



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



**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ELEKTRON-PROTON ÇARPIŞTIRICILARINDA HIGGS-ÜST SEKTÖR  
KUARKLARIN ÇEŞNİ DEĞİŞTİREN YÜKSÜZ AKIM BAĞLAŞIMLARININ  
ARAŞTIRILMASI**

**Burak HACIŞAHİNOĞLU**  
**Fizik Anabilim Dalı**  
**Yüksek Enerji ve Plazma Fiziği Programı**

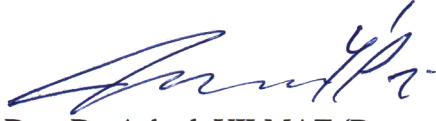
**Danışman**  
**Doç. Dr. Ayberk YILMAZ**  
**II. Danışman**  
**Doç. Dr. İlkey TÜRK ÇAKIR**

**Ekim, 2017**

**İSTANBUL**

Bu çalışma 19.10.2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Fizik Anabilim Dalı Yüksek Enerji ve Plazma Fiziği Programında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

**Tez Jürisi:**



Doç. Dr. Ayberk YILMAZ (Danışman)

İstanbul Üniversitesi

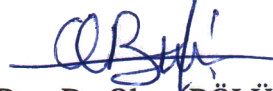
Fen Fakültesi



Prof. Dr. Sehban KARTAL

İstanbul Üniversitesi

Fen Fakültesi

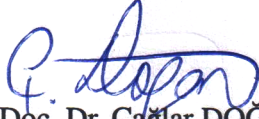


Doç. Dr. Olcay BÖLÜKBAŞI

YALÇINKAYA

İstanbul Üniversitesi

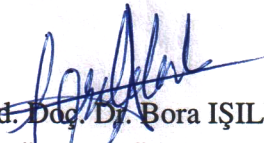
Fen Fakültesi



Yrd. Doç. Dr. Çağlar DOĞAN

İstanbul Üniversitesi

Fen Fakültesi



Yrd. Doç. Dr. Bora IŞILDAK

Özyeğin Üniversitesi

Mühendislik Fakültesi



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

## ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasını mümkün kılan kaos teorisine göre sayılamayacak kadar kişi ve gerçekleşen koşul olsa da, en çok katkısı olan çok değerli; hocalarıma, Murat'a ve aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Bu tez çalışması boyunca her aşamayı takip eden ve yol gösteren Doç.Dr. İlkey TÜRK ÇAKIR'a teşekkür ederim.

Sorularımı sabırla cevaplayan, tecrübeleriyle bana yol gösteren Prof.Dr. Orhan ÇAKIR'a teşekkür ederim.

Programları öğrenme aşamasında desteklerini eksik etmeyen ve tezle ilgili tavsiyeleriyle yol gösteren, okulda bir çalışma ortamı sağlayan ve bana odalarında sabreden Doç.Dr. Ayberk YILMAZ'a ve Doç.Dr. Olcay BÖLÜKBAŞI YALÇINKAYA'ya teşekkür ederim.

Verdiği ödevlerle çalışma hayatım boyunca en çok ihtiyaç duyacağım araştırma yeteneğimi geliştirmeme vesile olan Prof.Dr. Sehban KARTAL'a teşekkür ederim.

Yüksek lisans boyunca çalışmalarına eşlik eden, kanat adamım, öğrenci Murat ALTINLI'ya teşekkür ederim.

Bana desteklerini, güvenlerini ve sevgilerini eksik etmeyen biricik aileme teşekkür ederim.

