



**T.C.
BURDUR MEHMET AKİF ERSOY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

33 TeV'LİK KÜTLE MERKEZİ ENERJİSİNDE SLEPTON SİNYALİNİN KÜÇÜK KÜTLE FARKI DURUMUNDA İNCELENMESİ

FATMA BETÜL GÜZELOĞLU

BURDUR, 2022

**T.C.
BURDUR MEHMET AKİF ERSOY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**33 TeV'LİK KÜTLE MERKEZİ ENERJİSİNDE
SLEPTON SİNYALİNİN KÜÇÜK KÜTLE FARKI
DURUMUNDA İNCELENMESİ**

FATMA BETÜL GÜZELOĞLU

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ali ÇELİK

BURDUR, 2022

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “**33 TeV’lik Kütle Merkezi Enerjisinde Slepton Sinyalinin Küçük Kütle Farkı Durumunda İncelenmesi**” başlıklı bu tezin;

- Kendi çalışmam olduğunu,
- Sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi,
- Bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi,
- Kullandığım verilerde değişiklik yapmadığımı,
- Tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını,
- Bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı,
- Bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı,

bildirir, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

17 / 06 / 2022

Fatma Betül GÜZELOĞLU

TEŞEKKÜR

Tezin hazırlanması için gerekli zamanını ayıran, yardımını esirgemeyen ve destekleyen danışman hocam sayın Dr. Öğr. Üyesi Ali ÇELİK'e, tezin hazırlanmasında çok kez yardımını olan arkadaşım İnanç YILMAZ'a, manevi desteğiyle yanımda olan eşime ve aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek Lisans çalışmalarımı maddi olarak destekleyen Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinatörlüğü'ne teşekkür ederim.

Bu çalışma Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından 0669-YL-20 proje numarası ile desteklenmiştir.

Bu çalışmada kullanılan bilgi işlem kaynakları, Türkiye Ulusal Yüksek Performanslı Hesaplama Merkezi (UHeM) tarafından 1008362020 hibe numarası ile sağlanmıştır.

Haziran, 2022

Fatma Betül GÜZELOĞLU

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİL DİZİNİ	iii
ÇİZELGE DİZİNİ	v
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ÖZET	ix
SUMMARY	x
1. GİRİŞ	11
2. STANDART MODEL ve SÜPERSİMETRİ	13
2.1. Standart Model	13
2.1.1. Temel Kuvvetler ve Bozonlar	14
2.2. Süpersimetri	16
3. BHÇ VE CMS DEDEKTÖRÜ	19
3.1. BHÇ (Büyük Hadron Çarpıştırıcısı)	19
3.1.1. ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS, Toroid BHÇ Cihazı)	21
3.2. CMS	22
3.2.1. Genel Bakış	22
3.2.2. CMS Koordinat Sistemi	24
3.2.3. İzleyici	25
3.2.4. Elektromanyetik Kalorimetre(ECAL)	27
3.2.5. Hadronik Kalorimetre	28
3.2.6. Süperiletken Magnet (Solenoid)	29
3.2.7. Müon Sistemi	29
3.2.8. Tetikleme Sistemi	30
4. MONTE CARLO (MC)	32
4.1. Madgraph	32
4.2. Pythia	32
4.3. Delphes	32
4.4. Geant4	33
4.5. SUSY-HIT (SUSpect-SdecaY-Hdecay-InTerface)	33
5. SİNYAL VE ARDALAN	34
5.1. Sinyal	34
5.1.1. Motivasyon	35
5.2. Ardalan	36
5.2.1. Z+Jets (Drell-yan)	36
5.2.3. tt + jet Ardalanı	37
5.2.4. Dibozon (WW, WZ ve ZZ) Ardalanı	38
6. SÜPERSİMETRİ ARAŞTIRMALARI	39
7. ANALİZ	41
8. SONUÇ	48
KAYNAKLAR	49
EKLER	53
EK-1 R- paritesi	53

ŞEKİL DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. SM parçacıkları ve SÜSİ parçacıkları.....	16
Şekil 2.2. a) SM’de çiftlenim sabitlerinin Q (GeV) enerjisinde değişimleri. b) MSSM’de çiftlenim sabitlerinin Q (GeV) enerjisinde değişimleri	17
Şekil 3.1. CERN hızlandırıcı kompleksi	21
Şekil 3.2. ATLAS detektörünün genel görünümü.....	22
Şekil 3.3. CMS detektörünün genel görünümü.	23
Şekil 3.4 CMS detektörünün enine kesiti. Bazı parçacıkların izledikleri tipik yollar.....	24
Şekil 3.5. CMS koordinat sistemi.....	25
Şekil 3.6. CMS izleyicisinin şematik gösterimi.	25
Şekil 3.7. İzleyici dedektörünün, z düzleminin $1/4'$ lük kısmı gösterilmiştir.	26
Şekil 3.8. Kurşun tungstat kristalle etkileşime girdikten sonra simüle edilmiş elektromanyetik duş.....	27
Şekil 3.9. Elektromanyetik kalorimetrenin enine kesiti.	28
Şekil 3.10. HB, HO ve HE dedektörlerinin dörtte biri için HCAL kule bölümlenmesi.....	28
Şekil 3.11. CMS dedektöründeki Muon dedektör sistemin konumları.	30
Şekil 3.12. CMS L1 tetikleyici sistemi.	31
Şekil 5.1. Bir ISR jet ile birlikte Slepton üretimi.	34
Şekil 5.2. Yüksek enine momentumlu ISR jet ile, slepton çifti hemen hemen aynı doğrultuda fakat ISR jetin zıt yönünde hizalanır.....	34
Şekil 5.3. Z +Jet ardalanı üretimi ile ilgili Feynman diyagramı.	36
Şekil 5.4. tt ardalanı üretimi ile ilgili Feynman diyagramı.	37
Şekil 5.5. WW , WZ ve ZZ üretimi ile ilgili Feynman diyagramı ardalanlarının.....	38
Şekil 6.1. WW modeli için CMS analizinin %95 CL de limit grafiği.	39
Şekil 7.1. Bir ISR jet ile birlikte Slepton çifti üretimi.....	41
Şekil 7.2. Sinyal ve ardalanlardan gelen öncü jet momentum grafiği.....	43
Şekil 7.3. MET dağılımı grafiği. İlk üç ön seçimi geçen olayların MET dağılımı.	45
Şekil 7.4. Son durumdaki leptonların enine momentumlarının skaler toplamı dağılımı. ...	46
Şekil 7.5. Herhangi bir ön seçim uygulanmadan önce M_{T2} dağılımı.	47
Şekil 7.6. M_{T2} üzerine üst ön seçim uygulandıktan sonra sinyal ve ardalın dağılımı.	47

Şekil 8.1. Sleptonun kütlesine göre değişen anlamlılık değeri.....	48
---	----



ÇİZELGE DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1. Leptonlar, aileleri, çeşnileri, yükleri ve kütleleri	13
Çizelge 2.2. Kuarklar, aileleri, çeşnileri, yükleri ve kütleleri	14
Çizelge 2.3. Temel kuvvetler, aracı bozonları, şiddetleri, yükleri ve kütleleri	14
Çizelge 5.1. Sinyal için üretilen slepton ve nötralinoların kütle durumları.	35
Çizelge 7.1. Her bir kat dan sonra sinyal ve ardalan tesir kesitleri.	45



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ALICE	: Büyük Bir İyon Çarpıştırıcı Deneyi (A Large Ion Collider E xperiment)
APDS	: Çığ Fotodiyotları (A valanche P hoto D iode S)
ATLAS	: Toroid şeklindeki BHÇ Aparatı (A Toroidal L HC A pparatu S)
CERN	: Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi
CMS	: Kompakt Müon Solenoidi (T he C ompact M uon S olenoid)
CMSS	: Küçük kütle farkı spektrumu senaryosu (C ompressed M ass S pectra Scenario)
CSC	: Katot şerit odaları (C atot S trips C hambers)
CUT	: Ön seçim
DT	: Sürüklenme Tüpleri
EE	: Elektromanyetik kalorimetrenin son kapağı
EKAL	: Elektromanyetik kolorimetre
fb	: femtobarn
fm	: femtometre
GEM	: Gaz elektron çoğaltıcı
GeV	: Gigaelektronvolt
GUT	: Büyük Birleşim Teorisi
HB	: Hadron silindiri
HE	: Hadron Son kapak (H adron E ndcap)
HF	: İleri Hadron (H adron F orward)
HKAL	: Hadronik kalorimetre
HLT	: Yüksek Seviye Olay Tetikleyicisi
HO	: Hadron dış silindiri
HPDs	: Hibrit fotodiyotlar
ISR	: Başlangıç durum ışıması
kHz	: kiloHertz
K.M.	: Kütle Merkezi
L1	: Birinci Seviye Olay Tetikleyicisi
LEP	: Büyük Elektron Pozitron Çarpıştırıcısı (L arge E lectron P ositron)
BHÇ	: Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (L arge H adron C ollider)

LHCb	: LHC Güzellik (LHC Beauty)
LHCf	: LHC İleri (LHC Forward)
LS	: Uzun kaplama
LSP	: En hafif süpersimetrik parçacık
MC	: Monte Carlo
MET	: Kayıp enine momentum
MeV	: Megaelektronvolt
MHz	: Megahertz
MoEDAL	: BHC'de Monopol ve Exotics Dedektörü (The Monopole and Exotics Detector At the LHC)
MSSM	: Minimal Süpersimetrik Standart Model
PS	: Proton Sinkontronu
PSB	: Proton Sinkontron Yükseltici (Proton Sinkontron Booster)
RPC	: Dirençli Plaka Odaları (Resistive Plate Chambers)
SL	: Süper katman (Super Layer)
SPS	: Süper Proton Sinkontronu
SÜSİ	: Süpersimetri
TEC	: İzleyici Uç Kapağı (Tracker End Cap)
TeV	: Teraelektronvolt
TIB	: İzleyici merkezi silindir birimi (Tracker Inner Barrel)
TID	: İzleyici iç disk (Tracker Inner Disk)
TOB	: İzleyici dış silindir birimi (Tracker Outer Barrel)
TOTEM	: TOTAL Elastic and diffractive cross section Measurement
VPTS	: Vakum Fotoğraf Triyotları (Vacuum Photo TriodeS)
YETS	: Yıl sonu teknik durağı
WLS	: Dalga boyu kaydırıcı fiberler
QCD	: Kuantum Renk Dinamiği
P_T	: Enine momentum
MET	: Kayıp enine Momentum
M_{T2}	: Stransverse mass
σ	: sigma
s	: jet
j	: spin sayısı
B	: baryon sayısı

L	: lepton sayısı
p	: proton
l	: lepton
d	: aşağı
u	: yukarı
s	: acayip
c	: tılsımlı
b	: alt
t	: üst
e^-	: elektron
τ	: tau
μ	: müon
ν_e	: elektron nötrino
ν_μ	: müon notrino
ν_τ	: tau nötrino
g	: gluon
W^+, W^-	: W bozonu
Z^0	: Z bozonu
γ	: foton
g	: graviton
θ	: teta
η	: eta
Φ	: phi, azimut açısı
π	: pion
$\sim$	: tilda
λ	: Lamda, etkileşim uzunluğu

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

33 TeV’lik Kütle Merkezi Enerjisinde Slepton Sinyalinin Küçük Kütle Farkı Durumunda İncelenmesi

Fatma Betül GÜZELOĞLU

Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ali ÇELİK

Haziran, 2022

Temel parçacıkların ve onların birbiriyle olan etkileşmelerini açıklayan Standart Model, en başarılı kuramlardan biri olmasına rağmen tamamlanmış bir teori değildir. En büyük sorunlarından biri, karanlık madde için herhangi bir şey söyleyememesidir. Yani, evrendeki maddeyi oluşturan temel parçacıklar ve onların birbirleri ile etkileşimini sağlayan kuvvet taşıyıcıları arasında karanlık madde için herhangi bir aday yoktur.

Süpersimetri, standart modelin açıklayamadığı diğer bazı sorulara cevap vermekle beraber, R paritenin korunduğu minimal süpersimetrik modelde, en hafif süpersimetrik parçacık kendisinden daha hafif bir süpersimetrik parçacığa bozunamayacağı için karanlık maddeye adaydır. Şu ana kadar gerek Fermilab'daki Tevatron'da gerekse de CERN'deki Büyük Hadron Çarpıştırıcısı üzerindeki CMS ve ATLAS dedektörleri tarafından toplanan verilerde herhangi bir süpersimetri izine rastlanmamış ve bu araştırmalar süpersimetrik parçacıkların kütleleri üzerine limitler koymuştur. Yapılan çalışmalardan bazılarında renkli parçacıkların üretimine odaklanılmışken bazılarında ise chargino-neutralino, chargino-chargino veya slepton çifti üretimine odaklanılmıştır. Bu fenomenolojik çalışmada, 33 Teraelektron Voltluk kütle merkezi enerjisinde proton-proton çarpışmasında oluşan slepton sinyali; bir ISR jet, sleptonların bozunumundan gelen iki adet zıt işaretli lepton ve dedektörde herhangi bir iz bırakmadan kaçan LSP kaynaklı enine kayıp momentum olan son durumlarda incelendi. Slepton ile LSP arasındaki kütle farkının küçük olduğu durumları ele alıp, slepton sinyalini standart model ardaşanlarından ayırmak, sinyal ardaşan oranını artıran kinematik değişkenleri belirlemek ve optimize etmek bu çalışmanın başlıca hedefleri arasındadır. Çalışmanın sonucunda, kinematik parametreler ve optimum değerleri tespit edildi. Bu optimum değerler ışığında 100 fb^{-1} ışıklılığa tekabül eden bir data ile 33 TeV’lik K.M. enerjisinde slepton kütlelerinin 235 GeV, LSP’nin kütlelerinin 230 GeV olduğu bir slepton sinyalinin 7.4σ sinyal anlamlılık ile gözlenebileceği gösterildi.

Anahtar Kelimeler: SÜSİ, SM, Slepton, BHÇ, 33 TeV

Hazırlanan bu Yüksek Lisans tezi Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından 0669-YL-20 proje numarası ile desteklenmiştir.

SUMMARY

M. Sc. Thesis

Probing Slepton Signal at Center of Mass Energy of 33 TeV in the Compressed Mass Spectra

Fatma Betül KALAĞAN

**Burdur Mehmet Akif Ersoy University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Physics**

Supervisor: Assist. Prof. Ali ÇELİK

June, 2022

Although Standard Model, explaining elementary particles and their interactions, is one of the most successful theories, it is not a complete theory. One of its greatest flaws is that it cannot explain the existence of dark matter. In other words, there is no candidate for dark matter among the fundamental particles that make up the matter in the universe.

While supersymmetry answers some other questions that the standard model cannot explain, in the minimal supersymmetric model where R parity is preserved, the lightest supersymmetric particle is a candidate for dark matter. Thus far, no traces of supersymmetry have been detected in data collected at CERN's Large Hadron Collider or at Fermilab's Tevatron, and these studies have set limits on the masses of supersymmetric particles. In this phenomenological study, the slepton signal produced in the proton-proton collision at center of mass of 33 TeV is probed in a final state with an ISR jet, two opposite sign-leptons and missing transverse momentum. The main objectives of this study are to separate the slepton signal from the standard model backgrounds, by optimizing the kinematic variables that increase the signal background ratio in the compressed scenario. As a result of the study, kinematic parameters and their optimum values were determined. In the light of these optimum values, with a data corresponding to 100 fb^{-1} luminosity, we show that a slepton signal with a mass of 235 GeV and LSP with a mass of 230 GeV could be observed with a signal significance of 7.4σ .

Keywords: SUSY, SM, Slepton, LHC, 33 TeV

The present M.Sc. Thesis was supported by Burdur Mehmet Akif Ersoy University Scientific Research Council Under the Project number of 0669-YL-20

1. GİRİŞ

İnsanlık, tarihsel süreç içerisinde “Madde nelerden oluşur?”, “Çevremizde gördüğümüz maddelerin yapıtaşları nelerdir?” gibi sorulara cevap bulmaya çalışmıştır. Modern çağın getirdiği teknolojik gelişmeler sonucunda gözlem yapabilme yeteneğinin artması ile bu soru “Madde en küçük ölçekte nelerden oluşur?” veya “Maddeyi oluşturan en küçük ölçekteki bu parçacıklar birbirleriyle nasıl etkileşir?” gibi sorulara dönüşmüştür. Geçmişten günümüze üzerinde merakla düşünülen hem deneysel hem de teorik çalışmalarla cevap bulan ve bulmayı bekleyen bu soruların cevaplarını elde etmek Yüksek Enerji Fiziğinin ya da bir diğer adıyla Parçacık Fiziğinin temel uğraşıdır. Parçacık Fiziğinin 1897 yılında J.J. Thomson’un elektronu keşfetmesi ile temel parçacık fiziği başlamış ve soruların cevapları için günümüze kadar çalışmalar devam etmiştir.

