

T.C
MİMAR SİNAN GÜZEL SANATLAR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

CMS HF KALORİMETRESİ İÇİN 4-ANOTLU PMT'LERİN
LED ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Aslı ARSLAN

Fizik Anabilim Dalı

Fizik Programı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Ferhat ÖZOK

HAZİRAN 2014

T.C
MİMAR SİNAN GÜZEL SANATLAR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

CMS HF KALORİMETRESİ İÇİN 4-ANOTLU PMT'LERİN
LED ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Aslı ARSLAN

Fizik Anabilim Dalı

Fizik Programı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Ferhat ÖZOK

HAZİRAN 2014

Aslı ARSLAN tarafından hazırlanan CMS HF KALORİMETRESİ İÇİN 4-ANOTLU PMT'LERİN LED ANALİZİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

F. Ö. Ö.
Yrd. Doç. Dr. Ferhat Örok
Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından Fizik Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan: Yrd. Doç. Dr. Ferhat Örok

F. Ö. Ö.

Üye: Prof. Dr. Cemal Delichman

Delichman

Üye: Doç. Dr. Taylan Yetkin

Yetkin

Üye: Prof. Dr. M. Nazim Erduvan

Erduvan

Üye: Yrd. Doç. Dr. Mehtap YALCINKAYA

Yalcinkaya

Bu tez, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

TEŞEKKÜR

Öncelikle bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteklerini esirgemeyen danışman hocam Yard. Doç. Dr. Ferhat Özok'a sonsuz teşekkür ederim. Ayrıca bilgilendirmeleriyle ve yönlendirmeleriyle çalışmamı şekillendiren Dr. Elif Aslı Yetkin hocama teşekkürlerimi sunarım. CERN'deki CMS grubuna dahil olmamı sağlayan Doç. Dr. Kerem Cankoçak'a teşekkür ederim. Tez çalışmalarım sırasında bana her zaman yardım ve desteğini sunan Araş. Gör. Hüseyin Bahtiyar'a çok teşekkürler. Özellikle yüksek lisans eğitimim süresince bir çok yönden destek ve katkılarını hissettiğim, kısa zamanda çok şey paylaştığım arkadaşlarım Gökçe Şimşek ve Sema Küçüksucu'ya gösterdikleri dostluk için ayrıca teşekkür ederim. Son olarak ise beni bugünlere getiren, bana her zaman inanan ve desteklerini hiçbir zaman benden esirgemeyen sevgili annem Semra Arslan, sevgili babam Umur Arslan'a ve sevgili kardeşlerime sonsuz teşekkür ediyorum.

Aslı ARSLAN

HAZİRAN 2014

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	ii
ŞEKİL LİSTESİ	vi
TABLO LİSTESİ	vii
KISALTMALAR LİSTESİ	viii
SEMBOLLER LİSTESİ	ix
ÖZET	x
ABSTRACT	xi
1 GİRİŞ	1
2 ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	3
2.1 Parçacık Hızlandırıcıları	3
2.2 Büyük Hadron Çarpıştırıcısı	5
2.2.1 LHC'nin Enerjisi	5
2.2.2 Işınlılık ve Kütle Merkezi Enerjisi	6
2.2.3 LHC'de Deneyler	6
3 CMS	8
3.1 Yapısı ve Koordinat Sistemi	9
3.2 CMS'in Alt Dedektörleri	10
3.2.1 İz Dedektörü	10
3.2.2 Elektromanyetik Kalorimetre	11
3.2.3 Hadronik Kalorimetre	13
3.2.4 Müon Kalorimetresi	14
4 CMS - HADRONİK KALORİMETRE	15
4.1 Hadronik Fıçı (HB)	15
4.2 Hadronik Kapak (HE)	16
4.3 Hadronik Dış Kalorimetre (HO)	17
5 İLERİ HADRONİK KALORİMETRE	18
5.1 Tasarım	18
5.1.1 Cherenkov Işıması	21
5.2 HF Çalışma Prensipleri	21

5.3	Foto oğaltıcı Tüpler	22
5.3.1	Kazanç Hesabı	23
5.4	Dört Anotlu PMT'ler	24
5.5	HF - 904 Çalışmaları	25
5.6	LED Kalibrasyon Sistemi	26
6	VERİ ANALİZİ	27
7	SONUÇ	32
	KAYNAKLAR	36
	EK	38
	ÖZGEÇMİŞ	49

ŞEKİL LİSTESİ

2.1	LHC halkası [9].	5
2.2	LHC'nin şematik gösterimi [11].	7
3.1	CMS'in genel görünümü [17].	8
3.2	CMS koordinat sistemi [19].	9
3.3	CMS Dedektörünün Enine Kesiti [20].	10
3.4	İz dedektör sisteminin şematik görünümü [21].	11
3.5	Pixel dedektörünün şematik görünümü [22]	11
3.6	Elektromanyetik kalorimetre cam gibi şeffaf fakat demirden daha ağır olan kurşun tungsten kristallerinden oluşmuştur [23].	12
3.7	Elektromanyetik duş diagramı [22].	12
3.8	Hadronik duş diagramı [22].	13
3.9	Müon Sistemi [22].	14
4.1	CMS dedektörünün şematik görünümü. Üst kısım: Dedektörün dörtte birinin boyuna görünümü. Alt kısım: $z=0$ 'da enine görünümü [25].	15
4.2	Hadronik Fıçı dedektörünün görünümü [26].	16
4.3	Hadronik Kapak dedektörünün şematik görünümü [27].	17
4.4	CMS dedektörünün enine ve boyuna kesitlerinde HO katmanlarının konumları [27].	17
5.1	HF(+) sektörünün çeyrek kısımlarının görünümü.	19
5.2	HF'in kama yapısı [26].	19
5.3	Kuvars fiber demetlerinin görünümü [32].	20
5.4	Foto çoğaltıcı tüpün şematik görünümü [30].	22
5.5	Yeni ve eski HF PMT'leri [36].	25
6.1	LED ışık yoğunluğu değeri 100 olan JA1409 numaralı PMT için, değişik besleme gerilimlerine göre alınan sinyal dağılımları	28
6.2	JA1409 numaralı PMT için 650V'da dört farklı ışık yoğunluğu altındaki sinyal dağılımlarının şekli	28
6.3	LED ışık yoğunluğu değeri 150 olan JA0423 numaralı PMT için, değişik besleme gerilimlerine göre alınan sinyal dağılımları	29
6.4	JA0423 numaralı PMT için 700V'da dört farklı ışık yoğunluğu altındaki sinyal dağılımlarının şekli	29
6.5	JA0423 numaralı PMT'nin dört farklı ışık yoğunluğu altındaki sinyal dağılımları	30
6.6	Dört farklı besleme gerilim değeri altında PMT için kanaldan okunan sinyalin görünümü	30
6.7	Dört farklı besleme gerilim değeri altında PMT için kanaldan okunan pedestal sinyalinin görünümü	31

7.1 Iowa ve 904 için PMT kazanç grafiği	35
---------------------------------------------------	----

TABLO LİSTESİ

7.1	Analizler sonucunda LED-100 ışık yoğunluğunda, PMT sinyallerinin Gauss dağılımlarına bağlı olarak ortalama (mean) ve dağılımdaki karekök ortalama (rms) değerleri.	32
7.2	Analizler sonucunda LED-150 ışık yoğunluğunda, PMT sinyallerinin Gauss dağılımlarına bağlı olarak ortalama (mean) ve dağılımdaki karekök ortalama (rms) değerleri.	32
7.3	Analizler sonucunda LED-200 ışık yoğunluğunda, PMT sinyallerinin Gauss dağılımlarına bağlı olarak ortalama (mean) ve dağılımdaki karekök ortalama (rms) değerleri.	33
7.4	Analizler sonucunda LED-255 ışık yoğunluğunda, PMT sinyallerinin Gauss dağılımlarına bağlı olarak ortalama (mean) ve dağılımdaki karekök ortalama (rms) değerleri.	33
7.5	4. konfigürasyon için gerilim değerlerine bağlı olarak oluşturulan PMT kazanç tablosu. Burada PMT ID, PMT'nin seri numarasıdır.	34
7.6	Konfigürasyon-5	39
7.7	Konfigürasyon-6	40
7.8	Konfigürasyon-9	41
7.9	Konfigürasyon-11	42
7.10	Konfigürasyon-12	43
7.11	Konfigürasyon-13	44
7.12	Konfigürasyon-15	45
7.13	Konfigürasyon-16	46
7.14	Konfigürasyon-17	47
7.15	Konfigürasyon-18	48

KISALTMALAR LİSTESİ

ALICE	: Ağır İyon Çarpıştırma Deneyi
ATLAS	: Toroidal LHC Dedektörü
CMS	: Kompakt Müon Solenoid
CERN	: Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi
ECAL	: Elektromanyetik Kalorimetre
GeV	: Milyar Elektron Volt
HB	: Hadronik Fıçı Kalorimetresi
HCAL	: Hadronik Kalorimetre
HE	: Hadronik Kapak Kalorimetresi
HF	: İleri Kısım Hadronik Kalorimetre
HO	: Hadronik Dış Kalorimetresi
HPD	: Hibrit Foto Diyot
HV	: Yüksek Gerilim
Hz	: Hertz
INT	: Yoğunluk
LED	: Işık Yayan Diyot
LHC	: Büyük Hadron Çarpıştırıcısı
LHCb	: Büyük Hadron Çarpıştırıcısı b Fiziği Deneyi
LHCf	: İleri Büyük Hadron Çarpıştırıcısı
MeV	: Milyon Elektron Volt
LINAC	: Doğrusal Hızlandırıcı
PMT	: Foto Çoğaltıcı Tüp
PS	: Proton Sinkrotronu
PSB	: Proton Sinkrotronu Booster
RBX	: Okuma Ünitesi
RF	: Radyo Frekans
SPE	: Tek Foto Elektron
SPS	: Süper Proton Sinkrotronu
TeV	: Trilyon Elektron Volt
TOTEM	: Toplam Kesit, Elastik Saçılma ve Kırınım Ayrılma Deneyi
WLS	: Dalga Boyu Kaydırıcı

SEMBOLLER LİSTESİ

e^-	: Elektron
e^+	: Pozitron
T	: Tesla
K	: Kelvin
L	: Lüminosity
N_i	: Demet İçerisindeki Parçacık Sayısı
f	: Dönme Frekansı
ns	: Nanosaniye
A_t^{eff}	: Dik Kesit Alanı
$\sigma_{x,y}$: Etkileşme Tesir Kesiti
E_{beam}	: Sinyal Enerjisi
E_{KM}	: Kütle Merkezi Enerjisi
η	: Psüdorapidite
ϕ	: Azimuthal Açısı
θ	: Kutupsal Açısı
E_T^{miss}	: Kayıp Dik Enerji
P_T	: Dik Momentum
c	: Işık Hızı
n	: Kırılma İndisi
v	: Parçacığın Hızı
δ	: İkincil Elektron Kazancı
E^k	: Gerilimin Fonksiyonu
μ	: Kazanç

CMS HF KALORİMETRESİ İÇİN 4-ANOTLU PMT'LERİN LED ANALİZİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Aslı ARSLAN

MİMAR SİNAN GÜZEL SANATLAR ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2014

ÖZET

İleri Hadron Kalorimetresi (HF), Kompakt Müon Solenoid (CMS)'de kayıp enerji çözünürlüğü ve jet saptamaları konusunda önemli katkı sağlar. HF'de, Foto Çoğaltıcı Tüpler (PMT'ler) önemli rol oynar. PMT'ler ışık sinyalini elektrik sinyaline çevirir. HF'in elektronik kısmının incelenebilmesi için mavi LED ışığı yaygın olarak kullanılmaktadır. PMT'lerin kazanç değerlerinin belirlenmesi için yüksek yoğunluklu LED sinyali ile testler yapılmıştır. Bu tezde, dört anotlu R7600U-100-M4 tipi PMT'lerin davranışları incelenmiştir. PMT'lerin besleme gerilim değerleri 600V'dan 750V'a kadar değiştirilmiştir. Böylece yüksek gerilim altında dört anotlu PMT'lerin kazanç değerleri ve pedestal oranları incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler : CMS, HF, PMT, PMT Kazanç

Sayfa Adedi : 49 Sayfa

Tez Yöneticisi : Yrd. Doç. Dr. Ferhat ÖZOK

**4-ANODE PMTs LED ANALYSIS FOR CMS HF
CALORIMETER**

(M.Sc. Thesis)

Aslı ARSLAN

**MIMAR SINAN FINE ARTS UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

June 2014

ABSTRACT

The Hadronic Forward (HF) calorimeter improves the missing transverse energy resolution and jet detection of the Compact Muon Solenoid (CMS). In HF, the Photo Multiplier Tubes (PMTs) acts an important role. A PMT turn light signal to electrical signal. In order to examine the electrical part of HF, blue LED light was used extensively. LED signal with high intensity have been used to determine the gain values of PMTs. In this thesis, the behaviour of quad - anode Hamamatsu R7600U-100-M4 were examined. The voltage values of PMTs were changed from 600V to 750V. Thus, the gain values and pedestal levels of quad - anode PMTs were determined.

Key Words : CMS, HF, PMT, PMT Gain

Page Number : 49 Pages

Supervisor : Assist. Prof. Dr. Ferhat ÖZOK

1 GİRİŞ

Doğadaki en küçük ve en temel atomaltı parçacıkları bulmayı amaçlayan ve bunların etkileşimlerini inceleyen bilim dalına yüksek enerji fiziği adı verilir. Atomaltı parçacıkların çoğu kısa ömürlü olduğundan normal şartlar altında gözlemlenebilmeleri olanaksızdır. Bu amaçla, 1950'lerde parçacıkları ve etkileşmelerini anlayabilmek için parçacık hızlandırıcıları geliştirilmiştir. Bir parçacığı hızlandırmak demek, ona enerji yüklemek demektir. Hızlandırılmış bir parçacık, başka bir parçacıkla ya da bir hedefle çarpışarak yavaşladığında bu enerji açığa çıkar. Çarpışma sırasında meydana gelen enerjinin maddeye dönüşmesi, evrenin başlangıcı esnasında neler olduğu hakkında bize bilgi verir. Bu hızlandırıcı sistemlerinde, yüksek elektrik alan etkisi altında parçacıklar çarpıştırılmaktadır ve meydana gelen farklı parçacıklar tespit edilebilmektedir [1].

Parçacık fiziğinin Standart Model'i, yerçekimi dışında şimdiye kadar bilinen tüm parçacıkları ve temel kuvvetleri açıklayan en başarılı teoridir. Standart Model, her ne kadar hızlandırıcılarda elde edilen verileri ve içerisinde yaşadığımız evrende neler olduğunu bize çok iyi bir şekilde açıklayabilse de, bu modelin yanıtlayamadığı pek çok soru bulunmaktadır [2].

Ortaya atılan yeni teorilerin gerçekliğinin kanıtlanabilmesi için, deneysel olarak da doğrulanması gerekmektedir. Bu amaçla, çeşitli fizik araştırmaları İsviçre - Fransa sınırında kurulan Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi (CERN)'nde bulunan Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (LHC) halkasında yapılmaktadır. LHC'nin ilk amacı, tüm temel parçacıklara kütle kazandırdığı düşünülen Higgs parçacığını bulmaktır.

LHC üzerinde altı büyük deney yapılmaktadır ve bunlardan birisi Kompakt Müon Solenoid (CMS)'dir. CMS, proton - proton çarpışmaları sonucunda ortaya çıkan parçacıkların momentumlarını ve enerjilerini ölçmek için tasarlanmıştır. Parçacık fiziği dedektörlerinin bir çoğunda olduğu gibi, CMS de alt dedektörlerden oluşmuştur. Bunlardan biri, hadronik etkileşen parçacıkları tespit etmekte kullanılan hadronik kalorimetredir (HCAL). Bu kalorimetre dört bölümden oluşmaktadır. HCAL'ın dış kısmında bulunan ileri hadronik kalorimetre (HF), jet saptamaları ve dik yöndeki kayıp enerjinin çözünürlüğü konusunda önemli katkı sağlar.

HF'in arka kısmında bulunan hassas ışık dedektörleri olan foto çoğaltıcı tüpler (PMT'ler) CMS deneyinde önemli rol oynar. PMT'ler ışık sinyalini, elektrik sinyaline

dönüştürebilen aygıtlardır. PMT'lerin kazançlarının incelenmesi için Işık Yayan Diyot (LED) sinyalleri yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu tezde, 2012 yılında alınan LED verileri kullanılmıştır. HF kalorimetresinde kullanılan bir anotlu PMT'ler yerine daha düşük gerilimde daha iyi veri alınabilen dört anotlu PMT'ler tercih edilmiştir [3]. Bu PMT'ler Hamamatsu şirketi tarafından üretilen R7600U-100-M4 SEL tipi foto çoğaltıcılardır. Veri alınırken LED sinyali gönderilerek, kalorimetrede bulunan fotoçoğaltıcıların bu sinyale tepkisi incelenmiştir. PMT'lerin enerji kararlılıkları ve HF'in sorunlu kanalları tespit edilmiştir. Bu çalışmalar sırasında alınan verileri analiz edebilmek için ROOT [4] programı kullanılmıştır.

2 ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1 Parçacık Hızlandırıcıları

Parçacık hızlandırıcıları, elektron (e^-), pozitron (e^+), proton ve antiproton gibi temel yüklü parçacık demetlerinin bir amaç çerçevesinde hedeflenen enerji değerine ulaşmaya kadar dolanımlarını sağlayan aygıtlardır. Hızlandırılan parçacıkların elektrik alan etkisinde kalarak boyuna ivmelenmeleri mümkündür. Parçacık demetlerinin elektrik alan içerisindeki momentumunu, hareketini, enerji kazanımı, odaklama ve dağılma gibi durumları inceleyen bilim dalı hızlandırıcı fiziğidir [4]. Parçacık hızlandırma işlemi, doğrusal ya da dairesel yönlerde yapılabilir.

Doğrusal Hızlandırıcı: Doğrusal hızlandırıcılara kısaca " linac " (linear accelerator) denilmektedir. Bu tip hızlandırıcılar, enerji kazanım bölgeleri olan Radyo Frekans (RF) kaviteilerin bir doğru boyunca sıralandığı düzeneklerdir. Parçacıklar hızlandırıcıyı bir kez geçmektedir. Parçacıkları daha fazla hızlandırabilmek için hızlandırıcının boyunu mümkün olduğunca uzatmak gerekir [5].

Dairesel Hızlandırıcı: Parçacıklar, hızlandırıcı düzeneği istenilen yüksek enerjileri elde edinceye kadar, eğici magnetler aracılığıyla RF'lerden geçirilerek tekrar tekrar dolanırlar [2]. Her defasında enerji alarak kapalı yörüngeler izlerler. Bu tip hızlandırıcılarda, elektrik alan parçacıkları hızlandırırken, dipol magnetler ise parçacık yörüngesini dairesel biçimde bükerek merkezci kuvveti sağlarlar. Manyetik alan içerisine giren parçacık demetleri hareket yönlerine dik doğrultuda manyetik kuvvet uygulanırsa, demetler doğrusal yönlerinden saparak dairesel yörüngelerde dolanırlar.