Ekim, 2017

Burak HACIŞAHİNOĞLU

# İÇİNDEKİLER

Sayfa No

|                                                                                             |      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ÖNSÖZ.....                                                                                  | i    |
| İÇİNDEKİLER.....                                                                            | iii  |
| ŞEKİL LİSTESİ.....                                                                          | vi   |
| TABLO LİSTESİ.....                                                                          | vii  |
| SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ.....                                                              | viii |
| ÖZET .....                                                                                  | x    |
| SUMMARY .....                                                                               | xi   |
| 1. GİRİŞ .....                                                                              | 1    |
| 2. GENEL KISIMLAR.....                                                                      | 3    |
| 2.1. TEMEL PARÇACIKLAR VE TEMEL ETKİLEŞMELER .....                                          | 3    |
| 2.2. ÜST KUARK VE ÖZELLİKLERİ.....                                                          | 4    |
| 2.3. HIGGS BOZONU VE ETKİLEŞMELERİ.....                                                     | 4    |
| 2.4. STANDART MODELİN EKSİKLERİ VE YENİ FİZİK.....                                          | 7    |
| 2.5. GELECEKTEKİ ELEKTRON PROTON ÇARPIŞTIRICILARI.....                                      | 9    |
| 3. MALZEME VE YÖNTEM.....                                                                   | 12   |
| 3.1. ÜST KUARK - HIGGS ARASINDAKİ ÇEŞNİ DEĞİŞTİREN YÜKSÜZ<br>AKIM ETKİLEŞMELERİ.....        | 12   |
| 3.2. ELEKTRON-PROTON ÇARPIŞMASINDA $ep \rightarrow \nu_e h q$ SÜRECİNİN<br>İNCELENMESİ..... | 13   |
| 3.3. OLAY ÜRETİMİ VE HIZLI ALGIÇ BENZETİMİ.....                                             | 14   |
| 4. BULGULAR.....                                                                            | 16   |
| 4.1. ÜRETİM TESİR KESİTLERİNİN HESAPLANMASI.....                                            | 16   |

|                                                                              |           |
|------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.1.1. Sinyalin Hesaplanması.....                                            | 16        |
| 4.1.2. Arka Planın Hesaplanması.....                                         | 19        |
| 4.1.3. Polarize Elektron ile Tesir Kesiti Hesabı.....                        | 20        |
| 4.2. KİNEMATİK DAĞILIMLAR.....                                               | 21        |
| 4.2.1. Sinyalin Kinematik Dağılımları.....                                   | 21        |
| 4.2.2. Arka Planın Kinematik Dağılımları.....                                | 25        |
| 4.2.2.1. <i>LHeC’de Arka Plan Süreçlerinin Kinematik Dağılımları</i> .....   | 25        |
| 4.2.2.2. <i>FCC-eh’de Arka Plan Süreçlerinin Kinematik Dağılımları</i> ..... | 33        |
| 4.3. BULGULARIN ANALİZİ.....                                                 | 41        |
| 4.3.1. İstatistik Gözlenirlik.....                                           | 41        |
| 4.3.2. Değişmez Kütle Yapılandırmaları.....                                  | 45        |
| 4.4. DALLANMA ORANI İLE BAĞLAŞIM PARAMETRESİ ARASINDAKİ İLİŞKİ .....         | 48        |
| <b>5. TARTIŞMA VE SONUÇ.....</b>                                             | <b>51</b> |
| <b>KAYNAKLAR.....</b>                                                        | <b>53</b> |
| <b>EKLER.....</b>                                                            | <b>56</b> |
| EK 1. Kinematik dağılım grafikleri için kullanılan örnek kodlar.....         | 56        |
| EK 2. Değişmez kütle grafikleri için kullanılan örnek kodlar.....            | 57        |
| <b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>                                                         | <b>60</b> |

