



**T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



Doktora Tezi

**KUVARS FİBER BAZLI LUMİNOMETRE VE FACET
DEDEKTÖRLERİNİN TASARIMI VE SİMÜLASYON
ÇALIŞMALARI**

Orhan AYDİLEK

Fizik Anabilim Dalı

Yüksek Enerji ve Plazma Fiziği Programı

**DANIŞMAN
Prof. Dr. Suat ÖZKORUCUKLU**

Temmuz, 2024

İSTANBUL

Bu çalışma, 03.07.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Fizik Anabilim Dalı, Yüksek Enerji ve Plazma Fiziğı Programında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Prof. Dr. Suat ÖZKORUCUKLU(Danışman)
İstanbul Üniversitesi
Fen Fakültesi

Prof. Dr. Latife ŞAHİN YALÇIN
İstanbul Üniversitesi
Fen Fakültesi

Prof. Dr. Deniz SUNAR ÇERÇİ
Yıldız Teknik Üniversitesi
Fen Edebiyat Fakültesi

Doç. Dr. Burak BİLKİ
Beykent Üniversitesi
Fen Edebiyat Fakültesi

Dr. Öğr. Üyesi Çağlar ZORBİLMEZ
İstanbul Üniversitesi
Fen Fakültesi

İntihal Programı Beyanı

20.04.2016 tarihli Resmî Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi’nin aboneli olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

Proje Destekleri

Bu tez, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından Proje Numarası: 119N425 ile desteklenmiştir.

Tezden Üretilmiş Yayınların Künye Bilgileri

- [1]. Aydılek, O., Özkorucuklu, S., Çerçi, S., Sunar Çerçi, D., 2023, Study on Geant4 Simulation of Cherenkov Photons Generation and Propagation in Quartz Core Fibers, International Journal of Pure and Applied Sciences, 9 (2), 250-260.
- [2]. Cerci, D.S., Cerci, S., Aydılek, O., Ozkorucuklu, S., Zorbilmez, C., Selivanova, D.A., Popova, E.V., Ilyin, A.L., 2023, Geant4 Study for Geometry of Quartz Fiber Luminometer at CMS HL-LHC, Physics of Particles and Nuclei, 54 (4), 725-728.
- [3]. Selivanova, D. A., Cerci, D.S., Cerci, S., Aydılek, O., Ozkorucuklu, S., et al., 2020, Geant4 quartz fiber simulations as part of luminometer development for CMS, presented at the Journal of Physics: Conference Series, vol. 1690, no. 1.
- [4]. Cerci, S., Albrow, M. G. et al., 2022, FACET: a new long-lived particle detector in the very forward region of the CMS experiment, Journal of High Energy Physics, vol. 2022, no. 6.

ÖNSÖZ

Lisans, yüksek lisans ve doktora eğitimi, evrenin sırlarını ortaya çıkarmak için attığımız adımların, hayatımızın bir parçası olan bilimsel yolculuğumuzun en önemli yapıtaşlarıdır. Bu yapıtaşları, ne kadar bilgi birikimi ile sağlamlaştırılırsa, gelecekte inşa edilecek bilimsel benlik o kadar sağlam olacaktır. Doktora eğitimi bilimsel kimliğimizi oluştururken, hayat görüşümüzü de netleştirecektir.

Doktora eğitimim süresince sabırla ve özveri ile hiçbir yardımını esirgmeden bana destek olan saygıdeğer danışman hocam Prof. Dr. Suat Özkorucuklu'ya çok teşekkür ederim.

Doktora ve doktora süresince her zaman yanımda ve destekçim olan saygıdeğer hocalarım Prof. Dr. Deniz Sunar Çerçi ve Prof. Dr. Salim Çerçi'ye teşekkür ederim. Lisans, yüksek lisans ve doktora eğitimlerim süresince her zaman yanımda olan sevgili Pınar İsel, Güler Aggez, Emre Demir, Mert Y. Akalın ve Burak HACİŞAHİNOĞLU arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Hayatım boyunca beni destekleyen ve Dünya'yı iyi duyguları ile güzelleştiren sevgili eşim Elmas Balcı Aydılek'e en içten dileklerle teşekkür ederim.

Bu tezi, dünyayı daha iyi bir yer haline getiren tüm canlılar için kaleme alıyorum.

Temmuz 2024

Orhan AYDİLEK

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ŞEKİL LİSTESİ	vii
TABLO LİSTESİ.....	xiii
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ	xiv
ÖZET	xvi
SUMMARY	xviii
1. GİRİŞ	1
2. GENEL KISIMLAR.....	3
2.1. PARÇACIKLARIN MADDE İLE ETKİLEŞİMİ	3
2.1.1. Standart Model	3
2.1.2. Hadronik Etkileşimler	6
2.1.3. Elektromanyetik Etkileşimler	7
2.1.4. Cherenkov Radyasyonu	11
2.2. PARÇACIK YOĞUNLUĞU VE LUMİNOSİTE	13
2.3. LUMİNOMETRE DEDEKTÖRÜ	17
2.3.1. Kuvars Çekirdekli Fiberler	19
2.3.2. Dönüştürücü Plakalar	21
2.3.3. Foto-Dedektörler	23
2.4. FACET PROJESİ.....	25
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	27
3.1. LUMİNOMETRE DEDEKTÖRÜ	27
3.1.1. Luminometre Dedektörü Bileşenleri	27
3.1.1.1. Kuvars Çekirdekli Fiberler ve Geant4 Simülasyonu	27
3.1.1.2. Dönüştürücü Plakalar	33
3.1.1.3. Foto-Dedektörler	33
3.1.2. Luminometre Dedektör Tasarımları	35
3.2. GEANT4	38
3.2.1. Geant4 Fiziksel Süreçleri ve Fizik Listeleri	39
3.2.2. Geant4 Olay Üretici	40

3.2.3. Simülasyon Verilerinin Depolanması ve Analizi	43
3.3. FACET GEANT4 SİMÜLASYONU	43
4. BULGULAR.....	54
4.1. LUMİNOMETRE DEDEKTÖRÜNÜN BİLEŞENLERİNİN TESTLERİ	54
4.1.1. Kuvars Çekirdekli Fiberlerin Simülasyon Testleri.....	54
4.1.2. Dönüştürücü Plakaların Simülasyon Testleri	58
4.2. LUMİNOMETRE DEDEKTÖRÜNÜN TESTLERİ.....	60
4.3. FACET GEANT4 SİMÜLASYON TESTLERİ.....	77
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	87
KAYNAKLAR.....	94
ÖZGEÇMİŞ.....	97

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Standart Model.....	4
Şekil 2.2: Parçacıkların sınıflandırılması.	4
Şekil 2.3: Elektron-pozitron anihilasyonunun Feynman diyagramı gösterimi.	7
Şekil 2.4: Fotonların ve madde etkileşim biçimlerinin fotonların enerjilerine bağlı dağılımları.....	8
Şekil 2.5: Compton saçılmasının Feynman diyagramı ile gösterimi.	9
Şekil 2.6: Çift oluşumu Feynman diyagramı.	10
Şekil 2.7: Cherenkov radyasyonunun geometrik gösterimi.	12
Şekil 2.8: Sabit bir hedefe çarpan parçacıkların (a) ve hızlandırıcı içerisinde çarpıştırılan parçacıkların (b) şematik gösterimleri [2–4].	14
Şekil 2.9: Yıllara göre Büyük Hadron Çarpıştırıcısının tahmini luminosite değerleri kırmızı noktalar en yüksek luminosite değerlerini ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$), mor çizgi ise luminosite değerlerinin artışını (fb^{-1}) göstermektedir [9].	17
Şekil 2.10: Luminometre dedektörünün bileşen şeması.	19
Şekil 2.11: Optik fiber katmanları.....	20
Şekil 2.12: Optik fiberlerde sönmülenmenin azaltılmasının 1965'ten başlayarak geçmiş on yıllar içindeki evrimi [12].	21
Şekil 2.13: Çeşitli türlerdeki foto-dedektörler (SiPM, PMT, MCP).	23
Şekil 2.14: Yarı iletken bir foto-dedektör olan SiPM hücreli yapısı [14, 15].	24
Şekil 2.15: Facet projesi dedektör sistemi şeması [21].	25
Şekil 3.1: Molex FBP ve FSHA fiberlerinin katmanları [9, 10].	28
Şekil 3.2: Molex FBP ve FSHA fiberlerinin kuvars çekirdeklerinin (kırmızı) kırınım indislerinin, kuvars kaplamalarının (gri) kırınım indislerinin ve foton taşıyabilmesinin bir ölçütü olan sönmülenme değerlerinin (mavi ve yeşil) dalga boyuna bağlı değişimleri [9, 10, 11].	28

Şekil 3.3: 200 metre uzunluğundaki FBP fiberinin ilk 10 metrelik bölümüne farklı dozlarda (kGy cinsinden) radyasyon uygulanması sonucu oluşan radyasyon kaynaklı zayıflama [26].	29
Şekil 3.4: FSHA fiberinin 54 kGy radyasyona maruz kalması sonucu oluşan radyasyon kaynaklı zayıflama [27].	30
Şekil 3.5: Molex Fiber içerisinde oluşan ve ilerleyen Cherenkov fotonları [28].	30
Şekil 3.6: Kuvars çekirdekli fiberin Geant4 simülasyon uzayına yerleşimi ve parçacık üreticinin konumlandırılması.	32
Şekil 3.7: Geant4 simülasyonu uzayında kuvars çekirdekli fiberin üzerine gönderilen yüklü parçacıkların çarpma noktaları.	32
Şekil 3.8: Ketek (PM3315-WB-C0) SiPM 3 bölgeden oluşan fiziksel yapısı ve ölçüleri [30].	34
Şekil 3.9: Ketek SiPM için dalga boyuna karşılık verimlilik grafiği [30].	34
Şekil 3.10: Fiberlerin foto-dedektör camı üzerine yerleşim geometrileri.	35
Şekil 3.11: Luminometre dedektörünün Geant4 arayüzü aracılığı ile 2 farklı tasarımının görünümü.	35
Şekil 3.12: Luminometre tasarımında dönüştürücü plakaların düzeni ve ölçüleri.	36
Şekil 3.13: Dönüştürücü plakalar içerisine yerleştirilecek çeşitli sayılardaki fiber gruplarının ve fiberlerin kanal numaralarının konumları.	37
Şekil 3.14: Luminometre dedektörü üzerine rastgele gönderilen test parçacığı geantino ile gösterilen yüzey tarama alanı.	41
Şekil 3.15: LHC’de CASTOR’un konumu.	42
Şekil 3.16: CMS HepMC verileri ile Geant4 uzayında luminometre dedektörünün Geant4 arayüzündeki görünümü.	42
Şekil 3.17: FACET Geant4 simülasyonu arayüzünden görünümü.	43
Şekil 3.18: LHC hüzme hattında protonları yönlendiren ve hüzme hattı içerisinde tutarak hızlanmalarını sağlayan magnetler ve sistemin şeması [9].	44
Şekil 3.19: FACET’in önünde yer alan ve LHC’de protonları hüzme hattında tutmakla sorumlu D1 dipolünün GEANT4 arayüzünde görünümü.	45
Şekil 3.20: FACET’in önünde yer alan ve LHC’de protonları hüzme hattında tutmakla sorumlu D1 dipolünün manyetik alan vektörlerinin gösterimi ve teknik çizimi [9].	45
Şekil 3.21: FACET tasarımında Hodoskop önünde yer alan zırhın geometrik yapısı ve dairesel manyetik alanının gösterimi.	46

Şekil 3.22: FACET için kuvars barlardan oluşan hodoskop tasarımının geant4 arayüzünde (solda) ve 3d tasarımda (sağda) görünümü.	46
Şekil 3.23: FACET için kuvars barlardan oluşan hodoskop tasarımının teknik çizimi.	47
Şekil 3.24: FACET dedektör penceresinden hemen sonra 3 metrelik mesafeye konumlandırılan Silikon İz-Takip dedektörleri.	48
Şekil 3.25: Kalorimetreler içerisinden geçen parçacıkların oluşturdukları parçacık yağmurları [35].	50
Şekil 3.26: HGCAL elektromanyetik ve hadronik kalorimetrelerinde kullanılan altıgen modüllerin (0.52 cm^2) teknik çizimi (solda) ve GEANT4 ile tasarımı (sağda) [9].	51
Şekil 3.27: FACET dedektör sistemi için altıgen modüllerden oluşan bir kalorimetre plakasının teknik çizimi (solda) ve GEANT4 ile tasarımı (sağda).	52
Şekil 3.28: FACET iz-takip dedektörü arkasına yerleştirilen kalorimetrelerin plakalarının z-ekseni boyunca dizilimi.	52
Şekil 3.29: HEPMC kullanılarak simülasyona entegre edilen ve FACET için geliştirilen FLUKA'da üretilen parçacıkların simülasyon arayüzünde FACET üzerine doğru ilerleyişi.	53
Şekil 4.1: FBP fibere 11 farklı açı ve 7 farklı noktadan çarpan yüklü parçacıkların (77 durum) fiber içerisinde oluşturdukları Cherenkov fotonlarının sayıları.	54
Şekil 4.2: Fibere 45 derece (solda) ve 90 derece (sağda) çarpma açısı ile çarpan yüklü parçacıklar ve ürettikleri Cherenkov fotonları.	55
Şekil 4.3: FBP ve FSHA fiberlerine 11 farklı açı ve 2 farklı noktadan çarpan yüklü parçacıkların fiber içerisinde oluşturdukları Cherenkov fotonlarının sayıları.	55
Şekil 4.4: FBP fiberi için açık uçta tyvek yansıtıcı kullanılan ve yansıtıcı kullanılmayan durumlarda çarpma açılarına bağlı foton verimliliği.	56
Şekil 4.5: FBP fiberi için açık uçta yansıtıcı kullanılmayan durumlarda çeşitli fiber uzunlukları için çarpma açılarına bağlı foton verimliliği.	57
Şekil 4.6: FBP fiberi için açık uçta tyvek yansıtıcı kullanılan durumlarda çeşitli fiber uzunlukları için çarpma açılarına bağlı foton verimliliği.	57
Şekil 4.7: FBP ve FSHA fiberlerinin iki farklı uzunluğu için çarpma açılarına bağlı foton verimliliği.	58
Şekil 4.8: 4 farklı alaşıma sahip dönüştürücü plakaların çarpışma yüzeyine 3 farklı enerjiye sahip elektronlar gönderilmesi sonucu oluşan parçacıkların z-eksenindeki dağılımları.	59

Şekil 4.9: M1 ve M2 tasarımlarının 100 GeV ve 50 GeV enerjili elektronlar ile testlerinin sonucunda fiber grupları içerisinde oluşan toplam fotonların sayılarının dağılımları.....	60
Şekil 4.10: M1 ve M2 tasarımlarının 100 GeV ve 50 GeV enerjili elektronlar ile testlerinin sonucunda foto-dedektöre ulaşan toplam fotonların sayılarının dağılımları.....	61
Şekil 4.11: M1 ve M2 tasarımlarının 100 GeV enerjili elektronlar ile testlerinin sonucunda foto-dedektöre ulaşan ve foto-dedektörde algılanan fotonların fiber gruplarının kanallarına bağlı verimlilikleri.	62
Şekil 4.12: Z eksenı boyunca tüm fiberler içerisinde oluşan fotonların sayısal dağılımı.	63
Şekil 4.13: Fiber gruplarının kanallarına bağlı olarak, fiber gruplarının ilk 1 metresi ve ilk 1 metre sonrası, fiberler içerisinde oluşan foton sayılarının dağılımları.....	63
Şekil 4.14: Fiber gruplarının 1,v3,v7 ve 9 adet fiber içerdikleri durumlar için fiber grupları içerisinde oluşan fotonların sayıları.	65
Şekil 4.15: Fiber gruplarının 1, 3, 7 ve 9 adet fiber içerdikleri durumlar için foto-dedektöre ulaşan foton sayıları.	65
Şekil 4.16: FBP ve FSHA fiberleri kullanılarak, 50 GeV ve 100 GeV elektronlar ile test edilen luminometre dedektörünün fiber grupları içerisinde oluşan foton sayılarının fiber grup kanallarına bağlı dağılımları.	66
Şekil 4.17: FBP ve FSHA fiberleri kullanılarak, 50 GeV ve 100 GeV elektronlar ile test edilen luminometre dedektörünün fiber gruplarının foto-dedektöre taşıdığı foton sayılarının fiber grup kanallarına bağlı dağılımları.....	67
Şekil 4.18: 54 kGy radyasyona maruz kalan 12 metrelik FSHA fiber için fiber grupları içerisinde oluşan ve foto-dedektöre ulaşan foton sayılarının fiber grup kanallarına bağlı değişimi.	68
Şekil 4.19: 100 GeV enerjili elektronların luminometre dedektörü üzerine gönderilmesi sonucu, fiber gruplarındaki fiberler tarafından üretilen ve foto-dedektöre taşınan fotonların toplam sayısı ile fiber gruplarına bağlı olarak değişen foton sayılarının incelenmesi.....	70
Şekil 4.20: 100 GeV enerjili elektronların dönüştürücü plakalara gönderilmesi sonucu oluşan ikincil parçacık yağmurunun üç boyutlu gösterimi.....	71
Şekil 4.21: 100 GeV enerjili elektronların fiber gruplarına çarpması sonucu oluşan elektrik yüklü ikincil parçacıkların, fiberler içinde Cherenkov fotonları üretmesi ve bu fotonların oluşum pozisyonlarının üç boyutlu dağılımları.	71
Şekil 4.22: 100 GeV enerjili elektronların fiber grupları üzerine gönderilmesi sonucu oluşan fotonların, foto-dedektöre ulaşma zamanları.	72

Şekil 4.23: CMS bölgesinde, LHC'deki 14 TeV toplam enerjiyle gerçekleşen proton-proton çarpışmalarının sonucunda oluşan birincil parçacıklarından luminometre dedektörü tasarımına çarpan birincil parçacıklar, dönüştürücü plakalarda oluşan ikincil parçacıklar ve fiberlere çarpan tüm parçacıklar.	73
Şekil 4.24: CMS bölgesinde, LHC'deki 14 TeV toplam enerjiyle gerçekleşen proton-proton çarpışmalarının sonucunda oluşan birincil parçacıkların luminometre dedektörüne çarpması sonucu dönüştürücü plakalar içerisinde oluşan ikincil parçacık yağmurunun 3 boyutlu gösterimi.	74
Şekil 4.25: CMS bölgesinde, LHC'deki 14 TeV toplam enerjiyle gerçekleşen proton-proton çarpışmalarının sonucunda oluşan birincil parçacıkların luminometre dedektörüne çarpması sonucu fiber grupları içerisindeki fiberlere çarpan elektrik yüklü ikincil parçacıkların oluşturdukları Cherenkov fotonlarının oluştuğu pozisyonların 3 boyutlu dağılımları.....	75
Şekil 4.26: CMS bölgesinde, LHC'deki 14 TeV toplam enerjiyle gerçekleşen proton-proton çarpışmalarının sonucunda oluşan birincil parçacıkların luminometre dedektörüne çarpması sonucu fiber gruplarında oluşan toplam foton sayısı ile bu gruplar içerisindeki fiberlerin oluşturduğu ve foto-dedektöre taşıdığı fotonların sayılarının fiber gruplarına bağlı değişimleri.	76
Şekil 4.27: CMS bölgesinde, LHC'deki 14 TeV toplam enerjiyle gerçekleşen proton-proton çarpışmalarının sonucunda oluşan birincil parçacıkların luminometre dedektörüne çarpması sonucu fiber gruplarında oluşan fotonların foto-dedektöre ulaşma zamanları.	77
Şekil 4.28: FACET GEANT4 simülasyonunda CMS bölgesinde, LHC'deki 14 TeV toplam enerjiyle gerçekleşen proton-proton çarpışmalarının sonucunda oluşan birincil parçacıklardan D1 dipolü yüzeyine çarpanların oluşturduğu 2 boyutlu dağılım.....	78
Şekil 4.29: FACET GEANT4 simülasyonunda CMS bölgesinde, LHC'deki 14 TeV toplam enerjiyle gerçekleşen proton-proton çarpışmalarının sonucunda oluşan birincil parçacıklardan D1 dipolünü geçerek çıkış yüzeyine ulaşan parçacıkların 2 boyutlu dağılım.....	79
Şekil 4.30: FACET GEANT4 simülasyonunda CMS bölgesinde, LHC'deki 14 TeV toplam enerjiyle gerçekleşen proton-proton çarpışmalarının sonucunda oluşan birincil parçacıkların D1 dipolünün etkisi ile FACET boyunca hareketleri.....	79
Şekil 4.31: Zırhın giriş yüzeyine ulaşan ($z = 98$ m) parçacıkların çeşitli zırh uzunlukları için dağılımları.	80
Şekil 4.32: Zırhın çıkış yüzeyine ulaşan parçacıkların çeşitli zırh uzunlukları için dağılımları.....	81
Şekil 4.33: İki farklı FACET geometrisi için GEANT4 simülasyonu içerisinde oluşan birincil parçacıkların parçacık türüne göre sayısal dağılımları.	84

Şekil 4.34: İki farklı FACET geometrisi için hodoskop yüzeyine ulaşan birincil parçacıkların parçacık türüne göre sayısal dağılımları.	84
Şekil 4.35: İki farklı FACET geometrisi için dedektör penceresine ulaşan birincil parçacıkların parçacık türüne göre sayısal dağılımları.	84
Şekil 4.36: İki farklı FACET geometrisi için kalorimetreye ulaşan birincil parçacıkların parçacık türüne göre sayısal dağılımları.	85
Şekil 4.37: Kalorimetre üzerine 100 GeV enerjili π^+ parçacığı gönderilmesi sonucu (10k olay) kalorimetre plakalarında biriken enerji miktarlarının plaka sırasına göre dağılımları [36].	85



TABLO LİSTESİ

	Sayfa No
Tablo 2.1: Dünyanın çeşitli yerlerindeki parçacık hızlandırıcıları ve luminosite değerleri.....	16
Tablo 2.2: Tek-modlu ve çok-modlu fiberlerin teknik özellikleri.....	20
Tablo 2.3: Bazı elementlerin deneysel radyasyon uzunlukları verileri [14].....	22
Tablo 3.1: Kuvars çekirdekli fiber simülasyonu için deney parametreleri.....	33
Tablo 4.1: FACET için geliştirilen iki farklı geometrik tasarımın değişen parametreleri.....	82
Tablo 4.2: 2 farklı tasarım için FACET GEANT4 simülasyonu sonucunda elde edilen 5 bölgeden alınan olay başına parçacık sayıları dağılımları.....	82

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler

Açıklama

L_{int}	: Integre Luminosite
β	: Rölativistik hız sabiti
c	: Işığın vakum altında hızı
V_p	: Parçacığın hızı
σ	: Tesir kesiti
x_0	: Radyasyon uzunluğu
Z	: Atom numarası
A	: Mol kütlesi
θ_c	: Cherenkov açısı
b	: Barn (tesir kesiti birimi)
h	: Planck Sabiti
E_b	: Bağlanma Enerjisi
E_K	: Kinetik Enerji

Kısaltmalar

Açıklama

APD	: �ıř Foto-Diyot
CCD	: Yük Kaplinli Aygıt (Charge-Coupled Device)
CERN	: Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi
CMOS	: Tamamlayıcı Metal-Oksit-Yarıiletken (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor)
CMS	: Kompakt Müon Solenoidi (Compact Muon Solenoid)
FBP	: FBP600660710 (molex marka kuvars çekirdekli fiber modeli)
FSHA	: FSHA600630800 (molex marka kuvars çekirdekli fiber modeli)
FACET	: CMS için tasarlanan alt dedektör sistemi
Geant4	: Geometri ve İzleme (Geometry and Tracking)
HepMC	: Yüksek Enerji Fiziği Monte Carlo (High Energy Physics Monte Carlo)
HERA	: Hadron Elektron Halka Hızlandırıcısı (Hadron Electron Ring Accelerator)

HL-LHC	: Yüksek Luminositeli Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (High Luminosity Large Hadron Collider)
KED	: Kuantum Elektrodinamiği
KEKB	: Yüksek Enerji Hızlandırıcı Araştırma Organizasyonu (Japan)
KETEK	: Ketek marka PM3315-WB-C0 modeli SiPM
K. Ö.	: Kısa ömürlü (parçacıklar için)
KRD	: Kuantum Renk Dinamiği
L	: Luminosite
LED	: Fotodiyot (Light-Emitting Diode)
LEP	: Büyük Elektron-Positron Çarpıştırıcısı (Large Electron Positron Collider)
LHC	: Large Hadron Collider (Büyük Hadron Çarpıştırıcısı)
MCP	: Mikro Kanallı Plaka Dedektörü
NIR	: Yakın Kızılötesi
NM	: Sayısal Açıklık (Numerical Aperture)
PEP	: Pozitron-elektron Projesi (Positron Electron Project)
PMT	: Foto-Çoğaltıcı Tüp
Pythia	: Parçacık çarpışmalarını simüle etmek için kullanılan bir uygulama
ROOT	: Cern tarafından geliştirilen analiz uygulaması
SiPM	: Silikon foto-çoğaltıcı (Silicon Photomultiplier)
SPS	: Süper Proton Senkrotronu
U. Ö.	: Uzun ömürlü (parçacıklar için)
UV	: Ultraviyole

ÖZET

DOKTORA TEZİ

KUVARS FİBER BAZLI LUMİNOMETRE VE FACET DEDEKTÖRLERİNİN TASARIMI VE SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI

Orhan AYDİLEK

İstanbul Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Suat ÖZKORUCUKLU

Günümüz dünyasında evrenin yapı taşlarını keşfetmek için ileri teknolojiye sahip kapsamlı yüksek enerji fiziği deneyleri yapılmaktadır. Bu deneyler sayesinde yeni fizik teorileri ortaya konabilir ve nadiren görülen parçacıklar keşfedilebilir. Parçacık hızlandırıcı deneylerinde, parçacıkların çarpıştığı merkezi kütle enerjisi, araştırmanın derinliğini tam olarak yansıtmaz. Luminosite, parçacık hızlandırıcı deneylerinde başka bir kritik faktördür; parçacık demetlerinin birim zamanda ne kadar sık çarpıştığını gösterir ve dolayısıyla deneylerin hassasiyetini belirler. Yüksek luminosite, nadir olayların tespit edilme olasılığını artırarak, daha derin ve zengin bilimsel verilerin elde edilmesine olanak tanır.

Bu araştırmanın temel amaçlarından biri, yoğun radyasyon koşullarında dahi uzun süreler boyunca etkin çalışabilen, üstün hassasiyetle ölçüm yapabilen, yüksek mekanik dayanıklılığa sahip ve modern teknolojilerle donatılmış kompakt bir luminometre dedektörünü simülasyon ortamında geliştirmektir. Bu çalışma aynı zamanda CMS için bir alt dedektör sistemi olarak tasarlanan FACET dedektörünün simülasyon ortamında detaylı bir biçimde geliştirilmesini amaçlamaktadır.

Luminometre dedektörü kuvars çekirdekli fiberler, dönüştürücü plakalar ve foto-detektörler olmak üzere 3 ana bileşenden oluşmaktadır. FACET dedektörü ise hodoskop, bozunma hacmi, silikon iz-takip dedektörleri, elektromanyetik ve hadronik kalorimetreler olmak üzere birçok dedektörü bir arada bulunduran dedektör sistemidir. Luminometre ve FACET

dedektörlerine ait bileşenlerin her birinin deneysel verileri Geant4 simülasyon uygulamasına entegre edilmiştir ve her bir donanım geometrik ve yapısal olarak optimize edilmiştir. Bu optimizasyonlar sonucunda luminometre ve FACET dedektörleri tüm bileşenlerinin bir araya getirilmesi ile tasarlanarak Geant4 simülasyon uzayında test edilmiştir. Bu simülasyonlar sayesinde luminometre ve FACET dedektörlerinin tasarım süreci büyük ölçüde iyileştirilmiş ve dedektörlerin gerçek koşul senaryoları için uygunluğu teyit edilmiştir.

Luminometre dedektörü parçacık hızlandırıcılarında kullanılabileceği gibi, nükleer enerji, nükleer tıp (PET/MRI), ulusal güvenlik, askeri uygulamalar, telekomünikasyon ve kuantum kriptografi gibi birçok uygulama alanına sahiptir. FACET dedektörü ise uzun ömürlü parçacıkların ve karanlık fotonların doğasını keşfederek yeni fizik araştırmalarının önünü açacaktır.

Temmuz 2024, 117 sayfa.

Anahtar kelimeler: Luminometre, FACET, dedektör, yüksek enerji fiziği, parçacık fiziği, kuvars çekirdekli fiberler

SUMMARY

Ph.D. THESIS

DESIGN AND SIMULATION STUDIES OF QUARTZ FIBER BASED LUMINOMETER AND FACET DETECTORS

Orhan AYDİLEK

İstanbul University

Institute of Graduate Studies in Sciences

Department of Physics

Supervisor: Prof. Dr. Suat ÖZKORUCUKLU

In today's world, comprehensive high-energy physics experiments equipped with advanced technology are conducted to explore the fundamental building blocks of the universe. These experiments facilitate the development of new physical theories and the discovery of rarely observed particles. In particle accelerator experiments, the center-of-mass energy of colliding particles may not accurately represent the depth of the research. Another critical factor in these experiments is luminosity, which indicates the frequency of collisions between particle beams per unit of time and thus determines the precision of the experiments. Increased luminosity improves the likelihood of detecting rare phenomena, thereby allowing for the acquisition of more in-depth and extensive scientific data.

The aim of this study is to develop a compact luminometer detector that provides precise measurements, can operate effectively even under high radiation levels, includes durable

mechanical components, and is equipped with modern technologies. This study also aims to extensively develop the FACET detector, designed as a sub-detector system for CMS, in a simulation environment.

The luminometer detector consists of three main components: quartz core fibers, converter plates, and photodetectors. The FACET detector, on the other hand, comprises various detectors such as hodoscopes, decay volumes, silicon tracking detectors, electromagnetic and hadronic calorimeters. Each of these components has been integrated into the Geant4 simulation application, and each hardware has been geometrically and structurally optimized. As a result of these optimizations, the luminometer and FACET detectors have been designed by assembling all components and tested within the Geant4 simulation space. These simulations significantly improved the design process of the detectors and confirmed their suitability for real-world scenarios.

The luminometer detector can be utilized in a particle accelerator, as well as in various application areas including nuclear energy, nuclear medicine (PET/MRI), national security, military applications, telecommunications, and quantum cryptography. The FACET detector, on the other hand, will pave the way for new physics research by exploring the nature of long-lived particles and dark photons.

July 2024, 117 pages.

Keywords: Luminometer, FACET, detector, high energy physics, particle physics, quartz core fibers

1. GİRİŞ

Evrenin temel yapı taşları olan temel parçacıkları ve bu parçacıkların birbirleriyle etkileşimlerini anlamamız, fizik biliminin ilk amaçlarından biridir. Yüksek enerji fiziği bu amaç doğrultusunda parçacıklar ile çarpışma deneyleri gerçekleştiren kritik bir bilim dalıdır. Ancak, bu deneylerin başarısı çarpışma olaylarının enerjilerine ve oluşan parçacıkların gözlemlenebilmesine bağlıdır. Çarpışma enerjilerinin yüksek olması tek başına yeterli değildir ve yüksek luminosite (ışınlılık) gereklidir. Yüksek luminosite değerleri, daha fazla çarpışma olayının gözlemlenmesine ve nadir parçacıkların tespitine olanak tanır. Luminositeyi hassas bir şekilde ölçmek için kullanılan cihazlar ise luminometre dedektörleridir.

Bu çalışma, yüksek radyasyon koşullarında çalışabilen ve yüksek hassasiyet sunan bir luminometre dedektörü geliştirmeyi hedeflemektedir. Hızlandırıcılar gibi uzun süreli deneylerde zaman içinde radyasyon, elektronik cihazlara zarar verebilir. Benzer şekilde, insanların sürekli olarak giremediği nükleer tesisler gibi yerlerde, yüksek radyasyona dayanıklı donanımların kullanılması gerekmektedir. Yüksek radyasyon altında çalışabilen bir sistem, bu tür durumlar için son derece faydalı olacaktır. Bu çalışmanın amacı, Geant4 simülasyon uygulaması ile radyasyon dayanımı yüksek, verimli ve tamamen optimize edilmiş bir luminometre dedektörü geliştirmektir.

Genel kısımlar başlığı altında, dünya çapında tanınan parçacık fiziği deneylerinde luminosite ölçümünün önemi ve gereklilikleri detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Geliştirmeyi planladığımız modern ve ileri teknoloji luminometre dedektörlerinin temel bileşenleri ve bu bileşenlerin teorik çalışma prensipleri ile geçmişten bugüne gelişimleri incelenmiştir. Luminometre dedektörlerinin detaylı bir şekilde ele alındığı bu kısımda, aynı zamanda luminometre dedektörlerin çalışma prensipleri de ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

Malzeme ve yöntem, luminometre dedektörü tasarımlarımızda kullanacağımız spesifik donanımları ve yazılımları detaylıca incelediğimiz bölümdür. Luminometre dedektörünün en önemli bileşeni olan kuvars çekirdekli yüksek radyasyon dayanımlı optik fiberler, radyasyon uzunluğu ve arka plan radyasyonlarına bakılarak özenle seçilen dönüştürücü plakalar ve yeni nesil teknolojiye sahip radyasyon dayanımı yüksek foto-dedektörler bu başlık altında

incelenmiştir. Tüm çalışmaya yön veren ve deneysel verilerin entegre edildiği Geant4 simülasyon uygulaması ve ROOT analiz uygulaması hakkında bilgiler verilmiştir.

Bulgular kısmında ise luminometre dedektörünün bileşenleri üzerine detaylıca çalışılarak optimizasyonlar yapılmıştır. Tüm bileşenler optimize edildikten sonra luminometre dedektörü için iki farklı model ortaya çıkarılmış ve testler yapılmıştır. Bu testler simülasyon ortamında hem temel parçacıklar ile hem de LHC hüzme hattında CMS bölgesinde gerçekleştirilmiştir.

Luminometre dedektörünü geliştirilmesi sürecinde bileşenleri üzerine yapılan çalışmalar, bu bileşenleri farklı alanlarda ve farklı tasarımlarda kullanmak isteyenler için de rehberlik edecektir. Optimize edilmiş bir luminometre dedektörü mobilize halde çalışabilecek şekilde inşa edilebilecektir. Kullanılan donanımlar hem mobilize edilebilir hem de birleştirilerek daha büyük dedektörler inşa edilebilir.

Geliştirilen luminometre dedektörünün, hızlandırıcı deneyleri dışında nükleer enerji, nükleer tıp, ulusal güvenlik, askeri uygulamalar, telekomünikasyon ve kuantum kriptografi gibi çok çeşitli alanlarda da kullanım potansiyeli bulunmaktadır.

2. GENEL KISIMLAR

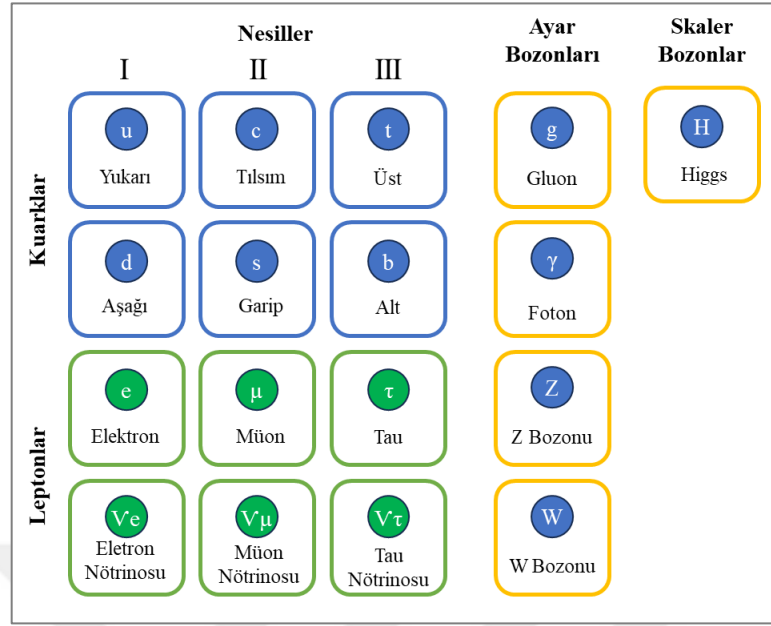
2.1. PARÇACIKLARIN MADDE İLE ETKİLEŞİMİ

Evrenin temel yapı taşları olan parçacıklar, çeşitli kuvvetler aracılığıyla madde ile etkileşime girerler. Bu etkileşimler, doğadaki dört temel kuvvet (elektromanyetik kuvvet, güçlü nükleer kuvvet, zayıf nükleer kuvvet ve kütleçekim kuvveti) ile gerçekleşir. Parçacıkların etkileşimlerini anlamak, evrenin temel işleyişini ve doğasını keşfetmek için önemli bir araçtır. Standart Model adı verilen teorik bir tablo kullanılarak bu etkileşimler ve etkileşime giren parçacıklar açıklanır.

Parçacıkların madde ile etkileşimlerini anlamak, evrenin temel işleyişine dair derin bir anlayış sağlar. Standart Model, bu etkileşimlerin büyük bir kısmını açıklamakta başarılı olsa da hala keşfedilmeyi bekleyen birçok gizem ve bilinmeyen vardır. Parçacık fiziği alanındaki araştırmalar, bu etkileşimlerin daha derinlemesine anlaşılması ve evrenin temel doğasının daha iyi kavranması için devam etmektedir. Bu araştırmalar, evrenin başlangıcından bugüne gelişimini anlamamıza yardımcı olur.

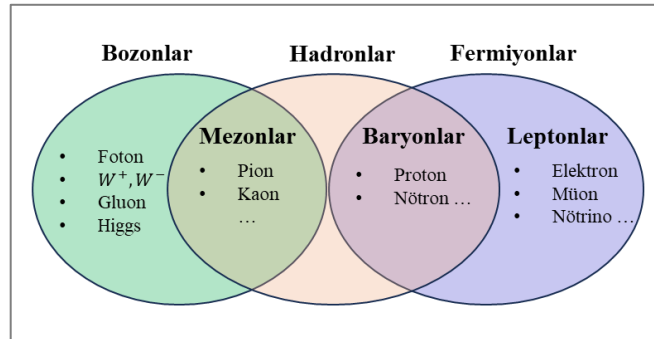
2.1.1. Standart Model

Parçacık fiziğinde en kapsamlı teori olan Standart Model, evrendeki temel parçacıkları ve bu parçacıklar arasındaki etkileşimleri açıklayan sistematik bir teoridir. 1970'lerde geliştirilmiş olan bu model, günümüzde birçok deneysel veriyle doğrulanmış olup, doğadaki üç temel kuvveti (elektromanyetik, zayıf nükleer ve güçlü nükleer kuvvetler) ve bunları taşıyan parçacıkları kapsar.



Şekil 2.1: Standart Model.

Şekil 2.1’de gösterilen Standart Model, fermiyonlar ve bozonlar olmak üzere Şekil 2.2’de gösterildiği gibi iki ana tür parçacığı kapsar. Fermiyonlar maddeyi oluşturan parçacıklar iken, bozonlar kuvvet taşıyıcı parçacıklardır. Fermiyonlar, maddeyi oluşturan temel parçacıklardır ve kuarklar ve leptonlar olmak üzere iki ana gruba ayrılırlar. Kuarklar, protonlar ve nötronlar gibi hadronların yapı taşlarıdır. Altı farklı kuark türü vardır. Bunlar yukarı kuark, aşağı kuark, tılsım kuarkı, garip kuark, üst kuark ve alt kuark olarak adlandırılırlar. Kuarklar, güçlü nükleer kuvvetin etkileşim parçacığı olan gluonlar ile bir arada tutulur ve hadronları oluştururlar. Hadronlar da içerdikleri kuark çeşnilerine göre baryonlar ve mezonlar olmak üzere 2 ana gruba ayrılırlar.



Şekil 2.2: Parçacıkların sınıflandırılması.

Baryonlar, üç kuarktan oluşan hadronlardır. Protonlar (iki yukarı kuark ve bir aşağı kuark) ve nötronlar (iki aşağı kuark ve bir yukarı kuark) en çok bilinen ve atomun çekirdeğini meydana

getiren baryonlardır. Baryonların elektrik yükleri proton ve nötronda olduğu gibi değişkenlik gösterebilir.

Mezonlar ise bir kuark ve bir anti-kuarktan oluşan hadronlardır. Pionlar (π) ve kaonlar (K), mezonlara örnektir. Pionlar, pozitif, negatif veya nötr olabilir ve genellikle nükleonlar (proton ve nötronlar) arasındaki güçlü kuvvetin aktarımında rol oynar. Kaonlar ise, daha ağır mezonlar olup, çeşitli bozunma süreçleri ve zayıf etkileşimlerde önemlidir. Mezonlar, kısa ömürlüdür ve genellikle diğer parçacıklara bozunurlar.

Leptonlar, doğrudan hadron olmayan ve güçlü nükleer kuvvetten etkilenmeyen temel parçacıklardır. Altı lepton türü vardır. Bunlar sırasıyla elektron, elektron nötrinosu, müon, müon nötrinosu, tau ve tau nötrinosudur. Elektron, müon ve tau yüklü leptonlardır ve elektromanyetik kuvvetten etkilenirler. Nötrinolar ise elektrik yüküne sahip değildir ve çok nadir etkileşimde bulunurlar.

Bozonlar, kuvvet taşıyıcı parçacıklardır ve doğadaki temel kuvvetleri iletirler. Standart Model'de dört ana kuvvet taşıyıcı bozon bulunur. Foton, elektromanyetik kuvveti taşır ve elektrik yüklü parçacıklar arasındaki etkileşimleri yönetir. Gluon, güçlü nükleer kuvveti taşır ve kuarklar arasındaki etkileşimi sağlar. Güçlü kuvvet, atom çekirdeğindeki protonlar ve nötronlar arasındaki güçlü bağları oluşturur. W ve Z bozonları, zayıf nükleer kuvveti taşır ve radyoaktif bozunma gibi süreçlerde rol oynar. Bu kuvvet, bir nötronun protona dönüşmesi gibi parçacıkların tür değiştirmesine neden olabilir. Higgs bozonu, parçacıklara kütle kazandıran mekanizmanın anahtarıdır. Higgs alanı ile etkileşime giren parçacıklar, kütle kazanır ve bu etkileşim Higgs bozonu aracılığıyla açıklanır.