Dairesel hızlandırıcılarda iki tip çarpışma deneyi yapılır. Birincisi sabit hedef deneyidir. Sabit hedef deneyinde, parçacık demetinin, hedef atomlarına çarptığında oluşabilecek durumlar araştırılır. Bu deneyde, üretilen parçacıklar ileriye doğru hareket ettiklerinden, genellikle koni biçiminde dedektörler kullanılır.

Diğer bir çarpışma deneyi ise çarpışan demetler deneyidir. Zıt yönlerde hızlandırılan ters yüklü iki parçacık demetlerinin yeterli enerjiye gelindiğinde çarpıştırılması deneyidir. Bu tip olaylarda, yeni üretilen parçacıklar etkileşme noktasından başlayarak bütün yönlerde ışına yaparlar. Bu nedenle, küresel veya daha genel olarak silindirik dedektörler kullanılır [6].

Dairesel hızlandırıcıların avantajı, parçacıklara doğrusal hızlandırıcılardan daha fazla enerji yüklenebilir olmasıdır. Dezavantajı ise bu yörüngelerde enerjilerinin bir kısmını radyasyon ile kaybetmesidir. Oluşan enerji kaybının miktarı halkanın eğrisinin ne kadar keskin olacağına ve parçacığın kütlesine bağlıdır. Bunun içinde, parçacık ne kadar ağır olursa ve çevresi ne kadar büyük olursa radyasyon ile enerji kaybı o kadar az olur. Bu yüzden proton ve antiproton çarpışmaları için bu tip hızlandırıcılar daha uygundur. Parçacıkların daha yüksek enerjilerde çarpışmaları, şu anda bu tür hızlandırıcılarda gerçekleşmektedir.

2.2 Büyük Hadron Çarpıştırıcısı

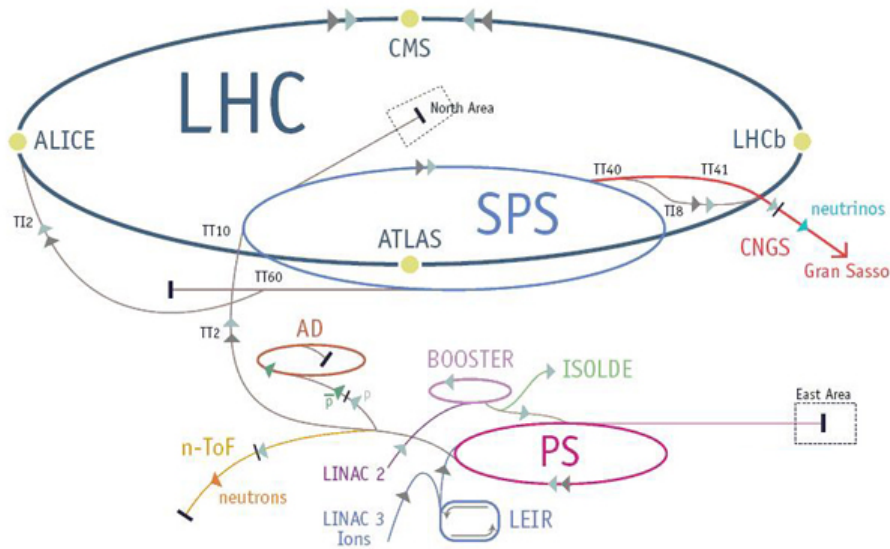
Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi anlamına gelen CERN, Fransızca *Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire* sözcüklerinin kısaltmasıdır [7]. Bu kurum, İsviçre ve Fransa sınırında yer alan dünyanın en büyük parçacık fiziği laboratuvarıdır. CERN’de en önemli bölge, yeraltındaki Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (LHC – Large Hadronic Collision) denilen parçacık hızlandırıcısının olduğu bölgedir.

LHC, yerin ortalama 100 metre altında 27 kilometrelik uzunluğa sahip dairesel bir parçacık hızlandırıcısıdır. Bu hızlandırıcı üzerinde proton – proton ve ağır iyonlar yüksek enerjilere sahip olabilecek şekilde hızlandırılmakta ve sonrasında çarpıştırılmaktadır. Çarpıştırıcı halkasında iki proton demetinin birbirine çok yakın ama zıt yönlerde dönmelerini sağlayabilmek için yüksek bir manyetik alan gerekmektedir. Böyle bir manyetik alanı oluşturabilmek için süperiletken teknolojisi kullanılmaktadır. Bu teknoloji ile malzemelerin elektrik akımını dirençsiz bir şekilde enerji kaybı olmadan iletilmesi sağlanır. Süper iletkenliği sağlayabilmek için LHC’de 1232 adet iletken dipol mıknatis 1.71 K’e kadar soğutulmaktadır. Böylece demetlerin yörüngede kalması sağlanmaktadır [8].

2.2.1 LHC’nin Enerjisi

Şekil 2.1’de görüldüğü gibi LHC için hızlandırma zinciri verilmiştir. Bu sisteme göre, protonların takip ettikleri yol şöyledir.

Linac2 → Proton Sinkroton Booster (PSB) → Proton Sinkroton (PS) → Süper Proton Sinkroton (SPS) → LHC.



Şekil 2.1: LHC halkası [9].

Protonların enerjisi ilk olarak LINAC'da (Doğrusal Hızlandırıcı) 50 MeV'e kadar hızlandırılmakta daha sonra Booster'da 1.4 GeV'e, Proton Sinkrotron'da 25 GeV'e, Süper Proton Sinkrotron'da 450 GeV enerjiye ulaşmaktadır. LHC'de son olarak proton demetleri mıknatıs arasından geçen iki ayrı vakum tüpü içerisinde yol alarak dedektörün merkezinde çarpışma gerçekleştirmektedir. Birbirine zıt yönlerde gelmekte olan proton demetleri hızlanarak bilinen dört çarpışma noktasında 25 ns'de bir çarpışacaktır. Deneyde proton demetleri LHC halkalarına öbekler halinde gönderilmektedir. Bu öbeklerin her birinde 1011 proton bulunmaktadır. Bu iki halkanın her birinde toplam öbek sayısı 2835 olacaktır. Bu durumda proton-proton çarpıştırmaları için kütle merkezi enerjisi 14 TeV iken, ışınlılık $L = 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ frekansla karşılaşacaktır. Çarpışma frekansının ise 107 – 109 Hz arasında olması beklenmektedir [10].

2.2.2 Işınlılık ve Kütle Merkezi Enerjisi

Işınlılık ve kütle merkezi enerjisi LHC deneyinde iki önemli fiziksel niceliktir. Işınlılık (L), dedektörde her saniyede ve her santimetre karede üretilen çarpışma sayısının bir ölçüsüdür. Çarpışma deneyindeki ışınlılık aşağıdaki denklem ile ifade edilir.

$$L = \frac{N_1 N_2 n_b f}{A_t^{eff}}, \quad (2.1)$$

burada,

- n_b , demetteki öbek sayısıdır.
- N_i , demet içerisindeki parçacık sayısı ($i = 1,2$)
- f , demetin dönme frekansı ve
- $A_t^{eff} = 4\pi\sigma_x\sigma_y$, silindirin parçacığın hareket yönüne dik kesit alanıdır. $\sigma_{x,y}$ ise etkileşme tesir kesitidir.

Çarpıştırıcı deneyinde, belirli bir çarpışma sırasında sinyal enerjisinde (E_{beam}) kütle merkezi enerjisi aşağıdaki gibi verilir [10].

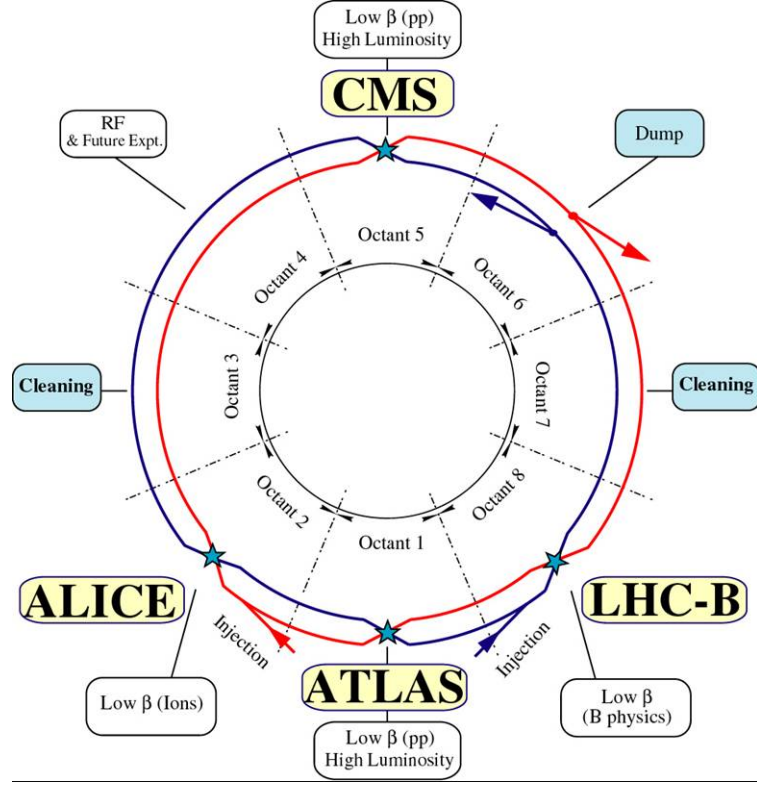
$$E_{KM} = 2E_{beam} \quad (2.2)$$

2.2.3 LHC'de Deneyler

LHC 'de altı deney yer almaktadır. Bunlardan CMS, ATLAS, ALICE ve LHCb dört ana dedektördür. Diğerlerine nispeten daha küçük iki dedektör ise TOTEM ve LHCf 'dir. LHC'nin şematik görünümü Şekil 2.2'de gösterilmiştir.

- ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS – Toroidal LHC Dedektörü) ve CMS (Compact Muon Solenoid – Kompakt Müon Solenoid) genel amaçlı fizik araştırmalarında kullanılan çok amaçlı dedektörlerdir.

CMS ve ATLAS 'ın dizaynındaki en önemli fark, CMS 'in manyetik alanın solenoidal yapıda ve ATLAS'ın ise toroidal yapıda dizayn edilmiş olmasıdır. Bu dedektörler değişik dedektör teknolojisiyle dizayn edilmiş olmasına rağmen aynı amaç için kullanılmaktadır.



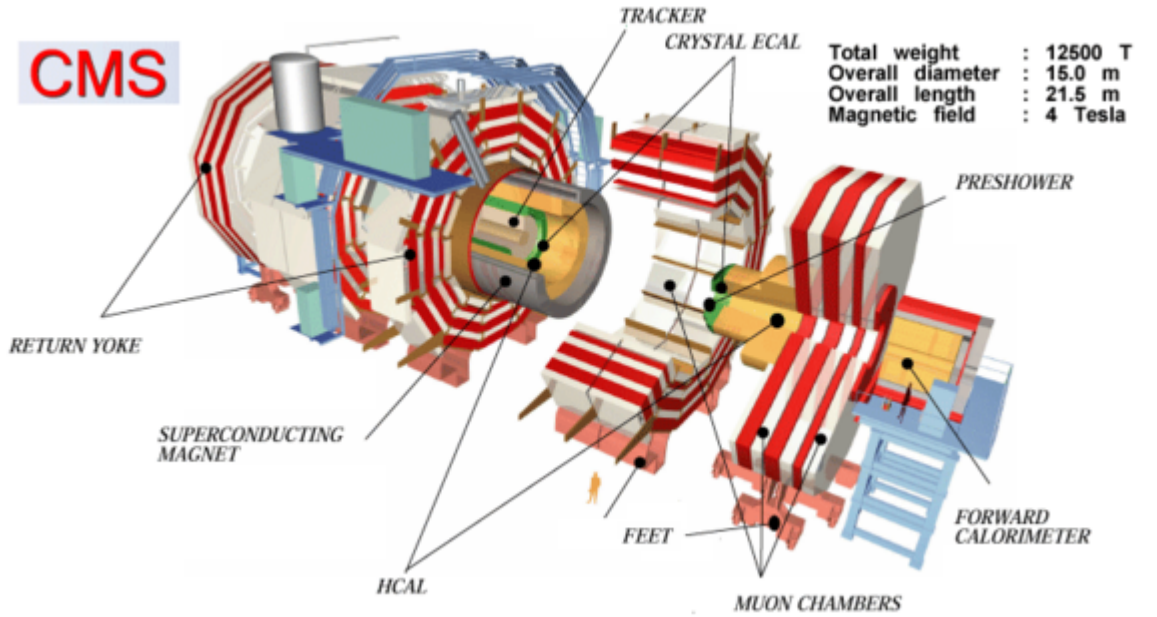
Şekil 2.2: LHC'nin şematik gösterimi [11].

- ALICE (A Large Ion Collider Experiment – Ağır İyon Çarpıştırma Deneyi) ve LHCb (Large Hadron Collider beauty - Büyük Hadron Çarpıştırıcı b Fiziği Deneyi) ise daha özel amaçlı deneylerdir. ALICE [12] deneyinin amacı, evrenin ilk mikrosaniyelerinde çok yüksek enerji yoğunluklarında ortaya çıkması beklenen çorba diye adlandırılan kuark – gluon plazma yapısını incelemeyi hedeflemektedir. LHCb [13] dedektörü ise b kuark (beauty quark) araştırmaları yapan LHC dedektörlerinden biridir. Bu deneyin amacı, evrendeki madde antimadde asimetresini araştırmaktır.
- TOTEM (Total cross section Elastic scattering and diffraction dissociation Measurement at the LHC - Toplam Kesit, Elastik Saçılma ve Kırınım Ayrılma Deneyi) [14] deneyi, proton yapısını daha iyi anlamak için, proton – proton etkileşim tesir kesitinin hassas ölçümünü yapmaktadır.
- LHCf [15] (Large Hadron Collider Forward - İleri Büyük Hadron Çarpıştırıcı) deneyi, kozmik ışınları incelemek adına tasarlanmıştır. Çarpışmadaki enerjiyi ve nötr atom sayısını ölçmektedir.

3 CMS

CMS (Compact Muon Solenoid) dedektörü, birçok katmandan oluşan ve herbiri belirli bir amaç için tasarlanmış olan büyük bir dedektördür. LHC’de bulunan proton - proton çarpışmaları sırasında oluşabilecek bütün parçacıkların kimliklerinin belirlenmesini, enerji ve momentumlarını hassas bir şekilde ölçebilmek için tasarlanmıştır.

Higgs bozonunu deneysel olarak gözlemlemek ve süper simetrik parçacıkları bulabilmek CMS dedektörünün temel amacıdır. Aynı zamanda karanlık enerji ve karanlık madde problemleri, madde-antimadde asimetrisi de araştırılacak diğer konular arasında yer almaktadır [16].



Şekil 3.1: CMS'in genel görünümü [17].

3.1 Yapısı ve Koordinat Sistemi

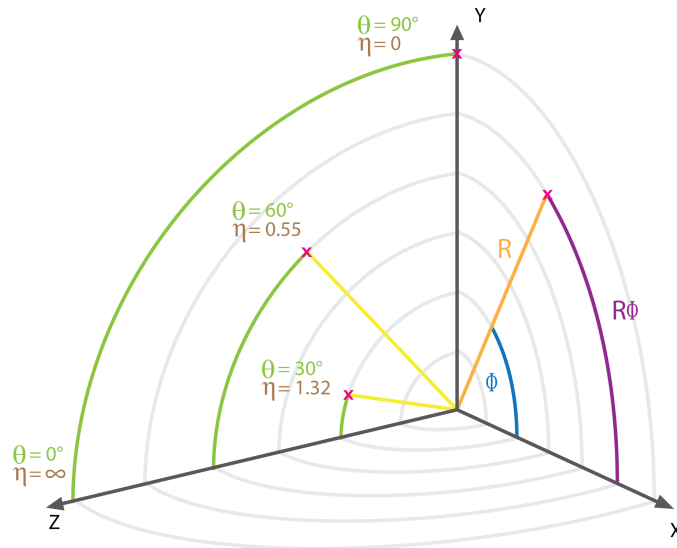
CMS dedektörü silindirik bir yapıya sahiptir. Şekil 3.1’de görüldüğü gibi, uzunluğu 21.5 m, çapı 15 m ve ağırlığı 12500 tondur. CMS’in merkezinde, 13 m uzunluğunda ve 5.9 m iç yarıçapında 3.8 T’lık süper iletken mıknatıs bulunmaktadır.

CMS tarafından belirlenen referans çerçevesine göre, dedektörün merkezi etkileşme veya çarpışma noktası olarak kabul edilir. Şekil 3.2’de CMS koordinat sistemi gösterilmiştir. Bu koordinat sistemine göre, çarpışma noktası orjin olarak belirlenir.

- X - eksenini radyal olarak çarpıştırıcının merkezine doğru,
- Y - eksenini başlangıç noktasından yukarıya doğru,
- Z - eksenini ise demet doğrultusundadır.

Azimuthal açı ϕ , x-y düzlemindeki X ekseninden ölçülmektedir. Kutupsal açı θ ise Z - ekseninden ölçülmektedir. Genellikle kutup açısı yerine psüdorapidite (η) kullanılmaktadır ve η denklemi aşağıda verilmektedir [18].

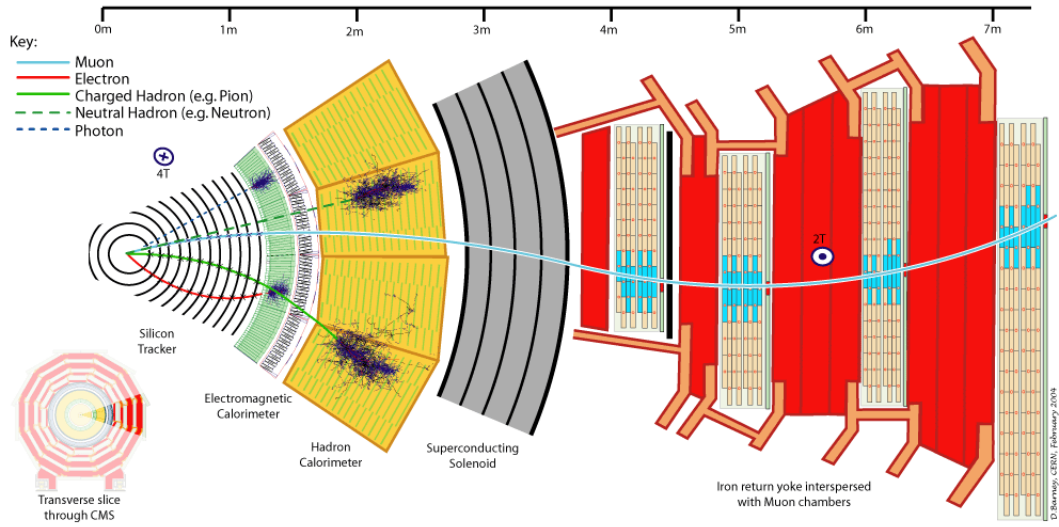
$$\eta = -\ln\left[\tan\frac{\theta}{2}\right] \quad (3.1)$$



Şekil 3.2: CMS koordinat sistemi [19].