Günümüzde parçacıkların keşfi ve incelenmesi için çarpıştırıcılar kullanılmaktadır. İnşa edilen en büyük çarpıştırıcı ise Fransa İsviçre sınırında bulunan Cenevre kentinin yaklaşık 100 mt altında bulunan 27 km çevreye sahip dairesel bir hızlandırıcı olan BHÇ (LHC-Büyük Hadron Çarpıştırıcısı)’dır. Bu çarpıştırıcıda, çarpıştırıcının isminden de anlaşılacağı üzere bir hadron olan protonlar çarpıştırılır. Bu çarpışmalarla protonların alt parçacıkları olan kuarklar etkileşime girer ve yeni parçacıklar oluşur. Oluşan bu yeni parçacıklar, toplam elektrik yükünün, momentumun korunması gibi bazı kurallar çerçevesinde kendisinden daha hafif olan diğer parçacıklara bozunur. Bu sayede yeni parçacıklar keşfedilebilir, bu parçacıkların kütlesi, elektrik yükü, momentumu gibi özellikleri incelenebilir hale gelir. Parçacıkların çarpışma enerjileri artırıldıkça daha ağır olan parçacıklar keşfedilebilir. Geçmişten günümüze bu çalışmalar sayesinde birçok çarpıştırıcı tarafından birçok parçacık keşfedilmiş, teorik olarak var olduğu düşünülen bazı parçacıkların kütleleri üzerine ise alt limitler konulmuştur. Çarpışma enerjileri artırıldıkça daha ağır olan bu parçacıklar da keşfedilebileceği öngörülmektedir.

Bu tez, bölüm 2’de Standart Modeli ve süpersimetriyi, sonraki bölümde BHÇ’yi, BHÇ dedektörü üzerindeki 7 ayrı deney düzeneğini ve bu deney düzeneklerinden biri olan CMS dedektörünü ayrıntılı olarak ele alacak şekilde hazırlanmıştır. Çalışma fenomenolojik bir çalışma olduğundan, dataları üretmek ve bu dataların analizi için kullanılan simülasyon araçları Bölüm 4’te ele alınmıştır. Üretilen sinyal, bu sinyalin neden seçildiğini anlatan motivasyon ve bu sinyali taklit eden standart model süreçleri ise Bölüm 5’de

detaylandırılmıştır. Bölüm 6’da süpersimetri araştırmalarının literatürü bulunmaktadır. Bölüm 7’ve Bölüm 8’de ise sırasıyla analiz ve sonuç kısımları bulunmaktadır.



2. STANDART MODEL ve SÜPERSİMETRİ

2.1. Standart Model

Temel parçacıkları ve onların birbiri ile olan etkileşimini açıklayan Standart Model en başarılı kuramlardan biri olmakla beraber, bu başarısını 2012 yılında ATLAS ve CMS deneyleri tarafından gözlemlenen Higgs bozonu ile de sürdürmüştür. (CMS Collaboration, 2012; K. G. Begeman, A. H. Broeils, 2014)

Görünür evrendeki tüm maddeler fermiyonlardan yani kuarklardan ve leptonlardan, kuvvet taşıyıcı olup fermiyonların birbirleri ile olan etkileşimlerine aracılık eden bozonlardan oluşur. Bu parçacıklar ve aralarındaki etkileşim Standart Model (SM) tarafından açıklanır. SM bu yönüyle, açıklayamadığı sorunlara rağmen deneylerde doğruluğu yüksek oranda kanıtlanan en güçlü kuramlardan biridir.

Görünür maddeyi oluşturan fermiyonların spin sayıları buçukludur ve Fermi-Dirac istatistiğine uyarlar. Pauli dışarlama ilkesi dolayısıyla iki fermiyon aynı anda aynı kuantum durumunda bulunamazlar. Her bir fermiyonun bir anti parçacığı vardır ve parçacıklar ile bu anti-parçacıklar arasında kütleleri bakımından bir fark olmamasına rağmen elektrik yükleri ise birbirinin zıt işaretlisidir (örneğin: parçacık -1 yüklü ise anti-parçacığının +1 yüklü olması gibi).

Çizelge 2.1. Leptonlar, aileleri, çeşnileri, yükleri ve kütleleri

Aile	Leptonlar (spin $\frac{1}{2}$)		Kütle (MeV/c ²)
	Çeşni	Yük	
1. Aile	Elektron (e^-)	-1	0.510999
	Elektron nötrino (ν_e)	0	0
2. Aile	Müon (μ)	-1	105.659
	Müon Nötrino (ν_μ)	0	0
3. Aile	Tau (τ)	-1	1776.99
	Tau nötrino (ν_τ)	0	0

Leptonlar ve kuarklar üç aileden meydana gelmektedir. Çizelge 2.1. de lepton ailesinin üyeleri listelenmiştir. Görüldüğü üzere birinci aile elektron (e^-), elektron nötrino (ν_e), ikinci aile müon (μ), müon nötrino (ν_μ) ve üçüncü aile tau (τ), tau nötrino (ν_τ) dan oluşur. Bunlardan elektron müon ve tau'nun yükü -1 ve kütleleri var iken nötrinolar yüksüz ve kütleleri SM tarafından "0" olarak kabul edilir. Leptonlar, elektrik yükü taşıdıklarından ve elektromanyetik etkileşim ve zayıf etkileşime girebilmektedirler.

Çizelge 2.2. Kuarklar, aileleri, çeşnileri, yükleri ve kütleleri

Kuarklar (spin ½)			
Aile	Çeşni	Yük	Kütle (MeV/c²)
1. Aile	Aşağı (<i>d</i>)	-1/3	7
	Yukarı (<i>u</i>)	2/3	3
2. Aile	Acayip (<i>s</i>)	-1/3	120
	Tılsımlı (<i>c</i>)	2/3	1200
3. Aile	Alt (<i>b</i>)	-1/3	4300
	Üst (<i>t</i>)	2/3	174000

Fermiyon üst ailesinin birer üyesi olan kuarkların da spin sayıları buçukludur ve Çizelge 2.2.'de görüldüğü üzere leptonlara benzer şekilde üç aileden oluşur. Birinci aile aşağı (*d*) ve yukarı (*u*), ikinci aile acayip (*s*) ve tılsımlı (*c*), üçüncü aile ise alt (*b*) ve üst (*t*) kuarktan oluşur. Aşağı, acayip ve alt kuarkın yükleri -1/3 iken yukarı, tılsımlı ve üst kuarkın yükü 2/3' dür. Yine bu kuarkların anti-parçacıkları da sırasıyla birinci, ikinci ve üçüncü aileye aittirler. Kuantum renk dinamiğine göre (QCD) leptonlardan ayrı olarak tek başlarına serbest halde bulunamazlar. Elektrik yükü taşımalarına ek olarak bir de renk yükü taşırlar ve hadronları oluşturarak renksiz halde bulunabilirler. Bu sebeple kuarklar için elde edilen bilgiler hadronların kullanılmasıyla elde edilen bilgilerdir. Kuarklar, leptonlar gibi hem elektromanyetik hem de zayıf etkileşime girmekle beraber, taşıdıkları renk yükü itibarıyla güçlü etkileşime de girebilmektedir.

2.1.1. Temel Kuvvetler ve Bozonlar

Doğada dört temel kuvvet bulunur ve kuvvetlerin her birine bir parçacık aracılık eder. Bu aracı parçacıklara bozon denir. Bu kuvvetlerin her biri için bir kuram mevcuttur.

Çizelge 2.3. Temel kuvvetler, aracı bozonları, şiddetleri, yükleri ve kütleleri

Bozonlar (spin 1)					
Temel Kuvvetler	Şiddeti	Kuramı	Kuvvet Taşıyıcı Bozonları	Yükleri	Kütleleri (MeV/c²)
Güçlü	10	Renk dinamiği	Gluon (<i>g</i>)	0	0
Elektromanyetik	10 ⁻²	Elektrodinamik	Foton (<i>γ</i>)	0	0
Zayıf	10 ⁻¹³	Çeşni dinamiği	W ⁺ , W ⁻	+1, -1	80,420
			Z ⁰	0	91,190

Çizelge 2.3'de, doğada bulunan temel kuvvetler ve kuramları yanı sıra birbirleri arasında kıyaslama yapabilmek adına şiddetleri listelenmiştir. Buradaki şiddet değerleri temsildir. Kuark- kuark, kuark-gluon veya gluon-gluon arasındaki güçlü etkileşime aracılık

eden parçacık gluon (g) dur. $SU(3)$ simetri grubu ile gösterilen kuvvetin menzili 1.5 fm kadardır. Bağlanma gücü ise $O(1)$ mertebesinde gösterilir. Güçlü kuvveti diğer kuvvetlerden ayıran bir özellik ise parçacıklar arasındaki mesafe arttıkça kuvvet şiddetinin de artmasıdır. Bu iki kuarkın birbirinden uzaklaştıkça daha kuvvetli bir çekimle bir araya geldiklerini gösterir.

Elektromanyetik kuvvet atomu bir arada tutan kuvvettir. Göreli olarak şiddeti 10^{-2} olan elektromanyetik kuvvetin kuramı elektrodinamiktir. Bu kuvvetin aracı parçacığı ise foton (γ) dur. Elektrik yükü taşıyan her parçacık elektromanyetik etkileşime girer yani nötrino hariç herhangi bir lepton bu etkileşime girebilir. Nötrino yüksüz olduğu için elektromanyetik kuvvetten etkilenmez. Elektromanyetik kuvvet sonsuz menzile sahiptir ve simetri grubu $U(1)$ altında tanımlanır.

Radyoaktif bozunumlardan sorumlu olan kuvvet ise zayıf kuvvettir ve 10^{-13} şiddetinde olan bu kuvvetin kuramı çeşni dinamiğidir. Menzili 10^{-3} fm kadardır ve simetri grubu ise $SU(2)$ olarak tanımlanır. Yüklü olan W^+ , W^- bozonları ve nötr olan Z^0 bozonunun eşlik ettiği zayıf kuvvetten kuarklar ve leptonlar etkilenir. Zayıf kuvvet içeriğinde çok sayıda proton ve nötron bulunduran atom çekirdeğinin kararlılığını sağlamada önemli bir rol oynar.

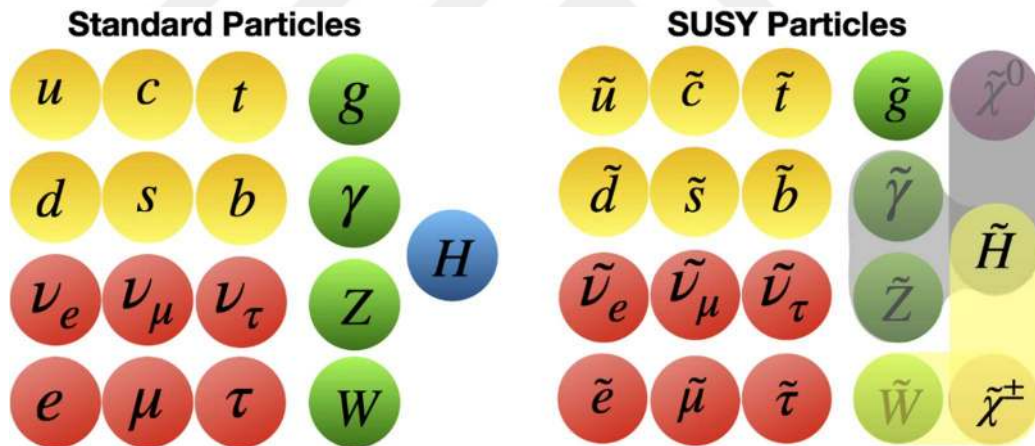
Standard modelin elektromanyetik ve zayıf kuvveti, Glashow-Salam-Weinberg (GSW) (Glashow, 1961; Salam, 1968; Weinberg, 1967) tarafından tek bir kuvvet (elektrozayıf) olarak kuramlaştırılmıştır. GWS modeli, zayıf ve elektromanyetik etkileşimleri elektrozayıf kuvvetinin düşük enerjilerde farklı görünüşleri olarak açıklar. Zayıf ve elektromanyetik kuvvetler tek bir kuvvet altında toplandığından, dört temel kuvvet üçe düşer.

Standart modeldeki son parçacık ise ‘fermionlara kütle kazandıran parçacık’ olarak ileri sürülen, 0 spinli Higgs (H) bozonudur. ATLAS ve CMS deneylerinde, 2012 yılında kütlesi 125 GeV mertebesinde olan yeni bir parçacık tespit edilmiştir. Bu parçacık teorik olarak bilinen Higgs bozonundan başkası değildir ve diğer bozonların aksine aracı bir parçacık değil sadece bozondur.

Sonuç olarak standart modelde her bir kuarkın bir anti parçacığı ve her bir parçacığın 3 çeşnisi-renk yükü olduğundan 36 kuark, anti parçacıklarıyla birlikte 12 lepton, foton, gluon, $W^\pm$ ve Z^0 bozonları ve son olarak bir adet Higgs bozonu ile toplamda 61 parçacık bulunur.

2.2. Süpersimetri

Süpersimetri'ye göre SM'de var olan her bir parçacığa karşılık bir süperez bulunur. Standart modelde fermiyonların spini buçuklu, bozonların spini ise tam sayılı olarak ifade edilmiştir. Süpersimetride parçacıkların kütleleri ile birlikte spin kuantum sayıları ise her bir grup için $-1/2$ değişiklik gösterir. Bu sebeple bozonik karakterli bir alana fermiyonik bir süperez alan, fermiyonik karakterli bir alana ise bozonik karakterli bir süperez alan getirilmiş olur. Yani süpersimetride, standart modeldeki her fermiyona karşı bir bozon ve her bozona karşı bir fermiyon bulunmaktadır. Şekil 2.1'de gösterildiği üzere Süpersimetrik parçacıklar SM parçacıklarından farklı olarak üzerlerindeki tilda ($\sim$) ile sembolize edilirler. Standart modeldeki her bir parçacığın süpersimetrideki karşılığı ise şöyledir; $(1/2)$ spinli kuarklara karşılık süpersimetride (0) spinli skuark, $(1/2)$ spinli leptonlara karşılık (0) spinli slepton bulunurken standart modeldeki tam sayı spinli W, Z, foton ve gluon bozonlarına ise süpersimetride $1/2$ spinli gaugino (wino, zino, fotino ve gulino) karşılık gelir. Elektro-zayıf gauginolarla Higgsinoların karışımıyla chargino ve nötralinolar oluşur.

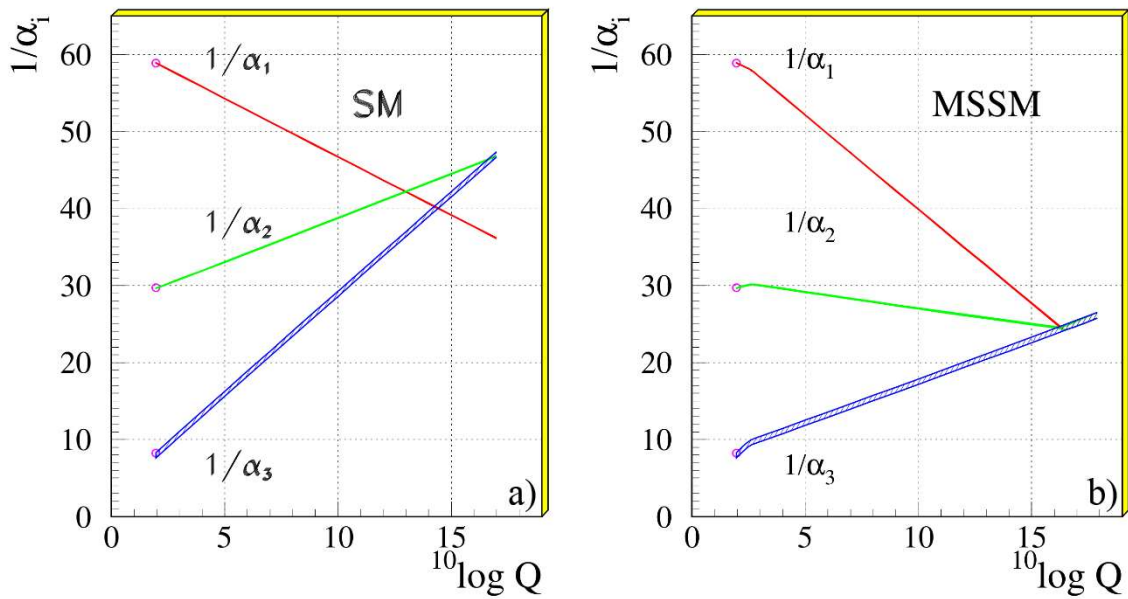


Şekil 2.1. SM parçacıkları ve SÜSİ parçacıkları

Süpersimetri birçok yeni parçacık öngörüyor fakat şimdiye kadar, CMS ve ATLAS deneylerinde farklı gruplar tarafından farklı yöntemlerle yapılan çarpıştırıcı deneylerinde bu parçacıklar gözlenememiştir. 2016 yılında, CMS deneyinde, 13 TeV'lik enerjide gerçekleştirilen p-p çarpışmasının sonucuna göre 35.9 fb^{-1} ışıklılığa karşılık gelecek data toplanmıştır. Bu sonuca göre %95 güven seviyesinde, farklı üretim süreçlerine bağlı olarak skuarkların direkt olarak üretildiği durum için kütleleri üzerine konulan limit 1 TeV'den ve gluno kütlesi üzerine konulan limit 2 TeV'den fazladır (Bonilla Castro, 2019; CMS Collaboration, 2022).