Parçacıkların ve kuvvetlerin bu düzeni, evrenin mikroskobik dünyasının temel işleyişini anlamamıza yardımcı olur. Standart Model, bu parçacıkların ve kuvvetlerin etkileşimlerini büyük bir başarıyla açıklar, ancak hala keşfedilmeyi bekleyen birçok gizem ve bilinmeyen vardır. Örneğin, kütleçekim kuvveti Standart Model'in bir parçası değildir ve karanlık madde ile karanlık enerji gibi evrenin büyük kısmını oluşturan bileşenler hakkında henüz tam bir bilgiye sahip değiliz. Bu nedenle, parçacık fiziği alanındaki araştırmalar, Standart Model'in ötesine geçerek evrenin daha derinlemesine anlaşılmasına katkıda bulunmayı amaçlamaktadır. Gelecekteki deneyler ve teorik çalışmalar, bu modelin sınırlarını test ederek, evrenin temel doğasına dair daha geniş bir anlayış geliştirmemizi sağlayacaktır.

2.1.2. Hadronik Etkileşimler

Hadronik etkileşimler, hadron adı verilen parçacıklar arasındaki kuvvetler ve etkileşimler anlamına gelir. Hadronlar, protonlar ve nötronlar gibi 3 kuarktan oluşan baryonlar ile iki kuarktan oluşan mezonları kapsayan parçacıklardır. Hadronlar, güçlü nükleer kuvvet tarafından bir arada tutulan parçacıklardır ve bu nedenle hadronik etkileşimler genellikle güçlü etkileşimler olarak da adlandırılır. Fakat Hadronların zayıf ve elektromanyetik olarak da etkileşebileceği unutulmamalıdır.

Güçlü etkileşimler, kuantum renk dinamiği (KRD) adı verilen teorik çerçevede açıklanır. KRD, güçlü etkileşimleri açıklayan bir kuantum alan teorisi olup, kuarklar arasındaki kuvvetleri yani hadronik etkileşimleri tanımlar. KRD'nin temel ilkelerinden biri, kuarkların "renk yükü" adı verilen bir kuantum sayısına sahip olmasıdır. Bu renk yükü, gerçekte renk ile ilgili olmamakla birlikte, fiziksel kuramda üç tür yükü (kırmızı, yeşil, mavi) belirtmek için kullanılır. Her kuark bir renk yüküne sahiptir ve gluonlar, kuarklar arasındaki renk yükünü değiştirerek etkileşimi sağlar. Gluonlar da renk yükü taşır, bu nedenle gluonlar kendi aralarında da etkileşime girebilir.

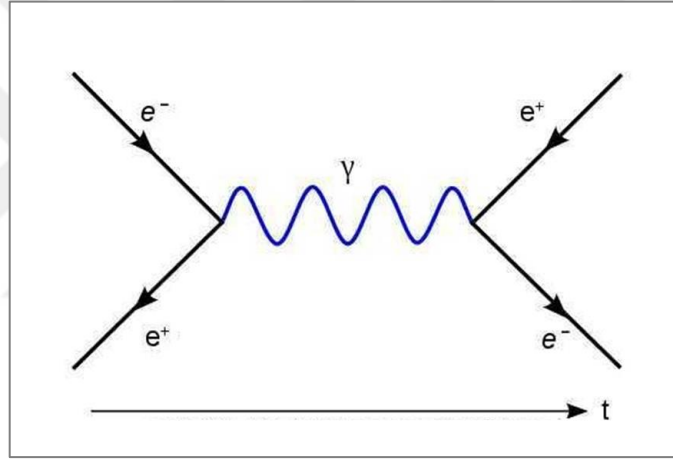
Renk yükünün korunumu, kuarkların ve gluonların yalnızca renk-nötr kombinasyonlar oluşturmalarına izin verir. Bu durum, kuarkların ve gluonların serbest halde bulunamayıp her zaman hadronlar gibi bileşik parçacıklar içinde yer almasını gerektirir. Kuarkların hapsolmesi olarak adlandırılan bu özelliği, kuarkların ve gluonların serbest halde gözlemlenememesine neden olur.

KRD'nin bir diğer önemli özelliği de asimptotik özgürlüktür. Bu özellik, yüksek enerjilerde veya kısa mesafelerde kuarklar ve gluonlar arasındaki etkileşimin zayıflamasını ifade eder. Bu durum, parçacık çarpışmalarında yüksek enerjilerde kuarkların ve gluonların birbirinden bağımsız hareket edebilmelerine olanak tanır. Asimptotik özgürlük, KRD'nin deneysel doğrulamaları arasında önemli bir yer tutar. Gluonların hapsolmesi yüksek enerjilerde azalır.

Hadronik etkileşimlere örnek olarak, iki protonun çarpışması sonucunda ortaya çıkan hadron-hadron etkileşimleri verilebilir. Bu etkileşimler sırasında protonlar birbirleriyle gluon alışverişi yaparlar ve yeni hadronlar oluşur. Örnek olarak, proton-proton çarpışmaları, büyük hadron çarpıştırıcısı (LHC) gibi yüksek enerjili parçacık hızlandırıcılarında gerçekleştirilen deneylerde incelenmektedir.

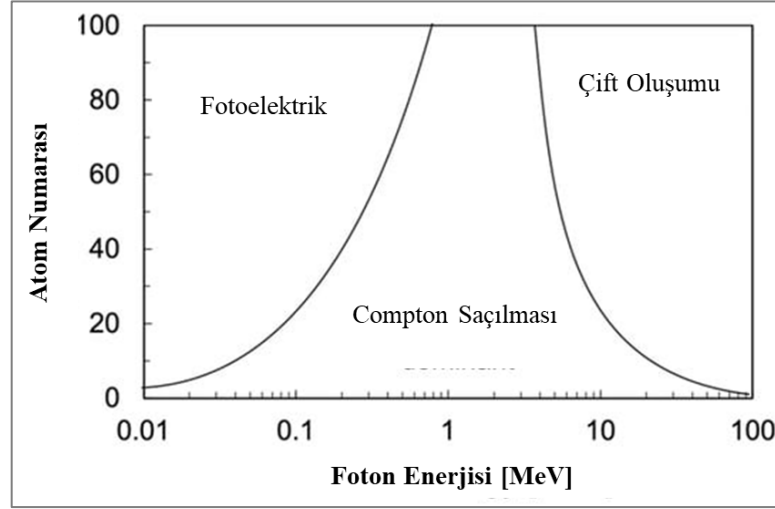
2.1.3. Elektromanyetik Etkileşimler

Elektromanyetik etkileşimler, doğanın dört temel kuvvetinden biri olan elektromanyetik kuvvet ile ve yüklü parçacıklar arasındaki etkileşimleri tanımlar. Bu etkileşim, hem günlük yaşamımızda gözlemlediğimiz birçok fenomenin ardında yatan mekanizmadır hem de modern fizik ve teknolojinin temel taşlarından biridir. Elektromanyetik kuvvet, elektrik ve manyetik alanlar aracılığıyla iletilir ve Coulomb yasası çerçevesinde elektrik yükleri arasındaki çekim ve itme kuvvetlerini ifade eder. Aynı yüklü parçacıklar birbirini iterken, zıt yüklü parçacıklar birbirini çeker. Bu kuvvet, Kuantum Elektrodinamiği (KED) adı verilen bir kuantum alan teorisi ile açıklanır. KED, elektromanyetik kuvvetin fotonlar adı verilen kütlesiz ara parçacıklar tarafından taşındığını belirtir.



Şekil 2.3: Elektron-pozitron anihilasyonunun Feynman diyagramı gösterimi [1].

Elektron-Pozitron anihilasyonu, Şekil 2.3'te gösterildiği gibi bir elektronun ve bir pozitronun bir araya gelerek yok olması ve enerjilerinin fotonlar şeklinde serbest bırakılması sürecidir [1–3]. Bu süreç, parçacık fiziği ve kuantum elektrodinamiği teorisi içinde önemli bir fenomendir. Elektron ve pozitronun enerjileri bir foton ile taşınmaktadır ve bu olay elektromanyetik etkileşim ile meydana gelmektedir.



Şekil 2.4: Fotonların ve madde etkileşim biçimlerinin fotonların enerjilerine bağlı dağılımları [1].

Elektromanyetik etkileşimlerin bazı temel örnekleri arasında yer alan fotoelektrik olay, çift oluşumu ve Compton saçılması, modern fiziğin ve kuantum mekaniğinin derinlemesine anlaşılmasına büyük katkıda bulunmuş önemli fiziksel olaylardır. Bu fenomenler, fotonların bir dalgadan öte bir parçacık davranışında da bulunduklarını göstermektedir ve klasik fizik anlayışının ötesine geçen yeni bir teorik çerçevenin geliştirilmesine olanak sağlamıştır. Şekil 2.4'te fotoelektrik olay, Compton saçılması ve çift oluşumunun atomlar üzerine etkileşen fotonların enerjilerine bağlı değişimleri verilmiştir. Atom numaraları arttıkça fiziksel etkileşimlerin türü değişirken, foton enerjileri arttıkça fiziksel olaylarda değişimler meydana gelmektedir.

Fotoelektrik olay, bir malzeme yüzeyine fotonlar düştüğünde, bu yüzeydeki atomların yörüngelerinden elektronların serbest bırakılması sürecidir. Bu olay, ışığın kuantum doğasını ve enerjinin kesikli yapısını anlamada büyük bir adım olmuştur. Albert Einstein, 1905 yılında fotoelektrik olayı açıklamak için ışığın kuantum teorisini kullanmış ve bu çalışmasıyla Nobel Fizik Ödülü kazanmıştır.

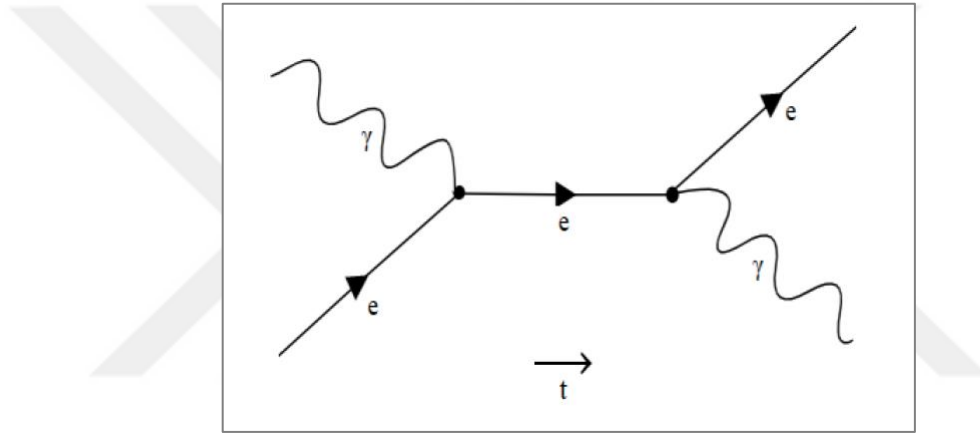
Fotoelektrik olay, klasik fizik teorilerinin açıklamakta yetersiz kaldığı bazı önemli detayları içerir. İlk olarak, bir yüzeyden elektron koparmak için fotonun enerjisi, belirli bir eşik enerjisinden daha büyük olmalıdır. Eşik enerjisinin altında kalan fotonlar, ne kadar yoğun olursa olsun, elektron koparamaz. Bu, klasik dalga teorisiyle açıklanamayan bir durumdur, çünkü klasik teoriye göre ışığın şiddeti (yoğunluğu) arttıkça enerji de artmalı ve yeterli

enerjiye ulaşıldığında elektronlar serbest kalmalıdır. Ancak deneyler, sadece fotonun enerjisinin belirleyici olduğunu göstermektedir.

Fotoelektrik olayda elektronların yüzeyden koparması için gereken enerji, yüzeye çarpan fotonun enerjisi ile ilişkilidir. Bu ilişkiyi veren denklem,

$$E_K = h\nu - E_B \quad (2.1)$$

şeklindedir. Burada E_B elektronun bağlanma enerjisi, $h\nu$ fotonun enerjisi, E_K elektronun kinetik enerjisidir. E_K sıfırdan büyük olduğunda bağlanma enerjisi ile yüzeyden koparılan elektron E_K enerjisi ile serbest kalacaktır.

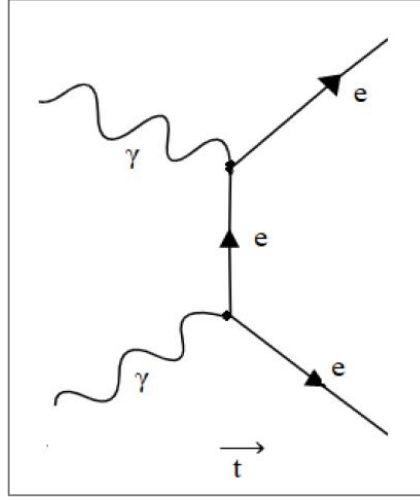


Şekil 2.5: Compton saçılmasının Feynman diyagramı ile gösterimi [1].

Compton saçılması, bir fotonun serbest bir parçacıkla (elektron) etkileşimine denir [4]. Etkileşimden önce ve etkileşimden sonra toplam momentum ve toplam enerji korunur. Korunum yasalarından yola çıkarak **Şekil 2.5**'te verilen Feynman diyagramı için Compton denklemini aşağıdaki gibi elde ederiz.

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos\theta) \quad (2.2)$$

Burada h Planck sabiti, m_e elektronun kütlesi ve c ışık hızıdır. λ' dalga boyuna sahip bir foton bir elektron ile etkileşime girerek λ dalga boyuna sahip bir foton ortaya çıkmıştır. Foton ve parçacık belirli bir açıyla sapmışlardır. Bu açı θ ile gösterilmektedir ve bu açıya saçılma açısı denir.



Şekil 2.6: Çift oluşumu Feynman diyagramı [1, 5].

Çift oluşumu ise, **Şekil 2.6**'da Feynman diyagramında gösterildiği gibi yüksek enerjili bir fotonun (genellikle gama ışını) bir çift parçacığa (pozitron-elektron) dönüşmesi sürecidir. Yüksek enerjili foton ortamdaki atom çekirdeği ile etkileştiği için pozitron ve elektrona dönüşür [1, 5]. Çift oluşumunda da fotoelektrik olayda ve Compton saçılmasında olduğu gibi enerji ve momentum korunur.

$$E_{e-} + E_{e+} = h\nu - 2m_{e_0}c^2 \quad (2.3)$$

Elektron pozitron çifti oluşumu için en az $2m_{e_0}c^2$ 'lik enerji gerekir. Elektron ve pozitron durağan kütlesi ile hesap yapılırsa 1.02 MeV değerinde bir eşik enerjisi elde edilir. Bu enerji üzerinde bir enerjiye sahip foton (gamma) çift oluşumu gösterecektir. Bu eşik enerjisinden daha fazla enerjiye sahip bir foton çift oluşumu gösterirse, kalan enerji bu iki parçacığa kinetik enerji olarak yansıtacaktır.

Sonuç olarak, elektromanyetik etkileşimler doğanın temel yapı taşlarından biridir ve birçok fiziksel fenomenin altında yatan kuvvettir. Fotoelektrik olay, çift oluşumu ve Compton saçılması gibi spesifik örnekler, bu etkileşimlerin farklı enerji bölgelerinde ve ortam koşullarda nasıl çalıştığını gösterir. Elektromanyetik kuvvetin anlaşılması hem teorik ve deneysel fizik alanlarında hem de teknolojiye büyük ilerlemelere yol açmıştır. Bu etkileşimlerin incelenmesi, doğanın temel fizik kanunları hakkında derin bir bilgi sağlar.

2.1.4. Cherenkov Radyasyonu

Işık, evrenimizdeki en temel fenomenlerden biridir ve onun davranışları, modern fizik ve mühendislikte önemli bir rol oynamaktadır. Işığın vakum altında sabit bir hızda (yaklaşık 299,792,458 m/s) ilerlediği bilinmektedir. Ancak, ışık farklı maddeler içinden geçerken hızı değişir [6].

Işık, elektromanyetik bir dalga olarak, maddelerin atomları ve molekülleri ile etkileşime girer. Bu etkileşim, ışığın maddeler içindeki hızını etkiler. Ana etkileşim mekanizmaları şunlardır: Soğurma ve yeniden yayılım, kırılma indisi ve dalga boyu değişimi. Soğurma ve yeniden yayılım sürecinde, ışık atomlar tarafından emilir ve daha sonra yeniden yayılır. Bu süreç, ışığın maddenin içinden geçerken hızının azalmasına neden olur. Kırılma indisi, bir maddenin ışığı ne kadar yavaşlattığının bir ölçüsüdür ve maddenin optik yoğunluğuna bağlıdır. Dalga boyu değişimi ise, ışığın farklı ortamlarda farklı dalga boylarına sahip olması ve bu durumun ışığın hızını etkilemesi ile ilgilidir.

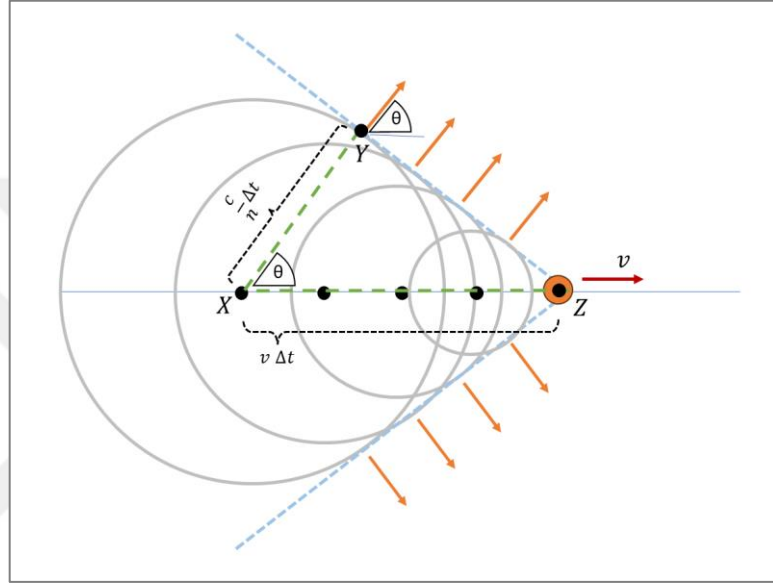
Farklı ortamlardaki ışık hızının değişimi, birçok teknolojik ve bilimsel uygulamada önemlidir. Örneğin, fiber optik kablolar, ışığın farklı ortamlardaki hız değişimini kullanarak veri iletimi sağlar. Tıbbi görüntüleme teknikleri, özellikle optik koherens tomografi (OCT), ışığın dokular içindeki hız değişimlerini kullanarak yüksek çözünürlüklü görüntüler elde eder. Astronomide, ışığın farklı ortamlardaki hız değişimleri, uzak yıldız ve galaksiler hakkında bilgi edinmek için kullanılır.

20. yüzyılın önemli fizikçilerinden biri olan Pavel Alekseyevich Cherenkov (Черенкова, Cerenkov, Ćerenkov) bugün Cherenkov radyasyonu ya da ışıınımı olarak bilinen yeni bir radyasyon türünün keşifidir [6, 7].

Cherenkov, radyum gama ışınlarının neden olduğu ışıma fenomenini detaylı bir şekilde incelemiştir ve bu ışımının, görünür ışık altında luminofor ışığının yayılması ile olan ilişkisini araştırmıştır. Bu çalışmalar Cherenkov ışıması olarak bilinen yeni bir radyasyon türünün keşfine yol açmıştır [7, 8].

Cherenkov radyasyonu, bir yüklü parçacığın, ışığın o ortamdaki faz hızından daha hızlı hareket ettiği bir dielektrik (elektriksel olarak polarize edilebilir) ortamdan geçtiğinde meydana gelir. Bu durum, özellikle nükleer reaksiyonlar ve parçacık hızlandırıcılarında

gözlemlenir. Cherenkov radyasyonu, parçacığın elektrik alanı tarafından ortamın elektriksel olarak polarize edilmesi ve parçacığın yeterince hızlı hareket etmesi durumunda, ortamın sınırlı tepki hızı nedeniyle parçacığın arkasında ilerleyen fotonlar bırakması sonucu oluşur. Bu fotonlara Cherenkov fotonları denir. Elektrik yüklü bir parçacık kırınım indisi farklı dielektrik bir ortama girdiğinde Cherenkov fotonları bir koni şeklinde oluşacaktır. Bu koniye Cherenkov konisi denir [7].



Şekil 2.7: Cherenkov radyasyonunun geometrik gösterimi.

Şekil 2.7’te gösterildiği gibi, yüklü bir parçacık rölativistik hızlarda hareket ettiğinde dielektrik içerisinde Cherenkov ışıınımı yaparak ilerler. Buradan yola çıkarak

$$\cos(\theta_c) = \frac{XY}{XZ} = \frac{\frac{c}{n}\Delta t}{v\Delta t} = \frac{1}{\beta n} \quad (2.4)$$

eşitliğini elde ederiz. Burada θ Cherenkov açısıdır ve Cherenkov açısını

$$\theta_c = \cos^{-1}\left(\frac{1}{\beta n}\right) \quad (2.5)$$

ifadesi ile elde ederiz. Burada rölativistik hız sabiti, $\beta = \frac{v}{c}$ ‘dir. Cherenkov açısı parçacığın hızı ve ortamın kırınım indisi ile orantılıdır.

Cherenkov radyasyonu, yüklü parçacığın ortamda $\frac{c}{n} < V_p < c$ koşulunu sağlayacak şekilde hareket ettiği durumda görülebilir. Burada c vakumdaki ışık hızı, n ortamın kırılma indisi ve V_p parçacığın hızıdır. Örneğin, ortam su ise ve $n=1.33$ ise, $0.75c < V_p < c$ koşulu geçerlidir. Bu koşul sağlanırsa su içerisinde Cherenkov fotonları oluşacaktır [5, 6].

2.2. PARÇACIK YOĞUNLUĞU VE LUMİNOSİTE

Luminosite (Luminosity, Işınlılık) kavramı, bilim dünyasında farklı disiplinlerde farklı anlamlara sahip olmakla birlikte, genellikle bir kaynağın ne kadar enerji yaydığını veya bir sürecin ne kadar enerji ürettiğini ifade eder. Bu kavramın en yaygın kullanıldığı alanlar astronomi, astrofizik ve parçacık fiziği olup, her birinde farklı yönleriyle ön plana çıkar.

Astronomi ve astrofizikte, "Luminosite" bir yıldızın, galaksinin veya diğer gök cisimlerinin uzaya ne kadar ışık ve diğer elektromanyetik radyasyonları yaydığını ifade eder. Bu, gök cisimlerinin enerji üretimini ve bu enerjinin uzayın derinliklerine nasıl yayıldığını anlamak için kritik bir ölçüttür. Yıldızların yaşam döngüleri, enerji üretim mekanizmaları ve evrenin genişlemesi gibi konuları anlamak için luminosite kavramı temel bir role sahiptir. Örneğin, bir yıldızın parlaklığı, onun kütlesi, sıcaklığı ve yaşam süresi hakkında önemli bilgiler verir.

Parçacık fiziğinde ise "Luminosite", biraz daha farklı bir bağlamda kullanılır. Burada, luminosite, parçacık hızlandırıcılarında gerçekleştirilen çarpışma deneylerinin etkinliğini ölçmek için kullanılır. Yüksek enerji ve hızlandırıcı fiziğinde, parçacıkların yüksek enerjilerde çarpıştırılması hem farklı türlerde hem de miktarlarda ikincil parçacıkların üretimini sağlar. Bu süreçte, ikincil parçacıkların sayısı ve çeşitliliği arttıkça, dedektörlerin bu parçacıkları gözlemlene şansı artar. Özellikle, yüksek enerjiler ağır ve nadiren oluşan parçacıkların üretilmesine olanak tanır, bu da nadir parçacıkların tespit olasılığını artırır.

Luminosite, parçacık hızlandırıcılarındaki çarpışmaların sıklığını ve yoğunluğunu veren bir terimdir. Hızlandırıcılarda, birim alandan birim zamanda geçen parçacık sayısı olarak ifade edilir. Bu, hızlandırıcıdaki çarpışma olaylarının ne kadar sık gerçekleştiğinin de bir göstergesidir. Luminosite, çarpışma deneylerinde oluşacak olayların sayısını tahmin etmek için kullanılır ve deneylerin tasarımı ve analizi için hayati öneme sahiptir.

Luminosite hesaplanırken başka önemli bir terim tesir kesitidir. Tesir kesiti (σ) belirli bir çarpışma olayının meydana gelme olasılığını ölçer. Bu, çarpışan parçacıkların birbirleriyle

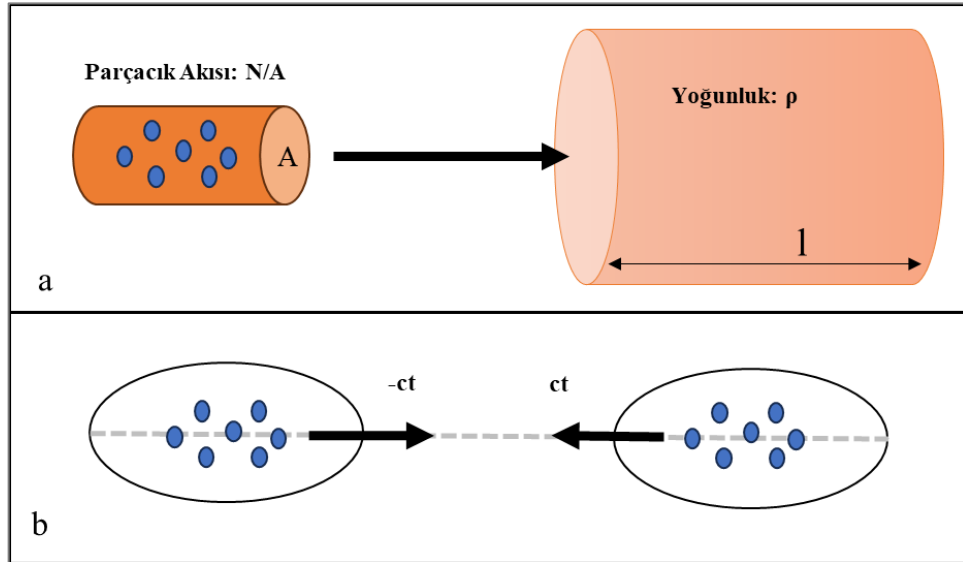
etkileşime girebilme olasılıklarının bir ölçüsüdür. Tesir kesitinin büyüklüğü, parçacıkların türüne, enerjilerine ve etkileşim türüne bağlıdır. Tesir kesiti ne kadar büyükse, o etkileşimin gerçekleşme olasılığı o kadar yüksektir. Birim olarak genellikle *barn* (b) kullanılır ve $1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$ 'dir.

Matematiksel olarak, luminosite (L) ve tesir kesitinin (σ) çarpımı, birim zamanda (dt) gerçekleşen olay sayısını (dN) verir. Luminosite eşitliğini elde edersek

$$L = \frac{1}{\sigma} \frac{dN}{dt} \quad (2.6)$$

şeklinde olur [9–11]. Burada Luminositenin zaman ve alan çarpımı başına olay sayısı olarak boyutlandırıldığı görülmektedir. SI birim sisteminde $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ birimiyle ifade edilir. Eğer luminositenin zaman üzerinden integrali alınırsa, belirli bir zaman periyodu boyunca gerçekleşen çarpışma olaylarının toplamı elde edilmiş olur ve bu değere Integre Luminosite (Integrated Luminosity) denir.

$$L_{int} = \int L dt \quad (2.7)$$



Şekil 2.8: Sabit bir hedefe çarpan parçacıkların (a) ve hızlandırıcı içerisinde çarpıştırılan parçacıkların (b) şematik gösterimleri [10–12].

Luminositeyi formüle ettikten sonra özel durumlarını inceleyebiliriz. Şekil 2.8’te gösterildiği gibi bir parçacık sabit bir hedefe çarptığında luminosite

$$L = \frac{N}{A} \rho l \quad (2.8)$$

şeklinde elde edilir [9–12]. Burada ρ silindirin yoğunluğu ve l silindirin uzunluğudur. Hızlandırıcılarda çarpıştırılan parçacıklar için luminosite hesabı da farklılık gösterir. Şekil 2.8’te gösterildiği gibi iki parçacık grubu çarpıştığında ortaya çıkacak luminosite değerini formüle edersek

$$L = f \frac{N_1 N_2}{A} \quad (2.9)$$

olur. Burada f çarpışma frekansı, N_1 ilk hüzmeki parçacıklar, N_2 ikinci hüzmeki parçacıklar ve A çarpışma alanını temsil etmektedir. Eğer rölativistik hesaplama yaparsak luminosite değeri

$$L = \iiint_{-\infty}^{\infty} \rho_1(x, y, s - ct) \rho_2(x, y, s + ct) dx dy dt ds \quad (2.10)$$

şeklinde elde edilir. Burada ρ_1 ve ρ_2 parçacık hüzmelerinin yoğunlukları, c ışık hızı, t zamanı ifade etmektedir. Luminosite her bir durum için özelleştirilerek formüle edilebilir, fakat temelde birim alandan birim zamanda geçen parçacık sayısını vermektedir [9–12].

Parçacık hızlandırıcıları, temel parçacıkları anlama arayışımızda ve birçok teknolojik uygulamada hayati önem taşıyan cihazlardır. Bu sofistike makineler, yüksek enerjili parçacıklar üretmek ve bu parçacıkları çeşitli deneylerde kullanmak üzere tasarlanmıştır. Parçacık hızlandırıcıları amaçları, yapıları ve çalışma prensiplerine göre ayrılır, her biri benzersiz özelliklere ve uygulama alanlarına sahiptir.

Lineer hızlandırıcılar, ya da daha yaygın bilinen adıyla Linacs, parçacıkları düz bir hatta hızlandıran cihazlardır. Genellikle düşük ila orta enerji seviyelerinde çalışan bu hızlandırıcılar, özellikle tıpta, radyoterapi uygulamalarında ve araştırma laboratuvarlarında kullanılır. Bu hızlandırıcılar, doğrusal yapıları sayesinde, daha basit ya da kompakt tasarımlara olanak sağlar.

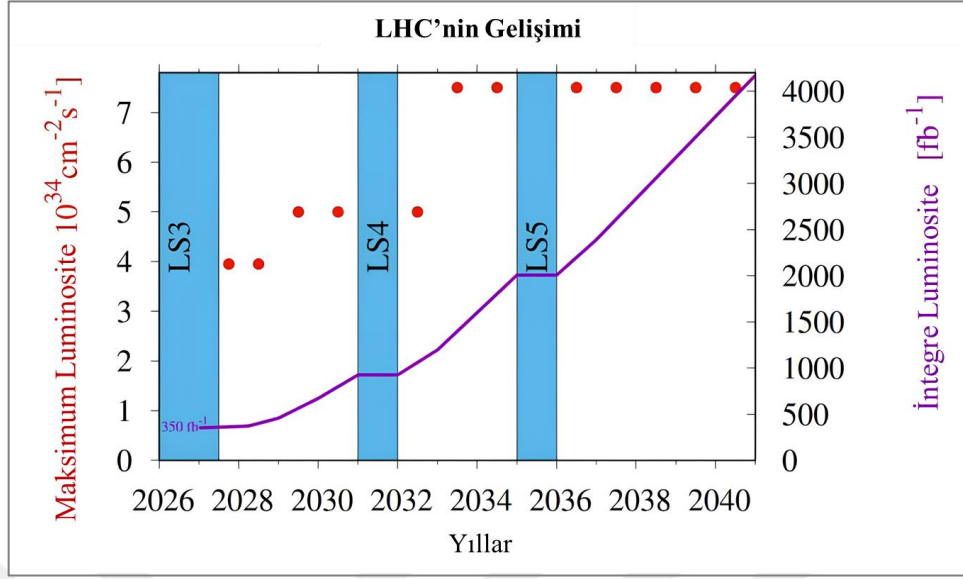
Dairesel hızlandırıcılar, parçacık fiziği ve diğer bilimsel alanlarda önemli bir yere sahiptir. Bu hızlandırıcılar içinde yer alan çeşitli tipler, farklı çalışma prensiplerine ve uygulama alanlarına sahiptir. En yaygın olanları sinkrotronlar, siklotronlar ve betatronlardır ve her biri belirli deneylerde kullanılır.

Her bir hızlandırıcı tipi, belirli bir uygulama veya araştırma gereksinimi doğrultusunda tasarlanmıştır. Bu çeşitlilik, parçacık fiziği, malzeme bilimi, tıp ve diğer birçok alanda ilerlemeler sağlamada kritik bir rol oynamaktadır. Parçacık hızlandırıcılarının bu geniş yelpazesi, bilimin en temel sorularını araştırırken bize eşsiz fırsatlar sunar ve bu, onları modern bilim ve teknolojinin en önemli araçlarından biri yapar. İnsanlık yıllarca hızlandırıcı teknolojisini kullanarak çeşitli deneyler yapmışlardır. Bu deneylerde en önemli parametreler ile hızlandırılan parçacıklar, bu parçacıkların çarpıştırıldığı enerjileri ve deneylerde elde edilen luminosite değerleridir. Her bir deney parçacık fiziğine ve bilime büyük katkılar sağlamıştır. Tablo 2.1’de gösterilen dünyaca ünlü deneylerin bir kısmını inceleyebiliriz.

Tablo 2.1: Dünyanın çeşitli yerlerindeki parçacık hızlandırıcıları ve luminosite değerleri.

Deney	Enerji (GeV)	Luminosite ($cm^{-2}s^{-1}$)
SPS ($p\bar{p}$)	315 x 315	6×10^{30}
Tevatron ($p\bar{p}$)	1000 x 1000	50×10^{30}
HERA (e^+p)	30 x 920	40×10^{30}
LHC (pp)	7000 x 7000	10000×10^{30}
HL-LHC (pp)	13000 x 13000	$(5-7) \times 10000 \times 10^{30}$
LEP (e^+e^-)	105 x 105	100×10^{30}
PEP (e^+e^-)	9 x 3	3000×10^{30}
KEKB (e^+e^-)	8 x 3.5	10000×10^{30}

LHC, CERN’de bulunan dünyanın en büyük ve en güçlü parçacık hızlandırıcısıdır. 14 TeV merkezi çarpışma enerji seviyelerinde çalışır ve $10^{34} cm^{-2}s^{-1}$ luminositeye sahiptir. Higgs bozonunun keşfinde merkezi bir rol oynamış ve parçacık fiziğinin birçok alanında devam eden araştırmalar için temel oluşturmuştur [13].



Şekil 2.9: Yıllara göre Büyük Hadron Çarpıştırıcısının tahmini luminosite değerleri kırmızı noktalar en yüksek luminosite değerlerini ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$), mor çizgi ise luminosite değerlerinin artışını (fb^{-1}) göstermektedir [13].

Şekil 2.9'te gösterildiği gibi HL-LHC, LHC'nin bir yükseltmesidir, daha yüksek enerji ve luminosite değerlerine ulaşmayı hedeflemektedir. Proton-proton çarpışmasının 14 TeV merkezi çarpışma enerji seviyelerinde olması ve $(5-7) \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ arasında bir luminosite değerlerine ulaşması planlanmaktadır [13]. Bu yükseltme, Standart Model ötesi modellerin araştırılmasında kritik öneme sahip olacaktır.

2.3. LUMİNOMETRE DEDEKTÖRÜ

Parçacık hızlandırıcılarında kullanılan luminometre dedektörleri, çarpışma olaylarının yoğunluğunu ve sıklığını ölçmek için tasarlanmış özel cihazlardır. Bu dedektörler, çarpışma olaylarının luminositesini doğru bir şekilde ölçerek, deneylerin verimliliğini ve elde edilen veri miktarını değerlendirmek için kritik öneme sahiptir.

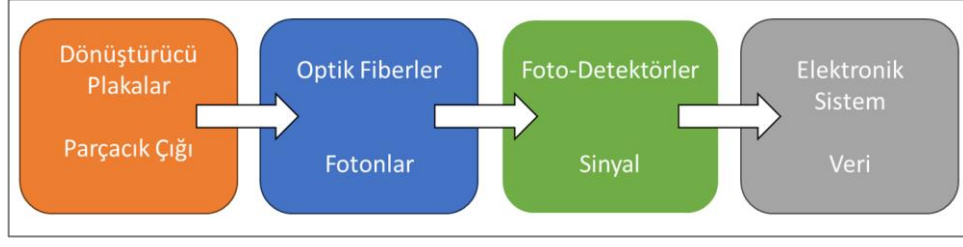
Parçacık hızlandırıcılarındaki çarpışma deneyleri, luminometre dedektörlerini yoğun radyasyon seviyelerine maruz bırakır. Bu radyasyon seviyesi, cihazlarda malzeme yorgunluğuna, elektronik bileşenlerin bozulmasına, kalibrasyon ve performans kaybına sebep olabilir. Bu etkiler, zamanla dedektörlerin hassasiyetini ve doğruluğunu azaltabilir, bu da deney sonuçlarının güvenilirliğini tehlikeye atar.

Bu zorlukların üstesinden gelmek için, luminometre dedektörleri radyasyona dayanıklı malzemeler kullanılarak tasarlanmalıdır. Bu çalışmada yüksek radyasyon altında bile hassas

ölçümler yapabilen bir luminometre tasarlanması amaçlanmıştır. Luminometre dedektörlerinin yüksek radyasyon altında çalışabilmesi için tüm donanımlarının yüksek radyasyona maruz kaldığında çalışabilmesi gerekir.

Yüksek hassasiyetli ve radyasyon dayanımı yüksek bir luminometre dedektörü tasarımı yapmak için öncelikle luminometre dedektörünün hangi ortamda çalışacağına karar verilmelidir. İlk testlerimizi simülasyon ortamında ve LHC hattında CMS dedektörü önünde, 15m mesafede yapılmıştır. Bu testler LHC'nin hüzm hattına (beam line) 2m mesafede olacaktır. Bu konumda yüksek radyasyona maruz kalacak olan luminometre dedektörü özel olarak tasarlanmalıdır. Bu tasarım yüksek radyasyon dayanımı sayesinde hem LHC'nin her bölgesinde hem de nükleer tesisler gibi yüksek radyasyon içeren başka tesislerde de kullanılabilir.

LHC'nin hüzm hattına yakın bölgesine radyasyona karşı yüksek direnç gösteren ve uzun süreler çalışabilecek donanımlar yerleştirilmelidir. Bu bölgede radyasyondan zarar görecekt tüm donanımı radyasyonlu alandan uzaklaştırarak kullanılmıştır. Bunu yaparken radyasyon dayanımı yüksek optik kuvars fiberler kullanılmıştır. Bu fiberler sayesinde tespit edilecek parçacıkların oluşturduğu fotonlar daha az radyasyonlu bölgeye yerleştirilmiş olan foto-dedektörlere ve dedektör sisteminin elektronik kısmına aktarılmaktadır. Böylece elektronik donanım ve foto-dedektörler yüksek radyasyona maruz kalmadan daha uzun süreler çalışabilmektedirler. Bu çalışmada, göz önünde bulundurulan koşullar altında, geliştirilmeye açık donanımlar kullanılarak hassas ölçümler yapabilen, yüksek radyasyon dayanımına sahip bir luminometre dedektörü geliştirilmektedir. Şekil 2.10'te gösterildiği gibi luminometre dedektörünün geliştirilmesi için dönüştürücü plakalar, optik kuvars fiberler ve foto-dedektörler olmak üzere üç ana donanım kullanılmıştır. Bu donanımlar luminometre dedektörünü oluştururken, SİPM üzerinde algılanan fotonlar elektronik sistem tarafından sinyale dönüştürülerek kayıt altına almaktadır.



Şekil 2.10: Luminometre dedektörünün bileşen şeması.

Dönüştürücü plakalara çarpan parçacıklar, ikincil parçacıklar oluşturmaktadır. Bu ikincil parçacıklar, dönüştürücü plakalar içine yerleştirilen optik kuvars fiberlere çarparak Cherenkov fotonlarını oluşturacak. Bu optik kuvars fiberler hem Cherenkov fotonları oluşturma hem de bu fotonları taşıyabilme yetenekleri sayesinde, fotonları foto-dedektörlere kadar taşımaktadır. Bu üç ana donanımı kullanarak tasarlanan luminometre dedektörü için optimizasyon ve geliştirme çalışmaları yapıldı. Bu çalışmalar sonucunda elde edilen verilerle, luminometre dedektörü için en kullanışlı ve verimli tasarımı belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bunun için çeşitli tasarımlar test edilerek optimizasyonlar yapıldı.

Bu bölümde anlatılan temel prensipler ve donanımlar, sonraki bölümlerde daha detaylı bir şekilde ele alınmıştır. 2.1.4. bölümünde, luminometre dedektörünün temelini oluşturan Cherenkov radyasyonunun fiziksel özellikleri ve bu radyasyonun dedektör tasarımındaki rolü incelenmiştir. 2.3.1. bölümünde, optik kuvars fiberlerin özellikleri, bu fiberlerin Cherenkov fotonlarını nasıl ürettiği, taşıdığı ve dedektör tasarımındaki önemi detaylandırılmıştır. 2.3.2. bölümünde, dönüştürücü plakaların yapısı, işlevi ve ikincil parçacıkların oluşumundaki rolü üzerinde durulmuştur. Son olarak, 2.3.3. bölümünde, foto-dedektörlerin çalışma prensipleri ve bu bileşenlerin luminometre dedektöründeki kritik önemi ele alınmıştır.

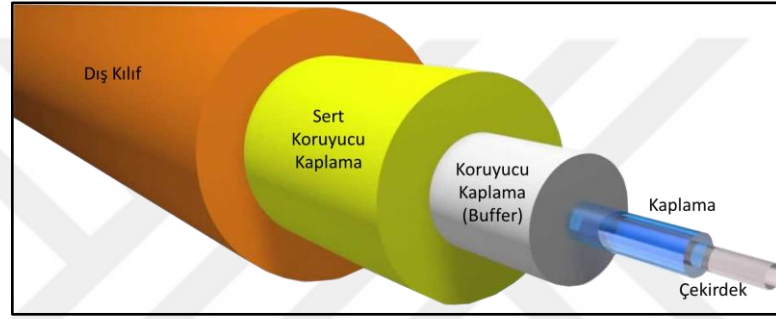
Bu şekilde, luminometre dedektörünün her bir bileşeninin ayrıntılı açıklaması, dedektörün genel çalışma prensibi ve optimizasyon süreci hakkında kapsamlı bir açıklama yapılmıştır.

2.3.1. Kuvars Çekirdekli Fiberler

Optik fiberler, geçmişten günümüze veri iletimi için sıkça kullanılan bir fiber türüdür. Çekirdekleri üzerine sarılı kaplamaları sayesinde fotonları çekirdek içerisine hapsederek metrelerce mesafeye iletebilirler. Bu sayede optik fiberler bakır ve diğer veri iletim kablolarına göre daha hızlı ve daha az kayıpla veri aktarabilirler. Burada en önemli etmen, verilerin ışık hızına yakın hızlarda iletiminin mümkün olmasıdır. Özellikle günümüz internet

ve web teknolojileri, yüksek hız ve anlık veri iletimi için optik fiber teknolojisine ihtiyaç duymaktadır.