3.2 CMS'in Alt Dedektörleri

CMS dedektörü en dıştan içe doğru dört alt sistemden oluşmaktadır. En iç kısmında, çarpışmada meydana gelen yüklü parçacıkların izlerini tespit etmek için iz dedektörü bulunur. Sonrasında, fotonların ve elektronların enerjilerini ölçen elektromanyetik kalorimetre, onun dışında proton, nötron ve pion gibi hadronik parçacıkların enerjilerini ölçen bir hadron kalorimetresi ve en dışta müonların enerjilerini ölçmek için müon odacıkları bulunmaktadır [16]. Şekil 3.3'de CMS dedektöründe parçacıkların sahip oldukları iz ve yörüngeler gösterilmiştir.

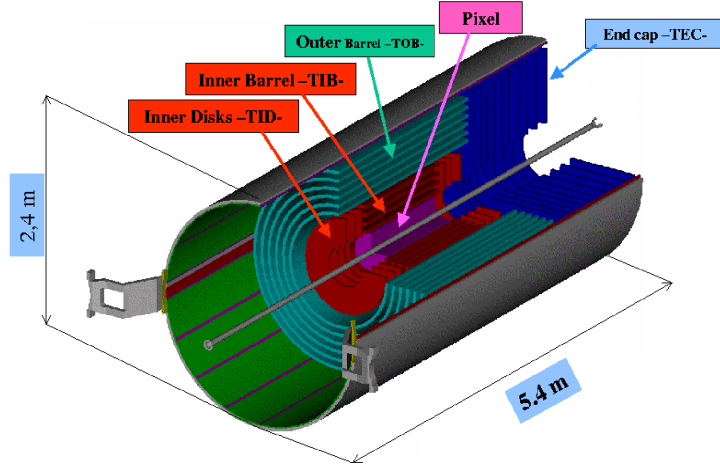


Şekil 3.3: CMS Dedektörünün Enine Kesiti [20].

3.2.1 İz Dedektörü

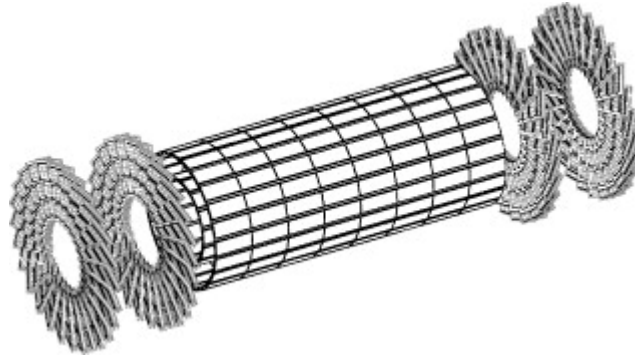
CMS dedektörü güçlü bir izleme sistemine sahiptir. Bu sistem, proton-proton çarpışmaları sırasında ortaya çıkacak olan parçacıkların dedektörde ilk geleceği bölgeye yerleştirilmiştir. Bu dedektör, oluşan yüklü parçacıkların enerjilerinin bir kısmını iyonizasyonla kaybettirerek parçacıkların momentumlarını ölçer, yükünü ve yörüngesini belirler [15].

İz dedektörü $-2.5 < |\eta| < 2.5$ psüdo-rapidity aralığında yer alır. Ayrıca bu sistem Şekil 3.4'de görüldüğü gibi 5.4 m uzunluğunda ve 2.4 m çapında olan silindirik bir yapıdadır. 3.8 T'lık manyetik alan içerisinde bulunan bu yapı, parçacıkların bıraktıkları izleri belirler. Bu manyetik alan sayesinde, parçacıkların yörüngeleri dairesel olarak bükülür ve bu bükülme yönü de parçacığın yük işaretinin belirlenmesini sağlar. Yörünge yarıçapı ise parçacığın momentumunu belirler. İz dedektörünün etkileşim noktasına en yakın elemanı piksel dedektörleridir.



Şekil 3.4: İz dedektör sisteminin şematik görünümü [21].

Bu dedektörler yüksek çözünürlüğe sahiptir ve bu özelliklerinden dolayı parçacıkların vuruş parametrelerinin, yapısında b-kuark bulunan hadronların bozunmasıyla oluşabilecek etkileşim noktalarının tespit edilmesini sağlar [16].



Şekil 3.5: Pixel dedektörünün şematik görünümü [22]

Piksel dedektörleri 53 cm uzunluğundadır ve etkileşme noktasına yakın olan fiçi bölgesinde 4.4 cm, 7.3cm ve 10.2 cm yarıçaplarında üç katmanlı tabakadan oluşmuştur [22]. İz dedektörünün ara bölgesinde ise silikon şerit dedektörleri bulunur. Dedektör, iç kısmında dört fiçi tabaka ve üç ileri diskten oluşur. Dış kısmında ise altı fiçi tabaka ve dokuz disk bulunmaktadır. Bu dedektör, piksel dedektörü ile birlikte parçacıkların tüm izleri için momentum ölçümlerinde kullanılacaktır.

3.2.2 Elektromanyetik Kalorimetre

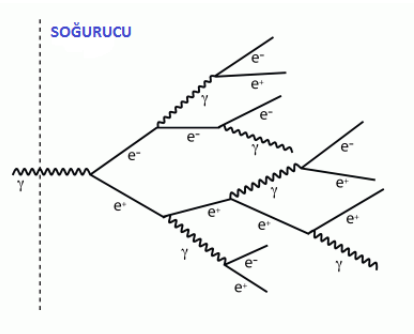
Elektromanyetik kalorimetre (ECAL), yüksek çözünürlüklü kurşun - tungsten ($PbWO_4$) kristalinden oluşmaktadır. ECAL, hermitik ve homojen bir yapıdadır. Merkezi fiçi kısmında yaklaşık olarak 61200 adet kurşun - tungsten ve iki kapak

kısımında ise 7324 adet kristal bulunmaktadır. Kalorimetre yüksek radyasyonlu bölge içerisinde olduğundan dolayı kullanılan malzemeler radyasyona karşı dayanıklıdır. Bu kalorimetre; elektronların, pozitronların ve fotonların taşıdıkları enerjileri ölçmek ve ayırt etmek için tasarlanmıştır.



Şekil 3.6: Elektromanyetik kalorimetre cam gibi şeffaf fakat demirden daha ağır olan kurşun tungsten kristallerinden oluşmuştur [23].

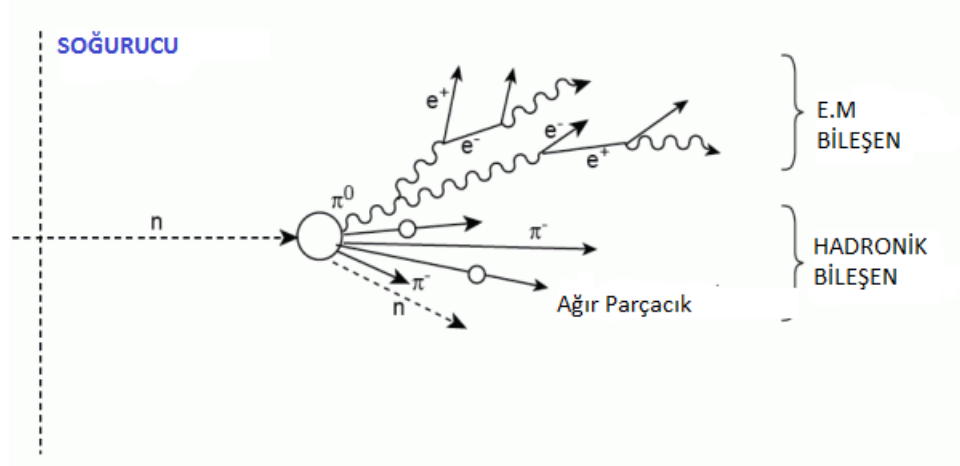
Elektromanyetik kalorimetre içerisine giren yüksek enerjili elektronlar ve fotonlar ortamın atom çekirdeği ile elektromanyetik bir etkileşime yaparak yüksek enerjili fotonları üretirler. Bu fotonlar atom çekirdeğinin Coloumb alanından etkilenir ve tekrar elektron - pozitron çiftleri üretirler. Sonuç olarak, bu olayların tekrarlanması elektromanyetik duşa (shower) dönüşür. Şekil 3.1’de elektromanyetik duş diagramı gösterilmiştir. Oluşan bu duş içerisinde düşük enerjili elektronlar ve pozitronlar kristal içerisinde ışıldamalar (scintillation) meydana getirirler. Bu ışıldamalar ya da ışık sinyalleri fotodedektörler tarafından tespit edilir ve toplanır [24].



Şekil 3.7: Elektromanyetik duş diagramı [22].

3.2.3 Hadronik Kalorimetre

Hadronik kalorimetre, manyetik halka içerisinde bulunan son dedektördür. Hadronik kalorimetreler, çarpışmadan sonraki hadronların enerjilerini ölçmek için tasarlanmıştır. Elektromanyetik kalorimetrede oluşan duşa kıyasla hadronik kalorimetredeki duş daha karmaşıktır. Bu durum, inelastik hadronik etkileşmeler sonucu çeşitli parçacıkların duş oluşturmasından kaynaklanır. Şekil 3.8'de hadronik duş diagramı gösterilmiştir.

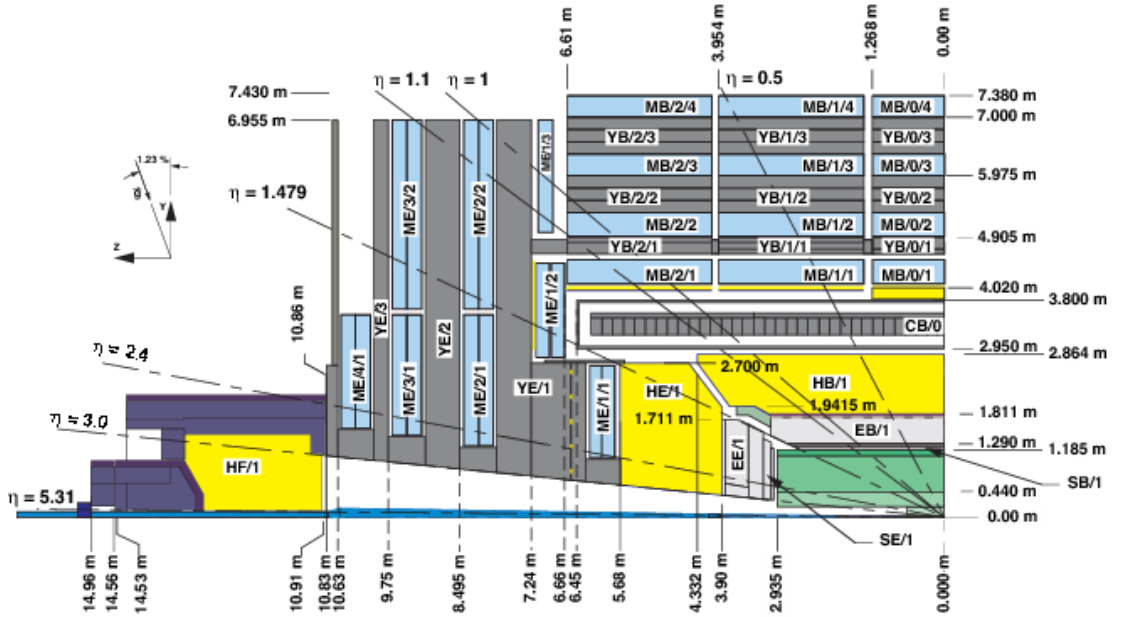


Şekil 3.8: Hadronik duş diagramı [22].

Hadronik kalorimetre, ECAL ile birlikte jetlerin yönünü ve enerjilerini ölçmek için kullanılır. Aynı zamanda kayıp dik enerjinin ölçümünü de saptamak amacıyla kullanılır. Bu ölçümler süpersimetrik parçacıkların ve Higgs bozonlarının keşfinde önemli rol oynamaktadır. HCAL; hadronik fiç (HB), hadronik kapak (HE), hadronik dış (HO) ve ileri hadron (HF) olmak üzere dört alt dedektörden oluşmaktadır. HO, HB ve HE alt dedektörleri $|\eta| \leq 3.0$ psüdorapite aralığını, (HF) ileri kalorimetresi $3 < |\eta| < 5$ psüdorapite aralığını kapsamaktadır. HCAL izdüşümsel geometrisini oluşturmak için kalorimetre; η (eta) ve ϕ (phi) 'den oluşan kuleler meydana getirmiştir. Bu kuleler de sektörleri oluşturmaktadır.

4 CMS - HADRONİK KALORİMETRE

Bir önceki bölümde bahsettiğimiz gibi, hadronik kalorimetre hadronların ve jetlerin ölçümü için tasarlanmıştır [16]. Bu kalorimetre; HB, HE, HO ve HF olmak üzere dört dedektörden oluşmaktadır. HB ve HE alt dedektörleri ECAL'ı tam olarak sarmaktadır. Etkileşme noktasından itibaren elektromanyetik kalorimetre ve müon sistemi arasına yerleştirilmiştir. Fıçı kısmında $|\eta| < 1.4$ değerindedir ve kapak kısmında ise $1.3 < |\eta| < 3.0$ psüdo-rapidity aralığındadır. HO, HB'yi saran solenoidin dışına yerleştirilmiştir ve $|\eta| < 1.3$ psüdo-rapidity aralığını kapsamaktadır. HF kalorimetresi, etkileşme noktasından 11.2 m uzaklıkta bulunmaktadır ve $3.0 < |\eta| < 5.0$ aralığını kapsamaktadır.

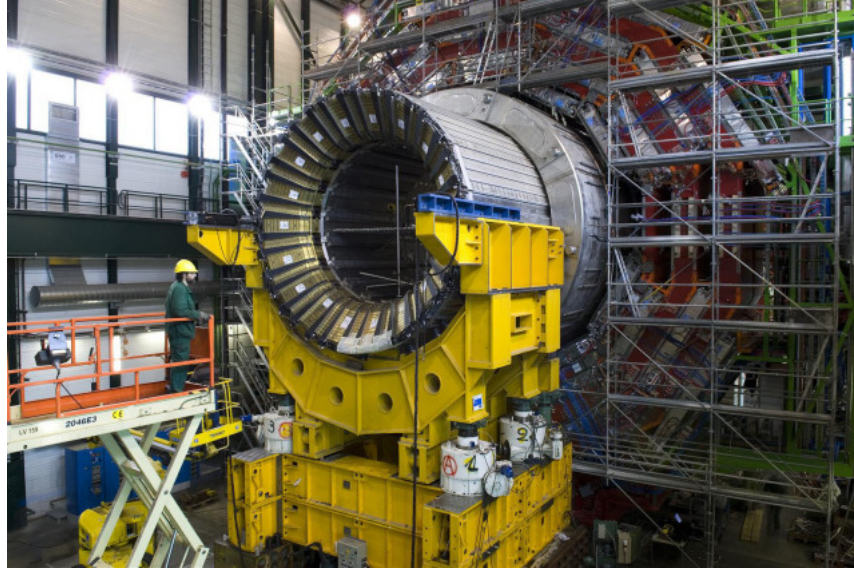


Şekil 4.1: CMS dedektörünün şematik görünümü. Üst kısım: Dedektörün dörtte birinin boyuna görünümü. Alt kısım: z=0'da enine görünümü [25].

4.1 Hadronik Fıçı (HB)

Hadronik fıçı kalorimetresi $|\eta| < 1.4$ psüdo-rapidity aralığını kapsamaktadır. Bu kalorimetreyi daha sağlam bir yapı haline getirmek için, kalorimetrenin iç ve dış

katmanında çelik kullanılmıştır. Hadronik fiçıda soğurucu malzeme olarak pirinç alaşımı kullanılmıştır. HB’de bulunan soğurucu tabakanın yüzde 70’i bakır, yüzde 30’u çinkodur ve yoğunluğu 8.83 g/cm^3 ’dür [16]. Çelik levha ile pirinç levhalar arasında 17 tane plastik sintilatör katman yer almaktadır.



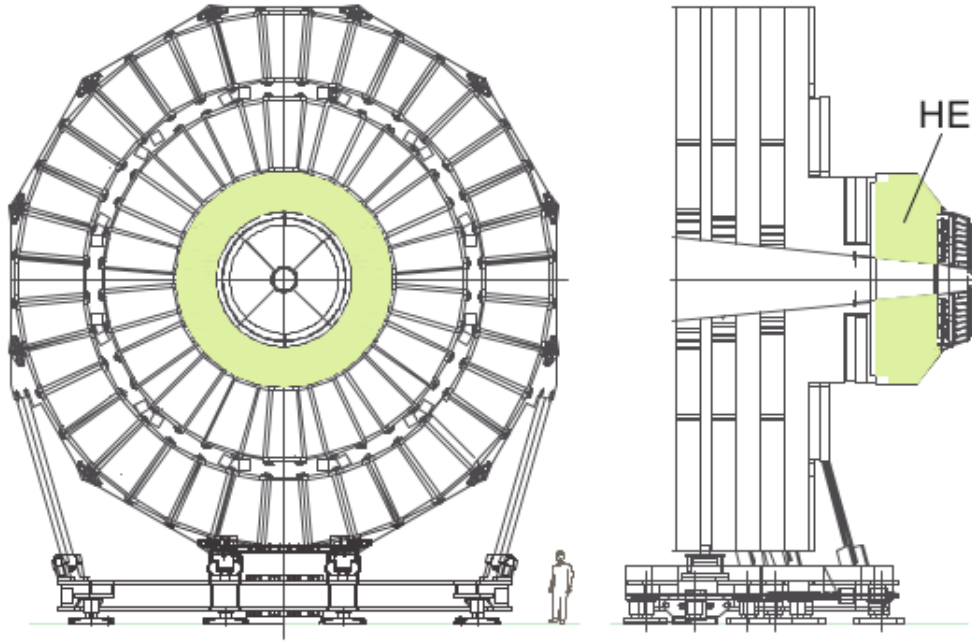
Şekil 4.2: Hadronik Fiçı dedektörünün görünümü [26].

HB, HB (+) ve HB (-) olmak üzere iki yarım fiçıdan oluşmuştur. $\Delta\phi= 20^\circ$ ’lik eşit açılı 18’er tane kama bulunmaktadır. Bu kamaların her biri $\Delta\varphi= 5^\circ$ ’lik açığa sahip olup, 16 kuleden oluşmuştur ve 4 sektöre ayrılmıştır. Toplamda 72 adet okuma kanalına sahiptir. Okuma üniteleri (RBX) içerisinde bulunan hibrit foto diyotlar (HPD), hadronik kalorimetreden gelen sinyalleri okumaktadır.

4.2 Hadronik Kapak (HE)

Hadronik kapak kalorimetresi $1.3 < |\eta| < 3.0$ psüdorapidite aralığındadır. HE, HB kalorimetresine çok benzeyen bir kalorimetredir. Tıpkı HB’de olduğu gibi HE kalorimetresi de pirinç soğurucu katmandan oluşmuştur ve her katmanda da 19 adet sintilatör bulunmaktadır.

