

T.C.
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK ENERJİLİ HADRON ÇARPIŞTIRICILARINDA
AYNI ANDA OLUŞAN W VE Z BOZONLARI İÇİN
KUANTUM RENK DİNAMİĞİ (QCD) TAHMİNLERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Bilal BAYRAM

FİZİK ANA BİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI
Doç. Dr. Kamuran DİLSİZ

BİNGÖL
2023

**YÜKSEK ENERJİLİ HADRON ÇARPIŞTIRICILARINDA AYNI ANDA
OLUŞAN W VE Z BOZONLARI İÇİN KUANTUM RENK DİNAMİĞİ (QCD)
TAHMİNLERİ**

Kamuran Dilsiz danışmanlığında, Bilal Bayram tarafından hazırlanan bu çalışma 20/06/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Fizik Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

Başkan	: Prof. Dr. İskender DEMİRKOL	İmza	:
Üye	: Doç. Dr. Kamuran DİLSİZ	İmza	:
Üye	: Doç. Dr. Hasan OĞUL	İmza	:

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulunun// tarih ve/
nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Zafer ŞİAR
Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının yürütülmesinde beni yönlendiren, bilgi ve tecrübelerinden yararlanma şansını vererek bu aşamaya gelmemde yardımcı olan ve yardımlarını esirgemeyen saygıdeğer danışman hocam Doç. Dr. Kamuran DİLSİZ'e ve beni destekleyen babam Dr. Muhittin BAYRAM'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek Lisans çalışmam boyunca her an yanımda olan, beni her zaman destekleyen aileme ve arkadaşım Özgür AKTAŞ'a teşekkür ederim.

Bu araştırmada yer alan tüm/kısmi nümerik hesaplamalar TÜBİTAK ULAKBİM, Yüksek Başarım ve Grid Hesaplama Merkezinde (TRUBA kaynaklarında) gerçekleştirilmiştir.

Bilal BAYRAM

Bingöl 2023

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	iii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	v
TABLolar LİSTESİ.....	vi
ÖZET.....	vii
ABSTRACT.....	viii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. W/Z Üretimi ve Bozunması.....	4
2. STANDART MODEL.....	6
2.1. Leptonlar.....	6
2.2. Kuarklar.....	6
2.3. Taşıyıcılar.....	7
3. MODERN PARÇACIK HIZLANDIRICILARI.....	8
3.1. Büyük Hadron Çarpıştırıcısı.....	9
3.2. Yüksek Enerjili Büyük Hadron Çarpıştırıcısı ve Gelecekteki Dairesel Çarpıştırıcı.....	10
4. KAYNAK ÖZETLERİ.....	13
5. W VE Z BOZONLARININ EŞ ZAMANLI OLUŞUMLARI HAKKINDA TEORİK BİLGİ.....	20
6. ROOT ANALİZ VE MCFM MONTE CARLO PROGRAMLARI.....	23
7. MATERYAL VE YÖNTEM.....	24
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	27
KAYNAKLAR.....	43
ÖZGEÇMİŞ.....	52

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

SM	: Standart Model
TGC	: Üçlü Ayar Eşleşmeleri
QGC	: Dörtlü Ayar Eşleşmeleri
LO	: Leading Order
NLO	: Next-to-leading Order
NNLO	: Next-to-next-to-leading Order
PDF	: Parton Dağılım Fonksiyonları
QCD	: Kuantum Renk Dinamiği
BHÇ	: Büyük Hadron Çarpıştırıcısı
CERN	: Avrupa Nükleer Araştırmalar Merkezi
CMS	: Compact Muon Solenoid
ATLAS	: A Toroidal LHC Apparatus
EW	: Elektrozayıf
SMEFT	: Standart Model Etkin Alan Teorisi
$\sqrt{s}$	: Kütle Merkez Enerjisi
(γ)	: Foton
(p_T)	: Transverse Momentum
FCC	: Gelecekteki Dairesel Çarpıştırıcı
FCC-ee	: Gelecekteki Dairesel Çarpıştırıcı Elektron/positron
FCC-hh	: Gelecekteki Dairesel Çarpıştırıcı Proton/proton ve iyon/iyon
μ_F	: Faktörizasyon
μ_R	: Renormalizasyon
α_S	: Güçlü çiftlenim sabiti
pb	: Picobarn
fb	: Femtobarn
N	: Olay sayısı
σ	: Tesir kesiti

L	: Entegre parlaklık
TeV	: Tera elektronVolt
Scale	: Ölçek
p-p	: proton-proton
CDF	: The Collider Detector at Fermilab
RHIC	: Relativistic Heavy Ion Collider
ALICE	: A Large Ion Collider Experiment
LHCb	: Large Hadron Collider Beauty
UA1	: Underground Area 1
UA2	: Underground Area 2
T	: Tesla
LEP	: Large Electron-Positron Collider
EGM	: Genişletilmiş ayar sektörü
QED	: Kuantum elektrodinamiği
ROOT	: Veri analiz programı
CPU	: Central processing unit
UV	: Ultraviolet
LHC	: Large Hadron Collider
W	: Weak boson
Z	: Zero boson

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.	Standart Modele Göre temel parçacıkların sınıflandırılması.....	7
Şekil 2.	Büyük Hadron Çarpıştırıcısı tüneli. Mavi borular vakum altında tutulan demet boruları ve bükücü mıknatısları, onların sağındaki beyazımsı borular ise helyum taşıyan soğutma düzeneğini içerir.....	10
Şekil 3.	Gelecekteki Dairesel Çarpıştırıcısının olası bir konumunu gösteren şematik bir harita.....	12
Şekil 4.	Proton anti-proton çarpıştırıcısında oluşan W ve Z bozonları'nın leading order Feynman diyagramları.....	21
Şekil 5.	Proton proton çarpıştırıcısında oluşan W ve Z bozonları'nın next-to-leading order Feynman diyagramları. Verilen bu diyagramlar pp çarpışması sonucu oluşan 28 diyagramdan sadece bir tanesidir.....	21
Şekil 6.	Proton proton çarpışması sonucu eş zamanlı oluşan W ve Z bozonları'nın LO Feynman diyagramları. Göstermiş olduğumuz bu diyagram çarpışma sonucu oluşan 6 diyagramdan sadece bir tanesini temsil etmektedir.....	22
Şekil 7.	Proton proton çarpışması sonucu eş zamanlı oluşan W ve Z bozonları'nın NLO Feynman diyagramları. Göstermiş olduğumuz bu diyagram çarpışma sonucu oluşan 130 diyagramdan sadece bir tanesini temsil etmektedir.....	22
Şekil 8.	13 TeV kütle merkez enerjisinde hesaplanan LO, NLO QCD sonuçlarının aynı enerjideki ATLAS sonuçları ile karşılaştırılmasını gösteren görsel.....	29
Şekil 9.	NNPDF3.1 ve diğer PDF'ler ile elde edilen NLO QCD sonuçları (Bütün PDF'ler NNLO mertebesinde).	33
Şekil 10.	$W^+ + Z$ ve $W^- + Z$ kanalları için LO ve NLO QCD kesitlerinin enerji ile değişimi ve artan enerji ile QCD mertebeleri arasındaki farklılığı gösteren görsel.....	38
Şekil 11.	$W^+ + Z$ (üst) ve $W^- + Z$ (alt) kanalları için LO ve NLO QCD kesitlerinin enerji ile değişimi ve artan enerji ile QCD mertebeleri arasındaki farklılığı gösteren görsel. W ve Z bozonları leptonlara bozunmaktadır.....	39

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1.	13 TeV kütle merkez enerjisinde $pp \rightarrow W^+ + Z$ ve $pp \rightarrow W^- + Z$ üretim kanalları için LO ve NLO QCD tesir kesitleri. Hata payları sırasıyla PDF, scale ve α_s 'dir ve bütün sonuçlar pb cinsindendir.....	28
Tablo 2.	14,27 Ve 100 TeV enerjilerinde farklı PDF'lerle elde edilen QCD tahminleri. Bütün sonuçlar pb cinsindendir.....	30
Tablo 3.	14, 27 ve 100 TeV kütle merkez enerjisinde $pp \rightarrow W^+ + Z$ ve $pp \rightarrow W^- + Z$ üretim kanalları için LO ve NLO QCD tesir kesitleri. Hata payları sırasıyla PDF, Scale ve α_s 'dir ve bütün sonuçlar pb cinsindendir.....	35
Tablo 4.	13, 14, 27 ve 100 TeV kütle merkez enerjisinde $pp \rightarrow W^+ + Z$ ($W^+ \rightarrow l^+ + \nu$ ve $Z \rightarrow l^+ + l^-$) ve $pp \rightarrow W^- + Z$ ($W^- \rightarrow l^- + \bar{\nu}$ ve $Z \rightarrow l^+ + l^-$) üretim kanalları için LO ve NLO QCD tesir kesitleri. Hata payları sırasıyla PDF, Scale ve α_s 'dir ve bütün sonuçlar fb cinsindendir.....	37

YÜKSEK ENERJİLİ HADRON ÇARPIŞTIRICILARINDA AYNI ANDA OLUŞAN W VE Z BOZONLARI İÇİN KUANTUM RENK DİNAMİĞİ (QCD) TAHMİNLERİ

ÖZET

Bu çalışmada proton çarpışmaları sonucu Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (BHÇ)'nin planlanan en yüksek enerjisi 14 TeV, BHÇ ile aynı tünelde fakat 27 TeV enerji ile başlatılacak olan Yüksek Enerjili BHÇ ve ileride kurulması planlanan ve 100 TeV'lik kütle merkez enerjisine sahip olacak dairesel çarpıştırıcı FCC'nin enerji değerlerinde eş zamanlı üretilen W ve Z bozonlarının yüksek mertebeli kuantum renk dinamiği tahminleri hesaplanmıştır. Hesaplamalar birçok parçacık üretimini bünyesinde barındıran MCFM Monte Carlo programı kullanılarak leading order (LO) ve next-to-leading order (NLO) mertebesine kadar yapılmıştır. W ve Z bozonlarının leptonik bozunumlarında dikkate alınarak yapılan hesaplamalarda W ve Z oluşumunda seçilecek olan partonların doğru tahmininin yapılabilmesi için LHAPDF kütüphanesindeki parton dağılım fonksiyonları (PDF)'nden NNPDF3.1, MMHT2014, MSTW2008 ve HERA2.0 parton dağılım fonksiyonları seçilmiştir. Daha sonra, seçilen PDF'ler ile elde edilen tesir kesiti sonuçları 14, 27 ve 100 TeV kütle merkez enerjilerinde karşılaştırılarak referans PDF (NNPDF3.1) seçilmiştir. Ayrıca, NNPDF3.1 PDF'si ile elde edilen 13 TeV kütle merkez enerjisindeki sonuçların aynı enerjide CMS işbirliği tarafından yayınlanmış sonuçlar ile karşılaştırılarak elde edilen NLO tesir kesiti sonuçlarının CMS sonuçları ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Daha sonra, NNPDF3.1 PDF'si kullanılarak 14, 27 ve 100 TeV kütle merkez enerjilerinde LO ve NLO tesir kesiti sonuçları elde edilmiştir. Sonuçların yanı sıra PDF, scale ve α_s hata payları hesaplanmıştır. PDF hata paylarının hesaplanması MCFM programı ile yapılmıştır. Scale hata payları renormalizasyon ve faktörizasyon değerlerinin seçilen referans değer olan W ve Z bozonlarının kütle toplamının iki katı ve yarısı alınarak hesaplanmıştır. Son olarak α_s hata payı $\alpha_s(M_Z) = 0,118$ değerinin 0,002 kadarlık pozitif ve negatif değerlerde değiştirilmesi sonucu elde edilmiştir. Böylece yüksek mertebeli kuantum renk dinamiği tahminlerinde düşük mertebeli LO'a göre daha küçük hata payları ile daha doğru sonuçların elde edildiği sonucuna varılmıştır. Son olarak, olay sayısı, entegre parlaklık ve tesir kesiti arasındaki ilişki kullanılarak 14, 27 ve 100 TeV kütle merkez enerjilerinde 13 TeV ile aynı istatistiği verecek olan data miktarı hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar $W^+ + Z$ kanalı için sırasıyla 14, 27 and 100 TeV enerjilerinde $57,62 fb^{-1}$, $24,87 fb^{-1}$, $5,53 fb^{-1}$ 'dir. $W^- + Z$ kanalı için ise sırasıyla 14, 27 and 100 TeV enerjilerinde $56,86 fb^{-1}$, $22,18 fb^{-1}$, $4,32 fb^{-1}$ 'dir. Bu sonuçlar daha yüksek enerjilerde daha az verinin daha düşük enerjilerle aynı istatistikleri sağladığını göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: CMS, ATLAS, CERN, LHC, W ve Z bozonları, Standart Model.

QUANTUM CHROMODYNAMICS (QCD) PREDICTIONS FOR THE SIMULTANEOUSLY PRODUCED W AND Z BOSONS IN HIGH-ENERGY HADRON COLLIDERS.

ABSTRACT

In this study, QCD predictions of simultaneously produced W and Z bosons were calculated at 14, 27 and 100 TeV center-of-mass energies since 14 TeV is the planned highest energy at the Large Hadron Collider, 27 TeV is the energy planned for the High Energy LHC (HE-LHC) and 100 TeV is the planned energy for the Future Circular Collider (FCC). All the predictions were calculated up to next-to-leading order (NLO) QCD using the MCFM Monte Carlo program. Four different parton distribution functions (PDFs) in the LHAPDF library were used to make the correct predictions while selection W and Z coming from the partons. The PDFs that are used in the calculations are NNPDF3.1, MMHT2014, MSTW2008 and HERA. A comparison of the QCD results that are obtained with these PDFs were performed and their consistency were tested. Among these PDFs, NNPDF3.1 were selected as reference PDF and its QCD results at 13 TeV were compared with the CMS results that were measured by the CMS collaboration at the same center-of-mass energy. Then, LO and NLO cross-section results were obtained at 14, 27 and 100 TeV center of mass energies using NNPDF3.1 PDF. In addition to the QCD results, PDF, scale and α_s uncertainties were calculated. MCFM program were used for the calculation of the PDF uncertainty. The scale uncertainties were calculated by taking twice and half of the mass sum of the selected reference value, the mass sum of the W and Z bosons, of the renormalization and factorization values. α_s uncertainties were obtained by changing the value of $\alpha_s(M_Z) = 0.118$ by 0.002. The results showed small uncertainties while the order of the QCD becomes higher. Finally, the amount of data that would give the same statistic with the data at 13 TeV center-of-mass energy were calculated at 14, 27 and 100 TeV center-of-mass energies by using the relationship between the number of events, integrated luminosity and the cross section. The results showed that we would need 57.62 fb^{-1} , 24.87 fb^{-1} , 5.53 fb^{-1} data at 14, 27 and 100 TeV for $W^+ + Z$ channel and 56.86 fb^{-1} , 22.18 fb^{-1} , 4.32 fb^{-1} data at 14, 27 and 100 TeV for $W^- + Z$ for channel to reach the same statistics with 13 TeV data. This shows that less data provide the same statistics while we reach the higher energies.

Keywords: CMS, ATLAS, CERN, LHC, W and Z bosons, Standard Model.

1. GİRİŞ

Evrendeki maddelerin dört temel elementten (toprak, hava, ateş ve su) oluştuğu inancından bugüne maddeyi oluşturan o en küçük yapı hakkında pek çok şey söylenegelmiştir. Aristoteles'in maddenin sürekli oluşuna olan inancının yanı başında Demokritos gibi bazı Yunan düşünürleri maddenin sonsuza kadar küçük parçalara ayrılamayacağını en sonunda bir bölünemeze "atomos"a varacağını iddia etmişler ve bu tartışma yüzyıllar boyunca devam etmiştir [1].

19 yy. başında John Dalton elementlerin kimyasal yapılarının bir ortaklık içerisinde bir araya geldiğini, şimdilerde molekül dediğimiz birimleri belirli oranlarda oluşturduklarını belirlemiştir. Elementler arasındaki bu 'katlı oranlar yasası' maddenin temelinde bölünemeyen parçacıkların varlığını gösteriyordu. Böylece Dalton, atom hakkında çalışılmış ilk sistematik modeli ortaya koymuş ve ilerleyen süreçte atom düşüncesi pek çok bilim insanı tarafından da kabul görmüştür. Aynı yüzyılda fiziğin pek çok farklı alanında da çalışmalar devam ederken elektriği, manyetizmayı anlamaya çalışan fizikçiler, atomu ve onun temel parçacıklarının keşfedilmesi sürecini hızlandırmışlardır. Örneğin; William Crookes tarafından geliştirilen 'Crookes Tüpü' katot ışınlarının ortaya çıkışını sağlamıştır. Yirminci yüzyılın ilk yıllarında J. J. Thomson'un katot ışınlarının doğasının anlamaya yönelik yapmış olduğu deneyler "bölünemez" kabul edilen atom fikrini kökünden sarsmış ve maddenin temel yapısı hakkında yeni bir çağın başlamasının önünü açmıştır. Thomson çalışmaları esnasında elde ettiği ışınların parçacıklı yapısını keşfetmiş ve bunların bir elektriksel yüke sahip olup olmadığını araştırma yoluna girmiştir. Hazırladığı yeni düzenekte bir elektriksel alan oluşturmuş ve katot ışınlarının yollarının saptığını görmüştür. Meydana gelen sapma artı yüklü levha yönünde olunca zıt yükler birbirini çekeceğinden katot ışınlarını meydana getiren parçacıkların eksi yüklü olduğunu tespit etmiş, defalarca tekrar ettiği deneylerinde eksi yüklü 'elektron' parçacığını keşfetmiş ve onun yük/kütle oranını ölçmüştür [2]. Elektronun sahneye çıkışı atom hakkında bilinen her şeyin değişmesine neden olmuştur.

Thomson'un 'üzümlü kek' modellemesini yaptığı konuşmasından birkaç yıl sonra atom içerisinde yoğun bir çekirdeğin olduğu ve yaptığı deneylerde α parçacıklarının nasıl saçılma yaptığını açıklayan yeni bir isim karşımıza çıkacaktır; Ernest Rutherford. Röntgen tarafından X ışınlarının keşfi ve Becquerel'in radyoaktiviteyi keşfiyle Rutherford, iki tür radyoaktivite olduğu ayrımını yapıp, bunlara alfa ve beta ışınları adını vermiştir. Böylece yönünü fiziğin bu yeni alanına çevirmiş ve radyoaktif atomların ışınlarını incelerken hazırladığı deney düzeneği ile atomun ortasında küçük bir hacimde artı yükün yoğunlaşmasının gerekliliğini bunun yanı sıra atomun boşluklu bir yapıda olduğunu deney sonuçlarına eklemiştir. Rutherford bu çıkarımına radyoaktif atomlardan yayılan alfa parçacıklarının atomlarla çarpıştıklarında uğradıkları sapmaları çözümleyerek ulaşmıştır [3]. Atomun çekirdeğinin ve artı yüklü proton parçacığının keşfi, maddenin temel parçacıklarının ve bu parçacıkların doğasının incelenmesi konusunda yeni çalışmaların hız kesmeden başlamasına sebep olmuştur. Örneğin Rutherford ile tanışan Niels Bohr, çekirdek etrafındaki yörüngelerde dolanan ve bir yörüngeden diğerine geçiş yaparken ışık salınımı ve soğrulması yapan elektronların dinamiğini açıklama problemiyle uğraşmış [4] aynı yıllarda Moseley uygun dalga boylarında X ışınları yayan bazı elementlerin çekirdek yüklerini ölçmekle uğraşmıştır [5]. Her ne kadar protonun 'birinci' olarak adlandırılıp maddenin temel birimi olduğuna inanılsa da James Chadwick'in protonla neredeyse aynı kütleye sahip fakat yüksüz olan nötronu keşfi nötronun da temel parçacık olarak kabul edilmesini gerekli kılmıştır [6]. Chadwick'in nötronu keşfi, Fermi'nin beta-radyoaktivitesi kuramı [7] ve protonların başka protonlarla ya da elektronlarla çarpıştırıldığı deneyler modern parçacık fiziği dönemini resmen başlatmış ve evrenin işleyişini, bu işleyişin mekanizmasını anlama yolunda fiziğe pek çok yeni alanlar ve yeni kuramlar oluşturulmasını sağlamıştır [8, 9].

Standart model yahut temel parçacıkların standart modeli, evreni oluşturan dört temel kuvvetten üçünü (elektromanyetizma, zayıf çekirdek kuvveti ve güçlü çekirdek kuvveti) içine alan ve bilinen tüm temel parçacıkları inceleyen modeldir. Kuantum alan teorisine göre, parçacıklar bütün boşluğu dolduran kuantum alan uyarılmalarıdır. Bütün fiziği kapsayan kuantum alan teorisinin bir sonucu olarak, evreni inşa eden, bununla birlikte sayısız olasılıkla etkileşime giren, çok sayıda parçacığı tanımlayabilir ve bu parçacıkları da Standart Model çerçevesinde inceleyebiliriz [10-13]. Standart model atom altı seviyede her geçen gün sayıları artarak keşfedilen temel parçacıkların, yükleri, ömürleri,

dönüş yönleri (spin), kararlılıkları gibi özellikleri göz önüne alınarak bir sınıflandırma yapmıştır. Bu model çok çeşitli fiziksel fenomenleri izah etmekte kullanılabilmekteyken cevaplayamadığı soruların alanlarına (kütleçekimi, nötrino kütleleri, anti-maddenin yokluğu, karanlık madde ve karanlık enerji, baryon asimetrisi) da bir basamak olmaktadır [14-18].