Optik fiberlerin bakır kablo gibi iletken metal kablolarla göre artıları ve eksileri vardır. Metal iletken kablolar elektromanyetik etkileşimlerden etkilenirken, fiber kablolar da bu minimum seviyededir. Fakat optik fiberler metal kablolar gibi kolaylıkla birleştirilip, koparılamaz ya da belirli bir açıdan daha fazla eğilemez. Özel bağlantı aparatları ya da özel birleştirme metotları ile kaynaştırılabilen optik fiberler, darbelere karşı da daha hassastır ve kaplamalar ile güçlendirilmektedir.



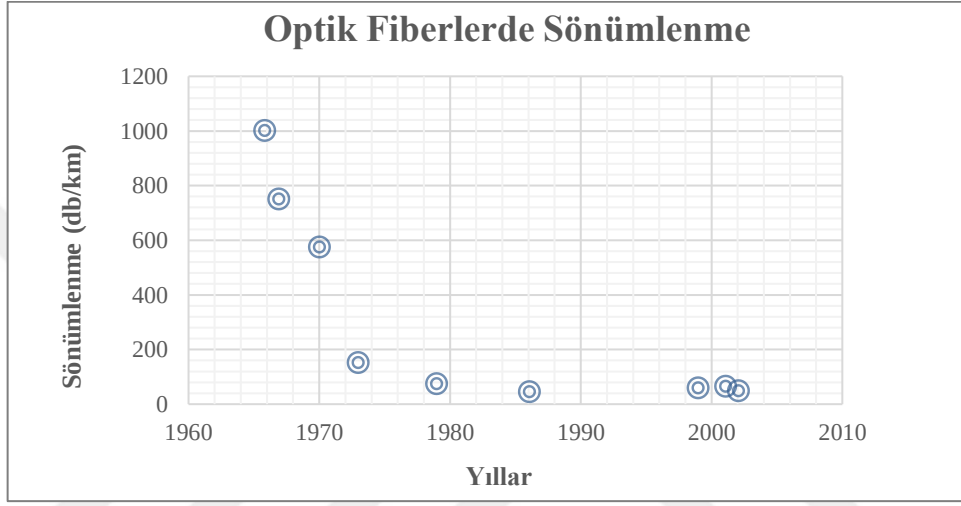
Şekil 2.11: Optik fiber katmanları.

Optik fiberlerin mekanik olarak yapıları tek modlu, çok modlu ve özel tasarımlar olarak 3 çeşittir. Şekil 2.11'te görüldüğü gibi tek-modlu ve çok-modlu optik fiberler silindirik ve boyuna uzayan bir yapıdadır. Tek modlu fiberler çok modlu fiberlere göre daha küçük çapta bir çekirdeğe sahiptir. Tablo 2.2'de görüldüğü gibi, tek modlu ve çok-modlu fiberlerin kullanım amaçları da farklıdır.

Tablo 2.2: Tek-modlu ve çok-modlu fiberlerin teknik özellikleri.

Karakteristik	Çok-Modlu Fiber	Tek-Modlu Fiber
Işık İletimi	Birden fazla yol ile	Tek bir yoldan
Çekirdek Çapı	50 μm – 100 μm	8.3 μm – 10 μm
Çalışma Aralığı (Dalga boyu)	850 nm – 1300 nm	1310 nm – 1550 nm
Foton Üretici	LED	Lazer
Enerji Dağılımı	Çekirdekte ve kaplama içerisine doğru	Yalnızca fiberin çekirdeğinde
Kullanım Mesafesi	Kısa Mesafeler	Uzun Mesafeler
Dalga boyu Aralığı	Düşük	Yüksek

Optik fiberler çeşitli malzemelerden üretilirler. Bu noktada foton iletim mekanizması önemlidir. Optik fiberler belirli bir uzunluğa kadar ve belirli bir dalga boyu aralığında foton iletebilirler. Kimyasal yapıları da foton iletimini daha uzun mesafelere çıkarmak için önemlidir. Genellikle optik fiberlerin çekirdekleri plastik ya da silika malzemeden üretilir. Bu malzemeler saydam biçimde üretilerek, foton iletimi için uygun olarak katkılandırılır veya saflaştırılır.



Şekil 2.12: Optik fiberlerde sönümlenmenin azaltılmasının 1965'ten başlayarak geçmiş on yıllar içindeki evrimi [8].

Şekil 2.12’te optik fiberlerinin geçmişten günümüze gelişimi gösterilmektedir. Günümüzde üretilen optik fiberlerde fotonlar daha az kayba uğrayarak fiber tarafından iletimleri sağlanmaktadır. Geçmişte ise bu durum bu kadar iyi değildi ve optik fiberler bundan dolayı günümüzdeki kadar yaygın bir kullanıma sahip değillerdi.

2.3.2. Dönüştürücü Plakalar

Luminometre dedektörü tasarımlarımızda temel bileşenlerden birisi de dönüştürücü plakalardır. Bu plakalar çeşitli materyaller kullanılarak dedektörde hem gövdeyi oluşturacak hem de ortamdaki parçacıkların üzerlerine çarpması durumunda bir parçacık ışıması oluşturacaklardır. Bu parçacık ışıması yüklü parçacıklar açısından zengin olduğunda ise, Luminometre dedektörü tasarımlarında yer alan optik fiberlere daha fazla parçacık çarpacak ve ortam değiştiren bu yüklü parçacıklar daha fazla Cherenkov fotonları oluşturacaklardır.

Dönüştürücü plakaların materyalinin seçiminde en önemli parametre Radyasyon uzunluğudur (χ_0). Bir malzemenin radyasyon uzunluğu, bir elektronun enerjisini faktör $1/e$ 'ye (yaklaşık

0.368) kadar azaltmak için gerekli ortalama değerdir [14]. Radyasyon uzunluğu değeri azaldıkça materyale çarpan parçacıklar daha hızlı bir şekilde enerji kaybeder ve daha sık saçılırlar. Bu da parçacıkların malzeme içindeki dağılımını artırır. Ayrıca daha düşük radyasyon uzunluğu değerine sahip malzemeler, parçacıkların malzemeyi geçerken daha fazla enerji kaybetmelerine neden olur. Bu, dedektörlerin daha hassas bir şekilde parçacıkları algılamasını ve ölçmesini sağlar.

Tablo 2.3: Bazı elementlerin deneysel radyasyon uzunlukları verileri [14].

Element	Z	A (g/mol)	Radyasyon U. (x_0) (gcm^{-2})
H	1	1.00794	63.04
He	2	4.0026	94.32
C	6	12.0108	42.7
N	7	14.0067	37.99
Fe	26	55.845	13.84
Ni	28	58.6934	12.68
Cu	29	63.546	12.86
Pt	78	195.084	6.54
Au	79	196.967	6.46
Pb	82	207.2	6.37
W	74	183.84	6.76

Arka plan radyasyonu, yüksek enerji fiziği deneylerinde ölçülen sinyallerin doğruluğunu etkileyen başka önemli bir faktördür. Bu tür deneylerde, istenmeyen radyasyon kaynakları çeşitli dış etkenlerden kaynaklanabilir. Bu radyasyon, ölçülen sinyallerin arasına karışabilir ve sonuçların yanlış yorumlanmasına veya doğru sonuçlar elde edilmesinin engellenmesine neden olabilir. Dolayısıyla, arka plan radyasyonunun kontrol altında tutulması veya azaltılması, deneylerin hassasiyetini artırmak ve doğru sonuçlar elde etmek için kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda, kurşun (Pb), tungsten (W), platin (Pt) ve altın (Au) gibi malzemeler arasında seçim yapılırken arka plan radyasyonunu dikkate almak önemlidir.

Tungsten, kurşun, platin ve altın gibi malzemeler, yüksek enerji fiziği deneylerinde arka plan radyasyonunu azaltmak için sıklıkla kullanılır. Bu malzemeler arasında tercih yapılırken, arka plan radyasyonunu düşük tutma kapasiteleri dikkate alınır. Özellikle tungsten, yüksek yoğunluğu ve yüksek Z (atom numarası) değeri sayesinde arka plan radyasyonunu azaltmak

için etkili bir seçenek olarak kabul edilir. Bu özellikler, tungstenin yüksek enerjili parçacıklarla etkileşimlerini daha iyi ölçmesini sağlar ve dolayısıyla arka plan gürültüsünü azaltarak doğru sonuçların elde edilmesine yardımcı olur.

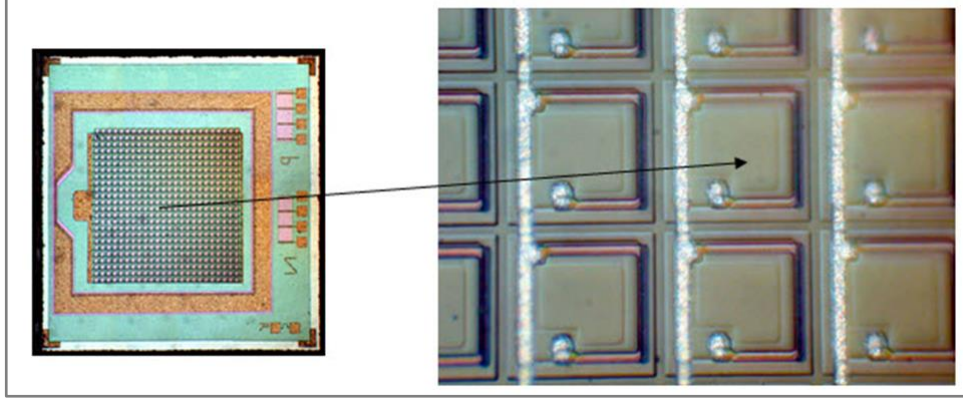
2.3.3. Foto-Dedektörler

Foto-dedektörler, optik ışınımı (fotonları) elektrik sinyallerine dönüştüren cihazlardır. Bunlar, yüksek enerji fiziği, astrofizik, görüntüleme teknolojileri, optik iletişim ve diğer pek çok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Başlıca foto-dedektör türleri olan yarı-iletken foto-dedektörler, foto-çoğaltıcı tüpler (PMT) ve diğer foto-dedektör teknolojileri günümüzde sıkça kullanılmaktadırlar.



Şekil 2.13: Çeşitli türlerdeki foto-dedektörler (SiPM, PMT, MCP).

Yarı-iletken foto-dedektörler, ışığın elektronlar üzerindeki etkisini kullanarak elektrik sinyali üreten cihazlardır. Silikon foto-çoğaltıcılar (SiPM), bu sınıfın en gelişmiş temsilcileridir. SiPM'ler, binlerce mikro-ölçekli fotodiyotun paralel bağlanmasıyla oluşur. Her bir mikro-fotodiyot, tek bir foton uyarımına karşılık gelen elektrik yükünü üretir. Böylece, oluşan sinyal SiPM'in toplam etkin alanına orantılı olur. SiPM'ler, geleneksel foton çoğaltıcı tüplere (PMT) kıyasla daha kompakt, daha ucuz ve daha yüksek kuantum verimliliğine sahiptir. Ayrıca, yüksek kazanç, düşük gürültü, hızlı yanıt süresi, düşük çalışma gerilimleri gibi önemli avantajlara sahiptirler [15–17].



Şekil 2.14: Yarı iletken bir foto-dedektör olan SiPM hücreli yapısı [15, 16].

SiPM'ler, yüksek enerji parçacık fiziği deneyleri, biyomedikal görüntüleme, uzay ve savunma uygulamaları, optik iletişim sistemleri, yüksek enerji lazer sistemleri gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Örneğin, LHC'de ve diğer yüksek enerji fiziği deneylerinde, parçacık ışınlarının tespiti için SiPM'ler tercih edilmektedir [18].

PMT'ler, ışık enerjisini elektrik sinyaline dönüştüren en yaygın ve gelişmiş foto-dedektörlerdir. PMT'ler, bir vakum tüpü yapısına sahiptir ve foto katot, dinot yapısı ve anot bölümlerinden oluşur. Işık, foto katot yüzeyine düştüğünde, foto katottaki elektronlar serbest kalır. Bu elektronlar, dinot yapısındaki yüksek gerilim potansiyeli altında çoğaltılır ve anotta toplanan elektrik yükü, güçlü bir elektrik sinyaline dönüşür. PMT'ler, çok düşük ışık seviyelerini algılayabilme, yüksek kazanç, hızlı yanıt süresi, yüksek sinyal-gürültü oranı gibi üstün özelliklere sahiptir [19].

Fotodiyotlar, APD'ler, Kızılötesi Dedektörler, CCD ve CMOS dedektörler, foto-dedektör teknolojisinin diğer önemli örnekleridir. Fotodiyotlar, basit ve ucuz yapıları nedeniyle düşük ışık şiddetlerinin ölçümünde kullanılır. APD'ler ise, PMT'lere benzer yüksek kazançla sahip yarı-iletken foto-dedektörlerdir [20]. Kızılötesi dedektörler, özel foto katot malzemeleri kullanarak kızılötesi ışınımı algılayabilirler [21]. CCD ve CMOS dedektörler ise, yüksek çözünürlüklü görüntü yakalama uygulamalarında tercih edilmektedir.

Foto-dedektörler, ışık enerjisini elektrik sinyaline dönüştüren anahtar bileşenlerdir. Başlıca foto-dedektör türleri olan SiPM'ler, PMT'ler ve diğer teknolojiler, yüksek enerji fiziği, astrofizik, tıp, savunma ve endüstriyel uygulamalar gibi çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Her bir foto-dedektör türünün kendine özgü özellikleri, avantajları ve

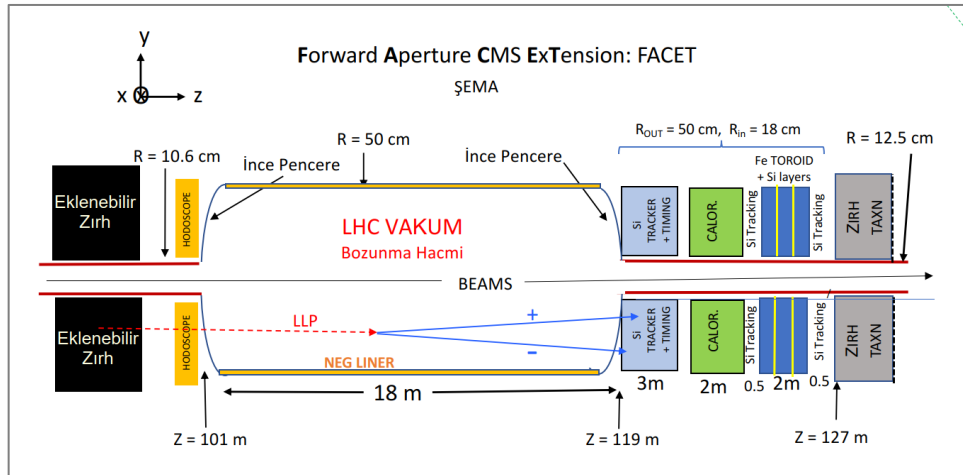
uygulama alanları bulunmaktadır. Foto-dedektör teknolojilerindeki gelişmeler, ışık ölçümü, görüntüleme ve algılama uygulamalarında önemli gelişmelere katkı sağlamaktadır.

2.4. FACET PROJESİ

Doktora çalışması süresince luminometre dedektörü geliştirmenin yanı sıra, birçok dedektör sistemi üzerine geniş çaplı ve detaylı simülasyon çalışmaları yaptık. Bu çalışmalar arasında en kapsamlı olanı geant4 FACET simülasyon çalışmasıdır.

FACET, CERN'deki CMS deneyine önerilen yeni bir alt dedektör sistemidir. Bu proje, parçacık fiziğinde devrim niteliğinde bir adım atmayı ve standart modelin ötesindeki gizemli dünyayı keşfetmeyi hedeflemektedir. Özellikle, FACET'in temel amacı, Büyük Hadron Çarpıştırıcısının (LHC) yüksek-luminosite evresinde (HL-LHC) uzun ömürlü parçacıkların araştırılmasıdır.

Uzun ömürlü parçacıklar, karanlık maddenin doğasını açıklayabilecek ve parçacık fiziğinin sınırlarını genişletebilecek kilit unsurlardır. Bu parçacıklar, standart model ile karanlık madde arasında bir köprü görevi görebilirler. Ancak, zayıf etkileşimleri nedeniyle şimdiye kadar tespit edilememişlerdir. FACET, benzersiz konumu ve tasarımı sayesinde, bu gizemli parçacıkları yakalama potansiyeline sahiptir [22].



Şekil 2.15: Facet projesi dedektör sistemi şeması [22].

Simülasyon uzayına FACET dedektörü, CMS'in 100 metre ilerisine yerleştirilmiştir. Şekil 2.15'de gösterildiği gibi, bir bozunma hacmine (vakum) sahiptir. Bozunma hacmi 50cm yarıçapında silindir şeklinde ve başlangıcında ve bitiminde hüzm hattı ile bir bütün olarak

inşa edilmiştir. Bozunma hacminin uzunluğu ilk tasarım için 18 metre olarak düşünülmüştür. Bozunma hacminin girişinde bulunan ve bozunma hacmi penceresi dediğimiz, çıkışında bulunan ve dedektör penceresi dediğimiz ince alüminyum ya da berilyum malzemeden oluşan yapılardan oluşmaktadır. Bozunma hacminde uzun ömürlü parçacıklar hava ile temas etmeden (arka planı da azaltmak için) bozunabilecek ve bu bozunmalardan ortaya çıkan ürünler dedektör penceresine ulaşmaktadır. Dedektör penceresine ulaşan parçacıklar daha sonra dedektör sistemlerine ulaşarak algılanmaktadırlar.

Bozunma hacminden önce bu bölgeye hüzmeye hattı dışından gelen parçacıkları azaltmak amacıyla zırhlama yapılması planlanmaktadır. Zırhlama da simülasyon ortamında çeşitli uzunluklarla test edilerek en uygun uzunluk seçilmiştir. Zırhlama için silindir şeklinde demir malzemeden oluşan, manyetik alan da eklenmesi düşünülen bir yapı planlanmaktadır. Manyetik alan sayesinde yüklü parçacıklar da sistemin dışına yönlendirilecektir.

Bozunma hacminin hemen önünde, öndeki zırhın ise hemen arkasında bir hodoskop vardır. Bu hodoskop bozunma hacmine giren yüklü parçacıkları tespit etmek için yerleştirilmiştir. Hodoskop kuvars kristallerden oluşan barlar ile inşa edilecektir. Başka bir tasarımda ise kuvars kristallerden oluşan pikseller düşünülmüştür. Bu bölgeden geçen parçacıklar bu kristaller üzerinde fotonlar oluşturacaktır ve bu fotonlar yine kristallere entegre edilen foto-dedektörler sayesinde algılanarak tespit edilecektir. Benzer biçimde kalorimetrenin önüne de bir hodoskop düşünülmektedir.

Bozunma hacminin bitiminde bulunan dedektör penceresinin arkasında ise dedektör sistemleri başlamaktadır. Dedektör penceresinin hemen arkasında 3 metrelik mesafede 5 ayrı düzlemde silikon dedektörler vardır. Bu dedektörlerin hemen arkasında ise 2 metrelik uzunluğa ve kompleks bir yapıya sahip kalorimetreler yer almaktadır. Bu kalorimetreler altıgen yapılardan oluşan silikon dedektörlerle donatılmıştır. Bu altıgen yapılan HL-LHC için planlanan 8 inçlik silikon dedektörlerdir.

FACET projesi bir dedektörler sistemidir. Bu sistemde optimizasyonu yapılacak birçok yapı bulunmaktadır ve maliyeti çok yüksek bir projedir. Geant4 simülasyonu sayesinde FACET geometrisi optimize edilmiştir. Proje HL-LHC dönemi için tasarlanmıştır ve halihazırda bu tez yazılırken çalışmalar devam etmektedir.

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. LUMİNOMETRE DEDEKTÖRÜ

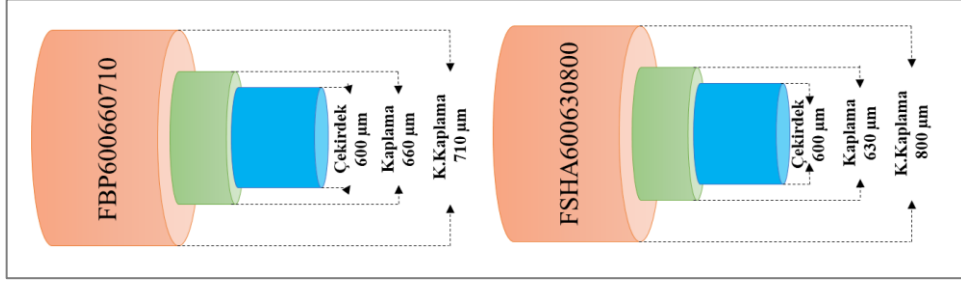
Luminometre dedektörünün tasarımı ve üretimi için kapsamlı bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Dedektörün her bir bileşeni ve bileşenlerin entegrasyonuna yönelik farklı yaklaşımlar incelenmiştir. Bu kapsamda, dedektörün optimum performans göstermesi için gerekli olan malzeme, geometri ve çalışma parametrelerinin belirlenmesi amacıyla çeşitli testler yapılmıştır.

Luminometre dedektörünün temel bileşenleri ve bunların optimizasyonu, bu çalışmanın merkezinde yer almaktadır. Her bir bileşenin performansı ayrı ayrı değerlendirilmiş ve optimize edilmiştir. Bileşenlerin entegrasyonu ve bu entegrasyonların optimizasyonları da çalışmanın önemli bir parçasını oluşturmuştur. Farklı malzeme seçenekleri, geometrik yapılar ve çalışma koşulları denenmiş, en uygun konfigürasyonu belirlemek bu çalışmanın temelini oluşturmuştur.

3.1.1. Luminometre Dedektörü Bileşenleri

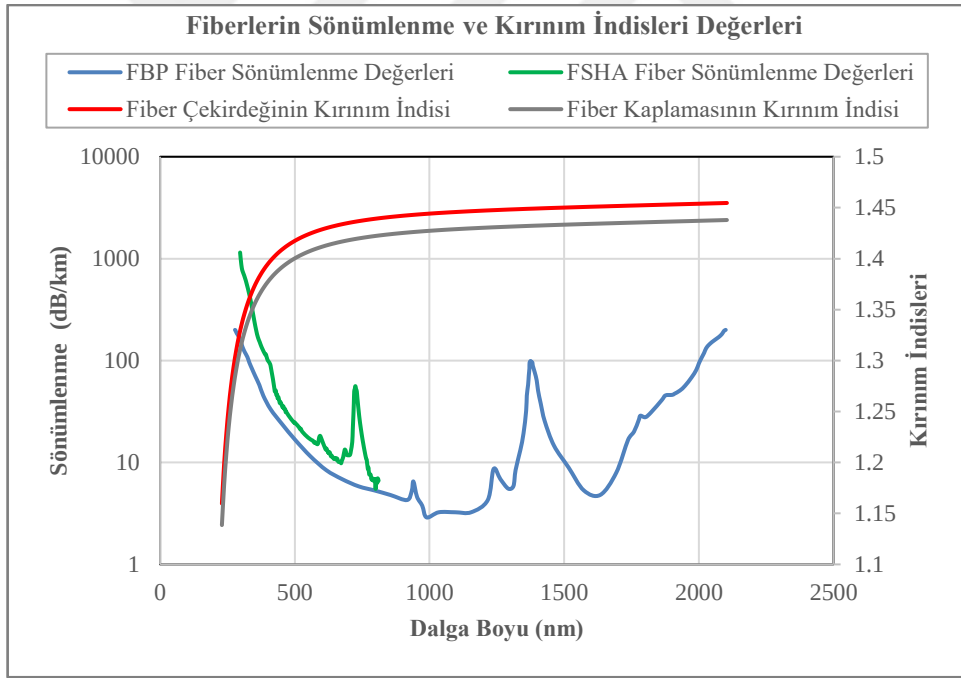
3.1.1.1. Kuvars Çekirdekli Fiberler ve Geant4 Simülasyonu

Kuvars çekirdekli fiberlerin ve benzer optik fiberlerin genel çalışma prensipleri ilk kısımda anlatılmıştır. Bu çalışmada 2 farklı çeşit kuvars çekirdekli fiber kullanılacaktır. Molex firmasının ürettiği bu iki fiberden ilki FBP (FBP600660710) ikincisi ise FSHA (FSHA600630800) model fiberleridir.



Şekil 3.1: Molex FBP ve FSHA fiberlerinin katmanları [9, 10].

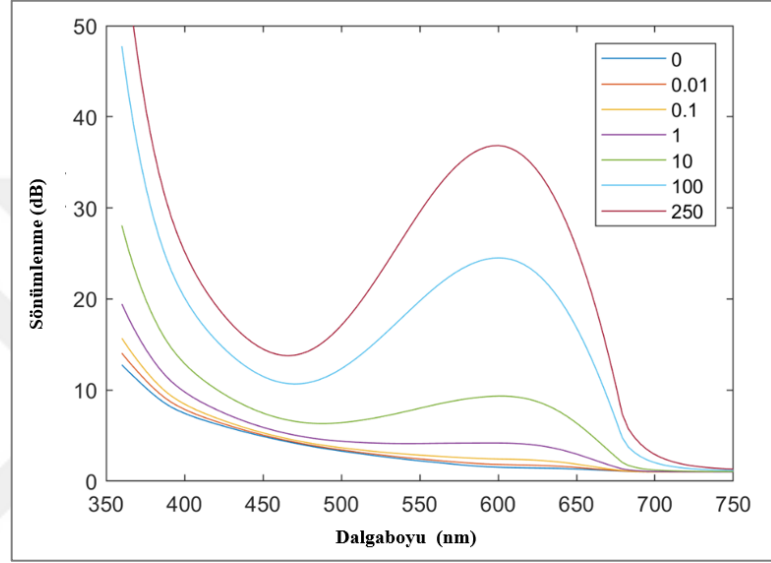
FBP fiberi için çekirdek çapı 600µm, kaplama çapı 660µm, koruma kılıfı (buffer) çapı 710µm'dir. FSHA fiberi için ise çekirdek çapı 600µm, kaplama çapı 630µm, koruma kılıfı çapı 800µm'dir [23]. Burada FSHA fiberi daha geniş bir dış çapa sahip olarak üretilse de çekirdek çapları aynıdır. Fiberlerin içerisindeki kuvarsın üretim mekanizmalarındaki farklılıkları sebebiyle (OH konsantrasyonu) foton iletim yetenekleri de farklılık göstermektedir [25].



Şekil 3.2: Molex FBP ve FSHA fiberlerinin kuvars çekirdeklerinin (kırmızı) kırınım indislerinin, kuvars kaplamalarının (gri) kırınım indislerinin ve foton taşıyabilmesinin bir ölçütü olan sönümlenme değerlerinin (mavi ve yeşil) dalgı boyuna bağılı değışimleri [9, 10, 11].

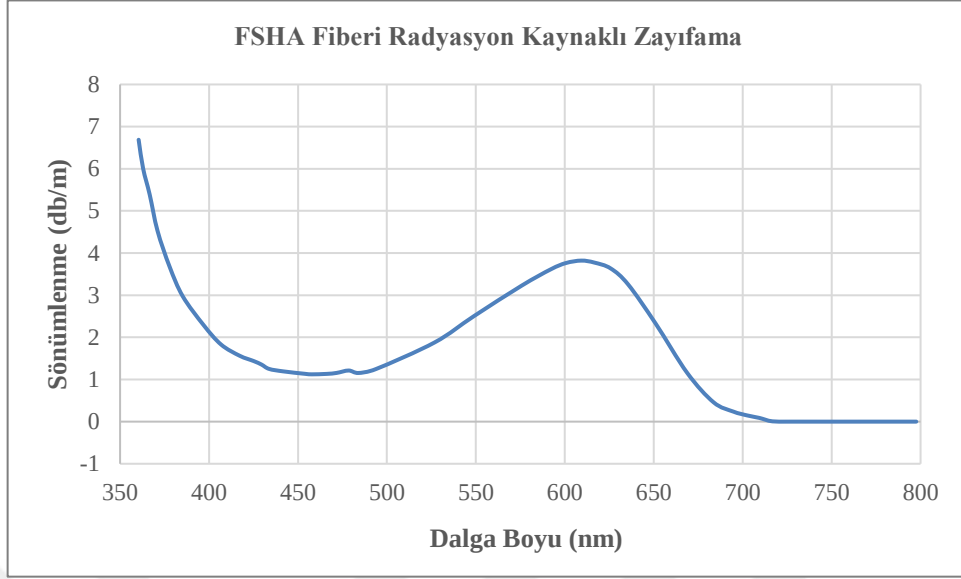
Seçtiğimiz kuvars bazlı fiberlerin 3 ayrı katmanı vardır ve her biri belirli kırınım indislerine sahiptirler. Şekil 3.2'de Molex FBP ve FSHA fiberlerinin kuvars çekirdeklerinin ve kaplamalarının dalgı boyuna bağılı kırınım indislerini görmekteyiz. Fotonlar fiber içerisinde seyahat ederken bir kısmı fiberin materyal yapısından dolayı soğrulur. Fotonların fiber

içerisinde soğurulması, fotonların dalga boyuna göre değişir. Bu etkiye sönümlenme (attenuation) denir [7]. FBP fiberleri 275nm ile 2100 nm gibi geniş bir dalga boyu aralığında foton iletimi yapabilmekte iken, FSHA fiberi daha dar bir dalga boyu aralığında foton iletmeye kabiliyetine sahiptir. FBP fiberi daha yeni bir teknoloji ile üretilmektedir. FSHA fiberi ise uzun zamandır CERN’de yapılan deneylerde kullanılmaktadır. Bu iki fiberi luminometre tasarımlarımız için test edilmiştir.



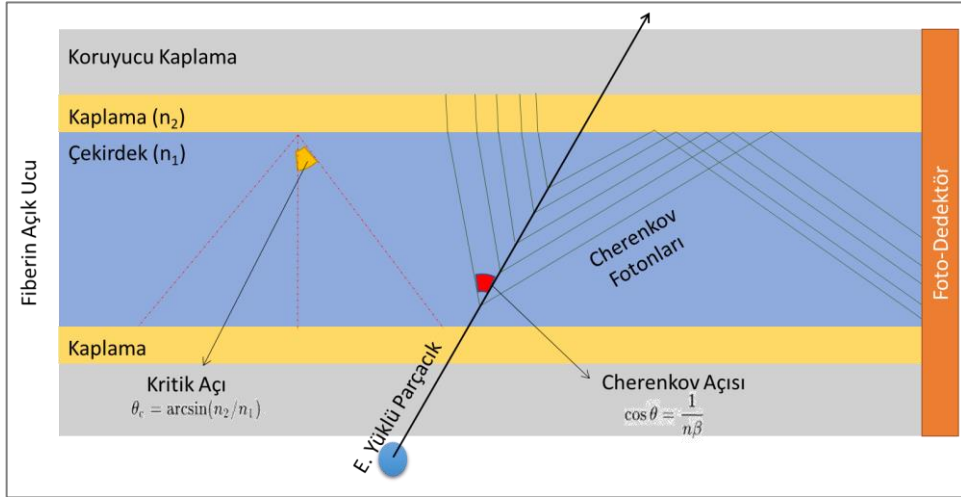
Şekil 3.3: 200 metre uzunluğundaki FBP fiberinin ilk 10 metrelik bölümüne farklı dozlarda (kGy cinsinden) radyasyon uygulanması sonucu oluşan radyasyon kaynaklı zayıflama [27].

Kuvars çekirdekli fiberler üretildikleri malzemenin kuvars olması sebebiyle radyasyon dayanımları da yüksektir [27]. Şekil 3.3'te gösterildiği gibi 200 metrelik FBP fiberinin 10 metrelik bir kısmı radyasyona maruz kaldığında bile foton aktarımını sürdürmektedir. Benzer biçimde Şekil 3.4'te FSHA fiberinin radyasyona maruz kalması durumunda foton taşıma kabiliyetinin dalga boyuna bağlı değişimi verilmiştir. FSHA fiberi de radyasyon altında foton iletimine devam etmektedir. Bunun en büyük avantajı bu fiberlerle inşa edilen dedektörlerin hem ömürleri uzun olacaktır hem de yüksek radyasyon içeren ve insanların sürekli girmesinin mümkün olmadığı çalışma alanlarında (hızlandırıcılar, nükleer tesisler gibi) kullanılabileceklerdir. Kuvars çekirdekli bu fiberlerin radyasyon dayanımı yeteneğinden dolayı luminometre tasarımlarımızda FBP ve FSHA fiberlerini tercih ettik.



Şekil 3.4: FSHA fiberinin 54 kGy radyasyona maruz kalması sonucu oluşan radyasyon kaynaklı zayıflama [28].

Kullandığımız fiberlerin kaplama ile çekirdek arasındaki NM değeri 0.37'dir [16]. FBP için çekirdek çapı 0.6 mm, kaplama çapı 0.66 mm ve dış kaplama çapı 0.71 mm iken FSHA fiberi için çekirdek çapı 0.6 mm, kaplama çapı 0.63 mm ve dış kaplama çapı 0.8 mm'dir. FBP fiberi -65 ve +300 derece Celsius aralığında çalışabilmektedir [23].



Şekil 3.5: Molex Fiber içerisinde oluşan ve ilerleyen Cherenkov fotonları [29].

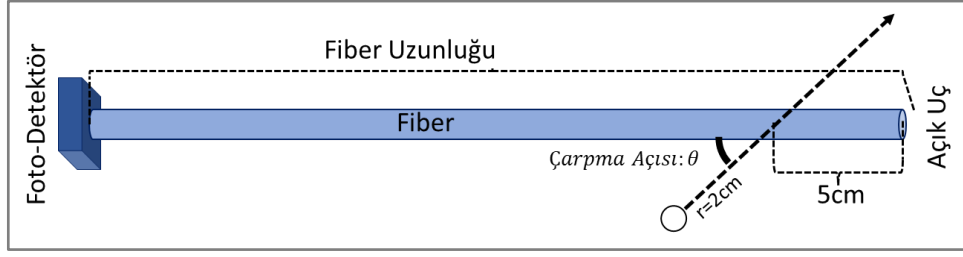
Elektrik yüklü bir parçacık Quartz bazlı fiberin içerisinde geçerken kırınım indisleri farkından dolayı Cherenkov fotonları oluşmaktadır. Bu fotonların oluşma açıları parçacığın hızı ve kırınım indislerine bağlıdır [7]. Şekil 3.5'te kuvars fiber içerisine giren bir yüklü parçacığın fiber içerisinden geçişi gösterilmiştir. Fiber çekirdeğinde oluşan Cherenkov

fotonlarının fiber içerisinde ilerleyebilmeleri için önemli iki açı vardır. Bunlardan biri daha önce bahsettiğimiz Cherenkov açısı, diğeri ise kaplama ve çekirdek arasındaki kırınım indisi farkından dolayı ortaya çıkan kritik açıdır. Cherenkov açısı ile oluşan Cherenkov fotonları kritik açıyı aştıklarında fiber içerisinde ilerleyebilmektedirler.

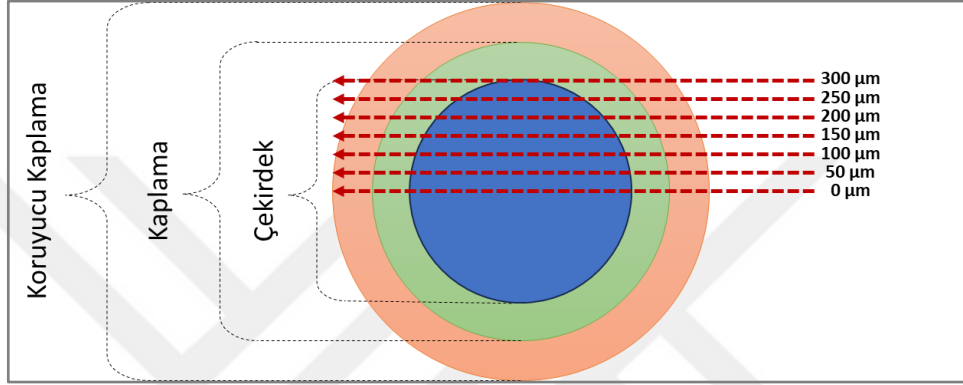
Şekil 3.5'te gösterildiği gibi fiberler iki boyutlu değildir. Bu gösterim sadece fiberleri ve fotonların oluşum ve iletim mekanizmasını daha iyi anlayabilmek için çizilmiştir. Fiberler silindirik yapıları sayesinde bir kablo gibi kullanılabilirler. Foton üretim mekanizmaları Cherenkov açısı ile belirli iken, silindirik yapıları sebebiyle foton iletim mekanizmaları karmaşıklık göstermektedirler. Foton iletimlerini hem geometrik yapıları hem de sönümleme mekanizmaları karmaşık bir hale getirmektedir. Bundan dolayı kuvars fiberlerin foton üretim ve iletim mekanizmalarını daha iyi anlayabilmek için bir Geant4 kuvars fiber simülasyonu tasarlanmıştır. Bu simülasyon çalışması luminometre dedektörünün en önemli donanımı olan kuvars fiberleri anlamak için en önemli yöntemlerden biridir. Simülasyon çalışması Şekil 3.2'deki üretici deneysel verileri temel alınarak yapılmaktadır. Geant4 simülasyonuna hem sönümleme değerleri hem de kırınım indisleri deneysel değerleri entegre edilmiştir [9, 10, 11]. Sonuç olarak kuvars çekirdekli fiberler için tasarlanan bu simülasyon deneysel verilere dayanmaktadır.

Optik materyallerin kullanıldığı deney sistemlerinde sıklıkla yansıtıcılar kullanılmaktadır. Örneğin kristaller içerisinde oluşan Cherenkov ya da sintilasyon fotonlarının kristal dışına çıkmasını önleyerek sistem içerisinde kalması için kristaller yansıtıcılarla kaplanmaktadır. Bu yansıtıcılardan sıkça kullanılan özel bir tanesi de tyvek yansıtıcı kaplamalarıdır [30]. Geant4 içerisinde kendi yansıtma katsayıları ile gelen tyvek yapı, yine Geant4 simülasyonlarında kolaylıkla kullanılabilir.

Geant4 uzayına bir ucu açık ya da tyvek kaplama ile kaplanmış, diğer ucunda ise foto-dedektör konumlu olacak şekilde kuvars çekirdekli fiber her iki model için de tam ölçüleri ile yerleştirilmiştir. Bu çalışmada yüklü parçacık olarak seçilen 10 GeV enerjili elektronlar belirli çarpma açılarıyla fiber üzerine 2cm mesafeden fiberin açık uç kısmının 5cm uzaklığına gönderilmiştir.



Şekil 3.6: Kuvarts çekirdekli fiberin Geant4 simülasyon uzayına yerleşimi ve parçacık üreticinin konumlandırılması.



Şekil 3.7: Geant4 simülasyonu uzayında kuvarts çekirdekli fiberin üzerine gönderilen yüklü parçacıkların çarpma noktaları.

Şekil 3.7’de gösterildiği gibi, yüklü bir parçacık fibere 7 farklı noktadan ve Şekil 3.6’da gösterildiği gibi 11 farklı çarpma açısı ile çarparak, fiber içerisinden geçecektir. Fiber, Geant4 uzayının hava materyali olduğu bir ortama yerleştirildiği için, fiberin açık ucu havaya temas edecektir. Havanın ve fiberin katmanlarının kırınım indisi farkı sebebiyle fiber içerisinde seyahat eden fotonların bir kısmı havaya geçecektir. Bu da sistem içerisinde foton kaybına sebep olacaktır. Foton kaybının hangi seviyede olduğunu anlamak için açık uca tyvek kaplayarak testler yapıldı. Bu testler fiberin 8 farklı uzunluğu için tekrarlandı. Fiber simülasyon testleri Tablo 3.1’de gösterildiği gibi 5 farklı parametre için her biri 5000 olay olmak üzere simülasyonlar tekrarlandı ve detaylıca analizleri yapıldı.

Tablo 3.1: Kuvvars çekirdekli fiber simülasyonu için deney parametreleri.

Simülasyon Parametreleri		
1	Fiber Türü	FBP, FSHA
2	Fiberin Açık Ucu	Tyvek Kaplama, Kaplamasız (Açık)
3	Fiber Uzunluğu	5m, 10m, 20m, 50m, 100m, 200m, 500m, 1km
4	Çarpma Açısı	15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°, 105°, 120°, 135°, 150°, 165°
5	Çarpma Noktası	0µm, 50µm, 100µm, 150µm, 200µm, 250µm, 300µm

3.1.1.2. Dönüştürücü Plakalar

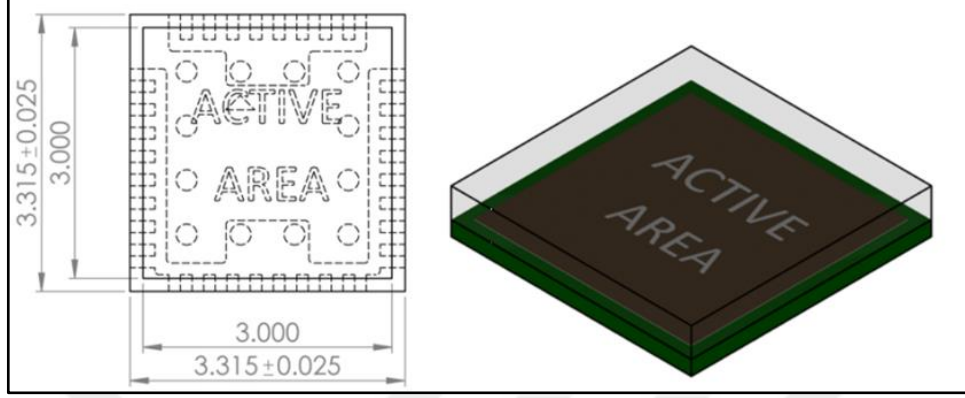
Luminometre tasarımında kullanılan dönüştürücü plakalar, geometri ve malzeme yapısının belirlenmesi amacıyla simülasyon testlerine tabi tutulmuştur. Bu plakalar için istenen özellikler, düşük radyasyon uzunluğu ve minimal arka plan radyasyonudur. Tablo 2.3’de gösterildiği gibi bu şartlar altında en uygun malzeme olarak tungsten (W) öne çıkmaktadır. Ancak, tungstenin yüksek erime noktası, mekanik işlemeye olan direnci ve sertliği nedeniyle şekillendirilmesi ve delinmesi zorluklar içermektedir. Bu aynı zamanda tungsteni kararlı ve sağlam bir malzeme yapar. Tungsten yüksek yoğunluğu sayesinde radyasyon etkileşimi de fazladır. Yüksek ısı iletkenliği sayesinde oluşan ısının etkin bir şekilde dağılmasına olanak tanır. Bu da sistemin termal kararlılığını artırır.