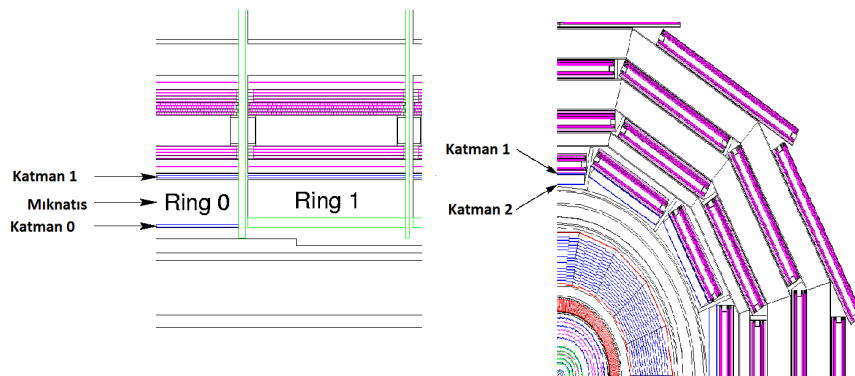
Parçacıklar sintilatörlerle etkileşerek sinyal oluştururlar. Bu sinyaller, dalga boyu kaydırıcı (WLS) fiberleri ile uygun dalgaboyuna getirilirler ve daha sonra da HPD’ler tarafından dijital sinyale çevrilirler. HE, HE (+) ve HE (-) olmak üzere iki ayrı kapaktan oluşmuştur. HE’nin her iki sektöründe de sintilatör tabakası bulunmaktadır.



Şekil 4.3: Hadronik Kapak dedektörünün şematik görünümü [27].

4.3 Hadronik Dış Kalorimetre (HO)

Hadronik dış kalorimetre $|\eta| < 1.3$ psüdrapidite aralığında yer almaktadır. Hadronik duşların tamamını durdurabilmek için elektromanyetik fiçı ve hadronik kalorimetre mıknatısın dışında bulunmaktadır [16]. Bu kısma da hadronik dış kalorimetre adı verilmiştir. HB'den sonra kalorimetrede depolanan enerjiyi ölçmek için tasarlanmıştır. HO; -2, -1, 0, 1 ve 2 olmak üzere 5 kısımdan oluşmuştur [27]. HO; ± 1 , ± 2 halkalarında bir katman sintilatör tabakadan, 0 halkasında ise iki katman sintilatör tabakadan oluşmuştur.



Şekil 4.4: CMS dedektörünün enine ve boyuna kesitlerinde HO katmanlarının konumları [27].

5 İLERİ HADRONİK KALORİMETRE

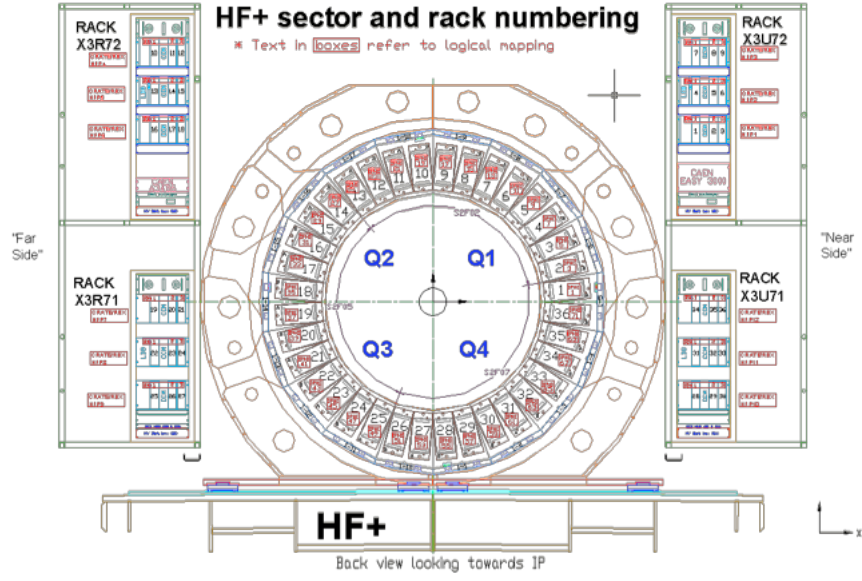
İleri kalorimetre, hadronik kalorimetrenin bir alt dedektörüdür. HF kalorimetresinin psüdorapidite aralığı $3.0 < |\eta| < 5.0$ 'dir. Bu aralık hüzmeye ekseni ile 0.58° ile 5.70° 'lik açılar yapan bölgeyi kapsamaktadır. CMS'in her alt dedektörünün farklı bir amacı olduğu gibi HF'inde iki önemli amacı vardır ve bu amaçlar sırasıyla,

- 1- Kayıp dik enerji (E_T^{miss}) ölçümünün yapılması,
- 2- İleri bölgeye giren yüksek enerjili jetleri belirlemektir.

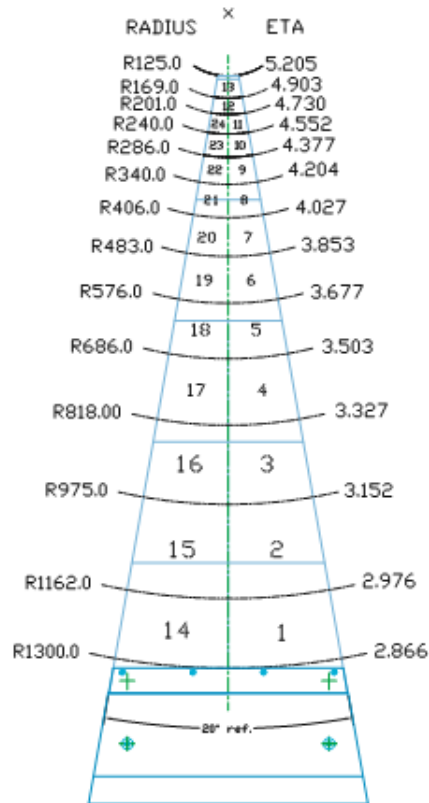
HF, başta higgs parçacığının keşfi olmak üzere, süper simetrik parçacıkların araştırmaları ve birçok önemli fizik konusuna katkıda bulunan bir dedektördür [28].

5.1 Tasarım

HF kalorimetresi silindirik bir yapıya sahiptir. HF(+) ve HF(-) olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Etkileşme noktasından ± 11.2 metre uzağa yerleştirilmiştir. Her bir kısmın uzunluğu 1.65 m ve yarıçapı 1.4 metredir. HF'in her bir kısmında 20° 'lik 18 kama bulunmaktadır [29]. Her bir kama aynı zamanda 10° 'lik açılara bölünmüş olup, toplamda 2 sektörden ve 24 kuleden oluşmuştur. Şekil 5.1'de HF sektörünün çeyrek kısımları görülmektedir. Bu çeyreklerin her biri RACK denilen elektronik kısımların bulunduğu kutulara yerleştirilmiştir.



Şekil 5.1: HF(+) sektörünün çeyrek kısımlarının görünümü.



Şekil 5.2: HF'in kama yapısı [26].

LHC çalışmaya başladığından beri dedektör, yüksek enerjilerde ($\cong 14 \text{ TeV}$) ve yüksek ışınılıktta ($\cong 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) her yıl 100 Mrad civarında radyasyona maruz kalacaktır ve 10 yılda bu radyasyon miktarının $\eta=5$ bölgesinde 1 Grad olabileceği tahmin edilmektedir [28].

Aşırı radyasyona maruz kalan HF kalorimetresinin verimli çalışabilmesi için soğurucular çelikten yapılmıştır ve bu çelik soğurucuların içerisine fiberler gömülmüştür. HF için fiberlerin radyasyona dayanıklı olması çok önemlidir. Çünkü, doz miktarı arttıkça fiberlerin ışık iletimleri sırasında meydana gelen değişiklikler ölçümler için oldukça etkilidir.



Şekil 5.3: Kuvars fiber demetlerinin görünümü [32].

HF kalorimetresinin içerisinde uzun ve kısa olmak üzere iki tip fiber bulunur. 1.65 metre uzunluğundaki uzun fiberler elektromanyetik kısmı oluştururlar. Bu kısım elektron ve foton gibi elektromanyetik etkileşen parçacıkların enerjilerinin ölçülmesini sağlar. Kısa olan fiberler ise 1.43 metre uzunluğuna sahip olup dedektörün hadronik kısmını oluştururlar [30].

Hadronik ve elektromanyetik bölümler birlikte hadronların enerjilerinin ölçülmesini sağlarlar ve aynı zamanda elektromanyetik etkileşen parçacıkları hadronlardan ayırmaya yararlar. HF dedektörünün içerisinde Cherenkov ışınımı prensibi kullanılır.

5.1.1 Cherenkov Işıması

Yüklü bir parçacığın hızı genelde ışık hızından (c) daha küçük bir hızla hareket eder. Kırılma indisi n olan bir ortamda ışığın hızı c/n olacaktır. Bir parçacığın hızı (βc), ışığın ortamdaki hızından daha büyük olursa, Cherenkov radyasyonu yayınlanır. Yüklü parçacıklar ortamdan geçerken, izledikleri yol üzerindeki atomları polarize ederler. Böylelikle bu atomlar elektrik dipollerini oluştururlar. Bu durumda zamana bağlı olarak dipol alanının değişimleri elektromanyetik bir radyasyon yayılmasına sebep olur [33].

Işığın ortamdaki hızı c/n , parçacığın hızı $v = \beta c$ olmak üzere,

$$\cos \theta_c = \frac{c}{n\beta c} = \frac{1}{n\beta} \quad (5.1)$$

- $v < c/n$ olduğu sürece, dipol dağılımları simetriktir. Parçacık yolu üzerindeki tüm dipollerin toplamı sıfır olacaktır.
- Parçacık $v > c/n$ hızı ile ilerlerse, dipol dağılımı asimetric olur. Bu durumda dipol momentlerinin toplamı sıfır olmayacaktır ve Cherenkov radyasyonu yayınlanacaktır.

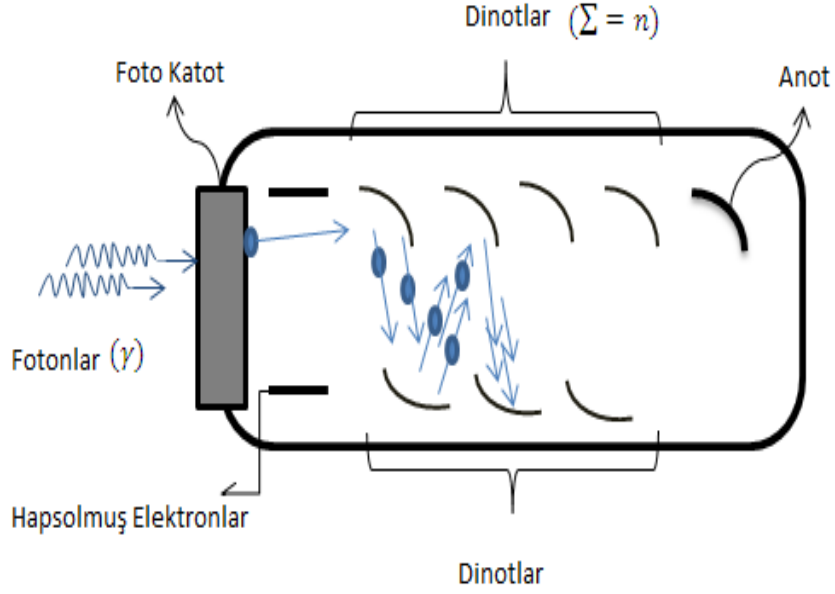
5.2 HF Çalışma Prensibi

Dedektöre çarpan parçacıklar çelik soğurucu ile etkileşerek ikincil parçacıkları oluştururlar. Oluşan bu parçacıklar yeterli enerjiye sahip olduklarında tekrar etkileşerek yeni parçacıkların oluşmasını sağlarlar. Bu işlem oluşan parçacıkların enerjilerinin, yeni parçacıkların oluşmasına yetmeyeceği duruma kadar devam eder. Bu şekilde birçok parçacık oluşturma durumuna düş (shower) adı verilir [24]. Parçacıkların olay içerisinde etkileşme durumu, düşün tipini belirler. Eğer parçacıklar elektromanyetik bir etkileşmede bulunmuşlar ise elektromanyetik düş meydana gelir. Bu olay hadronik bir etkileşme ise hadronik düş oluşumu meydana gelir.

Bu olay esnasında fiberler içerisinde geçen parçacıkların hızı ışıktan daha hızlı ilerliyorsa ($v/c > 1/n$) parçacıklar Cherenkov ışması yaparlar. Cherenkov ışmasında tam yansıma sağlayan ışınlar, fiberler içerisinde tam yansıma yaparak PMT'lere ulaşırlar. Şekil 5.3'de de görüldüğü gibi, fiberler demetler haline getirilerek dedektörün arka kısmında birleştirilmiştir ve sinyal buradaki fiberler ile PMT'lere iletilerek ayrı ayrı okuma bilgisi alınması amaçlanmıştır. PMT'ler, radyasyonun daha az olduğu kalorimetrenin dış kısmındaki ROBOX adı verilen kutulara yerleştirilmiştir. HF, 18 kanaldan oluşmaktadır ve her bir kanalda 48 PMT bulunmaktadır. Toplamda bu kalorimetre için 1728 PMT kullanılır. Yedek olanlar ile birlikte PMT sayısı 2000 tüpe kadar çıkabilmektedir [28]. HF kalorimetresinde başarılı sonuçlar alabilmek için foto tüplerin kalitesi ve karakteristiği önemlidir.

5.3 Foto Çoğaltıcı Tüpler

Foto çoğaltıcı tüpler, bir foton sinyalini elektrik sinyaline dönüştüren son derece hassas elektron tüpü cihazlarıdır. Tipik bir PMT, genellikle kapalı bir tüp içerisinde giriş penceresi, bir foto katot, bir elektron çoğaltıcı (diyotlar) ve bir anottan (toplayıcı) oluşur [34]. Foto çoğaltıcının şematik yapısı Şekil 5.4’de gösterilmiştir.



Şekil 5.4: Foto çoğaltıcı tüpün şematik görünümü [30].

Bir foto çoğaltıcı tüp içerisine giren ışık aşağıda belirtilen aşamalardan geçerek bir çıkış sinyali oluşturur.

- 1- İlk olarak, ışık giriş penceresinden geçer.
- 2- Daha sonra, ışık foto katot içindeki elektronları uyarır ve dış fotoelektrik etkisi ile salınan foto elektronlar tüp içerisine yayılır.
- 3- Foto elektronlar odaklayıcı foto katot yardımıyla, birincil diyota doğru hızlandırılır ve odaklanır, diyota çarpan elektronlarda yeni elektronların yani ikincil elektronların yayılmasına sebep olur. Bu ikincil yayılım ardışık olarak her bir diyotta tekrarlanır.
- 4- Son diyota çarparak yayılan ikincil elektronlar son olarak anot tarafından toplanır.

Foto Katot: Havaşı boşaltılmış bir tüp içerisinde (pozitif yüklü) bir anot ve bir katot (negatif yüklü) bulunarak fotoelektrik olayı oluştururlar. Katot ve anodu iki elektrot olarak düşünürsek, elektrotlar arasından akım geçmez. Eğer ki, katot üzerine yeterince ışık (foton) düşürülürse, foto katoda çarpan ışık anotta bulunan elektronların enerji düzeyini artırır.

Bununla birlikte elektronun foto katottan kurtularak anota doğru hareket etmesini sağlar. Böylece, katot ile anot arasında bir devre oluşur ve akım karşı tarafa geçer. Bu olaya fotoelektrik olay denir.

Fotoelektrik olay genel olarak iki şekilde sınıflandırılır. Dış fotoelektrik olay : Foto elektronlar bir materyalden boşluğa yayılır. İç Fotoelektrik olay : Foto elektronlar bir materyalden iletim bandına yayılır.

Elektron Yörüngesi : Foto elektronları ve ikincil elektronları bir diyot üzerinde toplayabilmek için ve ayrıca yayılan elektronun geçiş süresini minimuma indirebilmek için, elektronlar yörünge analizi ile uygun hale getirilmelidir. Bir PMT içerisindeki elektronların hareketi, elektrotların (anot ve katot) yeri ve elektrotlara uygulanan gerilimin belirlediği elektrik alanına bağlıdır.

Elektron Çoğaltıcı : Bir PMT'nin potansiyel dağıtım ve elektrot yapısı optimum performans sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Foto katottan yayılan foto elektronların yörüngeleri gözönüne alınırsa, foto elektronlar ilk diyottan son diyota kadar çoğaltılır ve akımın artması ile elektron sayısı 10^7 'den 10^8 'e kadar değişir. Sonuç olarak, elektronlar anota gönderilir.

Anot : Foto çoğaltıcı tüpün anodu, çok aşamalı diyottan oluşan ikincil elektronların toplandığı ve dış sisteme akım olarak aktarıldığı bir elektrottur. Anotun tasarımındaki en önemli faktörlerden biri, boşluk - yük etkileşimlerinin engellenmesi ve büyük bir çıkış akımı elde edebilmek için anot ile son diyot arasında yeterli potansiyel farkının oluşturulmasıdır.

5.3.1 Kazanç Hesabı

PMT'deki diyot - elektron çoğaltma sistemini gözönünde bulundurursak, foto katottan yayılan elektronlar diğer diyotlara çarparak elektron çoğaltmalarını sağlayacaktır. Fakat, bu çoğaltma esnasında belirli yörüngelerden sapan elektronlar çoğaltma işlemine dahil olmazlar. Bu nedenle, genellikle foto katottan yayımlanan elektronların ilk diyotun etkin alanına ulaşma ihtimaline toplama verimliliği denir. Toplama verimliliği α ile gösterilir. En etkin alan ilk diyot alanıdır. İkincil diyot yada sonraki diyotların çoğaltmaya katkısı olmayan ikincil elektronları vardır. Ancak bunların toplama verimliliğine etkileri azdır. Bu yüzden ilk diyottaki toplama verimliliği önemlidir. Sonuç olarak, katot ile ilk diyot arasında uygulanan gerilimin bir fonksiyonudur [34].

İkincil yayılım oranı δ 'dır. δ , ardışık sıralanmış diyotlar arasındaki V gerilimin bir fonksiyonudur. Aşağıdaki denklem ile gösterilmiştir [34].

$$\delta = aV^k \quad (5.2)$$

Burada a sabit ve k ise diyotun yapıldığı malzemeye bağlı olarak 0.7 veya 0.8 arasında değişen bir değerdir.