Parçacık fiziği kuvvetlerin, uzayın ve zamanın doğasını inceleme amacıyla özelleşmiş bir alan olarak karşımıza çıkarken incelediği temel parçacıkları birbirleri ile ilişkileri ve etkileşimleri açısından sınıflandırmak gerekmektedir. Fermiyonlar maddenin yapı taşlarıdır ve kütleleri vardır, bozonlar ise fermiyon etkileşimleri için kuvvet taşıyıcısı gibi davranırlar ve bazılarının kütlesi yoktur. Dört ayar bozonu olan gluon, foton, Z^0 ve $W^\pm$ bu grubun üyeleridir [19].

W ve Z ayar bozonlarının çift üretimi, standart modelin (SM) elektrozayıf bileşenini araştırır, çünkü bu kesitlerin yeni rezonanslar veya anormal üçlü ayarlı kaynakların varlığında önemli ölçüde daha büyük olacağı tahmin edilmektedir [20, 21]. Proton-proton çarpışmalarında bozon çifti üretimi için tesir kesitlerinin ölçümleri, SM'in elektrozayıf sektörünün temel bir testini sağlar. Elektrozayıf ayar grubunun değişmeyen doğası, üçlü ayar eşlemeleri (TGC'ler) ve dörtlü ayar eşlemeleri (QGC'ler) yoluyla ayar bozonunun kendi etkileşimlerine yol açar. Zayıf ayar bozon çifti üretimi, vektör bozonu saçılması yoluyla dörtlü ayar etkileşimlerinin yanı sıra üçlü ayar etkileşimlerini de içerir. Bu nedenle, çiftbozon (diboson) üretimi çalışması, elektrozayıf ayar grubunun hem zayıf etkileşimini hem de değişmeyen doğasını doğrudan test edebilir. Bozon çifti üretimi için next-to-leading order (NLO) ve next-to-next-to-leading order (NNLO) QCD düzeltmeleri, gluon ile başlatılan işlemlerin eklenmesi nedeniyle tahmin edilen tesir kesitleri üzerinde önemli etkiye sahiptir. CERN BHÇ'de mevcut olan enerjilerde geliştirilmiş olan kesitteki artış, deneysel belirsizliklere kıyasla önemlidir ve BHÇ bozon çifti kesit ölçümlerinin doğrudan yüksek dereceli QCD hesaplamalarını doğrulamasını sağlar. Tevatron çarpıştırıcısında proton-antiproton çarpışmalarında WZ üretiminin gözlemlenmesi, CDF [22, 23] ve D0 [24] deneyleri ile rapor edilmiştir. Proton-proton çarpışmalarında WZ üretim kesiti, BHÇ'de CMS deneyi ile $\sqrt{s} = 8$ TeV'de [25] ve ATLAS deneyi $\sqrt{s} = 7, 8$ ve 13 TeV'de [26-28] ölçülmüştür. Tüm ölçümler SM tahminleriyle iyi bir uyum içindedir.

Vektör bozonları elektronlara ve müonlara bozunmaları yoluyla gözlemlenir [29]. Elektrozayıf (EW) ayar bozonlarının proton-proton çarpışmalarında üretimi, esas olarak bir kuarkın ve bir antikuarkın yok edilmesinden oluşan zayıf Drell-Yan süreci [30] yoluyla gerçekleşir. Hassasiyet testlerinde merkezi bir rol oynamanın yanı sıra EW etkileşimlerinin gösterge yapısı ve EW mekanizması çalışmalarında simetri kırılması, vektör-bozon çifti üretiminde büyük bir ardalın (background) oluşturur.

SM yük parite asimetrisi gibi durumları açıklayamamasına rağmen günümüzde temel parçacıkları açıklamaya çalışan teorilerin en iyisidir. $W^{\pm}Z$ çiftlerinin üretimi, üçlü ayar bozon bağlantılarının değerli bir testini sunar ve SM'in önemli bir arka planını temsil eder [31]. BHÇ'den alınan verinin analizi sonucunda WW ve WZ kanallarının tesir kesiti hesaplamaları W ve Z'nin leptonik bozunumları düşünülerek hesaplanmıştır [32-33]. Ölçümler, Z bozonunun bir çift elektron veya müona bozunduğu ve W bozonunun bir nötrino ve bir elektron veya bir müona bozunduğu tamamen leptonik son durumları içermektedir [34]. Üst kuarkın özellikleri, BHÇ ve BHÇ'den önceki hızlandırıcı deneyleri ile ayrıntılı olarak araştırılmıştır. BHÇ'deki büyük kütle enerjisi ve parlaklık sayesinde, üst kuark'ın özellikleri incelenebilmiştir. Bunlar, bir Higgs bozonu [35-38] veya bir foton [39-42] ile birlikte üretilen üst kuarkların ölçümleriyle erişilen, Higgs bozonuyla eşleşmesini ve elektrozayıf etkileşimlerini içerir. Bir W veya Z bozonu ile ilişkili üst-kuark çiftlerinin ölçümleri, üst kuarkın [43-45] zayıf bağlantılarının doğrudan araştırılmasını sağlar. SM etkilerinden dolayı SM tahminlerinden herhangi bir sapma, Standart model etkin alan teorisi (SMEFT) [46-48] çerçevesi kullanılarak modelden bağımsız bir şekilde parametrelendirilebilir. SMEFT bağlamı süreçleri ATLAS [49,50] ve CMS [51,52] tarafından gözlemlendi ve ölçülen kesitler SM tahmini ile uyumludur. $W^{\pm}Z$ son durumları, kuarklar tarafından yayılan iki vektör bozonundan veya sanal bir W bozonunun TGC içeren bir $W^{\pm}Z$ çiftine bozunmasından kaynaklanır [53].

1.1. W/Z Üretimi ve Bozunması

Toplam W ve Z üretim kesitlerinin teorik tahminleri, yüksek mertebeli kuantum renk dinamiği (QCD) etkilerini içeren, parton dağılım fonksiyonları (PDF'ler) ile kıvrılmış parton-parton kesitlerinden belirlenir. W ve Z bozonları, kütsüz foton (γ) ile birlikte Weinberg, Salam ve Glashow tarafından önerilen birleşik elektrozayıf teorisinin bozonik

alanlarını oluşturur. W ve Z bozonları, 1983 yılında tam da bu amaç için tasarlanmış ve üretilmiş UA1 ve UA2 dedektörleri [54, 55] kullanılarak keşfedildi. W olaylarında yeniden oluşturulan leptonların transverse momentum (p_T) dağılımı, W kütesini belirlemek için kullanılırken, Z kütesi, Z olaylarında iki lepton çiftlerinin değişmez kütesini doğrudan yeniden yapılandırarak belirlendi. Vektör bozon kütleleri ve bozunma genişlikleri dâhil olmak üzere elektrozayıf parametrelerin mevcut deneysel ölçümleri, QCD ve SM öncü sıranın ötesindeki elektrozayıf kısmı testlerini sağlayacak kadar kesindir. Bu hassas ölçümler sadece elektrozayıf teoriyi test etmekle kalmaz, aynı zamanda teorinin sektörlerine, akım hızlandırıcı enerjilerinde doğrudan gözlemlenebilenlerden daha yüksek kütle ölçeklerinde olası pencereler sağlar. Bu sektörler, ışınsal düzeltmeler yoluyla elektrozayıf gözlemlenebilirliğe girerler. Z bozonunun parametreleri iyi çalışılmış olsa da [56], yüklü akım taşıyıcılarının özellikleri, W bozonları daha az kesinlik ile bilinmektedir. W ve Z bozonları için toplam üretim kesitlerinin hesaplamaları, parton kesitlerini, parton dağılım fonksiyonlarını, yüksek mertebeden QCD etkilerini ve farklı kuarkların ve antikuarkların W ve Z bozonlarına bağlanması için faktörleri içerir. Teorik hesaplamalar, PDF ve partonların zayıf bozonlara farklı bağlantılarını içerir. Önemli yüksek dereceli QCD düzeltmelerinden etkilenirler. Dâhil edilen W ve Z üretim kesitlerinin hesaplamaları, NLO [57, 58] ve NNLO'a göre yapılmıştır. Son zamanlarda, RHIC çarpıştırıcı deneyleri [59, 60] $\sqrt{s} = 0,5$ TeV'de pp çarpışmalarında W üretiminin ilk gözlemini bildirmiştir. W ve Z bozonlarının BHC'de bol miktarda üretilmesi beklenmektedir [61]. Öngörülen büyük veri seti ve yüksek BHC enerjisi, daha önce keşfedilmemiş bir kinematik alanda üretim özelliklerinin ayrıntılı ölçümlerine izin verecektir. Bu koşullar, çarpışmaların pp doğası ile birlikte, parton dağıtım fonksiyonları üzerinde yeni kısıtlamalar sağlayacak ve QCD'nin kesin testlerine izin verecektir. Leptonik dallanma fraksiyonu ve W bozonunun genişliği, toplam W ve Z kesitleri için NNLO tahminleri ve Z bozonu toplam ve leptonik kısmi genişliklerinin ölçülen değerleri kullanılarak ölçülen W/Z kesit oranından çıkarılabilir [62].

2. STANDART MODEL

Temel parçacıklar kendilerinden daha küçük parçacıklara bölünemeyen parçacıklardır. Standart model bu parçacıkları ve özelliklerini en iyi açıklayan modeldir. Bu model temel parçacıkları, elektriksel yüklerine ve kuantum sayılarına göre sınıflandırır. Elektronun enerjisini açısal momentumunu ve elektrik yükünü örnek olarak verebiliriz. Bu modele göre, her parçacığa ait bir karşıt parçacık vardır. Karşıt parçacıklar eş oldukları parçacıkla aynı kuantum sayılarına sahiptir, tek farkı ters yüke sahip olmasıdır. (Elektron ve pozitron gibi). Bugünkü görüşe göre, tüm madde üç çeşit temel parçacıktan oluşmaktadır. Bunlar: leptonlar, kuarklar ve bunlar arasındaki kuvvetlerin taşıyıcılarıdır. Şekil 1 SM'ye göre temel parçacıkların sınıflandırılmasını göstermektedir. Buna göre temel parçacıklar aşağıdaki alt başlıklarda belirtildiği gibidir.

2.1. Leptonlar

Yüklerine, elektron sayılarına, müon sayılarına ve tau sayılarına göre sınıflandırılan altı çeşit lepton vardır. Bunlar üç ailede toplanırlar. Ayrıca her leptonun bir antileptonu da olmak üzere toplam oniki tane lepton vardır. Leptonlar güçlü etkileşim yapamazlar, renk yükleri yoktur ve serbest dolaşabilirler. Leptonları kendi aralarında yüklü leptonlar ve nötr leptonlar olarak sınıflandırabiliriz. Yüklü leptonlar; elektron, müon ve tau'dur ve bunların hepsi -1 elektron yüküne sahiptir ve bu üç temel parçacığın +1 elektron yüküne sahip anti parçacıkları vardır. Nötr leptonlar ise bu leptonların nötrinolarıdır. Yüklü leptonlar diğer parçacıklarla birleşerek atom ya da pozitronyum gibi bileşik parçacıklar meydana getirirken nötrinolar diğer parçacıklarla çok az etkileşime girerler ve bu sebepten ötürü algılanmaları çok zordur.

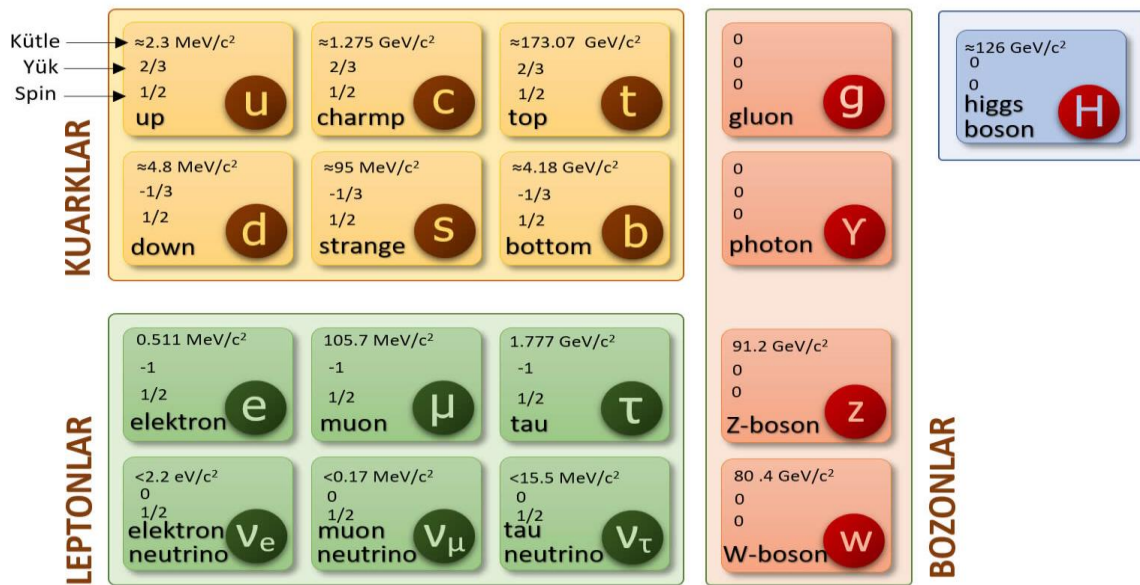
2.2. Kuarklar

Proton, nötron ve benzeri hadronları oluşturan temel parçacıklardır. Kuarklar, SM'in üç temel kuvveti olan, güçlü nükleer kuvvet, zayıf nükleer kuvvet ve elektromanyetik kuvvetin tamamıyla etkileşen tek temel parçacık ailesidir. Kuarklar hem elektrik yüküne

hem de renk yüküne sahip olan parçacıklardır. SM'e göre altı tane kuark vardır. Bunlar yukarı (u), aşağı (d), üst (t), alt (b), acayip (s) ve tılsımlı (c) kuraklardır. Her bir kuark kırmızı, mavi ve yeşil olmak üzere üç çeşit renk yüküne sahiptir. Ayrıca, her bir kuark'ın bir anti kuark'ı vardır. Böylece toplamda otuzaltı tane kuark vardır diyebiliriz. Kuarklar güçlü nükleer kuvvetle bir araya gelerek hadronları ve mezonları oluştururlar.

2.3. Taşıyıcılar

Evrendeki tüm madde dört temel kuvvetin etkisi altındadır. Bunlar; güçlü nükleer kuvvet, zayıf nükleer kuvvet, elektromanyetik kuvvet ve kütle çekim kuvvetidir. Güçlü nükleer kuvvetin taşıyıcıları gluonlardır, zayıf nükleer kuvvetin taşıyıcıları W ve Z bozonlarıdır, elektromanyetik kuvvetin taşıyıcıları fotonlardır. SM kütle çekim kuvveti dışındaki diğer üç temel kuvveti açıklayabilmektedir. Elektromanyetik kuvvet elektronları atomda tutan kuvvettir, zayıf nükleer kuvvet ise radyoaktivite ve nükleer füzyondan sorumlu kuvvettir. Güçlü nükleer kuvvet ise kuarkları bir arada tutan kuvvettir. Şiddet derecesine göre bu kuvvetleri en kuvvetliden en zayıf olanına doğru güçlü nükleer kuvvet, elektromanyetik kuvvet ve zayıf nükleer kuvvet olarak sıralayabiliriz.



Şekil 1. Standart Modele göre temel parçacıkların sınıflandırılması [63]

3. MODERN PARÇACIK HIZLANDIRICILARI

Temel parçacıklar; kozmik ışınlar, nükleer reaktörler ya da parçacık hızlandırıcıları ile elde edilebilirler. Mevcut büyük patlama nükleosentez modellerine göre, evrenin görünür maddesi %99, yaklaşık %75 hidrojen ve %25 helyum-4 olmalıdır. O halde, evrenin görünür kütesinin çoğunun, tüm baryonlar gibi sırasıyla yukarı ve aşağı kuarklardan oluşan proton ve nötronlardan oluştuğu sonucuna varılabilir. Dünya sürekli olarak uzaydan gelen yüksek enerjili parçacıklarla bombardımana tutulmaktadır ve bunlar atmosferin üst kısmındaki atomlara çarptıklarında, ikincil parçacıkları (çoğunlukla müonlar) meydana çıkarırlar. Kozmik ışınların atmosferimize çarpmasıyla az sayıda müon doğal olarak oluşurlar fakat sürekliliği olan müon üretmek için parçacık hızlandırıcılarına ihtiyaç vardır.

Nükleer reaktörlerde, ağır atom tanecikleri (Uranyum gibi) nötron ile bombardıman edilerek her seferinde farklı atomların ve yüksek enerjilerin ortaya çıktığı yapılan deneylerle gözlemlenmiştir. Yani bir radyoaktif çekirdek parçalandığında, nötronlar gibi nötrinolar, alfa parçacıkları, beta ışınları, gama ışınları vb. yayarlar [64]. Parçacık hızlandırıcı denilen dev düzenekler ise, yüksek elektriksel alan etkisi ile hızlandırılmış parçacıkları (elektronları veya protonları) hızlandırmayı ve onları bir hedefe çarpması yöntemini esas alır. Manyetik alan etkisi ile çarpıştırılma ile ortaya çıkan farklı parçacıklar incelenebilir hale getirilmeye çalışılır. Pozitron, müon, pion, kaon ve anti-protonlardan oluşan yoğun bir ikincil ışın üretilebilir ve bunlar da başka bir hedefe ateşlenebilir. Kararlı parçacıklar, elektronlar, protonlar, pozitronlar ve antiprotonlar, gerekli anda çıkarılmak ve kullanılmak üzere (güçlü mıknatıslar tarafından yönlendirilen) üretilen yeni parçacık akışı, farklı soğurucu ve mıknatıslar kullanılarak ayrılabilir. Bu işlemlerin yapılmasında ve oluşturulan çarpışmalarda ortaya çıkan enerji miktarları çok büyük olduğundan parçacık fiziği yüksek enerji fiziği olarak da adlandırılır [65-69].

Parçacık hızlandırıcılarını; Çizgisel (doğrusal) ve dairesel olmak üzere iki başlık altında toplamak mümkündür. Doğrusal hızlandırıcılar parçacıkları sadece tek bir yönde, bir seferde gidebileceği şekilde tasarlandığından ulaşılmak istenen enerji ne kadar büyükse o

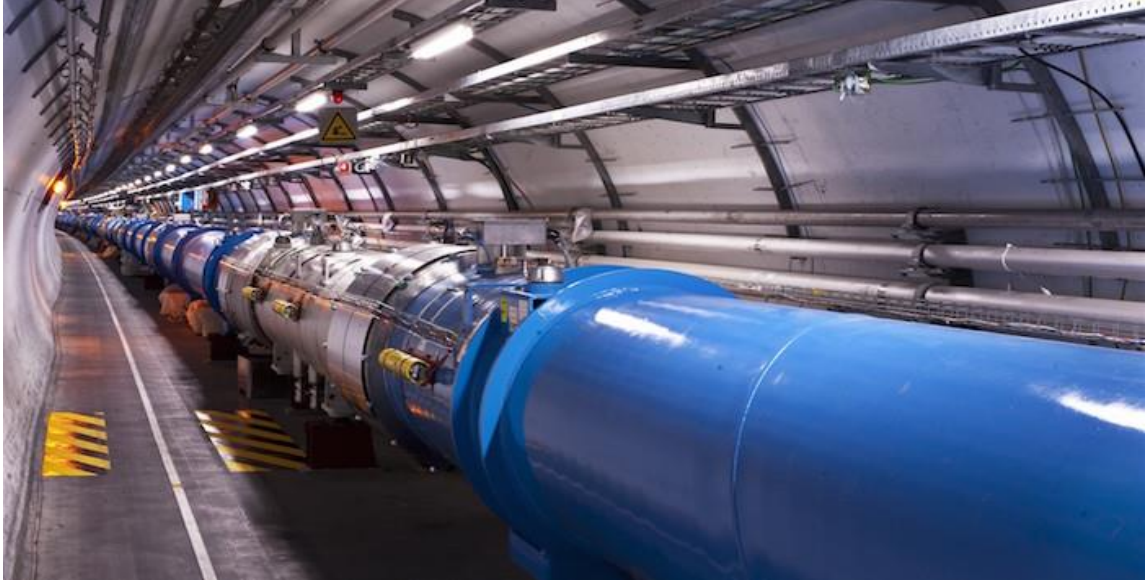
kadar büyük yapıların inşa edilmesi zorunluluğunu beraberinde getirmektedir. Dairesel hızlandırıcılarda ise doğrusal hızlandırıcılara göre daha yüksek enerjilere daha kolay bir şekilde ulaşılabilir. Bu durum dairesele hızlandırıcıların daha yüksek enerjilere izin verecek şekilde tasarlanmasını sağlar. Ancak, dairesele hızlandırıcıları sınırlandıran unsur yüksek enerjilerde oluşturulması gereken manyetik alanın büyüklüğüdür. Bu durum devasa mıknatısların inşasını zorunlu kılmaktadır.