SM deneysel süreçlerden başarıyla geçmiş bir model olsa da açıklık getiremediği sorular dolayısıyla tam bir teori değildir. Bunlardan biri standart model içerisinde karanlık maddeden ve bileşiminden bahsedilmiyor olmasıdır. Süpersimetri ise Standart Model'in aksine karanlık maddeye aday bir parçacık ileri sürer. Standart Model'in parametre sayısını en az tutacak şekilde süpersimetrike edilmiş hali olan MSSM'de, (Grees vd., 2004) R-Paritesinin korunması durumunda Nötralino1($\tilde{\chi}_1^0$) en hafif SÜSİ parçacığı olduğu için ve herhangi bir SÜSİ veya SM parçacığına bozunamayacağından karanlık madde için adaydır. Dedektörde tespit edilemeyen $\tilde{\chi}_1^0$ kayıp enerji olarak kaydedilir. SM ötesi fizik araştırmalarında, yüksek miktarda kayıp enerji içeren son durumlar bizi SM ötesi parçacıklara götüreceğinden özellikle karanlık madde araştırmaları için önemlidir.

Enerji mertebesi yükseldikçe-çarpışma enerjisi artırıldıkça SM'nin başarısını devam ettiremeyeceği düşünülmektedir ve bu doğrultuda SM'nin daha yüksek enerjilere karşılık gelecek olan tek ve temel teoremin düşük enerjilerdeki karşılığı olduğu düşünülmektedir.



Şekil 2.2. a) SM'de çiftlenim sabitlerinin Q (GeV) enerjisinde değişimleri. b) MSSM'de çiftlenim sabitlerinin Q (GeV) enerjisinde değişimleri

Şekil 2.2.'deki (Amaldi vd., 1991) a_1 , a_2 ve a_3 sırasıyla elektromanyetik, zayıf ve güçlü etkileşimin ayar çiftlenim sabitlerini temsil eder ve Şekil 2.2.'nin sol grafiğinde görüldüğü gibi standart model, üç kuvvetin (güçlü, zayıf, elektromanyetik) çiftlenim sabitlerinin belli bir mertebede birleşebileceğini öngörmez. Standart modele göre bu durum

mümkün değildir. Şekil 2.2.'nin sağındaki grafikte ise süpersimetri çiftlenim sabitlerinin 10^{16} GeV mertebesinde birleştiğini öngörür yani çiftlenim sabitlerinin fonksiyonel şekillenimi dolayısıyla bu birleşim tahmin edilebilir. Bu üç etkileşimin 10^{16} GeV mertebesinde birleşiyor olması GUT'u ifade eder ve bu da bize aslında bu üç kuvvetin, yüksek enerjilerdeki tek bir kuvvetin düşük enerjilerdeki karşılığı olduğunu söyler.



3. BHÇ VE CMS DEDEKTÖRÜ

3.1. BHÇ (Büyük Hadron Çarpıştırıcısı)

Günümüzdeki en büyük parçacık fiziği laboratuvarı, Fransa ve İsviçre sınırında bulunan Cenevre kenti civarındaki CERN'dir. CERN de yer alan BHÇ dairesel şekilde, çevresi 27 km ve yerin 100 metre altında inşa edilmiştir. BHÇ'nin dairesel bir şekilde inşa edilmesinin sebebi ise proton demetlerinin birden çok kez çevrim yaptırılıp ışık hızına yakın bir hıza çıkartılmasıdır ve bu sebeple dairesel inşa edilme durumu doğrusala göre daha az maliyetli olmuştur. CERN'deki BHÇ eski LEP çarpıştırıcısının tünellerine inşa edilmiştir. BHÇ'nin temel hedefi parçacıkları ulaşılabilen en yüksek hızlara çıkartarak yeni fizik keşiflerini sağlamaktır. BHÇ'nin tasarlanması, inşa edilmesi, test edilmesi gibi süreçleri yaklaşık 20 yıl sürmüştür. İlk kez 2009 yılının kasım ayında, 450 GeV'lik proton demetleri, 900 GeV'lik kütle merkezi. enerjisinde çarpıştırıldı ve kısa bir süre sonra her bir demetin enerjisi 1.18 TeV'ye yükseltildi. 2010 yılında proton demetlerine 3.5 TeV enerji verilerek 7 TeV kütle merkezi enerjisinde çarpışma gerçekleştirilmiştir. 2012 yılında enerjisi 8 TeV'lik enerjiye çıkılarak deneyler devam etti. Daha sonra 2015 yılına kadar BHÇ'yi iyileştirme çalışmaları yapıldı ve 2015 yılı Haziran ayında, proton demetleri enerjisi 6.5 TeV'e çıkarılarak 13 TeV'lik çarpışma enerjisinde toplamda 147 fb^{-1} ışıklılığa karşılık gelecek miktarda data toplanmıştır (Wenninger, 2018). BHÇ'de proton demetlerini hızlandırmak için elektrik alandan faydalanılırken, dairesel yörünge içerisinde tutabilmek için manyetik alandan faydalanılır. Bu manyetik alan 1232 adet 8.33 T'lik süper iletken mıknatıslar ile sağlanır. BHÇ'de elektronun kullanılmama sebebi ise, sinkotron ışıması denilen, manyetik alanda hareket eden yüklü parçacığın foton yayımlayarak kinetik enerjisinin bir kısmını kaybetmesi olayıdır. Fakat proton elektrona göre çok daha ağır bir parçacık olduğundan kaybettiği kinetik enerji çok daha az olacaktır. Bu sebeple elektron için doğrusal hızlandırıcılar tercih edilirken BHÇ gibi dairesel hızlandırıcılarda hadron sınıfına ait olan proton tercih edilir. Çember şeklindeki tüpler içerisinde olan proton demetleri birbirlerine zıt yönde hızlandırılarak kafa kafaya çarpıştırılır. Her bir yönde 2808 proton demeti oluşturulur ve her bir demette 10^{11} proton bulunur. Işık hızına yakın bir hıza ulaştırılarak çarpıştırılan bu proton demetleri ile 25 ns de ortalama 20 kez proton-proton çarpışması gerçekleşir ki bu da saniyede 800 milyon adet çarpışma olması demektir. Bu çarpışmalar sonucunda çok sayıda yeni parçacık oluşmaktadır ve bu parçacıkların tespiti için birçok alt dedektör sistemi vardır.

BHÇ çemberi üzerinde dört büyük genel maksat dedektörü vardır. Bunlar; ATLAS, CMS, ALICE ve LHCb'dir. Diğer üç küçük dedektör ise TOTEM, LHCf, MoEDAL'dir ve toplamda yedi detektör vardır.

ATLAS: A Toroidal LHC ApparatuS.

CMS: The Compact Muon Solenoid. CMS ATLAS ile aynı hedefe hizmet eder fakat dizayları farklıdır.

ALICE: A Large Ion Collider Experiment, ağır iyon ve parton plazması üzerinde çalışmalar yapılır.

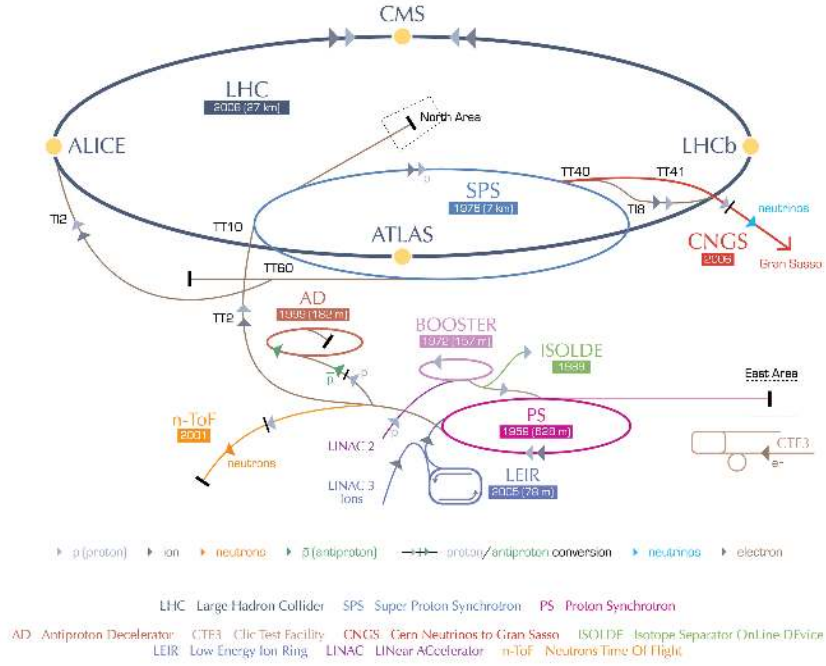
LHCb: LHC Beauty, zayıf ve b-kuark üzerinde çalışmalar yapılır.

TOTEM: TOTAl Elastic and diffractive cross section Measurement, hassas olarak tesir kesiti ölçümü yapar. CMS'e yakın bir noktada bulunur.

LHCf: LHC Forward, p-p çarpışmalarının küçük açılarda gerçekleşmiş olanlarını ve kozmik ışınları inceler. ATLAS'a yakın konumlandırılmıştır.

MoEDAL: The Monopole and Exotics Detector At the LHC, tek kutup ve egzotik parçacık detektörü.

CERN's accelerator complex



European Organization for Nuclear Research | Organisation européenne pour la recherche nucléaire

© CERN 2008

Şekil 3.1. CERN hızlandırıcı kompleksi

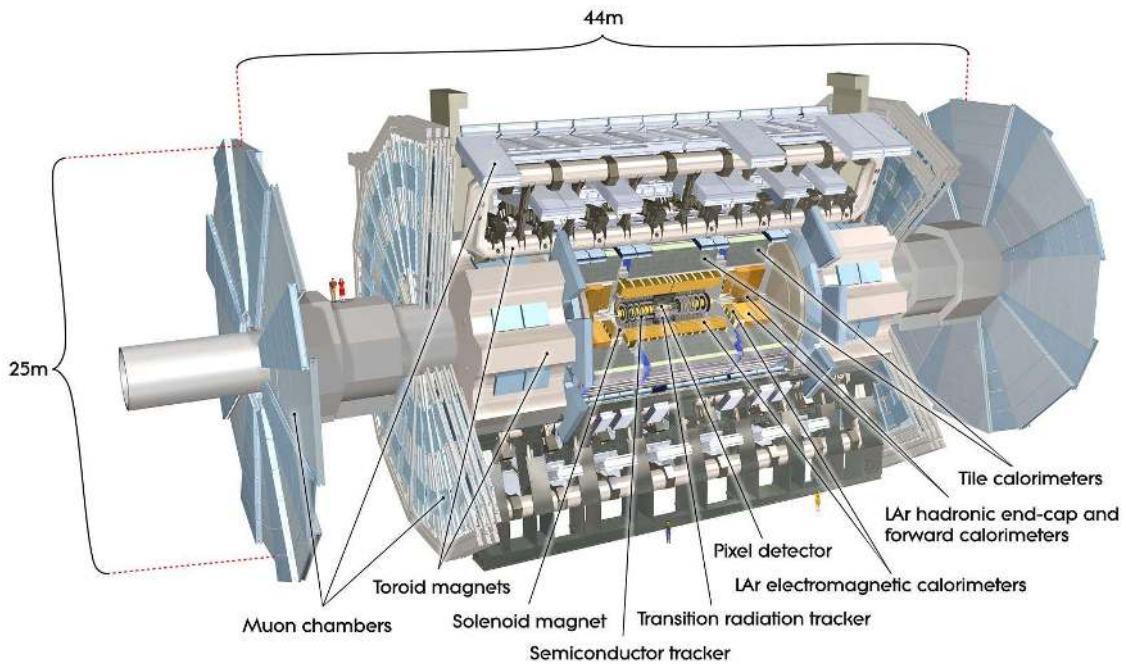
Şekil 3.1' de (Lefèvre, 2008). CERN hızlandırıcı kompleksinin şematik gösterimi verilmiştir. Hidrojen atomundan elde edilen protonlar önce Linac'da 50 MeV enerjiye yükseltilir. Buradan PSB'ye aktarılaraq 1.4 GeV' lik enerji kazandırılır. Daha sonra PSB'den PS'ye aktarılır ve proton demetlerinin enerjileri 26 GeV'e yükseltilir. Son olarak BHÇ'ye enjekte edilmeden önceki son durak olan SPS'de 450 GeV' lik enerji kazanırlar ve BHÇ'ye enjekte edilirler. BHÇ'de hedeflenen enerjiye ulaşan proton demetleri, ayrı tünellerde ve zıt yönde, ışık hızına yakın bir hıza çıkartılarak çarpışma noktalarında kafa kafaya çarpıştırılır.

3.1.1. ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS, Toroid BHÇ Cihazı)

Genel maksatlı bir detektör olan ATLAS; uzayın boyutlarını, kara delikleri, kütlelin kaynağını, karanlık maddeyi ve maddenin enerjisini araştırmak için şimdiye kadar yapılmış en büyük hacimli detektördür. Şekil 3.2.'de (ATLAS Collaboration, 2008)görüldüğü gibi boyu 44m, çapı 25m'dir. Silindirik bir şekli vardır. ATLAS detektörünün ağırlığı 7.000 tondur, ki bu haliyle yaklaşık Eyfel Kulesinin ağırlığına tekabül etmektedir. BHÇ'nin toroid yapıda detektörlerinden biri olan ATLAS'ın çok katmanlı bir yapısı vardır. Bu katmanlardan biri de çarpışma noktasının etrafına eş merkezli olarak sarılmış, halka biçimli çok büyük

mıknatısıdır. Mıknatıs sistemi 25m uzunluğunda 8 adet süper iletken mıknatıs bobinden meydana gelir. Bu büyük mıknatıs sistemi yüklü parçacıkları saptırarak parçacıkların momentumlarının hassas bir şekilde tespit edilmesini sağlar.

BHÇ tüneline son olarak ışık hızının %99,999999'una kadar ulaşan 6.5 TeV'lik enerjiye sahip proton demetleri çarpışma noktalarından biri olan ATLAS dedektörünün merkezinde çarpıştırılır. Çarpışma sonucunda oluşan yeni parçacıkların alt dedektörlerde bıraktıkları izlerden faydalanarak, algoritmalar yardımıyla yeniden yapılandırılması gerçekleşir.



Şekil 3.2. ATLAS dedektörünün genel görünümü.

3.2. CMS

3.2.1. Genel Bakış

BHÇ tüneli üzerinde bulunan ikinci en büyük dedektör olan ve çarpışma noktalarından biri olan Point 5 (P5)'e yerleştirilen CMS dedektörü (Compact Muon Selenoidi), Fransa'nın Cessy köyünde, yerin 100 m kadar altındadır. Dedektör, BHÇ borusunun etrafına silindirik bir şekilde inşa edilmiştir. CMS dedektörünün boyu 21 m, yüksekliği 15 m'dir ve toplamda 14000 tonluk ağırlığı vardır. ATLAS dedektörü ile karşılaştırıldığında CMS daha kompakt bir yapıya sahiptir.

