şekil 2.12'de HB kalorimetresi, Şekil 2.13'te ise HE kalorimetresi gösterilmektedir.

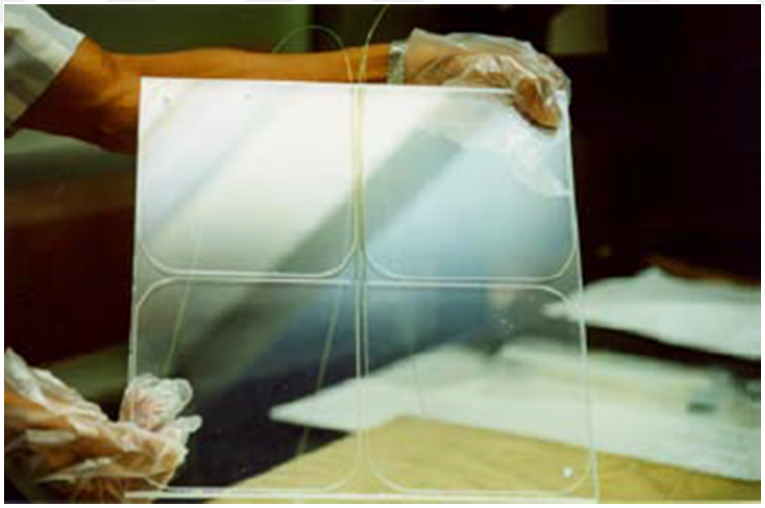


Şekil 2.12. HB kalorimetresi (http://cds.cern.ch/record/1431485)



Şekil 2.13. HE kalorimetresi (http://www.lhc-facts.ch/img/cms/hcal2.jpg)

HO kalorimetresi, HB kalorimetresinin tamamlayıcısı olup hadronik duşlar için kuyruk yakalayıcı görevini yapmakta ve müon tanımlamada etkin bir rol oynamaktadır. HO'da da HB ve HE gibi aynı aktif malzeme ve WLS fiber kullanılmaktadır. Ancak soğurucu olarak CMS'in mıknatısını ve çelik boyunduruğunu kullanmaktadır. HO, solenoid ile müon sistemi arasında bulunan bir veya iki kat sintilatör tabladan oluşmuştur (CMS Collaboration, 2008). WLS fiber eklenmiş bir HO sintilatör tablası Şekil 2.14'te gösterilmektedir. Tablalardan gelen ışık WLS fiberler tarafından toplanarak foto-dedektörlere iletilmektedir. HO'da başlangıçta foto-dedektör olarak HFD kullanmıştır. Daha yüksek bir foton algılama verimliliği için HFD'ler LS1 döneminde SiFÇ'ler ile değiştirilmiştir. Bu değişiklikten sonra HO'nun performansının önemli derecede arttığı görülmüştür (http://cms.web.cern.ch/news/hcal-upgrades-its-photodetectors). HO kalorimetresi radyasyondan daha az etkilendiğinden şimdilik başka bir yükseltme planı bulunmamaktadır (CMS Collaboration, 2015).



Şekil 2.14. HO'da kullanılan bir sintilatör tabla (CMS Collaboration, 2008)

HF kalorimetresi hüzme hattında, CMS'in her iki ucunda çarpışma noktasından 11,2 m uzaklıkta manyetik alanın dışında bulunmaktadır. Çelik bir soğurucusu ve aktif elemanı kuvars fiber olan bir örnekleme kalorimetredir (CMS Collaboration, 2008). Şekil 2.15'te soğurucu ve kuvars fiberlerden oluşan HF kamaları gösterilmektedir. Çelik soğurucu ile etkileşen parçacıklar kuvars fiberlerden geçerken, hızlarının fiber içerisindeki ışığın hızından büyük olduğu durumda Çerenkov ışıması yaparlar ve parçacıklar kalorimetrede bu şekilde algılanırlar. Kuvars fiberlerden ışık toplamak için Foto Çoğaltıcı Tüp (FÇT)'ler kullanılmaktadır. Foto çoğaltıcıdan gelen analog sinyal, Yük Toplayıcı Kodlayıcı (QIE) kart tarafından sayısal bir sinyale dönüştürülür. Dedektör ilk çalışmaya başladığında kötü sinyallerin tespit edilmesi nedeniyle FÇT'ler Faz-1 kapsamında yenilenmiştir. Ayrıca QIE8 kartları QIE10 ile değiştirilmiştir (CMS Collaboration, 2012). HF, önemli bir performans kaybı olmadan yüksek radyasyon dozuna dayanabilecek şekilde tasarlanmıştır. HF kanallarının yeniden kalibrasyonu ve sinyal zayıflamasının izlenmesi ile kuvars fiberler değiştirilmeden kabul edilebilir bir performans sağlanacağı düşünülmektedir (CMS Collaboration, 2015).

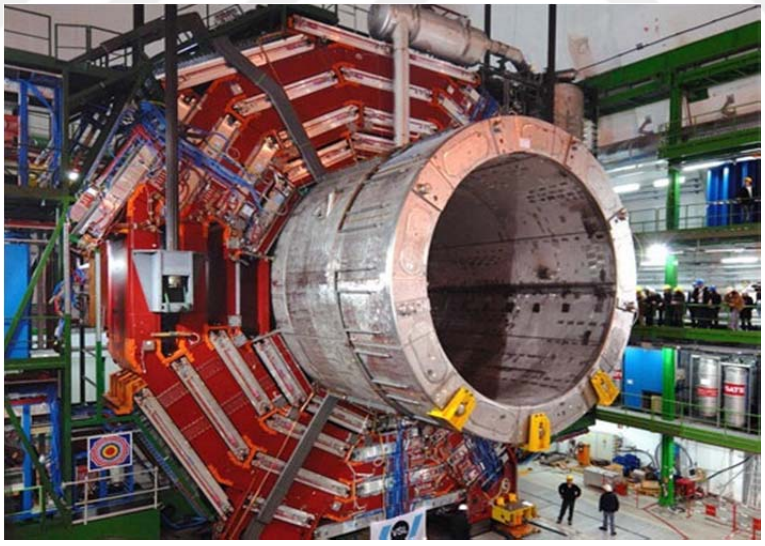


Şekil 2.15. HF kamaları (https://cds.cern.ch/record/1431489)

2.2.4.4. Süper İletken Solenoid

Süper iletken solenoid, çarpışmada saçılan parçacıkların momentumlarının ölçülebilmesi için yollarının bükülmesini sağlamaktadır.

Solenoid, Nb-Ti iletkeni ile güçlendirilmiş tel bobinlerden oluşmuştur. Bu tel bobinler -268,5 ℃'de süper iletkenlik özelliğe sahiptir. Solenoid, CMS'in 4 T değerinde bir manyetik alana erişebilmesi için tasarlanmış olmasına rağmen çalışma alanı, uzun ömürlü kullanım amacıyla tam tasarım gücü yerine 3,8 T değere düşürülmüştür. Tam akımda 2,66 GJ depolanmış enerji vermektedir. Mıknatısın sönmesi durumunda bu enerjiyi güvenli bir şekilde dağıtmak için boşaltma devreleri bulunmaktadır. Solenoid tarafından üretilen akı, boyunduruk yardımı ile geri dönüş sağlamaktadır. Dönüş boyunduruğu aynı zamanda bir filtre görevi görerek sadece zayıf etkileşen parçacıkların geçişini sağlamaktadır (https://en.wikipedia.org/wiki/Compact_Muon_Solenoid). Süper iletken solenoid Şekil 2.16'da gösterilmektedir.

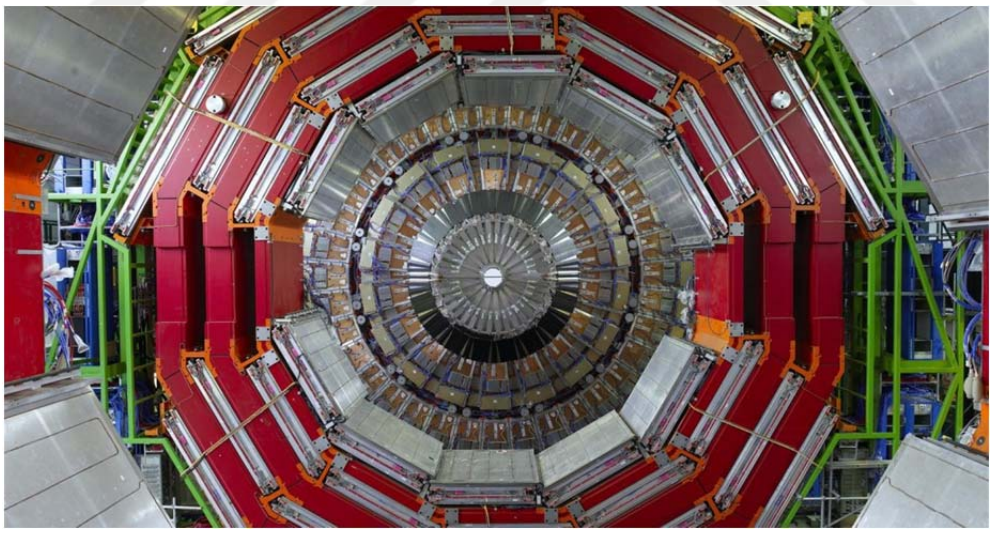


Şekil 2.16. Süper iletken solenoid (http://www.lhc-facts.ch/img/cms/solenoid2.jpg)

2.2.4.5. Müon Sistemi

Müonlar, uzaydan gelen kozmik ışınların atmosfer ile etkileşmesi sonucu oluşmasının yanı sıra hızlandırıcılarda da üretilebilmektedir. Elektronlara benzeyen müonlar, elektrondan çok daha ağırdır. Madde ile zayıf etkileştiklerinden, dedektör malzemesi içinde yol aldıkları sırada kolay durdurulamazlar ve çok fazla enerji kaybetmezler (https://cms.cern/content/muon-tomography). Bu nedenle müonları yakalayan sistem, en dış katman olarak yerleştirilmiştir.

Şekil 2.17'de gösterildiği gibi kırmızı renkte olan çelik boyunduruk ile birleştirilmiş müon sistemi, fıçı bölgesinde Sürüklenme Tüpleri (DT), kapak bölgesinde Katot Şerit Odaları (CSC) ve her iki bölgede de bulunan Dirençli Plaka Odaları (RPC)'ndan oluşmuştur. DT'ler ve CSC'ler müonların konumunu takip ederek bir tetikleme sağlarken, RPC'ler verilerin tetiklemeye değer olup olmadığına anında karar vererek müon momentumunun hızlı bir biçimde ölçülmesini sağlar (https://cms.cern/detector/detecting-muons).



Şekil 2.17. Müon sistemi (https://www.rwth-aachen.de/go/id/ydc)

3. MATERYAL VE METOT

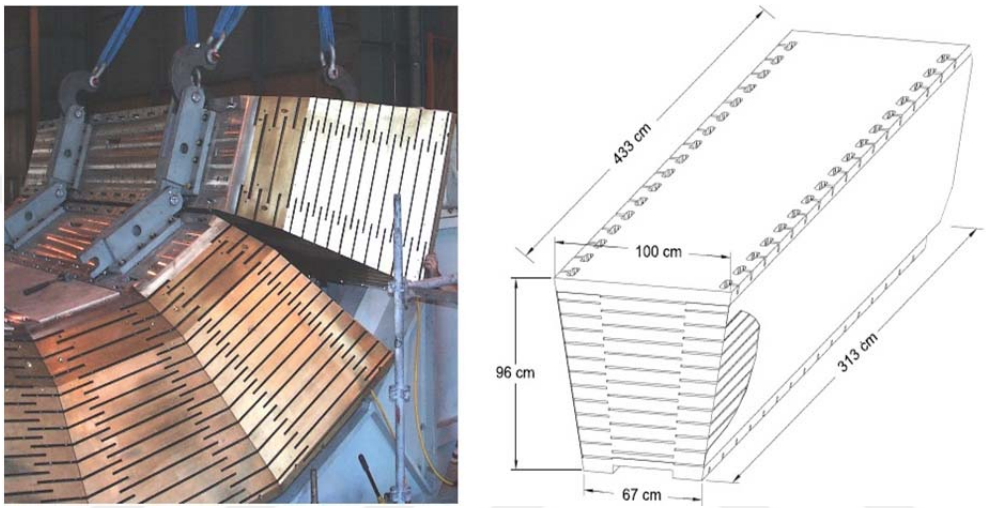
3.1. Hadronik Fıçı (HB) Kalorimetresi

HB, radyal olarak EKAL'in dış kısmı ile solenoidin iç kısmı arasındaki bölgede bulunmaktadır. Hadronik duşları soğurmak için yerleştirilecek malzeme miktarı bu alana göre sınırlanmıştır. HB, HB+ ve HB- olarak adlandırılan iki yarım fıçıdan oluşmuştur. Her bir yarım fıçıda 18 adet olmak üzere toplam 36 özdeş kama bulunmaktadır. Araları 2 mm'den az olacak şekilde cıvata ile birleştirilmiş kamalardan oluşan HB Şekil 3.1'de gösterilmektedir.