Foto katottan yayılan foto elektron akımı I_k , ilk diyottan yayımlanan ikincil elektronların akımı I_d 'dir. Bu noktada, ikincil yayılımın oranı ilk diyotta şöyle verilir.

$$\delta_1 = \frac{I_{d1}}{I_k} \quad (5.3)$$

Bu elektronlar[33] ilk diyot \rightarrow ikinci diyot \rightarrow üçüncü diyot \rightarrow \rightarrow n. diyota kadar süren bir süreç içerisinde bir duş oluşturur. n. durumdaki ikincil yayılım oranı δ_n ;

$$\delta_n = \frac{I_{dn}}{I_{d(n-1)}} \quad (5.4)$$

Anot akımı I_p ise,

$$I_p = I_k \alpha \delta_1 \delta_2 \dots \delta_n \quad (5.5)$$

$$\frac{I_p}{I_k} = \alpha \delta_1 \delta_2 \dots \delta_n \quad (5.6)$$

Denklemdaki α , elektron toplama verimliliğidir. $\alpha \delta_1 \delta_2 \dots \delta_n$ 'nin sonucu μ kazanç değeridir. Aşağıdaki denklem ile gösterilir.

$$\mu = \alpha \delta_1 \delta_2 \dots \delta_n \quad (5.7)$$

Buna göre, $\alpha=1$ ve diyot katman sayısı n olan foto çoğaltıcı tüpler için kazanç değeri eşit dağılımlı bir paylaştırıcının kullanılmasıyla uygulanan gerilime bağlı olarak şöyle değişir;

$$\mu = \delta^n = (aV^k)^n = a^n \left(\frac{V}{n+1} \right)^{kn} = AV^{kn} \quad (5.8)$$

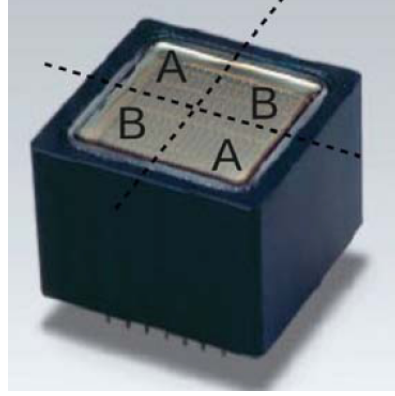
Kazanç (μ), gerilimin exponansiyel olarak kn kuvveti ile orantılıdır.

5.4 Dört Anotlu PMT'ler

2013 upgrade (yükseltme) çalışmalarında, PMT'lerin foto katot camına vuran yüklü parçacıkların oluşturduğu, Cherenkov ışınması sonucu oluşan gürültü ile başa çıkabilmek ve sinyal analizlerine olan etkiyi en aza indirebilmek için yeni dört anotlu PMT'ler seçilmiştir. PMT'lerin camlarına çarpan ortalığa saçılmış durumdaki parçacıklar, ayıklanması güç olan yüksek enerjili ölçümlere sebep olmaktadır. Bu problemi azaltabilmek için, CMS HF dedektöründeki PMT'ler daha iyi performans sağlayabilecek yeni modelleri ile değiştirilecektir.

Japon Hamamatsu şirketi tarafından üretilen eski R7525HA tip PMT'lerin yerine, yeni R7600U-100-M4 tip PMT'ler seçilmiştir [3].

Yeni PMT'ler, eski PMT'ler ile karşılaştırıldığında önemli ölçüde farklıdır. Yeni PMT'lerde bir pencere vardır ve foto katot dört parçaya ayrılmıştır. Her parçasında diyotlar ve çıkış kanalları bulunur. Parçalara bölünmüş olmasının yanı sıra, pencere 1 mm'den daha ince ve eski PMT'ye oranla daha küçüktür.



(a) Hamamatsu R7600-100-M4



(b) Hamamatsu R7525HA

Şekil 5.5: Yeni ve eski HF PMT'leri [36].

Eski PMT'ler; bir anotlu, tek kanallı, kalın, silindirik yüzeyli, yüzeyi küçük PMT'lerdir. Yeni PMT'ler ise; 4 kanallı, ince, geniş yüzeyli, kazancı yüksek PMT'lerdir. Yeni PMT'ler, pencere olaylarını donanım seviyesinde belirlemeyi mümkün kılar. Eski PMT'lerde gerçek sinyaller ve sahte sinyaller tek bir anotta gözlenirken, yeni tip PMT'lerde sahte sinyaller yalnız bir anotta görülür, ancak gerçek sinyaller tüm anotlarda gözlenmektedir [35]. Eski PMT'lere sabit 1250V yüksek gerilim uygulanırken, yeni dört anotlu PMT'lere çalışma prensibinden dolayı en fazla 800V uygulanmaktadır. Bu nedenle, mevcut HF sisteminde kullanılan eski PMT'lerin yerine daha düşük gerilimde daha iyi veri alınabilen yeni dört anotlu PMT'lerin tercih edilmesine karar verilmiştir.

5.5 HF - 904 Çalışmaları

CMS dedektör parçalarının test çalışmalarının yapıldığı CERN'de yer alan Preveşsin 904 no'lu binada kurulan test düzeneğinde yerel veri alımı yapılmaktadır. Buradaki amaç, Fermi Laboratuvar'ında [37] üretilip Iowa Üniversitesi Yüksek Enerji Fiziği

Laboratuvar'ında [38] test edilen ve daha sonra CERN'e getirilen PMT ve Baseboard'ların düzgün çalışıp çalışmadığını kontrol etmektir [3]. Kontrol edilen PMT ve Baseboard'lar HCAL dedektörünün alt dedektörü olan HF'e monte edilmektedir.

PMT testi için üç tip veri alınmaktadır.

- Pedestal
- LED
- SPE

Veri alımı yapılırken yüksek gerilim (high voltage - HV) ve yoğunluk (intensity - INT) değişimi yaparak farklı konfigürasyonlarda veri alınmaktadır. Alınan yerel veriler ile dedektörün kanallarının durumu incelenmiştir. Bu tezde, LED sinyali ile alınan veriler incelenmiştir.

5.6 LED Kalibrasyon Sistemi

HF'in elektronik kısmının daha iyi incelenmesi, UV-lazer sistemi ve mavi LED ışığı kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Devreyi test edebilmek için PMT'lere LED ışığı gönderilmiştir ve LED verileri alınmıştır. LED verileri, hem PMT kazançını belirlemek, hem de yüksek gerilim altında PMT kazanç değişimini görebilmek için alınmıştır. Veriler farklı yüksek gerilim (HV) değerleri için tekrarlanmıştır. LHC işlemi sırasında, LED verileri düzenli olarak alınması PMT pedestal miktarı, zamanlama ve kazanç kararlılığını izleyebilmek için gereklidir.

6 VERİ ANALİZİ

Bu analiz boyunca HF kalorimetresinde kalibrasyon ünitelerindeki LED sistemi kullanılmıştır. PMT'lere sayısal olarak 100'den 255 değerine kadar değişen yüksek yoğunlukta LED ışığı gönderilmiştir. Bütün PMT'lere 600V, 650V, 700V ve 750V olmak üzere dört farklı yüksek gerilim uygulanmıştır. PMT'lerden alınan sinyaller HF'in veri edinme sistemi aracılığıyla bilgisayarlara aktarılmıştır. Bu şekilde yüksek gerilim ve yoğunluk değişimleri altında PMT'lerin davranışları incelenmiştir.

Tüm PMT'lerden alınan sinyallere göre Gauss eğrisi uygulanarak dağılımın ortalama değerleri (mean) ve dağılımdaki karekök ortalama değerleri (rms) hesaplanmıştır. Bu hesaplar sayesinde PMT'lerin kazanç değerlerinin ölçülmesi amaçlanmıştır. Kazanç hesabı yapılırken,

$$\frac{Mean^2}{RMS^2} = \frac{\langle N_{pe} \rangle}{ENF} \quad (6.1)$$

eşitliği kullanılmıştır. Burada $\langle N_{pe} \rangle$, foto elektron sayısıdır. ENF (Excess Noise Factor), PMT'ler için üretici firma tarafından ölçülen gürültü faktörüdür ve $ENF = 1.15 \pm 0.05$ 'dir. (6.1) denklemi kullanılarak her PMT için foto elektron sayısı hesaplanmıştır. Foto katottaki yük,

$$Q_{katot} = \langle N_{pe} \rangle \cdot 1.910^{-19} \quad (6.2)$$

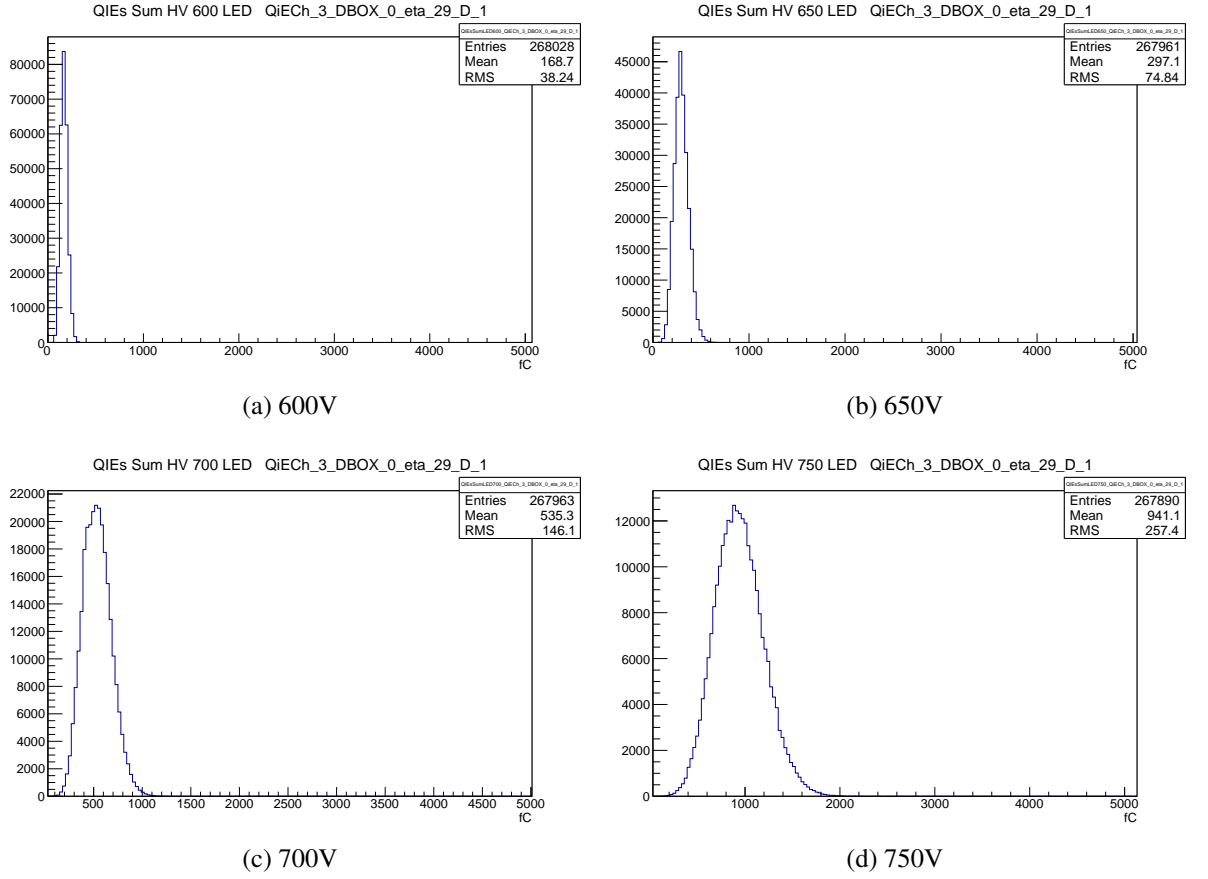
hesaplanır ve PMT'ler için kazanç hesabı aşağıdaki denklem ile gösterilir.

$$PMTKazanc = \frac{2.6(Mean)10^{-15}}{Q_{katot}} \quad (6.3)$$

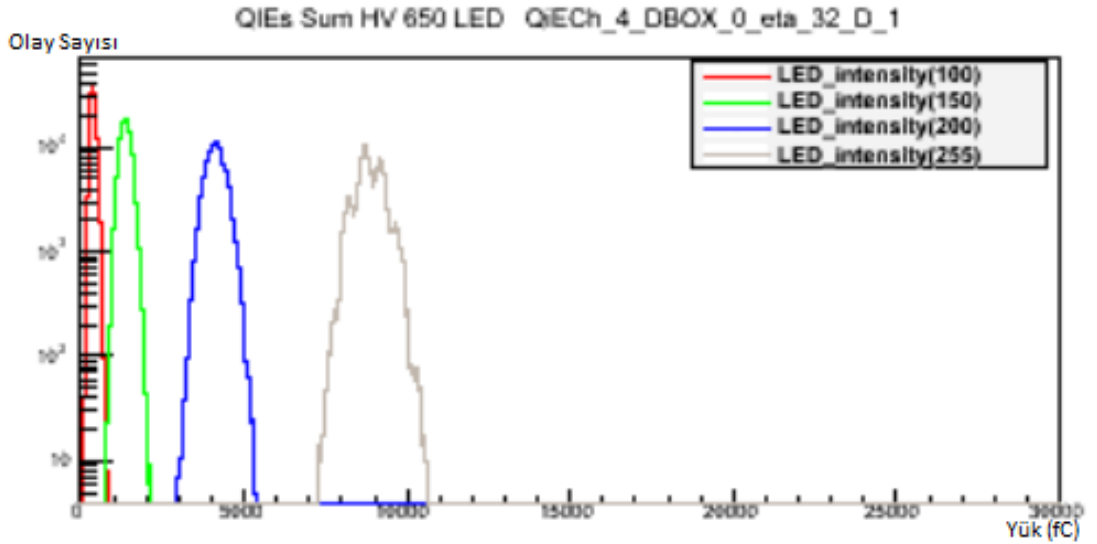
Her bir PMT için hesaplanan kazanç değerleri (5.8) denklemine fit edilmiştir. Elde edilen bu değerler, Iowa Üniversitesi tarafından hesaplanan değerler ile karşılaştırılmıştır.

Örnek olarak, Şekil 6.1'de LED-100 ışık yoğunluğu değerinde olan JA1409 numaralı PMT için dört farklı gerilim değeri altında PMT sinyallerinin dağılımları verilmiştir. Soldan sağa doğru sırası ile a) 600V, b) 650V, c) 700V ve d) 750V için alınan sinyal dağılımları gösterilmiştir.

Şekil 6.2'de 650 gerilim değeri altında JA1409 numaralı PMT için değişik LED ışık yoğunluklarına göre alınan sinyal dağılımları gösterilmiştir.

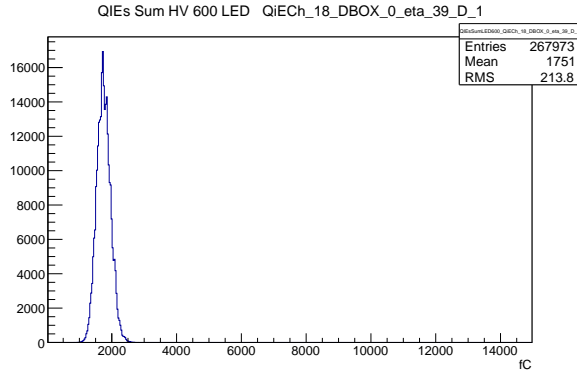


Şekil 6.1: LED ışık yoğunluğu değeri 100 olan JA1409 numaralı PMT için, değişik besleme gerilimlerine göre alınan sinyal dağılımları

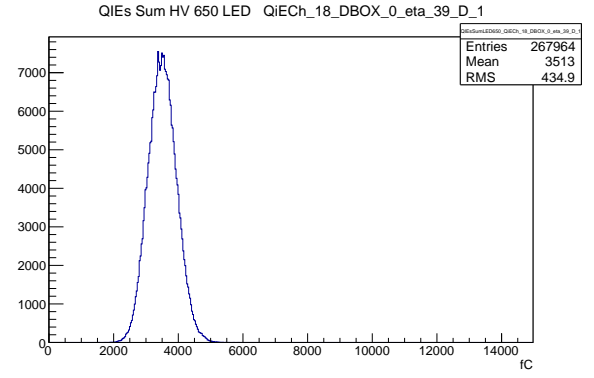


Şekil 6.2: JA1409 numaralı PMT için 650V'da dört farklı ışık yoğunluğu altındaki sinyal dağılımlarının şekli

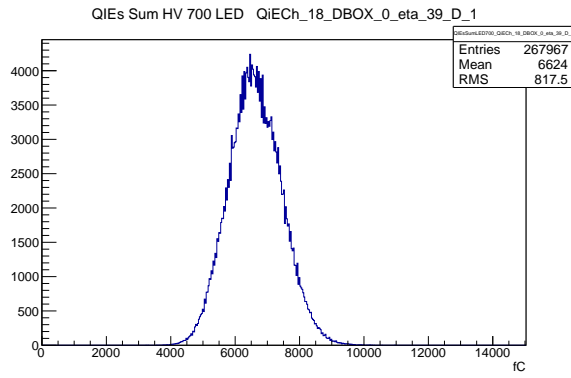
Şekil 6.2'de sırası ile kırmızı 100, yeşil 150, mavi 200 ve gri renkteki sinyal 255 (full) ışık yoğunluğunu temsil etmektedir.