3.1. Büyük Hadron Çarpıştırıcısı

Büyük Hadron Çarpıştırıcısı, İsviçre-Fransa sınırı arasında yer alan CERN’de bulunan yaklaşık 27 km’lik uzunluğu ile günümüzde dünyanın en büyük ve en güçlü parçacık hızlandırıcısıdır. BHÇ içinde süper iletken mıknatıslar bulunan halka şeklindeki tünellerden oluşur. Parçacıklar BHÇ’ye süper proton senkrotronu denilen bir ön hızlandırıcıdan yollar. BHÇ içinde proton demetleri geçtikleri yollar üzerinde bulunan radyo-frekans eğrilerinin oluşturduğu elektrik alan sayesinde hızlanarak ışık hızına çok yakın hızlara ulaştıktan sonra, manyetik alan yardımıyla algıçların merkezinde çarpıştırılırlar [70]. Bu çarpıştırma sonucunda yeni parçacıklar ortaya çıkar ve bu yeni parçacıklar algıçlarda incelenir. Şekil 2 BHÇ’nin bulunduğu 27 km’lik tünelin bir kısmını göstermektedir. Burada proton demetleri birbirlerine zıt yönde hareket ederler ve hepsinin ayrı ayrı hüzmeye borusu vardır. Her hüzmeye protonlar 7.7 cm uzunlukta birbiri ardına gelen boğçalar şeklinde gruplanmıştır ve 25 ns aralıklarla hareket ederler. BHÇ’nin başlangıç kütle merkez enerjisi 7 TeV olarak ayarlanmıştır. Bu enerji sırasıyla 8 ve 13 TeV’e kadar yükseltilmiştir. Yakın gelecekte bu enerji 14 TeV kütle merkez enerjisine kadar yükseltilecektir. Enerji miktarı ne kadar yüksek olursa çarpışmadan sonra o düzeyde daha çok parçacık ortaya çıkacak ve daha iyi sonuçlar alınabilecektir [71].

BHÇ’de “ATLAS, CMS, ALICE ve LHCb” olmak üzere 4 büyük algıç ve bazı küçük algıçlar vardır. Bu algıçların her biri bağımsız çalışırlar ve farklı amaçlar için kullanılırlar. Örneğin, ATLAS algıç maddenin ve evrendeki temel kuvvetlerin doğasını araştırır. CMS algıç yüksek enerjili parçacıkların özelliklerini incelemek ve bunun yanı sıra SM’i geliştirmek için öne sürülmüş parçacık fiziği modellerini sınamak için kullanılır. LHCb deneyinde b-kuark adı verilen temel parçacıklar ile ilgili deneyler

yapılarak madde ve anti-madde arasındaki farklılıklar incelenir. ALICE deneyinde ise güçlü kuvvetle etkileşen yüksek enerjili parçacıkların ve büyük patlamadan sonra var olduğu düşünülen kuark-gluon plazmasının özellikleri araştırılır [72].



Şekil 2. Büyük Hadron Çarpıştırıcısı tüneli. Mavi borular vakum altında tutulan demet boruları ve bükücü mıknatısları, onların sağındaki beyazımsı borular ise helyum taşıyan soğutma düzeneğini içerir [73]

3.2. Yüksek Enerjili Büyük Hadron Çarpıştırıcısı ve Gelecekteki Dairesel Çarpıştırıcı

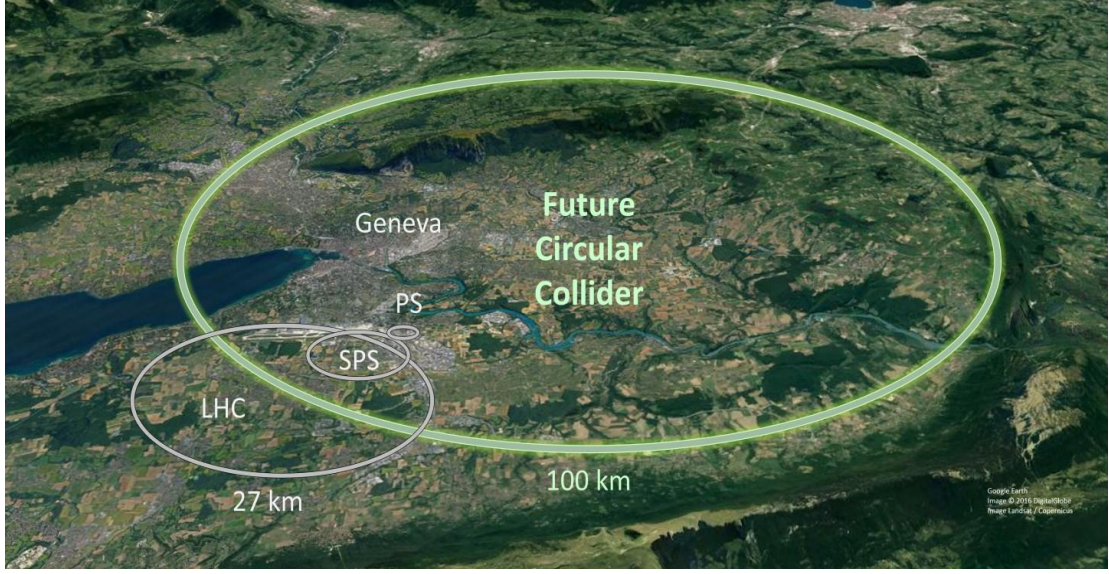
Yüksek Enerjili BHÇ projesi 27 TeV'lık kütle merkez enerjisine sahip ve çalışma süresi boyunca yaklaşık 15 ab^{-1} mertebesinde veri toplaması planlanan bir proton-proton çarpıştırıcısıdır. Bu çarpıştırıcı için yeni bir tünel oluşturulmayacak ve çarpıştırıcı mevcut BHÇ tüneline 16 T'lık mıknatıs kullanılarak çalıştırılacaktır. Yüksek Enerjili BHÇ'nin hedefleri FCC proton proton çarpıştırıcısı ile büyük ölçüde aynı olmakla beraber Yüksek Enerjili BHÇ'nin fizik potansiyeli daha güçlü enerjiye sahip FCC ile kıyaslanmamalıdır. Temel olarak bu çarpıştırıcının yüksek luminositeye sahip BHÇ (HL-LHC) ile FCC arasında bir köprü görevi üstlenmesi planlanmaktadır. Bu nedenle 27 TeV kütle merkez enerjisine sahip yüksek enerjili BHÇ'nin öncelikli olarak yeni fizik arayışlarında HL-LHC'nin erişimini genişletmeyi planladığını söyleyebiliriz. Yüksek enerjili BHÇ'nin HL-LHC'den yaklaşık iki kat fazla enerjiye sahip olması, yüksek enerjili BHÇ'nin HL-LHC'nin kütle erişimini yaklaşık olarak iki kat arttırabileceğini göstermektedir. Yüksek enerjili BHÇ hakkında daha fazla bilgiye ref [74]'den ulaşabilirsiniz.

Gelecekteki Dairesel Çarpıştırıcı, (FCC) BHÇ'den devralınabilecek yeni nesil daha yüksek performanslı parçacık çarpıştırıcıları için tasarımlar geliştirmektedir. FCC, yeni fizik arayışında 100 TeV'lik çarpışma enerjilerine ulaşmak amacıyla parçacık çarpıştırıcılarının enerji ve yoğunluk sınırlarını zorlamayı hedeflemektedir. FCC'de 3 farklı parçacık türü çarpışması planlanmaktadır. Bunlar; FCC-ee (elektron/pozitron), FCC-hh (proton/proton ve iyon/iyon) ve proton/elektron çarpıştırıcılarıdır [75].

FCC gelecekteki daireysel bir çarpıştırıcıyı inşa etmek ve işletmek için gerekli olan teknoloji, araştırma ve geliştirme programlarını dikkate alarak, hadron ve lepton daireysel çarpıştırıcıların potansiyelini araştırmak amacıyla altyapı ve operasyon kavramlarını analiz edecektir. Şekil 3 FCC'nin CERN'deki konumunu göstermektedir. Görüldüğü gibi FCC, LHC'den çok büyük ve yaklaşık 100 km uzunluğunda olacak ve 150'den fazla üniversite ve 1300 araştırmacı tarafından hazırlanan tasarım raporuna göre parçacıkların daha fazla hız ve enerji kazanmalarına olanak sağlayacaktır [76].

FCC, LHC sonrası dönem için CERN'deki potansiyel yüksek enerjili sınır daireysel çarpıştırıcıları için seçenekler geliştirecek ve gözlenebilir evrendeki enerjinin yaklaşık %25'ini oluşturan karanlık madde parçacıklarını aramaya yönelik çalışmaların hız kazanmasına yardımcı olacaktır. FCC çalışması ayrıca elektronlar ile protonlar için bir etkileşim noktası öngörmektedir [77].

FCC-ee ve FCC-hh'yi birleştiren FCC entegre projesi, LEP ve ardından BHÇ'de olduğu gibi paylaşılan ve uygun maliyetli bir teknik ve organizasyonel altyapıya dayanacaktır. Bu yaklaşım, düşük kütlede anlaşılması zor fiziksel süreçlere duyarlılığı bir kaç derece iyileştirir ve keşif en yüksek kütlelerde yeni parçacıklar için bir büyüklük sırasına ulaşır. Bu Higgs bozonu ve Elektrozayıf sektörünün özelliklerini benzersiz bir şekilde haritalandırmaya ve nötrino ışınları, çarpıştırıcı olmayan deneyler ve astrofizik deneyleri ile diğer yaklaşımları tamamlayan farklı karanlık madde aday parçacıkların keşfini genişletmeye olanak sağlayacaktır.



Şekil 3. Gelecekteki Dairesel Çarpıştırıcının olası bir konumunu gösteren şematik bir harita (Resim: CERN) [75]

4. KAYNAK ÖZETLERİ

ABD’de bulunan ulusal Fermi labaratuvarında konulandırılmış olan Tevatron hızlandırıcısı bir proton anti-proton arpıştırıcısıdır. Bu hızlandırıcı üzerinde bulunan CDF algıcının sağladığı veri ile $1,2 \text{ fb}^{-1}$ ’lık entegre parlaklıkta ve $\sqrt{s} = 1,96 \text{ TeV}$ ’lik enerjide yüklü bir lepton ve en az iki jet içeren WW ve WZ bozonlarının üretimi yapılmıştır [78]. Bu bozunma kanalındaki iki bozon retimi W + jet background (ardalan) olayları nedeniyle o dönemlerde gözlemlenememiştir ve tesir kesiti $2,09 \pm 0,12 \text{ pb}$ olarak hesaplanmıştır [78]. Ayrıca, CDF algıcı tarafından alınan veri ile yapılan bir başka çalışmada $\sqrt{s} = 1,96 \text{ TeV}$ ’deki proton anti-proton çarpışma verileri kullanılarak gerçekleştirilmiş olan elektron veya müon’lardan elde edilen WW+WZ tesir kesitinin ölçümleri rapor edilmiştir. Yapılan analiz sonunda hesaplanan tesir kesitinin değeri $\sigma_{p\bar{p} \rightarrow WW + WZ} = 16,0 \pm 3,3 \text{ pb}$ ’dır ve bu sonuç SM tahminleriyle tutarlıdır [79]. CDF gurubu tarafından gerçekleştirilmiş olan başka bir çalışmada bir lepton ve iki jet ile birlikte WW+WZ retim kanalı incelenmiştir. Bu incelemede entegre parlaklık değeri $4,3 \text{ fb}^{-1}$ ’dır. Benzer şekilde bu çalışmada bulunan tesir kesiti değeri SM tahminleriyle uyumlu olup hesaplanan değer $18,1 \pm 3,3 \text{ (stat.)} \pm 2,5 \text{ (syst.) pb}$ ’dır [80].

WZ retim tesir kesitinin mevcut olan en hassas ölçümünün yanı sıra CDF gurubu tarafından proton anti-proton çarpışmalarında $\sqrt{s} = 1,96 \text{ TeV}$ ’lik bir kütle merkezi enerjisindeki WWZ bağlantılarının sınırlarının anlatıldığ WZ olayları,  yüklü lepton içeren bozunmalardan ve yüklü leptonların elektronlar veya müonlar olduğu bir nötrino tarafından yeniden oluşturulduğu bir çalışma yapılmıştır [81]. Dedektör tarafından toplanan $7,1 \text{ fb}^{-1}$ ’lık entegre parlaklığa sahip olan ardalan ile 63 tane aday olay gözlemlenmiştir. Ölçülen toplam tesir kesiti $\sigma_{p\bar{p} \rightarrow WZ} = 3,93^{+0,60}_{-0,53} \text{ (stat.)}^{+0,59}_{-0,46} \text{ (syst.) pb}$ olarak bulunmuştur [81]. W ve Z bozonlarının farklı ağır bozunma modeli ve ikincil bozunma tepe noktası özelliklerinin analizi, WW ve WZ üretimini bağımsız olarak lme olanağı sağladığından, CDF deneyindeki iki bozon (WW ve WZ) retim tesir kesitinin lm, Tevatrondaki veri setine dayalı olarak leptonik W bozunması ve son durumunda ağır kuarklardan kaynaklanan jetlerin olduğu durumlar dikkate alınarak sunulmuştur.

Analiz sonunda WW ve WZ üretimi için 2,9 ve 2,1 sigma oranında bir istatistik elde edilmiştir [82]. WW ve WZ üretim tesir kesitlerinin bir ölçümü leptonik W bozonu bozunması ve bir W veya Z bozonundan gelen ağır kuarklardan kaynaklanmaktadır. CDF gurubunun $9,4 \text{ fb}^{-1}$ 'lık entegre parlaklığa karşılık gelen tam veri seti kullanılarak $\sqrt{s} = 1,96 \text{ TeV}$ 'lik enerjide tesir kesiti $\sigma_{p\bar{p} \rightarrow WW+WZ} = 13,7 \pm 3,9 \text{ pb}$ olarak hesaplanmıştır [83]. Bu sonuç toplam üretim süreçlerinin 3,7 katını sağlamaktadır.

CDF ve D0 verileri kullanılarak yapılan bir başka çalışmada yüklü leptonlar veya nötrinoları içeren W veya Z olaylarının üretim tesir kesitinin birleşik bir ölçümü sunulmuştur [86]. Analiz edilen $p\bar{p}$ örnekleri kullanılarak $7,5\text{-}9,5 \text{ fb}^{-1}$ arası entegre bir parlaklığa karşılık gelen veri ile $\sqrt{s} = 1,96 \text{ TeV}$ 'de ölçüm yapılmış ve WZ ve ZZ tesir kesitlerinin toplamı $\sigma_{p\bar{p} \rightarrow WW+WZ} = 4,47 \pm 0,64(\text{stat.})_{-0,72}^{+0,73} \text{ (syst.) pb}$ olarak bulunmuştur [84]. Tevatron çarpıştırıcısının 1992-1993 çalışması sırasında gözlemlenen $13,7 \pm 0,7 \text{ pb}^{-1}$ 'lık entegre parlaklığa karşılık gelen veride D0 algıcı tarafından $\sqrt{s} = 1,8 \text{ TeV}$ 'de proton anti-proton çarpışmalarında olağan olmayan WW ve WZ üretimi aramasının sonuçları incelenmiştir [85]. Ayrıca, WW ve WZ üretimi için yapılan çalışmalarda WW Z ve WW γ bağlantılarına ilişkin limitler $96,0 \pm 5,1 \text{ pb}^{-1}$ 'lık bir entegre parlaklığa karşılık gelen veri örneği alınarak sunulmuştur [86]. D0 deneyinden alınan WW Z ve WW γ kanallarına benzer şekilde CDF deneyinde de üç ayar bozon çiftinin son durumlarının eş zamanlı uyumu yapılan çalışmalar arasındadır [87].

D0 deneyi tarafından yapılan bir çalışmada $\sqrt{s} = 1,8 \text{ TeV}$ 'lik $p\bar{p}$ etkileşimi sonucu son durumunda elektoron ve müon bulunan W bozon çift üretimi incelenmiştir. Bu araştırmada beş aday olay incelenmiş ve yaklaşık 97 pb^{-1} entegre parlaklığa karşılık gelen $3,1 \pm 0,4$ olaylık ardaalan olay gözlenmlenmiştir. Doğal olmayan bağlantıların sınırları, aday olaylardaki leptonların maksimum uygunluk uyumundan elde edilmiştir [88]. Genel örneğe uymayan WW γ ve WWZ bağlantılarına ilişkin sınırlar $\sqrt{s} = 1,8 \text{ TeV}$ 'de proton anti-proton çarpışmalarından üretilen WW ve WZ olayları üzerine yapılmış olan bir başka çalışmada sunulmuştur [89]. D0 algıcından alınan veri ile yapılan bu analizde, D0 algıcı kullanılarak toplanan verilerin analizinden elde edilen sonuçlar Fermilab'da yürütülen Tevatron çarpıştırıcı deneyinden 1992-1993 yıllarından önce yapılmış olan bir başka çalışma ile birleştirilmiştir. Toplam sonucun analizi W bozonunun transverse momentumunun transverse momentum spektrumuna uygun olduğu

sonucuna varılmıştır [89]. D0 verisi ile yapılan diğer bir çalışmada WZ üretim tesir kesiti $4,50^{+0,63}_{-0,66}$ pb ve ZZ üretim tesir kesiti $1,44^{+0,35}_{-0,34}$ pb olarak bulunmuştur ve bulunan sonuçlar SM tahminleri ile uyumludur [90]. WW ve WZ bozonlarının üretiminin ele alındığı bir diğer çalışmada WZ bileşenini WW bileşeninden ayırmak için b-jet ayrımı kullanılmıştır [91]. Yapılan analiz sonucunda tesir kesiti $\sigma_{WW} = 15,9^{+3,7}_{-3,2}$ pb ve $\sigma_{WZ} = 3,3^{+4,1}_{-3,3}$ pb olarak hesaplanmıştır [91].

CMS deneyi için yapılan bir tez çalışmasında proton çarpışmaları sonrası eş zamanlı oluşan W ve Z bozonlarının üç leptona bozunması ile hesaplanan tesir kesiti bir veri analiz tekniği geliştirilmesini sağlamıştır [93]. Toplamda 1 fb^{-1} 'lık entegre parlaklıkta yapılan simülasyon sonucu toplam tesir kesiti $723,4 \pm 27,6 \text{ (stat.)} \pm 144,7 \text{ (syst.) fb}$ 'dır. Hesaplanmış olan bu tesir kesiti teorik sonuçlar ile uyum sağlamış olup, proton çarpışmaları sonucu elde edilen ve üç leptona bozunan WZ olaylarının sayısı $43,5 \pm 6,6$ olarak, ardalan olayları ise $6,4 \pm 2,5$ bulunmuştur [92].

CMS işbirliği tarafından yapılan bir diğer çalışmada ise bir Z bozonunun bozunduğu son durumlarda $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$ 'deki pp çarpışmalarındaki WZ ve ZZ üretim tesir kesitleri rapor edilmiştir. Büyük Hadron Çarpıştırıcısında CMS algıcının topladığı veri ile W veya Z ayar bozonları W ve Z'nin leptonik bozunması sonucu tespit edilmiştir. CMS algıcının topladığı veri toplamda $18,9 \text{ fb}^{-1}$ 'lık entegre parlaklığa sahiptir. Hesaplanan tesir kesiti $\sigma_{pp \rightarrow WZ} = 30,7 \pm 9,3 \text{ (stat.)} \pm 7,1 \text{ (syst.)} \pm 4,1 \text{ (th.)} \pm 1,0 \text{ (lumi.) pb}$ $\sigma_{pp \rightarrow ZZ} = 6,5 \pm 1,7 \text{ (stat.)} \pm 1,0 \text{ (syst.)} \pm 0,9 \text{ (th.)} \pm 0,2 \text{ (lumi.) pb}$ olarak bulunmuştur ve bulunan sonuçlar SM tahminleriyle uyumludur [93].

CMS öncülüğünde yapılan bir diğer çalışmada NNLO QCD mertebesine kadar $W^{++} Z$ and $W^{-+} Z$ üretim kanallarının diferansiyel tesir kesiti hesaplamaları rapor edilmiştir [93]. Bu çalışmada W ve Z bozonlarının leptonik bozunmaları dikkate alınarak $W^{++} Z$ and $W^{-+} Z$ üretim kanallarının diferansiyel tesir kesitleri 8 ve 13 TeV'lik kütle merkezi enerjilerinde hesaplanmıştır. Doğru NNLO tahminleri yeni fizik arayışlarında büyük öneme sahiptirler. Bu nedenle NNLO mertebesinde hesaplanmış bu sonuçlar CMS ve ATLAS gibi temel deneylerin sonuçlarının karşılaştırılıp doğruluklarının onaylanması bakımından önemlidir. Böylece diferansiyel NNLO tahminlerinin mevcudiyeti,

BHÇ'deki WZ çalışmalarına dayanan zengin fizik programında çok önemli bir rol oynayacaktır [94]. CMS deneyi ayrıca $\sqrt{s} = 8$ TeV enerji ve $19,6 \text{ fb}^{-1}$ entegre parlaklığa karşılık gelen pp verisi ile WZ diferansiyel tesir kesitinin son durumunda elektronlar ve müonlar olan vektör bozonları kullanarak ölçmüştür. Ölçülen tesir kesiti değeri $\sigma_{pp \rightarrow WZ} = 24,09 \pm 0,87 \text{ (stat)} \pm 0,80 \text{ (theo)} \pm 1,40 \text{ (exp.)} \pm 0,63 \text{ (lumi.) pb}$ olarak bulunmuştur [95]. CMS verisi ile yapılan bir diğer çalışmada $\sqrt{s} = 13$ TeV'lik enerjide $35,9 \text{ fb}^{-1}$ 'lık bir entegre parlaklığa karşılık gelen WZ üretim tesir kesiti $\sigma_{pp \rightarrow WZ} = 48,09^{+1,00}_{-0,96} \text{ (stat)}^{+0,44}_{-0,37} \text{ (theo)}^{+2,39}_{-2,17} \text{ (syst)} \pm 1,39 \text{ (lumi) pb}$ olarak ölçülmüştür [96].