Tungstenin işlenebilirliğini artırmak için, bakır (Cu) ile karıştırılarak alaşım haline getirilmiştir. Tungsten plakalar, alaşım haline getirilmiş olsalar dahi, fiber delikleri açılması zorluğu devam etmektedir. Bu yüzden, plakaları belirlenmiş ölçülerde üreterek ve dizerek modüler bir yapıda luminometre geliştirilmesi daha avantajlı olacaktır. Bu çalışmada, tungsten-bakır plakaların genel özellikleri dikkate alınarak çeşitli luminometre tasarımları geliştirilmiştir.

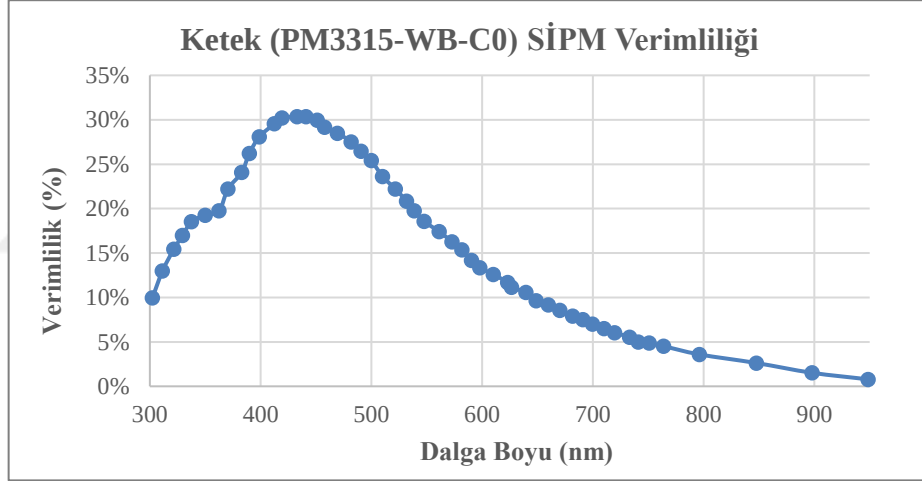
3.1.1.3. Foto-Dedektörler

Foto-dedektörler luminometre tasarımının önemli parçalarından biridir. Luminometre içerisinde parçacıklar foton üretimi yaptıktan sonra bu fotonları okuyup elektrik sinyallerine çevirecek olan donanımdır. Daha önce 2.3.3. Foto-Dedektörler başlığı altında detaylıca genel özelliklerini incelenmiştir. Luminometre dedektöründe fiber simülasyonunda ve luminometre

tasarımlarının simülasyonlarında kullanılmak üzere foto-dedektör olarak Şekil 3.8’de teknik detayları gösterilen Ketek marka PM3315-WB-C0 modeli SiPM seçilmiştir.

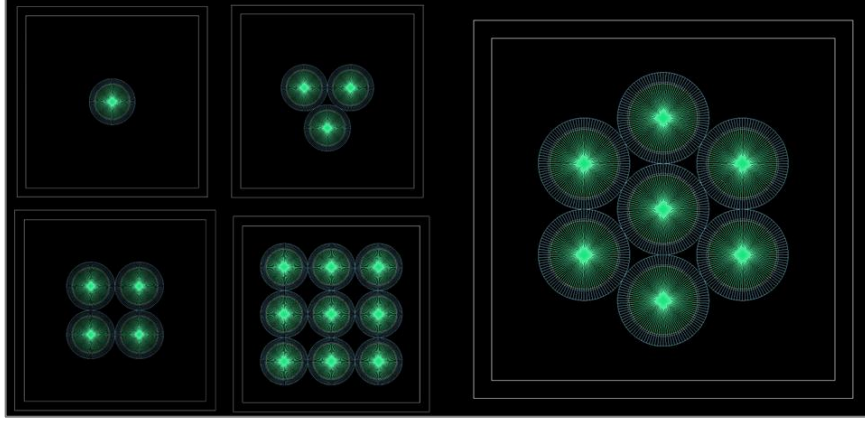


Şekil 3.8: Ketek (PM3315-WB-C0) SiPM 3 bölgeden oluşan fiziksel yapısı ve ölçüleri [31].



Şekil 3.9: Ketek SiPM için dalga boyuna karşılık verimlilik grafiği [31].

Şekil 3.9’da görüldüğü foto-dedektörlerin de fiberler gibi etkin bir çalışma aralıkları vardır. Bir foto-dedektör üzerine gelen tüm fotonları algılayamaz. Ketek SiPM üzerine düşen 300 nm-900 nm dalga boyu aralığındaki tüm fotonların yaklaşık %10-%15’ini algılamaktadır. Foto-dedektörün verimliliği, dedektör üzerine düşen fotonun dalga boyuna göre değişiklik göstermektedir. Foto-dedektör seçimi yaparken, kullanılan fiber önemli faktörlerden biridir. Fiberlerden gelen fotonları dedektörün okuması için, fotonlar uygun dalga boyu aralığında olmalıdırlar.

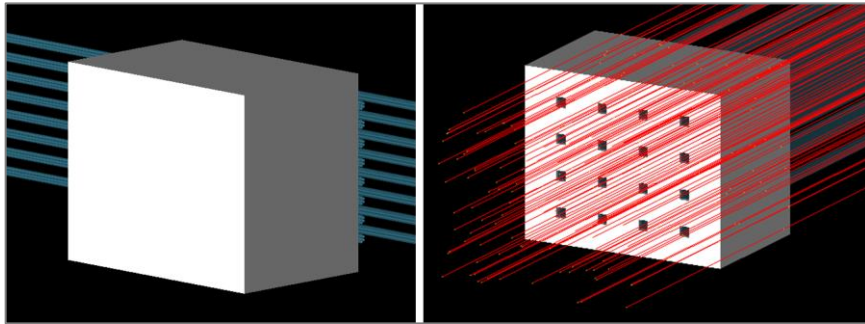


Şekil 3.10: Fiberlerin foto-dedektör camı üzerine yerleşim geometrileri.

Luminometre simülasyonunda Şekil 3.10’da gösterildiği gibi belirli sayıda fiberlerden oluşan fiber gruplarının bir ucu foto-dedektörlere temas etmektedir. Fiber içerisinde oluşan ve iletilen fotonlar bu temas sayesinde doğrudan foto-dedektöre gelmektedir. Cherenkov fotonları bu foto-dedektörün aktif bölgesine temas ederek elektrik sinyaline dönüşmektedir. Luminometre dedektörü optimizasyonu için fiberler tekli, üçlü, dördü, yedili ve dokuzlu olmak üzere gruplandırılmıştır ve bu grupların bir ucu foto-dedektöre bağlanmıştır.

3.1.2. Luminometre Dedektör Tasarımları

Luminometre dedektörü önceki bölümde bahsedildiği gibi 3 ana bileşenden oluşmaktadır. Bunlar sırasıyla dönüştürücü plakalar, kuvars çekirdekli fiberler ve foto-dedektörlerdir. Luminometre dedektörünü oluşturan 3 ana bileşen farklı tasarımlar ile bir araya getirilerek en optimum çalışan dedektör seçilmelidir. Şekil 3.11’de 2 farklı luminometre dedektörü tasarımı gösterilmektedir.

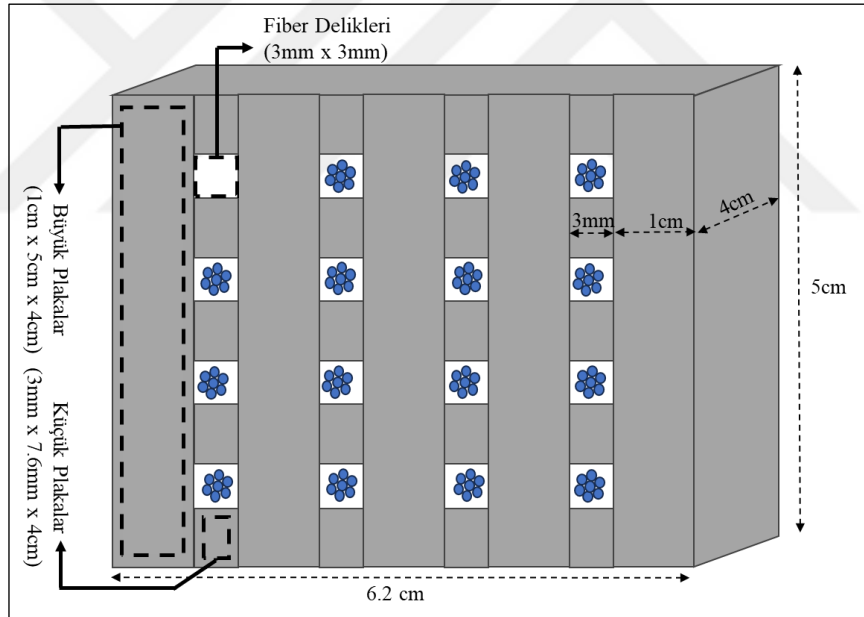


Şekil 3.11: Luminometre dedektörünün Geant4 arayüzü aracılığı ile 2 farklı tasarımının görünümü.

Dedektör sistemi için 2 farklı tasarım için simülasyon testleri yapılmıştır. Bu tasarımlar sırasıyla M1 (Model 1) ve M2 (Model 2) adlandırıldı. M1 tasarımı delikli bir yapıya sahiptir ve fiberler içerisinden geçmektedir. M2 tasarımında ise plakalar blok halinde arka arkaya dizilmiş ve en arkaya fiberler plakalara paralel biçimde gruplandırılarak yerleştirilmiştir.

Her iki tasarımda da plaka boyutları, fiber sayıları ve fiber grup sayıları sabittir. Böylece testler sırasında kıyaslamalar daha kolay olacak ve iki tasarım için alınan simülasyon testlerinin sonuçları daha kıyaslanabilir biçimde analiz edilebilmektedir.

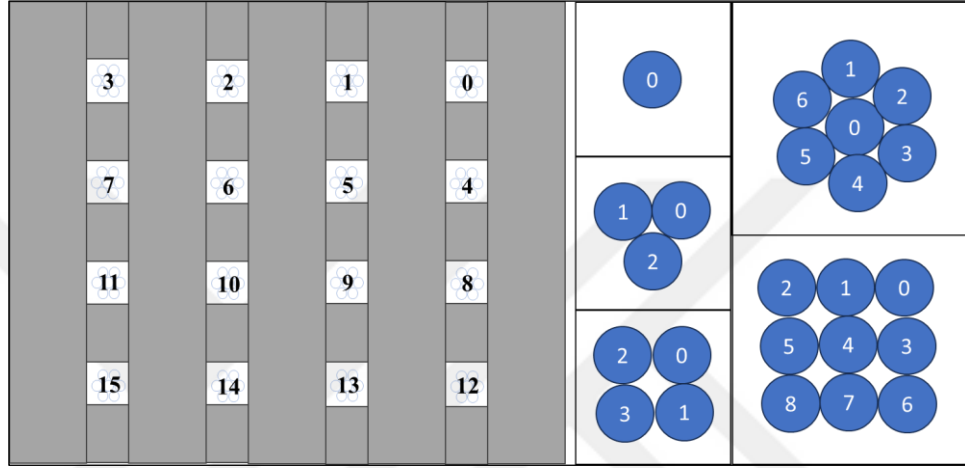
Bu çalışmada, benzer araştırmalar ve simülasyon testleri sonucunda M1 tasarımı daha detaylı bir şekilde incelenmiştir ve testler bu tasarım üzerine yoğunlaştırılmıştır. Bu tasarım diğer tasarımlara göre doğrudan plakalar arasına fiberler yerleştirildiği için ve fiberlere paralel biçimde parçacıkları algıladığı için daha verimli bir tasarım olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 3.12: Luminometre tasarımında dönüştürücü plakaların düzeni ve ölçüleri.

Tungsten alaşımı kullanılsa dahi, bu materyalin işlenmesi zor ve dayanıklı bir yapıya sahip olduğu için dönüştürücü plakalara fiberler için delik açmak güçleşmektedir. Bu nedenle, fiber gruplarının sığabileceği kadar boşluk oluşturularak, Şekil 3.12'de görüldüğü gibi modüler bloklar halinde üretim yapmak daha pratik bir çözüm olacaktır. Bu modüler yapı, birden fazla luminometre dedektörünün bir arada kullanılmasını mümkün kılacak şekilde tasarlanmıştır [32, 33].

Her bir fiber boşluğuna gruplar halinde fiberlerin yerleştirilebilmesi için kare şeklinde plastik tutucular kullanılacaktır. Bu uygulamanın temel sebebi, tungstenin sert yapısının, oldukça kırılgan olan fiberlere zarar verme potansiyeline sahip olmasıdır. Tungsten dönüştürücü plakaların fiberlere zarar vermesini önlemek ve fiberleri gruplar halinde yönlendirebilmek amacıyla, fiber grupları plastik materyalle kaplanacaktır. Bu sayede fiberler korunmuş olacak ve fiber grupları, dönüştürücü plakalar arasındaki boşluklara tam olarak uyum sağlayacaktır.



Şekil 3.13: Dönüştürücü plakalar içerisine yerleştirilecek çeşitli sayılardaki fiber gruplarının ve fiberlerin kanal numaralarının konumları.

Dönüştürücü plakalar arasına yerleştirilen fiber gruplarının kanallarını "Grup Kanalı (GCh)" olarak adlandırdık ve her bir fiber grubu içerisindeki bireysel fiber kanallarına "Kanal (Ch)" adını verdik. Şekil 3.13'te gösterildiği üzere, her grup kanalı ve her bir grup içerisinde yer alan fiber kanalları kendine özgü bir kanal numarasına sahiptir. Her bir fiber grubunun bir ucu, foto-dedektöre temas etmektedir. Bu sebeple, her foto-dedektörün kanal numarası ile bağlı olduğu fiberlerin grup kanal numaraları aynıdır. Örneğin, 5 numaralı grup kanalına bağlı foto-dedektörün kanal numarası da 5'tir. Şekil 3.10'da gösterildiği gibi, bir foto-dedektöre birden fazla fiber bağlantısı yapılmıştır. Tasarım ve fiber sayısı açısından en çok tercih edilen yapı, yedili fiber gruplarıdır. Diğer farklı sayıda fiberler içeren gruplar, optimizasyon amacıyla simülasyonlar aracılığıyla incelenmiştir.

3.2. GEANT4

Parçacık fiziği, nükleer teknoloji ve uzay araştırmaları gibi alanlarda, ışıyım etkileşimlerinin doğru şekilde modellenmesi kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda, Geant4 yazılımı, parçacık-madde etkileşimlerinin simülasyonu için güçlü ve esnek bir platform sunmaktadır. Geant4, birçok araştırma enstitüsü ve laboratuvarın etkin bir şekilde kullandığı önemli bir simülasyon aracıdır.

Luminometre dedektör tasarım süreçlerinde, optimizasyon çalışmaları kritik bir öneme sahiptir. Modern teknoloji kullanılarak bir dedektörün inşası önemli finansal kaynaklar gerektirdiğinden, her optimizasyon süreci hem zaman hem de maliyet açısından büyük yatırımlar gerektirmektedir. Bu nedenle, fiziksel inşa işlemine başlamadan önce, simülasyon tabanlı test ve optimizasyon işlemleri büyük bir avantaj sağlamaktadır.

Geant4 çeşitli senaryolar altında dedektör bileşenlerinin tepkilerini modelleyebilme yeteneği sunar. Bu sayede, dedektör tasarımcıları, gerçek dünya koşullarını taklit eden bir sanal ortamda, çeşitli tasarım alternatiflerini değerlendirebilir ve potansiyel performanslarına ilişkin önemli veriler elde edebilirler [34].

Geant4'ün sağladığı bu esneklik, araştırmacılara, luminometre dedektörlerinin her bir bileşenini detaylı bir şekilde test etme ve optimize etme imkânı tanır. Böylece, en verimli çalışacak tasarımı ve boyutları belirleme süreci, maliyet ve zaman kaybı olmaksızın, daha bilinçli ve veriye dayalı kararlar alınarak gerçekleştirilebilir. Bu yaklaşım, dedektör inşası sürecinin başarısını artırırken, aynı zamanda gereksiz maliyetlerin önlenmesine olanak tanır.

Bu çalışma kapsamında Luminometre dedektörünün her bir bileşeni ve son olarak tasarlanan bir luminometre dedektörü simülasyon ortamında test edilmiştir. Yüksek radyasyon altında çalışabilecek bir luminometre dedektörü geliştirilmiştir.

Geant4 uzayında bir parçacığın doğduğu ve uzay dışına çıkarak ya da kontrollü bir biçimde yok olduğu noktalar vardır. Bu tüm parçacıklar için geçerli olduğu gibi fotonlar için de geçerlidir. Bu çalışmada Cherenkov fotonları fiberler içerisinde, yüklü parçacığın çarptığı noktalarda, fiberlerin tüm katmanlarda oluşmaktadır. Bu fotonların büyük kısmı yine fiber içerisinde sönümlenirken, kalan kısmı ya açık uçtan kaçmakta ya da foto-dedektöre ulaşarak foto-dedektörün aktif bölgesine temas ederek dedektör tarafından algılanarak, elektrik

sinyaline dönüştürülmektedir. Bu yapı Geant4 içerisinde takip edilebilmektedir. Bu sayede fiber içerisinde üretilen fotonların sayısı (katmanları ile), dedektöre ulaşan fotonların sayısı, dedektörde algılanan fotonların sayısı gibi bilgilerle birlikte, bu fotonların fiber içerisinde ve dedektör üzerinde sönümlendiği yerler gibi detay bilgilere de ulaşılabilir. Bu çalışma yalnızca fotonlar için değil, tüm parçacıklar için yapılabilmektedir [35].

3.2.1. Geant4 Fiziksel Süreçleri ve Fizik Listeleri

Geant4'teki fiziksel süreçler, elektromanyetik, hadronik, optik ve bozunma süreçlerini içerir. Elektromanyetik süreçler, fotonlar, elektronlar ve pozitronlar gibi yüklü parçacıkların madde ile etkileşimlerini kapsar. Bu süreçler arasında Compton saçılması, fotoelektrik olay, çift oluşumu, Bremsstrahlung ve elektron-pozitron saçılması gibi olaylar bulunur. Bu süreçler, geniş bir enerji yelpazesinde parçacıkların nasıl davrandığını ve enerjilerini nasıl kaybettiklerini anlamak için kritiktir. Hadronik süreçler, protonlar, nötronlar ve pilyonlar gibi hadronik parçacıkların madde ile etkileşimlerini kapsar. Bu süreçler arasında elastik saçılma, inelastik saçılma, hadronik çarpışmalar ve nükleer reaksiyonlar yer alır. Hadronik süreçler, çekirdek fiziği ve yüksek enerji çarpışmaları gibi alanlarda önemlidir.

Optik süreçler, fotonların optik ortamlarla etkileşimlerini modellemek için kullanılır. Bu süreçler arasında yansıma, kırılma, saçılma ve absorpsiyon bulunur. Bu süreçler, optik dedektörlerin ve ışığın yayılımının simülasyonunda önemlidir. Bozunma süreçleri, kararsız parçacıkların bozunmalarını kapsar. Bu süreçler, çeşitli bozunma modlarını ve yarı ömürleri içerir. Bozunma süreçleri, nükleer fizik ve parçacık fiziği deneylerinde kritik rol oynar.

Geant4 içerisinde fiziksel süreçlerin yanı sıra fizik listeleri de bulunur. Fizik listeleri, belirli bir simülasyon için gerekli olan fiziksel süreçlerin bir araya getirilmesidir. Bu listeler, kullanıcıların belirli bir enerji aralığında ve belirli bir fiziksel ortamda simülasyon yapmak için uygun olan süreçleri seçmelerine olanak tanır. Geant4'te birçok önceden tanımlanmış fizik listesi bulunmaktadır ve kullanıcılar ihtiyaçlarına göre kendi fizik listelerini de oluşturabilirler.

Örneğin, elektromanyetik süreçler için "emstandard_opt0", "emstandard_opt1", "emstandard_opt2" ve "emstandard_opt3" gibi standart fizik listeleri bulunur. Bu listeler, farklı doğruluk ve hesaplama hızı dengelerine sahip çeşitli elektromanyetik süreçleri içerir. Hadronik süreçler için "QGSP_BERT", "FTFP_BERT" ve "QGSP_INCLXX" gibi fizik

listeleri mevcuttur. Bu listeler, hadronik çarpışmaları ve nükleer reaksiyonları modellemek için farklı modeller ve yaklaşımlar kullanır.

Geant4'teki fiziksel süreçler ve fizik listeleri, kullanıcıların belirli bir simülasyon ihtiyacına göre esneklik sağlar. Kullanıcılar, simülasyonlarının doğruluğunu ve verimliliğini artırmak için uygun süreçleri ve fizik listelerini seçebilirler. Bu, Geant4'ün çeşitli uygulama alanlarında etkili bir şekilde kullanılmasını sağlar. Geant4, fiziksel süreçlerin ve listelerin doğru bir şekilde seçilmesiyle, gerçek dünya deneylerinin ve fenomenlerin simülasyonunda yüksek doğruluk ve güvenilirlik sağlar.

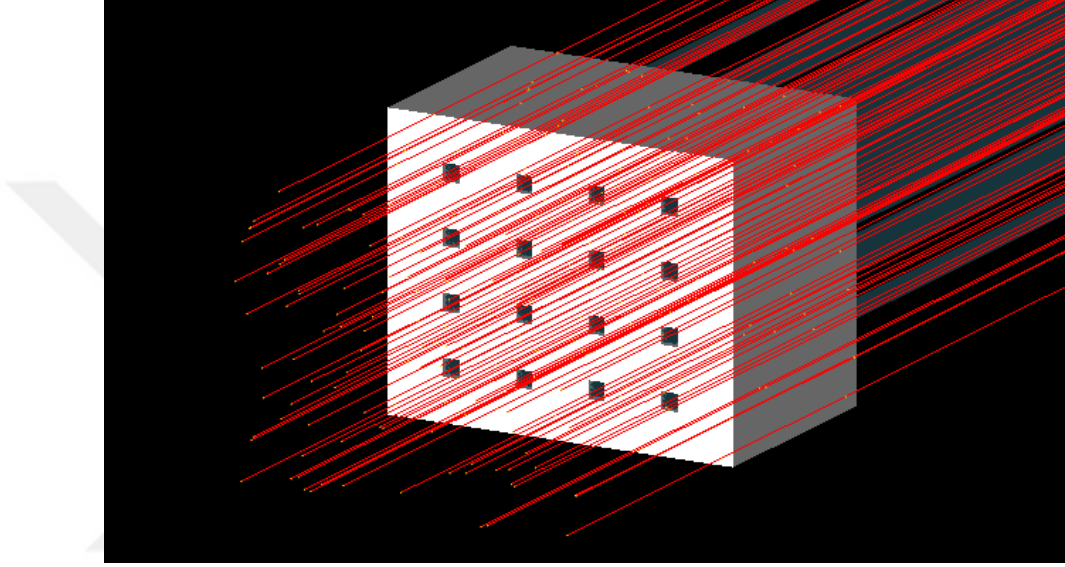
Bu çalışma kapsamında QGSP_BERT ve FTFP_BERT fizik listelerini kullanılmaktadır. Bununla birlikte elektromanyetik süreçler “emstandard_opt0” olarak aktiftir. Bu geant4 içerisinde bir seçenek özel olarak ayarlanmadığında çalışan elektromanyetik fiziksel süreçler listesidir. Luminometre çalışmasında hem fiber testlerinde hem de luminometrenin tasarımsal testlerinde optik süreçler açıktır ve fotonların hareketleri, davranışları bu süreçler aracılığı ile takip edilmektedir. Eğer optik süreçler özel olarak açılmazsa, sistemde parçacıklar yine malzemeler üzerinde enerji bırakacak ve Compton saçılması, fotoelektrik ve çift oluşum gibi olaylar meydana gelmeye devam etmektedir. Fakat fotonlar sistem içerisinde oluşmamaktadır. Çok fazla foton oluşan ve donanımları kilitleyen sistemler için kapalı tutularak testler yapılabilmesi amacıyla bu şekilde tasarlanmıştır. Optik süreçlerin açık olması durumunda ise fotonlar doğrudan takip edilebilmektedir.

3.2.2. Geant4 Olay Üretici

Geant4 bir uzaya, uzay içerisinde materyalleri ve geometrisi ile tamamlanmış bir yapıya, bir de parçacık üreticisine ihtiyacı vardır. Simülasyon tüm bunlar tamamlandıktan sonra koşturulur (run komutu verilir). Luminometre dedektörü ve bileşenlerinin Geant4 uzayında test edilebilmesi için bir de parçacık üreticisine ihtiyacı vardır [35].

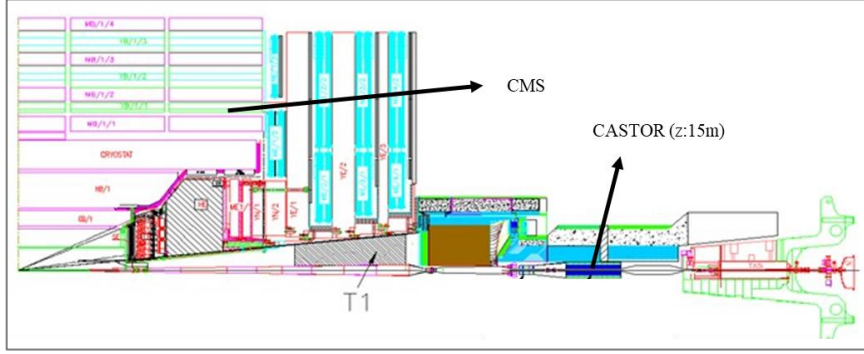
Bu çalışmada radyoaktif kaynak veya hüzmeye tanımlamak için kullanılan gun aracı, hesaplanan parçacık dağılımı için ise hepmc aracı olmak üzere 2 farklı parçacık üretici kullanılacaktır. Bunlardan ilki Geant4 içerisindeki Gun olarak ifade edilen parçacık üretici aracı, temel parçacık ışıınımları için kullanılır. Bu araç, belirli bir parçacığın enerji, momentum ve konum gibi başlangıç parametrelerini belirleyerek simülasyon ortamına yerleştirmektedir. Gun aracı, özellikle basit geometrilerde ve kontrol edilmesi gereken test

senaryolarında tercih edilir. Bu araç sayesinde, araştırmacılar belirli bir parçacık davranışını izole ederek analiz edebilir ve dedektörün bu parçacıklara tepkisini detaylı bir şekilde inceleyebilir. İlk çalışma olarak 20 GeV, 50 GeV ve 100 GeV’lik elektronlar luminometre simülasyonunda, luminometrenin ön yüzüne rastgele noktalara gönderildi. Fiber simülasyonunda ise, 50 GeV enerjili elektronlar fibere belirli açı ve çarpma noktalarına gönderildi.



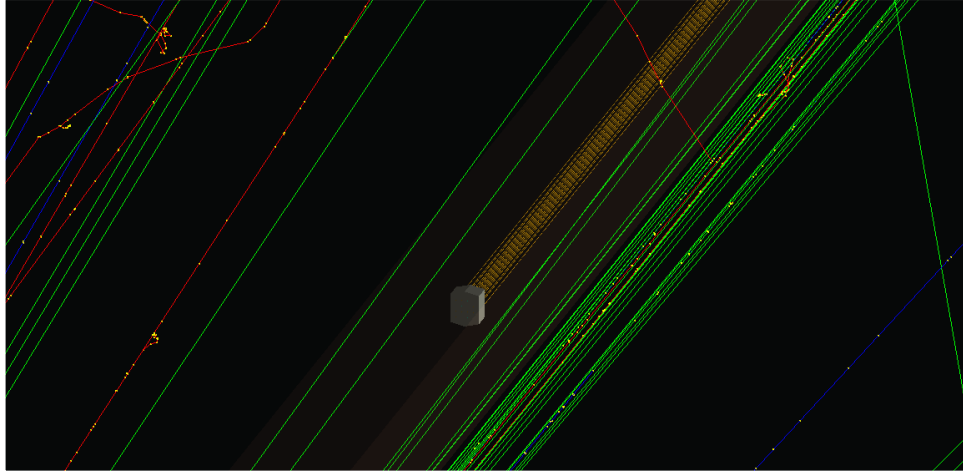
Şekil 3.14: Luminometre dedektörü üzerine rastgele gönderilen test parçacığı geantino ile gösterilen yüzey tarama alanı.

Diğer bir parçacık üretici olarak kullanılan HepMC, yüksek enerji fizik simülasyonları için standart bir veri yapısı sunan bir C++ kütüphanesidir. Bu çalışmada kullanılan HepMC modeli, gerçek CMS deney verilerini simülasyona entegre etmek için kullanılmıştır. CMS, CERN'deki Büyük Hadron Çarpıştırıcısında bulunan bir dedektördür ve sağladığı veriler, parçacık fiziği araştırmalarında değerli bir kaynaktır. HepMC modeli kullanılarak, bu gerçek deney verileri simülasyon ortamına aktarılmış ve böylece daha gerçekçi çarpışma senaryoları oluşturulmuş olur. Bu yaklaşım, simülasyon sonuçlarının gerçek deney verileri ile doğrulamasını sağlar ve araştırmacılara dedektör tasarımı ve optimizasyonu konularında daha güvenilir bilgiler sunar.



Şekil 3.15: LHC’de CASTOR’un konumu.

Bu çalışmada luminometre dedektörü tasarımı Şekil 3.15’te gösterilen LHC hüzme hattında CMS önündeki CASTOR Table (z:15 m, x:20 cm) alanına yerleştirilerek CMS HepMC verileri ile test edildi [35]. Şekil 3.16’te HEPMC aracı kullanılarak luminometre dedektörü üzerine gelen parçacıklar gösterilmiştir. Geant4 eğer özel olarak ayarlanmazsa parçacıkların uzay içerisindeki yollarını yeşil, kırmızı ve mavi renkte çizmektedir. Burada yeşil yüksüz parçacıkları, mavi ve kırmızı ise elektrik yüklü parçacıkları göstermektedir.



Şekil 3.16: CMS HepMC verileri ile Geant4 uzayında luminometre dedektörünün Geant4 arayüzündeki görünümü.

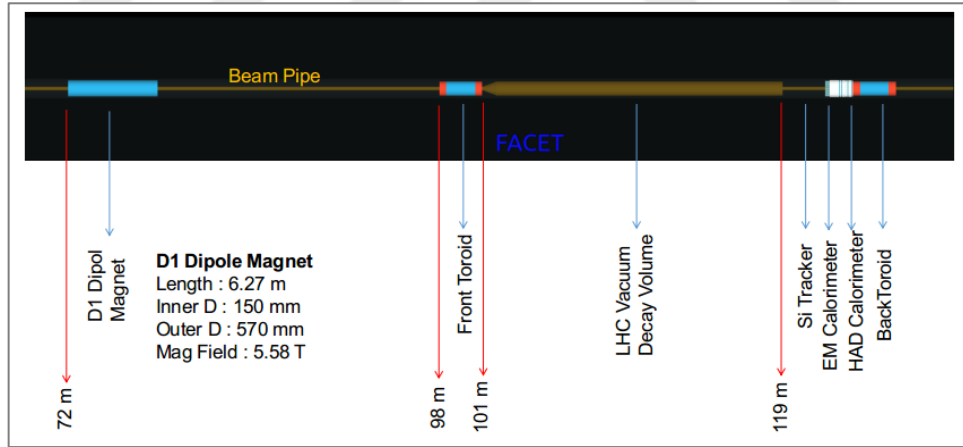
Bu iki farklı yaklaşım, Geant4 platformunun esnekliğini ve çeşitli araştırma ihtiyaçlarına uyum sağlama yeteneğini göstermektedir. Gun aracı ile basit testler gerçekleştirilirken, HepMC modeli aracılığıyla CMS verilerinin kullanılması, simülasyonları daha karmaşık ve gerçekçi hale getirmekte ve böylece dedektör tasarımlarının gerçek dünya senaryolarında nasıl performans göstereceğine dair değerli bilgiler sağlamaktadır.

3.2.3. Simülasyon Verilerinin Depolanması ve Analizi

Bu çalışmada simülasyon verilerini analiz etmek için sıkça kullandığımız ROOT Analiz uygulaması, parçacık fiziği ve ilgili disiplinlerde kullanılan temel yazılım araçlarından biridir. Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (LHC) gibi dev deneylerde milyonlarca veri noktasının işlenmesi, görselleştirilmesi ve analiz edilmesi gerekir. Bu amaçla geliştirilen ROOT, parçacık fiziği araştırmacıları için oldukça güçlü ve kapsamlı bir platform sunmaktadır. İlk olarak 1990'ların ortasında CERN'de başlatılan proje, günümüzde parçacık fiziği topluluğunun ihtiyaçlarına göre sürekli geliştirilmekte ve genişletilmektedir.

Luminometre Geant4 simülasyonu için ROOT dosyası içerisine 6 ayrı ntuple (veri kümesi) ağacı eklenmiştir. Ntuple altındaki verilerin vektörel olarak depolanması sayesinde her bir foton ve olay için tek bir girdi olarak kaydedildi. Vektörler açılarak analizlerin yapılması daha da kolay bir hale getirilmiştir.

3.3. FACET GEANT4 SİMÜLASYONU



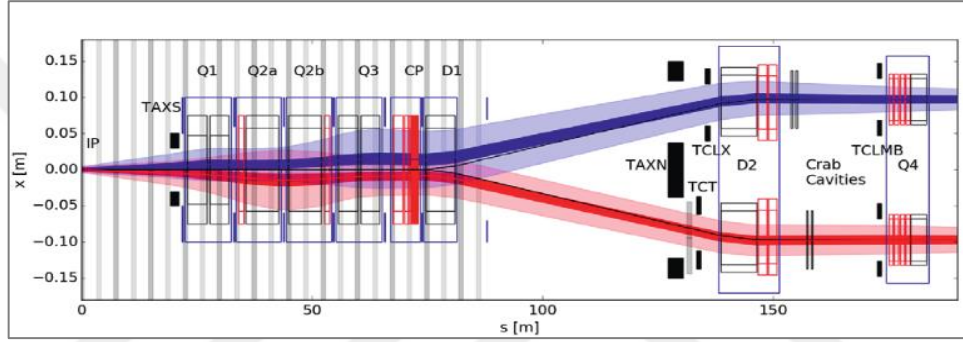
Şekil 3.17: FACET Geant4 simülasyonu arayüzünden görünümü.

FACET projesi Şekil 2.15’de gösterildiği gibi dedektör sistemlerinden oluşan geniş bir yapıya sahiptir. FACET için geliştirdiğimiz geant4 simülasyonu içerisinde bu dedektör sistemleri her biri ayrı ayrı detaylıca tasarlanarak entegre edildi. FACET geometrisi parça parça ve bir bütün olarak geant4 ile testlere tabi tutulmuştur. Bu testler optimizasyonlar için gereklidir ve FACET geometrisinin son halini ortaya çıkarmaktadır.

Geant4 FACET simülasyonu içerisinde en temel yapılardan biri hüzm hattıdır. CMS’in sıfır noktasından başlayarak FACET projesinin olduğu noktayı da içine alarak inşa edilmiştir.

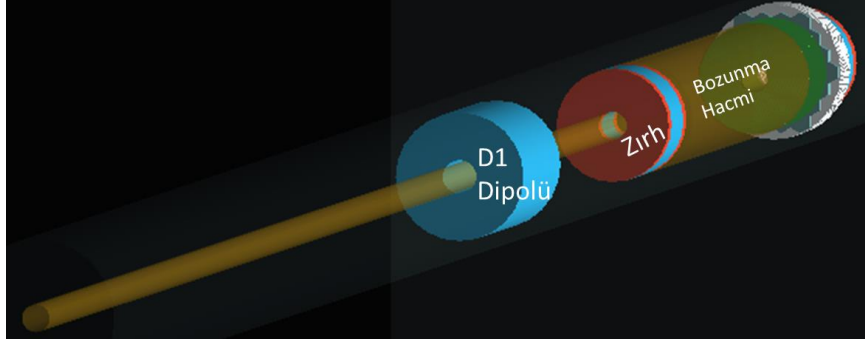
3mm paslanmaz çelik bir boru şeklinde tasarlanmıştır. CMS'in sıfır noktasında çarpışan proton-proton parçacıklarının ürünleri vakum olarak tanımlanan hüzme hattı içerisinde ilerlemektedirler. Oluşan bu parçacıklar hüzme hattı boyunca ilerlerken gerçeğine uygun biçimde hüzme hattının yapısından da etkilenmektedirler.

D1 Ayırma dipolü, hızlandırıcı hattında protonları etkileşim noktasına (IP) yönlendirmek ya da hızlandırıcı hattında tutmak için kullanılan bir magnettir. FACET'in bulunduğu bölgeye çarpışmadan sonra gelecek parçacıkları da yüklerine bağlı olarak yollarından saptırmaktadır. Bundan dolayı facet simülasyonunda önemli bir yeri vardır.

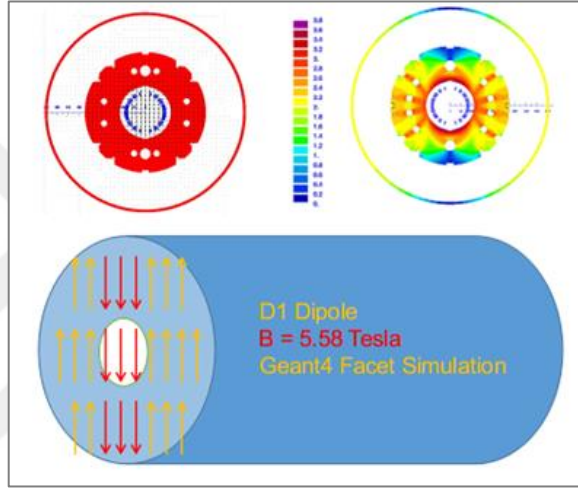


Şekil 3.18: LHC hüzme hattında protonları yönlendiren ve hüzme hattı içerisinde tutarak hızlanmalarını sağlayan magnetler ve sistemin şeması [13].

Şekil 3.18'de gösterildiği gibi protonları içeren hüzmeler, hüzme hattı içerisinde magnetler sayesinde tutulmaktadır. Bu magnetler protonları hüzme hattında tutmalarının yanı sıra çarpışma sonrası da FACET'in olduğu bölgeye gelen parçacıkları etkilemektedirler ve yönlendirmektedirler. D1 dipolünün FACET'in olduğu bölgeye etkisini incelemek için sıfır noktasında yani CMS içerisinde 14 TeV merkezi çarpışma enerjisi ile proton-proton çarpışması sonucu oluşacak parçacıklar Pythia ile simüle edilmiştir. Daha sonra bu parçacıklar GEANT4 FACET simülasyonuna D1 dipolü ile entegre edilmiştir.



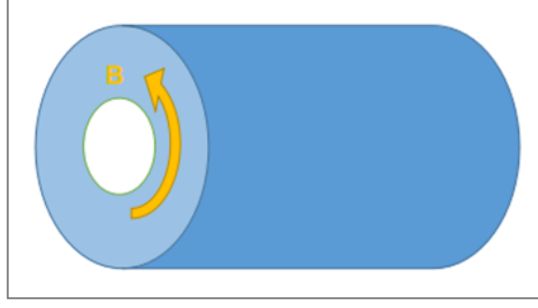
Şekil 3.19: FACET'in önünde yer alan ve LHC'de protonları hüzme hattında tutmakla sorumlu D1 dipolünün GEANT4 arayüzünde görünümü.



Şekil 3.20: FACET'in önünde yer alan ve LHC'de protonları hüzme hattında tutmakla sorumlu D1 dipolünün manyetik alan vektörlerinin gösterimi ve teknik çizimi [13].

Şekil 3.20'de D1 dipolünün manyetik alanı ve üzerindeki manyetik alan yön vektörleri gösterilmiştir. GEANT4 FACET simülasyonuna manyetik alanı 5.58 Tesla, çapı 57 cm ve uzunluğu 6.27m olarak aslına uygun olarak entegre edilmiştir. Şekil 3.19'de FACET dedektörü sistemi önünde yer alan D1 dipolü gösterilmektedir. Simülasyon bu şekli ile facet bölgesine gelen parçacıkların üzerine D1 dipolünün etkilerini inceleyebilmektedir.

FACET bozunma hacmine hüzme hattı çevresinden girecek olan parçacıkları soğurarak ya da manyetik alanı ile saptırarak sayılarını azalmak için bozunma hacmi önüne Hodoskop'tan önce bir demir zırh eklenmelidir. Böylece bozunma hacmine yalnızca hüzme hattından gelen parçacıklar girebilir ve bozunma hacminde bozunan parçacıklar dedektör sistemleri yardımıyla tespit edilebilir.

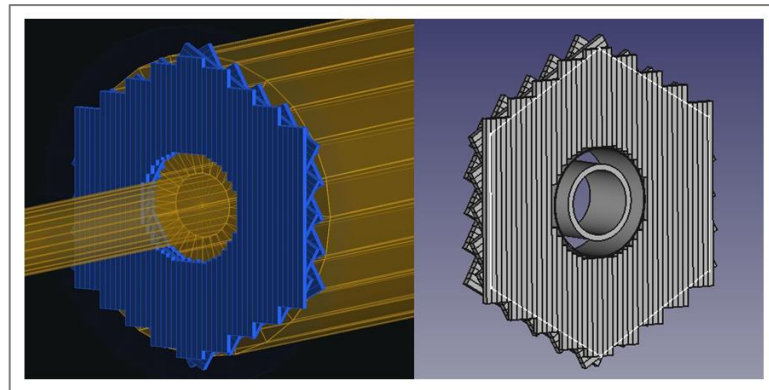


Şekil 3.21: FACET tasarımında Hodoskop önünde yer alan zırhın geometrik yapısı ve dairesel manyetik alanının gösterimi.

FACET önüne inşa edilecek zırhın çapı ilk tasarım için yarıçapı 30 cm, uzunluğu 2 m ve dairesel olarak tasarlanan manyetik alanı 1.6 Tesla'dır. Magnet farklı çap ($r=30\text{cm}, 50\text{cm}$) ve uzunluklarda ($L=1\text{ m}, 1.5\text{ m}, 2\text{ m}$) simülasyon üzerinde test edilmiştir.