CMS DETECTOR

Total weight : 14,000 tonnes
Overall diameter : 15.0 m
Overall length : 28.7 m
Magnetic field : 3.8 T

STEEL RETURN YOKE
12,500 tonnes

SILICON TRACKERS
Pixel ($100 \times 150 \mu\text{m}^2$) $\sim 1 \text{ m}^2$ $\sim 66\text{M}$ channels
Microstrips ($80\text{--}180 \mu\text{m}$) $\sim 200 \text{ m}^2$ $\sim 9.6\text{M}$ channels

SUPERCONDUCTING SOLENOID
Niobium titanium coil carrying $\sim 18,000 \text{ A}$

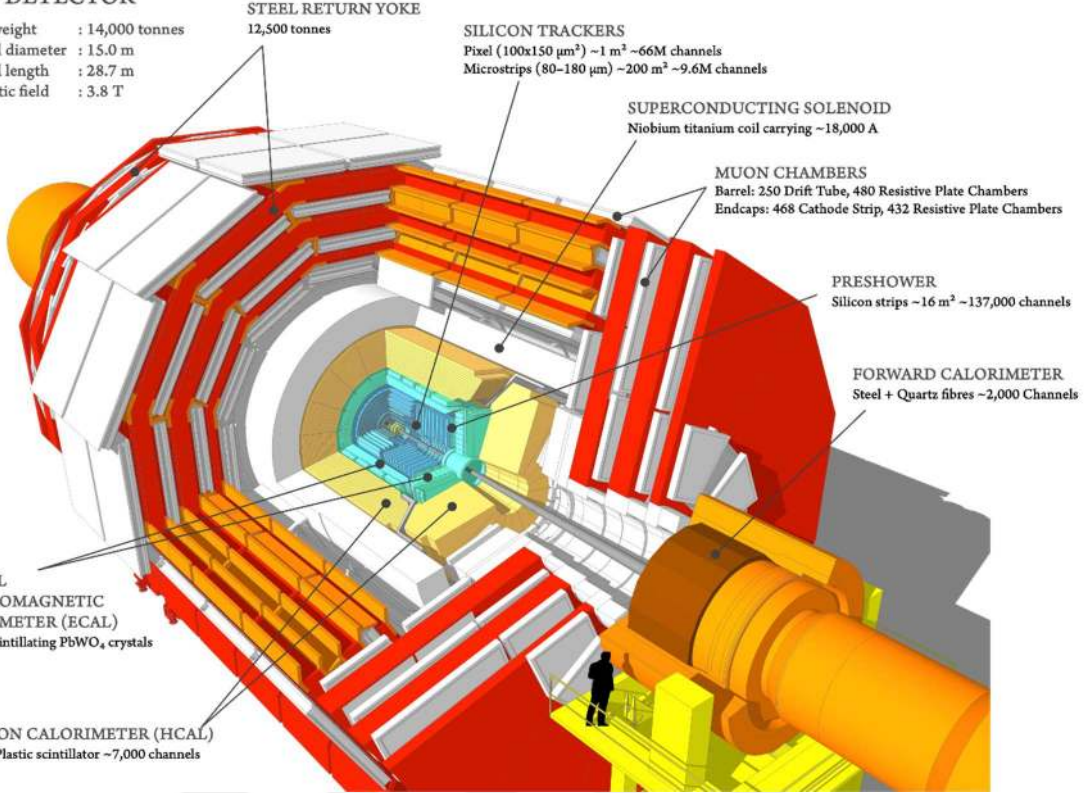
MUON CHAMBERS
Barrel: 250 Drift Tube, 480 Resistive Plate Chambers
Endcaps: 468 Cathode Strip, 432 Resistive Plate Chambers

PRESHOWER
Silicon strips $\sim 16 \text{ m}^2$ $\sim 137,000$ channels

FORWARD CALORIMETER
Steel + Quartz fibres $\sim 2,000$ Channels

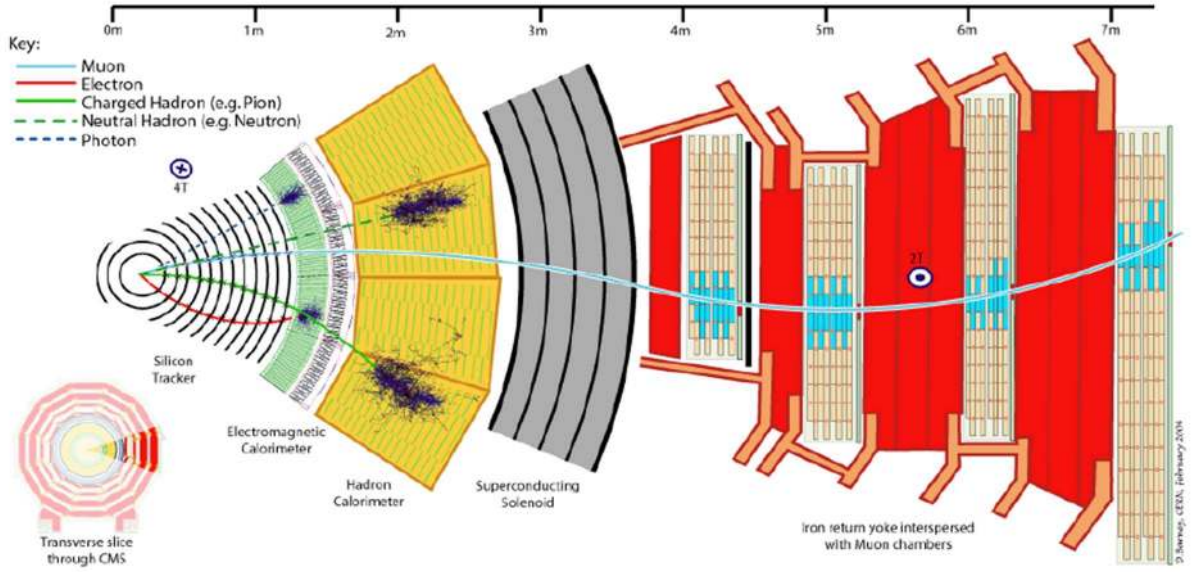
CRYSTAL
ELECTROMAGNETIC
CALORIMETER (ECAL)
 $\sim 76,000$ scintillating PbWO_4 crystals

HADRON CALORIMETER (HCAL)
Brass + Plastic scintillator $\sim 7,000$ channels



Şekil 3.3. CMS detektörünün genel görünümü.

Şekil 3.3 'de (Sakuma ve McCauley, 2014) görüldüğü gibi CMS genel maksatlı bir dedektör olduğundan katmanlı bir yapıya sahiptir. En iç tabakadan dış tabakaya sırasıyla silikon iz takip edici, elektromanyetik kolorimetre (EKAL), hadronik kalorimetre (HKAL) ve muon kalorimetresi bulunur. Silikon iz takip edici, EKAL ve HKAL süper iletken solenoidin içinde bulunurken muon odaları solenoidin en dışında bulunur. CMS'deki her alt dedektör huzme etrafındaki silindirik fiçı kısmında ve huzmeye dik olan iki kapak kısmındadır (Wouters, 2009). Deneyin temel unsurlarından biri 3.8 T'lık homojen bir manyetik alan sağlayan süper iletken solenoid mıknatısıdır. Solenoidin dışında manyetik alan Steel Return Yoke tarafından sınırlandırılır. Bu kısım 2,536m genişliğinde ve 19.5 cm kalındığında 5 halkadan meydana gelir. Muon sisteminin birkaç bileşeni yoke'e gömülü haldedir ve hadron emici olarak kullanılır.

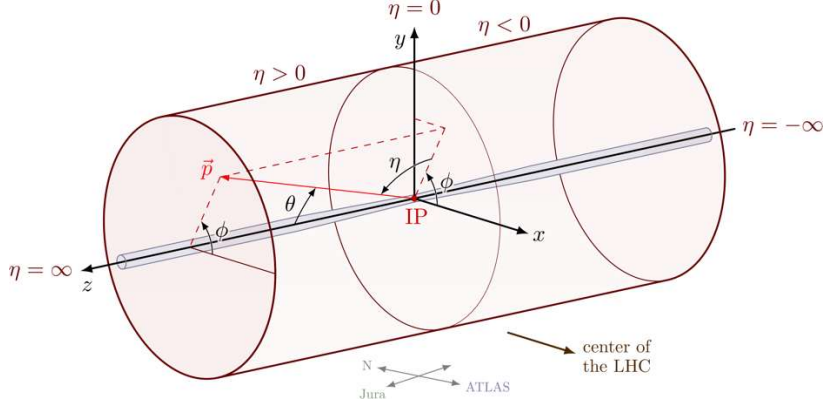


Şekil 3.4 CMS detektörünün enine kesiti. Bazı parçacıkların izledikleri tipik yollar.

Elektron, muon, hadronlar ve foton gibi yüksüz parçacıkların, CMS detektöründe takip ettikleri tipik yolları ve bıraktıkları izleri şekil 3.4’de (Davis, 2016) görüldüğü gibidir.

3.2.2. CMS Koordinat Sistemi

CMS deneyinde sağ eli koordinat sistemi kullanılmaktadır ve kullanılan koordinat sisteminin merkezi, dedektörün içindeki, nominal (planlanan, dizayn edilen) çarpışma noktasıdır. Koordinat sisteminin x-ekseni BHÇ’nin merkezine doğru yönelirken, y eksenini ise yukarıya doğrudur. Proton demetleri ise z eksenini boyunca hareket eder ve bu eksen x-y düzlemine diktir. Koordinatların silindirik gösterimi kullanılırken, radyal koordinatı (r) x-y düzleminde tanımlanır, azimut açısı olan ϕ , x-ekseninden ölçülür ve “Pseudorapidity” ya da “sözdehızlılık/sürat” olarak adlandırılan η değeri ise aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

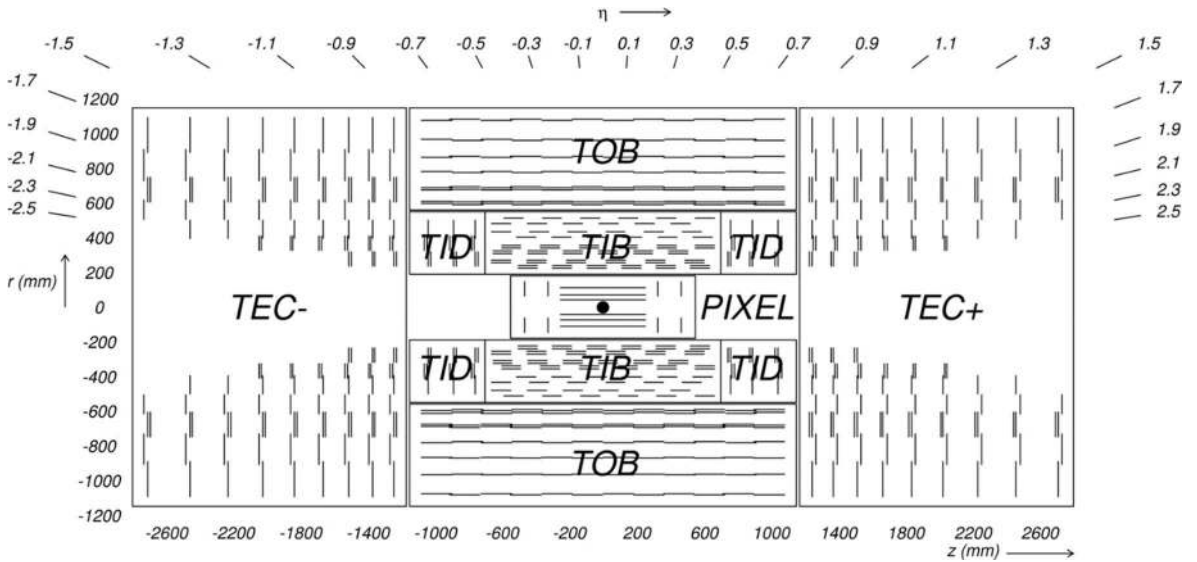


Şekil 3.5. CMS koordinat sistemi.

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

Parçacığın enine momentumu ise transverse düzlemde yani x-y düzleminde ölçülür ve şu şekilde tanımlanır: $P_T = \sqrt{p_x^2 + p_y^2}$. Sırasıyla p_x ve p_y parametreleri parçacığın momentumunun x-y bileşenlerine karşılık gelmektedir.

3.2.3. İzleyici



Şekil 3.6. CMS izleyicisinin şematik gösterimi.

CMS dedektörünün en iç kısmındaki izleyici sistemi, hadron çarpışmalarında üretilen yüklü parçacıkların bıraktıkları izi yani yörüngelerini ölçmek, birincil köşeleri (vortex) ve uzun ömürlü ağır parçacıkların bozunmalarından elde edilen ikincil köşeleri yeniden

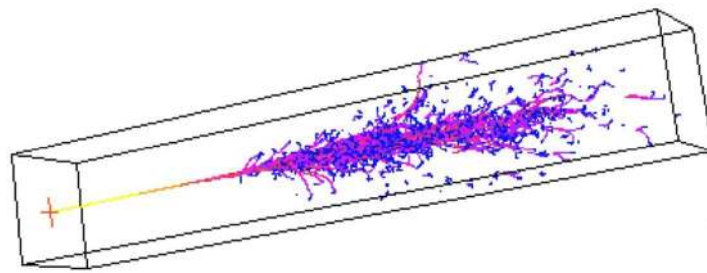
$$F = \frac{mv^2}{R} = qvB \Rightarrow mv = P = qBR \quad (3.2)$$

İzleyici dedektörünün enine kesiti Şekil 3.5 ve Şekil 3.6 ‘da verilmiştir (CMS Collaboration, 2008). Şekil 3.5’te görüldüğü gibi izleyici bir silindir bölgesinden ve iki son kapak bölgesinden meydana gelir. İzleyicinin ileri bölgesinde kapaklar TEC vardır. Bu kapakların her birinde 9 disk bulunur ve izleyicinin $120\text{ cm} < |z| < 280\text{ cm}$ ’lik bölümünü kaplar. TEC üzerindeki, silindir bölümünden itibaren ilk 2. ve 5. halkada stereo modüller bulunur. Merkezi silindir bölgesinin, iç kısmında TIB ve dış kısmında TOB bulunur. Silikon

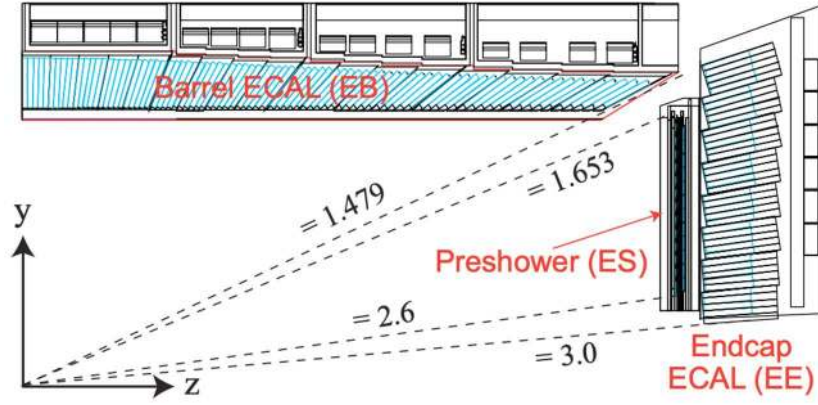
şerit dedektörlerinin bir kısmını kapsayan TIB kısmı 4 katmandan oluşur. TID ise TEC ve TIB arasındadır, her biri 3 disk içerir. İzleyicinin $|\eta| < 2.5$ olan bölgesinin bir kısmı silikon piksel ve silikon şerit dedektörlerinden meydana gelir. Piksel dedektörü 1440 adet modül içerir ve son kapak diskindeki iki modül katmanının yanı sıra, ışın demetlerinin izlediği borunun çevresinde 3 merkezi silindir katmanı halinde düzenlenmiştir. Piksellerin, olabilecek en yüksek köşe çözünürlüğünü sağlaması için r , ϕ ve z koordinatlarına göre yerleştirilmiştir. Merkezi silindirler 768 adet piksel modülünden oluşur. Pikseller enine koordinatta $10\ \mu\text{m}$ ve boyuna koordinatta $20\text{-}40\ \mu\text{m}$ mekansal çözünürlüğe ulaşır (CMS Collaboration, 2014). Piksel dedektörünü çevreleyen şerit dedektörünün 15148 adet modülü vardır. Bu modüller toplam 9,3 milyon şeritten meydana gelir. Modüller izleyiciyi iç ve dış olmak üzere iki bölüme ayırır ve modüller silindir bölgesinde 10 katman ve uç kapak bölgesinde ise 12 katman şeklinde düzenlenmiştir.

3.2.4. Elektromanyetik Kalorimetre(ECAL)

CMS dedektöründeki iki kalorimetreden biri olan elektromanyetik kalorimetre (CMS-TDR-004, 1997) elektronların ve fotonların enerjisini ölçer. İzleyici tarafından sağlanan bilgilerle birlikte parçacık tanımlanmasında önemli bir rol oynar. Silindir ve uç kapak olmak üzere iki kısımdan oluşan elektromanyetik kalorimetre (Şekil 3.9. (CMS Collaboration, 2006)) solenoidin içine konumlandırılmıştır ve izleyiciyi çevreler. Silindir kısmı 61200 kristalden meydana gelirken son kapak kısmı 15000 adet kurşun tungstanat (PbWO_4)-Şekil 3.8.(CMS Collaboration, 2006) kristalden meydana gelmiştir ve sırasıyla bu bölgeler $|\eta| < 1.5$ ve $|\eta| < 3.0$ 'e kadar kapsama sağlar.



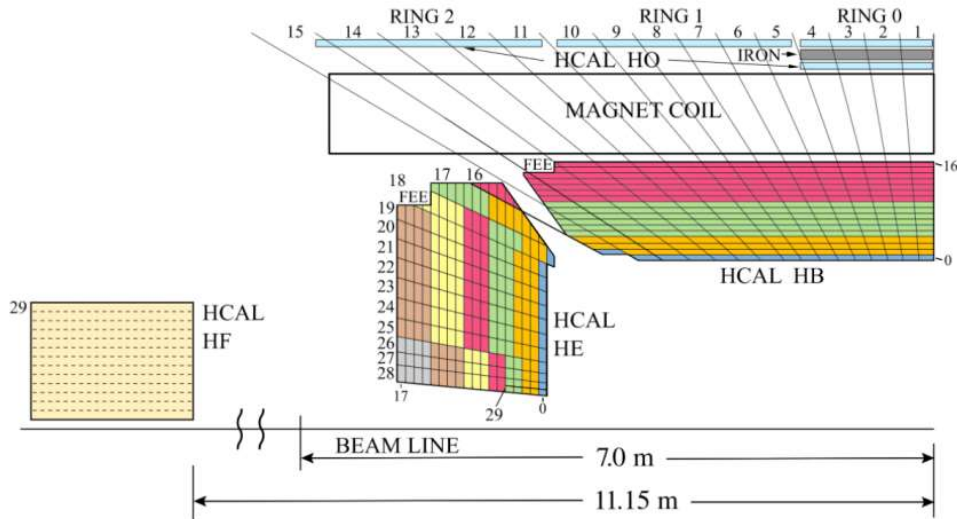
Şekil 3.8. Kurşun tungstat kristalle etkileşime girdikten sonra simüle edilmiş elektromanyetik duş.