Şekil 3.1. HB'nin montajı (CMS Collaboration, 2008)

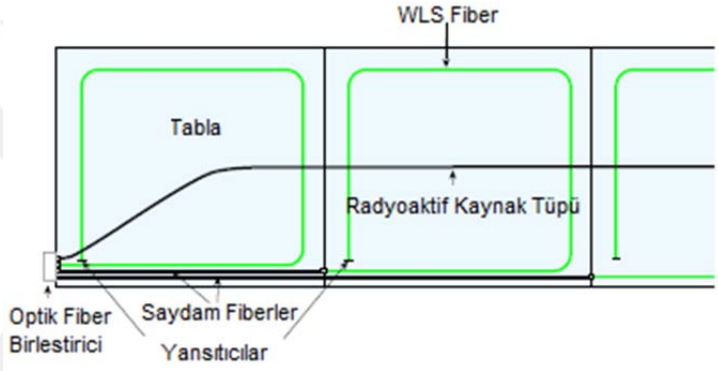
Kamaların her biri 20°'lik azimutal açıya sahiptir. Kamalar, hüzme eksenine paralel hizalanmış olan yassı pirinç soğurucu plakalar ve bu plakaların arasına yerleştirilen plastik sintilatörlerden yapılmıştır. Şekil 3.2'de kamalar ve bir kamanın hermetik tasarımı gösterilmektedir.



Şekil 3.2. HB kama yapısı (https://cds.cern.ch/record/1431485, CMS Collaboration, 2007)

HB'nin soğurucu yapısı, 40 mm kalınlığında çelik bir ön plaka, ardından sekiz adet 50,5 mm kalınlığında pirinç plaka, altı adet 56,5 mm kalınlığında pirinç plaka ve 75 mm kalınlığında çelik bir arka plakadan oluşmuştur. Pirinç plaka, C26000/pirinç kartuş olarak bilinen %70 Cu ve %30 Zn alaşımıdır. Yoğunluğu 8,53 g/cm^3, radyasyon uzunluğu 1,49 cm, etkileşim uzunluğu ise 16,42 cm'dir. Yapısal dayanıklılık için en içteki ve en dıştaki plakalar paslanmaz çelikten yapılmıştır. Soğurucu plakalar, bir kama tam radyal olacak şekilde ayarlanmış bir geometride cıvata ile birbirine tutturulmuştur.

HB'nin aktif ortamı olan plastik sintilatör tablaları, uzun süreli kararlılık ve orta radyasyon dayanıklılığı gösterecek şekilde seçilmiştir. Sintilatör yapı, bu tablalar ve ışığı ortaya çıkarmak için kullanılan WLS fiberlerden oluşmuştur. Sintilatör tablanın yapısı Şekil 3.3'te şematik olarak gösterilmektedir. Tabla geometrisi, sintilatör yapının deney alanına kurulmadan önce test edilmesine ve yıkıcı hasar durumunda soğurucu yapı sökülmeden değiştirilmesine izin vermektedir.

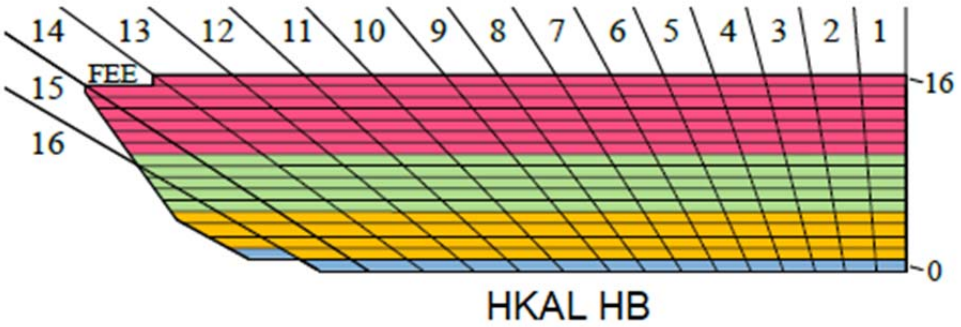


Şekil 3.3. Sintilatör tabla yapısı (CMS HCAL Collaboration, 2007)

Her bir tabladan gelen ışık, 0,94 mm çapındaki WLS fiberler ile toplanmaktadır. Tablalarda kalibrasyon için, kaynak tüpleri olarak adlandırılan 1 mm çapında paslanmaz çelik tüpler bulunmaktadır ve radyoaktif kaynaklar (Cs^{137} veya Co^{60}) tablanın merkezine bu tüpler yardımıyla taşınmaktadır. Ultraviyole (UV) lazer ışığını enjekte etmek için ilave bir kuvars fiber kullanılmaktadır. Tablaların üstü 2 mm kalınlığında beyaz polistiren ile kaplıdır. Bu kaplama, fiberleri tablanın dışına yönlendiren yolları sağlamak ve radyoaktif kaynakları taşıyan tüpleri yerleştirmek için olukludur. WLS fiberler sintilatörden çıktıktan sonra saydam fiberlere eklenerek tablanın sonunda bulunan optik bir konnektöre bağlanmıştır. Işık bu konnektörden çıkan optik bir kablo aracılığı ile fiberleri okuma kulelerine yerleştiren Optik Kod Çözücü Birimi (ODU)'ne iletilmektedir.

WLS fiber, saydam fiber, ekleme yerleri ve yansıtıcılar, bilgisayar kontrollü bir UV tarayıcı tarafından test edilerek tablalara yerleştirilmiştir. Tamamlanan tablalar, Cs^{137} radyoaktif kaynağı kullanan otomatik bir kaynak tarayıcı ile test edilmiştir. Bu kaynak, tabla üzerinde 4 cm çapında bir noktayı aydınlatmaktadır. Tarayıcı, her bir tablanın göreli ışık verimi ve homojenliğini tespit etmektedir. Kalibrasyon için radyoaktif kaynak tarayıcının yanı sıra lazer ve Işık Yayan Diyot (LED) enjeksiyon sistemleri bulunmaktadır (CMS Collaboration, 2008).

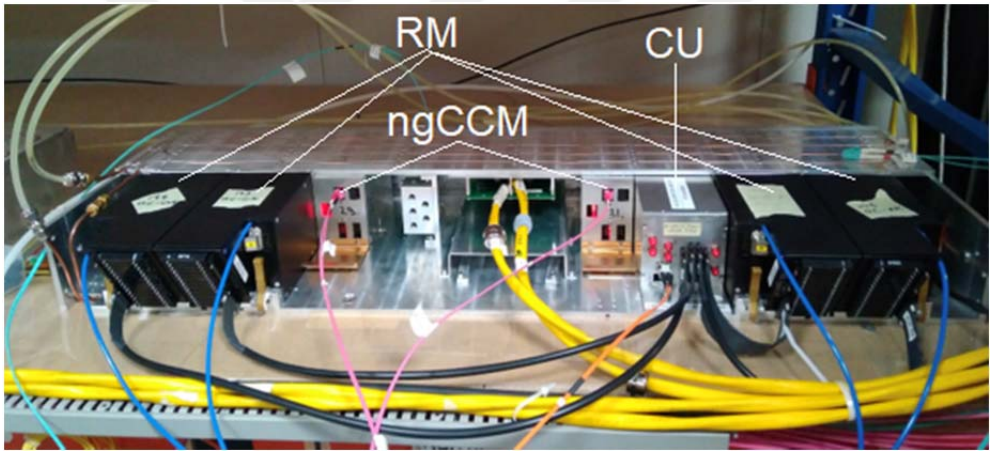
Her kamanın, 14. kulenin yakınında dedektör çevresine monte edilen ön-uç elektronikleri bulunmaktadır. Sintilatör yapıdan toplanan ışık, optik kablolar aracılığı ile bu elektroniklere iletilmektedir. Elektronik devreler, Okuma Kutusu (RBX) olarak adlandırılan bir muhafaza içine yerleştirilmiştir. HB'de 36 adet RBX bulunmaktadır. RBX bileşenleri, HB Faz-1 yükseltmesi ile yenilenmiştir. Yükseltmeler ile artan veri kanalları, HB kamalarında derinlik bölümlemesini mümkün duruma getirmiştir (CMS Collaboration, 2012). HB'nin dörtte biri için uzunlamasına kule bölümlemesi ile yükseltme sonrası derinlik bölümlemesi ve Ön-Uç Elektronikler (FEE)'in konumu Şekil 3.4'te gösterilmektedir.



Şekil 3.4. HB kule bölümlemesi ve yükseltmeler ile mümkün duruma gelen derinlik bölümlemesi (CMS Collaboration, 2017)

3.2. HB Kalorimetresindeki Yükseltmeler

HB'de yapılan yükseltmeler; RBX'ler, güç kabloları, soğutma boruları ve dedektör dışı elektroniklere bağlı bakır kablolar ile optik fiberler dahil olmak üzere mevcut altyapıyı korumak için kısıtlanmıştır. Bir RBX'in içine dört Okuma Modülü (RM), yeni nesil Saat ve Kontrol Modülü (ngCCM) ve bir Kalibrasyon Birimi (CU) monte edilmiştir. Şekil 3.5'te bir RBX düzeni gösterilmektedir. HB Faz-1 yükseltmesi, mevcut RM'lerin SiFÇ kullanan ve derinlik bölümlemesine izin veren yeni RM'ler ile değiştirilmesini içermektedir. Bu kısıtlamalar göz önüne alındığında, yükseltilmiş RM yapısı mevcut RM yapısından çok farklı olmamıştır (CMS Collaboration, 2012).



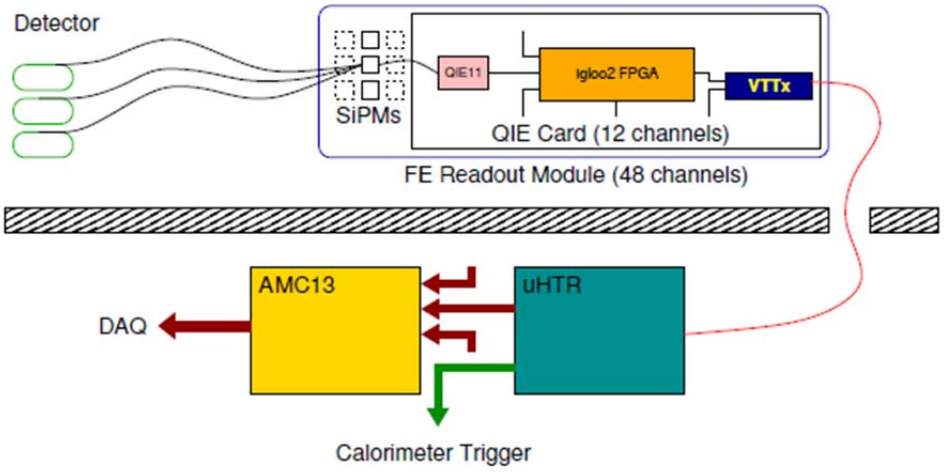
Şekil 3.5. RBX (Cummings, 2019)

Ön-uç okuma sisteminin yükseltilmesindeki birincil etken, aktif malzemedeki radyasyon hasarıdır. Radyasyona maruz kalmanın başlıca etkisi, sintilatör ve WLS fiberlerin kararmasıdır. Bu da ışık veriminin düşmesine neden olmaktadır. Bu etki, bir lazer izleme sistemi ve çarpışma verileri kullanılarak sintilatör ve fiberlerin iletiminin dikkatle izlenmesi ile düzeltilmektedir. HB kalorimetresinin mevcut foto-dedektörleri olan HFD'lerin düşük gürültü sinyal

oranı oluşturması, bozulmuş sintilatörden gelen sinyallerin temiz bir şekilde algılanmasını zorlaştırmıştır (Pastica, 2015). Bu sebeple HFD'ler yerine SiFÇ'lerin kullanılmasına karar verilmiştir.