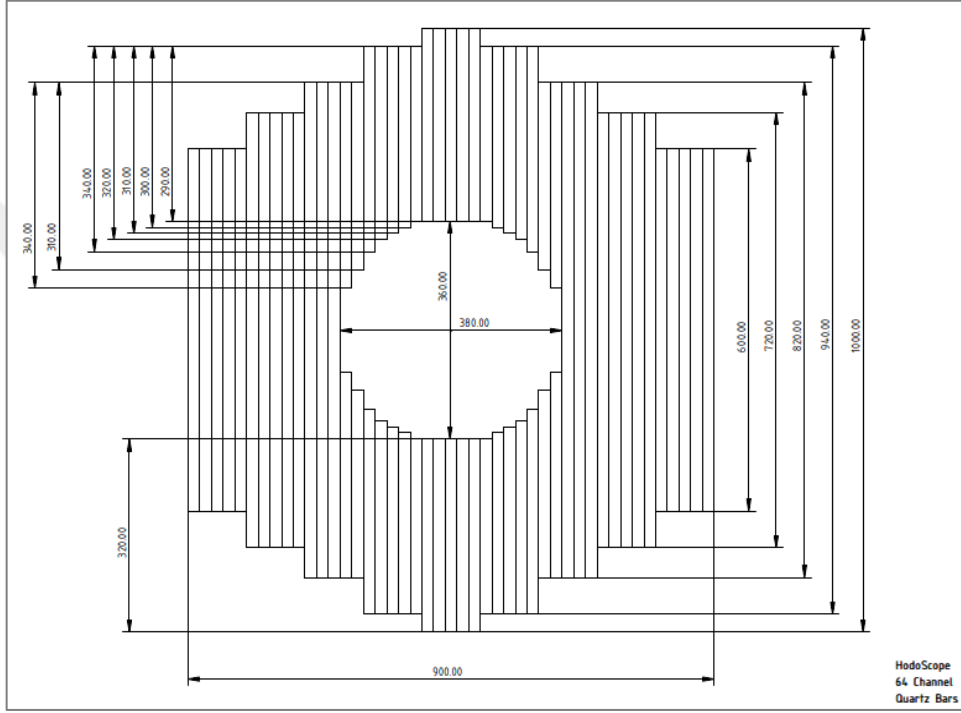
Hodoskop, parçacık fiziği deneylerinde kullanılan bir tür detektördür. Temel amacı, yüksek enerjili parçacıkların geçiş yollarını belirlemek ve bu parçacıkların varış zamanlarını kaydetmektir. Bu bilgiler, parçacıkların yollarını ve etkileşimlerini çözümlmek için kullanılır.

Hodoskoplar genellikle bir dizi hassas dedektör elemanından oluşur. Bu elemanlar, genellikle plastik veya organik sintilatörler, gaz odaları (örneğin, çok tel odası) veya başka tür dedektörler olabilir. Parçacıklar bu dedektörlerden geçtiğinde, ışık (sintilatörlerde) ya da elektrik sinyali (gaz odalarında) üretirler. Bu sinyaller, özel olarak tasarlanmış elektronik sistemler tarafından işlenmektedirler.



Şekil 3.22: FACET için kuvars barlardan oluşan hodoskop tasarımının geant4 arayüzünde (solda) ve 3d tasarımda (sağda) görünümü.

FACET’de hüzme hattı dışından sisteme giren parçacıkları ayırmak için hodoskop dedektörleri kullanılması planlanmaktadır. Hodoskop için kuvars barlardan oluşan ve pipe etrafını saran bir geometri simülasyon ortamında Şekil 3.22’de gösterildiği gibi tasarlanmıştır. Toplamda 64 kristalden oluşan bir hodoskop katmanı, 3 katmanlı bir yapıya sahiptir. Şekil 3.23’de her kristalin boyutunun gösterildiği bir teknik çizim yer almaktadır. Her katman 64 kuvars kristal’in foto-dedektörlere bağlanması ile toplam 64 kanal üzerinden izlenmektedir.



Şekil 3.23: FACET için kuvars barlardan oluşan hodoskop tasarımının teknik çizimi.

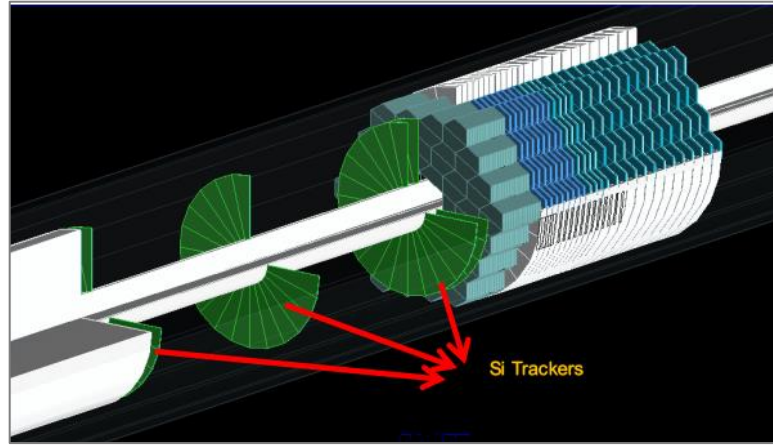
Hodoskop’un her katmanı 60 derecelik bir açı ile döndürülerek çözünürlüğün artması sağlanmaktadır. Hodoskop FACET simülasyonuna entegre edilerek hem Hodoskop’un FACET üzerine etkileri incelenebilmekte hem de ne kadar verimli çalıştığı optimize edilebilmektedir.

Bozunma hacmi FACET’in en önemli bölgesidir. Bozunma hacmine hüzme hattı içerisinde gelecek olan uzun ömürlü parçacıklar bozunma hacmi içerisinde bozunabilir. Bu bozunma sonucunda ortaya çıkan ürünler dedektör penceresine ulaştıklarında artık dedektörler ile tespit edilebilmektedirler. Tasarımlarımızda bozunma hacminin önemini anlamak için bozunma hacminin boyutları değiştirilerek ya da bozunma hacmini tamamen kaldırarak yalnızca hüzme hattı ile testler de yapılmıştır.

Yüksek enerji fizik deneylerinde kullanılan İz-Takip (Tracker) dedektörleri, çarpışma olaylarından kaynaklanan yüksek enerjili parçacıkların izlerini tespit etmek ve takip etmek için tasarlanmış cihazlardır. Bu dedektörler, parçacıkların geçtiği yolları hassas bir şekilde belirleyerek, parçacıkların türlerini, momentumlarını ve diğer fiziksel özelliklerini analiz etmek amacıyla kullanılırlar.

İz-Takip dedektörleri, genellikle silikon gibi yarı iletken malzemelerden yapılmış mikroşerit dedektörler veya piksel dedektörler içermektedirler. Bu dedektörler, geçen yüklü parçacıklar tarafından elektronlar ve delikler oluşturarak elektriksel bir sinyal üretmektedirler. Bu sinyaller, parçacıkların geçiş yollarının çok hassas bir şekilde belirlenmesini sağlamaktadırlar.

Silikon İz-Takip dedektörlerinin avantajları arasında, yüksek çözünürlüklü izleme kabiliyeti, hızlı tepki süresi ve yüksek radyasyon toleransı yer alır. Bu özellikler, özellikle Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (LHC) gibi yüksek enerjili parçacık çarpıştırıcılarında parçacık fiziğinin temel meselelerini araştırmak için elzemdir. Silikon İz-Takip dedektörleri, ayrıca parçacıkların yüksek detaylı profilini çıkararak, daha karmaşık fiziksel olayların anlaşılmasına yardımcı olmaktadır.



Şekil 3.24: FACET dedektör penceresinden hemen sonra 3 metrelik mesafeye konumlandırılan Silikon İz-Takip dedektörleri.

FACET dedektör sisteminin bir parçası olan Silikon İz-Takip dedektörleri, bozunma hacminden dedektör penceresine gelen parçacıkların ilk durağı olmaktadır. Dedektör penceresinden geçen parçacıklar iz-takip dedektörleri tarafından tespit edilmektedirler. Burada en önemli nokta FACET GEANT4 simülasyonu iz-takip dedektörlerinin hangi çözünürlükle olması gerektiği hakkında da bilgi vermektedir. Benzer şekilde iz-takip

dedektörlerinin konum, büyüklük, piksel büyüklüğü gibi birçok parametrenin optimizasyonunda FACET GEANT4 simülasyonu kullanılmıştır.

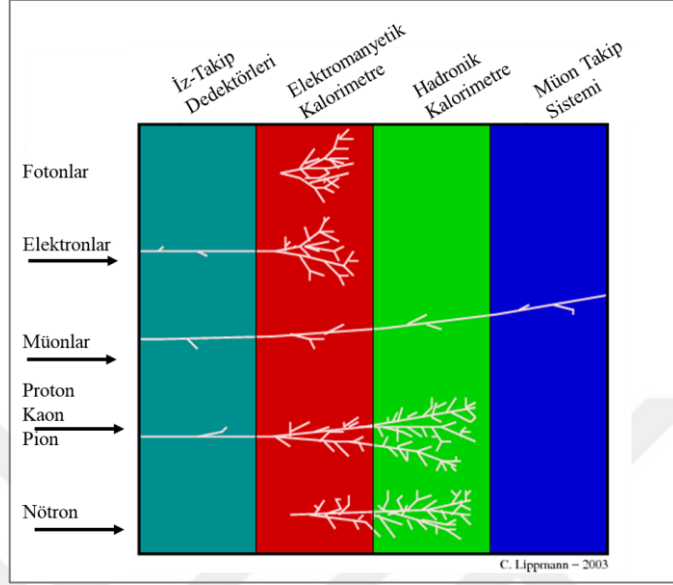
Silikon-İz Takip dedektörleri arka arkaya 5 ayrı yüzeyden oluşmaktadır. Her yüzey 1.8 mm Silikon ve arkasında 1.6 mm PCB materyali ile inşa edilmiştir. İlk iki ve son iki yüzey aralarında 10 cm mesafe olacak şekilde ve son yüzey ise 3 metrelik alanın ortasında yer alacak şekilde konumlandırılmıştır. Silikon İz-Takip dedektörleri iç yarıçapı 12,5 cm ve dış çapı 50 cm olacak şekilde hüzme hattı etrafını 360 derece sarmaktadırlar.

Kalorimetre, yüksek enerji fiziğinde parçacık detektörlerinin bir türüdür ve temel olarak çarpışma sonucu açığa çıkan enerjinin ölçülmesi için kullanılmaktadır. Bu cihazlar, çeşitli parçacıkların çarpışmaları sonucu oluşan enerjiyi ve bu enerjinin parçacık formunda nasıl dağıldığını tespit etmekte büyük bir rol oynar. Kalorimetreler, enerjiyi ölçme şekillerine göre elektromanyetik ve hadronik olmak üzere iki ana kategoriye ayrılır.

Elektromanyetik kalorimetreler, elektromanyetik etkileşime giren parçacıkların, yani fotonlar ve elektronlar gibi yüklü leptonların ölçümünde kullanılır. Bu tür kalorimetreler, parçacıkların soğurucu (absorber) adı verilen ve genellikle yüksek atom numarasına sahip malzemelerden (tungsten, demir, bakır, kurşun) yapılan katmanlara çarpmasıyla başlayan bir süreci takip eder. Şekil 3.25'te gösterildiği gibi parçacık soğurucu materyale çarptığında, bir elektromanyetik parçacık yağmuru meydana gelir; bu, parçacığın enerjisinin başka parçacıklara transfer edilmesi ve bu parçacıkların da enerjiyi sintilatörler ya da silikon dedektörler aracılığıyla tespit edilmesi sürecidir. Elektromanyetik kalorimetreler, LHC gibi karmaşık deney düzeneklerinde, özellikle yüksek enerji fiziği ve temel parçacık araştırmalarında kullanılır ve bu sayede bilim insanları evrenin temel yapı taşlarını daha iyi anlayabilir.

Hadronik kalorimetreler ise daha çok hadronlar gibi karmaşık parçacıkların etkileşimlerini ölçmek için tasarlanmıştır. Hadronlar, protonlar, nötronlar ve diğer karmaşık parçacık türlerini içerir ve bu parçacıklar elektromanyetik kalorimetrelerle göre farklı bir etkileşim mekanizmasına sahiptir. Hadronik kalorimetreler, elektromanyetik kalorimetrelerden genellikle daha kalın ve daha büyük soğurucu katmanlarına sahiptir; bu katmanlar demir veya bakır gibi malzemelerden yapılabilir. Hadronların soğurucu materyale çarpmasıyla, hadronik yağmur adı verilen ve elektromanyetik yağmurlardan daha karmaşık ve kestirilmesi zor olan

bir süreç başlar. Hadronik kalorimetreler, bu süreçteki enerjiyi tespit edebilen ve onu ölçebilen cihazlardır.

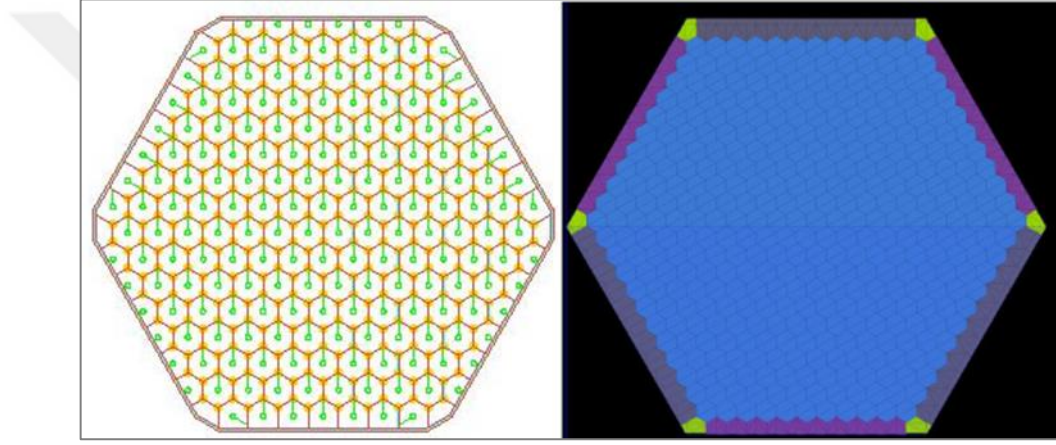


Şekil 3.25: Kalorimetreler içerisinde geçen parçacıkların oluşturdukları parçacık yağmurları [36]. HGCal, LHC'nin CMS deneyi için özel olarak geliştirilmiş bir dedektördür. Bu dedektör, LHC'nin luminositesinin ve enerjisinin arttığı koşullarda, yani HL-LHC projesi sırasında, daha fazla veri toplamasını ve daha detaylı analiz yapmasını sağlamak üzere tasarlanmıştır. HGCal, özellikle yüksek radyasyon koşullarında dahi üstün performans göstermek için silisyum detektörler ve sintilatörler kullanarak son derece yüksek çözünürlüğe ulaşan bir yapı sunar.

HGCal'ın tasarımı, çarpışma sonucu ortaya çıkan parçacıkların izlerini ve enerji profillerini detaylı bir şekilde tespit edebilmek için silindirik bir geometriye sahiptir. Merkezde yer alan hüzme hattı etrafına konumlandırılan bu dedektör, gelen parçacıkların enerji ve yönlerini maksimum hassasiyetle ölçebilir. Bu yapı, elektromanyetik ve hadronik olmak üzere iki ana bölümden oluşmaktadır.

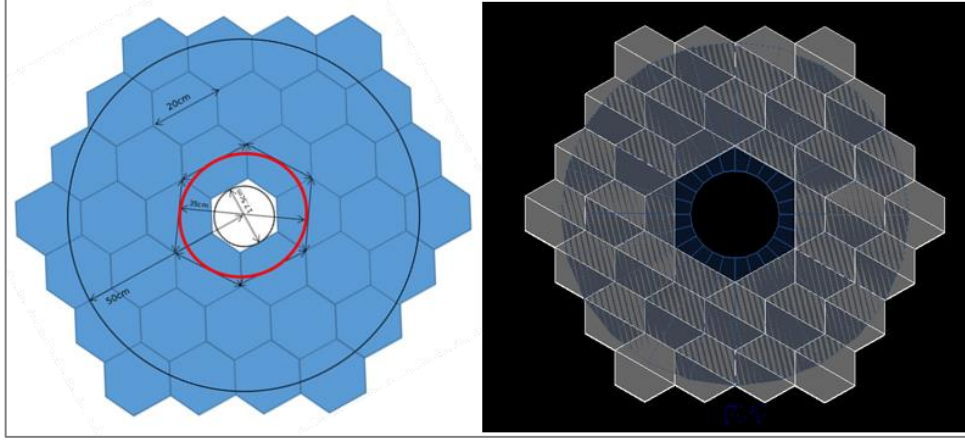
Yüksek çözünürlük, HGCal'ın en önemli özelliklerinden biridir. Bu özelliği sayesinde, parçacık çarpışmalarından kaynaklanan karmaşık olaylar çok daha net bir şekilde çözümlenebilir. Parçacık izlerinin ve düş profillerinin detaylı incelenmesi, bilim insanlarına Higgs bozonu gibi temel parçacıkların özelliklerini daha iyi anlama, süper simetri veya karanlık madde gibi yeni fizik teorilerini test etme olanağı tanır.

FACET için geliştirilen tasarımlarda kullanılan kalorimetreler HGCal dedektör sistemi ile aynı teknolojiyi kullanacaktır. Bu sebeple FACET GEANT4 simulasyonu da benzer bir kalorimetre tasarımını içerecektir. Örneğin elektromanyetik kalorimetrenin bir plakası 2.1 mm kurşun, 0.3 mm paslanmaz çelik, 0.1 mm bakırdan oluşan bir soğurucu üzerine, 1.6 mm kalınlığında bir PCB, 1.5 mm hava boşluğu (kablolama için), 1.6 mm ikinci PCB, 1.4 mm tungsten-bakır alaşım ve 0.3 mm silikon malzemedan oluşmaktadır. Bu yapı tek başına elektromanyetik kalorimetrenin bir plakasını oluşturmaktadır. Elektromanyetik kalorimetrenin iki plakası 6 mm kalınlığından bakır bir soğurucunun iki tarafına birer adet olmak üzere yerleştirilmiştir. Benzer şekilde iki farklı plaka yapısından oluşan hadronik kalorimetre vardır.

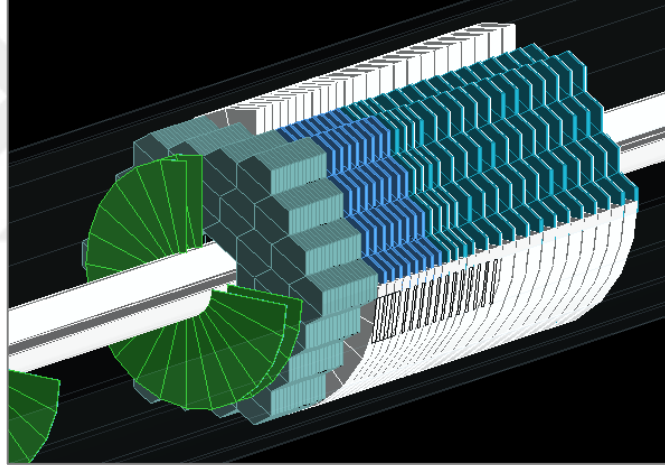


Şekil 3.26: HGCal elektromanyetik ve hadronik kalorimetrelerinde kullanılan altıgen modüllerin (0.52 cm^2) teknik çizimi (solda) ve GEANT4 ile tasarımı (sağda) [13].

FACET için kullanılacak kalorimetre yapısı birebir HGCal ile aynı yapıda değildir. FACET dedektörü sisteminde kullanılacak kalorimetreler sintilatörler içermeyecek ve altıgen modüllerin geometrik dizilimi ile kullanılacaktır. Elektromanyetik ve hadronik kalorimetreler aynı geometride arka arkaya dizilecektir. Şekil 3.26'te gösterildiği gibi her bir plaka içerisinde silikon dedektörler bulunduran altıgen modüllerden oluşmaktadır. Her bir altıgen modül wafer denilen silikon algılayıcılar bütünüdür. Bu silikon algılayıcılar, alanları 1.28 cm^2 ve 0.52 cm^2 olmak üzere iki çeşittir. Her iki ölçü için de altıgen modüller simülasyon içerisine entegre edilmiştir.



Şekil 3.27: FACET dedektör sistemi için altıgen modüllerden oluşan bir kalorimetre plakasının teknik çizimi (solda) ve GEANT4 ile tasarımı (sağda).

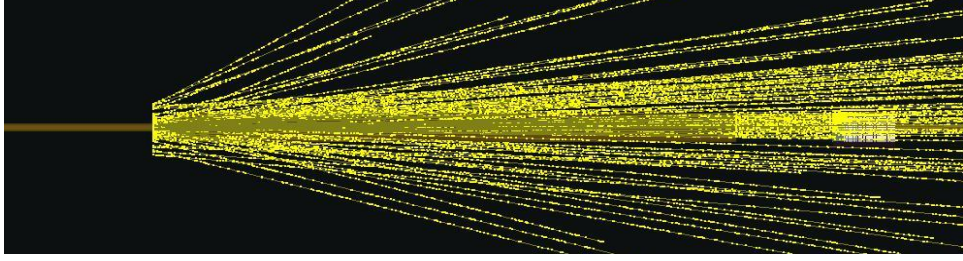


Şekil 3.28: FACET iz-takip dedektörü arkasına yerleştirilen kalorimetrelerin plakalarının z-ekseni boyunca dizilimi.

Şekil 3.27’de ve Şekil 3.28’de gösterildiği gibi elektromanyetik ve hadronik kalorimetreler 50 cm dış yarıçap için yarım ve tam altıgen modüller arka arkaya gelecek şekilde hüzmeye hattı etrafına, soğurucular ile yerleştirilmiştir. Elektromanyetik kalorimetre 14 plakadan (~34cm) ve hadronik kalorimetre (aralarında soğurucu plakalar olacak şekilde) 24 plakadan (~160cm) oluşmaktadır. FACET GEANT4 simülasyonu içerisinde toplamda 2 metrelik alana kalorimetreler yerleştirilmiştir.

FACET GEANT4 simülasyonu kalorimetreleri de optimize etmek için tasarlanmıştır. Bu optimizasyonlar sırasında kalorimetrelerin plaka sayıları, altıgen modüllerin yerleşim

geometrileri, soğurucuların materyalleri ve kalınlıkları gibi birçok parametre değiştirilerek simülasyon ortamında testler yapılmıştır.



Şekil 3.29: HEPMC kullanılarak simülasyona entegre edilen ve FACET için geliştirilen FLUKA’da üretilen parçacıkların simülasyon arayüzünde FACET üzerine doğru ilerleyişi.

FACET GEANT4 simülasyonu için birden fazla parçacık üretici kullanılmıştır. Bunlar sırasıyla, standart geant4 parçacık üretici (gun), HEPMC ile CMS için Pythia kullanılarak oluşturulan 14 TeV merkezi enerjili proton-proton çarpışması sonucu oluşan parçacıklar ve yine HEPMC kullanılarak FACET için özel olarak geliştirilen FLUKA simülasyonu ile üretilen CMS sonrası 100. Metreye ulaşan parçacıklar kullanılmıştır.

FACET FLUKA simülasyonu öncelikle FACET’in kurulacağı 100 metre ve ötesindeki bölgelerde radyasyon miktarını araştırmak için hazırlanmıştır. CMS, kuadropol ve dipoller gibi LHC hattı boyunca uzanan donanımları GEANT4 üzerinde tasarlayıp çalıştırmak çok uzun süreçler olacaktır. FLUKA simülasyonundan belirli bir bölgeye ulaşan parçacıkları listelemek mümkündür. Bu listeler HEPMC2 aracılığı ile GEANT4’te kullanılacak formata getirilerek simülasyonun koşturma süreleri düşürülmüştür.

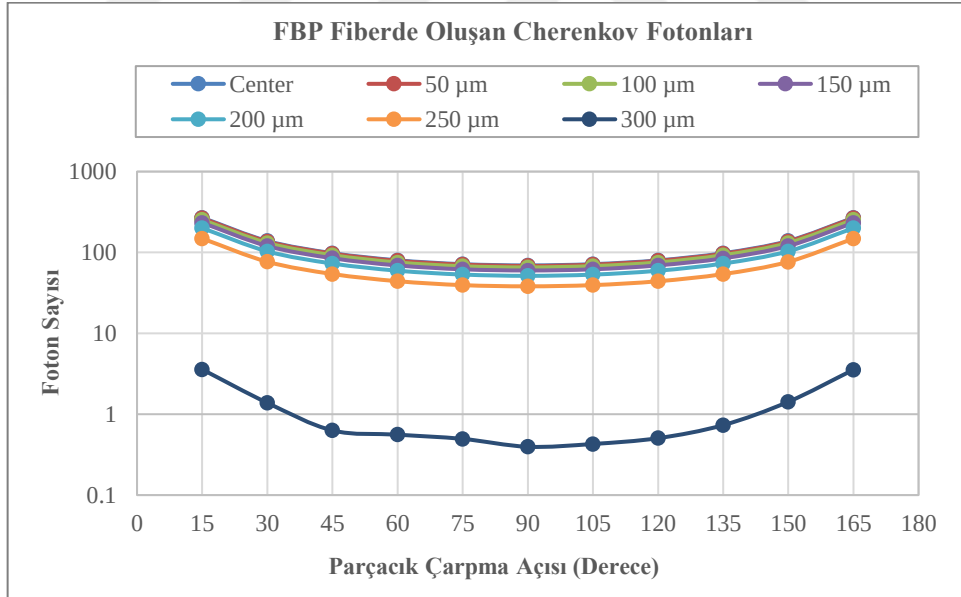
FLUKA FACET simülasyonu her bir parçacık için ayrı bir belge oluşturur. Bu belgeler GEANT4 FACET simülasyonuna her bir parçacık için ayrı ayrı girdi olarak verilmiştir. Sonucunda her bir parçacık türünün etkileri ayrı olarak incelenmiştir.

4. BULGULAR

4.1. LUMİNOMETRE DEDEKTÖRÜNÜN BİLEŞENLERİNİN TESTLERİ

4.1.1. Kuvars Çekirdekli Fiberlerin Simülasyon Testleri

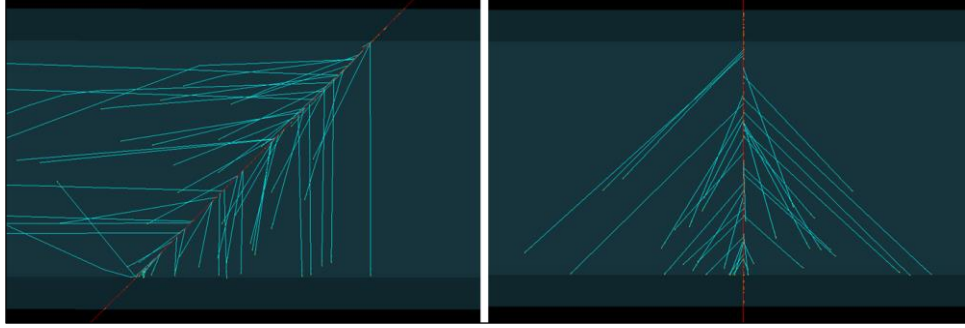
Bu çalışmada iki farklı kuvars çekirdekli fiber kullanıldı (Bölüm 3.1.1.1. Kuvars Çekirdekli Fiberler ve Geant4). Bunlardan biri yeni nesil bir fiber olan FBP fiberi, diğeri ise uzun süredir LHC deneylerinde kullanılan FSHA fiberidir. Şekil 3.2’de iki fiberin de deneysel verileri gösterilmektedir. Bu veriler Geant4 simülasyonuna entegre edildi ve simülasyonlar 5000 olay için, fiber üzerine 50 GeV enerjili elektronlar 11 farklı çarpma açısı (Şekil 3.6) ve 7 farklı çarpma noktası (Şekil 3.7) için, fiberin uzunluğu ve açık ucunun durumu değiştirilerek gönderildi. Bu simülasyonlar sayesinde fiberler detaylıca incelenerek optimizasyon için gerekli veriler elde edilmiştir.



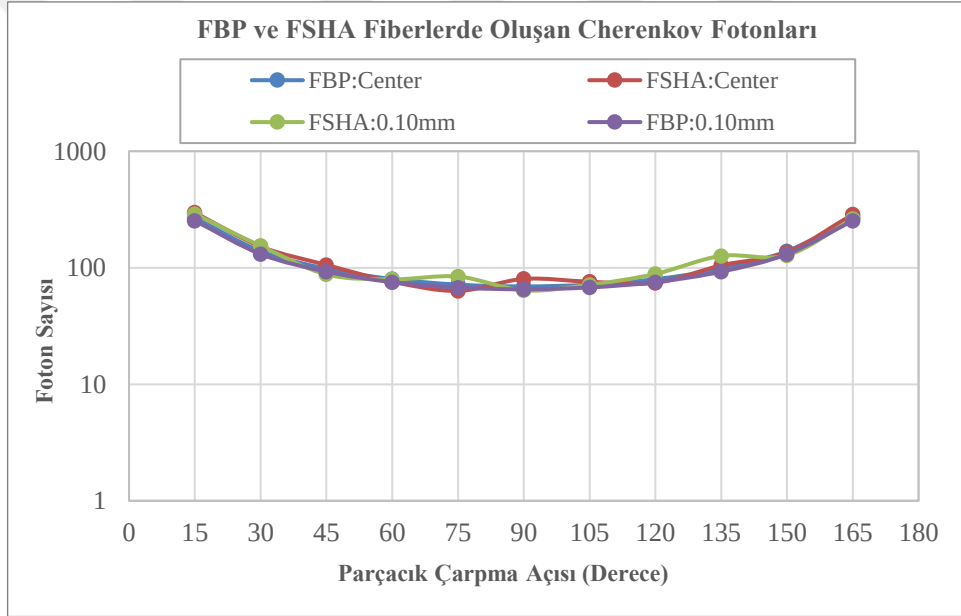
Şekil 4.1: FBP fibere 11 farklı açı ve 7 farklı noktadan çarpan yüklü parçacıkların (77 durum) fiber içerisinde oluşturdukları Cherenkov fotonlarının sayıları.

Şekil 4.1’de FBP fiberine 11 farklı çarpma açısına bağlı olarak 7 farklı çarpma noktasının foton sayıları grafiği gösterilmektedir. En fazla foton, yüklü parçacığın merkeze çarpması sonucu oluşmuştur. Grafikler bir “U” şekli çizmektedir. Bunun temel sebebi çarpma açısının yüklü parçacığın fiber içerisindeki seyahat süresini etkilemesindendir (Şekil 4.2). Fiber

içerisinde yüklü parçacık 15 ve 165 derecede en uzun mesafeye ulaşırken, 90 derecede en kısa mesafeyi kat etmektedir.



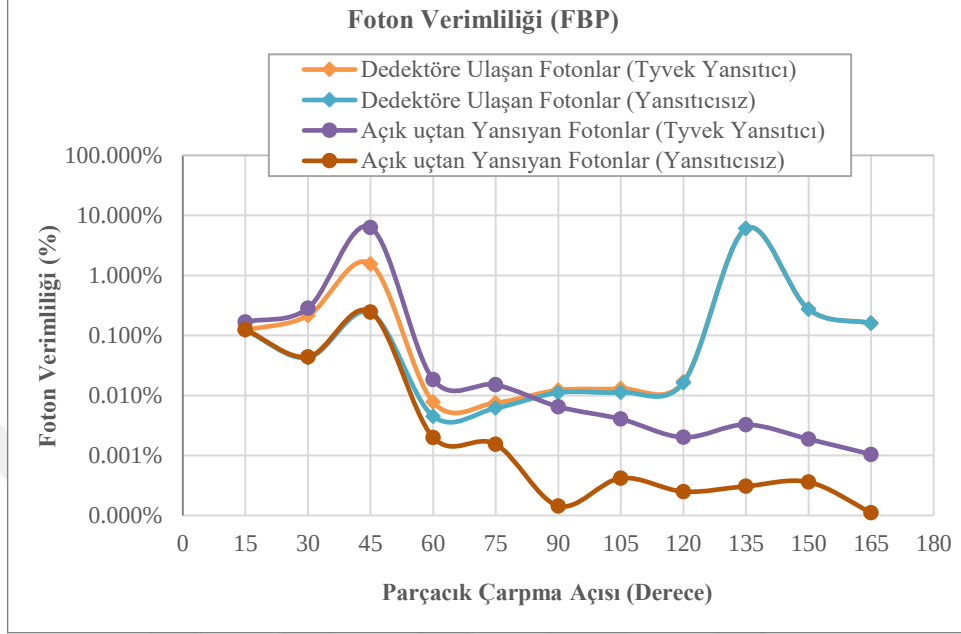
Şekil 4.2: Fibere 45 derece (solda) ve 90 derece (sağda) çarpma açısı ile çarpan yüklü parçacıklar ve ürettikleri Cherenkov fotonları.



Şekil 4.3: FBP ve FSHA fiberlerine 11 farklı açı ve 2 farklı noktadan çarpan yüklü parçacıkların fiber içerisinde oluşturdukları Cherenkov fotonlarının sayıları.

Şekil 4.3'te FBP ve FSHA fiberlerinin içerisinde oluşan Cherenkov fotonlarının sayılarının açılara bağlı değişimlerinin grafikleri gösterilmektedir. FBP ve FSHA fiberleri benzer çekirdek çaplarına sahip oldukları için (Şekil 3.1), benzer sayıda foton oluşturmuşlardır. İki fiber için de çarpma noktaları çekirdeğin merkezinden dışarı doğru, yani kaplamaya doğru ilerledikçe, foton sayılarında azalma görülmektedir. Çarpma noktaları da çarpma açlarına benzer bir etki göstermektedir. Yüklü parçacığın aldığı yol, fiberin silindirik yapısından dolayı, çarpma noktası fiberin çekirdeğinden kaplamasına doğru ilerledikçe azalacaktır ve daha az yol kat eden yüklü parçacık daha az Cherenkov fotonu oluşturacaktır. Bundan dolayı fiber

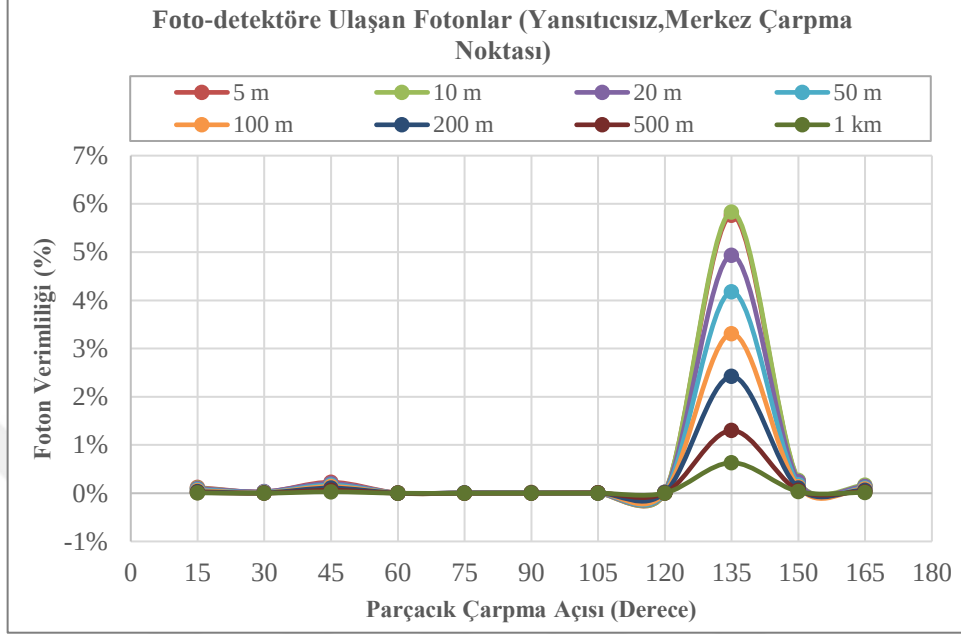
içerisinde en fazla foton çarpma noktası merkez seçildiğinde, en az foton ise çarpma noktası 0.3mm seçildiğinde oluşmuştur.



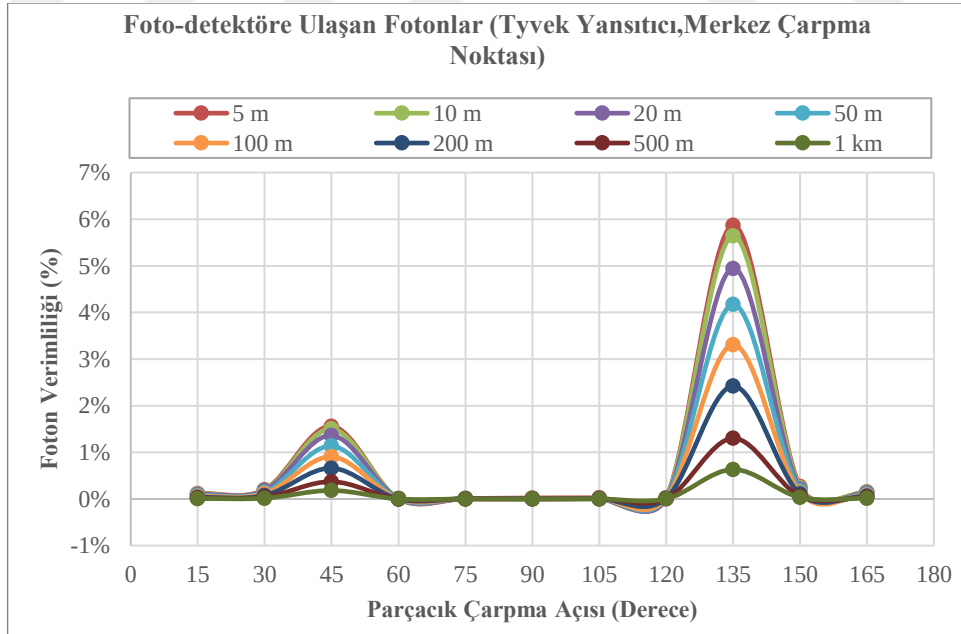
Şekil 4.4: FBP fiberi için açık uça tyvek yansıtıcı kullanılan ve yansıtıcı kullanılmayan durumlarda çarpma açılarına bağlı foton verimliliği.

Foton verimliliği, fiberin dedektör ucuna ulaşan ya da fiberin açık ucundan tekrar fiberin içerisine yansıyan fotonların, fiberin içerisinde oluşan tüm fotonlara oranıdır. Yani foton verimliliği fiberin oluşturabildiği fotonları ne kadar iletebildiğinin bir ölçüsüdür ve yüzdelik olarak verilmektedir. Şekil 4.4'te fiberin açık ucuna tyvek yansıtıcı kaplandığı durumda ve yansıtıcı kaplanmadığı yani fiberin açık ucunun havaya temas ettiği durumda, çarpma açılarına bağlı olarak foton verimliliği gösterilmektedir. Foto-dedektörün camına ulaşan fotonlar 135 derecede tyvek yansıtıcı kullanılması fark etmeksizin en yüksek değerdedir. Burada yüklü parçacığın çarpma açısı foto-dedektör yönünde olduğu için, fiber içerisinde oluşan Cherenkov fotonlarının yönü de foto-dedektöre doğrudur. Bundan dolayı yansıtıcının önemi düşüktür. Fakat yüklü parçacığın çarpma açısı 45 derece olduğunda fiber içerisinde oluşan Cherenkov fotonlarının büyük kısmının yönü açık uca doğru olacaktır. Eğer tyvek kaplama ile fotonun açık ucu kaplanırsa, fotonlar tekrar fiber içerisine dönecektir ve foto-dedektöre yönelecektir. Böylece daha fazla foton foto-dedektörde algılanacaktır. Eğer yansıtıcı kullanılmazsa, açık uç havayla bir yüzey oluşturacak ve havanın kırınım indisi fiberin katmanlarından daha düşük olduğu için fotonların bir kısmı fiberden kaçarak havaya geçecektir. Bu da sistemde foton kaybına sebep olacak ve daha az foton foto-dedektörde

algılanacaktır. Bu çalışma gösteriyor ki açık uca tyvek gibi bir yansıtıcı kaplama yapmak foton verimliliğini artıracaktır.



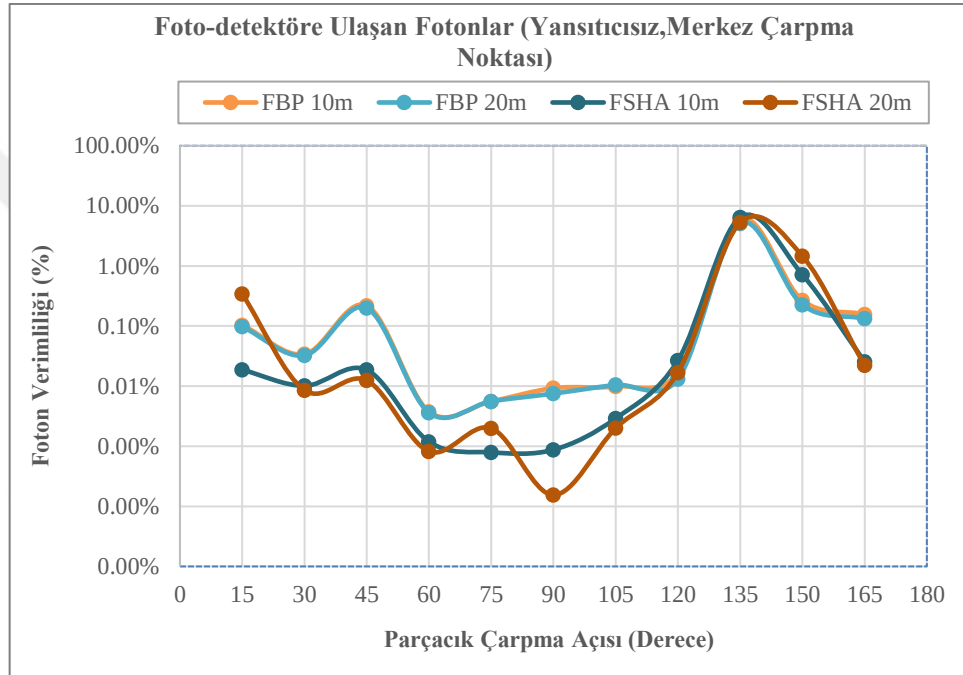
Şekil 4.5: FBP fiberi için açık uçta yansıtıcı kullanılmayan durumlarda çeşitli fiber uzunlukları için çarpma açılarına bağlı foton verimliliği.



Şekil 4.6: FBP fiberi için açık uçta tyvek yansıtıcı kullanılan durumlarda çeşitli fiber uzunlukları için çarpma açılarına bağlı foton verimliliği.

Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da FBP fiberinin açık uçta tyvek kaplama kullanılan ve kullanılmayan durumlarda uzunluk testleri yer almaktadır. Fiber içerisinde oluşan Cherenkov fotonları 135

derecelik çarpma açısı için, en fazla 5 metrelik fiberde foto-dedektör camına ulaşırken (%6) en az ise 1 km’lik fiberde foto-dedektör camına ulaşmaktadır (%1’in altında). İki grafikte de uzunluk arttıkça fiberin foton taşıma kabiliyeti azalmaktadır. Grafikler kıyaslandığında en önemli farklardan biri de açık uca tyvek kaplandığında 45 derecelik çarpma açısında fiber içerisinde oluşan Cherenkov fotonlarının foto-dedektöre ulaşma sayıları artmıştır. Benzer şekilde 135 derecelik çarpma açısında da açık uca tyvek kaplandığında foto-dedektöre ulaşan Cherenkov fotonları sayısında küçük bir miktarda artış gerçekleşmiştir.