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa No

|                                                                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 2.1:</b> Higgs bozonunun hadron çarpıştırıcılarındaki ana üretim kanallarını gösteren Feynman diyagramları.....                                         | 6  |
| <b>Şekil 2.2:</b> Higgs bozonunun bozunum modlarını gösteren Feynman diyagramları.....                                                                           | 7  |
| <b>Şekil 2.3:</b> Geleceğin Dairesel Çarpıştırıcısı (FCC) şeması.....                                                                                            | 10 |
| <b>Şekil 3.1:</b> $\bar{t} \rightarrow h\bar{q}$ bozunumu ile üst-Higgs FCNC diyagramı.....                                                                      | 13 |
| <b>Şekil 3.2:</b> $e^- p \rightarrow \nu_e h\bar{q}$ ( $\bar{q} = \bar{u}, \bar{c}$ ) sürecinde sinyalin Feynman diyagramları.....                               | 14 |
| <b>Şekil 4.1:</b> 60 GeV - 7 TeV LHeC de $\Delta\sigma$ sinyal tesir kesitine göre $\kappa_{tuh}$ ve $\kappa_{tch}$ parametreleri için kontur grafiği. ....      | 18 |
| <b>Şekil 4.2:</b> 60 GeV - 50 TeV FCC-eh de $\Delta\sigma$ sinyal tesir kesitine göre $\kappa_{tuh}$ ve $\kappa_{tch}$ parametreleri için kontur grafiği. ....   | 18 |
| <b>Şekil 4.3:</b> 60 GeV - 50 TeV FCC-eh ve 60 GeV - 7 TeV LHeC için $\Delta\sigma$ sinyalin aynı $\kappa_{tuh} = \kappa_{tch}$ parametrelerine bağlılığı. ....  | 19 |
| <b>Şekil 4.4:</b> LHeC çarpıştırıcısında $\kappa_{tuh} = \kappa_{tch} = 0.05$ parametre değeri ile elde edilen üç jetin enine momentum ( $P_T$ ) grafiği.....    | 22 |
| <b>Şekil 4.5:</b> LHeC çarpıştırıcısında $\kappa_{tuh} = \kappa_{tch} = 0.05$ parametre değeri ile elde edilen üç jetin sanki-hızlılık ( $\eta$ ) grafiği.....   | 22 |
| <b>Şekil 4.6:</b> LHeC çarpıştırıcısında $\kappa_{tuh} = \kappa_{tch} = 0.05$ parametre değeri ile elde edilen kayıp enine enerji ( $E_T$ ) grafiği.....         | 23 |
| <b>Şekil 4.7:</b> FCC-eh çarpıştırıcısında $\kappa_{tuh} = \kappa_{tch} = 0.05$ parametre değeri ile elde edilen üç jetin enine momentum ( $P_T$ ) grafiği.....  | 24 |
| <b>Şekil 4.8:</b> FCC-eh çarpıştırıcısında $\kappa_{tuh} = \kappa_{tch} = 0.05$ parametre değeri ile elde edilen üç jetin sanki-hızlılık ( $\eta$ ) grafiği..... | 24 |
| <b>Şekil 4.9:</b> FCC-eh çarpıştırıcısında $\kappa_{tuh} = \kappa_{tch} = 0.05$ parametre değeri ile elde edilen kayıp enine enerji ( $E_T$ ) grafiği.....       | 25 |
| <b>Şekil 4.10:</b> LHeC çarpıştırıcısında $e^- p \rightarrow \nu_e hq$ sürecinin arka planı için elde edilen üç jetin enine momentum ( $P_T$ ) grafiği.....      | 26 |

|                                                                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 4.11:</b> LHeC çarpıştırıcısında $e^- p \rightarrow \nu_e h q$ sürecinin arka planı için elde edilen üç jetin sanki-hızlılık ( $\eta$ ) grafiği.....   | 26 |
| <b>Şekil 4.12:</b> LHeC çarpıştırıcısında $e^- p \rightarrow \nu_e h q$ sürecinin arka planı için elde edilen kayıp enine enerji ( $E_T$ ) grafiği.....         | 27 |
| <b>Şekil 4.13:</b> LHeC çarpıştırıcısında $e^- p \rightarrow \nu_e Z q$ arka plan süreci için elde edilen üç jetin enine momentum ( $P_T$ ) grafiği.....        | 28 |
| <b>Şekil 4.14:</b> LHeC çarpıştırıcısında $e^- p \rightarrow \nu_e Z q$ arka plan süreci için elde edilen üç jetin sanki-hızlılık ( $\eta$ ) grafiği.....       | 28 |
| <b>Şekil 4.15:</b> LHeC çarpıştırıcısında $e^- p \rightarrow \nu_e Z q$ arka plan süreci için elde edilen kayıp enine enerji ( $E_T$ ) grafiği.....             | 29 |
| <b>Şekil 4.16:</b> LHeC çarpıştırıcısında $e^- p \rightarrow \nu_e W^- q$ arka plan süreci için elde edilen üç jetin enine momentum ( $P_T$ ) grafiği.....      | 30 |
| <b>Şekil 4.17:</b> LHeC çarpıştırıcısında $e^- p \rightarrow \nu_e W^- q$ arka plan süreci için elde edilen üç jetin sanki-hızlılık ( $\eta$ ) grafiği.....     | 30 |
| <b>Şekil 4.18:</b> LHeC çarpıştırıcısında $e^- p \rightarrow \nu_e W^- q$ arka plan süreci için elde edilen kayıp enine enerji ( $E_T$ ) grafiği.....           | 31 |
| <b>Şekil 4.19:</b> LHeC çarpıştırıcısında $e^- p \rightarrow \nu_e \bar{t}$ arka plan süreci için elde edilen üç jetin enine momentum ( $P_T$ ) grafiği.....    | 32 |
| <b>Şekil 4.20:</b> LHeC çarpıştırıcısında $e^- p \rightarrow \nu_e \bar{t}$ arka plan süreci için elde edilen üç jetin sanki-hızlılık ( $\eta$ ) grafiği.....   | 32 |
| <b>Şekil 4.21:</b> LHeC çarpıştırıcısında $e^- p \rightarrow \nu_e \bar{t}$ arka plan süreci için elde edilen kayıp enine enerji ( $E_T$ ) grafiği.....         | 33 |
| <b>Şekil 4.22:</b> FCC-eh çarpıştırıcısında $e^- p \rightarrow \nu_e h q$ sürecinin arka planı için elde edilen üç jetin enine momentum ( $P_T$ ) grafiği.....  | 34 |
| <b>Şekil 4.23:</b> FCC-eh çarpıştırıcısında $e^- p \rightarrow \nu_e h q$ sürecinin arka planı için elde edilen üç jetin sanki-hızlılık ( $\eta$ ) grafiği..... | 34 |
| <b>Şekil 4.24:</b> FCC-eh çarpıştırıcısında $e^- p \rightarrow \nu_e h q$ sürecinin arka planı için elde edilen kayıp enine enerji ( $E_T$ ) grafiği.....       | 35 |
| <b>Şekil 4.25:</b> FCC-eh çarpıştırıcısında $e^- p \rightarrow \nu_e Z q$ arka plan süreci için elde edilen üç jetin enine momentum ( $P_T$ ) grafiği.....      | 36 |
| <b>Şekil 4.26:</b> FCC-eh çarpıştırıcısında $e^- p \rightarrow \nu_e Z q$ arka plan süreci için elde edilen üç jetin sanki-hızlılık ( $\eta$ ) grafiği.....     | 36 |
| <b>Şekil 4.27:</b> FCC-eh çarpıştırıcısında $e^- p \rightarrow \nu_e Z q$ arka plan süreci için elde edilen kayıp enine enerji ( $E_T$ ) grafiği.....           | 37 |