HFD'lerin SiFÇ'ler ile değiştirilmesi üzerine, mevcut ön-uç elektronik elemanları da SiFÇ'lere uygun olarak yenilenmiştir. QIE8 kartları, kontrol ve veri hizalama ASIC, veri bağlantısı ve kontrol modülü Faz-1 kapsamında, QIE10/QIE11 kartları, veri hizalama için radyasyona dayanıklı Alan Programlayabilir Kapı Dizisi (FPGA), daha yüksek bant aralıklı veri bağlantısı olan Gigabit Alıcı-Verici (GBT) ve gelişmiş bir kontrol sistemi olan ngCCM ile yükseltilmiştir (CMS Collaboration, 2012).

Ön-uç ve arka-uç elektronikleri ilk inşaat sırasında eş zamanlı olarak yerleştirilmiştir. Bu plan yükseltme için riskli olduğundan, yükseltme projesinde ön-uç elektroniklerinden önce arka-uç elektronikleri geliştirilmiştir. Arka-uç elektroniği hem mevcut hem de yükseltilmiş ön-uç elektronikleri ile uyumludur (CMS Collaboration, 2012). Şekil 3.6'da HB ve HE için, SiFÇ'leri içeren yükseltilmiş ön-uç ve arka-uç okuma elektroniği gösterilmektedir.

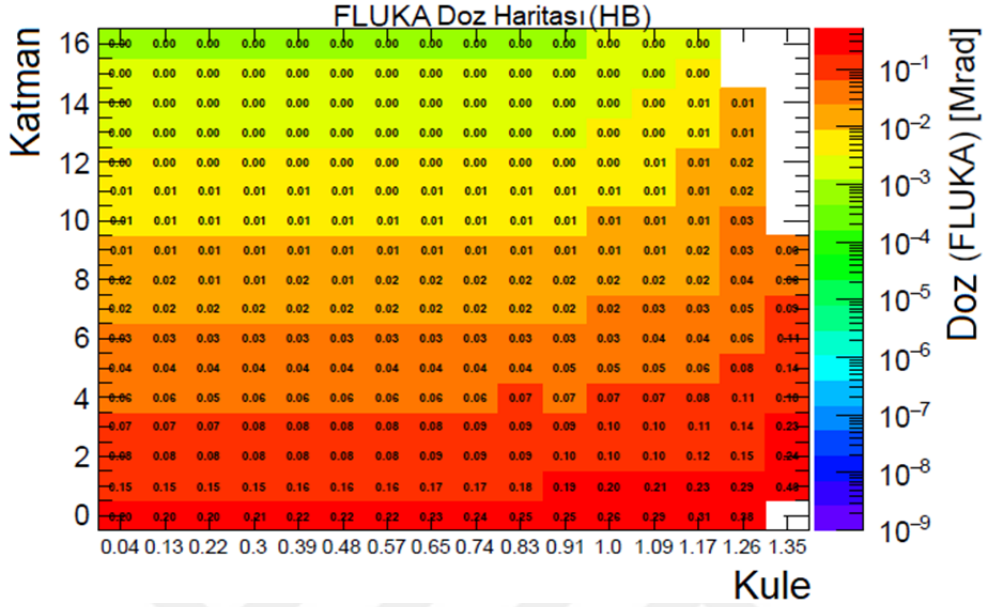


Şekil 3.6. HB ve HE için yükseltilmiş okuma zinciri (Pastica, 2015)

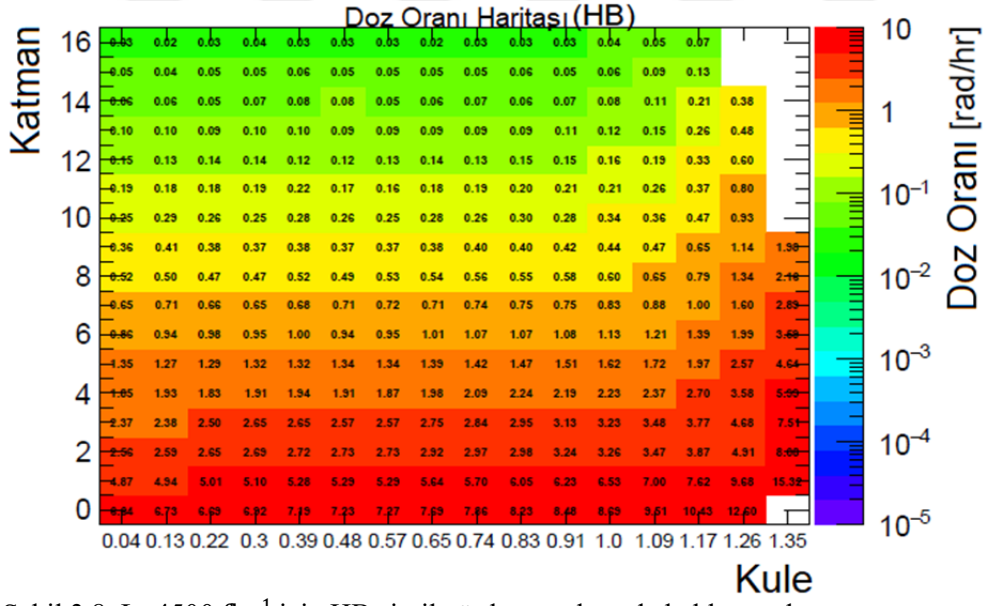
HL-LHC için HB yükseltme planlarında başlıca sorulardan biri, HB sintilatörlerinin HL-LHC çalışması boyunca beklenen radyasyona dayanıp dayanmayacağıdır. HB sintilatörlerinde beklenen radyasyon hasarının en iyi biçimde tahmin edilmesi, HE'deki sinyal kaybı ölçümleri kullanılarak yapılmaktadır. HE'nin 2017'de toplanan verilerinden, sinyal kaybının önemli bir kısmının HFD'lerden kaynaklandığı anlaşılmıştır. Bu verilerden yola çıkılarak, HL-LHC radyasyon koşullarında HB'nin durumunu tahmin etmek için doza bağlı bir model tasarlanmıştır. Dedektör bileşenlerinin eskimesi, L= 4500 fb^{-1} dozunda bir ışıklılığa kadar değerlendirilmiştir. Bu ışıklılık değeri için HB sintilatör katmanlarında beklenen doz oranları Şekil 3.7'de ve Şekil 3.8'de gösterilmektedir.

Sonuç olarak, HB sintilatörleri ve fiberleri için beklenen radyasyon hasarının tüm HL-LHC dönemi boyunca CMS'in fizik performansı üzerinde ihmal edilebilir bir etkisinin olacağı düşünülmektedir. Bu nedenle Faz-2 yükseltme çalışmaları için HB sintilatörlerinin ve fiberlerinin değiştirilmesine gerek duyulmamıştır. Ayrıca HB dedektörüne Faz-1 yükseltmesi sürecindeki LS2 döneminde monte edilen SiFÇ'li ön-uç elektroniklerinin, HL-LHC boyunca kullanılmasına karar verilmiştir.

HB'nin dış elektronikleri, HL-LHC veri alımı için CMS tarafından öngörülen 12,5 μs tetikleme gecikmesinde ve 750 kHz Seviye-1 (L1) tetikleme hızında çalışacak şekilde yükseltilecektir. HB Faz-1 μTCA elektroniği, özellikle EB için geliştirilen Fıçı Kalorimetre İşlemcisi (BCP) kartları kullanılarak Faz-2 ATCA standardına yükseltilecektir. Dedektör dışı elektroniklerinde, 36 adet RBX'i kontrol etmek için iki RBX'e bir BCP kartı olmak üzere toplam 18 kart kullanılacaktır (CMS Collaboration, 2017).



Şekil 3.7. L=4500 fb^{-1} için HB sintilatör katmanlarında beklenen doz oranları (CMS Collaboration, 2017)



Şekil 3.8. L=4500 fb^{-1} için HB sintilatör katmanlarında beklenen doz oranları (CMS Collaboration, 2017)

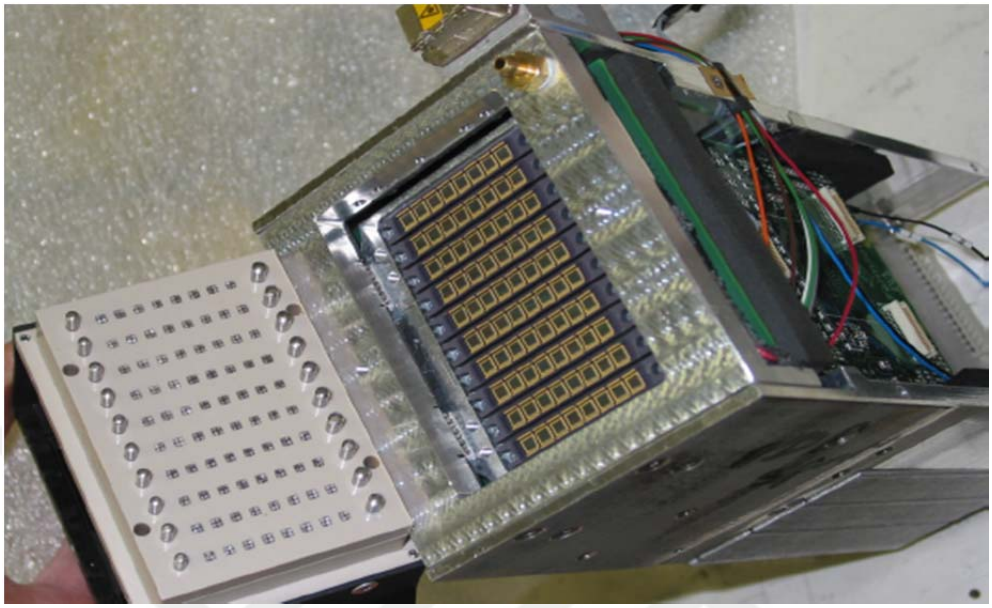
3.2.1. Silikon Foto Çoğaltıcı (SiFÇ)

SiFÇ'ler, foto-çoğaltıcıların ve birçok uygulama için diğer foto-dedektörlerin yerini alarak hızla gelişmekte olan bir teknoloji ürünüdür.

SiFÇ, çok pikselli bir Geiger-mod APD'dir. Bir fotonun çarptığı her piksel, düzgün genlikli bir yük darbesi yapar. SiFÇ'nin her bir pikseli, akım sınırlayıcı bir söndürme direnci ile ön gerilimden ayrılmıştır. Düşük çalışma voltajı, geniş dinamik aralık, manyetik alanlara dayanıklılık ve iyi bir radyasyon toleransına sahiptir. Fiziksel olarak çok küçük olduklarından kalorimetrenin okuma bölümünü arttırma olanağı sağlarlar. Kalorimetreleri kalibre etme ve izleme yeteneğini geliştirerek etkin kuantum verimliliği ve tekli foto-elektronları algılama becerisini arttırmışlardır (CMS Collaboration, 2012).