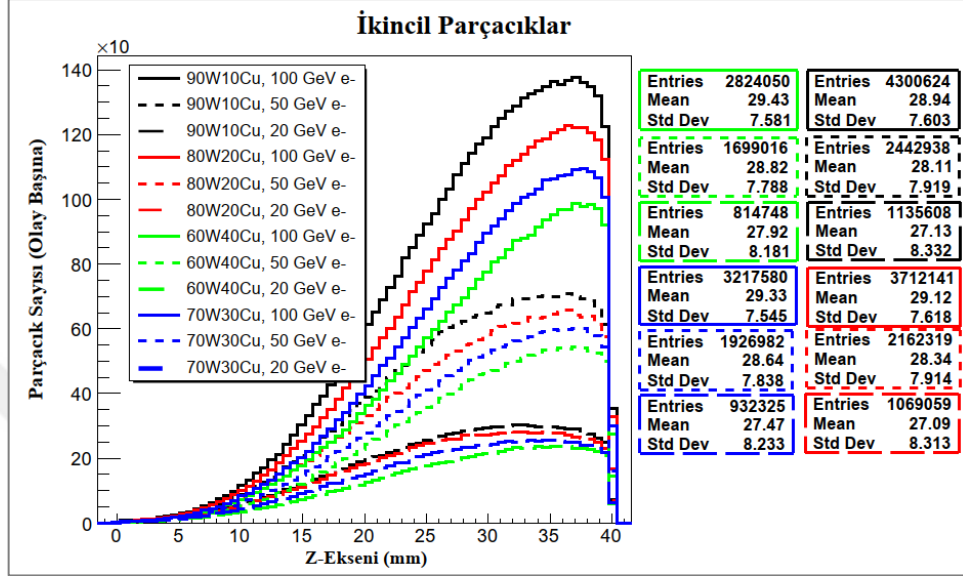


Şekil 4.7: FBP ve FSHA fiberlerinin iki farklı uzunluğu için çarpma açılarına bağlı foton verimliliği. Şekil 4.7’de FBP ve FSHA fiberleri için 2 farklı fiber uzunluklarında foton verimlilikleri verilmiştir. 10 metre ve 20 metrelik fiber uzunluklarında 135 derecelik açıda iki fiberde en fazla Cherenkov fotonunu foto-dedektöre ulaştırmıştır. Fakat burada en önemli çıkarım, 45 derecelik çarpma açısında FBP fiberi, FSHA fiberinden bir miktar daha fazla fotonu foto-dedektöre ulaştırmıştır. Fiberlerin boyu uzadıkça, foto-dedektöre foton taşıma yetenekleri de azalacaktır.

4.1.2. Dönüştürücü Plakaların Simülasyon Testleri

Dönüştürücü plakalar luminometre dedektörünün gövdesini oluşturmaktadır. Dönüştürücü plakaların luminometre dedektöründeki görevi ise, üzerine çarpan birincil parçacıkları soğurarak ikincil parçacıklar üretmektedir. Bölüm 2.3.2. *Dönüştürücü Plakalar* başlığı altında

dönüştürücü plakalar için hangi malzemelerin daha uygun olduğu anlatıldı. Tungsten yapıda dönüştürücü plakalar luminometre dedektörü için hem radyasyon dayanımı hem arka plan radyasyonu hem de radyasyon uzunluğu bakımından en uygun materyallerden birisidir.

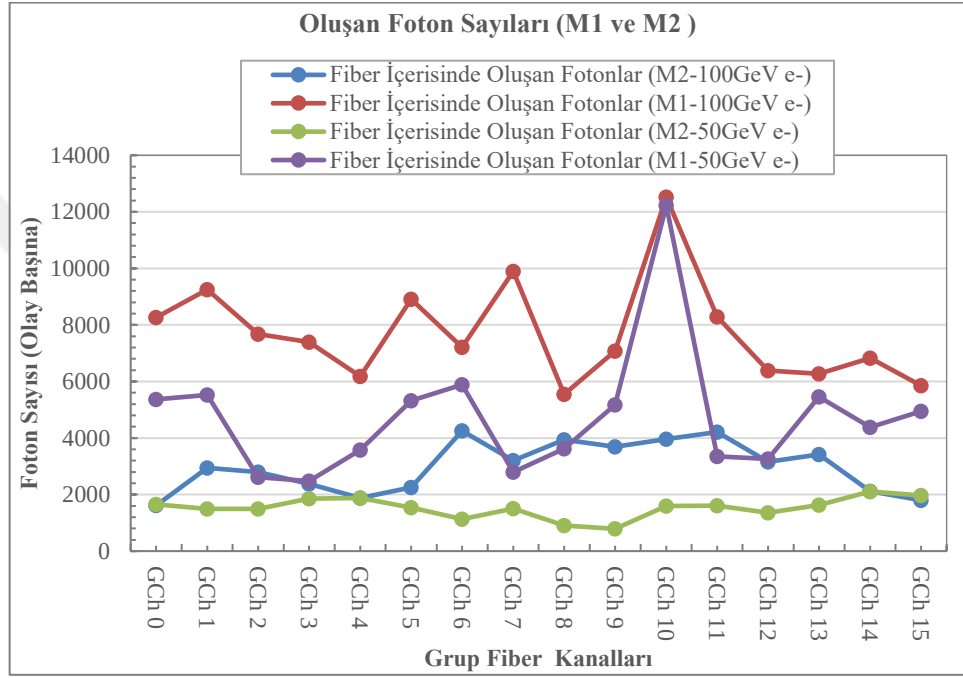


Şekil 4.8: 4 farklı alaşıma sahip dönüştürücü plakaların çarpışma yüzeyine 3 farklı enerjiye sahip elektronlar gönderilmesi sonucu oluşan parçacıkların z-eksenindeki dağılımları.

Tungsten kullanımının en zor kısmı tungstenin işlenmesidir. Çok sağlam bir yapıya sahip olan tungsten, delinmesi, kesilmesi zor bir malzemedir. Ancak alaşım haline getirilirse işlenmesi daha kolay bir hal alacaktır. Şekil 4.8’de tungstenin 4 farklı alaşımı kullanılarak hazırlanan dönüştürücü plakaların z-ekseni boyunca ikincil parçacık dağılımları gösterilmiştir. Bakır ile alaşım haline getirilen tungsten, ilk olarak %10 oranında bakır eklenerek ve bu oran %40a kadar %10 oranında artırılarak tekrarlanmıştır. 100 GeV, 50 GeV ve 20 GeV enerjili elektronlarla yapılan testler sonucunda, ne kadar fazla tungsten kullanılırsa o kadar fazla ikincil parçacık oluştuğu ortaya çıkmıştır. Kaynak enerjisi arttıkça, ikincil parçacıkların sayısı da artmıştır. Bu grafikte en önemli nokta ise grafiklerin tepe noktalarıdır. Tüm enerjiler ve alaşımlar için maksimum ikincil parçacıkların olduğu nokta 35mm ile 40mm arasındadır. Luminometre dedektörü için en fazla parçacığın oluştuğu noktaya yakın bir noktada dönüştürücü plakaların uzunluğunu seçmek gerekir. Burada 4 cm kalınlığında plaka kullanılmıştır. Ayrıca fiber delikleri de plakalar üzerindedir. Sonuç olarak luminometre dedektörü için alaşım olarak %70-80 oranında tungsten kullanılmalıdır. Bu oran hem tasarım için ikincil parçacıkları oluşturacak hem de mekaniksel işlemleri kolaylaştıracaktır.

4.2. LUMİNOMETRE DEDEKTÖRÜNÜN TESTLERİ

Luminometre dedektörünü oluşturan bileşenlerin simülasyon testlerinden sonra, luminometre dedektörü tasarımlarının testleri yapıldı. Şekil 3.11’de 2 farklı model tasarımı gösterilmektedir.

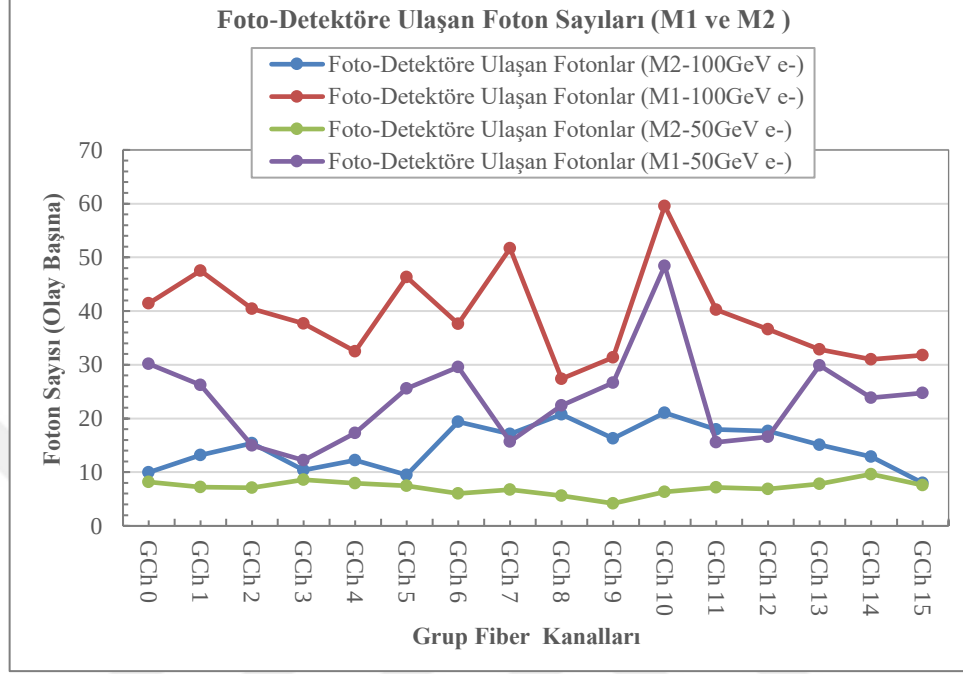


Şekil 4.9: M1 ve M2 tasarımlarının 100 GeV ve 50 GeV enerjili elektronlar ile testlerinin sonucunda fiber grupları içerisinde oluşan toplam fotonların sayılarının dağılımları.

Bu çalışmada, M1 ve M2 modelleri arasında seçim yapabilmek için, 50 GeV ve 100 GeV enerjili elektronlar kullanılarak simülasyon ortamında iki farklı tasarım test edilmiştir. Elektronlar, tasarımların etkileşim yüzeylerine rastgele gönderilmiş ve bu süreçte fiberler içinde, Şekil 4.9’da gösterildiği üzere fotonlar üretilmiştir. Her iki tasarım da 16 adet fiber grubundan oluşmakta ve her grup 7 adet fiber içermektedir. M1 ve M2 tasarımlarının sonuçları, fiberlerin tungsten bloğun arkasında mı yoksa içerisinde mi daha fazla foton ürettiğini belirlemektedir. Kullanılan dönüştürücü plakalar, %70 tungsten ve %30 bakır içeren bir alaşımdan yapılmıştır.

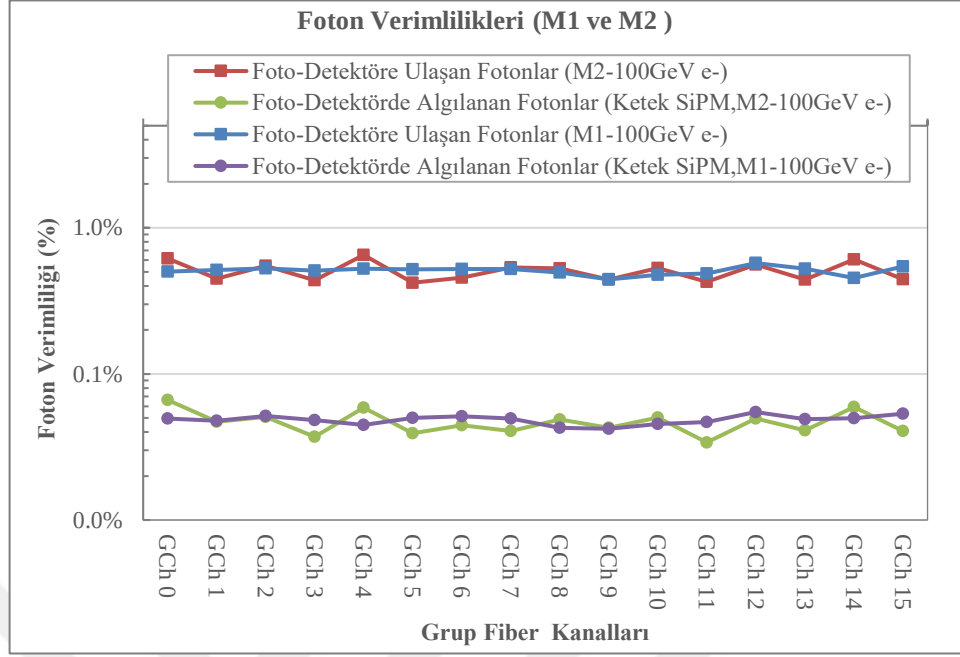
Şekil 4.9’da 50 GeV ve 100 GeV enerjili elektronlar ile yapılan testlerin her ikisinin sonucunda da M1 tasarımı M2 tasarımından daha fazla foton üretmiştir. Kanal dağılımları Şekil 3.13’te gösterildiği gibidir ve bu testler sonucunda en fazla foton 10. kanal bölgesinde

oluşturmuştur. Her iki tasarım için de 100 GeV enerjili elektronlar 50 GeV enerjili elektronlardan daha fazla foton üretmişlerdir.



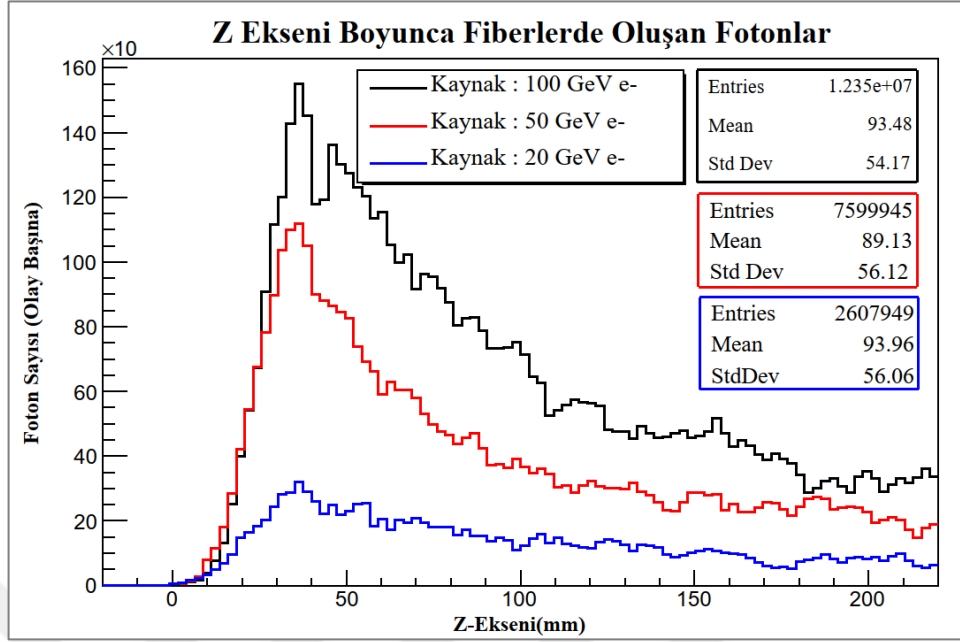
Şekil 4.10: M1 ve M2 tasarımlarının 100 GeV ve 50 GeV enerjili elektronlar ile testlerinin sonucunda foto-dedektöre ulaşan toplam fotonların sayılarının dağılımları.

Fiberlerde oluşan Cherenkov fotonlarının tamamının dedektöre ulaşabilmesi için Cherenkov açısının ve kritik açının uyumlu olması gerektiğini biliyoruz (Bölüm 2.1.4. Cherenkov Radyasyonu). Fiber içerisinde oluşan fotonların tamamı dedektöre bu sebeple ulaşmamaktadırlar. Hatta büyük bir kısmı bu açı sebebiyle fiber içerisinde soğurulmaktadırlar. M1 ve M2 tasarımında fiberlerin dönüştürücü plaka içerisine veya arkasına konumlandırılmasının kritik açı ve Cherenkov açısı için bir fark arz etmediği Şekil 4.10'da gösterilmiştir. M1 ve M2 tasarımlarının fiberler içerisinde oluşturduğu fotonlar ile bu fiberlerin foto-dedektöre taşıdıkları fotonların sayıları benzer oranda azalmıştır. Burada dikkat etmek gerekir ki aslında fiberler oluşan foton sayıları oranında foton taşımışlardır.

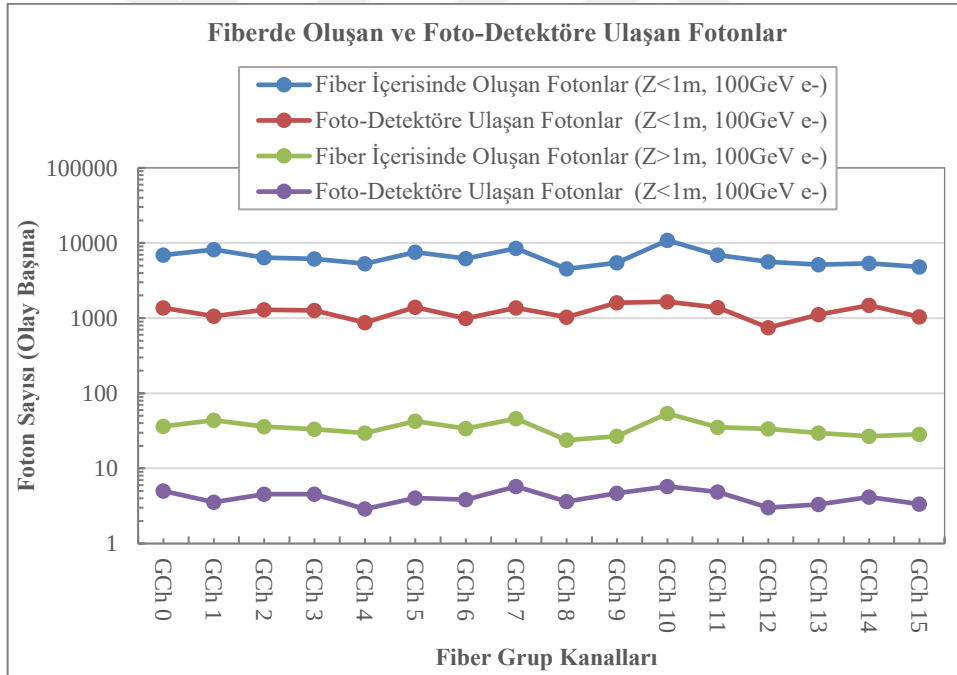


Şekil 4.11: M1 ve M2 tasarımlarının 100 GeV enerjili elektronlar ile testlerinin sonucunda foto-dedektöre ulaşan ve foto-dedektörde algılanan fotonların fiber gruplarının kanallarına bağlı verimlilikleri.

Fiber testlerine en önemli çalışmalardan birisi foton verimliliklerinin karşılaştırılmasıydı. Şekil 4.11’de fiber grup kanallarında oluşan fotonların, foto-dedektöre ulaşan ve foto-dedektörde algılanan fotonlara oranları yüzdelik olarak verilmiştir. M1 ve M2 tasarımlarında fiberlerde üretilen fotonların foto-dedektöre ulaşan ve foto-dedektörde algılanan foton sayılarına oranları benzer çıkmıştır. Bu da M1 ve M2 tasarımlarında fiberlere çarpan yüklü parçacıkların benzer çarpma açıları ile çarptığını göstermektedir.



Şekil 4.12: Z eksenine boyunca tüm fiberler içerisinde oluşan fotonların sayısal dağılımı.

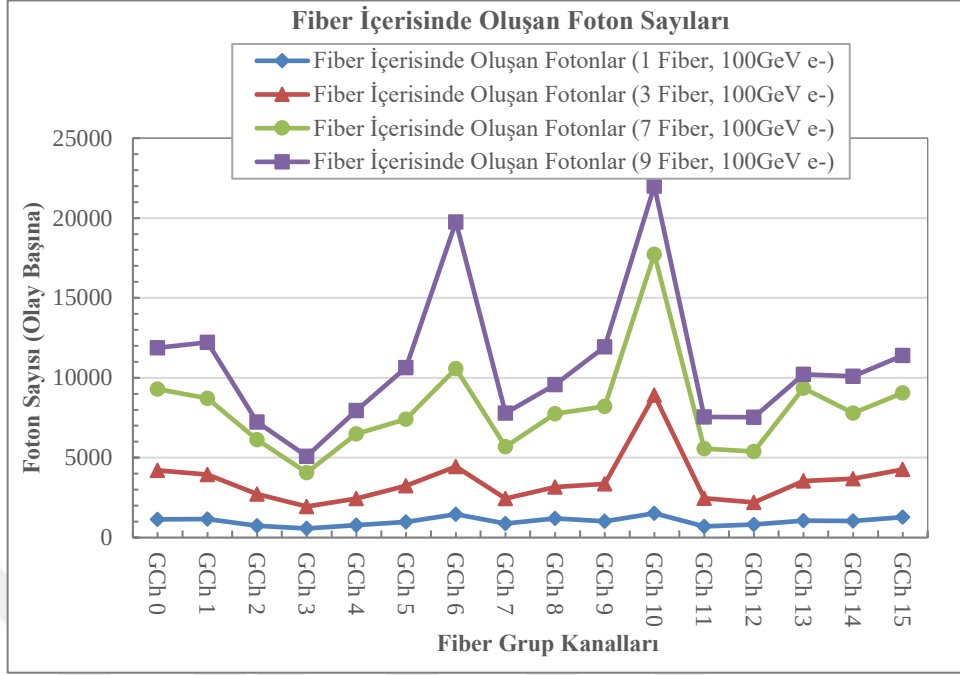


Şekil 4.13: Fiber gruplarının kanallarına bağlı olarak, fiber gruplarının ilk 1 metresi ve ilk 1 metre sonrası, fiberler içerisinde oluşan foton sayılarının dağılımları.

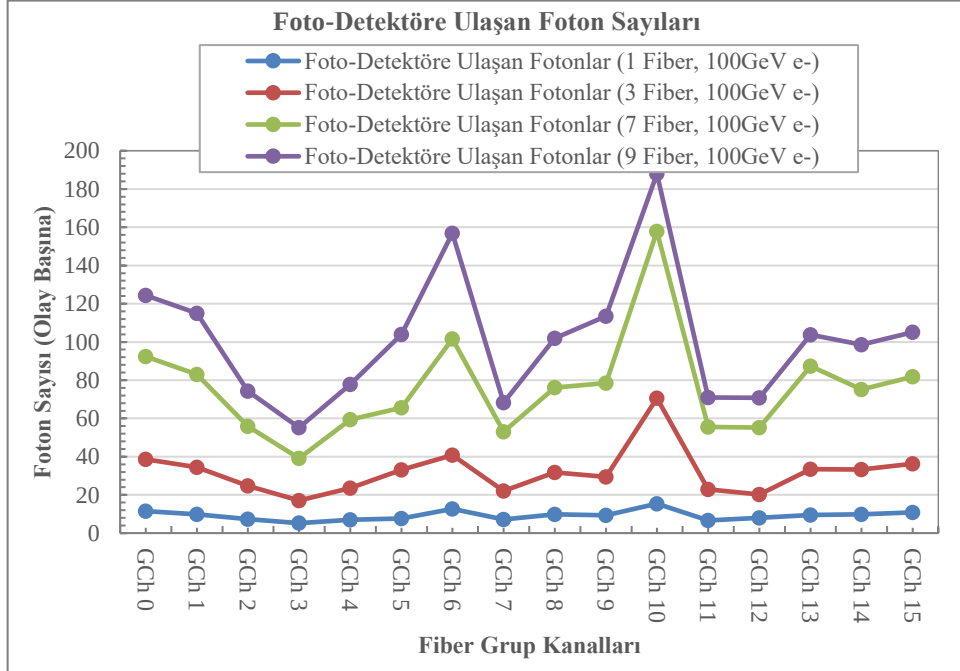
M1 tasarımı M2 tasarımına göre daha fazla foton üretebildiği için çalışmamıza en uygun tasarım M1 tasarımıdır. M1 tasarımının daha fazla foton üretmesi demek, fiberlerine daha fazla yüklü parçacık çarptığı anlamına gelmektedir. Dönüştürücü plakalar içerisine yerleştirilen fiber gruplarına dönüştürücü plakaların derinliği olan 4cm boyunca yüklü

parçacıkların çarpmasının yanı sıra, dönüştürücü plakaların oluşturduğu ikincil parçacıklar plakaların arka kısmına doğru uzanan fiber gruplarına 4cm'sinin sonrasında da çarpmaya devam etmektedir. Şekil 4.11'de logaritmik olarak fiber uzunluğu boyunca oluşan foton sayıları gösterilmektedir. M1 tasarımı üzerine gönderilen parçacıkların enerjileri arttıkça foton sayılarının da artmıştır. Fiber luminometre dedektörünün arka kısmına doğru uzandıkça oluşan foton sayısı da artmıştır. Tabi ki bu bir mesafeye kadar sürmektedir. Bir metrelik mesafeden sonra parçacık sayıları yüksek oranda düşmektedir. Şekil 4.13'te fiber gruplarının dönüştürücü plaka içerisindeki başlangıç noktasından başlayarak ilk 1 metresi ve ilk bir metre sonrası için fiber grupları içerisinde oluşan fotonların sayısal dağılımları gösterilmiştir. 100 GeV enerjili elektron kaynağı ile yapılan simülasyon testleri sonucu fiber gruplarının ilk 1 metrelik mesafesi ile 1 metrelik mesafenin arkasında oluşan foton sayıları karşılaştırıldığında neredeyse 200 katlık bir fark vardır. Foto-dedektöre ulaşan foton sayılarında ise benzer oranlarda düşüş vardır. Bu fotonların foto-dedektör üzerinde %10 civarı algılandığı için bu sayı daha da düşmektedir. Sonuç olarak fiberlerin oluşturdukları fotonların sayısı fiberin 1 metresinden sonrasında çok daha az olmaktadır.

Fiber yerleşim optimizasyonu sonucu M1 tasarımına karar verdikten sonra, luminometre dedektörünün testlerine devam edilmiştir. Fiber grupları farklı fiber sayıları içerebilir. Çoğunlukla 7 adet fiber kullanılmıştır. Bunun sebebi ise, dairesel bir şekilde kolayca bir araya getirilebilir ya da kılıflanabilirler. Luminometre dedektörü tasarımında farklı fiber sayıları içeren fiber gruplarının içerisine yerleştirilen fiberlerin konumlandırılması Şekil 3.13'te gösterilmiştir. Luminometre dedektörüne 4 farklı fiber sayısı için fiber grupları yerleştirilmiş ve simülasyon testleri yapılmıştır.

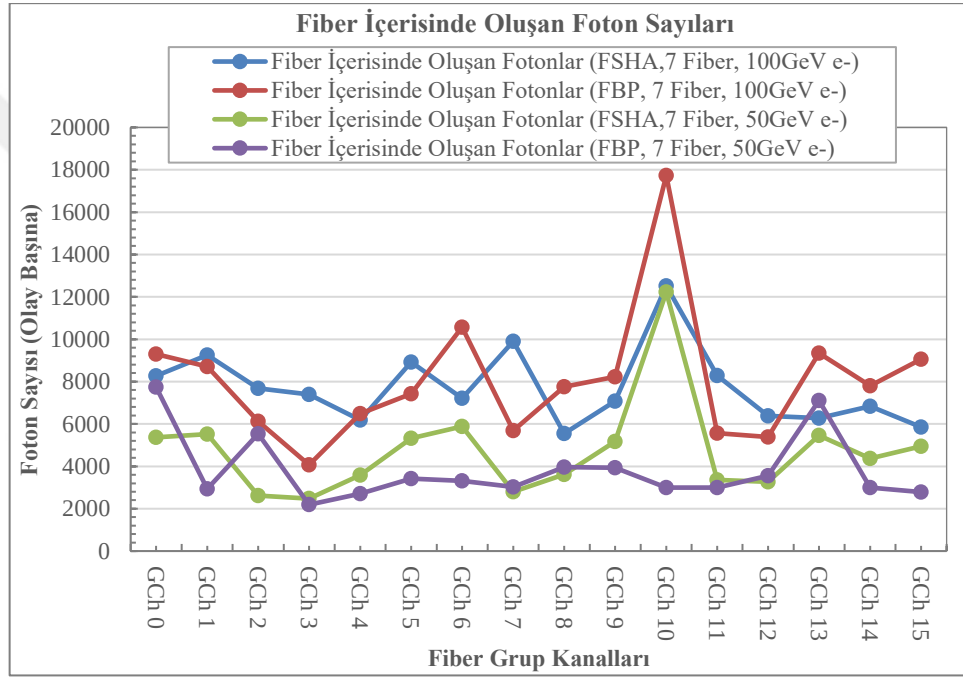


Şekil 4.14: Fiber gruplarının 1,3,7 ve 9 adet fiber içerdikleri durumlar için fiber grupları içerisinde oluşan fotonların sayıları.

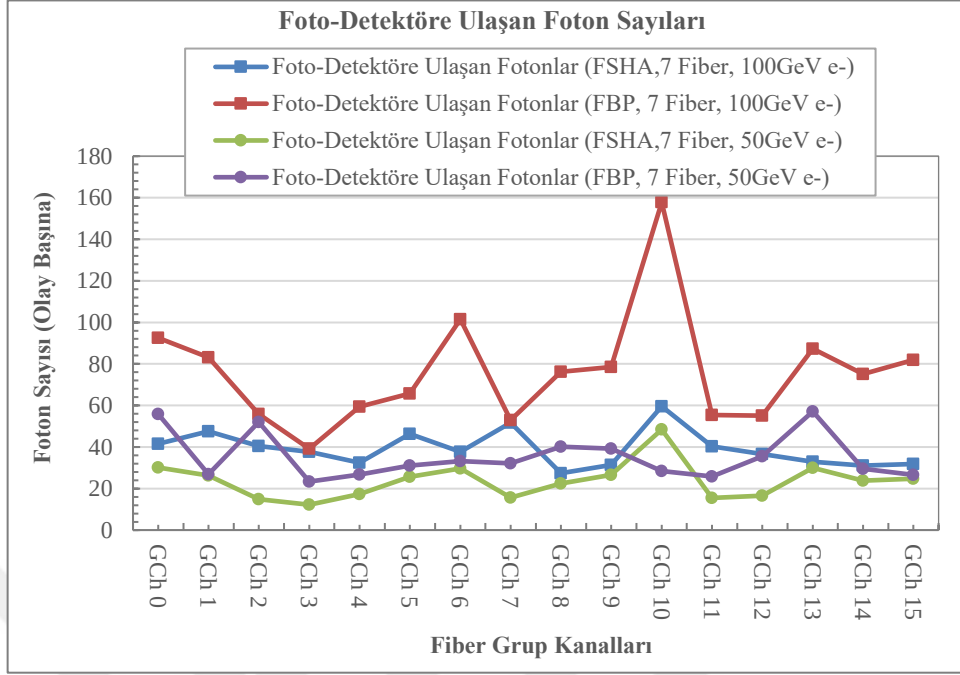


Şekil 4.15: Fiber gruplarının 1, 3, 7 ve 9 adet fiber içerdikleri durumlar için foto-detektöre ulaşan foton sayıları.

Şekil 4.14'te fiber grupları içerisinde oluşan fotonların sayılarının fiber grup kanallarına bağlı dağılımını, Şekil 4.15'te foto-dedektöre ulaşan foton sayılarının fiber grup kanallarına bağlı dağılımları verilmiştir. Yapılan 4 test sonucunda en fazla foton 10. ve 6. kanalda oluşmuştur. Benzer şekilde en fazla foton oluşturan fiber en fazla fotonu foto-dedektöre ulaştırmıştır. En fazla foton 9 fiberli sistemde oluşurken en az foton tekli fiberli sistemde oluşmuştur. En fazla fotonu foto-dedektöre 9 fiberli sistem iletirken, en az fotonu da tek fiberli sistem iletmiştir. Fiber grupları içerisindeki fiber sayılarının test edildiği bu çalışmada 2 m uzunluğunda FSHA fiberleri kullanılmıştır.

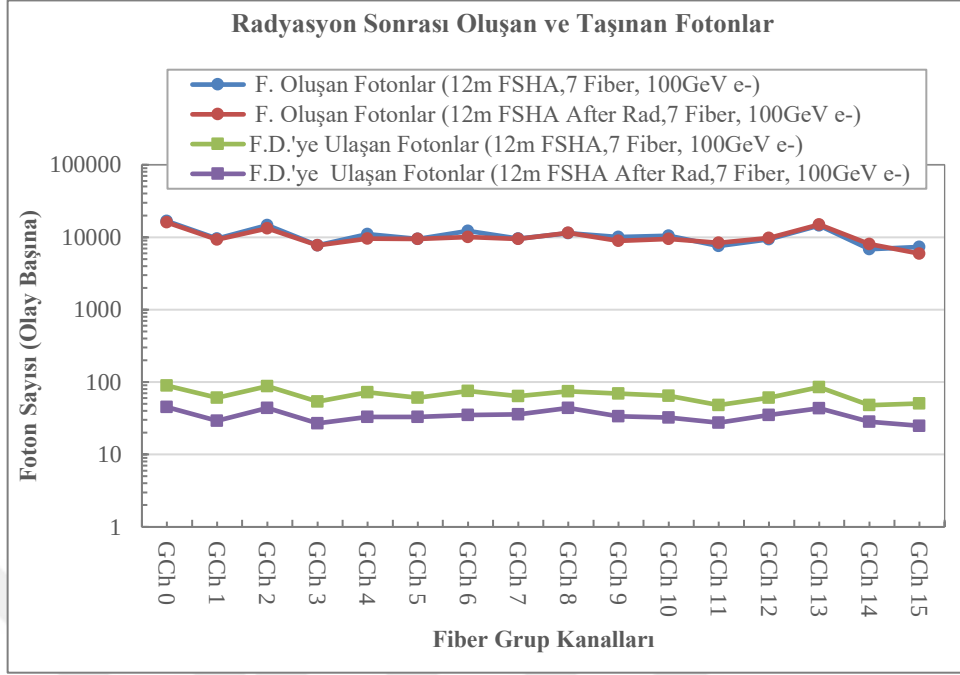


Şekil 4.16: FBP ve FSHA fiberleri kullanılarak, 50 GeV ve 100 GeV elektronlar ile test edilen luminometre dedektörünün fiber grupları içerisinde oluşan foton sayılarının fiber grup kanallarına bağlı dağılımları.



Şekil 4.17: FBP ve FSHA fiberleri kullanılarak, 50 GeV ve 100 GeV elektronlar ile test edilen luminometre dedektörünün fiber gruplarının foto-dedektöre taşıdığı foton sayılarının fiber grup kanallarına bağlı dağılımları.

Luminometre dedektörü 2 farklı fiber ile test edildi. Bu iki fiberin detaylarını ve teknik özelliklerini bölüm 3.1.1.1. Kuvars Çekirdekli Fiberler ve Geant4 başlığı altında incelenmiştir. FSHA fiberleri parçacık hızlandırıcı deneylerinde uzun süredir kullanılan bir fiber olmasına rağmen, FBP fiberleri yeni teknoloji ile üretilen fiberlerdir. İki fiberin de çekirdek yarıçapları aynıdır fakat FBP fiberi çekirdek yapısının avantajı ile daha az foton sönümleyerek daha fazla fotonu daha uzak mesafelere taşıyabilmektedir. Şekil 4.16'da FBP ve FSHA fiberlerinin kullanıldığı luminometre dedektörlerinin fiber grupları (7 fiber içeren) içerisinde oluşturduğu foton sayıları, Şekil 4.17'de ise oluşan bu fotonların foto-dedektöre ulaşma miktarları gösterilmektedir. FBP fiberi FSHA fiberi ile benzer foton üretiminde bulunmuşlardır fakat FBP fiberi oluşan bu fotonların daha fazlasını foto-dedektöre ulaştırmıştır. Bu testlerin sonucunda FBP fiberinin luminometre tasarımı için daha uygun ve daha verimli olduğu görülmektedir.



Şekil 4.18: 54 kGy radyasyona maruz kalan 12 metrelik FSHA fiber için fiber grupları içerisinde oluşan ve foto-dedektöre ulaşan foton sayılarının fiber grup kanallarına bağlı değişimi.

Bu çalışmanın amaçlarından birisi de yüksek radyasyon dayanımı olan bir luminometre dedektörü geliştirmektir. 54 kGy radyasyona maruz kalan FSHA fiberi için Şekil 3.4'te verilen deneysel veriler simülasyona luminometre dedektörü tasarımı ile entegre edilmiştir. Şekil 4.18'de elde edilen sonuçlara göre, radyasyon alsın ya da almasın fiberde aynı miktarda foton oluşmuştur, fakat fiberde oluşan bu fotonları ileten yapıda, yani çekirdek yapısında radyasyondan dolayı bozulmalar olmuştur ve fiberin taşıdığı foton sayısı azalmıştır. Foto-dedektöre ulaşan foton sayıları radyasyona maruz kalan fiber için yarıya düşmüştür. Kanallar arasındaki foton oluşturma ve taşıma oranları ise neredeyse sabit kalmıştır. Benzer şekilde luminometre dedektörü için FBP fiberleri de yüksek radyasyona maruz kaldığında çalışmaya devam edecektir. Fakat radyasyon öncesi durumdan daha az fotonu foto-dedektörlere taşıyacaktır. Şekil 3.3'te 10 metrelik fiberin radyasyona maruz kalması sonucunda FBP fiberlerin foton taşıma kabiliyetindeki kayıplar gösterilmiştir.

Luminometre dedektörü tasarımı için M1 tasarımı daha kullanışlı olduğu testler sonucunda anlaşılmıştır. Fiber olarak FBP fiberleri tercih edilebilir. Burada fiyat ve fiberlerin temini de zor bir süreçtir. Yeni teknolojilere ulaşmak fiyat olarak hem daha pahalıdır hem de her zaman hali hazırda ürün bulunamayabilir. Fakat çalışmalarımız açıkça gösteriyor ki FBP fiberleri FSHA fiberlerine göre daha başarılıdır. Her bir fiber grubu için 9 adet fiber daha fazla foton

taşıyabilse de 7 fiber kullanmak daha kolay ve kompakt bir kullanım sunmaktadır. Buna ek olarak yaptığımız fiber sayıları testlerinde 9 fiber kullanılan fiber grubu ile 7 fiber kullanılan fiber grubu arasında büyük bir fark yoktur.

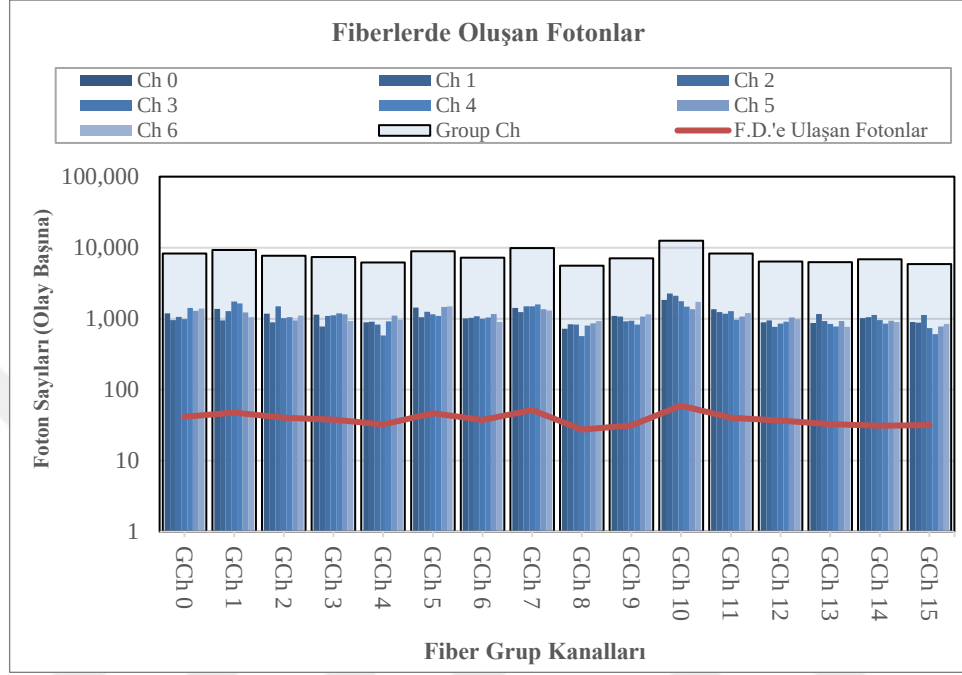
Bu çalışma için çoğunlukla foto-dedektöre ulaşan fotonlar incelenmiştir. Bu incelemeler sırasında Ketek SiPM kullanarak fotonların foto-dedektörde okunma oranları da test edilmiştir. Foto-dedektöre ulaşan foton sayılarına bakmamızın temel sebebi, farklı foto-dedektör kullanılsa da foto-dedektöre ulaşacak foton sayısının aynı olmasıdır. Burada yalnızca foto-dedektörün (kuantum) verimliliği okunan fotonların sayılarına etki etmektedir.

Dönüştürücü plakaların ölçüleri ve materyalinin seçiminde birçok parametre etki etmektedir. Öncelikle tasarlayacağımız luminometrenin kompakt bir yapıda olması için küçük bir ölçüde olması gereklidir. Bu yüzde 6,2 cm x 5 cm x 4 cm boyutlarında bir dönüştürücü plakalar bloğu seçilmiştir. Şekil 4.8’de gösterildiği gibi derinlik mesafesi simülasyonlar ile optimize edilerek 4cm seçilmiştir. Plakaların alaşımındaki oranlara ise mekaniksel işlemlerin kolaylığı için testler aşamasında %70 Tungsten ve %30 Bakır olarak kullanılmasına karar verilmiştir.

Luminometre dedektörü tüm bu donanımsal optimizasyonların sonucunda son donanımsal hali ile öncelikle elektron bombardımanı ve sonrasında CMS CASTOR bölgesinde konumlandırılarak (20cm, 0, 15m konumunda) 14 TeV enerjili çarpışma sonucunda oluşan parçacıklar ile test edilmiştir. Fiberlerin Cherenkov fotonlarını üretme ve taşıma kabiliyeti, dönüştürücü plakaların ikincil parçacık yağmuru ve foto-dedektöre ulaşan fotonların incelenmesi detaylıca yapılmıştır.