Şekil 3.9. Elektromanyetik kalorimetrenin enine kesiti.

3.2.5. Hadronik Kalorimetre

CMS dedektöründeki ikinci kalorimetre olan hadronik kalorimetre pirinç soğurucu ve plastik sintilasyondan imal edilmiş ve radyasyon dayanıklılığı oldukça yüksektir (CMS-TDR-002, 1997). Quark ve gluolardan meydana gelen hadronların enerjisini ölçmekte kullanılan hadronik kalorimetre, şekil 3.7 de gösterildiği gibi dört kısımdan meydana gelir ve elektromanyetik kalorimetreyi tamamen çevreler. Bu dört kısım silindir, dış silindir, son kapak diskleri ve ileri kalorimetreler'dir (CMS-TDR-15, 2017).



Şekil 3.10. HB, HO ve HE dedektörlerinin dörtte biri için HCAL kule bölümlenmesi.

Hadron kalorimetresinin silindir kısmı $-1.4 < \eta < +1.4$ aralığını kapsar HB’de soğurucu için 15 adet pirinç plaka bulunur ve her biri 5 cm kalınlığındadır. Pirinç, manyetik olmadığı ve kısa bir etkileşim uzunluğuna, 6.5λ sahip olduğu için seçilmiştir. Bunun haricinde mekanik dayanıklılığı için 2 tane daha paslanmaz çelik plaka bulunur.

HCAL’in dış kısmı $|\eta| < 1.26$ aralığını kapsar. Bobinin dış vakum tankını kaplayan 10 mm kalınlığında sintilatörler bulunur. HO, HCAL’in derinliğini 10λ ’nın üzerine çıkarır. HE bünyesindeki kule sayısı toplam 2304’tür.

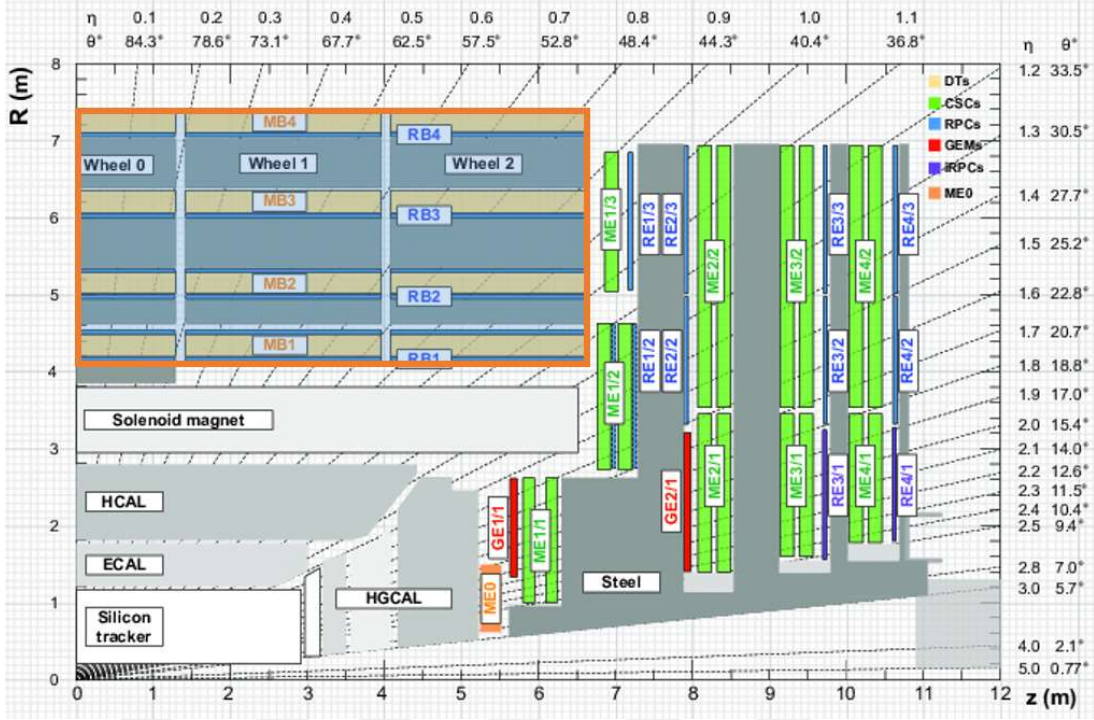
HCAL’in ileri kısmı η kapsamını genişletmek için eklenmiştir ve CMS dedektörünün kenarlarında bulunur. Kalorimetrenin $3.0 < |\eta| < 5.0$ aralığında bulunur. HF yüksek akı bölgesine fayda sağlayacak olan daha kısa ve daha dar jetler sağlar. Ön yüzü etkileşim noktasından 11,2 m uzaklıktadır ve soğurucunun derinliği 1,65 m’dir.

3.2.6. Süperiletken Magnet (Solenoid)

CMS deneyindeki (CMS-TDR-1, 1997) güçlü süperiletken solenoid üretilen en büyük süperiletken mıknatıs olmakla beraber 3.8 T’lik bir manyetik alan ile Dünya’nın manyetik alanından yaklaşık 100000 kat daha güçlüdür. Dedektörden geçen yüklü parçacıkların yörüngelerini büküp momentum ölçümlerini hassas bir şekilde elde etmek için kullanılır. Boyu 12.9 m ve iç çapı 6m’dir. İç bobinin geniş iç yarıçapı nedeniyle, izleyici ve diğer iki kalorimetrede (ECAL ve HCAL) içine sığabilir.

3.2.7. Müon Sistemi

Müon sistemi; CMS detektörünün ana bileşenidir ve müonların tespit edilip, konumlarının tanımlanması için tasarlanmıştır. Müonlar, diğer parçacıklara nazaran, meteryal içersine nüfuz edip çok az bir enerji kaybı ile yollarına devam edebildikleri için CMS dedektörünün en dış bölgesine yerleştirilmişlerdir. Şekil 3.9 ‘da (Fallavollita, 2020) görüldüğü üzere CMS dedektöründe 4 farklı müon dedektörü bulunmaktadır. Bunlar, hem silindir hemde son kapak kısmında bulunan RPC açık mavi, CSC son kapak kısmında ve yeşil renkli, sarı renk ile gösterilen DT silindir kısmında yer almaktadır. Ayrıca 2022 de tekrar çalışmaya hazır hale getirilen deneyde, CMS dedektörünün en fazla radyasyona maruz kalan bölgesine GEM dedektörleri yerleştirilmiştir. Bu dedektörler yapı ve çalışma bakımından yukarıdaki üç detektörden farklı olup yüksek radyasyon dayanımı ve 10 ns lik zaman çözünürlüğüne sahiptir.

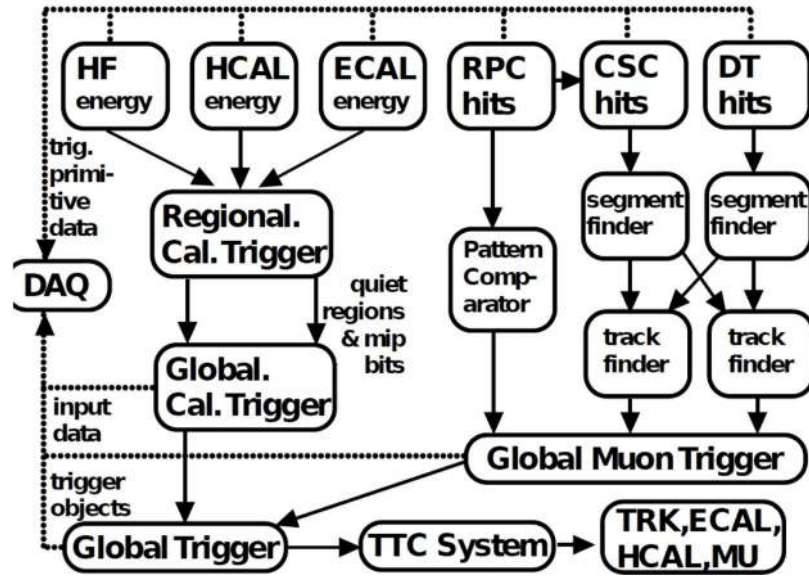


Şekil 3.11. CMS dedektöründeki Muon dedektör sistemin konumları.

3.2.8. Tetikleme Sistemi

3.2.8.1. CMS Tetikleme Sistemi

Tam kapasitede, 25 ns de bir çarpışma meydana gelen BHÇ’de, üretilen data miktarı çok büyüktür. Tüm çarpışma verilerini saklamak imkânsız olduğundan, oranı yönetilebilir bir düzeye indirmek için tetikleyiciler kullanılır. Bu tetikleyiciler iki kısma ayrılır: Özel tasarlanmış donanım tetikleyicilerinden oluşan L1 ve tamamen algoritma tabanlı HLT’dir. Şekil 3.12. (CMS Collaboration, 2017), CMS L1 tetikleyici sistemini göstermektedir. Her bir alt dedektörün tetikleyicisini geçen olaylar, Global tetikleyiciye gönderilir ve sonraki işlemler için karar, global tetikleyicide verilir. L1 tetikleyicisini geçen olaylar, HLT tetikleyicisi uygulandıktan sonra offline analizler için diske kaydedilir. Farklı analizler için farklı gruplar tarafından geliştirilmiş HLT tetikleyicileri mevcuttur.



Şekil 3.12. CMS L1 tetikleyici sistemi.

4. MONTE CARLO (MC)

Monte Carlo yöntemi, istatistiki teknikler kullanılarak bir deneyi veya olayı sayısal olarak taklit etmektir. Bu yöntem, özellikle 1930'lardan sonra hızla gelişmeye başlamıştır. Bu çalışmada kullanılan simülasyon araçları detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

4.1. Madgraph

MadGraph 5, MadGraph matris eleman üreticisinin Python programlama dilinde yazılmış yeni sürümüdür. MadGraph 5, tasarım, teorik, fenomenolojik ve simülasyon projelerinin geliştirilebildiği bir platformdur. Amaç, süreç için tüm Feynman diyagramlarının oluşturulması ve belirli bir faz uzay noktasında matris elemanını değerlendirmek için gerekli olan bilgisayar kodunun çıkartılmasıdır (Alwall vd., 2011). Parton duşu simülasyonu Madgraph içerisinde gerçekleştirilemediğinden, Pythia veya Herwig gibi programlar gereklidir.

4.2. Pythia

Pythia yüksek enerjili parçacık çarpışmalarının sonucunu Monte Carlo Yöntemi kullanılarak simüle eden bir programdır. Pythia kütüphanesi, yüksek enerjili etkileşimler, çok partonlu etkileşimler veya ilk ve son parton duşları gibi çarpışmaların çeşitli yönlerinin simülasyonu sağlayıp, $p-p$, $\mu^+\mu^-$ ve e^+e^- parçacık demetlerinin çarpışmalarını simüle edebilir (Christiansen, 2021). Önceki sürümleri Fortran'da yazılırken, Pythia, C++ ile tamamı yeniden yazılarak kullanıcılara sunulmuştur (Sjöstrand vd., 2007).

4.3. Delphes

Delphes genel bir çarpıştırıcı deneyinin hızlı bir dedektör simülasyonu için modüler bir çerçevedir. Delphes'in amacı, parçacıkların çarpıştırılması sonrası meydana gelen son durum parçacıklarının fenomenolojik çalışmalar için detektör ile etkileşimini simüle etmektir. Delphes hızlı simülasyonunun en son ki versiyonu Delphes 3.0 olmakla beraber, bu sürüm gerek CMS, ATLAS gerekse de uluslararası lineer çarpıştırıcı dedektörünü simüle edebilmektedir (de Favereau vd., 2013). Simülasyon, dedektör türüne bağlı olarak manyetik bir alana gömülü bir iz yayma sistemi, elektromanyetik ve hadron kalorimetreleri ve bir müon tanımlama sistemi içerir. Veri analizi için kullanılabilen fizik nesneleri daha sonra simüle edilecek olan detektör yanıtıyla yeniden oluşturulur.

4.4. Geant4

Nükleer fizik, hızlandırıcı fiziği, uzay ve sağlık bilimleri gibi pek çok alanda kullanımı olan GEANT4 (GEometry ANd Tracking) yazılımı ilk olarak yüksek enerji fiziği alanındaki deneysel çalışmalar için tasarlanmıştır. GEANT4; Monte Carlo tekniklerini kullanarak temel parçacıkların madde içindeki geçişini ve madde ile etkileşiminin simülasyonunu yapan bir ortamdır. GEANT4 C++ ile yazılmıştır (Geant4 Collaboration, 2020).

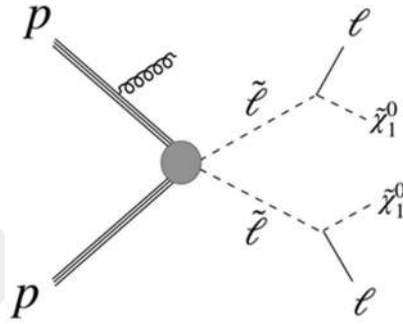
4.5. SUSY-HIT (SUspect-SdecaY-Hdecay-InTerface)

MSSM'deki süpersimetrik parçacıkların ilgili faz uzayında dallanma oranı, bozunma oranı gibi hesaplamaları için SUSY-HIT program paketi kullanılır. Paket sayesinde MSSM parçacık spekturumunun, tutarlı ve yüksek hassasiyet düzeyinde elde edilmesi sağlanır (Djouadi vd., 2006).

5. SİNYAL VE ARDALAN

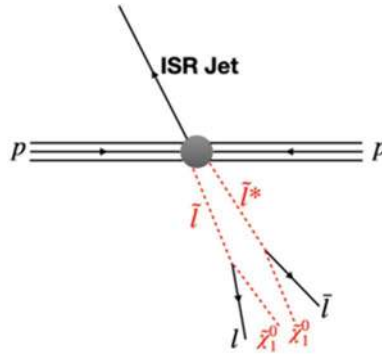
5.1. Sinyal

Analizde ele aldığımız olay, compressed scenario olarak adlandırılan süpersimetrik parçacıklar arasındaki kütle farkının küçük olduğu durumda 33 TeV’lik kütle merkezi enerjisinde proton-proton çarpışmasında Slepton çifti üretimidir. R-Paritesinin korunduğu MSSM baz alınarak, son durumda bir ISR Jet + iki lepton + MET’in bulunduğu sinyali fenomenolojik olarak inceliyoruz. Sinyalin üretim mekanizması Şekil 5.1.’de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Bir ISR jet ile birlikte Slepton üretimi.

Şekil 5.1’de görüldüğü gibi iki protonun çarpışmasından önce yüksek enine momentumlu bir parton yayımlanır.



Şekil 5.2. Yüksek enine momentumlu ISR jet ile, slepton çifti hemen hemen aynı doğrultuda fakat ISR jetin zıt yönünde hizalanır.

Momentum korunumundan dolayı, yayımlanan partonun momentumuna eşit olacak şekilde zıt yönde slepton çifti üretilir (Üretim mekanizması ayrıca Şekil 5.2.’de gösterilmiştir). Oluşan slepton çifti, kararsız olduğundan hızlı bir şekilde sleptonun selektron

(smuon) olma durumuna göre bir çift elektron (muon) ve LSP ye bozunacaktır. Son durum olayında elde edilecek fizik objeleri, aynı çeşniye sahip zıt işaretli bir çift lepton, LSP den meydana gelen kayıp enine momentum ve yüksek enine momentumlu bir ISR jet olacaktır ($pp \rightarrow \tilde{l}l_j \Rightarrow j + 2l + \tilde{\chi}_1^0$).

Çizelge 5.1. Sinyal için üretilen slepton ve nötralinoların kütle durumları.

$\Delta M = 5 \text{ GeV}$	$\tilde{l} = 235,245,250,260,270 \text{ GeV}$
	$\tilde{\chi}_1^0 = 230,240,245,255,265 \text{ GeV}$
$\Delta M = 3 \text{ GeV}$	$\tilde{l} = 235,245,250,260,270 \text{ GeV}$
	$\tilde{\chi}_1^0 = 232,242,247,257,267 \text{ GeV}$

Çizelge 5.1.’ de bu çalışma için üretilen sinyaller listelenmiştir. Bu çalışmada ele aldığımız senaryoya uygun olarak farklı kütle farklarına ($\Delta M = 3$ ve 5 GeV) tekabül eden toplam on adet sinyal üretilmiştir. Bu sinyallerin üretimi için gerekli olan parametre kartlarında, sol ve sağ elli sleptonların kütlelerinin birbirine eşit olduğu ve her bir sleptonun, lepton ve LSP ye bozunma oranlarının %100 olduğu kabul edilmiştir ($\tilde{l} \rightarrow l + \tilde{\chi}_1^0$). Sleptonun smuon ve selektron olduğu düşünülmüş ve kütlelerinin dejenere olduğu varsayılmıştır. Diğer bütün kütle parametrelerinin olabildiğince yüksek olduğu ($\sim 10 \text{ TeV}$) farz edilmiş ve üretim mekanizmasından hariç tutulmuşlardır.