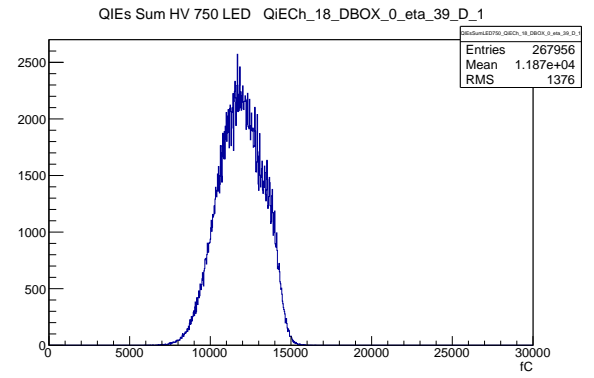
(a) 600V



(b) 650V

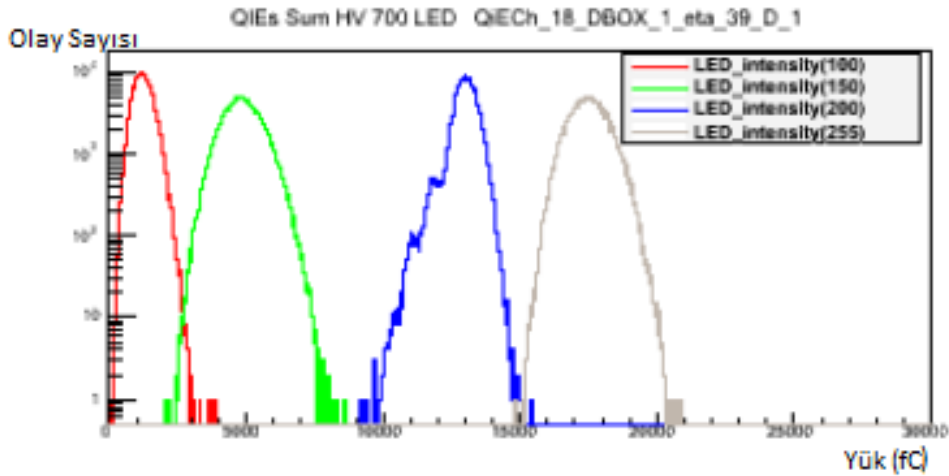


(c) 700V

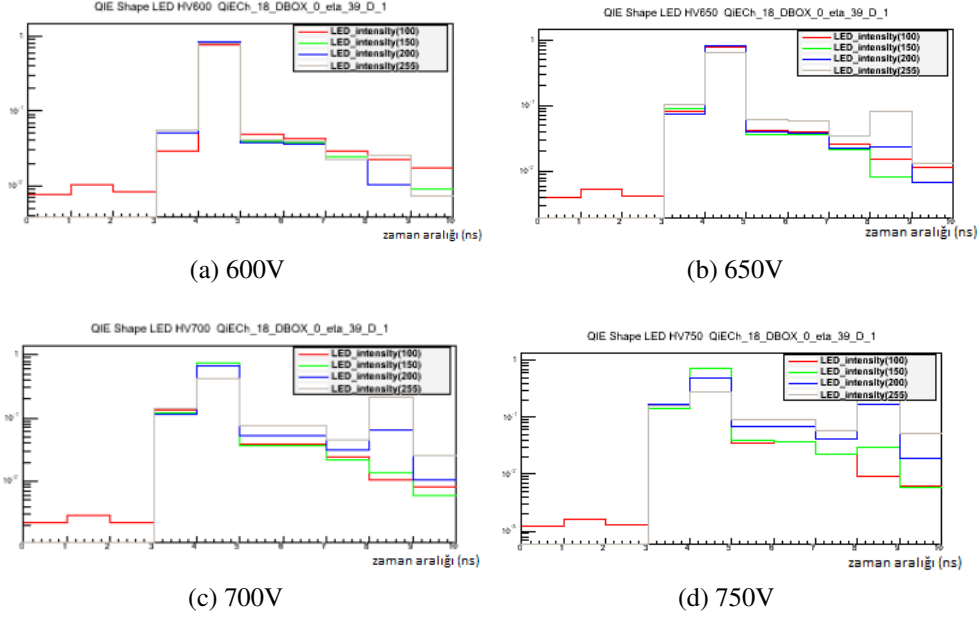


(d) 750V

Şekil 6.3: LED ışık yoğunluğu değeri 150 olan JA0423 numaralı PMT için, değişik besleme gerilimlerine göre alınan sinyal dağılımları

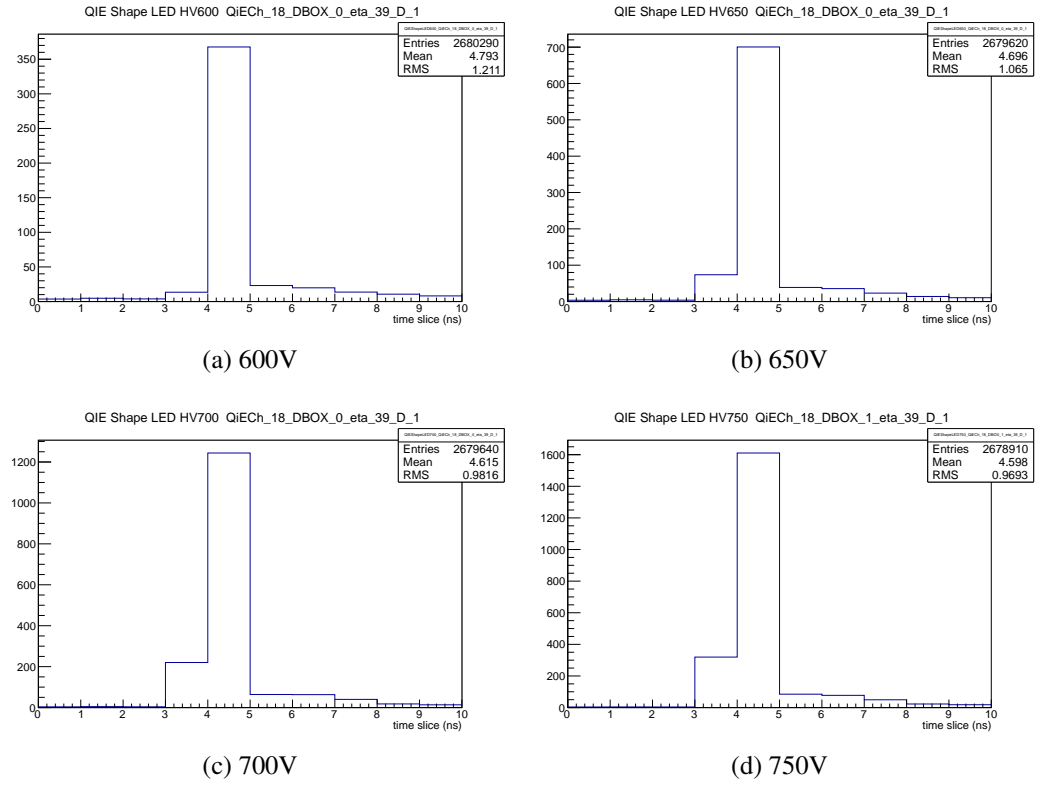


Şekil 6.4: JA0423 numaralı PMT için 700V'da dört farklı ışık yoğunluğu altındaki sinyal dağılımlarının şekli



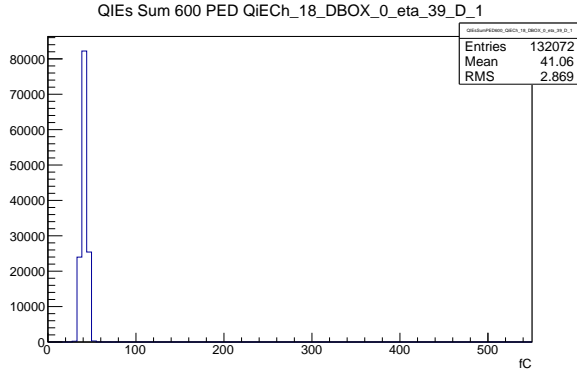
Şekil 6.5: JA0423 numaralı PMT'nin dört farklı ışık yoğunluğu altındaki sinyal dağılımları

Şekil 6.6'da görüldüğü gibi gerçek sinyal 4-5 zaman diliminde, yansıyan sinyaller ise 3-4 ve 5-8 zaman dilimleri arasındadır.

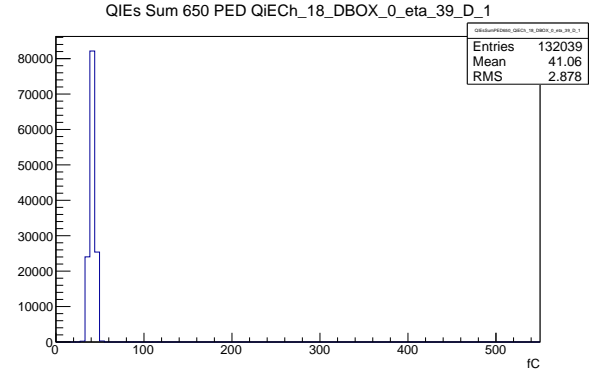


Şekil 6.6: Dört farklı besleme gerilim değeri altında PMT için kanaldan okunan sinyalin görünümü

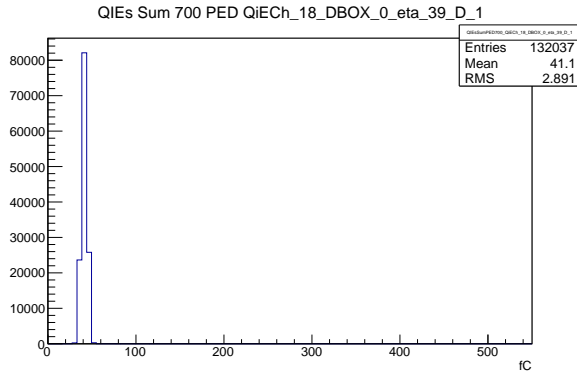
Pedestal değeri devreye herhangi bir sinyal gitmeden elektronik gürültüden dolayı kanallardan okunan sahte sinyallerdir. Şekil 6.7’de pedestal değerleri dört farklı gerilim değeri altında oluşan pedestal grafikleri verilmiştir. Örnek olarak, 18. okuma kanalının pedestal değerleri seçilmiştir.



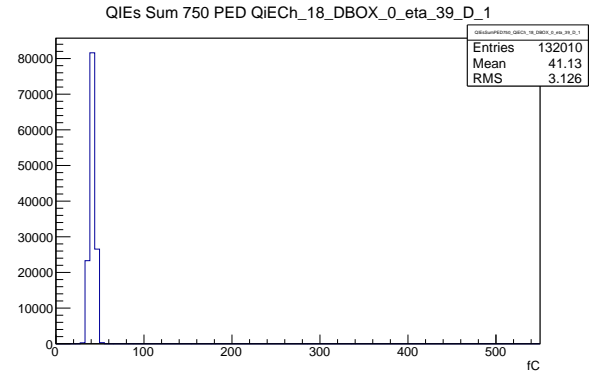
(a) 600V



(b) 650V



(c) 700V



(d) 750V

Şekil 6.7: Dört farklı besleme gerilim değeri altında PMT için kanaldan okunan pedestal sinyalinin görünümü

7 SONUÇ

Bu çalışmada, test sisteminde değişik HV değerleri için alınan LED verileri kullanılarak, PMT'ler için kazanç değerleri hesaplanmıştır. PMT'lerin kazanç hesapları yapılırken LED mean (dağılımın ortalama değeri), LED rms (dağılımın karekök ortalama değeri), pedestal mean (pedestal dağılımının ortalama değeri) ve pedestal rms (pedestal dağılımının karekök ortalama değeri) değerleri gözönüne alınmıştır.

PMT ID	Kanal No.	HV	LedMean	LedRms	PedMean	PedRms
JA0423	18	600	1217.68	299.797	107.419	8.91285
JA0423	18	650	2362.01	554.613	107.409	8.93389
JA0423	18	700	4355.65	1053.52	107.497	8.96437
JA0423	18	750	7817.24	1924.26	107.614	9.0206
JA1409	3	600	438.718	99.4343	110.783	8.72126
JA1409	3	650	772.508	194.552	110.812	8.69951
JA1409	3	700	1391.68	379.601	110.812	8.69951
JA1409	3	750	2446.65	668.496	110.764	8.76453

Tablo 7.1: Analizler sonucunda LED-100 ışık yoğunluğunda, PMT sinyallerinin Gauss dağılımlarına bağlı olarak ortalama (mean) ve dağılımdaki karekök ortalama (rms) değerleri.

PMT ID	Kanal No.	HV	LedMean	LedRms	PedMean	PedRms
JA0423	18	600	4553.01	555.639	107.502	8.9323
JA0423	18	650	9134.18	1130.12	107.638	8.92147
JA0423	18	700	17222.8	2124.24	107.841	9.06757
JA0423	18	750	30856.1	3576.85	108.305	9.01439
JA1409	3	600	1465.22	201.537	110.817	8.74596
JA1409	3	650	2849.59	395.887	110.86	8.74914
JA1409	3	700	5328.11	756.071	110.822	8.7477
JA1409	3	750	9640.41	1353.16	110.907	8.84407

Tablo 7.2: Analizler sonucunda LED-150 ışık yoğunluğunda, PMT sinyallerinin Gauss dağılımlarına bağlı olarak ortalama (mean) ve dağılımdaki karekök ortalama (rms) değerleri.

PMT ID	Kanal No.	HV	LedMean	LedRms	PedMean	PedRms
JA0423	18	600	13660.6	994.924	107.818	8.91889
JA0423	18	650	27382.7	1976.68	108.358	8.99026
JA0423	18	700	38779.3	1250.44	109.444	9.11692
JA0423	18	750	54756.3	2927.74	111.197	9.0726
JA1409	3	600	4361.96	354.986	110.78	8.71787
JA1409	3	650	8733.65	703.469	110.799	8.73373
JA1409	3	700	16450.9	1314.98	110.786	8.78812
JA1409	3	750	29628.3	2373.15	110.9	8.8129

Tablo 7.3: Analizler sonucunda LED-200 ışık yoğunluğunda, PMT sinyallerinin Gauss dağılımlarına bağlı olarak ortalama (mean) ve dağılımdaki karekök ortalama (rms) değerleri.

PMT ID	Kanal No.	HV	LedMean	LedRms	PedMean	PedRms
JA0423	18	600	29688.6	1473.75	108.439	8.9752
JA0423	18	650	40034.5	965.403	109.687	9.08515
JA0423	18	700	61267.8	2568.03	112.139	9.06771
JA0423	18	750	0	0	8.74494	0.0113783
JA1409	3	600	9702.92	523.446	110.812	8.74549
JA1409	3	650	19314.4	1057.69	110.81	8.74347
JA1409	3	700	34560.9	733.726	110.934	8.81738
JA1409	3	750	44286.7	1432.63	111.278	8.92713

Tablo 7.4: Analizler sonucunda LED-255 ışık yoğunluğunda, PMT sinyallerinin Gauss dağılımlarına bağlı olarak ortalama (mean) ve dağılımdaki karekök ortalama (rms) değerleri.

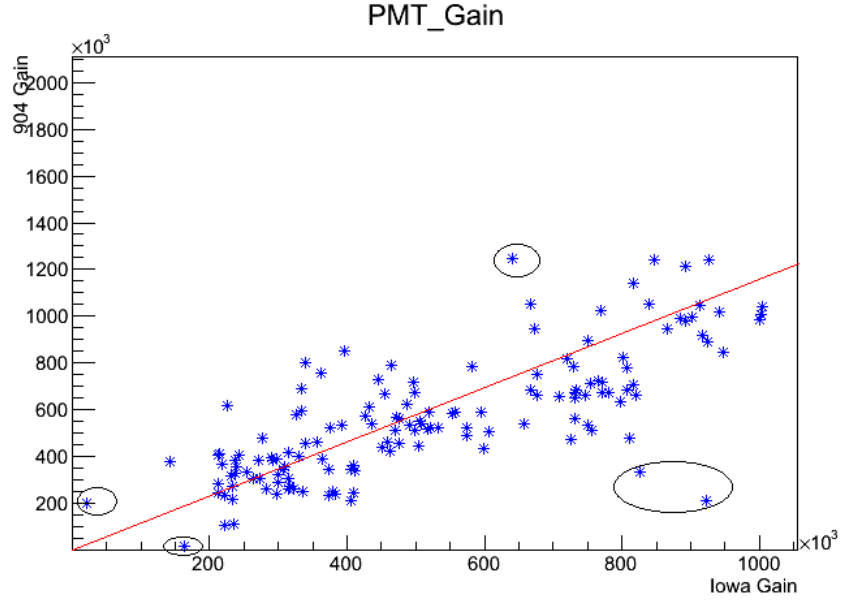
Tablo 7.1, Tablo 7.2, Tablo 7.3 ve Tablo 7.4’de değişik LED yoğunluğu için örnek olarak, 4. kofigürasyonda bulunan JA0423 ve JA1409 PMT’lerinin ortalama sinyal değerleri, sinyallerin rms değerleri ve pedestal oranları gösterilmiştir. Bu veriler kullanılarak oluşturulan kazanç (gain) değerleri Tablo 7.5’de verilmiştir. PMT’ler için hesaplanmış olan kazanç değerleri EK’de gösterilmiştir.

Elde edilen sonuçların ışığında test edilen PMT’lerin, daha önceki testlerde (Iowa) ve üretici firma değerleri ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Örnek olarak Şekil 7.1’de 144 adet PMT için oluşturulmuş grafik verilmiştir. Bu grafikte görüldüğü gibi sorunlu olan PMT’ler tespit edilmiştir.

LHC veri alımı, 1 Ocak 2014 itibari ile durmuş ve 1 senelik bakım ve onarım çalışmaları başlamıştır. Bu çalışmalar kapsamında HF PMT’leri yeni dört anotlu R7600-100-M4 tipi Hamamatsu PMT’leri ile değiştirilmeye başlanmıştır.

PMT ID	Kanal No.	Gain (HV600)	Gain (HV650)	Gain (HV700)	Gain (HV750)
JA0423	18	439569	741276	1.41983e+06	2.61016e+06
JA0351	24	354140	622294	1.19059e+06	2.12159e+06
JA0119	13	505763	999828	1.80774e+06	3.09085e+06
JA0138	19	266467	542394	985719	1.75108e+06
JA0317	20	335206	640390	1.17545e+06	1.99448e+06
JA0106	14	455145	867932	1.67353e+06	3.06357e+06
JA0564	22	248743	485490	850837	1.49872e+06
JA0910	16	429895	798329	1.52383e+06	2.71617e+06
JA1036	17	196524	386901	739923	1.25815e+06
JA0096	23	141285	281379	505152	883726
JA0451	15	152354	311720	538896	957218
JA0405	21	311777	545508	998006	1.76739e+06
JA0964	6	174864	368060	636471	1.13243e+06
JA0331	12	168863	317189	548517	971422
JA0393	1	320085	655394	1.18157e+06	2.03127e+06
JA0468	7	287288	555623	1.03002e+06	1.92523e+06
JA0544	8	198383	385686	695605	1.16787e+06
JA1139	2	114863	231870	443300	764905
JA1162	10	137594	259033	492432	897173
JA1265	4	162469	298277	583168	1.03853e+06
JA0870	5	294930	584911	1.05791e+06	1.8949e+06
JA1249	11	114652	153789	280072	504521
JA1409	3	162598	310249	611087	1.03957e+06
JA0189	9	203756	383573	718455	1.29001e+06
JA0440	18	380862	745027	1.34936e+06	2.51152e+06
JA0355	24	377397	747287	1.36403e+06	2.43937e+06
JA0109	13	336713	669335	1.22124e+06	2.22759e+06
JA0060	19	509333	952397	1.76639e+06	3.1571e+06
JA0068	20	235667	472459	843809	1.40604e+06
JA1171	14	416985	822152	1.51283e+06	2.75592e+06
JA0403	22	417604	797474	1.43657e+06	2.53762e+06
JA1360	16	394854	803819	1.5062e+06	2.70032e+06
JA0913	17	242770	514195	927449	1.64467e+06
JA0657	23	340522	687831	1.27725e+06	2.25513e+06
JA1288	15	240979	503877	888876	1.58773e+06
JA0662	21	339854	692013	1.30642e+06	2.28647e+06
JA1121	6	260878	527912	1.0265e+06	1.76368e+06
JA0764	12	427888	827890	1.5275e+06	2.85621e+06
JA0472	1	301570	589876	1.11072e+06	1.93509e+06
JA0655	7	328583	673670	1.24166e+06	2.21265e+06
JA0840	8	188349	371773	700856	1.22147e+06
JA0811	2	240841	484045	877912	1.56248e+06
JA0671	10	184322	358904	688576	1.18144e+06
JA0628	4	228492	454495	849468	1.51814e+06
JA0610	5	209384	420171	791613	1.40171e+06
JA0635	11	198666	405207	717803	1.24356e+06
JA0815	3	338489	674803	1.23544e+06	2.24536e+06
JA0814	9	388491	772266	1.43664e+06	2.5947e+06

Tablo 7.5: 4. konfigürasyon için gerilim değerlerine bağlı olarak oluşturulan PMT kazanç tablosu. Burada PMT ID, PMT'nin seri numarasıdır.