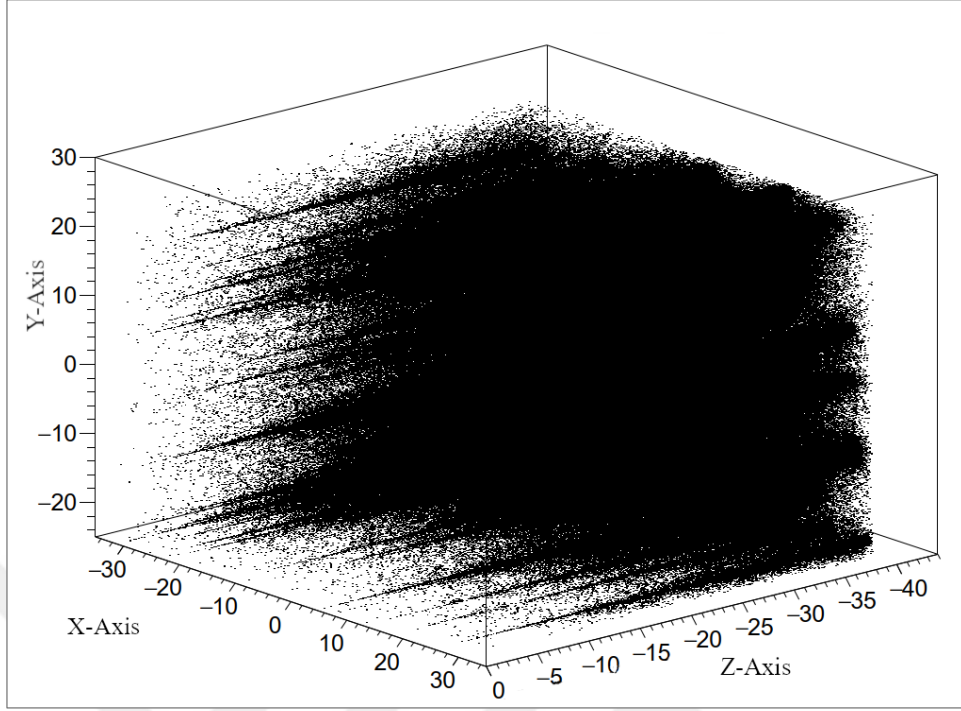
Fiber grupları içerisinde bulunan her bir fiber üzerine elektrik yüklü parçacıklar çarptıkça Cherenkov fotonunu üretip taşımaktadır. Daha önce fiber grupları içerisindeki 7 fiberin, dönüştürücü plakaların içerisine yerleştirilen fiber gruplarının ve de fiber gruplarının uç kısımlarına yerleştirilen foto-dedektörlerin konumlarına bağlı kanal numaraları Şekil 3.13’te detaylıca verilmiştir. Çalışmamız bu kanalların numaralarına bağlı olarak dağılımlar ve uzay içerisindeki pozisyonlarına göre yapılmıştır. Elektron ile bombardıman edilen Luminometre dedektörü simülasyon uzayında dönüştürücü plakanın yüzeyi z ekseninde sıfır noktasına gelecek şekilde, x ve y ekseninde ise plakaların merkezi sıfır noktasına gelecek şekilde konumlandırılmıştır. CMS CASTOR bölgesi olarak adlandırdığımız bölgede ise, dönüştürücü plakaların yüzeyi z ekseninde 15 metre noktasına, x ekseninde dönüştürücü plakaların

merkezi olmak üzere 20 cm noktasına, y ekseninde ise dönüştürücü plakaların merkezi sıfır noktasına yerleştirilmiştir. Grafiklerdeki ve tablolardaki okumalar da bu bilgiler ışığında yapılmıştır.

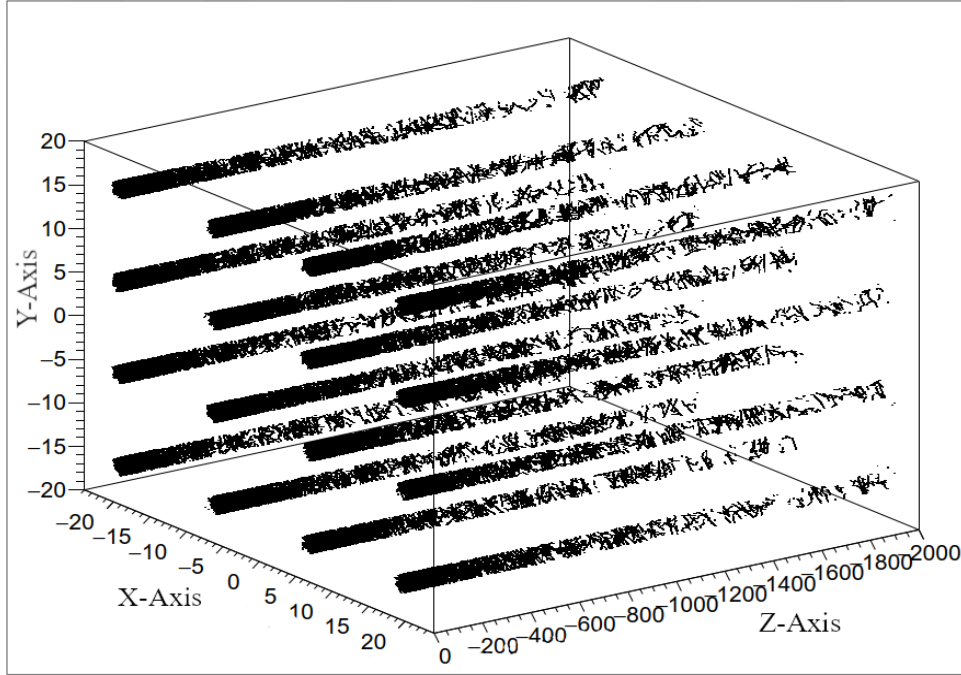


Şekil 4.19: 100 GeV enerjili elektronların luminometre dedektörü üzerine gönderilmesi sonucu, fiber gruplarındaki fiberler tarafından üretilen ve foto-dedektöre taşınan fotonların toplam sayısı ile fiber gruplarına bağlı olarak değişen foton sayılarının incelenmesi.

Şekil 4.19'da 100 GeV elektron, dönüştürücü plakaların yüzeyine rastgele olarak gönderilen durumda fiber gruplarındaki foton sayıları dağılımları gösterilmektedir. 100 GeV elektron luminometre dedektörünün yüzeyinde her noktaya rastgele gönderildiği için genel bir dağılım meydana gelmektedir. Luminometre dedektörünün plakaları üzerine rastgele gönderilen elektronların çarptığı noktalar ve oluşturduğu ikincil parçacıkların 3 boyuttaki dağılımı Şekil 4.20'de gösterilmiştir. İkincil parçacıklar elektronların dönüştürücü plakaya çarpma noktalarından başlayarak belirli bir açıyla artarak plakanın içerisinde ilerlemektedirler. İkincil parçacıklar dönüştürücü plakalar içerisinde oluştuktan sonra fiberlerin içerisinde geçerler ve fiberlerin içerisinde geçen parçacıklardan elektrik yüklü olan parçacıklar fiberler içerisinde bir çizgi halinde Cherenkov fotonları oluşturmaktadırlar.

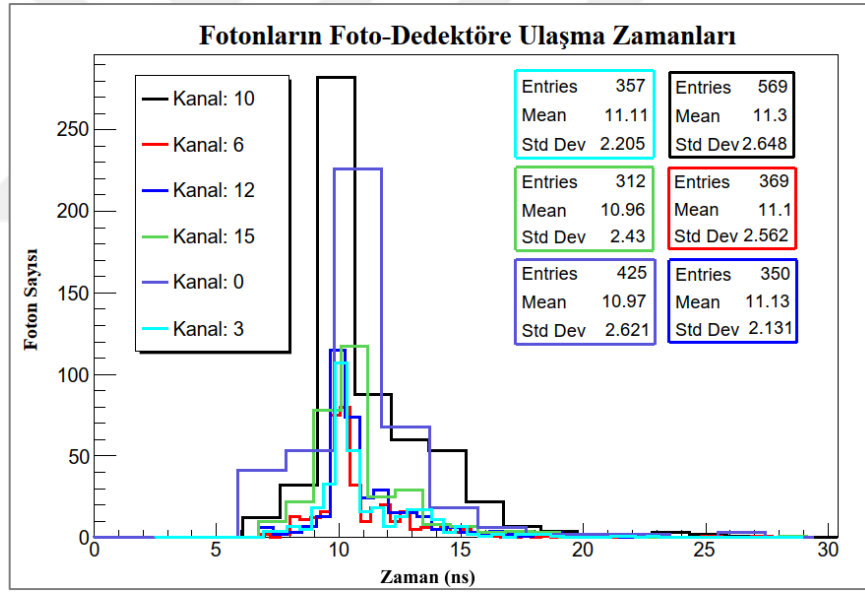


Şekil 4.20: 100 GeV enerjili elektronların dönüştürücü plakalara gönderilmesi sonucu oluşan ikincil parçacık yağmurunun üç boyutlu gösterimi.



Şekil 4.21: 100 GeV enerjili elektronların fiber gruplarına çarpması sonucu oluşan elektrik yüklü ikincil parçacıkların, fiberler içinde Cherenkov fotonları üretmesi ve bu fotonların oluşum pozisyonlarının üç boyutlu dağılımları.

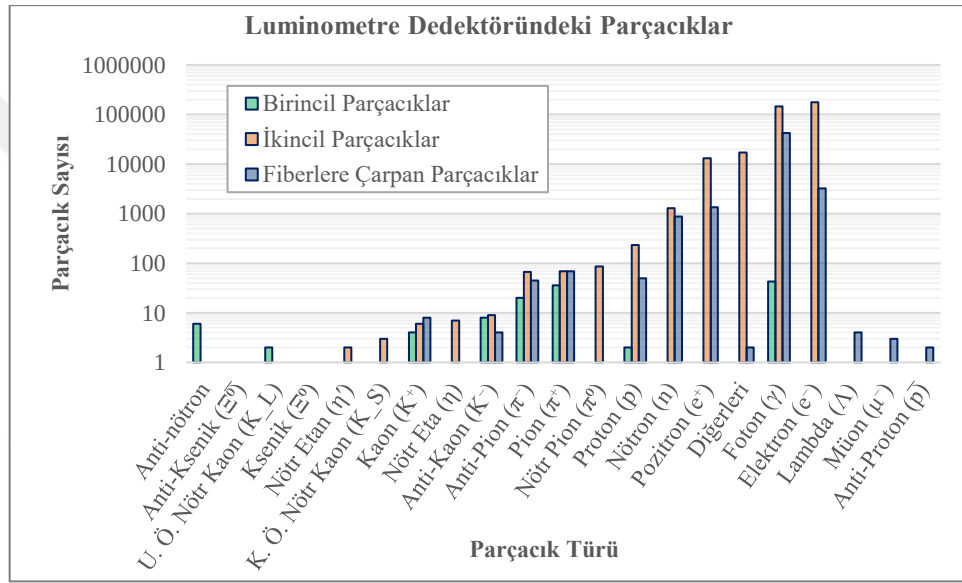
Şekil 4.21’de 7 fiberden oluşan fiber gruplarının içerisinde geçen yüklü parçacıkların oluşturduğu Cherenkov fotonlarının doğdukları noktalar gösterilmiştir. 100 GeV’lik kaynak ile yapılan bu testte Cherenkov fotonlarının daha çok dönüştürücü plakanın içerisinde ve yakınında oluştuğu görülmektedir. Plakaların arkasında da plaka içerisinde arkaya doğru yönelen ikincil parçacıkların etkisi ile fiberler içerisinde oluşan Cherenkov fotonları vardır. Plakaların arkasında mesafe arttıkça Cherenkov fotonu oluşma oranı da düşmektedir. Cherenkov fotonlarının, yüklü bir parçacık daha yüksek kırınım katsayısına sahip bir ortama geçtiğinde bir düz hat üzerinde oluştuğunu biliyoruz ve Şekil 4.21’de bu düz hatlar fiber grupları içerisindeki fiberlerin içerisinde gösterilmektedir. Adeta bir sanat eseri gibi rastgele yüklü parçacık vuruşlarıyla oluşan bu hatlar, parçacıklar fiber içerisinden çıkana kadar devam etmektedir ve büyük tabloya bakıldığında fiber ve fiber grupları açıkça 3 boyutlu grafiklerde ortaya çıkmaktadır.



Şekil 4.22: 100 GeV enerjili elektronların fiber grupları üzerine gönderilmesi sonucu oluşan fotonların, foto-dedektöre ulaşma zamanları.

Yüklü parçacıklar fiberlerin içerisinde geçerken, Cherenkov fotonları, her biri parçacık yol aldıkça çizgi halindeki yok üzerindeki bir noktadan ortaya çıkmaktadır. Cherenkov fotonlarının oluşmalarına sebep olan birincil parçacıkların olduğu noktada zaman sayacı başlar ve fotonlar foto-dedektöre ulaştıklarında zaman sayacı durur. Şekil 4.22’de 6 farklı fiber grubunun kanalları için fotonların foto-dedektöre ulaşma zamanlarının dağılımı gösterilmektedir. Fiberler içerisinde oluşan Cherenkov fotonlarının çoğunluğu 7 ns ile 17 ns arasında foto-dedektöre ulaşmışlardır. Grafikte tepe noktasına bakıldığında fotonların

çoğunun yaklaşık 11 ns’de foto-dedektöre ulaştıklarını görülmektedir. Dağılımlar seçilen 6 kanal için de benzerdir. Bu dağılımlar foto-dedektörlerin algıladığı fotonları elektrik sinyaline dönüştürdüğünde oluşacak olan sinyalin şeklini de oluşturmaktadır. Fotonların foto-dedektöre ulaşma zamanlarını etkileyen birçok faktör vardır. Bunların en başına fotonun fiber içerisinde yansıma sayısı, fotonların oluştuğu noktanın foto-dedektöre mesafesidir. Eğer foton fiber içerisinde çok fazla yansır ise (kritik açı ve Cherenkov açısına bağlı) daha fazla yol alması gerektiği için daha geç foto-dedektöre ulaşır. Benzer şekilde eğer fiberin dönüştürücü plakaların içerisindeki kısmında oluşursa foto-dedektöre ulaşma süresi artmaktadır.

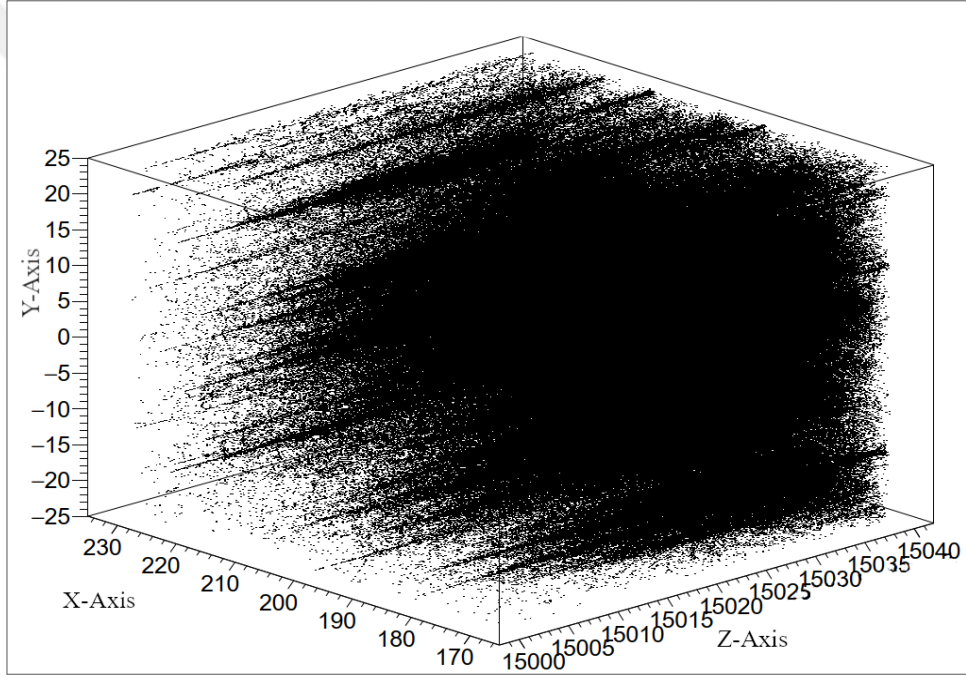


Şekil 4.23: CMS bölgesinde, LHC'deki 14 TeV toplam enerjiyle gerçekleşen proton-proton çarpışmalarının sonucunda oluşan birincil parçacıklarından luminometre dedektörü tasarımına çarpan birincil parçacıklar, dönüştürücü plakalarda oluşan ikincil parçacıklar ve fiberlere çarpan tüm parçacıklar.

Luminometre dedektörünün dönüştürücü plakalarının üzerine rastgele elektronlar göndererek yaptığımız testlerden sonra, luminometre dedektörünü LHC hattı üzerinde CMS önündeki CASTOR bölgesine (20 cm, 0, 15 m) yerleştirilmiştir. Parçacık üretici olarak CMS bölgesinde 14 TeV enerjili proton-proton çarpışmasının sonucunda ortaya çıkan parçacıkları pythia olay üretici uygulaması ile üretilerek, Geant4 simülasyonuna HEPMC2 ile entegre edilmiştir. Toplamda 5bin olay için simülasyonu çalıştırılmıştır. Luminometre dedektörünün konumundan dolayı her olayda bir parçacık çarpışması meydana gelmemektedir. 5000 olay incelendiğinde, 750 olayda birincil parçacıklar dönüştürücü plakalara çarpmaktadır. 656 olayda dönüştürücü plakalar içerisinde ikincil parçacıklar oluşmaktadır. 681 olayda fiberlere parçacıklar çarpmakta ve 661 olayda fiberlerde foton oluşmaktadır. Bu sayıların farklı

olmasının sebebi bazı olaylarda ikincil parçacıkların oluşmaması, bazı olaylarda fiberlere elektrik yükü olmayan parçacıkların çarparak foton oluşturmaması ve bazı olaylarda birincil parçacıkların dönüştürücü plakaya değil doğrudan fiberlere çarpmasıdır. Burada olay başına hesaplamalar yapılırken fiberlerde Cherenkov fotonu oluşturan olaylar dikkate alınmıştır.

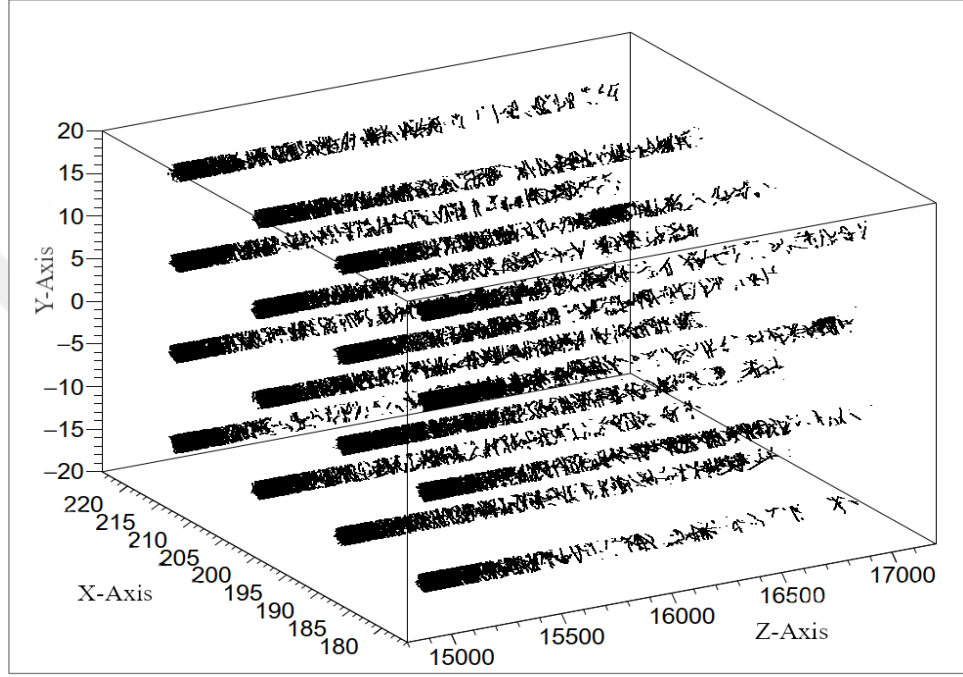
14 TeV enerjili proton-proton çarpışması sonucu tek tipte değil, birçok tipte parçacık ortaya çıkmaktadır. Proton-proton çarpışması sonucu ortaya çıkan bu parçacıklara Geant4 uzayı içerisinde birincil parçacıklar denmektedir. Bu parçacıkların belirli bir kısmı CASTOR bölgesindeki luminometre dedektörümüze çarpılmaktadırlar. Şekil 4.23'te luminometre dedektörüne çarpan parçacıklar gösterilmiştir.



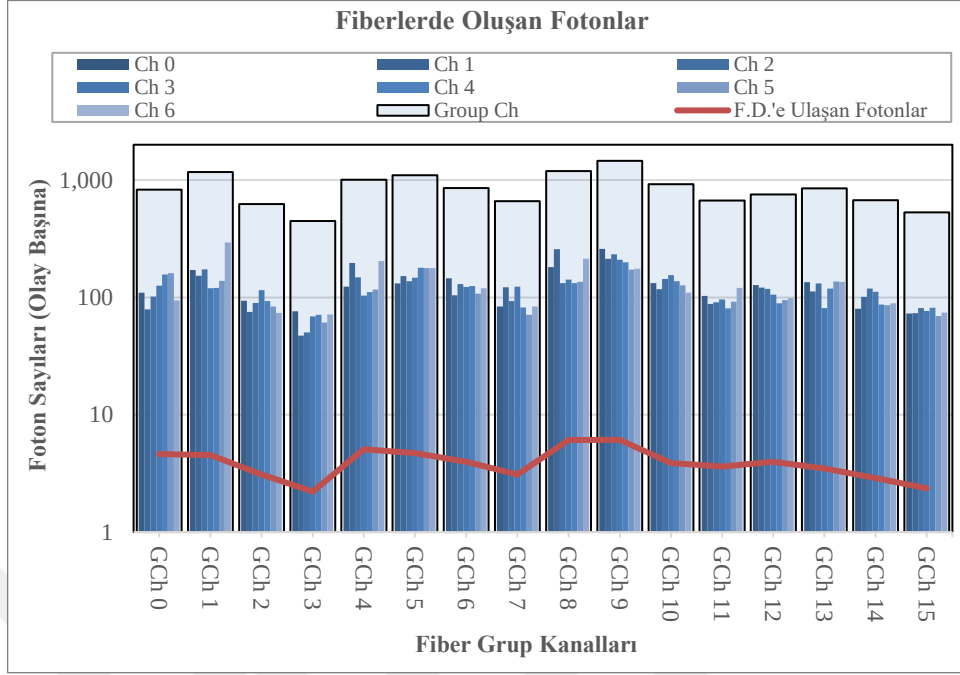
Şekil 4.24: CMS bölgesinde, LHC'deki 14 TeV toplam enerjiyle gerçekleşen proton-proton çarpışmalarının sonucunda oluşan birincil parçacıkların luminometre dedektörüne çarpması sonucu dönüştürücü plakalar içerisinde oluşan ikincil parçacık yağmurunun 3 boyutlu gösterimi.

Birincil parçacık olarak elektron ile yapılan testlere benzer şekilde luminometre dedektöründe ikincil parçacıklar oluşmaktadır. Fakat artık kaynak değiştiği için oluşan ikincil parçacıklar da değişmiştir hatta sabit bir enerjide olmamaktadırlar. CMS CASTOR bölgesinde luminometre dedektörü içerisindeki fiberlere yalnızca ikincil parçacıklar değil birincil parçacıkların da çarpma olasılıkları vardır fakat düşüktür. Şekil 4.25'te simülasyon içerisinde CMS CASTOR bölgesine yerleştirdiğimiz luminometre dedektörünün fiber gruplarına çarpan yüklü parçacıkların oluşturduğu Cherenkov fotonlarının doğdukları noktalar, yani yüklü parçacığın

fiber içerisinde bıraktığı çizgiler gösterilmektedir. Cherenkov fotonları çoğunlukla dönüştürücü plakalar içerisinde oluşmuştur. Dönüştürücü plakaların arkasına doğru azalarak devam etmiştir. Z ekseninde ve X ekseninde konum değerlerinin elektron test sonuçlarına göre farklı olduğu görülmektedir. Bunun sebebi dedektörün CMS CASTOR bölgesine yerleştirilmiş olmasındandır.

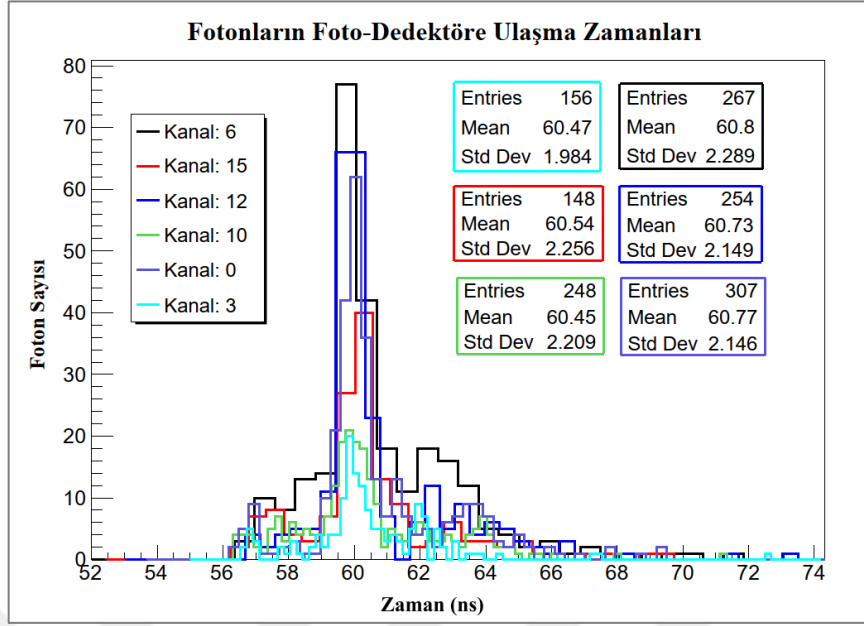


Şekil 4.25: CMS bölgesinde, LHC'deki 14 TeV toplam enerjiyle gerçekleşen proton-proton çarpışmalarının sonucunda oluşan birincil parçacıkların luminometre dedektörüne çarpması sonucu fiber grupları içerisindeki fiberlere çarpan elektrik yüklü ikincil parçacıkların oluşturdukları Cherenkov fotonlarının oluştukları pozisyonların 3 boyutlu dağılımları.



Şekil 4.26: CMS bölgesinde, LHC'deki 14 TeV toplam enerjiyle gerçekleşen proton-proton çarpışmalarının sonucunda oluşan birincil parçacıkların luminometre dedektörüne çarpması sonucu fiber gruplarında oluşan toplam foton sayısı ile bu gruplar içerisindeki fiberlerin oluşturduğu ve foto-dedektöre taşıdığı fotonların sayılarının fiber gruplarına bağlı değişimleri.

Şekil 4.26'da fiber gruplarının ve fiber gruplarının içerisindeki 7 fiberden her birinin içerisinde oluşan foton sayılarının dağılımları gösterilmektedir. Şekil 4.19'da elektron kaynağı ile yapılan testlerin benzer sonuçları gösterilmektedir. Bu iki test kıyaslandığında CMS CASTOR bölgesinde daha düzensiz foton sayıları oluşmaktadır. Bunun sebebi sadece sabit enerjili parçacıklar değil, farklı enerjili parçacıklar da luminometre dedektörüne çarpmaktadır ve homojen-rastgele kaynak dağılımı yoktur, proton-proton çarpışmasının gerçekleştiği sıfır noktasından gelen parçacıkların etkileşimlerinin etkisi görülmektedir. Benzer biçimde foto-dedektöre ulaşan foton sayıları da azalmıştır. En fazla Cherenkov fotonu 1, 8 ve 9 numaralı fiber grup kanallarında oluşmuştur. En fazla dedektöre ulaşan fotonlar da yine bu kanallarda olmuştur. Bu da oluşan foton sayıları ile dedektöre ulaşan foton sayılarının oranlarının korunduğunu göstermektedir.

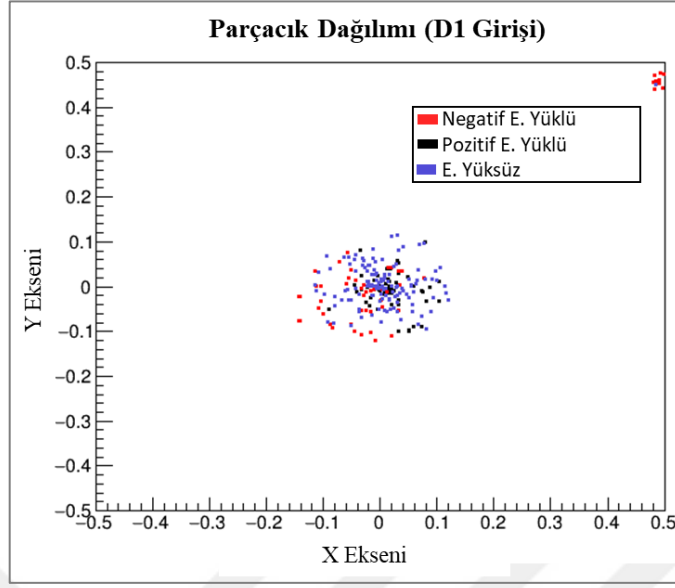


Şekil 4.27: CMS bölgesinde, LHC'deki 14 TeV toplam enerjiyle gerçekleşen proton-proton çarpışmalarının sonucunda oluşan birincil parçacıkların luminometre dedektörüne çarpması sonucu fiber gruplarında oluşan fotonların foto-dedektöre ulaşma zamanları.

Şekil 4.22’de kaynak olarak elektronun kullanıldığı luminometre testlerinde olduğu gibi Şekil 4.27’de simülasyon içerisinde CMS CASTOR bölgesinde yaptığımız testlerde de fotonların foto-dedektöre ulaşma süreleri de incelenmiştir. Foto-dedektörlerde algılanan fotonların oluşturacağı sinyallerin şeklini anlamak için fotonların foto-dedektöre ulaşma süreleri önemlidir. Proton-proton çarpışma noktasına 15 metre mesafede duran luminometre dedektöründe oluşan fotonların incelediğimiz 6 farklı fiber grubu kanalı için dedektöre ulaşma süreleri 56 ns ile 66 ns arasında değişirken, yoğunlukla 60 ns civarındadır.

4.3. FACET GEANT4 SİMÜLASYON TESTLERİ

GEANT4 FACET simülasyonu ile FACET dedektör sistemi çeşitli testlere tabi tutulmuştur. Bu testlerin temel amacı FACET dedektörlerini amacına uygun olarak optimize etmektedir. FACET dedektörlerini optimize etmek için geometri ve dedektörleri üzerinde çeşitli geometrik tasarımlar da yapılmıştır.

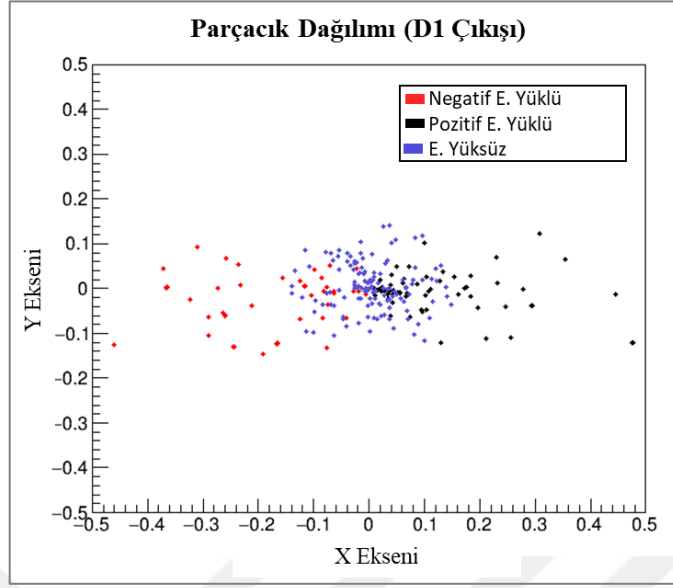


Şekil 4.28: FACET GEANT4 simülasyonunda CMS bölgesinde, LHC'deki 14 TeV toplam enerjiyle gerçekleşen proton-proton çarpışmalarının sonucunda oluşan birincil parçacıklardan D1 dipolü yüzeyine çarpanların oluşturduğu 2 boyutlu dağılım.

D1 dipolü LHC hattında CMS çarpışma noktasından 78 metre uzaktan başlamaktadır. D1 dipolünün FACET dedektör sistemi üzerine etkileri büyüktür. Dipol bir magnet olmasından dolayı pozitif ve negatif elektrik yüklü parçacıkların yönlerini zıt yönlerle doğru değiştirirken, nötr parçacıkların üzerine etkisi yoktur. D1 dipolü parçacıkların hızlandırılması sırasında proton hüzmelerini hüzmeye hattı içerisinde tutarken, çarpışma anı için CMS merkezine doğru yönlendirmektedir.

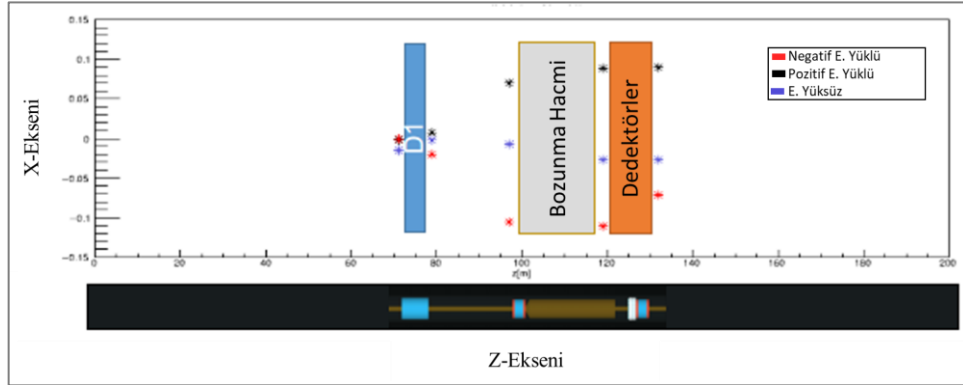
Şekil 4.28'de FACET GEANT4 simülasyonu içerisine tanımlanan D1 dipolünün 78. Metrede bulunan parçacıklar için giriş yüzeyi diye adlandırdığımız yüzeyindeki parçacık dağılımları gösterilmektedir. Burada parçacıklar elektrik yüklerine göre renklere ayrılmıştır. Kırmızı renkle negatif, siyah renkle pozitif elektrik yüklü parçacıklar gösterilirken, mavi renk ile yüksüz parçacıklar gösterilmektedir. Bu çalışma sırasında Pythia ile 14 TeV enerjili proton-proton çarpışması sonucu oluşan parçacıklar kullanılmıştır. Bu parçacıklar CMS merkezinden D1 dipolüne ulaşan parçacıklardır.

Şekil 4.28'de gösterildiği gibi elektrik yüklü ve yüksüz parçacıklar elektrik yüklerine göre düzensiz bir dağılımla D1 dipolüne çarpmaktadır. Yani CMS merkezinden elektrik yükü ayrımı yapılmaksızın D1 dipolüne parçacıklar ulaşmıştır.



Şekil 4.29: FACET GEANT4 simülasyonunda CMS bölgesinde, LHC'deki 14 TeV toplam enerjiyle gerçekleşen proton-proton çarpışmalarının sonucunda oluşan birincil parçacıklardan D1 dipolünü geçerek çıkış yüzeyine ulaşan parçacıkların 2 boyutlu dağılımı.

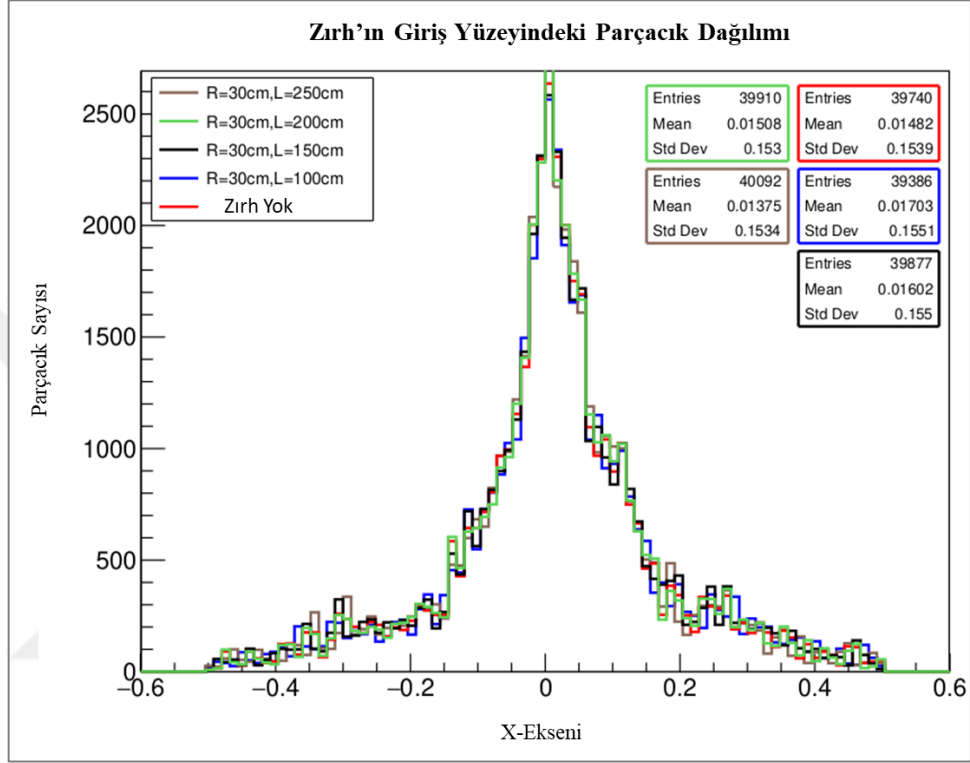
Şekil 4.29'da D1 dipolünün FACET tarafında bulunan çıkış yüzeyinden FACET'e doğru ilerleyen parçacıklar gösterilmektedir. D1 dipolüne giren parçacıklar ile D1 dipolünden çıkan parçacıkların elektrik yüküne göre dağılımlarında büyük bir farklılık ortaya çıkmıştır. D1 dipolünün manyetik alanı negatif ve pozitif elektrik yüklü parçacıkları sağa ve sola doğru yönlendirirken, elektrik yükü olmayan parçacıklar merkezden ilerlemeye devam etmişlerdir.



Şekil 4.30: FACET GEANT4 simülasyonunda CMS bölgesinde, LHC'deki 14 TeV toplam enerjiyle gerçekleşen proton-proton çarpışmalarının sonucunda oluşan birincil parçacıkların D1 dipolünün etkisi ile FACET boyunca hareketleri.

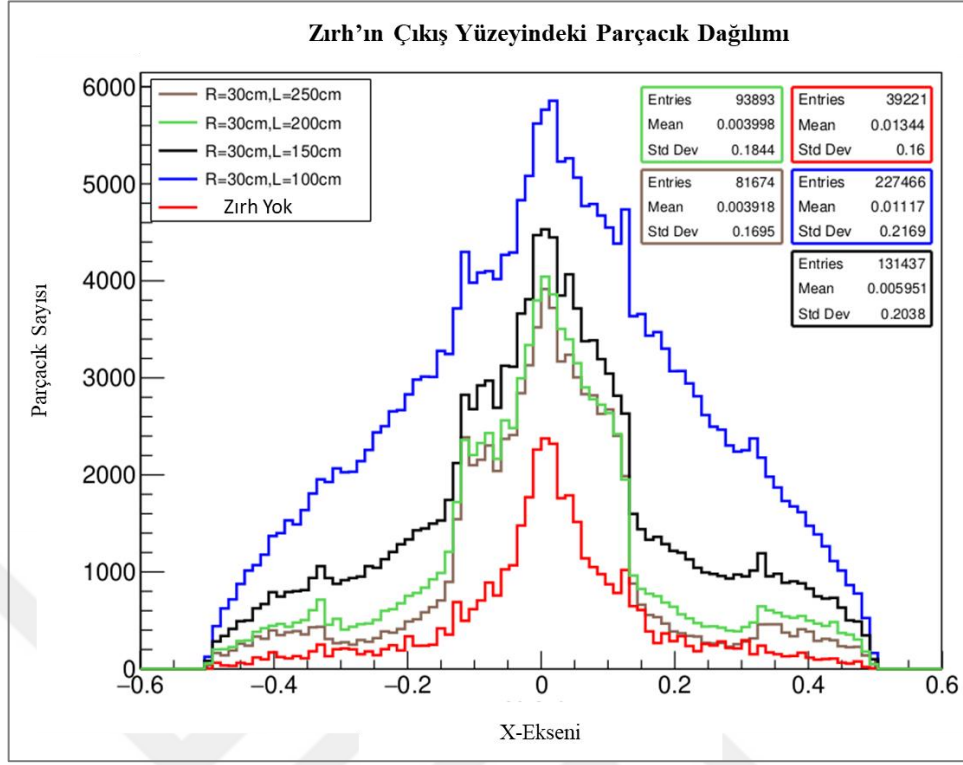
Şekil 4.30'da D1 dipolünün FACET üzerine doğru ilerleyen parçacıklar üzerine etkisi daha açık biçimde gösterilmektedir. Elektrik yüklü parçacıklar x eksenine göre sağa ve sola doğru FACET boyunca açılarak ilerlemektedirler. Burada negatif yüklü parçacıklar ve pozitif yüklü

parçacıkların belirli bir açıyla değil bazen ters yöne doğru da ilerledikleri görülüyor. Bunun sebebi hüzmeye hattı içerisinde D1 dipolü ile etkileşmeden sisteme katılan parçacıklardır. Bu parçacıklar da D1 dipolü içerisinde bulunan hüzmeye hattından devam ederek FACET bölgesine vardıklarında hüzmeye hattının dışına çıkarak dedektör sistemi içerisine dahil olmuşlardır.



Şekil 4.31: Zırhın giriş yüzeyine ulaşan ($z = 98$ m) parçacıkların çeşitli zırh uzunlukları için dağılımları.

FACET GEANT4 simülasyonunda D1 dipolünden sonra FACET önünde yer alan manyetik alana sahip bir zırh vardır. Bu zırhın amacı bozunma hacmine gelen parçacıkları soğurmak ya da saptırmaktır. Böylece bozunma hacmine yalnızca hüzmeye hattı içerisinde parçacıklar girecektir. Şekil 4.31’de 5 farklı durum için zırh üzerine gelen parçacıkların x eksenine boyunca parçacık sayılarına göre dağılımları gösterilmektedir. GEANT4 olay üretici CMS merkezinde 14 TeV proton-proton çarpışması sonucunda oluşan parçacıkları zırh önüne rastgele etkileşimler altında ulaştırdığı için sayılar farklıdır. Fakat yüksek oranda benzer dağılımlar elde edilmiştir. Zırhın olması ya da olmaması bu bölgeye gelen parçacıkların durumunda bir değişiklik oluşturmaz çünkü zırhın parçacıklar üzerine etkisi henüz yoktur.