CMS gurubu geçtiğimiz yıllarda 7 ve 8 TeV kütle merkez enerjisindeki verisini açık hale getirerek CMS üyesi olmayan bilim insanlarının kullanımına sunmuştur. Böylelikle CMS açık verisini kullanan bilim insanları geçmiş veride CMS gurubu tarafından incelenmemiş fizik ölçümlerini inceleme fırsatı bulmuştur. Buna ek olarak makine öğrenmesi ve yapay zekâ algoritmalarının geliştirilmesi gibi konularda açık veri büyük bir avantaj sağlamaktadır. Bu bağlamda CMS açık verisi ile incelenen bir çalışmada çeşitli fizik süreçlerinin tesir kesiti hesaplamaları yapılmıştır [96]. Böylece CMS gurubu tarafından incelenmemiş SM tesir kesitlerinin incelenmesi için yeni bir fırsat ortaya çıkmıştır. Yapılan çalışma sonucu CMS açık verisi ile ölçüm yapmanın fırsat ve zorlukları tartışılmış ve CMS ve ATLAS gurupları tarafından ölçülmüş olan tesir kesiti hesaplamalarıyla kıyaslama yapılarak CMS açık veri analiz stratejisi doğrulanmaya çalışılmıştır [97].

CMS grubu tarafından yapılmış olan “Measurements of production cross sections of WZ and same-sign WW boson pairs in association with two jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV” çalışmasında $\sqrt{s} = 13$ TeV'de pp çarpışmalarında aynı yüke sahip olan WZ bozonları ve 2 jet ile üretim tesir kesitleri hesaplamaları yapılmıştır ve leptonik bozunmaları dikkate alınmıştır. Elde edilen veriler 2016-2018 yılları arasında CMS algııcı ile toplanan 137 fb^{-1} 'lık entegre bir parlaklığa karşılık gelir ve SM tahminleriyle tutarlıdır [98].

ATLAS deneyinde yapılan bir çalışmada CERN'deki BHC tarafından üretilen $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$ 'de pp çarpışmalarının 34 pb^{-1} 'lık entegre parlaklığa sahip üretim tesir kesitinin bir ölçümü sunulmuştur. Ölçülen tesir kesitleri toplamda $\sigma_{pp \rightarrow WZ} = 41_{-16}^{+20} (\text{stat.}) \pm 5 (\text{syst.}) \pm 1 (\text{lumi.}) \text{ pb}$ olarak bulunmuştur ve elde edilen bulgular SM tahminleriyle uyumludur [99]. ATLAS gurubunun bir diğer çalışmasında ise WZ'ye bozunan ağır bir parçacığın son aşamadaki durumları incelenmiştir [100]. Çalışmanın yapılması için alınan veriler $1,02 \text{ fb}^{-1}$ 'lık entegre parlaklığa sahip ATLAS algıcı tarafından $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$ 'de BHC'deki pp çarpışmalarında kaydedilmiştir. Elde edilen verilerden seçilen WZ olaylarının kütle dağılımının SM ile tutarlı olduğu gözlemlenmiştir. Üretim tesir kesitinin dallanma oranı ile çarpımı sonucu elde edilen üst limitler, ağır bir parçacığın bir WZ çiftine bozunmasını öngören iki kıyaslama modeli kullanılarak elde edilmiştir [101]. WZ olaylarının leptonik bozunumu dikkate alınarak ATLAS işbirliği tarafından $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$ 'de toplanan $20,3 \text{ fb}^{-1}$ 'lık pp çarpışma verisi kullanılarak yapılan bir başka çalışmada bulunan sonuçlar SM öngörüsü ile tam olarak tutarlı değildir [102]. Bu çalışmadan elde edilen WZ olaylarının rezonanslarının üretim tesir kesitlerindeki üst limitler, W ve basitleştirilmiş ağır vektör bozon modelinden türetilmiştir.

ATLAS gurubu ayrıca aynı anda iki jete bozunan bir W veya Z bozonunun üretimini, 7 TeV kütle merkez enerjisinde kaydedilen $4,6 \text{ fb}^{-1}$ 'lık entegre parlaklığa sahip pp çarpışma verisini kullanarak incelemiştir. Hesaplanan tesir kesiti $\sigma_{pp \rightarrow WZ} = 68 \pm 7 (\text{stat.}) \pm 19 (\text{syst.})$ olarak bulunmuştur [103]. ATLAS algıcı tarafından incelenen bir başka çalışmada bir elektron ya da müon için çift diferansiyel tesir kesitinin bir ölçümü sunulmuştur. 2012'de LHC'de ATLAS algıcı tarafından toplanan $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$ enerjide $20,3 \text{ fb}^{-1}$ entegre parlaklığa sahip pp çarpışma verisi kullanılarak 116 GeV ile 1500 GeV arasındaki lepton çiftlerinin değişmez kütleleri incelenerek elektron ve müon kanalı ölçümleri birleştirilmiş ve böylece daha iyi bir deneysel kesinlik elde edilmiştir. Birkaç yeni PDF'yi kullanan ve NLO etkileri içeren QCD tahminleri ile bir karşılaştırma, verilen parton dağılım fonksiyonlarının kısıtlama potansiyeli olduğunu göstermiştir. Özellikle, foton PDF üzerindeki verilerin büyük etkisi gösterilmiştir [104].

ATLAS gurubu tarafından yapılmış olan bir başka çalışmada, bir W bozonunun leptonik bozunumu ve bir W veya Z bozonunun hadronik bozunumu dikkate alınarak WW veya WZ bozon çiftlerinin üretim kanalı çalışması yapılmıştır [104]. Bu analiz LHC’de ATLAS deneyi tarafından toplanan entegre parlaklığı $20,2 \text{ fb}^{-1}$ ’a karşılık gelen $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$ ’de pp çarpışma verisi kullanılarak elde edilmiştir [105, 106]. Yapılan bu araştırmalar çok hassas olmakla birlikte vektör-bozon füzyonunun kuark anti-kuark yok etme ve gluon-gluon füzyon mekanizmaları yoluyla dibozon rezonans üretimine dayanmaktadır. ATLAS öncülüğünde yapılan bir diğer çalışmada $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ ’lik enerjide $W^+ + Z$ ve $W^- + Z$ üretim tesir kesitlerinin ölçümleri sunulmuştur [106]. Veriler 2015 ve 2016 yıllarında LHC’deki ATLAS deneyi tarafından toplanmıştır ve toplam $36,1 \text{ fb}^{-1}$ ’lık bir entegre parlaklığa karşılık gelmektedir. Yapılmış olan bu çalışmada $W^+ + Z$ ve $W^- + Z$ olayları, ayar bozonlarının elektronlara ve müonlara leptonik bozunma modları hesaplanarak yeniden oluşturulmuştur. Hesaplanan $\sigma_{pp \rightarrow WZ} = 63,7 \pm 1,0(\text{stat.}) \pm 2,3(\text{syst.}) \pm 1,4(\text{lumi.}) \text{ fb}$ değerindeki tesir kesiti NNLO düzeltmesine karşılık gelen $(61,5^{+1,4}_{-1,3} \text{ fb})$ SM tahmini ile uyumludur [106]. $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ ’lik ve $36,1 \text{ fb}^{-1}$ ’lık bir entegre parlaklığa karşılık gelen ATLAS verileri ile yapılan diğer bir çalışmada, yeni yüklü vektör bozonlarının WZ ayar bozon çiftlerine bozunması, genişletilmiş ayar sektörüne (EGM) sahip modeller de dahil olmak üzere yeni fiziğin birçok senaryosunda tahmin edilmiştir.

W ve Z bozonlarının üretimine yönelik birçok veri sunan LHCb algıcı BHÇ üzerinde bulunan özel amaçlı algıçlardan biridir. LHCb gurubu $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$ ’lik enerjideki son durumunda iki müon bulunan Z bozonu ($Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$) analizini ve bir müon ve nötrino bulunan W bozonu ($W^+ \rightarrow \mu^+ \nu, W^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}$) analizini çalışmıştır. Yaklaşık $37,1 \pm 1,3 \text{ pb}^{-1}$ entegre parlaklığa karşılık gelen veri ile yapılan bu analiz elektrozayıf bozon üretimi hakkında bilgi sunmuştur [107]. Tau leptonunun son durumlarında ise Z bozunmaları için 247 pb^{-1} entegre parlaklığa karşılık gelen veri kullanılmıştır. Burada bir tau leptonu, bir müon ve nötrinoya bozunmasıyla tanımlanmıştır. Tesir kesiti sonuçları; $\sigma(W^+ \rightarrow \mu^+ \nu) = 808 \pm 7 \pm 28 \pm 28 \text{ pb}$, $\sigma(W^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}) = 634 \pm 7 \pm 21 \pm 22 \text{ pb}$, $\sigma(Z \rightarrow \mu \mu) = 74,9 \pm 1,6 \pm 3,8 \pm 2,6 \text{ pb}$ olarak ölçülmüştür. Sunulan bu verilerde ilk hata payı istatistiksel, ikincisi sistematik ve üçüncüsü ise parlaklık hata payını temsil etmektedir. Son durumunda müon bulunan W ve Z bozonları için diferansiyel ölçümler, tesir kesit oranları ve W yük asimetrisi ile aynı kinematik bölgede ölçülmüştür. En yeni

PDF'ler kullanılarak elde edilen QCD tahminleri hesaplanmış ve NNLO mertebesinde hesaplanan teorik tahminler yapılmış olan ölçümlerle uyumludur [107]. Benzer bir çalışmada, 37 pb^{-1} 'lık entegre bir parlaklığa karşılık gelen pp verisi kullanılarak W bozonu tesir kesiti $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$ 'lik enerjide hesaplanmıştır [108]. Analiz sonucunda, W^+ bozonunun tesir kesiti $656 \pm 8 \pm 19 \pm 23 \text{ pb}$ ve W^- bozonunun tesir kesiti ise $76,7 \pm 1,7 \pm 3,3 \pm 2,7 \text{ pb}$ olarak ölçülmüştür [108]. Elde edilen bu ölçümlerde hata payları sırasıyla istatistiksel, sistematik ve parlaklık hata paylarıdır. Ayrıca, en yeni PDF'ler kullanılarak hesaplanan NLO mertebesindeki teorik tahminler ref. [108]'te elde edilen ölçümler ile uyumludur.

LHCb algıcısı kullanılarak pp çarpışmalarından elde edilen veriler üzerine yapılmış olan bir başka çalışmada, $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$ kütle merkez enerjisinde EW bozon üretiminin ölçümleri sunulmuştur [109]. Analiz LHCb dedektörü ile kaydedilen $2,0 \text{ fb}^{-1}$ entegre bir parlaklığa dayanmaktadır. Analizdeki bozunum kanalları $W \rightarrow \mu\nu$ ve $Z \rightarrow \mu^+\mu^-$ bozunma kanalları şeklinde tanımlanmıştır ve sonuçlar $\sigma_{W^+ \rightarrow \mu^+ \nu} = 1093,6 \pm 2,1 \pm 7,2 \pm 10,9 \pm 12,7 \text{ pb}$, $\sigma_{W^- \rightarrow \mu^- \nu} = 818,4 \pm 1,9 \pm 5,0 \pm 7,0 \pm 9,5 \text{ pb}$, $\sigma_{Z \rightarrow \mu^+ \mu^-} = 95,0 \pm 0,3 \pm 0,7 \pm 1,1 \pm 1,1 \text{ pb}$ olarak ölçülmüştür. Verilen hata paylarının ilki istatistiksel, ikincisi sistematik, üçüncüsü ise parlaklıktır. Farklı enerjilerdeki elektrozayıf bozon üretimi ölçümlerinin hesaplanmış olduğu başka bir LHCb deneyinde, BHÇ enerjilerinde SM için önemli bir test sağlamıştır ve protonun partonik içeriğinin sınırlandırılmasına izin verilmiştir. W ve Z bozonları, sırasıyla 1, 2, ve 0.29 pb^{-1} entegre parlaklıklarına karşılık gelen 7,8 ve 13 TeV kütle merkez enerjilerde toplanan veri örnekleri kullanılarak, leptonik son hallerde yeniden yapılandırılmıştır [110].

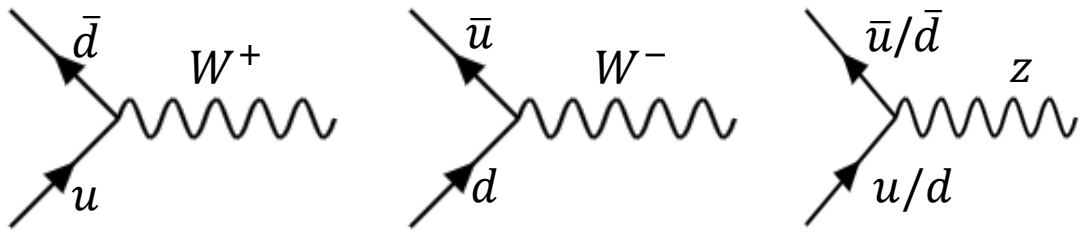
Literatürde NNLO sürecine kadar mevcut olan tahminler NLO EW düzeltmelerinide içermektedir [111]. Tesir kesiti tahminleri PDF'lere bağlıdır ve bu nedenle güçlü bir şekilde etkileşime giren parçacıkların temel etkileşimlerine duyarlıdır. Bu nedenle WZ bozonlarının üretimi BHÇ'de parton dinamiği modellerini test etmek için eşsiz bir fırsat sunar [112]. CERN deneylerinde, WZ kanalı üzerinde yapılan çalışmalar, kapsayıcı üretim tesir kesitleri leptonik dallanma oranlarının ölçümlerini açıklamaktadır. Tüm ölçümler entegre bir parlaklığa karşılık gelen pp çarpışma verileriyle gerçekleştirilmiştir [113].

5. W VE Z BOZONLARININ EŞ ZAMANLI OLUŞUMLARI HAKKINDA TEORİK BİLGİ

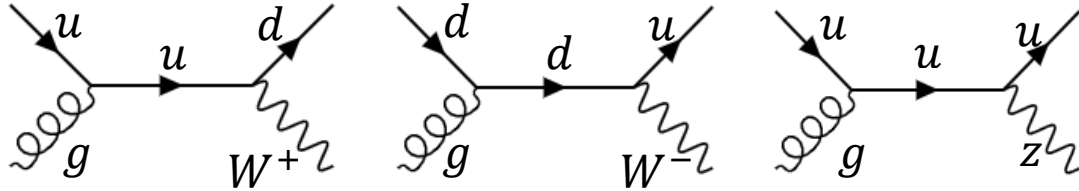
Kauntum elektrodinamiği (QED) atom altı parçacıklar arasındaki elektromanyetik ilişkiyi inceleyen ve bu ilişkiyi en iyi şekilde açıklayabilen kuramdır. Temelde coulomb yasasını kullanan QED kendisinden sonra gelecek ve kuarkların renk yüküylede ilgilenecek olan QCD'ye de temel teşkil etmektedir. QED'de elektromanyetik alan kuantize edilir ve bu alanların kaynakları olan yüklü parçacıklar tanımlanır. QCD ise kuarkların renk yükleri ile ilgilenen bir kuramdır. QED'de pozitif veya negatif olabilen tek bir elektrik yükü varken, QCD'de kırmızı, yeşil ve mavi olmak üzere üç çeşit renk yükü vardır. QCD'de gluonlar renk yüküne sahip oldukları için elektriksel yükleri sıfır olmasına rağmen kendi aralarında da etkileşime girerler. Bu doğrudan gluon-gluon etkileşiminde önemlidir. QED'de elektriksel yükün korunumlu olması gibi QCD'de renk yükü korunumlu olmak zorundadır. Bu nedenle parçacık etkileşimlerinde renk farkı gluonlarla taşınır. Bu durum gluonların bir renk birde anti-renk yüküne sahip olmalarını gerektirir. Kırmızı, mavi ve yeşil olmak üzere üç çeşit renk yükünün kombinasyonlarının bir araya getirilmesiyle toplamda dokuz gluon olması gerekirken gerçekte sadece sekiz gluon vardır. Bunun nedeni renk tekli olan gluon gerçekte mevcut değildir çünkü gluonlar da kuarklar gibi serbest parçacıklar değildirler bağlı durumdadırlar. Kısacası doğada serbest bir gluonun olmaması renk tekli kombinasyonunu iptal etmektedir. Gluonların fotonlardan farklı olması ve kendi aralarında çiftlenebilmeleri QCD'yi QED'den farklı ve daha kararlı kılmaktadır.

W ve Z bozonları zayıf etkileşimlerin taşıyıcı bozonları olan vektör bozonlardır. Her iki bozonda 1983 yılınca CERN'de proton anti-proton çarpıştırıcısında yapılan deneylerde (UA1 ve UA2) keşfedilmiştir [114]. Şekil 4 W ve Z bozonlarının proton-anti proton çarpıştırıcısında oluşumlarını temsil eden Feynman diyagramlarını göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi bir yukarı kuark ve anti aşağı kuark'ın etkileşimi sonucu W^+ bozonu, bir aşağı kuark ve anti yukarı kuark'ın etkileşimi sonucu W^- bozonu ve bir

yukarı ve anti yukarı veya bir aşağı ve anti aşağı kuark'ın etkileşimi sonucu ise Z bozonu oluşmaktadır. Şekil 5 pp çarpışması sonucu oluşan W ve Z bozonlarının NLO mertebesindeki Feynman diyagramlarını göstermektedir. Verilen Feynman diyagramına ek 29 feynman diyagramı daha mevcuttur. Bu tür diyagramların tesir kesitleri Feynman cebiri kullanılarak yapılmaktadır. Hesaplamalar yapılırken ilk olarak her bir diyagramın ayrı ayrı genlikleri hesaplanır. Daha sonra bütün genlikler toplanarak toplam genlik değeri bulunur. Bulunan bu genlik değeri tesir kesiti eşitliğinde yerine konularak tesir kesiti değeri hesaplanır.

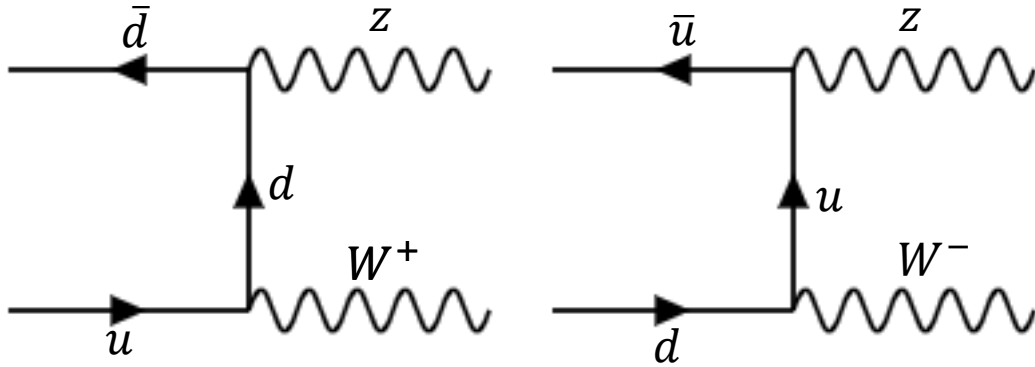


Şekil 4. Proton anti-proton çarpıştırıcısında oluşan W ve Z bozonlarının leading order Feynman diyagramları

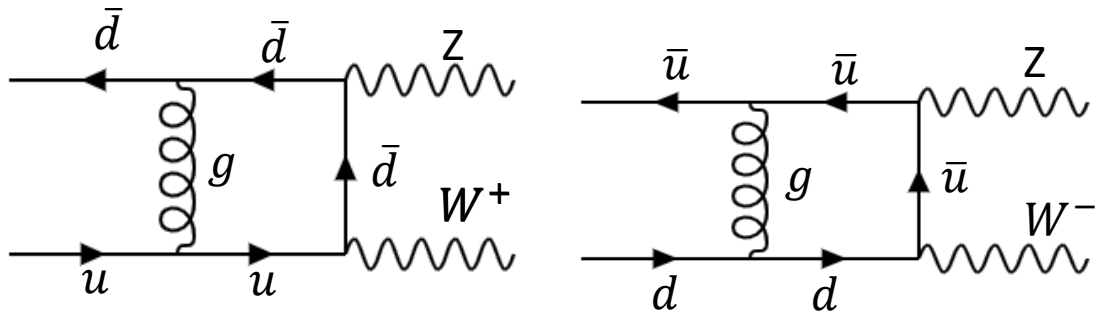


Şekil 5. Proton proton çarpıştırıcısında oluşan W ve Z bozonlarının next-to-leading order Feynman diyagramları. Verilen bu diyagramlar pp çarpışması sonucu oluşan 28 diyagramdan sadece bir tanesidir

Bu çalışmanın hedefi pp çarpışmaları sonucunda eş zamanlı oluşan W ve Z bozonlarının tesir kesitlerini hesaplamaktır. Her ne kadar yapılan hesaplamalar MCFM programı kullanılarak yapılmış olsa da, W ve Z'nin eş zamanlı oluştuğu Feynman diyagramlarının gösterilmesi hesaplamaların yapılması konusunda bize daha iyi bir fikir sunacağını düşünmekteyiz. Şekil 6 W ve Z bozonlarının pp çarpıştırıcısında LO mertebesinde oluşumlarını temsil eden Feynman diyagramlarını göstermektedir. Şekilde gösterilen bu diyagram oluşan altı diyagramdan sadece bir tanesini temsil etmektedir. Bu diyagrama tuhaf (s) ve tılsımlı (c) kuarklarında dahil olduğu beş diyagram daha mevcuttur. Genlik hesaplamaları yapılırken mümkün bütün diyagramlar dikkate alınmalıdır. Şekil 7 W ve Z bozonlarının pp çarpıştırıcısında NLO mertebesinde oluşumlarını temsil eden Feynman diyagramlarını göstermektedir. Bu diyagrama farklı süreçlerin (loop) dahil olduğu toplam 130 diyagram mevcuttur. Genlik hesaplamaları yapılırken 130 diyagram dikkate alınarak toplam genlik hesaplanmalıdır.