5.1.1. Motivasyon

Şimdiye kadar ATLAS ve CMS deneylerinde, SÜSİ araştırmalarına yönelik farklı gruplar tarafından çalışmalar yapılmasına rağmen, herhangi bir ize rastlanmamıştır. Yapılan çalışmaların bir kısmı renkli süpereş aramaya odaklanmışken, bir kısmı ise Chargino-Neutralino, Chargino-Chargino veya slepton çifti üretimine odaklanmıştır. Bu araştırmalarda renkli süpereşlerden $\tilde{t}$ ve $\tilde{g}$, üzerine 1.25 TeV ve 2.28 TeV’lik bir alt limit konmuştur (Bonilla Castro, 2019; CMS Collaboration, 2022). Chargino Neutralino üretiminde ise bazı modellerde 650 GeV’lik bir limit konulmuştur (CMS Collaboration, 2018). Buna rağmen sleptonlar üzerine konulan limitler daha düşük olması sebebiyle onların hala BHÇ’nin erimi içerisinde olabildiğini ve CMS veya ATLAS deneylerinde gözlenebileceğini göstermektedir.

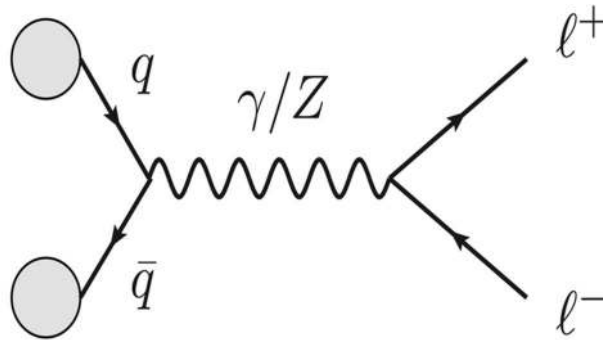
Astronomik gözlemlerle varlığı bilinen karanlık maddenin kalıntı yoğunluğunun elde edilebilmesi ancak sinyelimiz için slepton ile LSPnin küçük kütle farkının bulunduğu, compressed senaryo ile mümkündür. Bu da bize R-paritenin korunduğu MSSM de, süpereşlerin tespit edilmesi halinde LSP nin çok büyük ihtimalle karanlık madde olduğunu söyleyecektir. Bu sebeple sinyelimiz için $\Delta m = 5 \text{ GeV}$ ve $\Delta m = 3 \text{ GeV}$ 'lik iki farklı durum ele alınmıştır.

Sıkıştırılmış kütle farkı durumunun dahil edildiği bu araştırmada sleptonların bozunmundan gelen leptonların momentumları düşük yani soft olacaktırlar. Başlangıç durumuna eklenen bir ISR jet gereksinimi ise çarpışmadan sonra meydana gelecek olan sleptonların ve bu sleptonların bozunmasıyla oluşan leptonların da momentumlarının yüksek olmasını sağlayacağından, leptonlar soft olma durumunu aşar ve CMS ve ATLAS tetikleyicilerini geçip yeniden yapılandırılabilir. Data verimliliğini artıran bu durum analiz sonucunu yani sinyal anlamlılığını olumlu yönde etkilemektedir. Belirtilen sebeplerden dolayı küçük kütle farkı durumunda bir ISR jetli slepton çifti üretimi bu çalışmada sinyal olarak seçilmiştir.

5.2. Ardalan

Sinyelimizi taklit eden ve aynı son durum parçacıklarına sahip olan standart model olaylarına ardalan veya background denir. Bu analizde sinyal bölgemizdeki belli başlı süreçler aşağıda açıklanmıştır.

5.2.1. Z+Jets (Drell-yan)



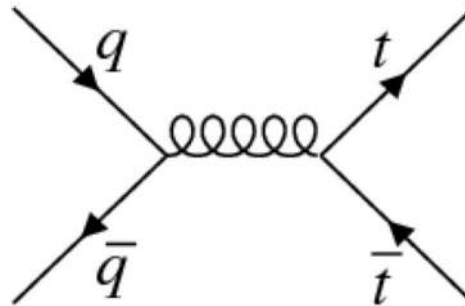
Şekil 5.3. Z+Jet ardalanı üretimi ile ilgili Feynman diyagramı.

Sinyelimizi taklit eden bir diğer ardalanlardan biri Drell-yan ardalanıdır ve Şekil 5.3.'de üretim mekanizması sunulmuştur. Yüksek enerjili iki kuarkın bir ara foton veya Z

bozonu ara olayına yok olma durumudur. Z bozonu %70 oranında bir kuark - anti kuark ($Z \rightarrow q\bar{q}$) çiftine bozunabilirken, %20 oranında nötrinolar ($Z \rightarrow \nu_l\bar{\nu}_l$) ve %10 oranında ise leptonik olarak, bir lepton ve bir anti-lepton $Z \rightarrow l\bar{l}$ olarak bozunabilir(Nakamura vd., 2010). Madgraph ile dört tane partona kadar üretilen Z+jets ardalanı diğer ardalanlara nispeten çok büyük üretim tesir kesitine sahip olduğundan ve ayrıca çok fazla işlemci gücü ve ara bellek gerektirdiğinden 30 milyon adet üretilmiş olup, 100 fb^{-1} ışıklılığa karşılık gelecek şekilde normalize edilmiştir.

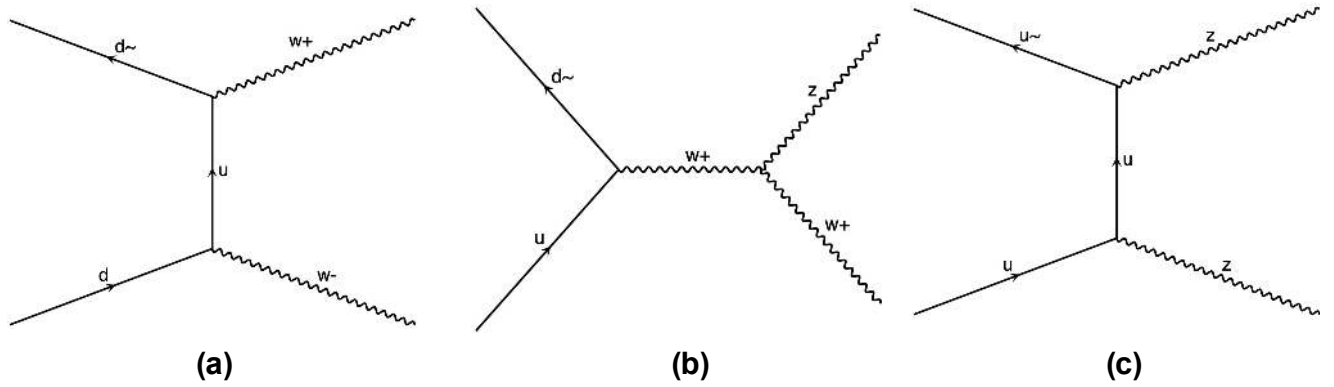
5.2.3. $t\bar{t}$ + Jet Ardalanı

Analizdeki ikinci en büyük tesir kesitine sahip olan $t\bar{t}$ ardalanı, Şekil.5.4.'da görüldüğü gibi bir kuark- anti kuarkin ($q - \bar{q}$) bir ara gluon olayına yok olup ve bu gluonun top anti-top ($t - \bar{t}$) kuarkına bozunması durumudur. Burada her bir top kuarkı b kuarkına ve W bozonuna bozunur. Buradaki W bozonlarının birinin leptonik ($W^+ \rightarrow l^+ + \nu$), diğerinin hadronik ($W^- \rightarrow q' + \bar{q}$) bozunması sonucu sinyal bölgesine dahil olur. Z+jets gibi üretim tesir kesiti yüksek olan bu ardalanın üretimi çok fazla donanımsal kaynak gerektireceğinden, 20 milyon adet üretilmiş olup 100 fb^{-1} ışıklılığa normalize edilmiştir.



Şekil 5.4. $t\bar{t}$ ardalanı üretimi ile ilgili Feynman diyagramı.

5.2.4. Dibozon (WW, WZ ve ZZ) Ardalanı



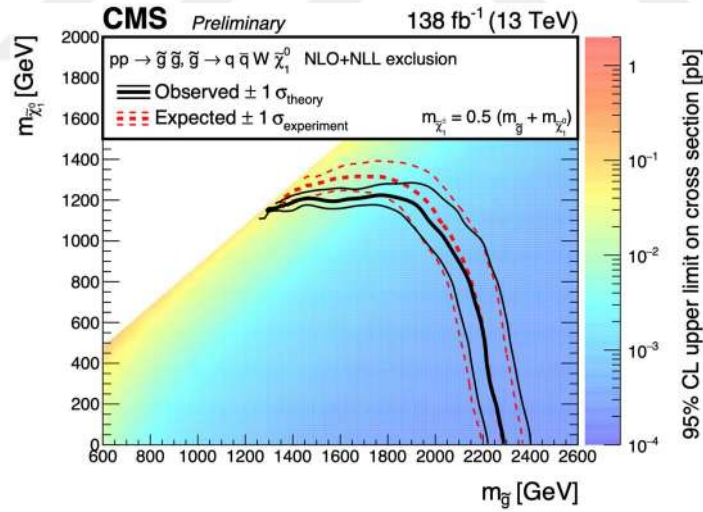
Şekil 5.5. WW, WZ ve ZZ üretimi ile ilgili Feynman diyagramı ardalanlarının (a) W^+W^- , (b) W^+Z^0 ve (c) Z^0Z^0 süreçlerini göstermektedir.

Bir kuark ve bir anti kuark ($q - \bar{q}$) çarpışmasından meydana gelebilecek olan W^+W^- , W^+Z^0 , Z^0Z^0 bozonlarının, birinin leptonik, diğerinin hadronik bozunması ve Z^0 bozonunun leptonik bozunması sonucunda dibozon çifti sinyali taklit eder ve ardalan olur.

6. SÜPERSİMETRİ ARAŞTIRMALARI

Süpersimetrik parçacık izi arama çalışmaları renkli ve elektroweakinos/slepton araştırmaları olarak iki kısma ayrıştırılabilir. Her ne kadar renkli süpereşlerin üretim tesiri kadar yüksek olmasa da slepton veya elektroweakino üretimleri üzerine konulan kütle limitleri nispeten daha düşük ve sinyal bölgesi aralan bakımından daha temizdir. Bu da elektroweakino veya slepton araştırmalarını cazip kılmaktadır. Her ne kadar birbirlerinin alternatifleri olmasalarda, renkli SÜSİ araştırmalarını tamamlayıcı bir özelliği bulunmaktadır.

Şekil 6.1.'de CMS analizi tarafından gerçekleştirilen renkli süpersimetri araştırmalarında gluino üzerine konulan limiti göstermektedir. Grafikteki siyah sürekli çizgiler gözlenen, kesikli kırmızı çizgiler ise beklenen limiti göstermektedir. Chargino kütlesinin gluino ve LSP kütleleri toplamının yarısı olarak varsayıldığı çalışmada gluino kütlesi üzerine 2280 GeV'lik bir limit konmuştur. Diğer renkli parçacıklardan stop kütlesi üzerine konulan limit ise modele bağlı olmakla birlikte kütesiz LSP durumunda 1325 GeV mertebesindedir (CMS Collaboration, 2021).



Şekil 6.1. WW modeli için CMS analizinin %95 CL de limit grafiği.

Proton-proton çarpışması sonucu üretilen sleptonlar, iki lepton ve en hafif süpersimetrik parçacık LSP ile hem 8 TeV hem de 13 TeV'de CMS ve ATLAS deneylerinden toplanan datada aranmıştır (ATLAS Collaboration, 2014, 2018; CMS Collaboration, 2014a, 2019; Collaboration, 2019). Bu çalışmalarda Chargino/Neutralino ve slepton üzerine konulan kütle limitleri ise modele bağlı olarak çok daha düşük ve sırasıyla kütesiz LSP durumunda 580

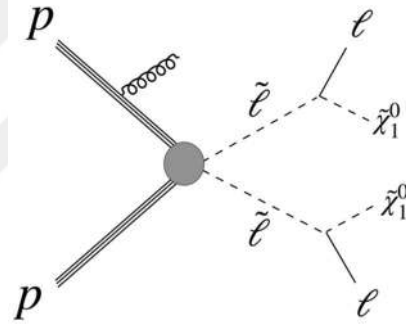
ve 500 GeV 'dir Sol ve sağ eli sleptonların kütlelerinin dejenere olduğu varsayılan çalışma çok küçük kütle farkları ($m_l - m_{\tilde{\chi}_1^0} < 50$ GeV) için ise hassas değildir.

Bahsedilen deneysel çalışmalara ek olarak gerek renkli süperparçacıkların gerekse de chargino/neutralino ve slepton sinyali çeşitli fenomenolojik çalışmalarda farklı yöntemlerle incelenmiştir. 14 TeV'lik kütle merkezi çarpışmasında slepton sinyali, son durumda kayıp enerji, iki-lepton ve bir ISR jet, slepton ile LSP arasındaki kütle farkının $\Delta M \leq 20$ GeV ve $\Delta M \leq 60$ GeV olduğu durumlarda fenomenolojik (Dutta vd., 2017; Han ve Liu, 2015) olarak incelenmiş ve 100 fb^{-1} ışıklılık ile ≈ 150 GeV'lik sleptonlar için 5σ bir anlamlılık elde edilmiştir. Diğer bir fenomenolojik çalışmada (Dutta vd., 2017) ise $\Delta M = 60$ GeV olduğu durumda 300 fb^{-1} lık ışıklılığa karşılık gelen simüle edilmiş data ile $m_{\tilde{\mu}} = 110$ GeV için 4.7σ 'lık sinyal anlamlılığının elde edilebileceği gösterilmiştir.

7. ANALİZ

Bu kısımda analiz sonuçları, kullanılan seçim kriterleri ve her bir kriterin uygulanmasından sonra kalan son durum olaylarının tesir kesiti ayrıntılı bir şekilde ele alınıp sunulmuştur.

High Energy Large Hadron Collider (HE-LHC) olarak adlandırılan ve gelecekteki inşası muhtemel bir hadron çarpıştırıcısında, 33 TeV'de proton-proton (pp) çarpışmalarından elde edilen datalarda slepton sinyali fenomenolojik olarak incelendi. (Üretim mekanizması için Şekil 7.1'e bakınız). Sonuçlar, R-paritesinin korunduğu Minimal Süpersimetrik Standart Model bağlamında sunulmuştur (Fayet, 1976, 1977). En hafif nötralino'nun ($\tilde{\chi}_1^0$) tamamen Bino olduğu varsayılmıştır. Astronomik gözlemlere dayalı doğru karanlık madde kalıntı yoğunluğunu elde edilebilmesi için (Griest ve Seckel, 1991) LSP ve slepton kütlelerinin neredeyse dejenere olduğu varsayılmıştır.



Şekil 7.1. Bir ISR jet ile birlikte Slepton çifti üretimi.

Bu analizde incelediğimiz sinyal, Şekil 7.1.'de görüldüğü üzere proton-proton çarpışmasından bir çift sol/sağ-elli selectron ($\tilde{e}$) veya smuon ($\tilde{\mu}$) çifti ve gelen partonlardan birinden yayılan bir gluon veya quarkın oluşturduğu başlangıç durum jetidir. Sol ve sağ-elli sleptonların kütlelerinin dejenere olduğu varsayılmıştır. Kuark /anti-kuark veya quark/gluon etkileşiminden Z^* veya γ^* aracılığıyla oluşan selectron veya smuon çifti, hızlı bir şekilde LSP ve zıt elektrik yüklü bir çift elektron veya muon çiftine bozunurlar. Oluşan bu leptonların enine momentumları compressed scenario adı verilen süpersimetrik parçacıklar arasındaki kütle farkının çok küçük olması durumunda küçük (soft) olacaktır. Son durum olaylarındaki parçacıkların düşük enine momentuma sahip olmaları, parçacıkların yeniden yapılandırılmasını güç kılmaktadır, bu da aslında sinyalin istatistiksel anlamlılığını etkilemektedir. Dolayısı ile düşük akseptans durumunun üstesinden gelebilmek için,

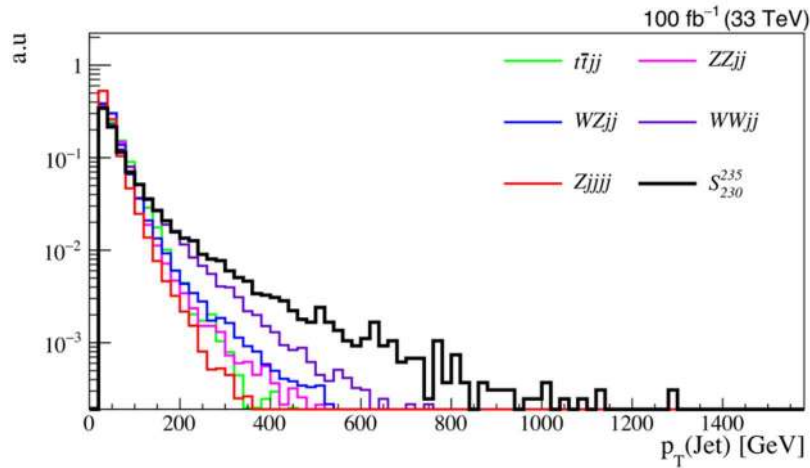
sinyalimiz de bir tane yüksek enine momentumlu ISR jetine gerek duyulmuştur. Şart koşulan bu yüksek momentumlu ISR jeti, çarpışmadan sonra oluşan slepton çiftinde de yüksek momentuma sebep olacaktır. Çarpışmadan önceki toplam enine momentum sıfır olduğundan ve çarpışmadan sonraki toplam enine momentumda sıfır olması gerektiğinden, yüksek enerjili ISR jet gereksinimi, yüksek momentumlu bir slepton çiftinin ve dolaylı olarak da bozunum ürünleri olan elektron veya muon çiftinin de momentumunu etkileyecektir.