|                                                                                                                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 4.28:</b> FCC-eh çarpıştırıcısında $e^- p \rightarrow \nu_e W^- q$ arka plan süreci için elde edilen üç jetin enine momentum ( $P_T$ ) grafiği.....                               | 38 |
| <b>Şekil 4.29:</b> FCC-eh çarpıştırıcısında $e^- p \rightarrow \nu_e W^- q$ arka plan süreci için elde edilen üç jetin sanki-hızlılık ( $\eta$ ) grafiği.....                              | 38 |
| <b>Şekil 4.30:</b> FCC-eh çarpıştırıcısında $e^- p \rightarrow \nu_e W^- q$ arka plan süreci için elde edilen kayıp enine enerji ( $E_T$ ) grafiği.....                                    | 39 |
| <b>Şekil 4.31:</b> FCC-eh çarpıştırıcısında $e^- p \rightarrow \nu_e \bar{t}$ arka plan süreci için elde edilen üç jetin enine momentum ( $P_T$ ) grafiği.....                             | 40 |
| <b>Şekil 4.32:</b> FCC-eh çarpıştırıcısında $e^- p \rightarrow \nu_e \bar{t}$ arka plan süreci için elde edilen üç jetin sanki-hızlılık ( $\eta$ ) grafiği.....                            | 40 |
| <b>Şekil 4.33:</b> FCC-eh çarpıştırıcısında $e^- p \rightarrow \nu_e \bar{t}$ arka plan süreci için elde edilen kayıp enine enerji ( $E_T$ ) grafiği.....                                  | 41 |
| <b>Şekil 4.34:</b> LHeC çarpıştırıcısında farklı toplanmış ışınlık değerleri ile SS - $\kappa$ grafiği....                                                                                 | 42 |
| <b>Şekil 4.35:</b> FCC-eh çarpıştırıcısında farklı toplanmış ışınlık değerleri ile SS - $\kappa$ grafiği.....                                                                              | 43 |
| <b>Şekil 4.36:</b> LHeC çarpıştırıcısında $\kappa_{tuh} = \kappa_{tch} = 0.05$ parametre değerinde elde edilen elektronun farklı polarizasyon durumları için SS - $L_{int}$ grafiği. ....  | 44 |
| <b>Şekil 4.37:</b> FCC-eh çarpıştırıcısında $\kappa_{tuh} = \kappa_{tch} = 0.05$ parametre değerinde elde edilen elektronun farklı polarizasyon durumları için SS - $L_{int}$ grafiği..... | 44 |
| <b>Şekil 4.38:</b> LHeC çarpıştırıcısında $\kappa_{tuh} = \kappa_{tch} = 0.05$ parametre değeri ile elde edilen Higgs değişmez kütle grafiği.....                                          | 45 |
| <b>Şekil 4.39:</b> FCC-eh çarpıştırıcısında $\kappa_{tuh} = \kappa_{tch} = 0.05$ parametre değeri ile elde edilen Higgs değişmez kütle grafiği.....                                        | 46 |
| <b>Şekil 4.40:</b> LHeC çarpıştırıcısında $\kappa_{tuh} = \kappa_{tch} = 0.05$ parametre değeri ile elde edilen üst kuark değişmez kütle grafiği.....                                      | 47 |
| <b>Şekil 4.41:</b> FCC-eh çarpıştırıcısında $\kappa_{tuh} = \kappa_{tch} = 0.05$ parametre değeri ile elde edilen üst kuark değişmez kütle grafiği.....                                    | 47 |
| <b>Şekil 4.42:</b> Dallanma oranının anormal FCNC bağlaşım sabiti ile ilişkisi ( $\kappa_{tuh} = \kappa_{tch}$ ). ....                                                                     | 49 |