Şekil 6. Proton proton çarpışması sonucu eş zamanlı oluşan W ve Z bozonları'nın LO Feynman diyagramları. Göstermiş olduğumuz bu diyagram çarpışma sonucu oluşan 6 diyagramdan sadece bir tanesini temsil etmektedir



Şekil 7. Proton proton çarpışması sonucu eş zamanlı oluşan W ve Z bozonları'nın NLO Feynman diyagramları. Göstermiş olduğumuz bu diyagram çarpışma sonucu oluşan 130 diyagramdan sadece bir tanesini temsil etmektedir

6. ROOT ANALİZ VE MCFM MONTE CARLO PROGRAMLARI

Avrupa Nükleer Araştırmalar Merkezi (CERN) tarafından geliştirilmiş olan veri analiz programı ROOT, kuantum mekaniksel verilerin analizinde kullanılan en iyi parçacık fiziği programlarından biridir. Temelde C++ bilgisayar programı ile geliştirilmiş olan ROOT programı bünyesinde bulunan kütüphaneler ve yazılım tabanı sayesinde çok büyük ve karmaşık verileri analiz etme özelliğine sahiptir. Kuantum mekaniğinde, modeller tipik olarak yalnızca bir dizi parametreye bağlı olarak ölçümlerin olasılık yoğunluk fonksiyonunu tahmin eder ve deneysel analizin amacı, parametreleri, ölçümün belirli değerlerinin gözlemlendiği frekans dağılımından çıkarmaktır. Beklenen verilerin simülasyonu, veri analizinde bir diğer önemli husustur. Gerçek verilerle aynı şekilde analiz edilen Monte Carlo verilerinin tekrar tekrar üretilmesiyle, gerçek veri doğrulanabilir veya Monte Carlo verisi ile karşılaştırılabilir. Çoğu durumda, ölçüm hatalarının dağılımı kesin olarak bilinmez ve simülasyon, farklı varsayımların etkilerini test etme imkanı sunar. ROOT programının bütün bu gereksinim ve analizleri bir arada sunabilmesi ve tamamen ücretsiz bir program olması bu çalışmada kullanıma elverişli en iyi program olduğunu göstermektedir [115].

MCFM Monte Carlo programı birçok hadronik çarpışma sürecini bünyesinde bulunduran ve bu çeşitli süreçler için tahminler veren parton düzeyinde bir Monte Carlo programıdır. Bu programda birçok süreç NLO mertebesine kadar hesaplanabilmektedir. Bazı süreçlerde bir sonraki aşamaya geçildiğinde (order düzeyinde) NNLO mertebesinde hesaplamalar yapılabilmektedir. Ayrıca bu programda oluşan parçacık süreçlerinde son durum leptonlarına bazı eşik değerleride uygulanabilmektedir. Genelde eşik değerleri leptonların transverse momentumları ve pseudorapidity üzerine uygulanmaktadır. Ayrıca proton çarpışmaları sonucu oluşan jet süreçleri içinde uygulanabilen eşik değerleri programa tanımlanmıştır. Bu tezde seçmiş olduğumuz süreç olan W ve Z bozonlarının eş zamanlı üretimi kanalında sonuçlarımızı MCFM MC programı ile ürettikten sonra ROOT programı ile analiz ettik [116].

7. MATERYAL VE YÖNTEM

Tesir kesiti parçacıkların çarpışabilme ihtimalinin bir ölçüsüdür ve bize parçacıkların doğası hakkında bilgi verdiği için önemli bir parametredir. Kuantum mekaniğinde bir sürecin tesir kesiti hesaplaması pertürbasyon teorisi kullanılarak yapılabilmektedir. Ancak, hadronik süreçlerde tesir kesitinin hesaplanması yüksek mertebeli tahminlerde sapmalara neden olabileceği için pertürbasyon teorisi kullanılarak yapılamaz. Bu nedenle hesaplanacak olan sürecin ilk olarak pertürbatif QCD’de hesaplanabilen sürece indirgenmesi gerekmektedir. PDF’ler yardımıyla tesir kesiti süresi pertürbatif QCD’de hesaplanabilen partonik tesir kesiti sürecine indirgenebilir. Eşitlik 1 hesaplamalarımızda kullanılan tesir kesiti eşitliğini göstermektedir.

$$\sigma(pp \rightarrow W^{+/-} + Z) = \sum_{i,j} \int dx_i dx_j f_i(x_i, \mu_F^2) f_j(x_j, \mu_F^2) x [\widehat{\sigma}_0 + \alpha_S(\mu_R^2) \widehat{\sigma}_1 + \dots]_{i,j}, \quad (1)$$

Bu eşitlikte $f_{i,j}(x_{i,j}, \mu_F^2)$ terimleri PDFler, μ_F ve μ_R terimleri faktörizasyon ve renormalizasyon değerleri ve köşeli parantez içindeki kısım ise partonik tesir kesitidir. Bu hesaplamalar, kullanımı ücretsiz ve herkese açık Monte Carlo simülasyon araçları kullanılarak yapılmaktadır.

Bu tezde pp çarpışmaları sonucu eş zamanlı oluşan W ve Z bozonlarının yüksek mertebeli QCD tahminleri hesaplanmıştır. Bahsi geçen bu tahminler parçacıkların yüksek mertebeli düzeltmeleri olan tesir kesitleridir. Temelde Feynman hesaplamaları ile bulunabilen bu düzeltmeler MCFM [117] Monte Carlo programı kullanılarak yapılmıştır. Ancak MCFM programında özellikle NLO QCD düzeltmesinin CPU zamanının uzun olması, bu hesaplamayı bilgisayarımızda yapmamızı zorlaştırmaktadır. Bu nedenle MCFM programı Türk Ulusal Bilim e altyapısı (TRUBA) [118] portalına kurularak hesaplanacak olan işler TRUBA kuyruklarına yönlendirilmiştir.

MCFM programının yanında LHAPDF [119] kütüphanesi kullanılarak PDF hata paylarının hesaplanması yapılmıştır. MCFM programı ve LHAPDF kütüphanesine bağlı

olan ara yüz dosyamız kütle merkez enerjisi, olay sayısı ve parçacıkların bozunması sonucu oluşan leptonlar üzerine uygulanan eşik değerler gibi parametreleri içermektedir. W ve Z bozonlarının bozunması ile oluşan leptonlar üzerine uyguladığımız eşik değerleri CMS koloborasyonu tarafından yayınlanan 13 TeV kütle merkez enerjisindeki makaleye [120] yakın değerler tercih edilmiştir. Seçilen bu değerlere göre leptonların transverse momentumu (p_T^l) 25 GeV'den büyük seçilmiştir. Benzer şekilde pseudorapidity ($|\eta_l|$) değeri 2.5 seçilmiştir. Z bozonunun indirgenmiş kütlesi ise 71 GeV ile 111 GeV arasında seçilmiştir.

LO ve NLO tesir kesitleri hesaplanırken oluşan scale hata payında, UV ve IR radyasyonlarının etkisini minimuma indirmek amacıyla renormalizasyon ve faktorizasyon değerleri W ve Z'nin toplam kütlelerine eşit, toplam kütleinin iki katı ve toplam kütleinin yarısı olacak şekilde ayarlanmalıdır. Bu çalışmada dikkate alınan hata payları referans PDF olarak seçtiğimiz NNPDF3.1 PDF [121] modeline bağlı olarak PDF, scale ve α_s hata paylarıdır. Scale hata payları hesaplanırken μ_R ve μ_F değerleri başlangıçta W ve Z bozonlarının toplam kütlelerine eşitlenmiştir. Bulunan bu değer varsayılan değer olarak alınmıştır. Daha sonra μ_R ve μ_F değerleri eş zamanlı olarak W ve Z bozonlarının toplam kütleinin iki katı ve yarısı olarak seçilmiştir. Böylece scale hata payı varsayılan değer ile toplam kütleinin yarısı ve iki katı arasındaki fark alınarak asimetric olarak hesaplanmıştır. Bu durum eşitlik 2 ve eşitlik 3'teki formüllerle belirtilmiştir.

$$|\Delta scale_1| = QCD\ 1 (\mu_R = \mu_F = M_{W+Z}) - QCD\ 2 (\mu_R = \mu_F = \frac{1}{2}M_{W+Z}) \quad (2)$$

$$|\Delta scale_2| = QCD\ 1 (\mu_R = \mu_F = M_{W+Z}) - QCD\ 3 (\mu_R = \mu_F = 2M_{W+Z}) \quad (3)$$

Her iki eşitlikte de M_{W+Z} değeri W ve Z'nin toplam kütlelerine eşittir. QCD 1, QCD 2 ve QCD 3 değerleri hesaplanan LO ve NLO QCD tesir kesiti değerleridir. Bu yöntemle hesapladığımız scale hata payları Tablo 3 ve Tablo 4'te verilmiştir.

Scale hata payına ilaveten, çarpışma sonucu oluşan parçacıkların momentumunun bir kesrini ölçmek amacıyla PDF'ler kullanılmaktadır. Bunun için LHAPDF

kütüphanesindeki CT14 PDF [122], HERA2.0 PDF [123], MMHT2014 PDF [124] ve MSTW2008 PDF [125] PDF'lerini kullanılmış ve PDF hata payları MCFM program yardımıyla hesaplanmıştır. W+Z üretim kanalları için sırasıyla toplam ve leptonik bozunma süreçleri için PDF hata payları Tablo 3 ve Tablo 4'te verilmiştir. α_s çiftlenim sabiti başlangıçta 0,118 seçilip ana değerler elde edildikten sonra hata payının hesaplanabilmesi için bu değer 0,116 ve 0,120 arasında değiştirilerek varsayılan değer (0,118) ile aralarındaki fark alınarak hesaplanmıştır. α_s hata payı değeri hem toplam (Tablo 3) hemde leptonik bozunma süreci (Tablo 4) için hesaplanmıştır. Her üç hata payının (PDF, scale ve α_s) toplam değeri aşağıdaki eşitlikle hesaplanabilmektedir.

$$Hata\ Payı = \sqrt{PDF^2 + Scale^2 + \alpha_s^2} \quad (4)$$

Son olarak 13 TeV enerjisinde elde edilen data miktarının daha yüksek enerjilerde daha düşük miktar ile elde edilebilmesi için gerekli olan veri miktarı hesaplanmıştır. Bu hesaplamanın yapılabilmesi için Luminosity (parlaklık), tesir kesiti ve olay sayısı arasındaki ilişki eşitlik 2'de verildiği gibi kullanılmıştır.

$$N = \sigma \times L \quad (5)$$

Bu eşitlikte N olay sayısını, σ tesir kesitini ve L ışınlık değerini göstermektedir. Bu hesaplama ile 14, 27 ve 100 TeV enerjilerine çıkıldığında $pp \rightarrow W^+ + Z$ ve $pp \rightarrow W^- + Z$ üretim kanalları için 13 TeV enerjisi ile aynı istatistiğe sahip veri miktarını bulmuş olacağız.

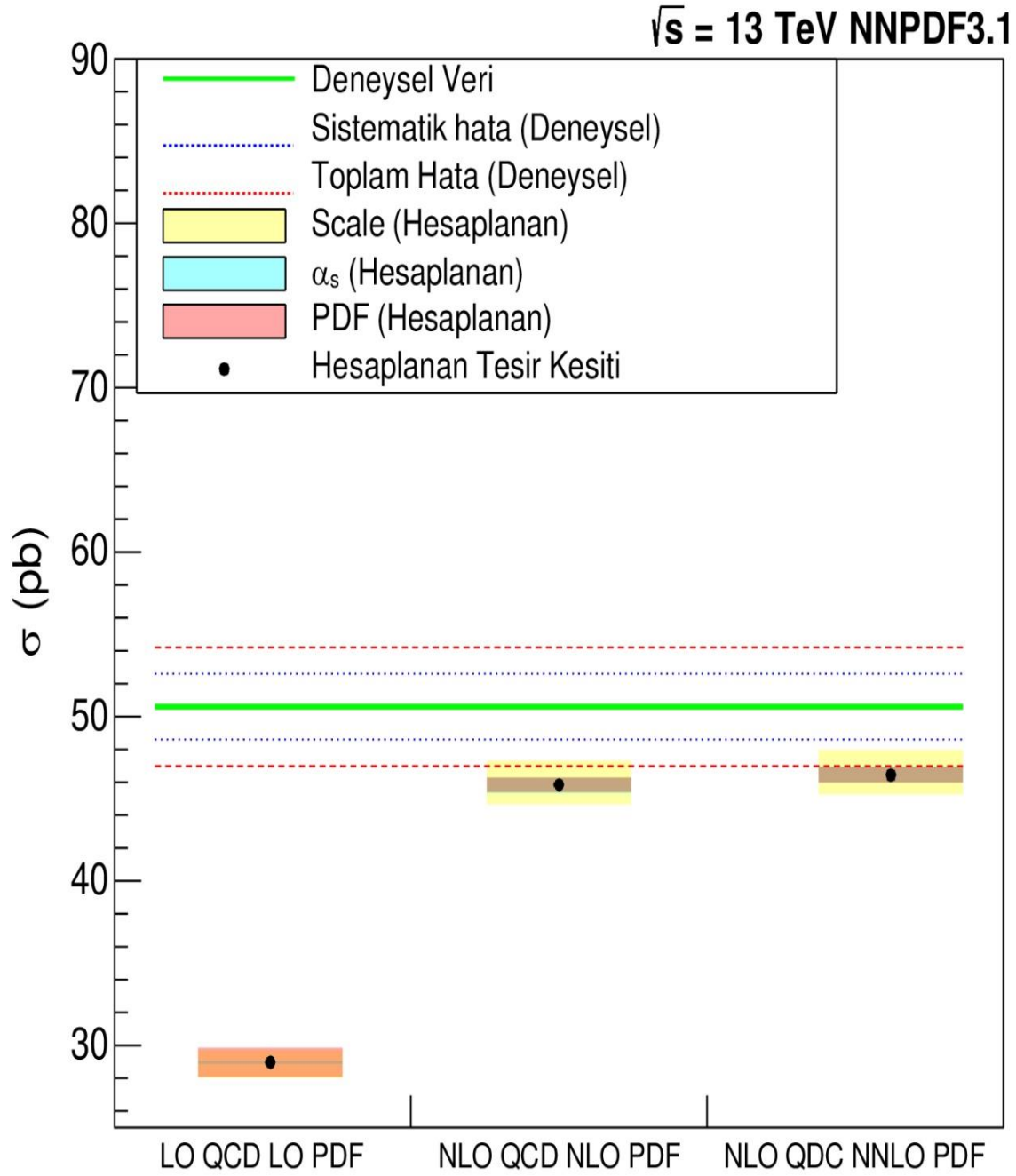
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Proton-proton çarpışmaları sonucu üretilen W ve Z bozonları hem QCD hesaplamaları için hemde elektrozayıf olayların hesaplanmasında önemli rol oynamaktadırlar. Bu kısımda, hadron çarpıştırıcılarındaki çarpışma enerjisinin etkisini test etmek amacıyla 13, 14, 27 ve 100 TeV enerjilerinde eş zamanlı oluşan W ve Z bozonlarının üretimi yapılmıştır. İlk olarak 13 TeV kütle merkez enerjisinde $pp \rightarrow W^{++} + Z$ ve $pp \rightarrow W^{-} + Z$ üretim kanalları için LO ve NLO tesir kesitleri hesaplanmıştır. Elde edilen sayısal değerler Tablo 1’de verilmiştir. MCFM programıyla elde edilen bu sonuçlar, yine aynı enerjide yapılmış ATLAS sonuçları [126] ile kıyaslandığında (şekil 8) kısmen farklılık gösterdikleri tespit edilmiştir. Ancak sonuçların ATLAS sonuçlarına oldukça yakın olması MCFM programında yazmış olduğumuz kodların doğruluğunu ve güvenilirliğini göstermektedir. Sonuçların ATLAS sonuçları ile tam olarak örtüşmemesinin nedeni NNLO mertebesinin henüz hesaplanamamış olmasındandır. NNLO düzeltmesine yakın bir değer elde etmek amacıyla NLO düzeltmesini NLO ve NNLO PDFleri ile ayrı ayrı hesapladık. Tablo 1’de görüldüğü gibi NNLO PDF ile elde edilen QCD düzeltmesi NLO PDF ile elde edilen QCD sonucuna kıyasla daha yüksektir.

Tablo 1. 13 TeV kütle merkez enerjisinde $pp \rightarrow W^+ + Z$ ve $pp \rightarrow W^- + Z$ üretim kanalları için LO ve NLO QCD tesir kesitleri. Hata payları sırasıyla PDF, Scale ve α_s 'dir ve bütün sonuçlar pb cinsindendir

Üretim Kanalı	LO	NLO	NLO (NNLO PDF)
$W^+ + Z$	$17,877^{+0,515+0,460+0,058}_{-0,515-0,571-0,058}$	$28,223^{+0,277+0,904+0,280}_{-0,277-0,704-0,285}$	$28,625^{+0,289+0,937+0,324}_{-0,289-0,721-0,266}$
$W^- + Z$	$11,089^{+0,369+0,280+0,022}_{-0,369-0,360-0,022}$	$17,631^{+0,163+0,564+0,155}_{-0,163-0,444-0,213}$	$17,828^{+0,178+0,591+0,184}_{-0,178-0,461-0,183}$
$W + Z$	$28,967^{+0,884+0,741+0,081}_{-0,884-0,931-0,081}$	$45,855^{+0,441+1,469+0,435}_{-0,441-1,190-0,499}$	$46,453^{+0,467+1,529+0,508}_{-0,467-1,182-0,450}$

Tablo 1'de görüldüğü gibi LO'dan NLO'ya geçildiğinde α_s hata payının nümerik değeri artmıştır. Bu hata payının yükselmesinin sebebi LO mertebesinin α_s çarpanına bağlı olmamasıdır, NLO düzeltmesinin ise α_s çarpanına bağlı olması nümerik değeri arttırmaktadır. Benzer şekilde NNLO değeri α_s çarpanının karesine bağlıdır ve bu nedenle NNLO mertebesine çıkıldığında nümerik değerde buna bağlı olarak artış gözlenecektir.