SiFÇ'ler HFD'ler ile karşılaştırıldığında, SiFÇ'lerin daha üstün özelliklere sahip olduğu görülmektedir. SiFÇ'lerin kuantum verimliliği, HFD'lerden iki kat daha yüksektir. SiFÇ'lerin gürültü sinyali oranı, HFD'lere göre sekiz kat daha fazladır. Yaklaşık 10 kV'de çalışan vakum tüpleri olan HFD'lere göre, SiFÇ'ler 100 V'den daha düşük bir gerilimde çalışmaktadırlar. Düşük voltajda çalışmanın avantajlarından biri, HFD'lerde görülen yüksek gerilim arızalarının SiFÇ'lerde görülmemesidir (CMS Collaboration, 2011).

SiFÇ'ler, RM'lerin yapımını basitleştirmek ve SiFÇ'leri korumak için sekiz SiFÇ içeren seramik bir montaj kartının içine yerleştirilmiştir. SiFÇ sinyalleri, montaj kartı üzerinde tek bir okuma kanalında birleştirilmiştir (CMS Collaboration, 2012). Şekil 3.9'da bir RM'ye yerleştirilmiş SiFÇ dizileri gösterilmektedir.



Şekil 3.9. RM'ye yerleştirilmiş SiFÇ'ler (CMS Collaboration, 2012)

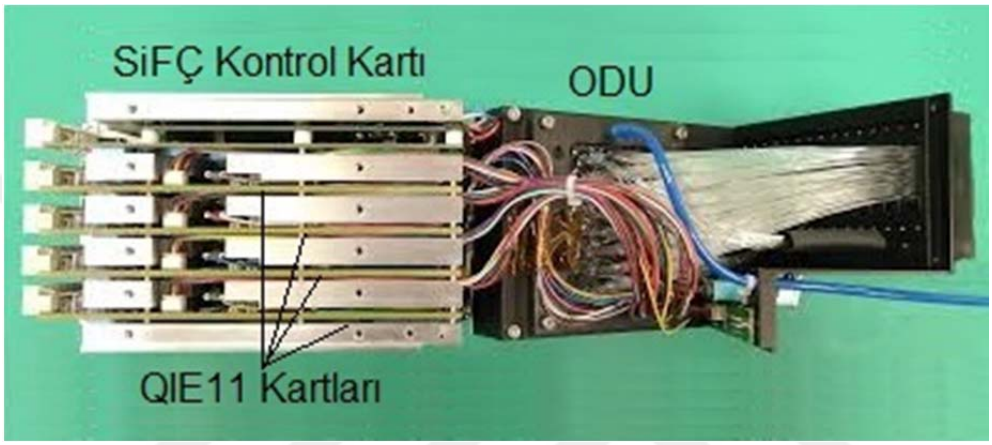
3.2.2. QIE Kartları

HKAL'in okuması, QIE kartlar üzerinden gerçekleştirilmektedir. QIE, doğrusal olmayan çok aralıklı bir Analog Sayısal Dönüştürücü (ADC)'dür. Bir QIE kartı; QIE çipleri, FPGA, GBT ve Çok yönlü Çift Verici (VTTx) içermektedir. SiFÇ dizilerinden gelen elektrik sinyalleri, QIE çipleri tarafından toplanarak FPGA'ya gönderilir. FPGA, QIE çipleri ve ngCCM arasında arabirim oluşturma ve verileri biçimlendirmeden sorumludur. Veri çıkışı, GBT çipi ve VTTx üzerinden gerçekleşmektedir (CMS Collaboration, 2012).

HB kalorimetresinde SiFÇ'ler, Fermilab'da geliştirilen 16 kanallı QIE11 versiyonu kullanılarak okunmaktadır (Pastica, 2015). QIE11 kartları, sadece negatif girişleri okumak için tasarlanmıştır. Programlanabilir kazanç ve düşük giriş direncine sahiptir. Yükü 25 ns aralıklarla toplar ve 8-bit okuma ile 17-bit dinamik aralığına sahiptir (Strobbe, 2016).

3.2.3. Okuma Modülü (RM)

HB'de kullanılan yükseltilmiş bir RM; bir ODU, sekiz adet SiFÇ montaj kartı (64 SiFÇ), bir SiFÇ kontrol kartı ve dört adet QIE11 karttan oluşmuştur. Şekil 3.10'da HB için kullanılan bir RM gösterilmektedir.

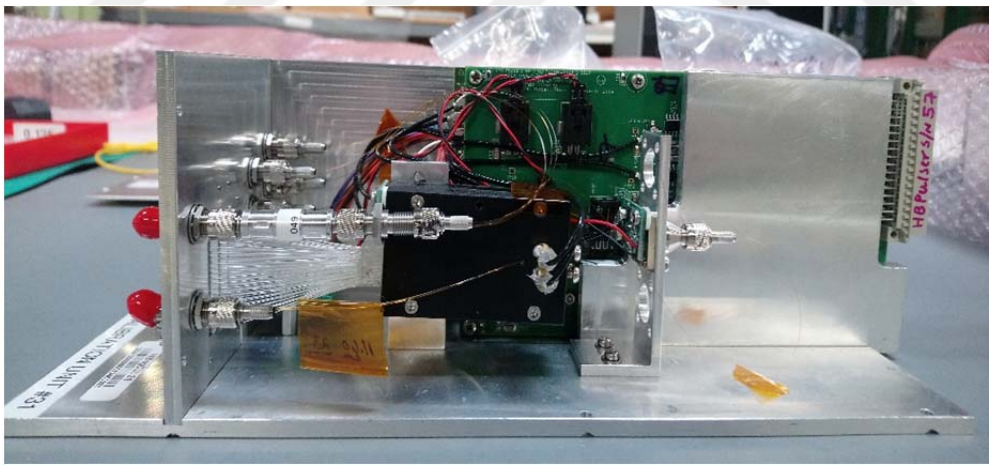


Şekil 3.10. RM (Cummings, 2019)

ODU'nun görevi, aktif malzemeden gelen fiberleri kalorimetre optik kule bölümleri oluşturarak SiFÇ dizilerine bağlamaktır. SiFÇ'ler, kalorimetre sinyalini ışıktan elektriksel darbeye dönüştürmektedir. SiFÇ'lerden gelen elektrik darbeleri, QIE kartları tarafından sayısallaştırılmaktadır. SiFÇ kontrol kartı ise birçok işlev gerçekleştirmektedir. SiFÇ'ler için ön gerilim ve SiFÇ sıcaklıklarını sabit tutan peltier soğutucular için kontrollü gerilim sağlamaktadır. Ayrıca kritik sıcaklıkların yeniden okunmasını, gerilimleri ve elektrik sisteminin akımlarını sağlamaktadır (CMS Collaboration, 2012).

3.2.4. Kalibrasyon Birimi (CU)

Her bir RBX'de bir adet CU bulunmaktadır. CU içinde bulunan ışık karıştırıcıdaki mikro-fiberlerin her birine bağlanmış fiberler, SiFÇ'lere LED veya lazer sinyallerini iletmektedir. CU, lazer ışık dağıtım sisteminin yanı sıra SiFÇ'ler için bir LED pulser kartı içermektedir. LED pulser kartının tasarımı, orijinal HB CU'daki ile aynıdır. Ancak pulser kontrolleri önemli ölçüde gelişmiştir. Özellikle CU, LED darbeleri üretmek için LHC yörünge boşluğu boyunca CMS global Uyarı Test Etkinleştirme (Warning-Test-Enable) sinyalini kullanabilecektir. Bu durum ile CMS global işlemleri sırasında SiFÇ kazançlarının izlenmesi sağlanacaktır. Bu izleme sistemi ve LED pulser kontrolleri, HKAL kalibrasyonuna sonradan eklenen özelliklerdir. CU ayrıca, iletilen ışığı izlemek için PIN diyotlar içermektedir. CU'larda da okuma zincirindeki QIE'ler ile aynı olan QIE11 kartı kullanılmaktadır (CMS Collaboration, 2012). Şekil 3.11'de HB için kullanılan bir CU gösterilmektedir.



Şekil 3.11. HB'de kullanılan bir CU
(https://twiki.cern.ch/twiki/bin/viewauth/CMS/HBCUAssemblyTests)

4. ARAŞTIRMA VE BULGULAR

HB kalorimetresinde Faz-1 kapsamında yenilenen CU'ların montaj çalışması 2019 yılının ilk aylarında tamamlanmıştır. Toplam 50 adet CU'nun bileşenlerinin montajı yapılıp testlerden geçirilerek yeni CU'lar hazırlanmıştır. Tüm testlerden sorunsuz geçen 36 adet yeni CU, HB RBX'lere yerleştirilmiştir.

Tezin bu bölümünde önce CU mekanizması hakkında bilgi verilecektir. Daha sonra CERN-Prevessin yerleşkesindeki 904 numaralı binada yapılan HB904 lazer testi düzeneği ve veri alımı anlatılacaktır. Son olarak, lazer testlerinden alınan veriler ile CU'ların optik kısmının analizi tartışılacaktır ve tüm CU'ların durumu hakkında bilgi verilerek HB kalorimetresine yerleştirilen CU'ların tanımlama (ID) numaraları belirtilecektir.

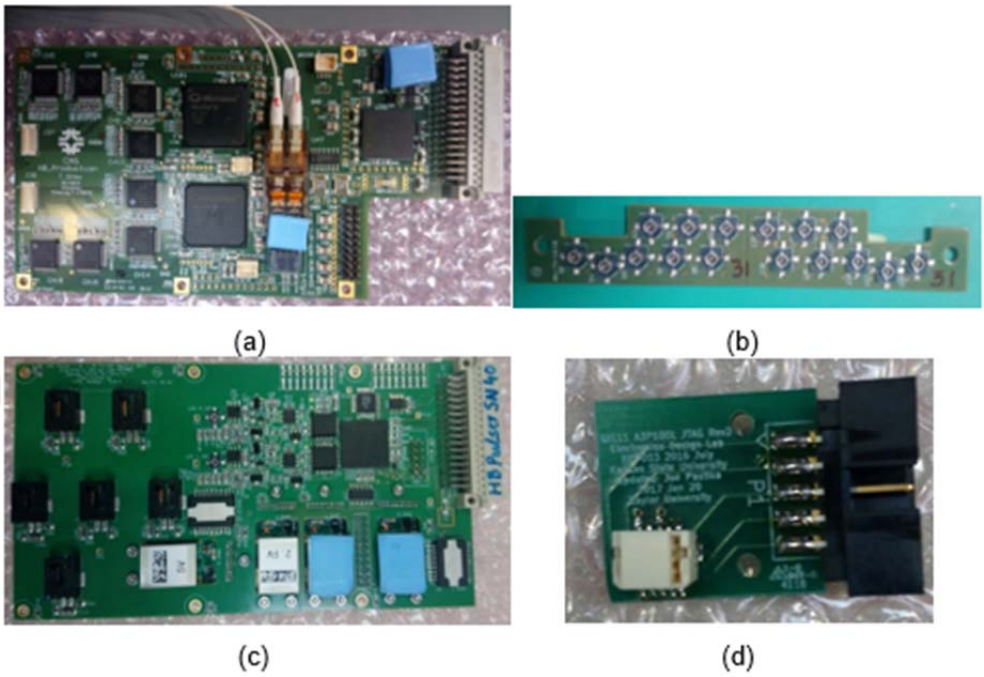
4.1. CU Mekanizması

Yeni CU'larda orijinallerine göre birtakım değişiklikler yapılmıştır. Bu değişiklikler, QIE ve pulser kartlarının yenilenmesi ve bazı bileşenlerin yeniden konumlandırılmasıdır.

CU bileşenleri, elektronik ve optik olmak üzere iki bölüme ayrılmaktadır. CU'nun elektronik bileşenleri; pulser kart, QIE11 kartı, QIE adaptör kartı, fiber optik kablolar, JTAG (Ortak Test Eylem Grubu) konnektör kartı ve JTAG kablosudur. Optik bileşenleri ise ışık karıştırıcı kutusu, sintilatör kutusu, PIN diyot ve kuvars fiber ayırıcılardır.