Şekil 7.1: Iowa ve 904 için PMT kazanç grafiği

Bu çalışmalar sonucu kazançları hesaplanan ve HF'de kullanılmaya uygun olduğu belirlenen PMT'ler deney alanına gönderilerek HF'e yerleştirilmeye başlanmıştır. Şu anda HF PMT'lerinin yerleştirme çalışmaları devam etmektedir. 2015'de LHC 13-14 TeV enerjileri ile veri alımına başlandığında ileri kalorimetre yeni PMT'leri ile veri alımına hazır olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] **Indico Document**, <http://indico.cern.ch/getFile.py/access?resId=3materialId=slidesconfId=133970>, LHC ve Hızlandırıcılar.
- [2] **Cankocak, K.**, 2010, <http://web.itu.edu.tr/kcankocak/docs/kerem-cankocak-simetri-LHC-Nisan2010.pdf>, LHC ve Simetri.
- [3] **Turkcapar, S., Gecit, F., Ozcan, M., Demiroglu, S.Z., Girgis, S.**, <http://indico.cern.ch/event/246600/material/slides/0.pdf>, 16 Nisan 2013.
- [4] **ROOT**, <http://root.cern.ch/drupal/>
- [5] **Yavaş, O.**, Parçacık Hızlandırıcıların Tipleri ve Fiziği, Bodrum, 18-24 Eylül 2006.
- [6] **Çakır, İ.**, 2007, Hızlandırıcılar ve Dedektörler.
- [7] **CERN**, <http://en.wikipedia.org/wiki/CERN>
- [8] **LHC Guide**, CERN-Brochure-2009-003-Eng, Communication Group, Şubat 2009.
- [9] **LHC**, <http://project-integration-accelerateurs.web.cern.ch/project-Integration-Accelerateurs/Integration/Images/CERN-Accelerator-Complex.jpg>
- [10] **Jindal M.**, 2011. Drell-Yan Study in CMS Experiment At Large Hadron Collider.
- [11] **LHC Machine Outreach**, <http://lh-machine-outreach.web.cern.ch/lhc-machine-outreach/images/lhc-schematic.jpg>
- [12] **ALICE - Technical Design Reports**, <http://www-alice.gsi.de/trd>
- [13] **LHCb Technical Proposal**, <http://lhcb-tp.web.cern.ch/lhcb-tp/>
- [14] **TOTEM - Technical Design Reports**, <http://totemtdr.web.cern.ch/totemtdr/totemtdr-24-03-04.pdf>
- [15] **LHCf - Technical Design Report**, <http://cdsweb.cern.ch/record/926196/files/lhcc-2006-004.pdf>
- [16] **CMS**, 2006. CMS Physics Technical Design Report Volume 1: Detector Performance and Software, The Scientific Information Service CERN.
- [17] **CMS**, <http://physicslight.files.wordpress.com/2013/03/cms.png>

- [18] **Akgun, U.**, 2003. CMS HF calorimeter PMTS and +C lifetime, *Ph.D Thesis*, Iowa University, Iowa City.
- [19] URL-1, <https://inspirehep.net/record/1236817/plots>
- [20] **Kodolova O**, 2009. Heavy Ion Physics Program in CMS Experiment.
- [21] **CMS**, <https://inspirehep.net/record/1234410/plots>
- [22] **Goitom, I.**, 2009. Track Quality Monitoring for The Compact Muon Solenoid Silicon Strip Tracker, *Ph.D Thesis*, School of Engineering and Design Brunel University, London.
- [23] **CERN Document Server**, <http://cds.cern.ch/record/1051383>
- [24] URL-2, <http://epilicer.home.uludag.edu.tr/detektor.html>
- [25] **The CMS Collaboration**, 2010. Performance of the CMS Drift Tube Chambers with Cosmic Rays.
- [26] **CERN Document Server**, <http://cds.cern.ch/record/1431485>
- [27] **The CMS Collaboration: Hadronic Calorimeter**, 2008. <http://jinst.sissa.it/LHC/CMS/ch05.pdf>
- [28] **Akgun, U., Ayan, A.S., Brucecken, P., Duru, F., Mestvirishvili A., Miller, M., Onel Y., Schmidt, I., Gülmez, E.**, Complete Tests of 2000 Hamamatsu R7525HA Phototubes for the CMS-HF Forward Calorimeter, 2004.
- [29] **Penzo, A., Onel Y.**, 2008. The CMS-HF quartz fiber calorimeters.
- [30] **Tiras., E.**, 2012. Characterization of 900 four-anode photomultiplier tubes for use in 2013 hadronic forward calorimeter upgrade, *Master Thesis*, Iowa Üniversitesi, Iowa City.
- [31] **Akgun, U., Ayan, A.S., Miller, M., Onel, Schmidt, I., Y., Anderson, E.W., Gülmez, E., Winn, D.**, 2003. Comparison of PMTs from three different manufacturers for the CMS-HF Forward Calorimeter.
- [32] **CERN Document Server**, <http://cds.cern.ch/record/1431489>.
- [33] **Koçak, F.**, Parçacık Detektörleri III, Kalorimetreler, Ankara.
- [34] **Hamamatsu**, 2007. <http://www.hamamatsu.com>, PMT Handbook.
- [35] **Öz., Y.**, 2013. Comparison of The Multi-Anode PMTs with The Old HF PMTs by Studing The Collision Data, *Master Thesis*, Boğaziçi University, İstanbul.
- [36] **CMS Document Server**, 2013. Status of the Upgrades for the CMS Hadron Calorimeter.
- [37] **Fermi National Accelerator Laboratory**, <http://en.wikipedia.org/wiki/Fermilab>
- [38] **Iowa State University**, <http://www.physastro.iastate.edu/research/high-energy>

EK

PMT'lerin Gain (Kazanç) değerleri dört besleme gerilim değeri altında tablolar halinde verilmiştir.

Tablo 7.6 -> Konfigürasyon-5,

Tablo 7.7 -> Konfigürasyon-6,

Tablo 7.8 -> Konfigürasyon-9,

Tablo 7.9 -> Konfigürasyon-11,

Tablo 7.10 -> Konfigürasyon-12,

Tablo 7.11 -> Konfigürasyon-13

Tablo 7.12 -> Konfigürasyon-15

Tablo 7.13 -> Konfigürasyon-16,

Tablo 7.14 -> Konfigürasyon-17,

Tablo 7.15 -> Konfigürasyon-18.

PMT ID	Kanal No.	Gain (HV600)	Gain (HV650)	Gain (HV700)	Gain (HV750)
JA1219	18	550987	1.07022e+06	2.13444e+06	3.48213e+06
JA0620	24	139820	296286	509821	696159
JA0413	13	322545	615399	1.20266e+06	1.93414e+06
JA1312	19	386992	774674	1.45131e+06	3.14284e+06
JA1319	20	374029	745262	1.4218e+06	1.75647e+06
JA0104	14	435685	824381	1.56382e+06	3.10366e+06
JA0450	22	246367	486977	875950	1.61727e+06
JA0401	16	423626	761035	1.41097e+06	1.8054e+06
JA1034	17	264729	552814	1.02346e+06	2.04564e+06
JA1014	23	226252	435337	800182	1.37526e+06
JA0972	15	209924	426712	748769	1.40251e+06
JA0402	21	211394	371325	658088	1.31624e+06
JA0854	6	383505	704024	1.31382e+06	2.28072e+06
JA0834	12	344003	671212	1.33069e+06	2.47711e+06
JA0909	1	178761	343899	676912	807066
JA1002	7	188370	373886	652532	1.137e+06
JA0921	8	180365	355771	679715	1.07801e+06
JA0867	2	179287	385256	657485	911693
JA1020	10	136017	286886	512051	863617
JA1220	4	110939	198270	375749	553398
JA0086	5	107798	199623	364258	781518
JA0844	11	203083	390185	718820	1.38801e+06
JA1404	3	154594	290488	579212	721058
JA1066	9	158596	306314	567331	860249
JA0115	18	253072	513386	933805	1.74066e+06
JA1168	24	548288	1.05826e+06	1.98141e+06	3.41892e+06
JA1025	13	482719	916051	1.73128e+06	2.11448e+06
JA0392	19	367828	707528	1.25995e+06	2.52884e+06
JA0395	20	349173	709040	1.20878e+06	1.8266e+06
JA0431	14	370203	731024	1.32282e+06	2.34393e+06
JA1212	22	438160	879727	1.61762e+06	2.57504e+06
JA1320	16	329248	662866	1.2518e+06	2.05064e+06
JA0736	17	315927	666284	1.21596e+06	2.16935e+06
JA1207	23	177198	339417	655554	986174
JA1093	15	158008	303423	590264	1.0355e+06
JA0669	21	339402	691533	1.28861e+06	2.30884e+06
JA1109	6	259910	519618	1.03427e+06	1.6118e+06
JA0397	12	221750	431890	768804	1.00156e+06
JA1271	1	260822	510856	980594	1.71445e+06
JA0627	7	319801	670927	1.25613e+06	2.9129e+06
JA0195	8	159687	309149	595056	1.1107e+06
JA0287	2	195470	374287	733636	1.33144e+06
JA0219	10	204353	392155	743202	1.06184e+06
JA0304	4	211121	407735	751660	1.30348e+06
JA0306	5	260502	524624	933597	1.81602e+06
JA0248	11	184942	369459	693661	1.26443e+06
JA0218	3	222882	436388	809179	1.30484e+06
JA0152	9	96608.3	169964	304396	543418

Tablo 7.6: Konfigürasyon-5

PMT ID	Kanal No.	Gain (HV600)	Gain (HV650)	Gain (HV700)	Gain (HV750)
JA0438	18	370257	631819	1.14946e+06	1.54547e+06
JA0114	24	158182	336596	575138	1.06692e+06
JA1173	13	499635	1.03845e+06	1.90372e+06	3.19073e+06
JA1092	19	551880	1.06866e+06	2.03905e+06	3.45028e+06
JA0411	20	339101	652762	1.18546e+06	2.01893e+06
JA0330	14	258718	509171	919194	1.59517e+06
JA0715	22	515060	971962	1.86598e+06	3.27771e+06
JA0067	16	202212	415746	715567	1.42648e+06
JA1117	17	252794	519567	996448	2.32051e+06
JA0225	23	388021	726445	1.32763e+06	2.51577e+06
JA0384	15	160939	324526	555647	877269
JA0586	21	158949	337355	613095	1.58433e+06
JA0911	6	242957	492139	858820	1.21554e+06
JA0130	12	396261	747239	1.527e+06	2.12613e+06
JA0303	1	379220	781276	1.40523e+06	2.31602e+06
JA0444	7	315600	588869	1.10096e+06	1.91344e+06
JA0549	8	205153	396789	704440	1.15961e+06
JA0452	2	120183	238946	454326	638000
JA0505	10	176274	353457	620347	1.32789e+06
JA0376	4	116759	212638	379232	976871
JA0265	5	203975	403868	736234	1.25218e+06
JA0334	11	103491	192282	337935	541828
JA0172	3	145075	267223	511089	813141
JA0512	9	192176	364431	677220	1.11586e+06
JA1282	18	354033	721063	1.3331e+06	1.88063e+06
JA0129	24	310916	640882	1.17126e+06	2.27017e+06
JA0406	13	326659	645522	1.15901e+06	2.25564e+06
JA0412	19	287417	590880	1.04199e+06	2.22948e+06
JA0398	20	320920	660845	1.14378e+06	2.33532e+06
JA1189	14	306829	642876	1.16893e+06	1.70667e+06
JA0356	22	310918	645405	1.15827e+06	2.52906e+06
JA1498	16	435662	862534	1.5696e+06	2.73062e+06
JA0329	17	154863	292615	560395	1.03176e+06
JA0467	23	269465	527120	984690	1.6815e+06
JA0539	15	292802	586941	1.02653e+06	2.12517e+06
JA0820	21	394202	806072	1.45453e+06	3.19964e+06
JA0448	6	272659	552226	1.06545e+06	2.10379e+06
JA0691	12	420648	814349	1.488e+06	2.70664e+06
JA0713	1	274962	536947	1.02724e+06	1.54867e+06
JA0759	7	235795	461638	880290	1.33339e+06
JA0831	8	293812	600169	1.07367e+06	1.9207e+06
JA0555	2	139816	265512	498495	933157
JA1709	10	143887	273452	521129	1.03475e+06
JA0509	4	153589	289197	539958	893378
JA0506	5	118548	228128	439269	736101
JA0485	11	205463	426369	748886	1.28381e+06
JA0598	3	169833	337803	635975	1.07661e+06
JA1136	9	155274	288753	562960	996914

Tablo 7.7: Konfigürasyon-6

PMT ID	Kanal No.	Gain (HV600)	Gain (HV650)	Gain (HV700)	Gain (HV750)
JA0218	18	302210	572781	1.01584e+06	1.57195e+06
JA0415	24	279891	515403	972900	1.80728e+06
JA1106	13	421514	853462	1.64542e+06	2.76124e+06
JA1490	19	354030	715062	1.32038e+06	2.57958e+06
JA1240	20	364524	708905	1.34237e+06	2.33794e+06
JA0434	14	223523	446501	796878	1.7527e+06
JA0370	22	301189	554846	1.00106e+06	1.56521e+06
JA0091	16	420462	770261	1.45025e+06	2.57647e+06
JA0166	17	359090	739437	1.30887e+06	3.22653e+06
JA0243	23	327068	590679	1.08014e+06	2.45346e+06
JA0366	15	150146	302511	531009	1.26559e+06
JA0379	21	170841	329359	577775	960900
JA0141	6	101930	192222	381030	480739
JA0200	12	239462	440040	828778	1.31585e+06
JA0359	1	135135	260948	490149	925125
JA0375	7	164856	324198	573246	831101
JA0464	8	160318	300941	591049	1.09584e+06
JA0456	2	140420	293598	514739	783362
JA0339	10	104532	188466	347381	497432
JA0259	4	135378	240903	465453	878374
JA0085	5	70161.4	113633	202735	348451
JA0333	11	93112.4	169832	307881	453159
JA0378	3	93995.3	166135	295982	578838
JA0458	9	151829	289553	533098	766985
JA0416	18	282613	585860	1.06193e+06	1.37105e+06
JA0569	24	210678	420055	804065	1.56451e+06
JA1075	13	277153	557847	993181	1.86486e+06
JA1334	19	319586	661599	1.19051e+06	2.19142e+06
JA1100	20	260515	537202	985017	1.40064e+06
JA0730	14	416918	855369	1.58298e+06	2.66203e+06
JA0454	22	198265	381150	747534	1.49979e+06
JA0058	16	381873	735278	1.31513e+06	2.59011e+06
JA0457	17	143742	274839	538562	871360
JA0494	23	219839	422871	804360	1.50689e+06
JA0543	15	246297	503511	891548	1.78566e+06
JA0560	21	271470	538218	1.03348e+06	1.26851e+06
JA0386	6	169313	323348	617505	1.35252e+06
JA0476	12	288559	594131	1.02721e+06	1.48988e+06
JA0535	1	273153	530038	1.00303e+06	2.00085e+06
JA0556	7	232433	451788	858448	1.23506e+06
JA0741	8	206766	410856	778582	1.31634e+06
JA0694	2	183288	354215	694554	1.18789e+06
JA0508	10	166255	312003	592825	1.02743e+06
JA0484	4	140097	261120	487794	1.06827e+06
JA0469	5	159697	308145	590063	1.1433e+06
JA0487	11	164783	319651	617833	1.12523e+06
JA0524	3	177593	343396	646509	1.05056e+06
JA0739	9	180167	335091	657532	869982

Tablo 7.8: Konfigürasyon-9

PMT ID	Kanal No.	Gain (HV600)	Gain (HV650)	Gain (HV700)	Gain (HV750)
JA0579	18	501366	886238	1.70121e+06	3.1306e+06
JA1082	24	288334	512951	968790	1.88359e+06
JA1248	13	323756	610295	1.17383e+06	1.61469e+06
JA1270	19	438692	873188	1.64214e+06	2.7604e+06
JA1257	20	395574	779363	1.51252e+06	2.27972e+06
JA1097	14	317187	627233	1.16402e+06	1.61436e+06
JA0711	22	471560	874141	1.66641e+06	1.97486e+06
JA0463	16	228007	488021	867931	1.80283e+06
JA0113	17	153537	290793	569343	1.28414e+06
JA0381	23	159154	316972	551990	1.01662e+06
JA1403	15	200922	412312	717464	1.37447e+06
JA1738	21	188711	371621	690085	1.23579e+06
JA0080	6	278841	539398	920515	2.06559e+06
JA0241	12	320620	587777	1.11097e+06	1.7896e+06
JA1283	1	226002	444686	895484	1.21082e+06
JA1408	7	222834	449409	809096	1.24446e+06
JA0640	8	156174	294854	577004	931390
JA0554	2	108538	206915	405249	766658
JA0294	10	180091	362517	638588	813331
JA0250	4	359282	696448	1.29843e+06	2.33421e+06
JA0249	5	194506	379702	701564	1.17048e+06
JA0288	11	158311	316772	566380	1.06847e+06
JA0497	3	147455	272477	538296	1.04411e+06
JA0634	9	151042	292910	539717	865569
JA0137	18	240241	480234	879954	1.32044e+06
JA0716	24	383965	807489	1.5021e+06	2.58125e+06
JA0816	13	423011	819992	1.51861e+06	3.08708e+06
JA1341	19	378781	773300	1.44542e+06	2.963e+06
JA0999	20	227115	459394	866123	1.3128e+06
JA0752	14	232633	466186	895143	1.70821e+06
JA0561	22	426399	866701	1.60287e+06	2.95703e+06
JA0076	16	398217	781161	1.40709e+06	2.95782e+06
JA0432	17	185871	363989	698775	1.24956e+06
JA0483	23	214342	412728	799412	1.42544e+06
JA1225	15	153968	297855	597949	894410
JA1407	21	205031	406574	792271	1.33097e+06
JA0049	6	276509	540765	1.01528e+06	1.69141e+06
JA0437	12	136350	260129	497362	861171
JA1067	1	143749	272351	504302	825386
JA1242	7	253976	511397	989813	1.91021e+06
JA1233	8	122701	235760	445090	784460
JA0316	2	221993	439140	835795	1.29858e+06
JA0682	10	155984	292129	556555	966541
JA0747	4	138833	260732	493008	990391
JA0646	5	175565	345604	653609	904998
JA0886	11	92297	169206	312117	449741
JA0826	3	155808	306160	582269	1.27017e+06
JA0977	9	133846	253533	466580	1.02124e+06