Sinyalimizle benzer bir topolojiye sahip olan başlıca Standart Model ardalanları önceki kısımda ayrıntılı bir şekilde ele alınmışlardır. Bunlardan Z+jets en yüksek tesir kesitine sahip olandır. Son durumda dört tane jet'e kadar simüle edildiği için, üretim aşamasında çok fazla ram ve işlemci gücüne gereksinim duyulmaktadır. Dolayısı ile Z+jets ve $t\bar{t}$ ardalanları sırasıyla 30 ve 20 milyon adet üretilmiş olup, 100 fb⁻¹'lık ışıklılığa normalize edilmiştir. VV + jets ardalanları ise 100 fb⁻¹'lık ışıklılığa tekabül edecek sayıda üretilmişlerdir. Sinyal ise $\Delta M = 3$ ve 5 GeV olacak şekilde farklı slepton kütleleri için ($m_{\tilde{l}} = 235, 245, 250, 260, 270$ GeV) son durumda en fazla iki parton olacak şekilde üretildi. Hem sinyaller hem de tüm SM ardalanlarının üretiminde MadGraph_aMC@NLO sürüm 2.6.7 (Alwall vd., 2011) kullanılmıştır. Parton duşu ve hadronizasyon işlemleri için Pythia 6 (P, 2006), dedektör simülasyonu için ise Delphes 3 (Michele Selvaggi, 2014) kullanılmıştır. Dedektör simülasyonu için HE-LHC için hazırlanmış ön tanımlı delphes kartından (M. Selvaggi, 2018) faydalanılmıştır. Aynı olayları iki defa sayımın önüne geçmek için MLM algoritmasından faydalanılmıştır (Treccani, 2007). Sinyal üretimi için gerekli olan parametre kartları SÜSİ spektrum üretici olan SUSY-HIT (Muhlleitner vd., 2007) ile üretilmiştir.

Simüle edilen ardalan ve tüm sinyaller için hemen hemen aynı ön seçim kriterleri uygulanmıştır. Tek farklılık $\Delta M = 3$ ve 5 GeV olduğu durumlarda ortaya çıkmakta ve yalnızca son durum leptonlarının enine momentumlarının skaler toplamı üzerine konulan ve $m_{T2} - \mu$ parametreleri için uygulanan ön seçimler değişmektedir. Bu ön seçimler sırasıyla $\Delta M = 3$ GeV için 35 ve 3 GeV iken $\Delta M = 5$ GeV olduğu durumda ise, 50 ve 5 GeV'dir. Uygulanan her bir ön seçimden sonra, referans alınan sinyalle ($m_{\tilde{l}}, m_{\tilde{\chi}_1^0} = 235, 230$ GeV) birlikte her bir ardalanın tesir kesiti Çizelge 7.1'de gösterilmiştir. Son durumda incelediğimiz olaylar yalnızca müon veya elektron içereceğinden, uygulanan ön seçimlerden ilki tau (τ) leptonun veto edilmesi olacaktır. Her bir slepton, lepton ve LSP ye bozunduğundan $p_T > 7$ GeV ve $|\eta| < 2.4$ olacak şekilde zıt yüklü iki adet lepton ön seçimi uygulanmıştır. $t\bar{t}$ ardalanı en fazla tesir kesitine sahip olan ardalanlardan biri olması sebebiyle çok fazla miktarda ortaya çıkmakta ve sinyali gölgelemektedir. Biliniyor ki, $t\bar{t}$

ardalanı b-jet içermesi yönüyle sinyale göre farklı kılınmaktadır. Dolayısı ile, $p_T > 30$ GeV ve $|\eta| < 2.4$ olacak şekilde tanımlanmış b-jet içeren olayların veto edilmesi, $t\bar{t}$ ardalanını çok büyük oranda elimine edecektir.

Küçük kütle farkı durumunda oluşacak olan düşük lepton momentumu sonucunda, olaylar CMS veya ATLAS detektörlerindeki tetikleyici eşik değerini geçememe durumuna maruz kalabilmekte ve dolayısıyla çevrimdışı analiz için kaydedilmeyeceklerdir. Bu da son durumda sinyal ardalan oranını ve sinyal anlamlılığını olumsuz yönde etkileyecektir. Bunun önüne geçebilmek adına, yüksek momentumlu bir tane ISR jeti gereksinimi ön seçimi uygulayarak, çarpışmadan sonra oluşacak olan slepton çiftine yüksek momentum kazandırılabilir. Yüksek momentumlu slepton da bozunduğu LSP ve leptona momentumunu aktaracaktır. Şekil 7.2’de ISR jetin enine momentumu gösterilmektedir. Grafik sinyal ve ardalan arasında bir karşılaştırma yapabilmek adına bire normalize edilmiştir. Grafikten de görüldüğü üzere, sinyalden gelen jet ≈ 150 GeV yakınlarında ardalanlardan ayrılım göstermektedir. Uygulanacak olan optimum ön seçim belirlemede sinyal ve ardalan dağılımlarının gösterdiği trendin yanı sıra sinyal ardalan oranı ve sinyal anlamlılığı her bir 1 GeV’lik aralıklarla hesaplanıp, uygulanacak olan en az 180 GeV’lik ISR jet enine momentum katına karar verilmiştir.

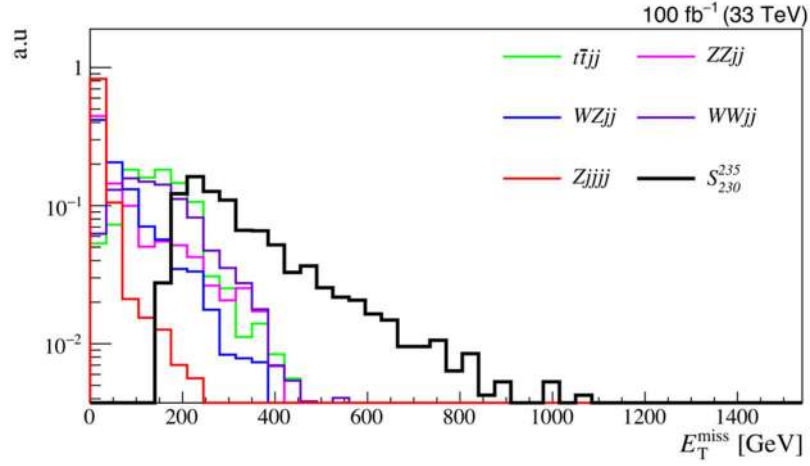


Şekil 7.2. Sinyal ve ardalanlardan gelen öncü jet momentum grafiği.

SÜSİ araştırmalarında kullanılan en önemli parametrelerden biri kayıp enine momentum değişkenidir. Son durumda oluşan LSP, detektörde herhangi bir iz bırakmadan kaçacağı için çarpışmadan önceki durumdaki toplam enine momentum son durumda detektörde tespit edilen parçacıkların enine momentumları toplamına eşit olmayacaktır. Bu

aradaki fark, detektörde tespit edilemeyen LSP'lere ait olan enine momentum olacaktır. Bizim sinyelimiz de son durumda iki adet LSP ile karakterize edildiği için, yüksek miktarda bir kayıp enine momentum olacaktır. Bu fark bizim için sinyali ardalandan ayırmada önemli faktör olarak öne çıkacaktır. Şekil 7.3'de ISR jet ön seçimi uygulandıktan sonra gerek ardalan gerekse de sinyalin kayıp enine momentum dağılımı gösterilmiştir. ISR jet ile sleptonların sırt sırta olması beklendiğinden ve slepton bozunumundan meydana gelen LSP'lerde aynı şekilde ISR jet ile sırt sırta olacak ve hemen hemen ISR jet enine momentumuna yakın bir momentuma sahip olacaklardır (Şekil 5.2'e bakınız). Dolayısı ile, daha öncesinde uygulanan 180 GeV'lik minimum ISR jet p_T ön seçiminin yaratmış olduğu etkiyi, yani sinyalden gelecek olan MET in 180 GeV ötesinde oturduğunu grafikte de görebiliyoruz. Bire normalize edilmiş olan MET grafiğinde 200 GeV ötesinde ise sinyalin ardalanlardan ayrıldığını görebiliyoruz. Bu değişken içinde yine ardalan sinyal oranını farklı ön seçimler için kontrol edip her bir nokta için sinyal anlamlılığı hesapladığımız da optimum katın 180 GeV olacağı bulunmuştur. Uygulanan bu ön seçim Çizelge 7.1'den görüleceği üzere sinyal anlamlılığını 6 kat, sinyal ardalan oranını 39 kat artırmıştır.

Son durumdaki leptonların enine momentumları slepton ve LSP arasındaki kütle farkının bir ölçüsü olduğundan, sinyali öne çıkarmada belirgin bir etki yaratabileceği düşünülen leptonların enine momentumlarının skaler toplamı dağılımı da incelenmiştir. Şekil 7.4'de görüleceği üzere 50-60 GeV dolaylarında ardalanlardan gelen leptonların momentum toplamı slepton üretiminden gelen leptonların momentum toplamına sayıca baskın geldiği görülmektedir. Bu parametre içinde sinyal anlamlılığı ve sinyal ardalan oranı hesaplandığında 50 GeV'lik bir üst ön seçiminin optimum olacağı görülmüştür. Bu ön seçimi aynı zamanda Z+jets ardalanını tamamen elimine etmek adına da faydalı olmuştur. Çizelge 7.1'den görüleceği üzere bir önceki ön seçimden sonra kalan olay sayısı ile karşılaştırıldığında sinyal olaylarının yaklaşık %90'ı SM ardalanlarının ise %5'i bu ön seçimi geçebilmiştir.



Şekil 7.3. MET dağılımı grafiği. İlk üç ön seçimi geçen olayların MET dağılımı.

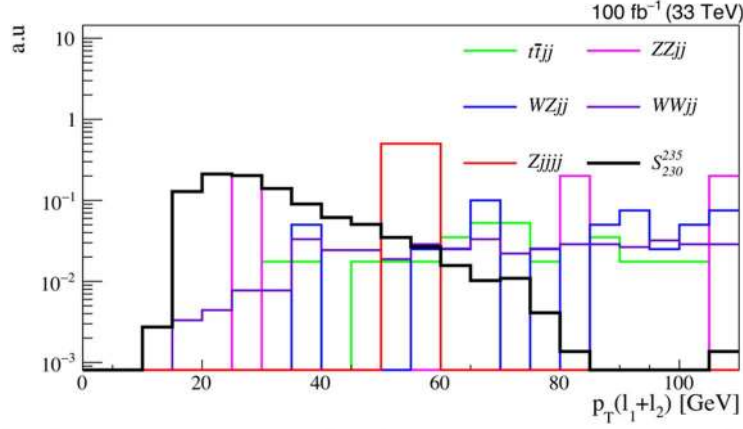
Şekil 7.3.’te görüldüğü üzere, yüksek momentumlu ISR jet gereksiniminden dolayı, beklenildiği üzere sinyal olayları 180 GeV ötesine yerleşmişlerdir.

Çizelge 7.1. Her bir kat dan sonra sinyal ve ardalan tesir kesitleri.

Selections	$t\bar{t} + \text{jets}$	$ZZ + \text{jets}$	$WZ + \text{jets}$	$WW + \text{jets}$	$Z + \text{jets}$	S_{230}^{235}
Initial	3919650.00	40154.80	149999.00	308871.00	137857000.00	129.72
τ Veto	3562280.00	38706.20	143452.00	296032.00	136270000.00	128.74
2OSSF	44919.70	1571.05	2767.32	2527.33	2462960.00	10.58
b-jet Veto	13190.2	1423.38	2670.50	2497.93	2453960.00	10.46
Jet $p_T > 180$ GeV	65.14	8.89	20.69	43.63	3382.10	0.34
MET > 180 GeV	21.35	1.75	2.25	14.68	47.50	0.33
$81 < M_{ll} < 101$	18.43	0.07	0.65	13.18	9.50	0.32
$\cos \theta_{l_1, l_2}^* < 0.5$	10.40	0.05	0.41	8.93	9.50	0.26
$p_{T_{l_1}} + p_{T_{l_2}} < 50$	0.55	0.01	0.02	0.93	-	0.23
$\Delta\Phi(\text{Jet}, \text{MET})$	-	0.01	0.01	0.81	-	0.22
$\Delta\Phi(\text{Jet}, l_1 l_2)$	-	0.01	0.01	0.53	-	0.19
$m_{T_2} - \mu < 5$	-	-	-	0.06	-	0.18

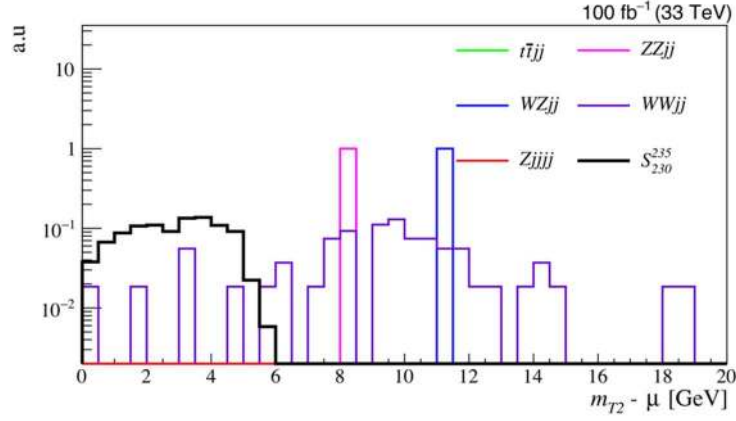
Etkili olabileceği düşünülen ve kontrol edilen diğer bir parametre ise ISR jet ile MET arasındaki azimut açısı. Şekil 5.2’e bakıldığında açık bir şekilde görünüyor ki, MET ve ISR jet hemen hemen sırt sırta yaslanmış bir şekildedir. Dolayısıyla sinyalimiz için MET ve ISR jet arasındaki açının yaklaşık olarak π kadar olması beklenir. Diğer uygulanan ön seçimlere

nazaran çok etkili bir ön seçim olmasada, uygulandıktan sonra sinyalin tesir kesitini hemen hemen hiç değiştirmemekte, $t\bar{t}$ dan gelen olayların hepsini ise elimine etmiştir.

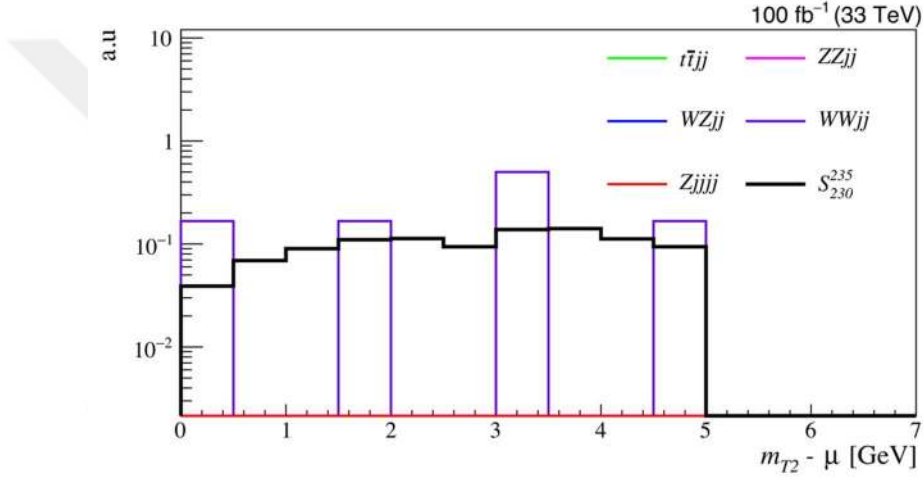


Şekil 7.4. Son durumdaki leptonların enine momentumlarının skaler toplamı dağılımı.