Şekil 4.32: Zırhın çıkış yüzeyine ulaşan parçacıkların çeşitli zırh uzunlukları için dağılımları.

Şekil 4.32’de FACET önündeki zırhın 4 farklı geometrisi ve kullanılmadığı durumda çıkışındaki parçacık dağılımları verilmektedir. Burada bir enerji kesmesi ya da birincil ve ikincil parçacık ayrımı yapılmamıştır. Zırhın kullanılmadığı durumda en az parçacığın zırh çıkışına ulaştığı görülmektedir. Burada bir mantık hatası gibi görünen olayı açıklığa kavuşturmak gereklidir. Zırhın olmadığı durum için, zırh uzunluğu 200 cm alınmakta ve zırha benzer bir geometrik yapı ortamla etkileşmeyecek biçimde (yani hayalet bir yapı) simülasyona yerleştirilmiştir. Zırhın kullanılmadığı durum ile farklı uzunluklarda kullanıldığı durumlar arasında bir kıyaslama yapılması bu şekilde daha uygun olacaktır. En az parçacık zırhın olmadığı durumda zırh çıkış yüzeyine ulaşırken, en fazla parçacık 100 cm uzunluğunda bir zırh kullanıldığında zırh çıkış yüzeyine ulaşmaktadır. 200 cm uzunluğunda bir zırh kullanılması durumu ile, 250 cm uzunluğunda bir zırh kullanılması durumunda zırh çıkış yüzeyine ulaşan parçacık sayısı ve dağılımı benzerdir. Yani 200 cm ve üzerine uzunlukta bir zırh kullanılırsa benzer bir parçacık dağılımına ulaşılabacaktır. Bu da 200 cm uzunluğu zırh geometrisi için yeterlidir. Daha uzun bir zırh kullanılması etkiyi değiştirmeyecektir.

Tablo 4.1: FACET için geliştirilen iki farklı geometrik tasarımın değişen parametreleri.

	Geometri 1	Geometri 2
Facet başlangıç konumu	101. metre	103. metre
Hodoskop yüzeyi çapı	iç: 10,6 cm, dış: 50 cm	iç: 10,6 cm, dış: 45 cm
Bozunma hacmi uzunluğu	18 metre	10 metre
Bozunma hacmi çapı	50 cm	45 cm
Dedektör penceresi başlangıç	118. metre	113. metre
Dedektör penceresi çapı	50 cm	45 cm
İz-Takip dedektörü çapı	iç: 18 cm, dış: 50 cm	iç: 18 cm, dış: 45 cm
Kalorimetre başlangıcı	122. metre	116. metre
Kalorimetre dedektörü çapı	iç: 18 cm, dış: 50 cm	iç: 18 cm, dış: 45 cm

FACET çalışması başladığında GEANT4 simülasyonu ile FLUKA simülasyonu da paralel olarak başladı. FLUKA tarafından CMS sıfır noktasından 100. Metresine ulaşan parçacıklar simüle edilmiştir. Bu parçacıklar daha sonra HEPMC2 formatında FACET GEANT4 simülasyonuna entegre edilmiştir. Her bir parçacık için gruplandırmalar yapılmıştır ve GEANT4 her bir birincil parçacığın türü için ayrı olarak koşturulmuştur.

Tablo 4.1'de FACET için geliştirilmiş 2 farklı tasarıma ait parametreler verilmiştir. Geometri 1 tasarımı ile geometri 2 tasarımı arasındaki en büyük fark, dış yarıçap ve bozunma hacmi uzunluğudur. Geometri 2 tasarımı daha kısa bir FACET tasarımıdır. Bu tasarım LHC hattında daha az yer kaplayan bir FACET modeli için tasarlanmıştır. Fakat bozunma hacmini kısaltmanın artıları olduğu gibi eksileri de olacaktır. Her iki tasarım için de hodoskop ve kalorimetre gibi donanımlar aynı şekildedir. Ayrıca iki tasarımın başlangıç noktaları farklıdır.

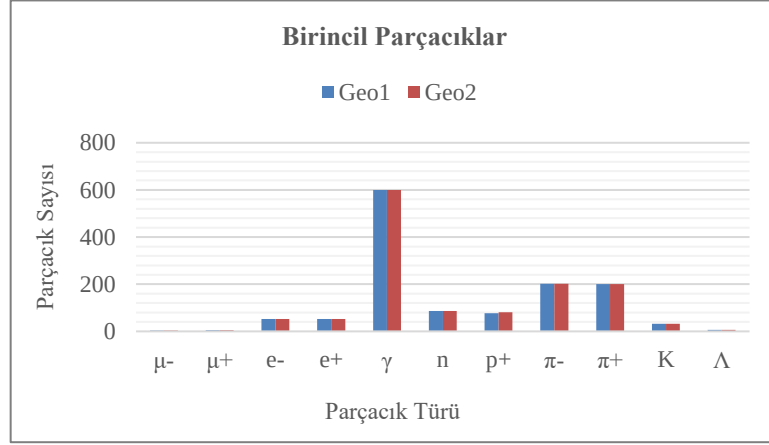
Tablo 4.2: 2 farklı tasarım için FACET GEANT4 simülasyonu sonucunda elde edilen 5 bölgeden alınan olay başına parçacık sayıları dağılımları.

	Birincil Parçacıklar	Hodoskop Yüzeyi	Dedektör Penceresi	İz-Takip	Kalo. Girişi
--	-----------------------------	------------------------	---------------------------	-----------------	---------------------

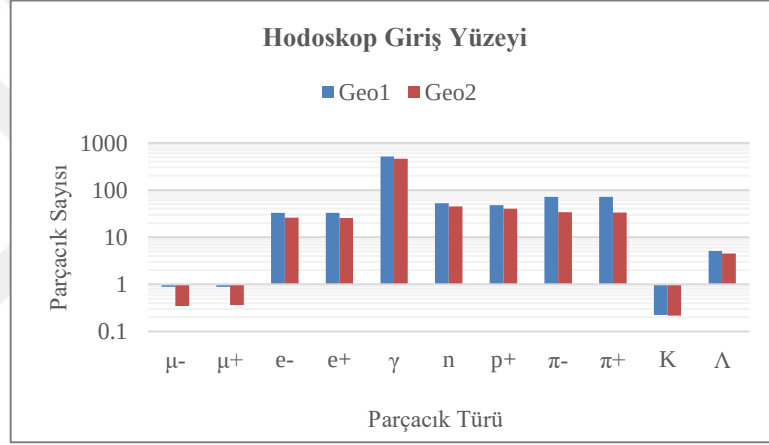
					L1	
μ^-	Geo1	4.39	1.67	0.32	0.3	0.25
	Geo2	4.3948	1.2822	0.452	0.3808	0.3514
μ^+	Geo1	4.7	1.67	0.32	0.3	0.25
	Geo2	4.736	1.3664	0.4116	0.3716	0.2876
e^-	Geo1	51.99	12.44	20.12	14.99	14.11
	Geo2	51.987	12.8554	16.1974	10.3636	10.6112
e^+	Geo1	52.33	12.59	19.75	14.98	14.06
	Geo2	52.3272	13.2096	16.3204	10.551	10.6686
γ	Geo1	599.46	57.3	120.3	41	44.98
	Geo2	599.462	38.8408	69.2604	22.629	22.1478
n	Geo1	87.05	25.06	3.5	2.7	2.33
	Geo2	87.0512	12.8968	3.5368	2.6638	2.2906
p^+	Geo1	77.25	21.25	21.25	2.8	3.06
	Geo2	80.4476	12.7964	7.1418	2.7032	2.2256
π^+	Geo1	200.06	97.15	25.2	20.27	17.12
	Geo2	200.057	74.568	27.178	21.5546	17.7188
π^-	Geo1	202.23	98.88	24.3	20.25	16.95
	Geo2	202.226	75.6386	27.0178	21.7364	17.7788
K	Geo1	32.23	0.0024	0.004	0.004	0
	Geo2	32.2346	0.0004	0.0002	0.0002	0.0002
Λ	Geo1	6.19	0.76	0.024	0.014	0.01
	Geo2	6.1888	0.1294	0.0242	0.0094	0.011

Tablo 4.2’de FACET için geliştirilen 2 tasarımın GEANT4 sonuçları yer almaktadır. İki tasarım için de 5 farklı bölgede 11 farklı parçacık türü için parçacık sayıları alınmıştır. Bu bölgeler sırasıyla, birincil parçacıkların olduğu bölge (FLUKA dosyasından elde edilen parçacık sayısı ile aynı), hodoskop yüzeyi, dedektör penceresi, iz-takip dedektörlerinin birincisi olan L1 plakası ve kalorimetrenin girişidir. Bu bölgeler FACET için en önemli bölgelerdir. Her biri bir dedektör sisteminin başlangıcıdır.

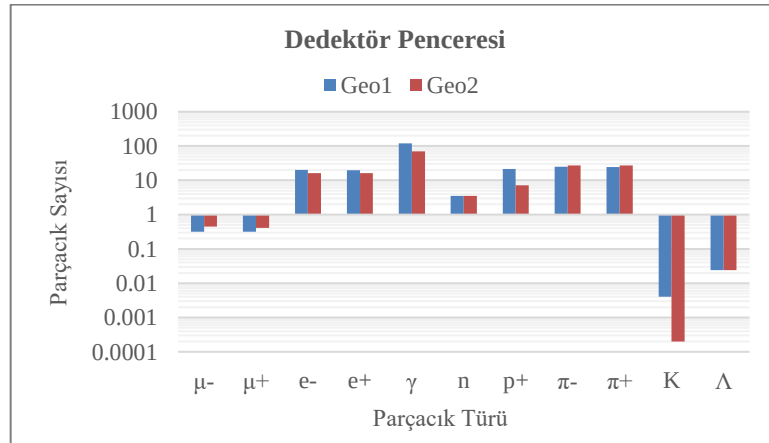
İki tasarımın da 5 bölgesinde 11 farklı parçacık türü için sayılarında değişiklikler görülmektedir. Örneğin 1. tasarımdan 2. tasarıma geçerken, kalorimetre girişimde müon sayıları azalırken π^+ ve π^- parçacıklarının sayıları artmıştır. Benzer şekilde tüm parçacıklar sayılarında değişimler gözlenmektedir.



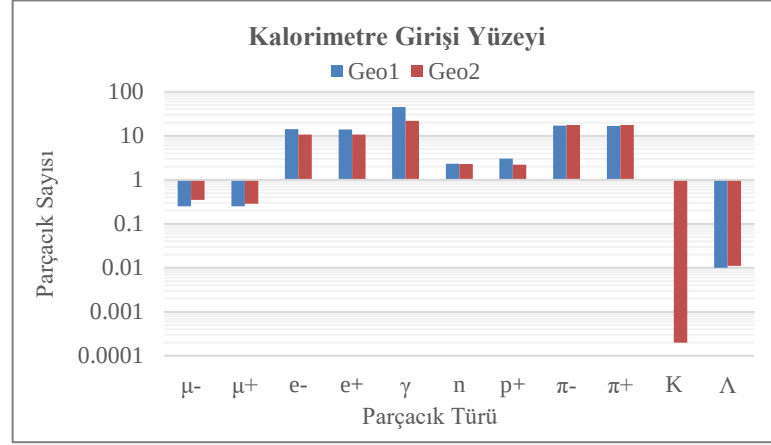
Şekil 4.33: İki farklı FACET geometrisi için GEANT4 simülasyonu içerisinde oluşan birincil parçacıkların parçacık türüne göre sayısal dağılımları.



Şekil 4.34: İki farklı FACET geometrisi için hodoskop yüzeyine ulaşan birincil parçacıkların parçacık türüne göre sayısal dağılımları.

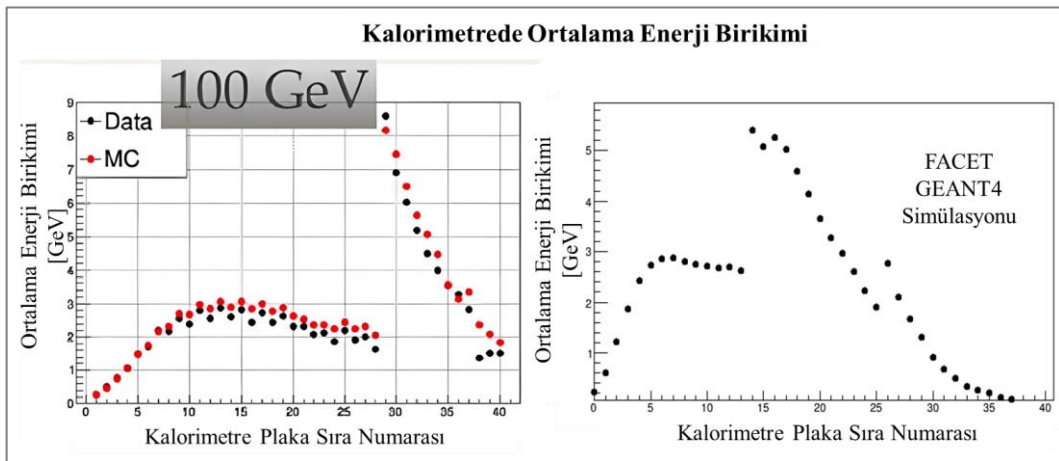


Şekil 4.35: İki farklı FACET geometrisi için dedektör penceresine ulaşan birincil parçacıkların parçacık türüne göre sayısal dağılımları.



Şekil 4.36: İki farklı FACET geometrisi için kalorimetreye ulaşan birincil parçacıkların parçacık türüne göre sayısal dağılımları.

Şekil 4.33'ten Şekil 4.36'ya kadar olan 4 grafik iki farklı FACET tasarımı için belirli bölgelerdeki birincil parçacıkların dağılımlarını göstermektedir. Şekil 4.33'te birincil parçacıkların sayıları her iki tasarım için de aynıdır. Bunun sebebi aynı girdi dosyalarının parçacık üretici olarak kullanılmasıdır. Şekil 4.34'te hodoskop yüzeyine ulaşan birincil parçacıklar gösterilmektedir. Müon parçacıkları hariç tüm parçacıklar 2. tasarımda daha azdır. Şekil 4.34'de dedektör penceresine ulaşan birincil parçacıklar gösterilmektedir. Her iki tasarım da farklı parçacık türlerinde farklı dağılımlar göstermişlerdir. Belirli bir artış ya da azalma yoktur. Bunun sebebi parçacıklar yalnızca yüzeylerden sırasıyla ya da etkileşerek geçmez. Aynı zamanda sisteme hüzme hattından da yeni parçacıklar girecektir.



Şekil 4.37: Kalorimetre üzerine 100 GeV enerjili π^+ parçacığı gönderilmesi sonucu (10k olay) kalorimetre plakalarında biriken enerji miktarlarının plaka sırasına göre dağılımları [37].

FACET GEANT4 simülasyonunda en karmaşık dedektör sistemi kalorimetrelerdir. Belirli bir düzene göre sıralanan plakalar altıgen modüller içermektedir. Plakaların dizilim sırası HL-LHC için tasarlanan HGCal modülleri ile aynıdır. Daha önce deneysel olarak alınan sonuçlar Şekil 4.37’de verilmiştir. Benzer şekilde geant4 ile 100 GeV enerjili bir π^+ parçacığı kalorimetre üzerine 10bin olay ile gönderilmiştir. Şekil 4.37’de gösterildiği gibi HGCal modüllerinin testlerinden alınan deneysel veriler ile FACET kalorimetresinin GEANT4 testlerinden alınan veriler birebir uyumludur. Bu da FACET GEANT4 simülasyonunun kalorimetrelerinin başarısını göstermektedir.



5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Günümüzde yapılan yüksek bütçeli parçacık çarpışma deneyleri ve nükleer deneylerde luminosite değeri deneyin hassaslığını ve derinliğini göstermektedir. Teorik hesaplarla ortaya sürülen yeni parçacıkların keşif serüveni de yine luminosite değerine bağlıdır. Luminosite arttıkça, hızlandırıcılarda çarpışan parçacıklarının ürünleri de artar ve ortamda nadir görünen parçacıkları keşfetmek daha da kolaylaşır. Parçacık fiziği deneyleri Tablo 2.1'deki gibi zamanla luminosite değerlerini artırmak için güncellemeler yaparak, yeni keşiflere doğru yol almaktadırlar.

Luminometre dedektörü, parçacık hızlandırıcılarında kullanılan en önemli dedektörlerden biridir ve bu alandaki başarısı, onu luminosite ölçümünün kritik olduğu diğer birçok alanda da kullanılabilir kılar. Hızlandırıcılar, parçacık fiziği deneylerinde, özellikle yüksek enerji fiziği çalışmalarında, çarpışmaların sıklığını ve yoğunluğunu ölçmek için bu dedektörleri kullanır. Luminometre dedektörleri, bu çarpışmaların verimliliğini ve deneylerin genel başarısını doğrudan etkileyen çarpışma hızını ölçmede kritik bir role sahiptir.

Bu dedektörlerin kullanım alanları yalnızca parçacık hızlandırıcıları ile sınırlı değildir. Nükleer tesisler gibi yüksek radyasyon seviyelerine maruz kalan ortamlarda da luminometre dedektörleri önemli bir işlev görür. Bu tür tesislerde, radyasyon seviyelerinin sürekli olarak izlenmesi gerekir, çünkü bu seviyeler hem çalışanların güvenliği hem de çevresel etkiler açısından kritik öneme sahiptir. Luminometre dedektörleri, bu tür ortamlarda radyasyon yoğunluğunu doğru bir şekilde ölçebilir ve böylelikle güvenli çalışma koşullarının sürdürülmesine yardımcı olur. Yüksek radyasyon içeren ve canlıların sürekli giremeyeceği alanlara da yerleştirilerek yıllarca çalışabilir.

Bu çalışma kapsamında yüksek oranda radyasyon altında uzun süre çalışabilen, gerektiğinde taşınabilecek kompaktlığa sahip, sağlam ve dayanıklı, modern teknolojilerle donatılmış bir luminometre dedektörü tasarladık. Bu tasarım 3 ana bileşenden oluşmaktadır. İskeleti oluşturan ve radyasyon alanında yer alacak olan dönüştürücü plakalar, bu plakaların yüzeyinden başlayarak içerisinden arkasına doğru uzanan, radyasyon dayanımı yüksek kuvars çekirdekli fiberler ve bu fiberlerde oluşan Cherenkov fotonlarını algılamak üzere radyasyon

bölgesinden fiberler aracılığı ile uzaklaştırılan foto-dedektörler luminometre dedektörünü oluşturan bileşenlerdir.

Simülasyon, yüksek enerji fiziği dedektörleri için çok önemli bir yer tutmaktadır. Bir dedektör geliştirmek ve test etmek için çok yüksek maliyetler ve tesisler gereklidir. Tüm bu maliyetleri göze alarak dedektör geliştirmeden önce simülasyon ortamında testler yaparak dedektör geliştirilebilir ve tasarlanabilir. Bu tez kapsamında yapılan tüm çalışmalar kuvars çekirdekli fiberlerin, dönüştürücü plakaların ve foto-dedektörlerin üreticilerinin deneysel verileri Geant4 simülasyon uygulamasına entegre edilerek yapıldı. Luminometre dedektörünün tüm bileşenleri ayrı ayrı optimize edilerek luminometre dedektörü tasarlandı ve bu tasarımlar da simülasyon ortamında test edildi.

Luminometre dedektörünün en önemli bileşeni olan kuvars çekirdekli fiberler üzerine çeşitli çalışmalar gerçekleştirildi. Bu çalışmalar, luminometre dedektörü tasarımıda kullanılacak fiberler için optimizasyon yapmamıza olanak sağladı. Bu çalışmalar aşağıdaki önemli bilgilere ulaşmamızı sağladı.

- FBP fiberleri, FSHA fiberlerine göre daha verimlidir ve daha uzak mesafelere, daha geniş bir bant aralığında foton iletebilmektedir (Şekil 3.2).
- Fiberlerin uzunluğu arttıkça, fiberler taşıdıkları fotonların bir kısmını soğurmaya başlayacaklardır ve sistemde foton kayıplarına sebep olmaktadır (Şekil 4.5, Şekil 4.6).
- Fiberlerin bir ucu ortamdaki hava ile temas ederken diğer ucu foto-dedektöre bağlıdır. Fiber içerisinde oluşan Cherenkov fotonları açık uçtan kaçabilmektedir. Bunu önlemek için açık uca yansıtıcı kaplanabilir. Açık uca yansıtıcı kaplanarak yapılan testlerde fotonların daha fazlasının sistem içerisinde kaldığı görülmüştür (Şekil 4.5, Şekil 4.6).
- Kuvars çekirdekli fiberlere yüklü parçacıklar farklı çarpma noktaları ile ve farklı çarpma açıları ile çarptıklarında, fiberlerin içerisinde oluşan Cherenkov fotonlarının sayısı ve fiberlerin foto-dedektöre ulaştırdığı fotonların sayısı değişmektedir (Şekil 4.1- Şekil 4.4).
- Kuvars çekirdekli fibere 45 ve 135 derecelik çarpma açıları ve fiberin merkez (sıfır) çarpma noktasına yüklü bir parçacık çarptığında en fazla Cherenkov fotonu sayısı ölçüldü. Fiber içerisinde en az Cherenkov fotonu 90 derecelik çarpma açısında ve 0.3 mm çarpma noktasında oluşmaktadır (Şekil 4.1- Şekil 4.4).

- Kuvars çekirdekli fibere yüklü bir parçacığın çaptığı nokta fiberin çekirdeğinin merkezinden dışına doğru konum olarak arttığında, oluşan Cherenkov fotonu sayıları da azalmaktadır. Benzer şekilde kuvars çekirdekli fibere yüklü bir parçacığın çaptığı açı 15 dereceden 90 dereceye artarken oluşan Cherenkov fotonlarının sayıları azalmaktadır, 90 dereceden 165 dereceye artarken oluşan Cherenkov fotonlarının sayıları artmaktadır (Şekil 4.1- Şekil 4.4).
- Kuvars çekirdekli fibere yüklü bir parçacığın çaptığı çarpma noktası ve açısı değiştikçe, foto-dedektöre ulaşan foton sayıları da değişmektedir. En fazla foton 135 derece çarpma açısında foto-dedektöre ulaşmaktadır. En az foton ise 90 derecelik çarpma açısında foto dedektöre ulaşmaktadır. 135 derecelik çarpma açısında Cherenkov fotonları foto-dedektör yönüne doğru yönelirken, 45 derecelik çarpma açısında Cherenkov fotonları fiberin açık ucuna doğru yönelmektedir. Bundan dolayı 45 derecelik çarpma açısında foto-dedektöre ulaşan fotonların sayısı artırılmak istenirse, fiberin açık ucuna yansıtıcı kaplama yapılarak ortama kaçarak sistemden çıkan fotonların sistemde kalması sağlanabilir. Sonuç olarak 45 derecelik çarpma açısında da foto-dedektöre yüksek oranda foton gelmektedir (Şekil 4.4).
- Kuvars çekirdekli fiberin merkezinden dışına doğru değişen farklı çarpma noktalarına yüklü parçacıklar çarptığında, foto-dedektöre ulaşan foton sayıları değişmektedir. Çarpma noktası fiberin merkezinden kaplamasına doğru arttıkça, foto-dedektöre ulaşan foton sayıları azalmaktadır. Benzer şekilde foto-dedektörde algılanan foton sayıları da azalmaktadır (Şekil 4.5).

Luminometre dedektörünün gövdesini oluşturan donanım dönüştürücü plakalardır. Dönüştürücü plakalar için üretildikleri malzeme çok önemlidir. Sağlamlığı, radyasyon uzunluğu ve arka plan radyasyon seviyesi, mekaniksel olarak işlenebilirliği olan bir malzeme seçilmelidir. Tungsten en iyi adaylardan biridir fakat mekanik olarak tungsteni işlemek çok zordur. Bundan dolayı alaşım yapılarak plakalar olarak kesilebilir ya da delikler açılabilir. Belirli oranda bakır ekleyerek bunu yapmak mümkündür. Alaşım yapıldığında, luminometre dedektörü içerisinde oluşacak ikincil parçacıkların seviyesindeki değişim de önemlidir. Tungsten miktarı azaldıkça oluşan ikincil parçacıklar da azalacaktır. Fakat çok düşük oranda bakır karıştırmak mekaniksel işlenebilirliği azalmaktadır. En uygun seviye %70-%80 civarında Tungsten kullanmaktır. Yaptığımız çalışmalar da bunu göstermektedir (Şekil 4.8).

Geliştirilen tasarımlar ve optimize edilen bileşenler ile luminometre dedektörü simülasyon ortamında tasarlanmıştır. Luminometre dedektörü üzerine farklı elektrik yüklerine sahip parçacıklar gönderilerek testler yapılmıştır.

- Luminometre dedektörü için 2 farklı model tasarlanmıştır. İlk tasarımda fiberler dönüştürücü plakaların içerisinden geçerek foto-dedektörlere ulaşırken, ikinci tasarımda dönüştürücü plakalardan oluşan bir bloğun arkasına yerleştirilerek foto-dedektörlere doğru uzatılmıştır.
- Kuvars çekirdekli fiberlerin dönüştürücü plakaların içerisinden geçtiği tasarımda fibere daha fazla ikincil parçacıklar çarptı ve bundan dolayı fiberlerde daha fazla Cherenkov fotonu oluşmaktadır. Benzer şekilde daha fazla foton foto-dedektöre ulaşmaktadır (Şekil 4.9 - Şekil 4.11).
- İki tasarım için kuvars çekirdekli fiberlerde oluşan Cherenkov fotonlarının sayılarının, foto-dedektöre ulaşan foton sayılarına ve foto-dedektörde algılanan foton sayılarına oranlarına baktığımızda benzer sonuçlar elde edilmiştir. Sistemde oluşan fotonların foto-dedektöre ulaşan fotonlara oranları göz önüne alındığında iki sistem de benzer şekilde çalışmaktadır. Fazla foton üreten daha fazla fotonu foto-dedektörlere ulaştırmaktadır (Şekil 4.11).
- Optimizasyonlar sonucu ilk tasarım daha başarılı olmuştur ve daha fazla fotonu oluşturarak foto-dedektöre ulaştırmaktadır. Fiberler bu tasarımda dönüştürücü plakaların içerisinden geçerek, arka kısma doğru ilerleyip foto dedektörlere temas etmektedir. Bundan dolayı dönüştürücü plaklar içerisinde oluşan ikincil parçacık yağmuru dönüştürücü plakaların arkasına doğru devam ederken arkaya uzanan fiberlere de çarpmakta ve dedektörün arka kısmına doğru da foton oluşumları meydana gelmektedir (Şekil 4.12).
- Dönüştürücü plakaların arka kısmında parçacık yağmuru altında kalan fiberler Cherenkov fotonu üretmeye ve foto-dedektöre taşımaya devam etmektedirler. Bu aşamada buradaki etki en fazla foton fiberlerin ilk 1 metresinde görülmekte ve fiberin 1 metre sonrasına göre 200 kata yakın bir fark meydana gelmektedir (Şekil 4.13).
- Luminometre tasarımında gruptandırılmış fiberler kullanılmaktadır. Her bir grup içerisine bir ya da birden fazla fiber konularak testler yapılmıştır. Bu testler sonucunda en az foton tek bir fiber kullanıldığında, en fazla foton ise 9 adet

fiberden oluşan bir grup kullanıldığında oluşmakta ve foto-dedektöre ulaşmaktadır. Grup içerisindeki fiber sayısı arttıkça, oluşan foton sayıları ve foto-dedektöre ulaşan foton sayıları da artmaktadır (Şekil 4.14).

- Luminometre dedektöründe fiber grupları içerisine iki farklı fiber modeli yerleştirilerek testler yapılmıştır. FSHA ve FBP fiberleri için yapılan testler sonucunda FBP fiberi daha fazla fotonu foto-dedektöre ulaştırmaktadır (Şekil 4.16).
- Luminometre dedektörü radyasyon oranı yüksek ortamlarda kullanılmak üzere modern teknolojilerle donatılmıştır. Daha önce yapılan deneyler ışığında elde edilen kuvars FSHA fiberlerinin radyasyon verileri Geant4 simülasyonuna entegre edilmiştir. 54 kGy radyasyon altına kalan fiberleri kullanarak yapılan testlerde foto-dedektöre ulaşan foton sayısı yarıya düşmektedir. Sonuç olarak fiberler çalışmayı sürdürmekte ve fotonları taşımaya devam etmektedirler (Şekil 4.18).

Luminometre dedektörünün optimizasyonu için yapılan simülasyon testlerinden sonra tasarım son şeklini almıştır. Her biri 7 adet FBP fiberi içeren fiber grupları oluşturulmuş ve 16 grup plakalar içerisine yerleştirilmiştir. Dönüştürücü plakaların boyutları 6.2cm x 5cm x 4cm olarak seçilmiştir. 2 metrelik fiberlerin sonuna Ketek SiPM'ler foto-dedektör olarak yerleştirilmiştir. Luminometre dedektörü böylece son testler için hazır hale getirilmiştir. İlk olarak dönüştürücü plakaların yüzeyine yani 0 noktasına 100 GeV enerjili elektronlar yüzeyi tarayacak şekilde rastgele gönderildiler. Elektronlarla yapılan bu testlerden sonra, luminometre dedektörü CMS CASTOR bölgesine (20 cm, 0, 15 m) yerleştirildi ve 14 TeV enerjili merkezi çarpışma simüle edilmiştir. Proton-proton çarpışması sonucu ortaya çıkan parçacıkların bir kısmı luminometre dedektörüne çarptılar ve fiberlerde Cherenkov fotonları oluşturdular.

- Luminometre dedektörü üzerine rastgele gönderilen 100 GeV sabit enerjili elektronlar benzer oranda ikincil parçacıklar üretti ve bütün fiber gruplarında benzer sayılarda Cherenkov fotonu oluşturdular. Oluşan Cherenkov fotonlarının foto-dedektöre ulaşma sayıları da benzerlik göstermiştir (Şekil 4.19, Şekil 4.20).
- İkincil parçacıklar 7 adet fiberden oluşan fiber gruplarına çoğunlukla fiberlerin dönüştürücü plaka içerisinde kalan kısmında ve dönüştürücü plakaların hemen arkasında çarparak Cherenkov fotonları oluşturmaktadırlar. İkincil parçacıklar fiber

içerisinde seyahat ederken belirli bir hat üzerinde Cherenkov fotonlarını oluşturmaktadırlar (Şekil 4.21, Şekil 4.22).

- CMS CASTOR bölgesine yerleştirilerek 14 TeV merkezi enerjili proton-proton çarpışması 5000 olay için tekrarlandı. Bu olaylardan 661 tanesinde foton okunurken, 750 olayda dönüştürücü plakalara parçacık çarpmaktadır. Bu farkın sebebi Geant4 uzayında fiberlere de birincil parçacıklar da çarpmaktadır.
- Proton-proton çarpışması sonucu dönüştürücü plakalara çarpan parçacıklar sabit bir enerjide ve tek tipte parçacıklar değildir (Şekil 4.23). Bundan dolayı dönüştürücü plakalar içerisinde oluşan ikincil parçacıklar aynı seviyede oluşmamışlardır (Şekil 4.24). Buna bağlı olarak fiber gruplarında hatta gruplar içerisindeki 7 ayrı fiberde farklı sonuçlar ortaya çıkmaktadır (Şekil 4.26). Sabit enerjili elektron testleri ile proton-proton çarpışması testleri sonucu ortaya çıkan parçacıklar ile farklı sonuçlar vermektedir. Bu farklı sonuçlar da bize gösteriyor ki, luminometre dedektörü ortamdaki parçacıkların yoğunluğu ve enerjileri, yani luminositeleri hakkında bilgi vermektedir.

Sonuç olarak yüksek radyasyon dayanımı olan, bulunduğu ortamdaki luminosite hakkında hassas ölçümler yapabilen, kompakt ve yenilikçi bir luminometre dedektörü tasarlanmıştır.

Luminometre dedektörü geliştirme çalışması ile paralel olarak FACET Projesi için GEANT4 simülasyonu geliştirilmiştir. FACET gelecekte kurulması planlanan (HL-LHC dönemi), simülasyonlar ile optimizasyonları yapılan bir dedektör sistemidir.

- FACET LHC hüzme hattı üzerinde CMS çarpışma noktasından 100 metre ileriye kurulması planlanan bir dedektör sistemidir. Simülasyon ortamında LHC hüzme hattı tasarlanmıştır.
- FACET sistemi önünde yer alan D1 dipolü simülasyona entegre edilerek testler yapılmıştır (Şekil 4.28 - Şekil 4.30).
- FACET içerisinde yer alan ve bozunma hacminin önüne yerleştirilecek olan zırh simülasyon ile uzunluğu optimize edilmiştir (Şekil 4.31, Şekil 4.32).
- Zırh ile bozunma hacmi arasına yerleştirilecek olan hodoskop, kuvars kristallerden oluşmaktadır ve GEANT4 simülasyonuna 3 ayrı yüzey olarak 60 derecelik açılarla eklenmiş ve etkileri üzerine testler yapılmıştır.

- Silikon iz-takip dedektörleri 5 ayrı plaka olarak simülasyona dahil edilmiştir.
- HL-LHC için tasarlanan HGCal kalorimetre sisteminin bir benzeri FACET için tasarlanmış ve GEANT4 simülasyonuna hem elektromanyetik hem de hadronik kalorimetre olarak entegre edilmiştir. Daha sonra ise HGCal deneysel verileri ile FACET GEANT4 simülasyonunun kalorimetresinin test sonuçları karşılaştırılarak tasarımın doğruluğu ortaya konmuştur (Şekil 4.37).
- FACET dedektör sistemi için 2 farklı tasarım göz önüne alınarak testler yapılmıştır. Bozunma hacminin kısa olduğu bir tasarım ile bozunma hacminin etkileri incelenmiştir (Şekil 4.33 - Şekil 4.36).

FACET tüm bileşenleri ile GEANT4 ortamında tasarlanmıştır ve üzerine çalışmalar devam etmektedir.

KAYNAKLAR

- [1]. Griffiths, D. J., 2008, *Introduction to Elementary Particles*, Second, Revised Edition. Wiley-VCH.
- [2]. Sodickson, L., W. Bowman, J. Stephenson, and R. Weinstein, 1961, Single-Quantum Annihilation of Positrons, *Phys. Rev.*, 124, 6, 1851–1861.
- [3]. Tuomisto, F. and I. Makkonen, 2013, Defect identification in semiconductors with positron annihilation: Experiment and theory, *Rev. Mod. Phys.*, 85, 4, 1583–1631.
- [4]. Pattison, P., 1975, *X-RAY AND GAMMA-RAY COMPTON SCATTERING*, University of Warwick.
- [5]. Wang, H.-Z., H.-X. He, J. Feng, X.-D. Chen, and W. Lin, 2011, The Actual Nature of Light (I) Reveal the Mystery about the Actual Nature of Light from Newton, Einstein to the Recent Mistakes, *Journal of Quantum Information Science*, 1, 2, Art. no. 2.
- [6]. Penrose, R., 2004, *The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe*, 1st ed., 410,411.
- [7]. Cherenkova, E. P., 2008, The discovery of the Cherenkov radiation, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 595, 1, 8–11.
- [8]. Wandel, M., 2005, *Attenuation in silica-based optical fibers*, Technical University of Denmark, Denmark.
- [9]. Griffiths, D. J., 2008, Cross Sections, in *Introduction to Elementary Particles*, Second, Revised Edition., 6.1.1, 199.
- [10]. Herr, W. and B. Muratori, 2006, Concept of luminosity, *CAS - CERN Accelerator School: Intermediate Accelerator Physics*, 361–378.
- [11]. Muratori, B., 2002, Luminosity and luminous region calculations for the LHC. CERN, Geneva.
- [12]. Bai, M., 2015, Colliding Beams, presented at the BND School.
- [13]. Béjar Alonso, I., O. Brüning, P. Fessia, and M. Lamont, 2020, High-Luminosity Large Hadron Collider (HL-LHC) Technical design report, *CERN Yellow Reports: Monographs. CERN-2020-010: 378.*
- [14]. Gupta, M., 2010, Calculation of radiation length in materials. CERN, Geneva.
- [15]. Gola, A., A. Ferri, A. Tarolli, N. Zorzi, and C. Piemonte, 2014, SiPM optical crosstalk amplification due to scintillator crystal: effects on timing performance, *Phys Med Biol*, 59, 13, 3615–3635.

- [16]. Pro, T. *et al.*, 2013, New developments of near-UV SiPMs at FBK, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 60, 2247–2253.
- [17]. Piemonte, C. *et al.*, 2013, Characterization of the First FBK High-Density Cell Silicon Photomultiplier Technology, *Electron Devices, IEEE Transactions on*, 60, 2567–2573.
- [18]. Vinogradov, S., 2016, Performance of Silicon Photomultipliers in photon number and time resolution, 002.
- [19]. Hamamatsu Photonics, 2007, Photomultiplier Tubes: Basics and Applications. Hamamatsu Photonics K.K.
- [20]. Zappa, F., S. Tisa, A. Tosi, and S. Cova, 2007, Principles and features of single-photon avalanche diode arrays, *Sensors and Actuators A: Physical*, 140, 1, 103–112.
- [21]. Rogalski, A., 2012, History of infrared detectors, *Opto-Electronics Review*, 20, 3, 279–308.
- [22]. Albrow, M. G. *et al.*, 2022, FACET: a new long-lived particle detector in the very forward region of the CMS experiment, *Journal of High Energy Physics*, 2022, 6.
- [23]. Polymicro Molex, 2023, FBP Fiber Technical Document. Polymicro Molex.
- [24]. Technologies, P., 2001, Proposal for Quartz Plastic Fibers for the CMS Detectors. Polymicro Technologies.
- [25]. Aydılek, O., S. Ozkorucuklu, D. Sunar Cerci, and S. Cerci, Study on Geant4 Simulation of Cherenkov Photons Generation and Propagation in Quartz Core Fibers, *International Journal of Pure and Applied Sciences*, 9, 2, 250–260.
- [26]. Malitson, I. H., 1965, Interspecimen Comparison of the Refractive Index of Fused Silica, *J. Opt. Soc. Am.*, JOSA, 55, 10, 1205–1209.
- [27]. Fisher, A. *et al.*, 2019, Beam-Loss Detection for LCLS-II, in *8th International Beam Instrumentation Conference*, TUA002.
- [28]. Cankocak, K. *et al.*, 2019, Radiation-Hardness Measurements of High OH- Content Quartz Fibres Irradiated with 24 GeV Protons up to 1.25 Grad, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 585, 1–2.
- [29]. Lechner, A., 2018, Particle interactions with matter, *CERN Yellow Rep. School Proc.*, 5, 47.
- [30]. Zhang, Y. *et al.*, 2017, New prototype scintillator detector for the Tibet AS γ experiment, *Journal of Instrumentation*, 12, P11011–P11011.
- [31]. KETEK, 2020, KETEK-PM3315-WB-C0-Datasheet. KETEK GmbH.
- [32]. Sunar Cerci, D. and Sa. Cerci, 2023, Geant4 Study for Geometry of Quartz Fiber Luminometer at CMS HL-LHC, *Physics of Particles and Nuclei*, 54, 4, 725–728.

- [33]. Selivanova, D. A. *et al.*, 2020, Geant4 quartz fiber simulations as part of luminometer development for CMS, presented at the Journal of Physics: Conference Series, 1690, 1.
- [34]. Agostinelli, S., 2003, GEANT4—a simulation toolkit, *Nucl. Instrum. Meth. A*, 506, 250–303.
- [35]. Geant4 Collaboration, 2023, Geant4 Book For Application Developers. CERN.
- [36]. Lippmann, C., 2011, Particle identification, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A*, 666, 148–172.
- [37]. Krüger, K., C. Lange, and D. S. Cerci, 2019, Pion Analysis, presented at the HGCal 2018 beam tests.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Orhan AYDİLEK
Doğum Yeri	
Doğum Tarihi	
Uyruğu	☒ T.C. ☐ Diğer:
E-Posta Adresi	
Web Adresi	

Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Fakülte	Fen Edebiyat Fakültesi
Bölümü	Fizik
Mezuniyet Yılı	2014

Yüksek Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı	Fizik
Programı	Matematiksel Fizik

Doktora	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı	Fizik
Programı	Yüksek Enerji ve Plazma Fiziği

Makale ve Bildiriler	
[1]. Aydılek, O., S. Ozkorucuklu, D. Sunar Cerci, and S. Cerci, Study on Geant4 Simulation of Cherenkov Photons Generation and Propagation in Quartz Core Fibers, International Journal of Pure and Applied Sciences, vol. 9, no. 2, pp. 250–260. [2]. Selivanova, D. A. et al., 2020, Geant4 quartz fiber simulations as part of luminometer development for CMS, presented at the Journal of Physics: Conference Series, vol. 1690, no. 1. doi: 10.1088/1742-6596/1690/1/012047. [3]. Albrow, M. G. et al., 2022, FACET: a new long-lived particle detector in the very forward region of the CMS experiment, Journal of High Energy Physics, vol. 2022, no. 6, doi: 10.1007/JHEP06(2022)110.	

- [4]. Tumasyan, A. et al., 2023, Search for heavy resonances and quantum black holes in $e\mu$, $e\tau$, and $\mu\tau$ final states in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV, JOURNAL OF HIGH ENERGY PHYSICS, no. 5. doi: 10.1007/JHEP05(2023)227.
- [5]. Tumasyan, A. et al., 2023, Search for Higgs boson decays to a Z boson and a photon in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV, JOURNAL OF HIGH ENERGY PHYSICS, no. 5. doi: 10.1007/JHEP05(2023)233.
- [6]. Tumasyan, A. et al., 2023, Search for long-lived particles decaying to a pair of muons in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV, JOURNAL OF HIGH ENERGY PHYSICS, no. 5. doi: 10.1007/JHEP05(2023)228.
- [7]. Tumasyan, A. et al., 2023, Search for top squarks in the four-body decay mode with single lepton final states in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV, JOURNAL OF HIGH ENERGY PHYSICS, no. 6. doi: 10.1007/JHEP06(2023)060.
- [8]. Tumasyan, A. et al., 2023, Search for CP violation using $t(t)\text{-bar}$ events in the lepton plus jets channel in pp collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV, JOURNAL OF HIGH ENERGY PHYSICS, no. 6. doi: 10.1007/JHEP06(2023)081.
- [9]. Hayrapetyan, A. et al., 2023, Measurements of inclusive and differential cross sections for the Higgs boson production and decay to four-leptons in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV, JOURNAL OF HIGH ENERGY PHYSICS, no. 8. doi: 10.1007/JHEP08(2023)040.