Tablo 7.9: Konfigürasyon-11

PMT ID	Kanal No.	Gain (HV600)	Gain (HV650)	Gain (HV700)	Gain (HV750)
JA0473	18	406642	696457	1.30928e+06	2.67375e+06
JA0324	24	270048	469982	844076	1.19255e+06
JA0846	13	269108	489821	946946	1.95075e+06
JA1095	19	419681	815781	1.51634e+06	2.184e+06
JA1308	20	279676	517494	935291	1.51386e+06
JA0479	14	340453	652520	1.20501e+06	2.39984e+06
JA0408	22	274595	510472	912045	1.95939e+06
JA0477	16	460059	849694	1.58658e+06	2.32905e+06
JA0817	17	448335	884571	1.62213e+06	3.01527e+06
JA0447	23	305096	556324	1.01658e+06	1.57545e+06
JA0638	15	228558	454611	825273	1.39415e+06
JA0602	21	239342	479189	870372	1.71508e+06
JA0656	6	382009	703596	1.31045e+06	2.49107e+06
JA0562	12	317644	584766	1.10863e+06	1.90648e+06
JA0637	1	245893	492188	962026	1.42638e+06
JA0531	7	265270	513715	943233	1.76159e+06
JA0310	8	171344	324782	615757	1.1771e+06
JA0337	2	97695.4	171584	336693	515734
JA0253	10	115041	224378	418261	743136
JA0048	4	159232	286489	480893	756220
JA0191	5	137755	263049	495014	666207
JA0515	11	115838	221700	390958	790049
JA0094	3	113284	203141	375376	920351
JA0296	9	181482	336324	606057	926474
JA1015	18	291107	603059	1.09892e+06	1.86831e+06
JA0233	24	250902	524307	969963	1.60886e+06
JA0407	13	19297.7	214906	73433.3	64065
JA0354	19	168930	328660	625428	1.24469e+06
JA0162	20	184557	368309	706647	1.66695e+06
JA0480	14	274473	555695	996836	1.98104e+06
JA0442	22	173357	327553	633588	762180
JA0139	16	190613	366883	687847	1.65337e+06
JA0523	17	196156	391076	729405	1.05815e+06
JA0541	23	259582	503217	938004	1.51681e+06
JA0093	15	174247	336472	659836	990010
JA1397	21	197565	390348	751205	1.07733e+06
JA1392	6	140031	274420	517303	1.10957e+06
JA0527	12	261953	546972	949365	1.70057e+06
JA0983	1	265266	514729	991033	1.88234e+06
JA1401	7	247090	482912	926571	1.61275e+06
JA0198	8	151158	283194	537627	825033
JA0789	2	411681	812704	1.48571e+06	2.36123e+06
JA0521	10	243840	480302	899002	1.38248e+06
JA0528	4	134237	248805	460019	1.07425e+06
JA0238	5	154548	299767	575171	901768
JA1044	11	109365	201383	390297	664873
JA0389	3	101737	186679	333118	514391
JA0301	9	368994	710064	1.29423e+06	3.19561e+06

Tablo 7.10: Konfigürasyon-12

PMT ID	Kanal No.	Gain (HV600)	Gain (HV650)	Gain (HV700)	Gain (HV750)
JA1112	18	209057	460919	765101	1.77411e+06
JA1126	24	309572	548679	1.06675e+06	1.48642e+06
JA0914	13	320927	621659	1.21774e+06	2.46061e+06
JA0784	19	431762	833021	1.53927e+06	3.20095e+06
JA0740	20	394210	778065	1.50291e+06	2.00668e+06
JA1181	14	213915	428174	785571	1.2936e+06
JA1129	22	307671	570895	1.06764e+06	1.47369e+06
JA0797	16	414409	767227	1.43296e+06	2.50207e+06
JA0532	17	193802	376349	734042	1.35152e+06
JA0837	23	268238	496849	928141	1.73611e+06
JA0474	15	78623.1	117756	193359	397421
JA0732	21	370086	701852	1.32831e+06	2.07777e+06
JA0966	6	238852	485978	849213	1.46566e+06
JA0222	12	323988	589743	1.10857e+06	2.06067e+06
JA0592	1	117901	226789	415344	809733
JA0836	7	296542	559478	1.04897e+06	1.66127e+06
JA0591	8	217910	441785	823153	1.27083e+06
JA0733	2	145747	304387	557581	1.06045e+06
JA0751	10	92832.8	172212	342518	458182
JA0284	4	103329	186100	332420	663160
JA0642	5	93705.4	172611	316188	647013
JA0645	11	111737	211600	386065	564489
JA0285	3	156431	292420	583285	994125
JA0748	9	105409	194867	363819	616582
JA1345	18	313450	646351	1.17464e+06	1.97095e+06
JA1259	24	339300	714983	1.31671e+06	1.83803e+06
JA0445	13	379262	727387	1.30282e+06	2.13881e+06
JA1210	19	209547	423467	799057	1.73861e+06
JA1247	20	202384	397115	772871	1.13498e+06
JA1231	14	333699	681945	1.26845e+06	2.36471e+06
JA0478	22	296211	615875	1.12787e+06	2.2398e+06
JA1335	16	209431	400197	766799	1.98311e+06
JA0681	17	196845	395327	750503	1.29062e+06
JA0849	23	231847	445822	853644	1.68649e+06
JA0750	15	162389	311490	620848	750614
JA0661	21	283993	568298	1.09816e+06	2.36204e+06
JA0873	6	266813	548939	1.06628e+06	2.24692e+06
JA0756	12	121719	238203	452626	772521
JA0712	1	196206	380232	726844	1.59457e+06
JA0842	7	240119	469693	877670	1.16675e+06
JA0309	8	219344	429935	784086	1.34079e+06
JA0643	2	102216	200051	359163	649856
JA0737	10	113164	209071	384511	666418
JA0858	4	139344	261835	495848	658130
JA0688	5	101918	198601	366287	661955
JA0286	11	194380	396063	736720	1.15967e+06
JA0254	3	102696	197895	363158	633362
JA0922	9	149250	283097	525570	851860

Tablo 7.11: Konfigürasyon-13

PMT ID	Kanal No.	Gain (HV600)	Gain (HV650)	Gain (HV700)	Gain (HV750)
JA1298	18	474739	842439	1.60529e+06	2.17907e+06
JA2189	24	474774	946959	1.7972e+06	3.20397e+06
JA1768	13	480408	998186	1.86856e+06	3.24349e+06
JA1915	19	511515	997892	1.90395e+06	4.11186e+06
JA2497	20	525706	1.00987e+06	1.94264e+06	3.55703e+06
JA0819	14	419038	795355	1.5257e+06	2.58507e+06
JA1596	22	529714	1.03226e+06	2.01967e+06	3.19884e+06
JA1482	16	454002	847548	1.61431e+06	3.00448e+06
JA2033	17	285813	602750	1.08325e+06	2.12141e+06
JA2446	23	296536	567026	1.06442e+06	1.40019e+06
JA2157	15	278554	530079	992789	2.46892e+06
JA1895	21	366555	712876	1.39299e+06	2.32074e+06
JA0874	6	286408	555556	1.00603e+06	2.07423e+06
JA0293	12	240646	464043	897170	1.38283e+06
JA2281	1	237317	477325	932543	1.92832e+06
JA1875	7	253094	508104	947102	1.46825e+06
JA1837	8	148441	287051	563113	1.08098e+06
JA1716	2	177674	380174	632707	896360
JA1906	10	182404	370050	681271	1.63064e+06
JA2278	4	147362	268247	536230	1.02275e+06
JA2331	5	144475	279946	547491	708492
JA0986	11	147470	292635	508686	908240
JA1932	3	192707	379827	710213	927941
JA0963	9	197250	372025	696747	1.3631e+06
JA2240	18	522534	1.01691e+06	1.97581e+06	4.5725e+06
JA1386	24	445561	892181	1.63557e+06	2.58753e+06
JA1496	13	462618	858341	1.63341e+06	3.32447e+06
JA1693	19	519345	1.0005e+06	1.92235e+06	3.65705e+06
JA1499	20	411074	831129	1.47254e+06	2.35585e+06
JA2367	14	597976	1.17068e+06	2.18434e+06	4.76852e+06
JA1613	22	528840	1.05676e+06	1.94313e+06	3.34327e+06
JA1435	16	451429	908441	1.69056e+06	4.43038e+06
JA2357	17	265564	546946	1.01889e+06	1.6483e+06
JA1953	23	295676	584773	1.08304e+06	1.98385e+06
JA1970	15	297971	616495	1.09628e+06	2.11773e+06
JA1359	21	313192	636695	1.21518e+06	2.01719e+06
JA1803	6	241921	493872	979538	1.90345e+06
JA0904	12	303328	628014	1.09451e+06	1.6832e+06
JA2242	1	270952	542929	1.04791e+06	1.87788e+06
JA2241	7	285726	601011	1.1392e+06	2.16839e+06
JA1792	8	169926	328630	635114	1.55489e+06
JA0895	2	157616	308147	592798	1.00464e+06
JA2332	10	167091	321925	628699	1.13294e+06
JA0410	4	199039	367350	657630	940942
JA2082	5	153178	304897	594990	1.09726e+06
JA2389	11	170771	336712	666644	993171
JA2263	3	166521	327168	612666	1.17241e+06
JA2410	9	29432.8	133801	70291.4	165844

Tablo 7.12: Konfigürasyon-15

PMT ID	Kanal No.	Gain (HV600)	Gain (HV650)	Gain (HV700)	Gain (HV750)
JA1971	18	553086	1.02488e+06	2.07053e+06	4.02306e+06
JA1558	24	481137	949338	1.81837e+06	3.16992e+06
JA2368	13	553922	1.14522e+06	2.15225e+06	4.29022e+06
JA1652	19	536361	1.0479e+06	1.99002e+06	4.66233e+06
JA1597	20	503372	999678	1.88462e+06	2.70991e+06
JA1594	14	475301	926885	1.77683e+06	3.95979e+06
JA1658	22	567167	1.11862e+06	2.18858e+06	3.27729e+06
JA1476	16	500496	946235	1.8084e+06	3.29443e+06
JA1754	17	370890	777223	1.41734e+06	2.57356e+06
JA2417	23	361431	679599	1.26884e+06	2.54699e+06
JA0496	15	251435	493285	900220	1.53467e+06
JA1936	21	335876	658132	1.26671e+06	2.56873e+06
JA2134	6	234029	498598	873944	1.40483e+06
JA2139	12	244330	463678	890693	1.33035e+06
JA0872	1	270675	556579	1.07902e+06	1.90619e+06
JA2328	7	268060	526723	983168	2.02828e+06
JA2253	8	174137	339371	674151	1.14872e+06
JA1363	2	168424	366018	633506	1.2918e+06
JA1701	10	254808	462855	846480	1.58721e+06
JA1740	4	148902	274008	527633	951297
JA2071	5	147293	288607	555795	715374
JA0906	11	156710	312399	552523	923555
JA1833	3	222696	465657	853487	1.23358e+06
JA2229	9	164559	326885	613062	1.37287e+06
JA1595	18	513244	1.00326e+06	1.88464e+06	2.20732e+06
JA1576	24	611314	1.17299e+06	2.19464e+06	4.4027e+06
JA2047	13	496140	991082	1.89923e+06	2.84195e+06
JA2468	19	380671	782951	1.4325e+06	2.44932e+06
JA1698	20	503917	1.00619e+06	1.85408e+06	3.48041e+06
JA2084	14	530266	1.03655e+06	1.95958e+06	2.93806e+06
JA1557	22	564116	1.11595e+06	2.06782e+06	3.42493e+06
JA0210	16	459841	910651	1.6908e+06	2.68523e+06
JA2434	17	349099	717428	1.30907e+06	1.96921e+06
JA2137	23	234999	459014	882700	1.62381e+06
JA2355	15	264338	548937	1.00921e+06	1.78586e+06
JA2382	21	320151	642771	1.24436e+06	2.04928e+06
JA2277	6	293942	607694	1.17731e+06	2.35593e+06
JA2525	12	307427	637532	1.13535e+06	2.43762e+06
JA2243	1	295888	592561	1.131e+06	2.07301e+06
JA2040	7	340573	709993	1.32481e+06	2.05954e+06
JA2457	8	177576	338766	649593	1.02596e+06
JA2305	2	151353	286960	549826	1.25116e+06
JA1762	10	153544	289190	551039	1.17906e+06
JA2032	4	154315	291198	551687	1.23519e+06
JA0625	5	86899.7	85319.4	114592	180242
JA1824	11	146006	279938	557739	779811
JA2337	3	130399	253085	457799	619684
JA1641	9	204878	386267	710032	1.10187e+06

Tablo 7.13: Konfigürasyon-16

PMT ID	Kanal No.	Gain (HV600)	Gain (HV650)	Gain (HV700)	Gain (HV750)
JA1580	18	570885	1.04513e+06	2.05835e+06	3.6486e+06
JA2010	24	567630	1.16798e+06	2.23334e+06	4.55043e+06
JA1786	13	554748	1.17983e+06	2.17861e+06	2.99461e+06
JA0825	19	669147	1.29867e+06	2.40711e+06	4.05083e+06
JA1624	20	493614	985241	1.81027e+06	2.95311e+06
JA1943	14	496993	978586	2.01742e+06	3.20189e+06
JA1436	22	544210	1.05026e+06	2.06498e+06	3.14409e+06
JA1633	16	555457	1.06884e+06	2.04312e+06	4.79725e+06
JA2487	17	330217	698103	1.30048e+06	1.92107e+06
JA1555	23	265012	502863	928215	1.68112e+06
JA2303	15	284008	543274	1.0343e+06	1.69938e+06
JA2353	21	272373	536935	994062	2.74148e+06
JA0618	6	238722	498171	874192	2.04467e+06
JA0391	12	299804	540846	1.00414e+06	1.83093e+06
JA1907	1	284275	601192	1.11887e+06	1.56782e+06
JA1346	7	424533	802138	1.57674e+06	2.25571e+06
JA2219	8	182147	357515	699748	1.16421e+06
JA1361	2	168070	365466	633917	1.27436e+06
JA1939	10	162004	343562	622396	914569
JA2201	4	191755	369249	686183	1.20673e+06
JA2004	5	178316	349466	663334	1.00701e+06
JA2067	11	147499	296479	534403	860775
JA1790	3	204664	411193	776222	1.3918e+06
JA1765	9	220482	435697	821715	1.23717e+06
JA1500	18	555632	1.07334e+06	2.07913e+06	2.96959e+06
JA2188	24	547817	1.06544e+06	1.98718e+06	4.81196e+06
JA1600	13	562363	1.0849e+06	2.07295e+06	3.03419e+06
JA1583	19	565201	1.06246e+06	2.0348e+06	3.30388e+06
JA2187	20	530828	1.04137e+06	1.92814e+06	3.60635e+06
JA1428	14	545095	1.06908e+06	2.0104e+06	2.72798e+06
JA1598	22	544352	1.07914e+06	2.00881e+06	4.00733e+06
JA1770	16	566751	1.13933e+06	2.17718e+06	3.48903e+06
JA1660	17	312873	652624	1.18926e+06	1.89081e+06
JA2519	23	328539	660975	1.24243e+06	1.95258e+06
JA1950	15	267413	556452	988478	1.80023e+06
JA2420	21	325868	659158	1.27188e+06	2.74156e+06
JA1919	6	381619	824146	1.44386e+06	2.70926e+06
JA2142	12	238887	495049	913524	2.10598e+06
JA1918	1	333978	670108	1.25385e+06	2.24448e+06
JA1296	7	296121	627704	1.17271e+06	1.61958e+06
JA2384	8	211723	414136	801723	1.19847e+06
JA1995	2	210684	412706	805742	1.41147e+06
JA2480	10	204520	399404	771936	1.11824e+06
JA2268	4	189928	370623	714409	1.37679e+06
JA2409	5	204344	403317	769937	1.15462e+06
JA1261	11	140643	271131	540476	966057
JA2245	3	187158	369514	701323	834721
JA1884	9	261649	528433	979050	2.04743e+06

Tablo 7.14: Konfigürasyon-17

PMT ID	Kanal No.	Gain (HV600)	Gain (HV650)	Gain (HV700)	Gain (HV750)
JA0616	18	210954	470443	792590	1.21673e+06
JA0083	24	750034	1.51742e+06	2.80313e+06	4.57195e+06
JA1987	13	120969	258776	436543	797789
JA0071	19	513743	990509	1.85717e+06	3.21359e+06
JA0121	20	403692	806872	1.5261e+06	2.54488e+06
JA1611	14	387046	736453	1.38166e+06	2.58335e+06
JA0623	22	371565	681627	1.30089e+06	1.76467e+06
JA2043	16	658279	1.33063e+06	2.64542e+06	4.95255e+06
JA1724	17	254422	537233	989909	2.1908e+06
JA0953	23	322316	595856	1.11483e+06	1.92753e+06
JA2098	15	286895	558898	1.04573e+06	2.52814e+06
JA2344	21	267345	502833	929955	1.81432e+06
JA1286	6	342357	633598	1.19616e+06	1.81375e+06
JA2429	12	348356	681455	1.31987e+06	2.00195e+06
JA1681	1	309928	649594	1.217e+06	1.79581e+06
JA2099	7	300162	581991	1.09243e+06	2.13489e+06
JA2092	8	165833	322291	634501	1.39414e+06
JA2287	2	156116	337098	576478	1.03781e+06
JA2387	10	194585	405678	726116	1.47864e+06
JA1804	4	198023	378706	709496	1.14582e+06
JA1152	5	199273	397323	736644	1.3453e+06
JA2451	11	198176	384141	716374	1.15562e+06
JA2474	3	219416	454435	857343	1.38413e+06
JA2274	9	172079	337021	629875	1.04926e+06
JA1461	18	659084	1.26632e+06	2.4763e+06	4.7934e+06
JA2061	24	673545	1.32422e+06	2.50182e+06	5.1247e+06
JA1620	13	648638	1.23314e+06	2.39404e+06	4.67546e+06
JA2060	19	649189	1.25639e+06	2.40015e+06	6.29002e+06
JA1614	20	549730	1.07114e+06	2.00138e+06	4.51357e+06
JA2186	14	595951	1.15409e+06	2.19222e+06	3.0741e+06
JA1917	22	556901	1.09935e+06	2.07279e+06	5.39482e+06
JA2336	16	164535	315393	584771	1.06981e+06
JA1752	17	331537	676135	1.23518e+06	2.43992e+06
JA2006	23	439572	896658	1.65994e+06	2.72794e+06
JA1530	15	289957	604629	1.08307e+06	1.6543e+06
JA2208	21	298912	607876	1.14956e+06	1.51643e+06
JA2342	6	318131	655886	1.27419e+06	1.95362e+06
JA2025	12	271659	571690	1.02521e+06	2.43473e+06
JA1979	1	335011	662624	1.23404e+06	1.9055e+06
JA1644	7	318193	642353	1.18602e+06	2.61429e+06
JA1382	8	194898	383443	724241	1.24876e+06
JA1820	2	231581	470422	868744	1.32293e+06
JA2442	10	225755	441439	841413	1.25655e+06
JA2381	4	223596	442722	824362	1.24546e+06
JA2338	5	152869	302314	578195	1.11771e+06
JA1985	11	191214	393013	728414	1.18981e+06
JA2239	3	198534	394311	745040	1.5098e+06
JA1865	9	202624	397423	754782	1.11122e+06

Tablo 7.15: Konfigürasyon-18

ÖZGEÇMİŞ

1990 yılında İstanbul'da doğdu. Lise öğrenimini Nişantaşı Nuri Akın Lisesi'nde tamamladı. 2007 yılında Pamukkale Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümüne girdi. 2011 yılında mezun olarak yine aynı yıl Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında tezli yüksek lisans programına başladı.