4.1.1. Elektronik Bölüm Montajı ve Testleri

Elektronik bölüm; bir adet pulser kartı, QIE11 kartı, QIE adaptör kartı, fiber optik kablolar, JTAG kablosu ve JTAG konnektör kartından oluşmaktadır. Pulser kartı, CU'nun içine monte edilmiştir ve LED ışığının SiFÇ'ler ve PIN diyot kartlarında aynı şekilde parlamasını kontrol etmektedir. Şekil 4.1'de elektronik bölüm bileşenleri gösterilmektedir.



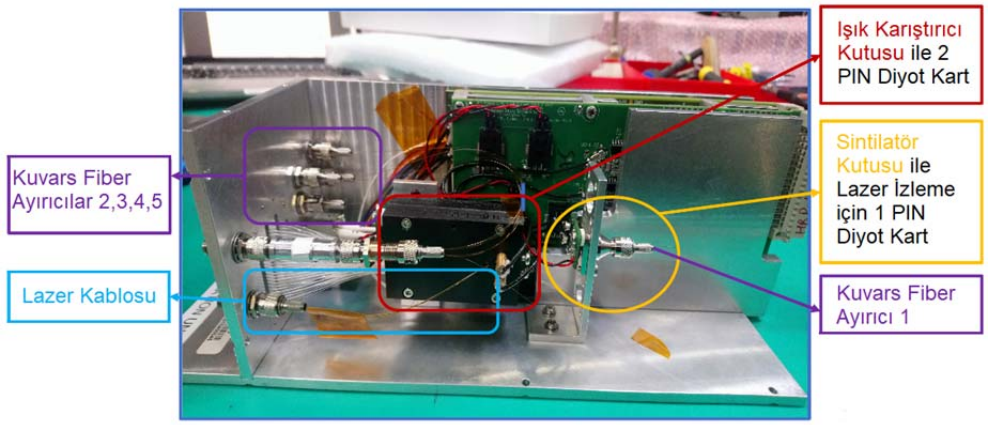
Şekil 4.1. (a) QIE11 kartı (b) QIE11 adaptör kartı (c) Pulser kartı (d)JTAG konnektör kartı (https://twiki.cern.ch/twiki/bin/viewauth/CMS/HBCUAssemblyTests)

İlk aşamada, CU'ların elektronik bileşenleri montaj edilerek kontrol testleri yapılmıştır. Bu testler; güç döngüsü testi, iletişim testi, JTAG pulser testi, bağlantı testi ve JTAG köprü testidir. Testler sırasında fark edilen anormal durumlar, elektronik bileşenlerde yapılan birtakım değişiklikler ile düzeltilmiştir. 3 ve 4 numaralı CU'lar elektronik testlerde başarı sağlayamadığından bu CU'larda sonraki aşamaya geçilememiştir.

4.1.2. Optik Bölüm Montajı ve Testleri

Optik bölüm; ışık karıştırıcı kutusu, sintilatör kutusu, ikisi ışık karıştırıcı kutusunda ve biri lazer izleme/dağıtımı için kullanılan sintilatör kutusunda olmak üzere üç PIN diyot kartı, lazer kablosu, kuvars fiber ayırıcılar ve SMA

konnektörlerden oluşmaktadır. Şekil 4.2'de bir CU içine montajı tamamlanan optik bölüm gösterilmektedir.



Şekil 4.2. Optik bileşenlerin CU içerisindeki konumları (https://indico.cern.ch/event/785734/contributions/3266921/attachments/1789618/2916651/CMSweek_PhaseIMeeting_HB_CU_03.02.2019.pdf)

CU'ların optik bölüm montajı tamamlandıktan sonra lazer testleri yapılmıştır. Lazer testlerinin amacı, optik bölümün düzgün çalışıp çalışmadığını kontrol etmektir.

4.2. HB904 Lazer Testi Düzeneği ve Veri Alımı

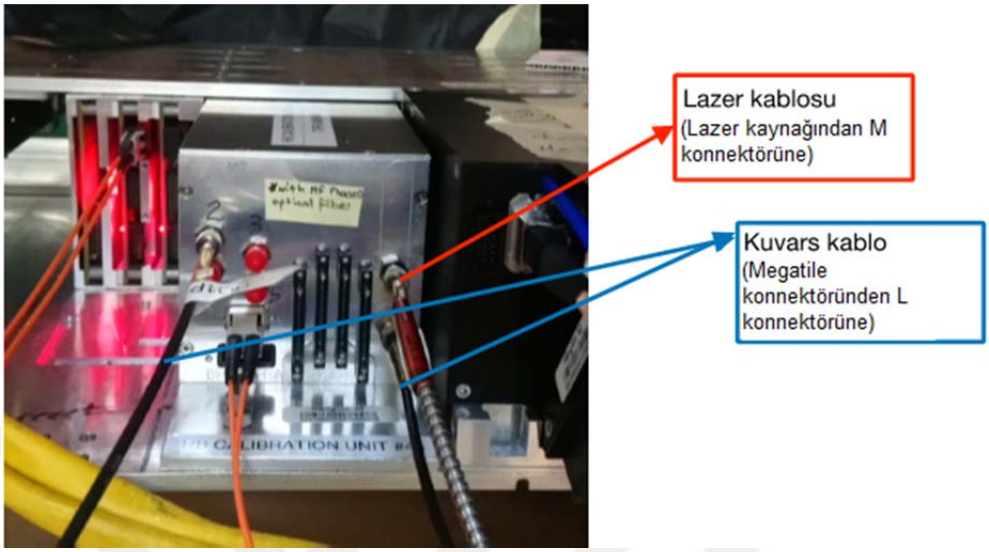
Montajı tamamlanan CU'ların ilk testleri için bir adet RBX kullanılmıştır. İlk testleri başarılı bir şekilde geçen CU'lar burn-in test alanındaki 12 adet prototip RBX'e montaj edilip belirli kısa veya uzun periyotlar boyunca çalıştırılmıştır. İlk kalite kontrol testlerinde lazer kullanılarak her bir CU için beş farklı biçimde veri alınmıştır. Bu veriler, Laser to SiPM (L.root), Laser to Megatile 2 (2.root), Laser to Megatile 3 (3.root), Laser to Megatile 4 (4.root) ve Laser to Megatile 5 (5.root) şeklindedir.

Bir CU'da altı adet SMA konnektör (L,2,3,4,5) bulunmaktadır. CU'daki SMA konnektörler Şekil 4.3'te gösterilmektedir.



Şekil 4.3. CU'da bulunan SMA Konnektörler.

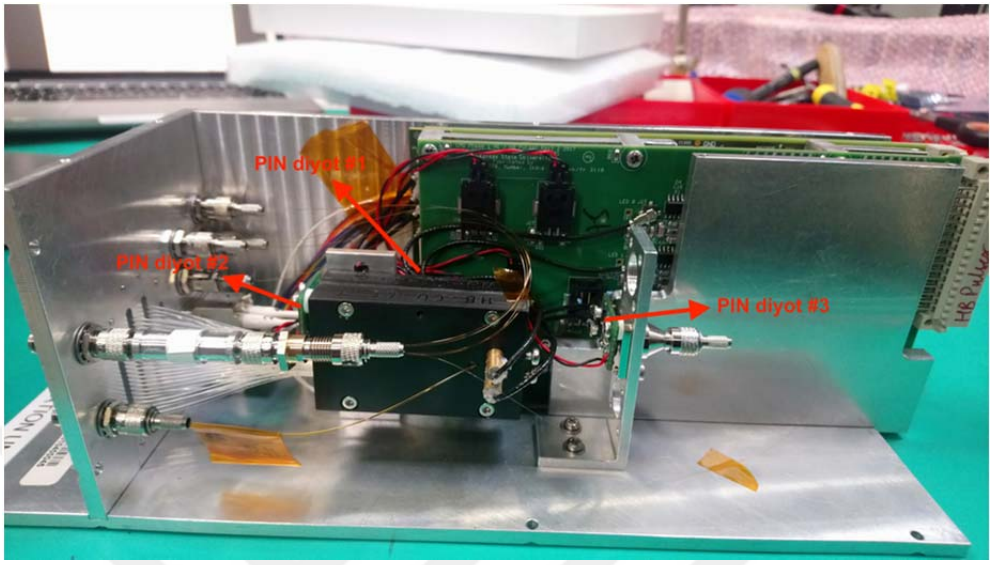
Laser to SiPM testi için; lazer kablosu L konnektörüne bağlanarak L.root elde edilmiştir. Laser to MegatileX testleri için; lazer kablosu M konnektörüne bağlanmıştır. Daha sonra bir adet kuvars kablonun bir ucu 2 numaralı konnektöre diğer ucu L konnektörüne bağlanarak 2.root elde edilmiştir ve 3, 4, 5 numaralı konnektörler için de bu işlem tekrarlanarak ilgili veriler oluşturulmuştur. RBX'e yerleştirilen bir CU'da Laser to Megatile2 testinin veri alımı sırasındaki kablo bağlantıları Şekil 4.4'te gösterilmektedir.



Şekil 4.4. Veri alımı sırasında kablo bağlantılarının bir görünümü.

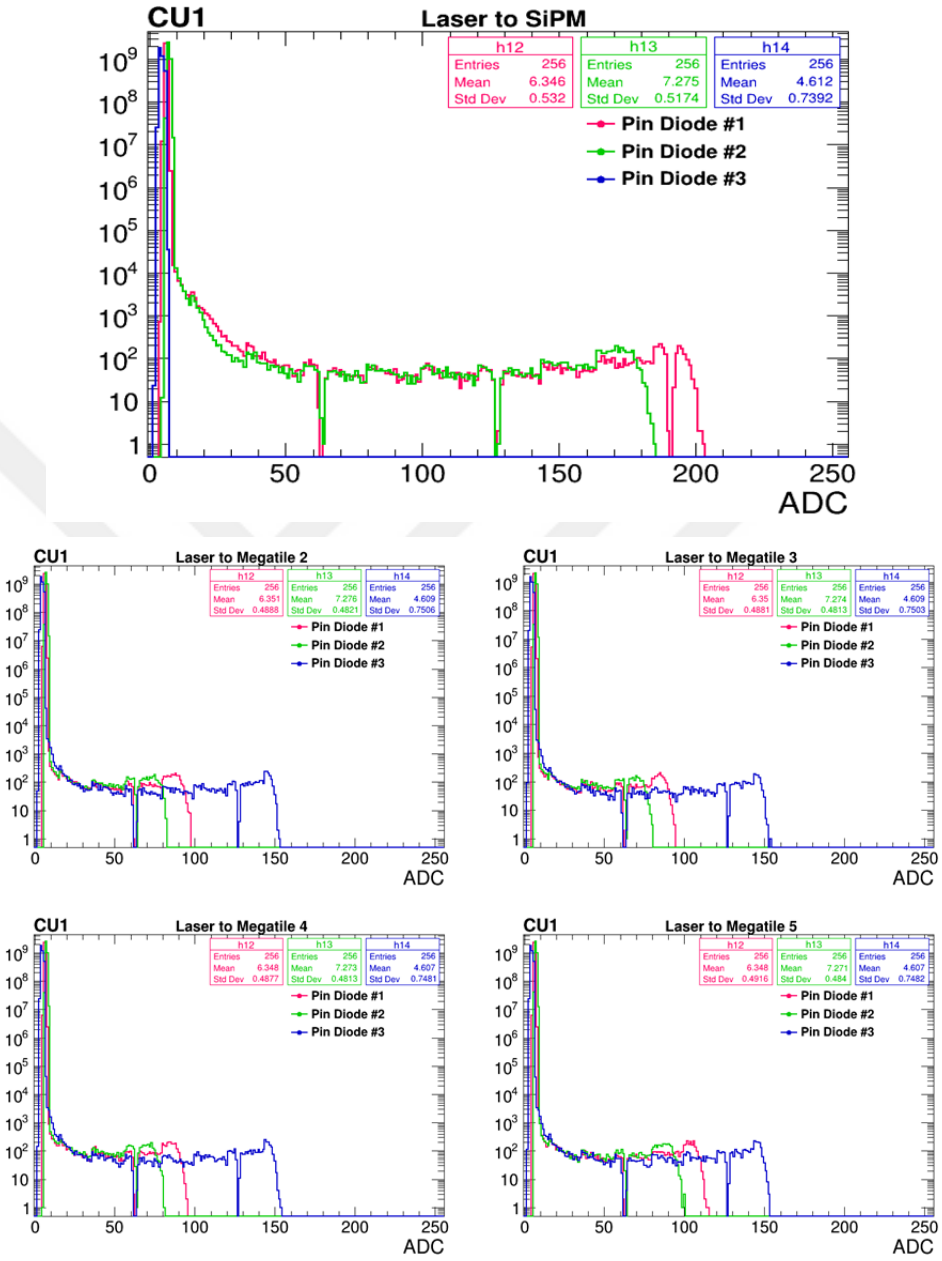
Veri alma sistemi burn-in siteminde bulunan bütün RBX'lerdeki CU'ların bilgisini kullanarak root dosyasını oluşturmaktadır. Bir CU'da bulunan bir QIE kartında 16 kanal olduğundan, her bir veriye ait root dosyasının içinde 12×16=192 histogram oluşmaktadır. Ancak her bir CU'da üç adet PIN diyot olduğundan sadece üç adet QIE kanalı (#13, #14, #15) kullanılmaktadır ve bu kanallarda gerçek sinyal gözlenmektedir. Diğer kanallarda görülen sinyaller sadece elektronik gürültü (pedestal)'dür. Okunan sinyaller ADC cinsindendir. Daha sonra sinyaller, ADC değerinden femto Coulomb (fC)'a dönüştürülmüştür.