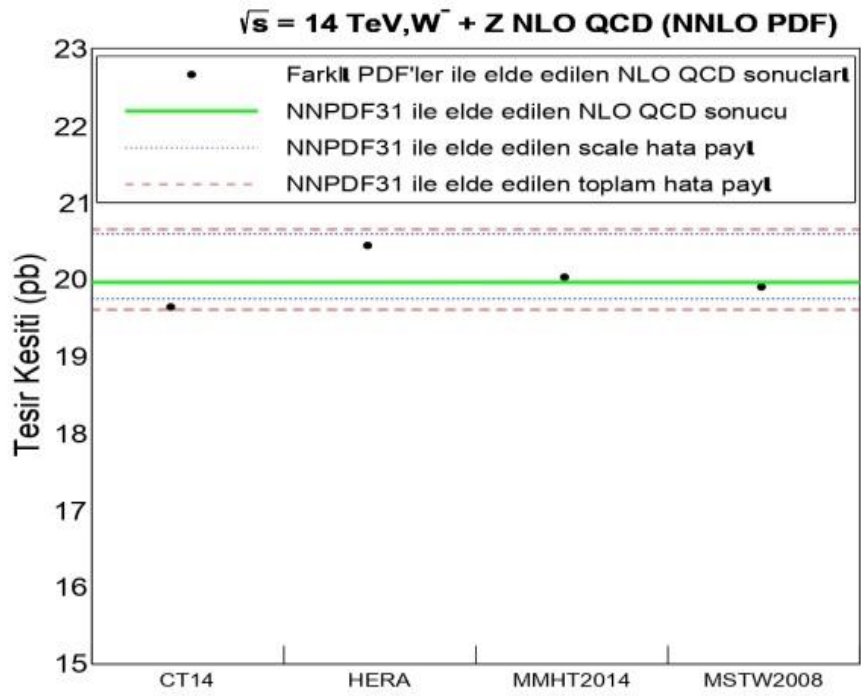
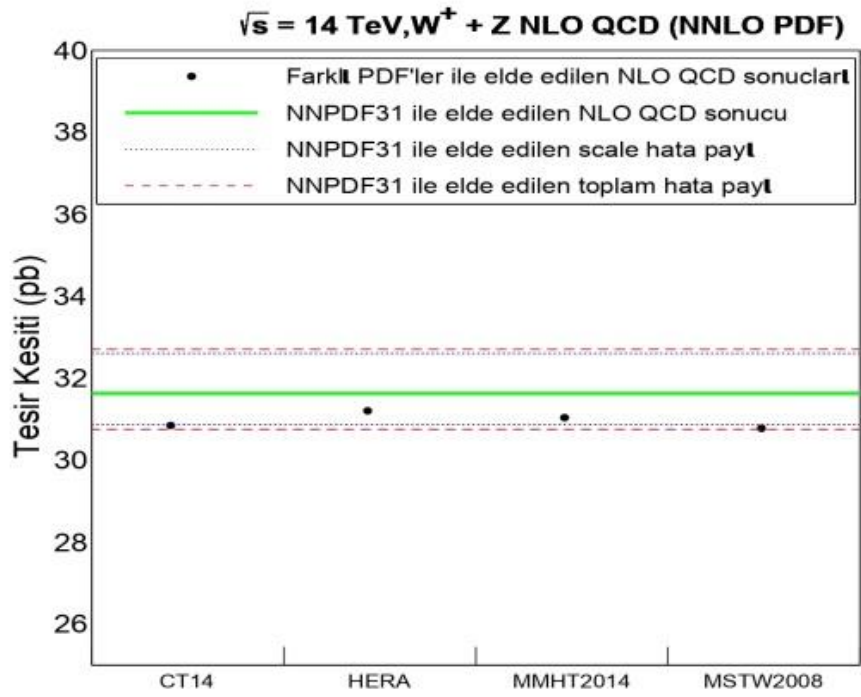


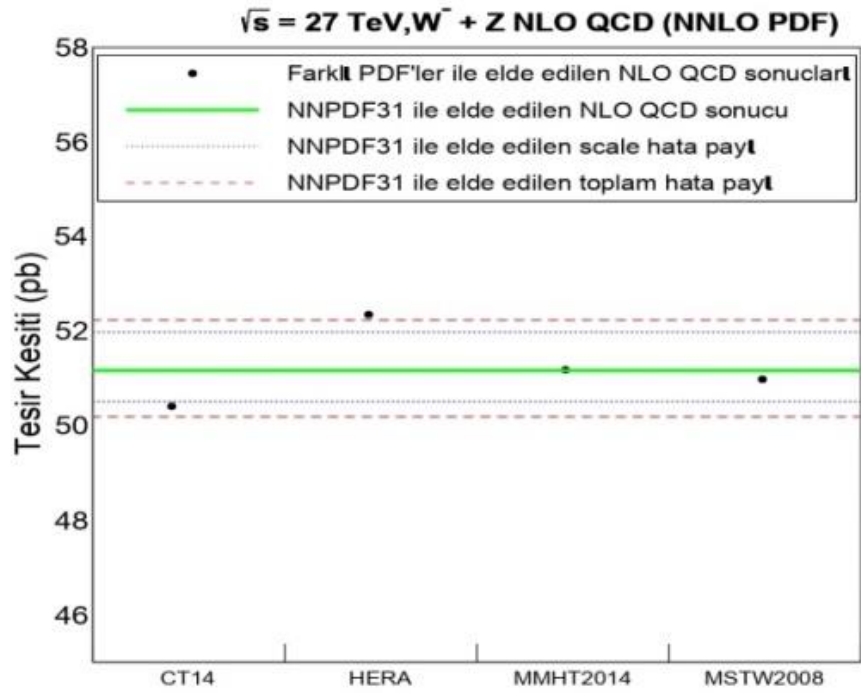
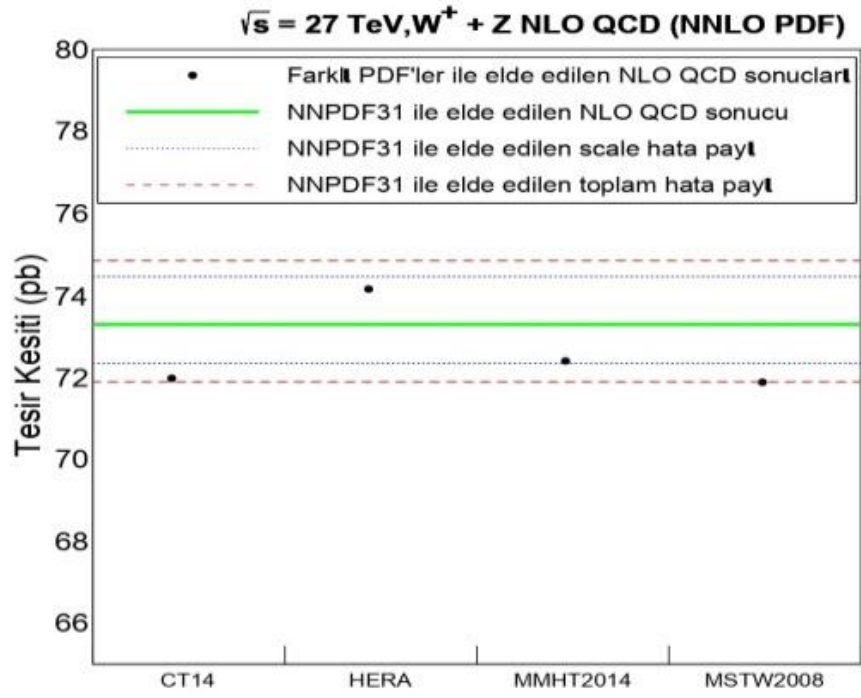
Şekil 8: 13 TeV kütle merkez enerjisinde hesaplanan LO, NLO QCD sonuçlarının aynı enerjideki ATLAS sonuçları ile karşılaştırılmasını gösteren görsel

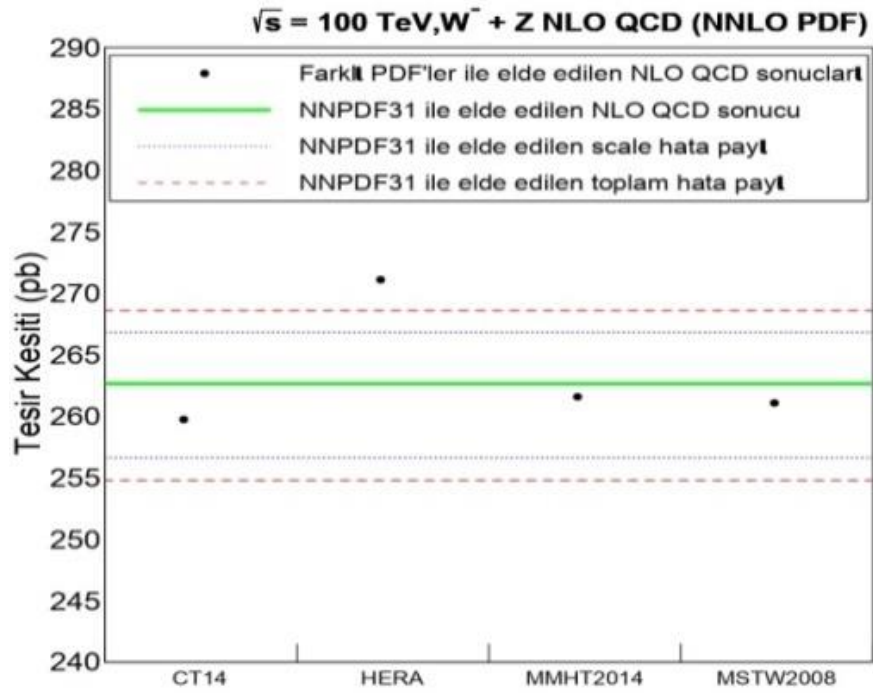
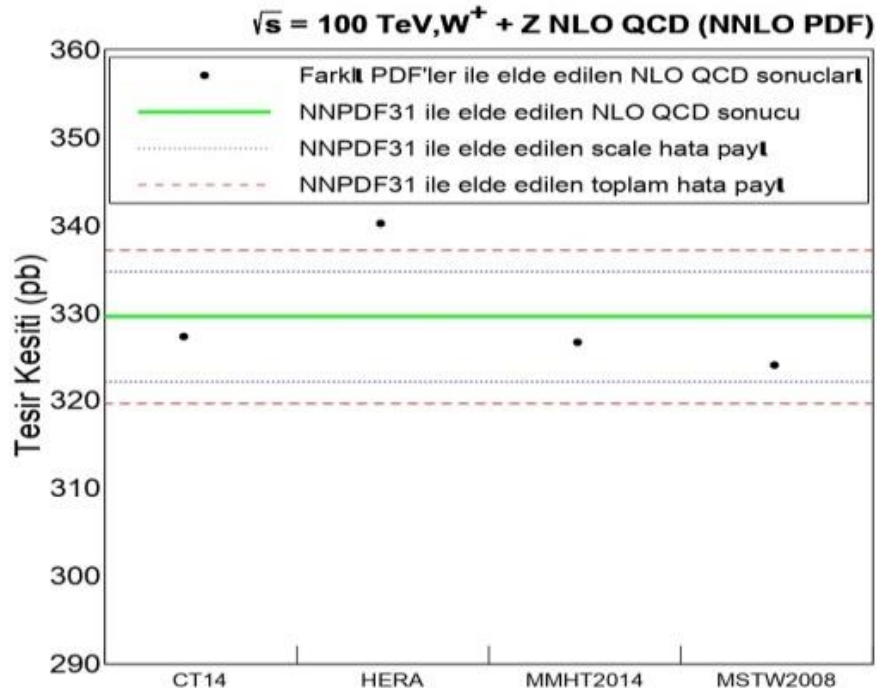
MCFM programında yazmış olduğumuz kodların güvenilirliği test ettikten sonra ikinci aşamada kullanmış olduğumuz PDF (NNPDF3.1)'in doğruluğunu, farklı PDF'ler ile kıyaslama yaparak test ettik. Dört farklı PDF ve üç farklı enerji (14, 27 ve 100 TeV) ile elde ettiğimiz QCD tesir kesiti sonuçları Tablo 2' de verilmiştir. Şekil 9, Tablo 2'de sunulan NLO (NNLO PDF) sonuçlarının NNPDF3.1 NLO (NNLO PDF) sonuçları ile kıyaslanmasını göstermektedir. Görüldüğü gibi NNPDF3.1 sonuçları diğer PDF'ler ile uyumludur. Hata payları dikkate alınmadan CT14 PDF ve NNPDF3.1 PDF arasındaki farklılık $W^+ + Z$ ($W^- + Z$) kanalı için sırasıyla 14, 27 ve 100 TeV enerjilerinde %2,50 , %1,80 ve %0,70 (%1,63 , %1,50 ve %1,13) civarındadır. Benzer şekilde HERA2.0 PDF ile bu farklılıklar; %1,35 , %1,16 ve %3,11 (%2,34 , %2,26 ve %3,11) civarında, MMHT2014 PDF ile bu farklılıklar; %1,90 , %1,23 ve %0,90 (%0,33 , %0,03 ve %0,41) civarında, MSTW2008 PDF ile bu farklılıklar; %2,76 , %1,96 ve %1,71 (%0,30 , %0,36 ve %0,60) civarındadır. NNPDF3.1'in hata payları dikkate alındığında bu farklılıkların çok küçük ve ihmal edilebilir oldukları görülmektedir.

Tablo 2. 14,27 Ve 100 TeV enerjilerinde farklı PDF'lerle elde edilen QCD tahminleri. Bütün sonuçlar pb cinsindendir

		CT14 PDF		HERA2.0 PDF		MMHT2014 PDF		MSTW2008 PDF	
	ENERJİ	NLO	NNLO	NLO	NNLO	NLO	NNLO	NLO	NNLO
$W^+ + Z$	14 TeV	30,383	30,848	31,017	31,206	30,524	31,039	30,553	30,779
	27 TeV	70,696	71,974	73,857	74,152	71,402	72,397	71,196	71,878
	100 TeV	324,518	327,311	343,124	340,189	329,330	326,656	325,053	324,054
$W^- + Z$	14 TeV	19,264	19,641	20,361	20,440	19,642	20,028	19,711	19,903
	27 TeV	49,411	50,410	52,149	52,350	50,357	51,180	50,445	50,981
	100 TeV	256,848	259,739	272,529	271,106	261,921	261,587	260,385	261,084







Şekil 9. NNP31 ve diğer PDF'ler ile elde edilen NLO QCD sonuçları (Bütün PDF'ler NNLO mertebesinde)

Tablo 3 W ve Z bozonlarının herhangi bir bozunmaya uğramadığı durumlar için proton çarpışmaları sonrasında eş zamanlı oluşan W ve Z bozonlarının LO ve NLO QCD tesir kesitlerini göstermektedir. Tabloda elde edilen sonuçlara göre NLO mertebesinde tesir kesiti LO mertebesine göre artış göstermektedir. Bu artışın miktarı $W^+ + Z$ kanalı için 14, 27 ve 100 TeV enerjilerinde sırasıyla %59,64 , %76,74 ve %113,30 pb kadardır. Benzer şekilde $W^- + Z$ kanalı için ise artış miktarı 14, 27 ve 100 TeV enerjilerinde sırasıyla %60,77 , %77,87 ve 115,21 pb kadardır. NLO PDF ve NNLO PDF ile elde edilen NLO QCD sonuçları arasında ise; $W^+ + Z$ ($W^- + Z$) kanalı için 14, 27 ve 100 TeV enerjilerinde sırasıyla %1,47 , %1,67 ve %1,70 (%1,19 , %1,60 ve %1,61) pb artış gözlemlenmiştir. Elde edilen bu sonuçlar enerji arttıkça LO ve NLO arasındaki farklılığın arttığını göstermektedir. Bu durum görsel olarak şekil 10'da gösterilmektedir. Tablo 3'te verilen sayısal değerlere göre sırasıyla $W^+ + Z$ üretim kanalı için 14 ve 27 TeV enerjilerinde NLO PDF hata payı LO mertebesine göre %47,47 ve %52,74 azalma göstermiştir. Bunun aksine 100 TeV enerjisinde PDF hata payı %0,26 kadarlık bir artış göstermiştir. Ancak NLO QCD tesir kesitinin LO QCD tesir kesitine göre artışı dikkate alındığında bu artış miktarının çok küçük olduğu görülmektedir. Ayrıca, $W^- + Z$ üretim kanalı için 14, 27 ve 100 TeV enerjilerinde NLO PDF hata payı LO mertebesine göre %55,98 , %57,38 ve %11 azalma göstermiştir. Leptonik bozunum süreçleri dikkate alındığında, PDF hata payları Tablo 4'te gösterildiği gibi yüksek mertebelere çıkıldıkça azalma göstermektedir. $W^+ + Z$ ($W^- + Z$) üretim kanalı için 13, 14, 27 ve 100 TeV enerjilerinde NLO PDF hata payı LO mertebesine göre %50,64 (%72,90), %52,01 (%63,27), %58,74 (%60,35), ve %38,42 (%48,20) azalma göstermiştir. Tablo 3'te hesaplanan sonuçlara göre, 14 TeV kütle merkez enerjisinde LO mertebesinden NLO mertebesine geçerken scale hata payında yaklaşık iki kat artış gözlemlenmiştir. Ancak tesir kesiti değerinin LO'dan NLO'a geçişte iki katından daha fazla olması scale hata payındaki bu artışı ihmal edilebilir göstermekte ve tesir kesitinin yüzde oranı ile kıyaslandığında düşük olduğunu göstermektedir. 27 ve 100 TeV kütle merkez enerjilerinde ise scale hata payının azaldığı gözlemlenmiştir. Tablo 4 sonuçları da Tablo 3 sonuçları ile benzer şekilde yine scale hata payının azaldığını göstermektedir. Bu durum, NLO mertebesinin LO mertebesine göre daha doğru ve güvenilir sonuçları vereceğini ispatlamaktadır.

Bölüm 7’de verilen eşitlik 4’e göre toplam $W^+ + Z$ ($W^- + Z$) hata payı Tablo 3’teki sonuçlar dikkate alınarak hesaplandığında 14 TeV kütle merkez enerjisinde toplam LO QCD hata payı $+0,8014 (+0,5351)$ pb ve $-0,9057 (-0,5970)$ pb’dır. Aynı enerjideki NLO QCD hata payı ise $+1,0397 (+0,6553)$ pb ve $-0,8631 (-0,5555)$ pb; NLO QCD (NNLO PDF) hata payı ise $+1,079 (+0,6878)$ pb ve $-0,8794 (-0,3568)$ pb’dır. Bu hesaplamalara göre negatif hata payı yüksek mertebelere çıkıldıkça düşmektedir. Pozitif hata payında ise her ne kadar artış gözlemlense bile artan QCD değerine kıyasla bu artış çok küçük bir değer olduğundan toplam hata payının genel olarak azaldığını söyleyebiliriz. 27 TeV kütle merkez enerjisinde toplam LO QCD hata payı $+2,9583 (+2,1467)$ pb ve $-3,2497 (-2,2540)$ pb; NLO QCD hata payı $+1,5133 (+1,041)$ pb ve $-1,3483 (-0,9481)$ pb; NLO (NNLOPDF) QCD hata payı ise $+1,5521(+1,0668)$ pb ve $-1,3976 (-0,9889)$ pb’dır. 27 TeV kütle merkez enerjisinde toplam hata payının azaldığı gözlemlenmiştir. 100 TeV kütle merkez enerjisinde toplam LO QCD hata payı $+24,8532 (+19,5788)$ pb ve $-25,2056 (-19,8201)$ pb’dır. NLO QCD hata payı $+8,4061 (+6,4885)$ pb ve $-9,7797 (-7,9454)$ pb; NLO (NNLOPDF) QCD hata payı ise $+7,5322 (+5,9371)$ pb ve $-9,9337 (-7,8660)$ pb’dır. Bu sonuçlara göre 100 TeV kütle merkez enerjisinde de toplam hata payı yüksek mertebeli QCD tahminleri için azalmıştır ve bu azalma NLO mertebesinin daha doğru ve tutarlı olduğunu göstermektedir.