Süpersimetri izinin arandığı çalışmalarda sık kullanılan parametrelerden bir diğeri ise Stranverse mass olarak adlandırılan m_{T2} parametresidir (A. Barr vd., 2003; C G Lester ve Summers, 1999). Her ne kadar lepton enine momentumları üzerine uyguladığımız ön seçim etkili olsa da $m_{T2} - \mu$ parametresi kütle farkının doğrudan bir ölçüsüdür. Buradaki μ parametresi LSP nin kütesine karşılık gelmektedir. m_{T2} parametresi ana parçacık olan slepton kütesinin olabilecek minimum değerini bozduğu parçacıkların momentumu ve LSP kütesinden yola çıkarak hesaplar. Verilen slepton ve LSP kütesi için hesaplanacak olan m_{T2} değeri, (Christopher G Lester ve Nachman, 2015) yazarları tarafından sağlanan “bisection code” aracılığıyla hesaplanır. Şekil 7.5 $m_{T2} - \mu$ dağılımını hem sinyal hem de ardaanlar için göstermektedir. Sinyalimizin $m_l = 235$ GeV ve $m_{\tilde{\chi}_1^0} = 230$ GeV olduğu durumda $m_{T2} - \mu$ hesaplanırsa beklenildiği üzere bu değer kütle farkı olan 5 GeV etrafında veya biraz daha küçük olması aşıkardır. Dolayısı ile Şekil 7.5’e baktığımızda sinyalin 5-6 GeV’ye kadar var olduğunu ardaanların ise daha çok bu değerin üzerinde yerleştiği görülmektedir. Slepton ile LSP arasındaki kütle farkının 5 GeV olduğu durumda uyguladığımız 5 GeV’lik bir üst ön seçimi, sinyal ardaan oranını 0.35 ten yaklaşık 3.0 civarına, sinyal anlamlılığını ise yaklaşık 7.4σ ya çıkarmıştır. Şekil 7.6., $m_{T2} - \mu < 5$ GeV uygulandıktan sonra sinyal ve ardaan dağılımını göstermektedir.



Şekil 7.5. Herhangi bir ön seçim uygulanmadan önce M_{T2} dağılımı.

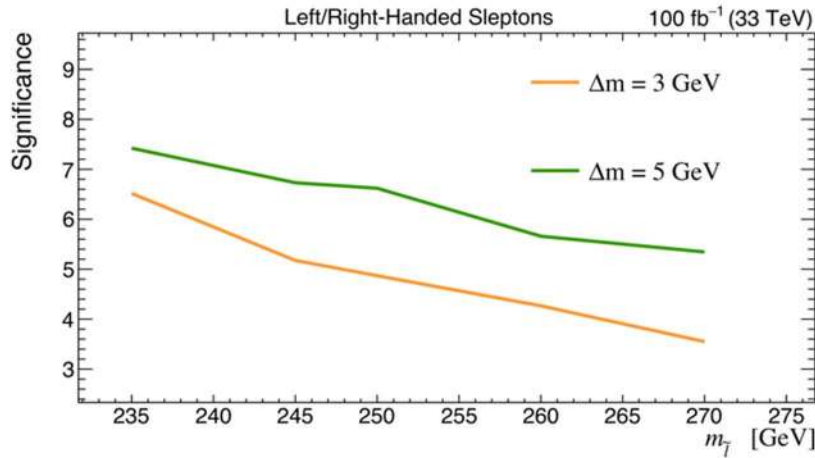


Şekil 7.6. M_{T2} üzerine üst ön seçim uygulandıktan sonra sinyal ve ardaan dağılımı.

Çizelge 7.1.'de gösterilen ve ardalanı elimine edip sinyal ardalan oranını artıran diğer ön seçimlerden biri di-lepton değişmez kütlesi üzerine uygulanan ön seçimdir. Bu ön seçim spesifik olarak Z+jets ardalanını hedef almaktadır. Son durumdaki leptonların değişmez kütlesinin Z bozonu kütlesinin ± 10 GeV etrafında çıkması durumunda, bu olaylar reddedilmiştir. Diğer bir kat ise $\cos \theta_{l_1, l_2}^*$ dir. İlk defa (A. J. Barr, 2006) tarafından ileri sürülen ve (Edelhäuser vd., 2012) tarafından yapılan çalışmada uygulan parametre, spin-0 anne parçacık bozunumundan meydana gelen olayları spin-1 parçacıkların bozunum olaylarından ayırmak için kullanılır. Sinyal anlamlılık ve sinyal ardalan oranı kontrol edildiğinde $\cos \theta_{l_1, l_2}^* < 0.5$ optimum değer olduğu gözlenmiştir. Her ne kadar diğer ön seçimler kadar etkili olmasa da son olarak ISR jet ile son durumdaki leptonlar arasındaki azimut açısı dağılımı incelenmiş ve bu ön seçimin de $\Delta \Phi(Jet, l1l2) > 0.65$ değerinde optimum olduğu gözlenmiştir.

8. SONUÇ

CERN'deki Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'ndaki (BHÇ) deneylerden toplanan verilerle süpersimetri izi aranmaktadır. Araştırmalardan bazıları renkli süpersimetrik parçacıklara odaklanırken, bazıları ise chargino-nötralino veya sleptonların elektrozayıf üretimine odaklanmışlardır. Şu ana kadar yapılan deneysel araştırmalarda süpersimetrik parçacık izine rastlanılmadığından, bu parçacıkların kütleleri üzerine sınırlamalar getirilmiştir. Bu fenomenolojik çalışmada, 33 TeV'lik kütle merkezi enerjisinde proton-proton çarpıştırıcısında slepton sinyali incelenmiş ve 100 fb^{-1} gibi düşük sayılabilecek bir ışıklılığa karşılık gelen verilerle, en hafif süpersimetrik parçacık ile slepton arasındaki kütle farkının çok küçük olduğu durumda ($\Delta M = 5 \text{ GeV}$), 270 GeV'ye kadar kütleye sahip slepton sinyalinin keşfedilebileceği gösterilmiştir. Şekil 8.1'de Sleptonun kütlesine göre farklı ΔM durumu için bu analizde hesaplanan sinyal anlamlılık değerlerini görüyoruz. 100 fb^{-1} ışıklılığa tekabül eden bir data ile 33 TeV'lik kütle merkezi enerjisinde slepton kütlesinin 235 GeV, LSP'nin kütlesinin 230 GeV olduğu bir slepton sinyali 7.4σ sinyal anlamlılık ile gözlenebilir.



Şekil 8.1. Sleptonun kütlesine göre değişen anlamlılık değeri.

KAYNAKLAR

- Alwall, J., Herquet, M., Maltoni, F., Mattelaer, O., Stelzer, T., 2011. MadGraph 5 : Going Beyond. *Journal of High Energy Physics*, 6, 1-40
[https://doi.org/10.1007/JHEP06\(2011\)128](https://doi.org/10.1007/JHEP06(2011)128)
- Amaldi, U., de Boer, W., Fürstenau, H., 1991. Comparison of grand unified theories with electroweak and strong coupling constants measured at LEP. *Physics Letters B*, 260, 447–455. [https://doi.org/10.1016/0370-2693\(91\)91641-8](https://doi.org/10.1016/0370-2693(91)91641-8)
- ATLAS Collaboration, 2008. The ATLAS Experiment at the CAB - The ATLAS detector as installed in its experimental cavern at point 1 at CERN is described in this paper. A brief overview of the expected performance of the detector when the Large Hadron Collider begins operation is al. *Journal of Instrumentation*, 3, 08, S08003–S08003. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/3/08/s08003>
- ATLAS Collaboration, 2014. Search for direct production of charginos, neutralinos and sleptons in final states with two leptons and missing transverse momentum in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector. *Journal of High Energy Physics*, 5, 1–52.
- ATLAS Collaboration, 2018. Search for electroweak production of supersymmetric states in scenarios with compressed mass spectra at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector. *Physical Review D*, 97, 5, 52010.
- Barr, A. J., 2006. Measuring slepton spin at the LHC. *Journal of High Energy Physics*, 02, 42.
- Barr, A., Lester, C., Stephens, P., 2003. A variable for measuring masses at hadron colliders when missing energy is expected; M_{T2} : the truth behind the glamour. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, 29, 10, 2343.
- Bonilla Castro, J. S., 2019. *Reconstructing the Top Quark in a Search for a Pair-Produced Supersymmetric Partner in the All-Hadronic plus Missing Energy Final State Using 139 fb^{-1} of $\sqrt{s} = 13$ TeV Proton-Proton Collisions Delivered by the Large Hadron Collider at CERN*. Oregon U.
- Christiansen, P., 2021. Understanding R_T Using Two-Particle Correlations by Simulating Proton-Proton Collisions in A Monte-Carlo Model.
- CMS-TDR-002, 1997. *The Hadron Calorimeter Technical Design Report*.
- CMS-TDR-004, 1997. *The CMS electromagnetic calorimeter project - CERN Document Server*. <https://cds.cern.ch/record/349375>
- CMS-TDR-1, 1997. *The CMS magnet project CERN Document Server*. <https://cds.cern.ch/record/331056>
- CMS-TDR-15, 2017. *The Phase-2 Upgrade of the CMS Barrel Calorimeters - CERN*

Document Server. <https://cds.cern.ch/record/2283187>

- CMS Collaboration, 2006. CMS Physics: Technical Design Report - Volume 1: Detector Performance and Software. *Cern-Lhcc-2006-001*, February, 1–547. <https://cds.cern.ch/record/922757/files/lhcc-2006-001.pdf>
- CMS Collaboration, 2008. The CMS experiment at the CERN LHC. *Journal of Instrumentation*, 3, 8, 8004. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/3/08/S08004>
- CMS Collaboration, 2012. Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC. *Physics Letters B*, 716, 1, 1–29.
- CMS Collaboration, 2014a. Searches for electroweak production of charginos, neutralinos, and sleptons decaying to leptons and W, Z, and Higgs bosons in pp collisions at 8 TeV. *The European Physical Journal C*, 74, 9, 1–42.
- CMS Collaboration, 2014b. Description and performance of track and primary-vertex reconstruction with the CMS tracker. *Journal of Instrumentation*, 9, 10, <https://doi.org/10.1088/1748-0221/9/10/P10009>
- CMS Collaboration, 2017. The CMS trigger system. *Journal of Instrumentation*, 12, 01, P01020–P01020.
- CMS Collaboration, 2018. Combined search for electroweak production of charginos and neutralinos in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV. *arXiv preprint arXiv:1801.03957*.
- CMS Collaboration, 2019. Search for supersymmetric partners of electrons and muons in proton–proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV. *Physics Letters B*, 790, 140–166.
- CMS Collaboration, 2021. Combined searches for the production of supersymmetric top quark partners in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV. *arXiv preprint arXiv:2107.10892*.
- CMS Collaboration, 2022. Search for supersymmetry in final states with a single electron or muon using angular correlations and heavy object tagging in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV. <https://cds.cern.ch/record/2805223>
- Collaboration, A., 2019. Searches for electroweak production of supersymmetric particles with compressed mass spectra in $\sqrt{s}=13$ TeV pp collisions with the ATLAS detector. *arXiv preprint arXiv:1911.12606*.
- Davis, S. R., 2016. *Interactive Slice of the CMS detector*. <https://cds.cern.ch/record/2205172>
- Djouadi, A., Muhlleitner, M. M., Spira, M., 2006. Decays of supersymmetric particles: the program SUSY-HIT (SUSpect-SdecaY-HDECAY-InTerface). *arXiv preprint hep-ph/0609292*.
- Dutta, B., Fantahun, K., Fernando, A., Ghosh, T., Kumar, J., Sandick, P., Stengel, P.,

- Walker, J. W., 2017. Probing squeezed bino-slepton spectra with the Large Hadron Collider. *Physical Review D*, 96, 7, 75037.
- Edelhäuser, L., Matchev, K. T., Park, M., 2012. Spin effects in the antler event topology at hadron colliders. *Journal of High Energy Physics*, 11, 1–45.
- Fallavollita, F., 2020. Novel triple-GEM mechanical design for the CMS-ME0 detector and its preliminary performance. *Journal of Instrumentation*, 15, 8. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/08/C08002>
- Fayet, P., 1976. Supersymmetry and weak, electromagnetic and strong interactions. *Physics Letters B*, 64, 2, 159–162.
- Fayet, P., 1977. Spontaneously broken supersymmetric theories of weak, electromagnetic and strong interactions. *Physics Letters B*, 69, 4, 489–494.
- Geant4 Collaboration, 2020. *Introduction to Geant4*.
- Glashow, S. L., 1961. Partial-symmetries of weak interactions. *Nuclear Physics*, 22, 4, 579–588. [https://doi.org/10.1016/0029-5582\(61\)90469-2](https://doi.org/10.1016/0029-5582(61)90469-2)
- Grees, M., Godbole, R. M., Roy, P., 2004. *Theory and Phenomenology of Sparticles: An Account of Four-Dimensional $N=1$ Supersymmetry in High Energy Physics*. World Scientific, Singapore.
- Griest, K., Seckel, D., 1991. Three exceptions in the calculation of relic abundances. *Physical Review D*, 43, 10, 3191.
- Han, Z., Liu, Y., 2015. M_{T2} to the rescue: Searching for sleptons in compressed spectra at the LHC. *Physical Review D*, 92, 1, 15010.
- K. G. Begeman, A. H. Broeils, R. H. S., 2014. Learning to discover: the higgs boson machine learning challenge. URL <http://higgsml.lal.in2p3.fr/documentation>, 9.
- Lefèvre, C., 2008. *The CERN accelerator complex*. <http://cds.cern.ch/record/1260465>
- Lester, C. G., Summers, D. J., 1999. Measuring masses of semi-invisibly decaying particle pairs produced at hadron colliders. *Physics Letters B*, 463, 1, 99–103.
- Lester, C. G., Nachman, B., 2015. Bisection-based asymmetric M_{T2} computation: a higher precision calculator than existing symmetric methods. *Journal of High Energy Physics*, 3, 1–16.
- Muhlleitner, M. M., Djouadi, A., Spira, M., 2007. Decays of supersymmetric particles-The program SUSY-HIT. *Acta Physica Polonica Series B*, 38, 2, 635.
- Nakamura, K., Amsler, C., Group, P. D., 2010. Particle physics booklet. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, 37, 7A, 75021.
- P, S. Tm. Ss., 2006. PYTHIA 6.4 physics and manual. *Journal of High Energy Physics*, 05,

- Sakuma, T., McCauley, T., 2014. Detector and event visualization with sketchup at the CMS experiment. *Journal of Physics: Conference Series*, 513, TRACK 2, 22032. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/513/2/022032>
- Salam, A., 1968. Elementary particle theory. *Prog. Of the Nobel Symposium, Stockholm, Sweden*. <https://ci.nii.ac.jp/naid/10025429448/>
- Selvaggi, M., 2018. *DELPHES*. https://github.com/delphes/delphes/blob/9a7ea360f6f9f1c8f3f35b9545f62c3a61a82230/cards/delphes_card_HLLHC.tcl Erişim Tarihi:17.06.2022
- Selvaggi, M., 2014. DELPHES 3: A modular framework for fast-simulation of generic collider experiments. *Journal of Physics: Conference Series*, 523, 1, 12033.
- Sjöstrand, T., Mrenna, S., Skands, P., 2007. A Brief Introduction to PYTHIA 8.1. *Computer Physics Communications*, 178, 11, 852–867. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2008.01.036>
- The DELPHES 3 collaboration, 2014. DELPHES 3, A modular framework for fast simulation of a generic collider experiment. *Journal of High Energy Physics*, 2. [https://doi.org/10.1007/JHEP02\(2014\)057](https://doi.org/10.1007/JHEP02(2014)057)
- Treccani, M., Mangano, M. L., Moretti M., Piccinini F., 2007. Matching matrix elements and shower evolution for top-pair production in hadronic collisions. *Journal of High Energy Physics*, 01, 13.
- Weinberg, S., 1967. A model of leptons. *Physical Review Letters*, 19, 21, 1264–1266. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.19.1264>
- Wenninger, J., 2018. LHC Report: The final days of Run 2 CERN. <https://home.cern/news/news/accelerators/lhc-report-final-days-run-2>
- Wouters, S., 2009. Sebastian Wouters the RPC performance Commissioning the CMS-detector at CERN: monitoring.

EKLER

EK-1 R- paritesi

R-Paritesinin korunumlu olduğu standart modelin süpersimetrik uzantısında en hafif SÜİ parçacığı karanlık madde için adaydır. R-paritesi $R = (-1)^{2j+3B+L}$ şeklinde tanımlanır. Buradaki j , parçacığın spin sayısı, B , baryon sayısı ve L ise lepton sayısıdır. Bir proton için bu sayı hesaplanacak olursa, protonun spini $\frac{1}{2}$ olmak üzere $2 \times \left(\frac{1}{2}\right) = 1$ olacaktır. Protonun içerisinde iki up ve bir down olmak üzere üç adet kuark bulunur ve her bir kuarkın baryon sayısı $1/3$ 'dür. Buna göre $B = 3 \times \left(\frac{1}{3}\right)$, $B = 1$ ve $3B = 3$ olacaktır. Protonun lepton sayısı 0'dır. O halde bir proton için R-paritesi $(-1)^{1+3+0} = +1$ olacaktır. Benzer şekilde R-paritesi her bir SM parçacığı için hesaplandığında +1, süpersimetrik parçacık için hesaplandığında ise -1 bulunur. Buna göre; $-1 \neq (+1) \times (+1)$ veya $-1 \neq (-1) \times (-1)$ olduğu için her bir süpersimetrik parçacık ancak bir SM parçacığına ve bir de süpersimetrik parçacığı bozunmak zorundadır $(-1) = (+1) \times (-1)$.

Bunun sonucu olarak süpersimetrik parçacıklar ve standart model parçacıkları ile bir karışım oluşturamaz.