Laser to SiPM testlerinde, PIN diyot 3'teki fiber kullanılmadığı için pedestal bu diyota ait kanaldan beklenmiştir. PIN diyot 1'den en güçlü sinyal ve PIN diyot 2'den ise daha zayıf bir sinyal alınmıştır. Şekil 4.5'te CU içinde kullanılan PIN diyotların numaralandırılması gösterilmiştir.

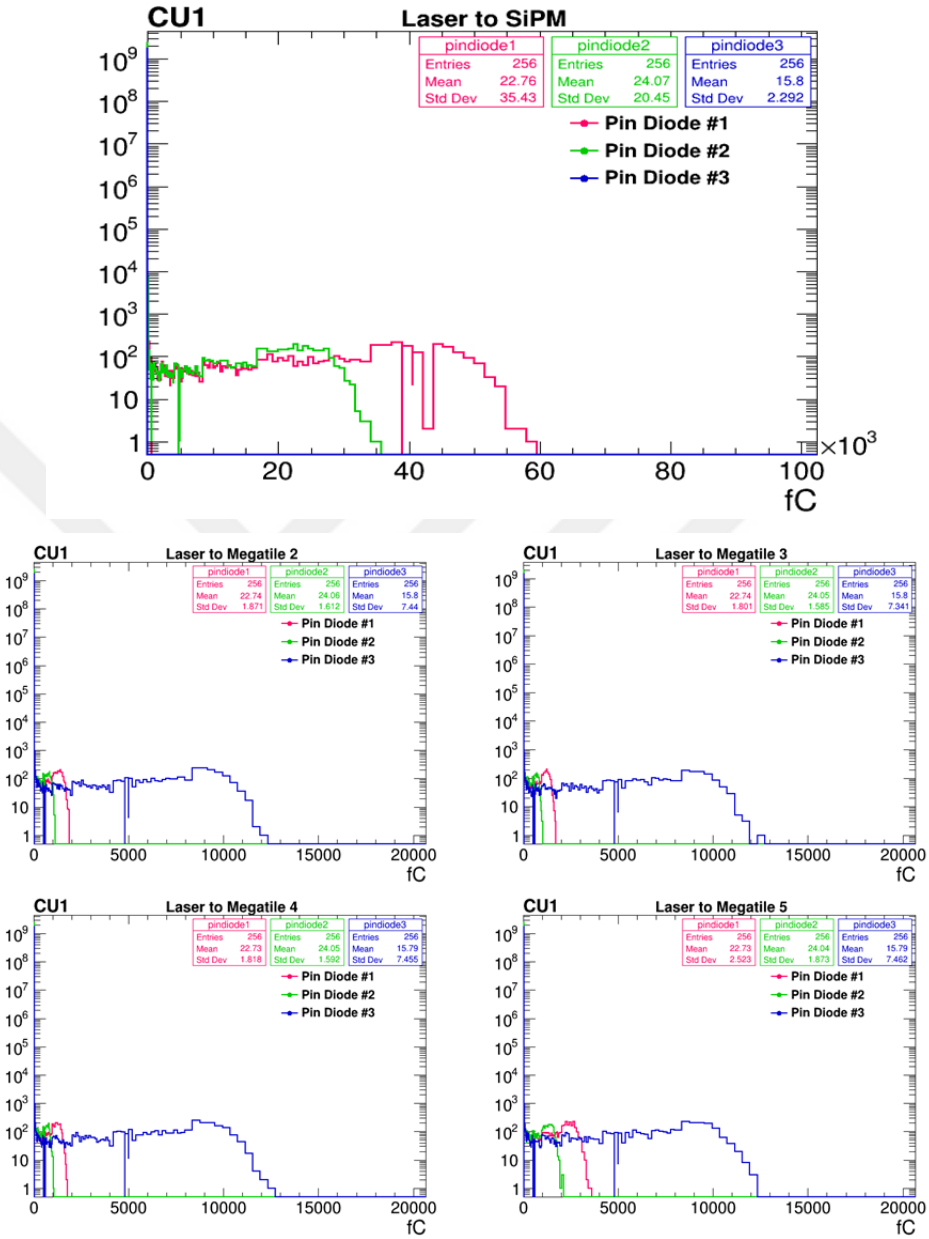


Şekil 4.5. CU'da kullanılan PIN diyotların numaralandırılması.

Şekil 4.6'da 1 numaralı CU'ya ait verilerdeki üç kanaldan gözlenen ADC sinyallerinin dağılımları verilmiştir. Histogramların *x*-eksenleri ADC değerini, *y*-eksenleri ise olay sayısını göstermektedir. Şekil 4.7'de ise CU1'in ADC'den fC'ye dönüştürülmüş sinyal dağılımları verilmiştir. Sinyal dağılımlarında bir anormallik tespit edilmemiştir.

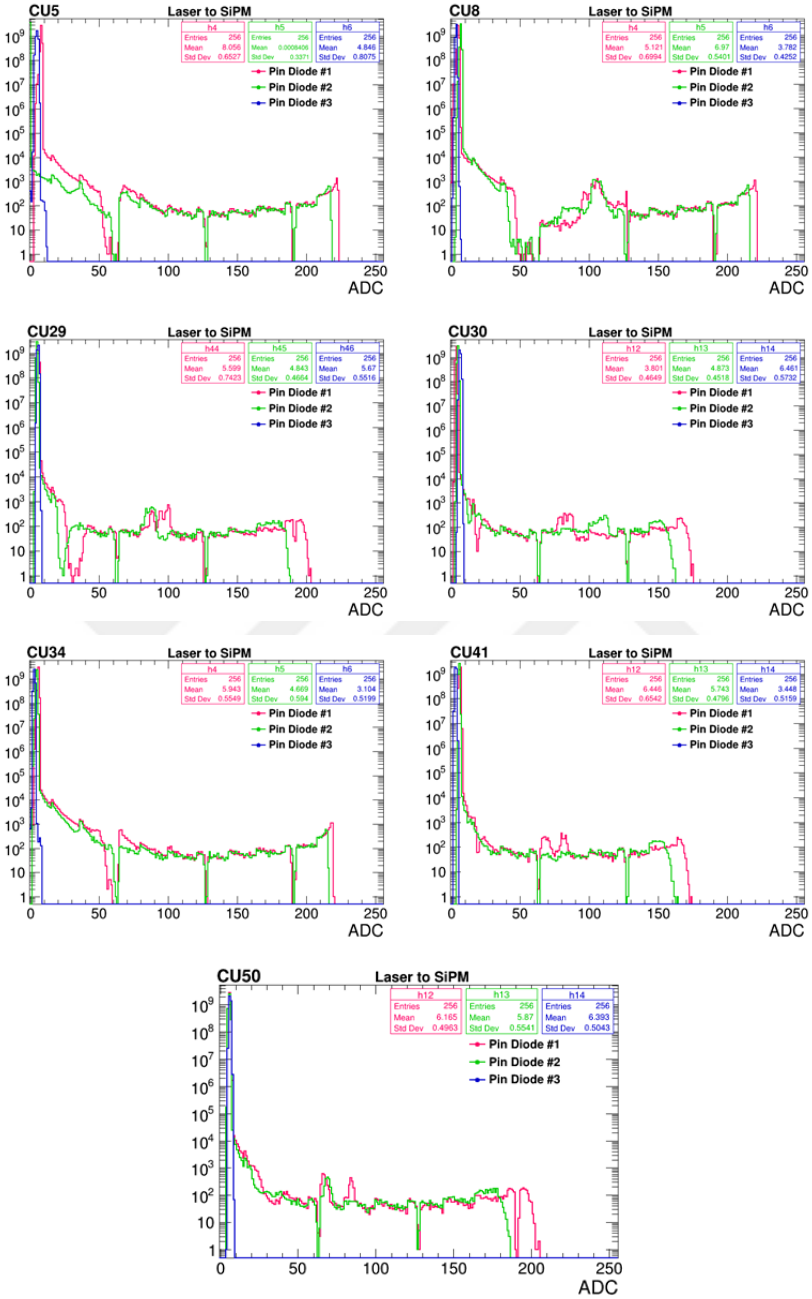


Şekil 4.6. CU1'e ait beş farklı veri alma yöntemiyle elde edilen ADC sinyallerinin dağılımları.

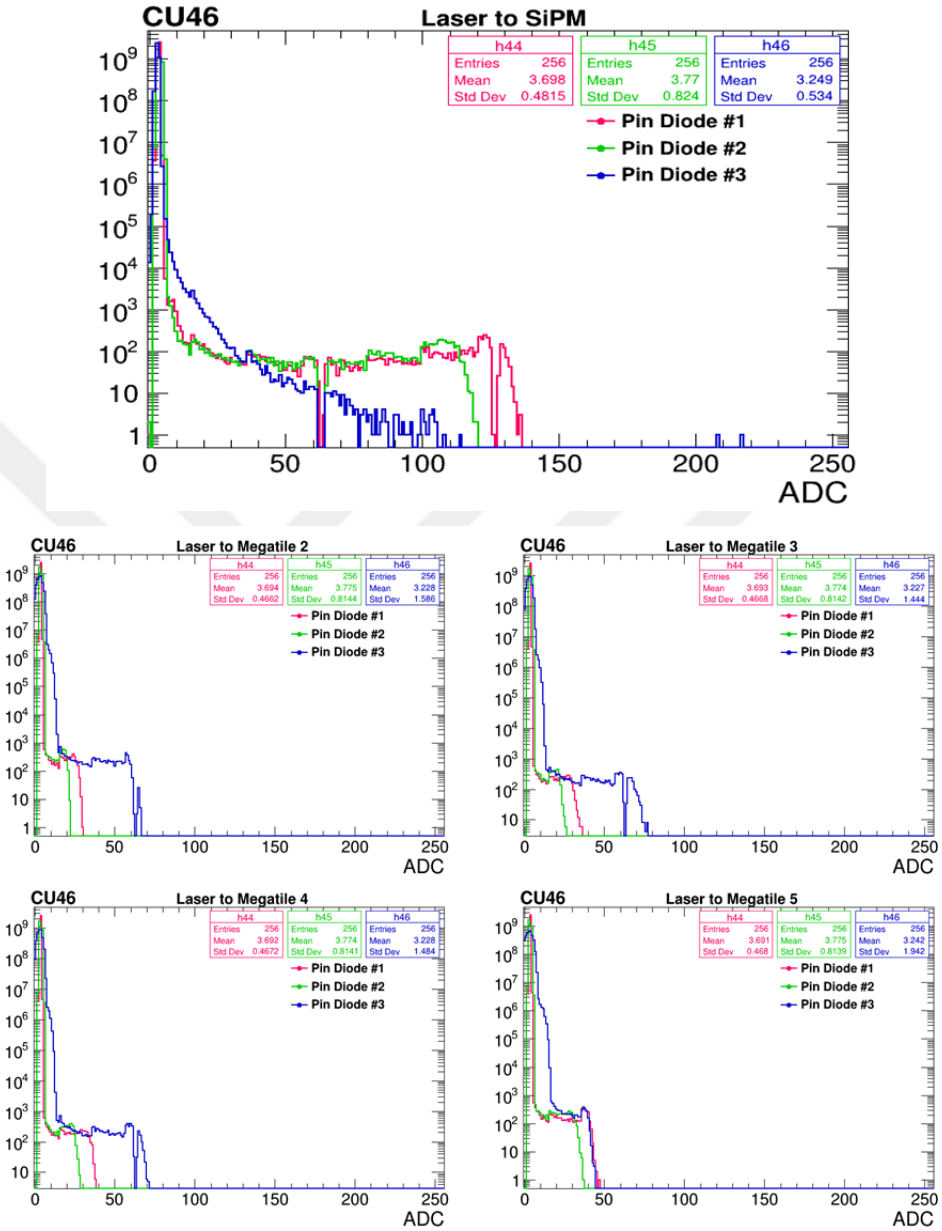


Şekil 4.7. CU1'e ait beş farklı veri alma yöntemiyle elde edilen sinyallerin fC cinsinden dağılımları.