Tablo 3. 14, 27 ve 100 TeV kütle merkez enerjisinde $pp \rightarrow W^+ + Z$ ve $pp \rightarrow W^- + Z$ üretim kanalları için LO ve NLO QCD tesir kesitleri. Hata payları sırasıyla PDF, Scale ve α_s ’dir ve bütün sonuçlar pb cinsindendir

Üretim Kanalı	Enerji	LO	NLO	NLO (NNLO PDF)
$W^+ + Z$	14 TeV	$19,525^{+0,554+0,570+0,097}_{-0,554-0,709-0,097}$	$31,170^{+0,291+0,943+0,327}_{-0,291-0,749-0,313}$	$31,629^{+0,301+0,974+0,353}_{-0,301-0,762-0,317}$
	27 TeV	$40,788^{+0,912+2,635+0,988}_{-0,912-2,958-0,988}$	$72,088^{+0,431+1,076+0,972}_{-0,431-0,926-0,879}$	$73,290^{+0,438+1,169+0,921}_{-0,438-0,946-0,930}$
	100 TeV	$151,941^{+3,063+21,151+12,684}_{-3,063-21,564-12,684}$	$324,095^{+3,071+5,376+5,686}_{-3,071-7,480-5,501}$	$329,597^{+2,928+5,116+4,689}_{-2,928-7,425-5,914}$
$W^- + Z$	14 TeV	$12,270^{+0,398+0,357+0,007}_{-0,398-0,444-0,007}$	$19,727^{+0,174+0,603+0,186}_{-0,174-0,471-0,237}$	$19,962^{+0,188+0,626+0,213}_{-0,188-0,216-0,212}$
	27 TeV	$28,313^{+0,650+1,953+0,606}_{-0,650-2,071-0,606}$	$50,362^{+0,277+0,751+0,664}_{-0,277-0,615-0,665}$	$51,166^{+0,303+0,810+0,623}_{-0,303-0,658-0,672}$
	100 TeV	$120,112^{+2,358+16,896+9,607}_{-2,358-17,175-9,607}$	$258,493^{+2,088+4,338+4,350}_{-2,088-6,223-4,477}$	$262,663^{+2,133+4,172+3,646}_{-2,133-6,041-4,564}$

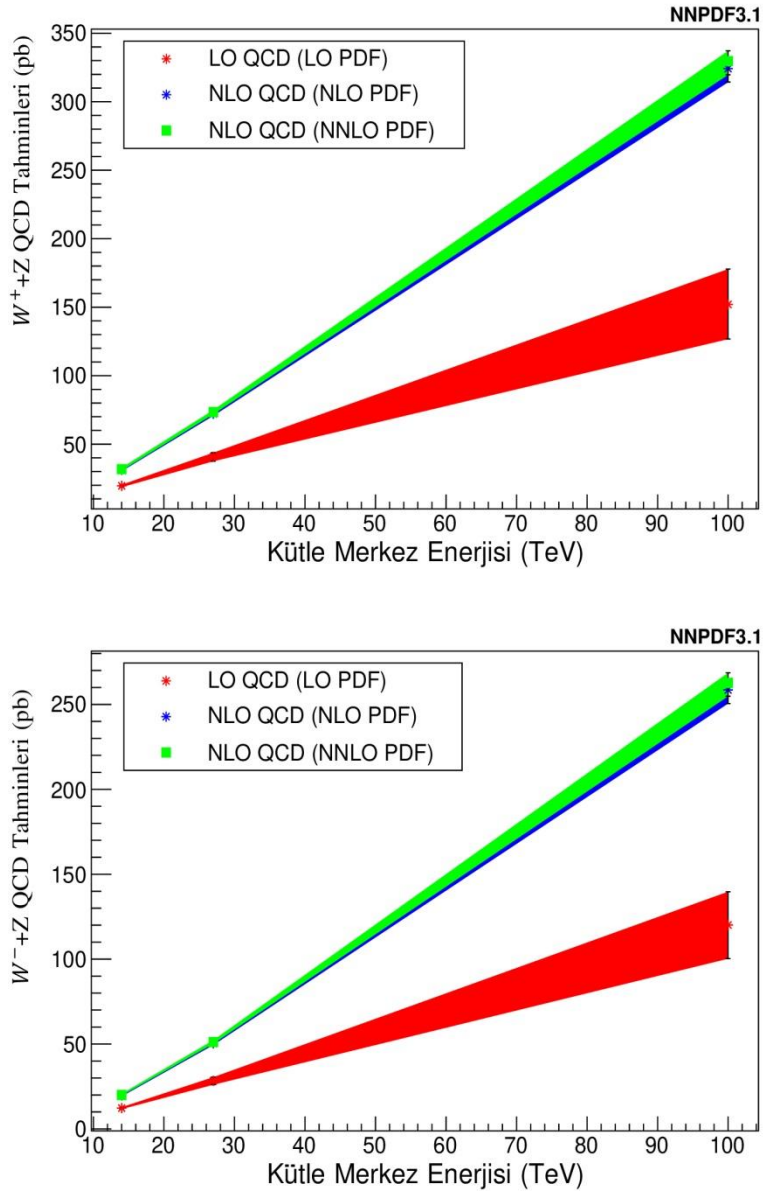
$W^+ + Z$ ve $W^- + Z$ kanalları için toplam LO ve NLO tesir kesiti sonuçlarını elde ettikten sonra bu kanalların leptonik ($W^+ \rightarrow l^+ + \nu$, $W^- \rightarrow l^- + \bar{\nu}$ ve $Z \rightarrow l^+ + l^-$) bozunumları için QCD tesir kesitlerini HL-LHC, HE-LHC ve FCC için hesapladık. Tablo

4 bu hesaplama sonuçlarının sayısal değerlerini göstermektedir. W ve Z bozonlarının leptonik bozunumu ile elde edilen LO ve NLO QCD tesir kesiti sonuçları Tablo 4'te verilmiştir. Tabloda verilen sayısal değerlere göre NLO mertebesinde tesir kesiti LO mertebesine göre artış göstermektedir. Bu artış miktarı $W^+ + Z$ kanalı için 13, 14, 27 ve 100 TeV enerjilerinde sırasıyla %72,17, %75,44, %44,04 ve %164,19 fb kadardır. Benzer şekilde $W^- + Z$ kanalı için ise artış miktarı 13, 14, 27 ve 100 TeV enerjilerinde sırasıyla %70,19 , %72,91 , %124,00 ve 163,01 fb kadardır. NLO PDF ve NNLO PDF ile elde edilen NLO QCD sonuçları arasında ise $W^+ + Z$ ($W^- + Z$) kanalı için 13, 14, 27 ve 100 TeV enerjilerinde sırasıyla %1,37 , %1,32 , %1,68 ve %1,89 (%0,96 , %1,07 , %1,74 ve %1,88) fb artış gözlemlenmiştir. Elde edilen bu sonuçlar enerji artıkça LO ve NLO arasındaki farklılığın arttığını göstermektedir. Şekil 11 $W^+ + Z$ ve $W^- + Z$ kanalları için LO ve NLO QCD tesir kesitlerinin enerji ile değişimini ve artan enerji ile QCD mertebeleri arasındaki farklılığı göstermektedir.

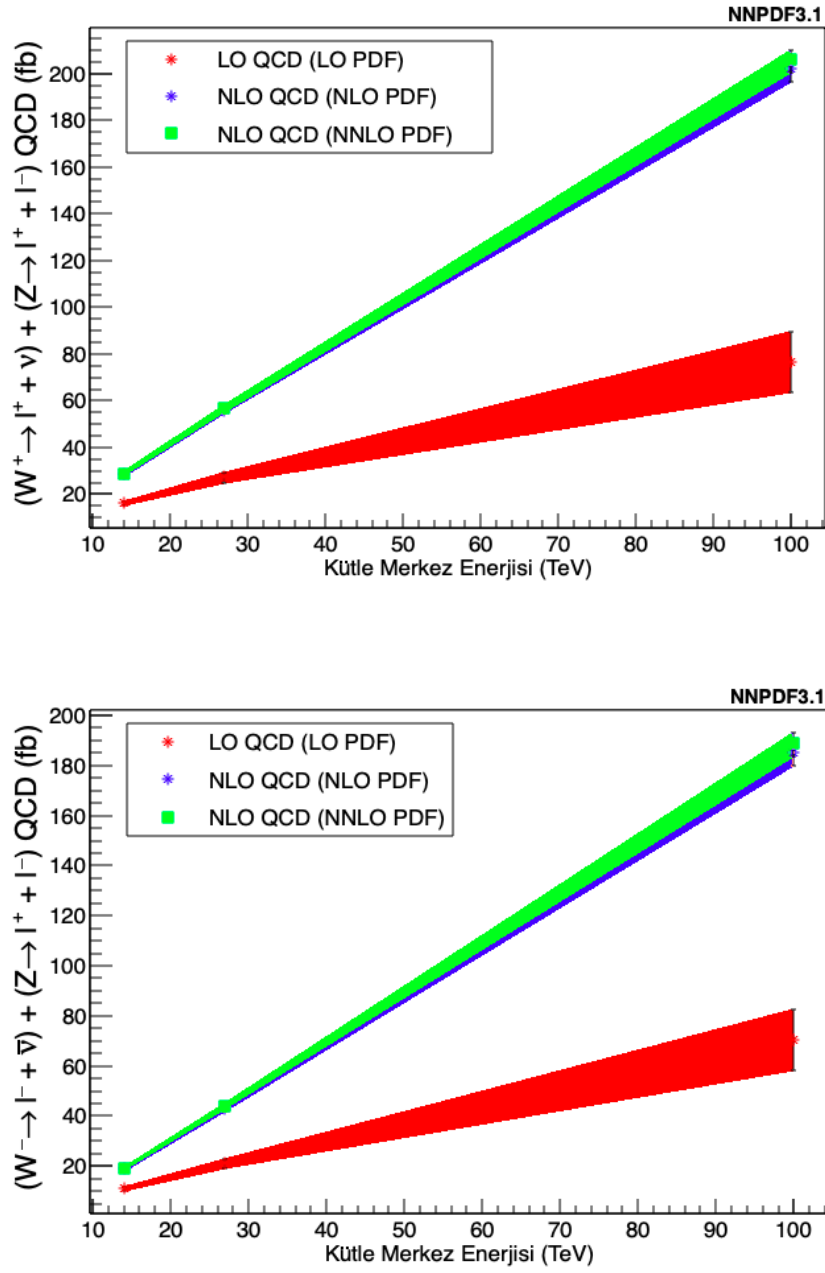
$W^+ + Z$ ($W^- + Z$) leptonik bozunumlarının toplam hata paylarını hesaplamak için yine bölüm 7'de verilen eşitlik 4 ve aşağıda verilen Tablo 4'ten yararlanırız. Buna göre 14 TeV kütle merkez enerjisinde toplam LO QCD hata payı + 0,8375 (+0,6068) fb ve - 0,9110 (-0,6758) fb'dır. Aynı enerjideki NLO QCD hata payı ise +1,1437 (+0,7310) fb ve -0,9069 (-0,5936) fb; NLO QCD (NNLO PDF) hata payı ise +1,1635 (+0,7733) fb ve -0,9370 (-0,5917) fb'dır. Bu hesaplamalara göre negatif hata payı yüksek mertebelere çıkıldıkça düşmektedir. Pozitif hata payında ise her ne kadar artış gözlemlense de artan QCD değerine kıyasla bu artış çok küçük bir değer olduğundan toplam hata payının genel olarak azaldığını söyleyebiliriz. 27 TeV kütle merkez enerjisinde toplam LO QCD hata payı +2,2211 (+1,7843) fb ve -2,4074 (-1,9386) fb; NLO QCD hata payı +1,4847 (+1,1041) fb ve -1,3247 (-0,9830) fb; NLO (NNLOPDF) QCD hata payı ise +1,4706 (+1,1019) fb ve -1,4916 (-1,0525) fb'dır. 27 TeV kütle merkez enerjisinde toplam hata payının azaldığı gözlemlenmiştir. 100 TeV kütle merkez enerjisinde toplam LO QCD hata payı +13,0080 (+12,3117) fb ve -13,1732 (-12,3831) fb'dır. NLO QCD hata payı +4,4199 (+4,0286) fb ve -5,5626 (-5,2480) fb; NLO (NNLOPDF) QCD hata payı ise +3,7697 (+4,2635) fb ve -5,9164 (-4,9869) fb'dır. Bu sonuçlara göre 100 TeV kütle merkez enerjisinde de toplam hata payı yüksek mertebeli QCD tahminleri için azalmıştır ve bu azalma NLO mertebesinin daha doğru ve tutarlı olduğunu göstermektedir.

Tablo 4. 13, 14, 27 ve 100 TeV kütle merkez enerjisinde $pp \rightarrow W^+ + Z$ ($W^+ \rightarrow l^+ + \nu$ ve $Z \rightarrow l^+ l^-$) ve $pp \rightarrow W^- + Z$ ($W^- \rightarrow l^- + \bar{\nu}$ ve $Z \rightarrow l^+ l^-$) üretim kanalları için LO ve NLO QCD tesir kesitleri. Hata payları sırasıyla PDF, Scale ve α_s 'dir ve bütün sonuçlar fb cinsindendir

Üretim Kanalı	Enerji	LO	NLO	NLO (NNLO PDF)
$W^+ + Z$	13 TeV	$15,304^{+0,545+0,499+0,042}_{-0,545-0,602-0,042}$	$26,350^{+0,269+1,052+0,335}_{-0,269-0,756-0,250}$	$26,711^{+0,274+1,011+0,355}_{-0,274-0,807-0,281}$
	14 TeV	$16,251^{+0,573+0,606+0,070}_{-0,573-0,704-0,070}$	$28,512^{+0,275+1,058+0,335}_{-0,275-0,807-0,309}$	$28,890^{+0,276+1,065+0,378}_{-0,276-0,833-0,327}$
	27 TeV	$27,315^{+0,744+1,997+0,625}_{-0,744-2,202-0,625}$	$55,833^{+0,307+1,239+0,758}_{-0,307-1,074-0,711}$	$56,776^{+0,294+1,264+0,690}_{-0,294-1,177-0,867}$
	100 TeV	$76,556^{+2,095+11,560+5,583}_{-2,095-11,745-5,583}$	$202,258^{+1,290+2,641+3,301}_{-1,290-4,151-3,471}$	$206,085^{+1,512+2,379+2,503}_{-1,512-4,020-4,069}$
$W^- + Z$	13 TeV	$10,063^{+0,428+0,339+0,006}_{-0,428-0,415-0,006}$	$17,127^{+0,159+0,648+0,177}_{-0,159-0,491-0,213}$	$17,292^{+0,178+0,666+0,204}_{-0,178-0,502-0,197}$
	14 TeV	$10,918^{+0,452+0,404+0,006}_{-0,452-0,502-0,006}$	$18,879^{+0,166+0,682+0,202}_{-0,166-0,522-0,226}$	$19,082^{+0,184+0,712+0,236}_{-0,184-0,523-0,204}$
	27 TeV	$21,241^{+0,570+1,610+0,513}_{-0,570-1,780-0,513}$	$42,991^{+0,226+0,915+0,574}_{-0,226-0,747-0,597}$	$43,740^{+0,243+0,918+0,558}_{-0,243-0,815-0,619}$
	100 TeV	$70,420^{+2,172+10,842+5,414}_{-2,172-10,923-5,414}$	$185,214^{+1,125+2,521+2,934}_{-1,125-4,074-3,111}$	$188,709^{+1,431+2,750+2,927}_{-1,431-3,565-3,180}$



Şekil 10. $W^+ + Z$ (üst) ve $W^- + Z$ (alt) kanalları için LO ve NLO QCD tesir kesitlerinin enerji ile değişimi ve artan enerji ile QCD mertebeleri arasındaki farklılığı gösteren görsel



Şekil 11. $W^+ + Z$ (üst) ve $W^- + Z$ (alt) kanalları için LO ve NLO QCD tesir kesitlerinin enerji ile değişimi ve artan enerji ile QCD mertebeleri arasındaki farklılığı gösteren görsel. W ve Z bozonları leptonlara bozunmaktadır

Bu çalışmanın son kısmında LHC, HE-LHC ve FCC’de 13 TeV LHC verisi ile aynı istatistiği elde etmemiz için ihtiyaç duyulan veri miktarını hesapladık. Bunun için bölüm 7’de verilen eşitlik 5’ten yararlandık. 13 TeV kütle merkez enerjisinde CMS dedektörü tarafından kaydedilen veriye göre toplam ışınlık değeri $63,67 \text{ fb}^{-1}$ ’dir [127]. Buna göre $W^+ + Z$ ve $W^- + Z$ üretim kanalları için toplam ve leptonik bozunumlarda veri miktarını aşağıdaki eşitliklerde gösterildiği gibi hesaplarız. Yapmış olduğumuz bu hesaplamalar şekil 7’de gösterildiği gibi karşılaştırılmıştır. Bu durum yüksek enerjilere çıkıldıkça düşük enerjilere kıyasla daha az veri ile düşük enerjilerdeki veri miktarı ile aynı istatistiğin elde edilebileceğini göstermektedir.

Toplam $W^+ + Z$ için:

$$\sigma_{13}^{W^+ + Z} L_{13} = \sigma_{14}^{W^+ + Z} L_{14} \Rightarrow L_{14} = \frac{\sigma_{13}^{W^+ + Z}}{\sigma_{14}^{W^+ + Z}} L_{13} = \frac{28,6258}{31,6295} \times 63,67 = 57,62 \text{ fb}^{-1} \quad (6)$$

$$\sigma_{13}^{W^+ + Z} L_{13} = \sigma_{27}^{W^+ + Z} L_{27} \Rightarrow L_{27} = \frac{\sigma_{13}^{W^+ + Z}}{\sigma_{27}^{W^+ + Z}} L_{13} = \frac{28,6258}{73,2903} \times 63,67 = 24,87 \text{ fb}^{-1} \quad (7)$$

$$\sigma_{13}^{W^+ + Z} L_{13} = \sigma_{100}^{W^+ + Z} L_{100} \Rightarrow L_{100} = \frac{\sigma_{13}^{W^+ + Z}}{\sigma_{100}^{W^+ + Z}} L_{13} = \frac{28,6258}{329,5970} \times 63,67 = 5,53 \text{ fb}^{-1} \quad (8)$$

Toplam $W^- + Z$ için:

$$\sigma_{13}^{W^- + Z} L_{13} = \sigma_{14}^{W^- + Z} L_{14} \Rightarrow L_{14} = \frac{\sigma_{13}^{W^- + Z}}{\sigma_{14}^{W^- + Z}} L_{13} = \frac{17,8281}{19,9621} \times 63,67 = 56,86 \text{ fb}^{-1} \quad (9)$$

$$\sigma_{13}^{W^- + Z} L_{13} = \sigma_{27}^{W^- + Z} L_{27} \Rightarrow L_{27} = \frac{\sigma_{13}^{W^- + Z}}{\sigma_{27}^{W^- + Z}} L_{13} = \frac{17,8281}{51,1662} \times 63,67 = 22,18 \text{ fb}^{-1} \quad (10)$$

$$\sigma_{13}^{W^- + Z} L_{13} = \sigma_{100}^{W^- + Z} L_{100} \Rightarrow L_{100} = \frac{\sigma_{13}^{W^- + Z}}{\sigma_{100}^{W^- + Z}} L_{13} = \frac{17,8281}{262,6630} \times 63,67 = 4,32 \text{ fb}^{-1} \quad (11)$$

Leptonik $W^+ + Z$ için:

$$\sigma_{13}^{W^+ + Z} L_{13} = \sigma_{14}^{W^+ + Z} L_{14} \Rightarrow L_{14} = \frac{\sigma_{13}^{W^+ + Z}}{\sigma_{14}^{W^+ + Z}} L_{13} = \frac{26,7116}{28,8908} \times 63,67 = 58,87 \text{ fb}^{-1} \quad (12)$$

$$\sigma_{13}^{W^+ + Z} L_{13} = \sigma_{27}^{W^+ + Z} L_{27} \Rightarrow L_{27} = \frac{\sigma_{13}^{W^+ + Z}}{\sigma_{27}^{W^+ + Z}} L_{13} = \frac{26,7116}{56,7767} \times 63,67 = 29,95 \text{ fb}^{-1} \quad (13)$$

$$\sigma_{13}^{W^+ + Z} L_{13} = \sigma_{100}^{W^+ + Z} L_{100} \Rightarrow L_{100} = \frac{\sigma_{13}^{W^+ + Z}}{\sigma_{100}^{W^+ + Z}} L_{13} = \frac{26,7116}{206,0850} \times 63,67 = 8,25 \text{ fb}^{-1} \quad (14)$$

Leptonik $W^- + Z$ için:

$$\sigma_{13}^{W^- + Z} L_{13} = \sigma_{14}^{W^- + Z} L_{14} \Rightarrow L_{14} = \frac{\sigma_{13}^{W^- + Z}}{\sigma_{14}^{W^- + Z}} L_{13} = \frac{17,2924}{19,0822} \times 63,67 = 57,69 \text{ fb}^{-1} \quad (15)$$

$$\sigma_{13}^{W^- + Z} L_{13} = \sigma_{27}^{W^- + Z} L_{27} \Rightarrow L_{27} = \frac{\sigma_{13}^{W^- + Z}}{\sigma_{27}^{W^- + Z}} L_{13} = \frac{17,2924}{43,7407} \times 63,67 = 25,17 \text{ fb}^{-1} \quad (16)$$

$$\sigma_{13}^{W^- + Z} L_{13} = \sigma_{100}^{W^- + Z} L_{100} \Rightarrow L_{100} = \frac{\sigma_{13}^{W^- + Z}}{\sigma_{100}^{W^- + Z}} L_{13} = \frac{17,2924}{188,7090} \times 63,67 = 5,83 \text{ fb}^{-1} \quad (17)$$

Bu tezde BHÇ'nin şu anki enerjisi olan 13 TeV kütle merkez enerjisinde ATLAS algıcından elde edilen veri ile MCFM programının kullanımında yazılan analiz kodları kıyaslanarak yazılmış olan analiz kodlarının doğruluğu ve güvenilirliği sağlanmıştır. Sonrasında BHÇ'nin planlanan en yüksek enerjisi olan 14 TeV kütle merkez enerjisinde eş zamanlı üretilen W ve Z bozonlarının yüksek mertebeli QCD tahminleri hesaplanmıştır. Böylece, BHÇ'nin planlanan enerjisine ulaşıldığında elde edilecek olan WZ olayları 14 TeV pp çarpışması başlamadan tahmin edilmesi sağlanmıştır. Benzer şekilde 27 TeV'lik kütle merkez enerjisi ile başlatılacak olan Yüksek Enerjili BHÇ ve ileride kurulması planlanan ve 100 TeV'lik kütle merkez enerjisine sahip olacak dairesel çarpıştırıcı FCC'nin enerji değerlerinde eş zamanlı üretilen W ve Z bozonlarının yüksek mertebeli kuantum renk dinamiği tahminleri hesaplanarak bu hızlandırıcılarda oluşacak olan WZ olayları tahmin edilmiştir. Herbir enerji değerinin tesir kesiti NLO mertebesine kadar PDF, scale ve α_s hata payları dahil edilerek hesaplanmış ve toplam hata payının düşük mertebe olan LO mertebesine göre azaldığı gözlemlenmiştir. Böylece yapılan hesaplamaların yüksek güvenilirliğe sahip olduğu ispatlanmıştır. MCFM programının 8.2 versiyonunun söz konusu kanal olan WZ kanalında tesir kesitinin NNLO mertebesine kadar hesaplanamamasına neden olmaktadır. Bu eksikliğin kısmen giderilebilmesi adına NLO tesir kesiti hem NLO hemde NNLO mertebesindeki PDF'ler ile hesaplanmış ve bulunan sonucun 13 TeV enerjisindeki ATLAS sonuçlarına çok yakın olduğu gözlemlenmiştir. Ancak, hem CMS ve ATLAS gibi deneylerin sonuçları ile uyumluluk sağlanabilmesi hemde daha düşük hata paylarına sahip olunabilmesi bakımından NNLO mertebesindeki düzeltmelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle, bu çalışmanın ilerleyen aşamalarında proton çarpışmaları sonrası eş zamanlı oluşacak olan W ve Z bozonlarının NNLO mertebesindeki QCD tesir kesitleri 14, 27 ve 100 TeV kütle merkez enerjilerinde hesaplanacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Külçü R. Thales' ten Günümüze Arkhe Arayışı. Akademia Disiplinlerarası Bilimsel Araştırmalar Dergisi. 2016; 2 (1): 1-16
- [2] Thomson JJXL. Cathode rays. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. 1897; 44(269): 293-316
- [3] Rutherford E. LXXIX. The scattering of α and β particles by matter and the structure of the atom. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. 1911; 21(125): 669-688
- [4] Bohr NI. On the constitution of atoms and molecules. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. 1913; 26(151): 1-25
- [5] Moseley HGJ. XCIII. The high-frequency spectra of the elements. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. 1913; 26(156): 1024-1034
- [6] Chadwick J. Possible existence of a neutron. Nature. 1932; 129(3252): 312-312
- [7] Fermi E. An attempt of a theory of beta radiation. 1. Z. phys. 1934; 88(161): 19
- [8] Weinberg S. The discovery of subatomic particle. Luis Weinberg and Weinabet Weinberg Trust, Cambridge: 1983.
- [9] Oerter R. The Theory Of Almost Everything. 2006; ISBN: 978-0-13-236678-6
- [10] Braibant S. Giacomelli G. and Spurio, M. Particles and fundamental interactions: an introduction to particle physics. Springer Science and Business Media: 2011.
- [11] Donoghue JF. Golowich, E. and Holstein, BR. Dynamics of the standard model (p. 573). Cambridge university press: 2014.
- [12] Weinberg S. The quantum theory of fields (Vol. 2). Cambridge university Press: 1995.
- [13] Dirac PAM. The quantum theory of the emission and absorption of radiation. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character. 1927; 114(767): 243-265
- [14] Miransky VA. Dynamical symmetry breaking in quantum field theories. World Scientific. Mann, RAn introduction to particle physics and the standard model (p. 614). Taylor and Francis: 2010.