Lazer testleri sırasında CU'larda iki farklı sorun ile karşılaşılmıştır. Bunlardan biri pulser kartlarına yerleştirilmiş olan 5 V DC/DC dönüştürücüleri ile QIE özellikleri arasında bilinen bir uyumsuzluk ile ilgilidir. QIE, ~5,2 V veya daha fazla güç gerektirmesine rağmen kartın montajı sırasında 5 V DC/DC sipariş edilmiştir. 5 V DC/DC'ler 4,9 V veya daha az güç sağlamaktadır. Gerektiğinden daha az güç kullanılması, QIE'nin iç toplayıcılarının eksik yük boşalmasından dolayı 4 Zaman Dilimi (TS)'nden sonra gelen bir "yankı" sinyaline neden olmaktadır. Bu sinyalin 4 TS'den sonra görülmesi nedeniyle uzmanlar, CU'da bulunan PIN diyotların okuma sistemi için bir problem oluşturmayacağına karar vermiştir ve DC/DC dönüştürücüleri değiştirilmemiştir. Bu sorunun görüldüğü CU'ların ID numaraları 5, 8, 29, 30, 34, 41 ve 50'dir. Şekil 4.8'de bu CU'ların Laser to SiPM testi verilerinden elde edilen ADC sinyal dağılımları gösterilmektedir. Bu dağılımlarda anormal tümsekler tespit edilmiştir. Lazer testlerinde karşılaşılan diğer sorun ise bazı CU'larda okunan ADC sinyallerin maksimum değerlerinin diğer CU'lara göre daha düşük değerlere sahip olmasıdır. Bu CU'ların ID numaraları 19, 27, 28, 38, ve 46 şeklindedir. Örnek olarak, Şekil 4.9.'da düşük maksimum ADC'ye sahip olan CU46'nın beş farklı veri alma yöntemiyle elde edilen sinyal dağılımları gösterilmektedir.

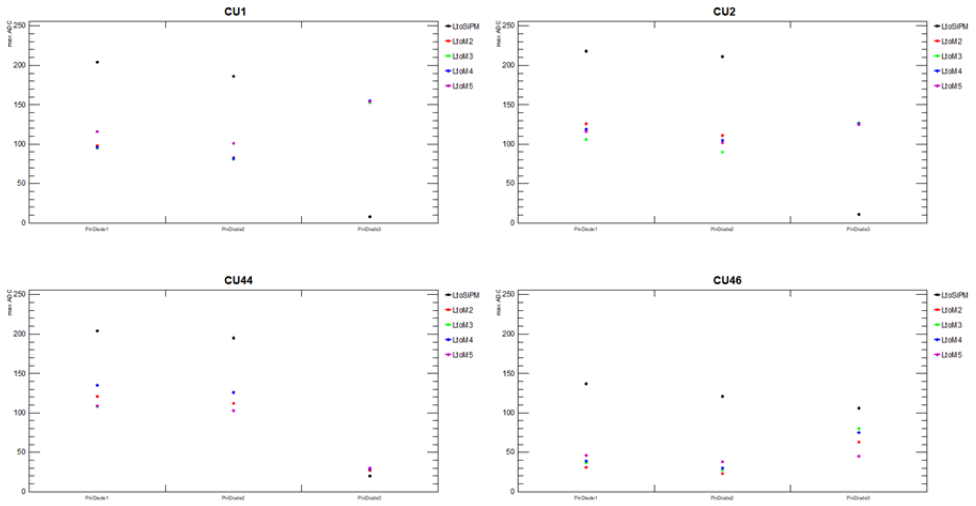


Şekil 4.8. CU5, CU8, CU29, CU30, CU34, CU41 ve CU50'nin Laser to SiPM testi verisinden elde edilen ADC sinyallerinin dağılımları.



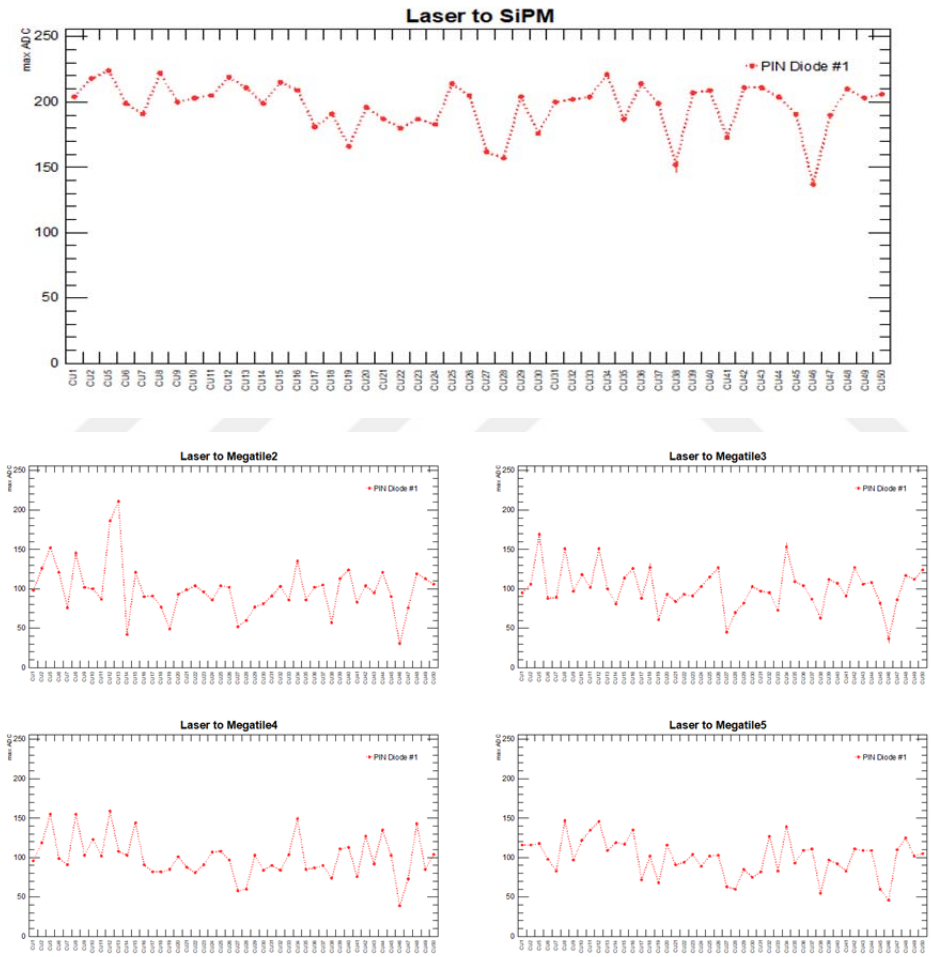
Şekil 4.9. CU46'ya ait beş farklı veri alma yöntemiyle elde edilen ADC sinyallerinin dağılımları.

Her bir CU için alınan beş farklı veriden, sinyallerin maksimum ADC değerlerine bakılarak PIN diyotların kararlılığı analiz edilmiştir. PIN diyot 1, PIN diyot 2 ve PIN diyot 3 için her bir veriye ait dağılımlarda maksimum ADC değerleri belirlenmiştir. Elde edilen dağılımlarda her bir nokta, beş farklı metodu (Laser to SiPM, Laser to Megatile 2, Laser to Megatile 3, Laser to Megatile 4, Laser to Megatile 5) temsil etmektedir. Histogramların *x*-ekseni PIN diyot ID'sini, *y*-ekseni ise maksimum ADC değerini göstermektedir. Şekil 4.10'da dört farklı CU için elde edilen bu dağılımlar verilmiştir. Böylece, PIN diyotlara ait sinyallerin her bir farklı veri yöntemine göre nasıl bir davranış gösterdiği belirlenmeye çalışılmıştır. Laser to SiPM metodunda, PIN diyot 1 ve 2 daha yüksek, PIN diyot 3 ise daha düşük ADC değerine sahiptir. Bu metot ile veri alınırken PIN diyot 3'e ait kanal kullanılmadığı için düşük ADC değerine sahip olması beklenen bir durumdur. Laser to Megatile metotlarında ise birbirine yakın değerler elde edilmiştir.



Şekil 4.10. Beş farklı veri yöntemi için CU1, CU2, CU44 ve CU46'ya ait PIN diyotların maksimum ADC değerleri.

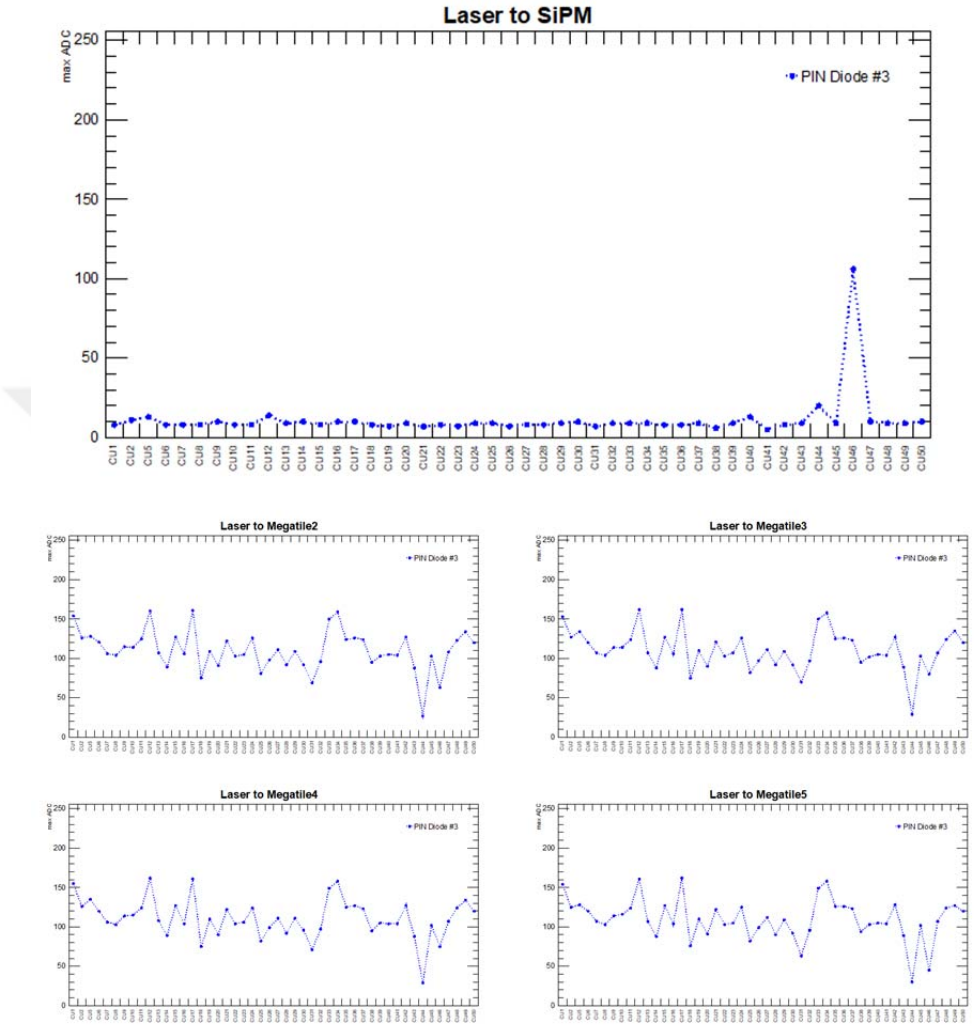
Bütün CU'lar için yük sinyal dağılımlarının maksimum ADC değeri, her bir PIN diyot ve veri alma yöntemine göre elde edilmiştir. Şekil 4.11'de PIN diyot 1 için, Şekil 4.12'de PIN diyot 2 için, Şekil 4.13'te ise PIN diyot 3 için elde edilen dağılımlar gösterilmektedir. Dağılımların *x*-eksenleri CU ID'sini, *y*-eksenleri ise maksimum ADC değerlerini göstermektedir.



Şekil 4.11. Beş farklı veri yöntemi için tüm CU'lardaki PIN diyot 1'e ait maksimum ADC değerleri.



Şekil 4.12. Beş farklı veri yöntemi için tüm CU'lardaki PIN diyot 2'ye ait maksimum ADC değerleri.



Şekil 4.13. Beş farklı veri yöntemi için tüm CU'lardaki PIN diyot 3'e ait maksimum ADC değerleri.

CU27, CU28, CU38, CU46'ya ait 1 ve 2 numaralı PIN diyotlarda bütün veri yöntemlerinde daha düşük ADC değeri gözlenmiştir. CU46'ya ait PIN diyot 3, Laser to SiPM verisinde beklenilenin aksine daha yüksek pedestal sinyali göstermiştir. CU19'a ait PIN diyot 1'de bütün veri yöntemlerinde daha düşük ADC değeri gözlenmiştir. Test yapılan ortamın sıcaklığı veya kullanılan lazer ışığının şiddetinin ADC değerlerinin düşmesine neden olabileceği düşünülmüştür. Bu CU'lar, maksimum ADC değeri normal değerlerde olan bir CU referans alınarak değişik günlerde tekrar test edilmiştir. Bu testlerde de düşük ADC değeri elde edilmiştir. Sorunun, CU'larda bulunan PIN diyotlardan kaynaklı olabileceği önerilmiştir. Ancak yedek PIN diyot mevcut olmadığından bu testler yapılamamıştır. Dolayısıyla bu CU'ların dedektöre yerleştirilmemesine karar verilmiştir (https://twiki.cern.ch/twiki/bin/viewauth/CMS/HBCUAssemblyTests).

Tüm testlerden sorunsuz geçerek HB- ve HB+ RBX'lerine kurulan CU'ların ID'leri Çizelge 4.1'de gösterilmektedir.

Çizelge 4.1. Dedektöre yerleştirilen CU'ların ID'si

HB- RBX	CU ID	HB+ RBX	CU ID
1	24	1	2
2	47	2	39
3	21	3	49
4	26	4	36
5	42	5	44
6	11	6	12
7	20	7	15
8	16	8	13
9	35	9	14
10	32	10	1
11	31	11	18
12	33	12	9
13	40	13	25
14	45	14	7
15	43	15	22
16	10	16	23
17	37	17	17
18	6	18	48

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

CMS dedektörünün HKAL kalorimetresinin HB alt kalorimetresine ait CU'lar, Faz-1 yükseltmeleri kapsamında yenilenmiştir. İlk aşamada 50 adet CU'nun elektronik bölüm bileşenlerinin montajı yapılmıştır ve testlerden geçirilmiştir. Daha sonra optik bölüm bileşenlerinin montajı tamamlanarak lazer testleri uygulanmıştır. Elektronik testlerde başarısız olan 3 ve 4 numaralı CU'lar için lazer testleri yapılmamıştır.

Bu tez çalışmasında, lazer testlerinden alınan veriler ile CU'ların optik bölümünün durumu analiz edilmiştir. Tüm CU'lar için alınan verilerden ADC ve fC cinsinden sinyal dağılımları incelenmiştir. Her bir CU için alınan beş farklı veriden, dağılımların maksimum ADC değerlerine bakılarak PIN diyotların kararlılığı analiz edilmiştir. Böylece, PIN diyotlara ait sinyallerin her bir farklı veri yöntemine göre nasıl bir davranış gösterdiği tespit edilmiştir. Laser to SiPM metodunda, PIN diyot 1 ve 2 daha yüksek, PIN diyot 3 ise daha düşük ADC değerine sahiptir. Bu metot ile veri alınırken PIN diyot 3'e ait kanal kullanılmadığı için bu kanaldan alınan sinyal pedestal olduğundan düşük ADC değerine sahip olması beklenen bir durumdur. Laser to Megatile metotlarında ise birbirine yakın değerler elde edilmiştir.

Lazer testleri sırasında, bazı CU'lar için iki farklı sorun tespit edilmiştir. Bu sorunlardan biri, pulser kartlarına yerleştirilmiş olan 5 V DC/DC dönüştürücüleri ile QIE özellikleri arasındaki uyumsuzluktan kaynaklanmıştır. Bu sorunun CU'da bulunan PIN diyotların okuma sistemi için bir problem oluşturmayacağına karar verilerek DC/DC dönüştürücüleri değiştirilmemiştir. Bu sorunun görüldüğü CU'ların ID numaraları 5, 8, 29, 30, 34, 41 ve 50'dir. Lazer testlerinde fark edilen diğer sorun ise bazı CU'larda okunan ADC sinyallerin maksimum değerlerinin diğer CU'lara göre daha düşük değerlere sahip olmasıdır. Test yapılan ortamın sıcaklığı veya kullanılan lazer ışığının şiddetinin ADC değerlerinin düşmesine neden olabileceği düşünülmüştür. Bu CU'lar, maksimum

ADC değeri normal değerlerde olan bir CU referans alınarak değişik günlerde tekrar test edilmiştir. Bu testlerde de düşük ADC değeri elde edilmiştir. Sorunun, CU'larda bulunan PIN diyotlardan kaynaklı olabileceği önerilmiştir. Ancak yedek PIN diyot mevcut olmadığından bu testler yapılamamıştır. Bu CU'ların ID numaraları ise 19, 27, 28, 38, ve 46 şeklindedir. Bu iki sorunun görüldüğü CU'ların dedektöre yerleştirilmesi önerilmemiştir.

2019 yılının başlarında, testleri sorunsuz geçen CU'lar HB kalorimetresinde bulunan 36 adet RBX'in her birine bir adet olmak üzere yerleştirilmiştir. HB kalorimetresinde Faz-1 kapsamında yenilenen ön-uç elektronikler, HL-LHC boyunca kullanılmaya devam edilecektir.

KAYNAKLAR

CERN Brochure, 2017. https://cds.cern.ch/record/2255762/files/CERN-Brochure-2017-002-Eng.pdf

CMS Collaboration, 2008. The CERN Large Hadron Collider: Accelerator and Experiments, The CMS experiment at the CERN LHC, JINST 3 S08004. https://cds.cern.ch/record/1129810/files/jinst8_08_s08004.pdf

CMS Collaboration, 2011. Technical Proposal for the Upgrade of the CMS Detector Through 2020, CERN-LHCC-2011-006, CMS-UG-TP-1, LHCC-P-004.
https://cds.cern.ch/record/1355706/files/LHCC-P-004.pdf

CMS Collaboration, 2012. Cms Technical Design Report for the Phase 1 Upgrade of the Hadron Calorimeter, CERN-LHCC-2012-015, CMS-TDR-010. https://cds.cern.ch/record/1481837/files/CMS-TDR-010.pdf

CMS Collaboration, 2015. Technical Proposal for the Phase-II Upgrade of the Compact Muon Solenoid, CERN-LHCC-2015-010, LHCC-P-008, CMS-TDR-15-02.
https://cds.cern.ch/record/2020886/files/LHCC-P-008.pdf

CMS Collaboration, 2017. The Phase-2 Upgrade of the CMS Barrel Calorimeters, Technical Design Report, CERN-LHCC-2017-011, CMS-TDR-015.
https://cds.cern.ch/record/2283187/files/CMS-TDR-015.pdf

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

Cummings, G.E., 2019. Overview of the CMS HCAL Barrel Phase 1 Upgrade.
https://indico.cern.ch/event/797774/contributions/3321893/attachments/1802113/2939720/GECummings_HBUpgrade_LHCC2019.pdf

Pastica, N.J., 2015. Performance of the prototype readout system for the CMS endcap hadron calorimeter upgrade, CMS CR-2015/291. https://cds.cern.ch/record/2065593/files/CR2015_291.pdf

Strobbe, N., 2016. The upgrade of the CMS hadron calorimeter with silicon photomultipliers, FERMILAB-CONF-16-501-CMS-E. https://pdfs.semanticscholar.org/7553/522011ed5a904bfe8e420ec438a9da9a4c31.pdf

https://www.britannica.com/topic/CERN

https://timeline.web.cern.ch/timeline-header/89#371

https://atlas.physicsmasterclasses.org/tr/zpath_lhcphysics1.htm

https://home.cern/science/experiments/alice

https://home.cern/science/experiments/lhcb

https://home.cern/science/experiments/atlas

https://cms.cern/detector

https://cms.cern/physics

https://cms.cern/detector/identifying-tracks

https://cms.cern/detector/measuring-energy/ecal-preshower

https://cms.cern/detector/measuring-energy/crystal-calorimeter

http://cms.web.cern.ch/news/hcal-upgrades-its-photodetectors

https://en.wikipedia.org/wiki/Compact_Muon_Solenoid

https://cms.cern/content/muon-tomography

https://cms.cern/detector/detecting-muons

http://maalpu.org/lhc/LHC.main.htm

https://home.cern/resources/image/accelerators/lhc-images-gallery

https://www.news.uct.ac.za/article/-2018-07-24-upgrading-the-largest-experiment-on-earth

https://home.cern/sites/home.web.cern.ch/files/2018-06/lhcb-detector-2018.jpg

https://www.tech-worm.com/wp-content/uploads/2019/05/cern-lhc-atlas-cms-clic-alice-nedir.jpg

https://cds.cern.ch/record/1433717
https://cds.cern.ch/record/1431466
https://cds.cern.ch/record/1431467
https://cds.cern.ch/record/1431477
http://www.digitaljournal.com/image/88389
http://cds.cern.ch/record/1431485
http://www.lhc-facts.ch/img/cms/hcal2.jpg
https://cds.cern.ch/record/1431489
http://www.lhc-facts.ch/img/cms/solenoid2.jpg
https://www.rwth-aachen.de/go/id/ydc
https://cds.cern.ch/record/1431485
https://twiki.cern.ch/twiki/bin/viewauth/CMS/HBCUAssemblyTests
https://indico.cern.ch/event/785734/contributions/3266921/attachments/1789618/2916651/CMSweek_Phase1Meeting_HB_CU_03.02.2019.pdf

ÖZGEÇMİŞ

1990 yılında Mersin'de doğdu. 2008 yılında Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Gıda Teknolojisi Bölümünde ön lisans programına başladı ve 2010 yılında mezun oldu. 2010 yılında Çukurova Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümünde lisans programına başladı ve 2016 yılında mezun oldu. 2017 yılında Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında tezli yüksek lisans programına başladı.