- [15] Nicolson I. Dark side of the universe: dark matter, dark energy, and the fate of the cosmos: 2007.
- [16] Robson BA. The matter-antimatter asymmetry problem. In Cosmology, Gravitational Waves and Particles: Proceedings of the Conference. 2018; (pp. 154-162)
- [17] Lincoln D. What is Supersymmetry?. FNAL (Fermi National Accelerator Laboratory) Batavia, IL (United States): 2013.
- [18] Khlopov M. What comes after the Standard Model?. Progress in Particle and Nuclear Physics. 2021; 116, 103824
- [19] Cheng TP. and Li, LF. Gauge theory of elementary particle physics. Oxford university press: 1994.
- [20] K. Hagiwara, S. Ishihara, R. Szalapski, and D. Zeppenfeld, Phys. Rev. D. 1993; 48, 2182
- [21] U. Baur and D. Rainwater, Phys. Rev. D. 2000; 62, 113011
- [22] CDF Collaboration, Observation of WZ Production, Phys. Rev. Lett. 2007; doi:10.1103/PhysRevLett.98.161801, arXiv:hep-ex/0702027
- [23] CDF Collaboration, Measurement of the WZ Cross Section and Triple Gauge Couplings in pp Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV, Phys. Rev. D. 2012; doi:10.1103/PhysRevD.86.031104, arXiv:1202.6629
- [24] D0 Collaboration, A measurement of the WZ and ZZ production cross sections using leptonic final states in 8.6 fb^{-1} of pp collisions, Phys. Rev. D. 2012; doi:10.1103/PhysRevD.85.112005, arXiv:1201.5652
- [25] CMS Collaboration, Measurement of WZ and ZZ production in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV in final states with b-tagged jets, Eur. Phys. JC. 2014; doi:10.1140/epjc/s10052-014-2973-5, arXiv:1403.3047
- [26] ATLAS Collaboration, Measurement of WZ production in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector, Eur. Phys. JC. 2012; doi:10.1140/epjc/s10052-012-2173-0, arXiv:1208.1390
- [27] ATLAS Collaboration, Measurements of $W^{\pm}Z$ production cross sections in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector and limits on anomalous gauge boson self-couplings, Phys. Rev. D. 2016; doi:10.1103/PhysRevD.93.092004, arXiv:1603.02151
- [28] ATLAS Collaboration, Measurement of the $W^{\pm}Z$ -boson production cross sections in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector, Phys. Lett. B. 2016; doi:10.1016/j.physletb.2016.06.023, arXiv:1606.04017

- [29] Measurement of the inclusive W and Z production cross sections in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the CMS experiment 2011; doi:10.1007/JHEP10132
- [30] S. Drell and T.M. Yan, Massive lepton pair production in hadron-hadron collisions at high-energies, Phys. Rev. Lett. 1970; 25 316
- [31] D.E. Morrissey, T. Plehn and T.M.P. Tait, Physics searches at the LHC, Phys. Rept. 2012; 515 1 [arXiv:0912.3259]
- [32] ATLAS Collaboration, Phys. Rev. D. 2013; arXiv:1210.2979 [hep-ex]
- [33] CMS Collaboration, Eur. Phys. JC. 2013; arXiv:1306.1126 [hep-ex]
- [34] Measurement of the WZ production cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV and search for anomalous triple gauge couplings at $\sqrt{s} = 8$ TeV Eur. Phys. JC. 2017; 77:236 DOI 10.1140/epjc/s10052-017-4730-z
- [35] ATLAS Collaboration, Evidence for the associated production of the Higgs boson and a top quark pair with the ATLAS detector, Phys. Rev. D. 2018; 97, 072003
- [36] CMS Collaboration, Evidence for associated production of a Higgs boson with a top quark pair in final states with electrons, muons, and hadronically decaying τ leptons at $\sqrt{s} = 13$ TeV, J. High Energy Phys. 2018; 08 066
- [37] CMS Collaboration, Observation of $t\bar{t}H$ Production, Phys. Rev. Lett. 2018; 120, 231801
- [38] ATLAS Collaboration, Observation of Higgs boson production in association with a top quark pair at the LHC with the ATLAS detector, Phys. Lett. B. 2018; 784, 173
- [39] ATLAS Collaboration, Observation of top-quark pair production in association with a photon and measurement of the $t\bar{t}\gamma$ production cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV using the ATLAS detector, Phys. Rev. D. 2015; 91, 072007
- [40] ATLAS Collaboration, Measurement of the $t\bar{t}\gamma$ production cross section in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector, J. High Energy Phys. 2017; 11 086
- [41] CMS Collaboration, Measurement of the semileptonic $t\bar{t}\gamma$ production cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV, J. High Energy Phys. 2017; 10 006
- [42] ATLAS Collaboration, Measurements of inclusive and differential fiducial cross-sections of $t\bar{t}\gamma$ production in leptonic final states at $\sqrt{s} = 13$ TeV in ATLAS, 2019; arXiv: 1812.01697
- [43] J.A. Dror, M. Farina, E. Salvioni, and J. Serra, Strong tW scattering at the LHC, J. High Energy Phys. 2016; 01 071

- [44] A. Buckley, C. Englert, J. Ferrando, DJ. Miller, L. Moore, M. Russell, and CD. White, Constraining top quark effective theory in the LHC Run II era, J. High Energy Phys. 2016; 04 015
- [45] O. Bessidskaia Bylund, F. Maltoni, I. Tsirikos, E. Vryonidou, and C. Zhang, Probing top quark neutral couplings in the Standard Model effective field theory at NL in QCD, J. High Energy Phys. 2016; 05 052
- [46] S. Weinberg, Phenomenological Lagrangians, Physica. 1979; 96A, 327
- [47] W. Buchmüller and D. Wyler, Effective Lagrangian analysis of new interactions and flavour conservation, Nucl. Phys. 1986; B268, 621
- [48] CN. Leung, ST. Love, and S. Rao, Low-energy manifestations of a new interactions scale: Operator analysis, Z. Phys. 1986; C 31, 433
- [49] ATLAS Collaboration, Measurement of the $t\bar{t}W$ and $t\bar{t}Z$ production cross sections in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector, J. High Energy Phys. 2015; 11 172
- [50] ATLAS Collaboration, Measurement of the $t\bar{t}Z$ and $t\bar{t}W$ production cross sections in multilepton final states using 3.2 fb^{-1} of pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector, Eur. Phys. 2017; JC. 77, 40
- [51] CMS Collaboration, Observation of top quark pairs produced in association with a vector boson in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV, J. High Energy Phys. 2016; 01 096
- [52] CMS Collaboration, Measurement of the cross section for top quark pair production in association with a W or Z boson in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV, J. High Energy Phys. 2018; 08 011
- [53] Measurement of the $W^{\pm}Z$ boson pair-production cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS Detector, Phys. Lett. B 7621 2016; DOI: 10.1016/j.physletb.2016.08.052
- [54] Arnison G. et al Phys. Lett. 1983; B 122 103
- [55] Bagnaia P. et al Phys. Lett. 1983; B 129 130
- [56] The LEP Collaborations: ALEPH, DELPHI, L3 and OPAL, the LEP Electroweak Working Group and the SLD Electroweak and Heavy Flavor Working Group 2004; Preprint hep-ex/0412015
- [57] J. Kubar-Andre and FE. Paige, Gluon Corrections to the Drell-Yan Model, Phys. Rev. 1979; D 19 221
- [58] J. Kubar, M. Le Bellac, JL. Meunier and G. Plaut, QCD Corrections to the Drell-Yan Mechanism and the Pion Structure Function, Nucl. Phys. 1980; B 175 251

- [59] PHENIX collaboration, A. Adare et al. Cross Section and Parity Violating Spin Asymmetries of $W^\pm$ Boson Production in Polarized pp Collisions at $\sqrt{s} = 500$ GeV, arXiv:1009.0505 [SPIRES]
- [60] STAR collaboration, MM. Aggarwal et al. Measurement of the parity-violating longitudinal single-spin asymmetry for $W^\pm$ boson production in polarized proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 500$ GeV, arXiv:1009.0326 [SPIRES]
- [61] L. Evans, and P. Bryant eds., LHC Machine, 2008; JINST 3 S08001 [SPIRES]
- [62] ALEPH Collaboration, DELPHI Collaboration, L3 Collaboration, OPAL Collaboration, SLD Collaboration, LEP Electroweak Working Group and The SLD Electroweak and Heavy Flavour Groups, Precision electroweak measurements on the Z resonance, Phys. Rep. 2006; 427 257. doi:10.1016/j.physrep.12.006
- [63] <https://fizikolog.net/cern/standart.html> (Erişim Tarihi: 27.05.2023).
- [64] Stacey, WM. Nuclear reactor physics. John Wiley & Sons: 2006.
- [65] ALEPH Collaboration, DELPHI collaboration, L3 Collaboration, OPAL Collaboration, and LEP Electroweak Working Group. Electroweak measurements in electron–positron collisions at W-boson-pair energies at LEP. Physics reports, 2013; 532(4): 119-244
- [66] Wiedemann, H. Particle accelerator physics. Springer Nature: 2015.
- [67] Braibant, S. Giacomelli, G. and Spurio, M. Particles and fundamental interactions: an introduction to particle physics. Springer Science and Business Media: 2011.
- [68] Sanford, JR. The Fermi national accelerator laboratory. Annual Review of Nuclear Science. 1976; 26(1), 151-198
- [69] Bryant, PJA. brief history and review of accelerators: 1994.
- [70] <https://home.cern/science/accelerators/large-hadron-collider> (Erişim Tarihi: 27.05.2023).
- [71] Yamçııer Ç. Proton-Proton çarpıştırıcılarında süpersimetri araştırmaları. (Yüksek Lisans Tezi). Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı: 2013.
- [72] <https://bilimgenc.tubitak.gov.tr/makale/buyuk-hadron-carpistirici> (Erişim Tarihi: 27.05.2023).
- [73] <https://webrazzi.com/2015/04/06/buyuk-hadron-carpistiricisi-cern-rekor/> (Erişim Taihi: 27.05.2023).
- [74] <https://link.springer.com/content/pdf/10.1140/epjst/e2019-900088-6.pdf?pdf=button> (Erişim Tarihi (27.05.2023)).

- [75] <https://home.cern/science/accelerators/future-circular-collider> (Erişim Tarihi: 27.05.2023).
- [76] <https://www.space.com/43036-cern-future-circular-collider.html> (Erişim Tarihi: 27.05.2023).
- [77] https://en.wikipedia.org/wiki/Future_Circular_Collider (Erişim Tarihi: 27.05.2023).
- [78] CDF Collaboration, Search for WW and WZ production in lepton plus jets final state at CDF. 2009; arXiv:0903.0814v1 [hep-ex]
- [79] CDF Collaboration, Measurement of the WW+WZ Production Cross Section Using the Lepton + Jets Final State at CDF II. 2010; arXiv:0911.4449v2 [hep-ex]
- [80] CDF Collaboration, Observation of $WW/WZ \rightarrow \nu + \text{jets}$ at CDF. 2010; DOI 10.1393/ncc/i2011-10773-5
- [81] CDF Collaboration, Measurement of the WZ cross section and triple gauge couplings in $pp[\overline{p}]$ collisions at $\sqrt{s} = 196$ TeV, Phys. Rev. D. 2012; 86, 031104
- [82] CDF Collaboration, Measurement of WW and WZ production in the lepton plus heavy flavor jets final state at CDF, 38th International Conference on High Energy Physics: 2018.
- [83] CDF Collaboration, Measurement of the WW and WZ production cross section using final states with a charged lepton and heavy-flavor jets in the full CDF Run II data set, Phys. Rev. D. 2016; 94, 032008
- [84] CDF and DØ Collaborations, Combined CDF and DØ measurement of WZ and ZZ production in final states with b-tagged jets. 2012; arXiv:1203.3782v1 [hep-ex]
- [85] DØ Collaboration, Search for Anomalous WW and WZ Production in $p\overline{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV. 1996; arXiv:hep-ex/9606013v1
- [86] DØ Collaboration, Limits on WW Z and WW γ couplings from $p\overline{p} \rightarrow e\nu jjX$ events at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV. 1997; arXiv:hep-ex/9705010v1
- [87] DØ Collaboration, Limits on Anomalous WW γ and WW Z Couplings. 1998; arXiv:hep-ex/9803017v2
- [88] DØ Collaboration, Limits on WW γ and WW Z Couplings from W Boson Pair Production. 1998; arXiv:hep-ex/9803004v1
- [89] DØ Collaboration, Limits on Anomalous WW γ and WW Z Couplings from WW/WZ $\rightarrow e\nu jj$ Production. 2000; arXiv:hep-ex/9912033v2
- [90] DØ Collaboration, Measurement of the CP-violating phase $\phi_{s}^{j/\psi\phi}$ using the flavor-tagged decay $B_{s}^{0} \rightarrow \overline{j}/\psi\phi$ in 8 fb^{-1} of $pp[\overline{p}]$ collisions, Phys. Rev. D. 2012; 85, 032006

- [91] DØ Collaboration, Measurement of the $p\bar{p} \rightarrow t\bar{t}$ production cross section at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV in the fully hadronic decay channel. 2006; arXiv:hep-ex/0612040v1
- [92] Melachrions C. The Muon Detection System and $WZ \rightarrow 3\ell(e, \mu)$ Cross Section Measurement at CMS. Bachelor of science in Physics: 2008.
- [93] CMS Collaboration, Measurement of WZ and ZZ production in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV in final states with b-tagged jets. 2014; DOI 10.1140/epjc/s10052-014-2973-5
- [94] TH Division, Physics Department, CERN, CH-1211 Geneva 23, Switzerland, $W^{\pm}Z$ production at the LHC: fiducial cross sections and distributions in NNLO QCD. 2017; doi:10.1007/JHEP05139
- [95] CMS Collaboration, Measurement of the WZ production cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV and search for anomalous triple gauge couplings at $\sqrt{s} = 8$ TeV. 2017; DOI 10.1140/epjc/s10052-017-4730-z
- [96] CMS Collaboration, Measurements of the $pp \rightarrow WZ$ inclusive and differential production cross sections and constraints on charged anomalous triple gauge couplings at $\sqrt{s} = 13$ TeV. 2019; arXiv:1901.03428v2 [hep-ex]
- [97] CMS Collaboration, Opportunities and Challenges of Standard Model Production Cross Section Measurements in Proton-Proton Collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV using CMS Open Data, DOI: 10.1088/1748-0221/15/01/P01009 FERMILAB-PUB-19-383-CMS ACCEPTED e-Print. 2020; arXiv:1907.08197 [hep-ex]
- [98] CMS Collaboration, Measurements of production cross sections of WZ and same-sign WW boson pairs in association with two jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV. 2020; arXiv:2005.01173v3 [hep-ex]
- [99] ATLAS Collaboration, Measurement of the W^+W^- cross section in $\sqrt{s} = 7$ TeV pp collisions with ATLAS. 2011; arXiv:1104.5225v1 [hep-ex]
- [100] ATLAS Collaboration, Search for resonant WZ production in the $WZ \rightarrow \nu l' l'$ channel in $\sqrt{s} = 7$ TeV pp collisions with the ATLAS dedector, PHYSICAL REVIEW D. 2012; 85, 112012
- [101] ATLAS Collaboration, Search for WZ resonances in the fully leptonic channel using pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector. 2014; arXiv:1406.4456v1 [hep-ex]
- [102] ATLAS collaboration, Measurement of the WW + WZ cross section and limits on anomalous triple gauge couplings using final states with one lepton, missing transverse momentum, and two jets with the ATLAS detector at $\sqrt{s} = 7$ TeV. 2015; doi:10.1007/JHEP01049

- [103] ATLAS Collaboration, Measurement of the double-differential high-mass Drell–Yan cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector. 2016; arXiv:1606.01736v1 [hep-ex]
- [104] ATLAS Collaboration, Measurement of WW/W Z $\rightarrow$ vqq production with the hadronically decaying boson reconstructed as one or two jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with ATLAS, and constraints on anomalous gauge couplings. 2017; DOI 10.1140/epjc/s10052-017-5084-2
- [105] ATLAS collaboration, Search for WW/WZ resonance production in vqq final states in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector. 2017; [https://doi.org/10.1007/JHEP03\(2018\)042](https://doi.org/10.1007/JHEP03(2018)042)
- [106] ATLAS Collaboration, Measurement of $W^{\pm}Z$ production cross sections and gauge boson polarisation in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector. 2019; <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-019-7027-6>
- [107] LHCb collaboration, W and Z production in the forward region at LHCb. 2011; arXiv:1109.3371v1 [hep-ex]
- [108] LHCb Collaboration, Inclusive W and Z production in the forward region at $\sqrt{s} = 7$ TeV. 2012; <http://dx.doi.org/10.1007/JHEP06058>
- [109] <http://diposit.ub.edu/dspace/handle/2445/119341> (Erişim Tarihi: 27.05.2023).
- [110] LHCb Collaboration, LHCb results with vector bosons, International Conference on High Energy Physics: 2016.
- [111] C. Anastasiou, et al. High precision QCD at hadron colliders: Electroweak gauge boson rapidity distributions at NNLO, Phys. Rev. D 69 2004; arXiv:hep-ph/0312266 [hep-ph]
- [112] L. Evans and P. Bryant, LHC Machine. 2008; JINST 3 S08001
- [113] ATLAS Collaboration, The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider. 2008; JINST 3 S08003
- [114] <https://timeline.web.cern.ch/w-and-z-particles-discovered> (Erişim Tarihi: 27.05.2023).
- [115] <https://root.cern/> (Erişim Tarihi: 27.05.2023).
- [116] <https://mcfm.fnal.gov/manual.pdf> (Erişim Tarihi: 27.05.2023).
- [117] JM. Campbel et al. MCFM-Monte Carlo for FeMtobarn processes, URL:<http://mcfm.fnal.gov/> (Erişim Tarihi: 27.05.2023).
- [118] <https://www.truba.gov.tr/> (Erişim Tarihi: 27.05.2023).

- [119] A. Buckley et al. Eur. Phys. JC. 2015; 75, 132
- [120] Parton distribution functions at LO, NLO and NNLO with correlated uncertainties between orders. 2014; DOI 10.1140/epjc/s10052-014-3039-4
- [121] Ball, RD. et al. Parton distributions from high-precision collider data, Eur. Phys. JC. 2017; 77:663 DOI 10.1140/epjc/s10052-017-5199-5
- [122] Dulat, S. et al. The CT14 Global Analysis of Quantum Chromodynamics, Phys. 2016; Rev. D 93, 033006 —DOI: 10.1103/PhysRevD.93.033006
- [123] Abramowicz, H. et al. Combination of measurements of inclusive deep inelastic $e^\pm p$ scattering cross sections and QCD analysis of HERA data, Eur. Phys. JC. 2015; 75:580 DOI 10.1140/epjc/s10052-015-3710-4
- [124] Harland-Lang, LA. et al. Parton distributions in the LHC era: MMHT 2014 PDFs, Eur. Phys. JC. 2015; 75:204 DOI 10.1140/epjc/s10052-015-3397-6
- [125] Martin, AD. et al. Parton distributions for the LHC. 2009; IPPP/08/95 DCPT/08/190 Cavendish-HEP-08/16 11th June
- [126] ATLAS Collaboration, Measurement of $W^\pm Z$ production cross sections and gauge boson polarisation in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector. 2019; <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-019-7027-6>
- [127] <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CMSPublic/LumiPublicResults> (Erişim Tarihi: 27.05.2023).