## TABLO LİSTESİ

### Sayfa No

|                                                                                                                                                                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tablo 4.1:</b> LHeC’de $e^-p \rightarrow \nu_e h \bar{q}$ ( $\bar{q} = \bar{u}, \bar{c}$ ) süreci için farklı parametre değerleri ile elde edilen tesir kesitleri (pb). Arka plan tesir kesiti $\sigma_b = 1.104 \times 10^{-2}$ pb’dir.....                           | 16 |
| <b>Tablo 4.2:</b> Sinyal tesir kesiti ile dallanma oranı ve verimlilik çarpımı sonuçları. Sinyal ile girişim yapan arka plan katkısı $2.305 \times 10^{-3}$ pb olarak hesaplanmıştır. ....                                                                                | 16 |
| <b>Tablo 4.3:</b> FCC-eh’de $e^-p \rightarrow \nu_e h \bar{q}$ ( $\bar{q} = \bar{u}, \bar{c}$ ) süreci için farklı parametre değerleri ile elde edilen tesir kesitleri (pb). Arka plan tesir kesiti $\sigma_b = 9.279 \times 10^{-2}$ pb’dir. ....                        | 17 |
| <b>Tablo 4.4:</b> Sinyal tesir kesiti ile dallanma oranı ve verimlilik çarpımı sonuçları. Sinyal ile girişim yapan arka plan katkısı $1.937 \times 10^{-2}$ pb olarak hesaplanmıştır. ....                                                                                | 17 |
| <b>Tablo 4.5:</b> Arka plan tesir kesitine katkıda bulunan süreçler ve karşılık gelen tesir kesitleri (pb). ....                                                                                                                                                          | 20 |
| <b>Tablo 4.6:</b> LHeC’de sinyal ( $\kappa_{tqh} = 0.05$ ) ve arka plan süreçleri için elektron demeti polarize olmadan ve polarize durumda tesir kesitleri (pb). Burada NP=0 arka plana karşılık gelmektedir, NP=1 ise sinyal ve arka planı birlikte içermektedir.....   | 20 |
| <b>Tablo 4.7:</b> FCC-eh’de sinyal ( $\kappa_{tqh} = 0.05$ ) ve arka plan süreçleri için elektron demeti polarize olmadan ve polarize durumda tesir kesitleri (pb). Burada NP=0 arka plana karşılık gelmektedir, NP=1 ise sinyal ve arka planı birlikte içermektedir..... | 20 |
| <b>Tablo 4.8:</b> İstatistiksel Önem (SS) tablosu.....                                                                                                                                                                                                                    | 42 |

## SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

| Simgeler       | Açıklama                                                                              |
|----------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| $\gamma$       | : Foton                                                                               |
| $e$            | : Elektron                                                                            |
| $\mu$          | : Müon                                                                                |
| $\tau$         | : Tau                                                                                 |
| $u$            | : Yukarı kuark                                                                        |
| $d$            | : Aşağı kuark                                                                         |
| $c$            | : Tılsımlı kuark                                                                      |
| $s$            | : Acayip kuark                                                                        |
| $t$            | : Üst kuark                                                                           |
| $b$            | : Alt kuark                                                                           |
| $p$            | : Proton                                                                              |
| $W^-$          | : $W^-$ bozonu                                                                        |
| $W^+$          | : $W^+$ bozonu                                                                        |
| $Z^0$          | : $Z^0$ bozonu                                                                        |
| $V$            | : Vektör bozonu                                                                       |
| $g$            | : Gluon                                                                               |
| $H, h$         | : Higgs bozonu                                                                        |
| $q$            | : Çoklu parçacık tanımı; $u, d, c, s, b, \bar{u}, \bar{d}, \bar{c}, \bar{s}, \bar{b}$ |
| $\bar{q}$      | : Çoklu parçacık tanımı; $\bar{u}, \bar{c}$                                           |
| $P_T$          | : Enine momentum                                                                      |
| $\eta$         | : Sanki-hızlılık                                                                      |
| $E_T$          | : Kayıp Enine Enerji                                                                  |
| $\Delta\sigma$ | : Toplam tesir kesit - Arka planın tesir kesiti                                       |
| $\sigma_b$     | : Arka planın tesir kesiti                                                            |
| $L_{int}$      | : Toplanmış ışınlık                                                                   |
| $\kappa_{tqh}$ | : $t - u - h$ ve $t - c - h$ bağlaşım parametresi                                     |

| <b>Kısaltmalar</b> | <b>Açıklama</b>                                         |
|--------------------|---------------------------------------------------------|
| <b>ATLAS</b>       | : Toroidal LHC Aparatı                                  |
| <b>B</b>           | : Arka Planın Olay Sayısı                               |
| <b>BR</b>          | : Dallanma oranı                                        |
| <b>BSM</b>         | : Standart Model Ötesi                                  |
| <b>CDR</b>         | : Kavramsal Tasarım Raporu                              |
| <b>CL</b>          | : Güvenilirlik seviyesi                                 |
| <b>CMS</b>         | : Tıkız Müon Selenoit                                   |
| <b>CP</b>          | : Yük-Parite                                            |
| <b>DIS</b>         | : Derin İnelastik Saçılma                               |
| <b>ERL</b>         | : Enerji Dönüştümlü Doğrusal Hızlandırıcı               |
| <b>EW</b>          | : Elektrozayıf                                          |
| <b>FCC</b>         | : Geleceğin Dairesel Çarpıştırıcısı                     |
| <b>FCC-ee</b>      | : Geleceğin Dairesel Çarpıştırıcısı - elektron-pozitron |
| <b>FCC-eh</b>      | : Geleceğin Dairesel Çarpıştırıcısı - elektron-hadron   |
| <b>FCC-hh</b>      | : Geleceğin Dairesel Çarpıştırıcısı - hadron-hadron     |
| <b>FCNC</b>        | : Çeşni Değiştiren Yüksüz Akım                          |
| <b>GIM</b>         | : Glashow-Iliopoulos-Maiani                             |
| <b>HERA</b>        | : Hadron Elektron Halka Hızlandırıcısı                  |
| <b>KAT</b>         | : Kuantum Alan Teorisi                                  |
| <b>LHC</b>         | : Büyük Hadron Çarpıştırıcısı                           |
| <b>LHeC</b>        | : Büyük Hadron Elektron Çarpıştırıcısı                  |
| <b>MET</b>         | : Kayıp enine enerji                                    |
| <b>NP</b>          | : Yeni Fizik                                            |
| <b>S</b>           | : Sinyalin Olay Sayısı                                  |
| <b>SS</b>          | : İstatistiksel Önem                                    |
| <b>SM</b>          | : Standart Model                                        |

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

#### ELEKTRON-PROTON ÇARPIŞTIRICILARINDA HIGGS-ÜST SEKTÖR KUARKLARIN ÇEŞNİ DEĞİŞTİREN YÜKSÜZ AKIM BAĞLAŞIMLARININ ARAŞTIRILMASI

Burak HACIŞAHİNOĞLU

İstanbul Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Ayberk YILMAZ

II. Danışman: Doç. Dr. İlkay TÜRK ÇAKIR

Standart Model ötesindeki yeni fizik arayışında FCNC, geleceğin çarpıştırıcılarındaki gözlemlenebilirliği bakımından iyi bir araştırma konusudur. Çarpıştırıcılarda daha yüksek enerji ve ışınlık ile Higgs üretiminin artması, bildiğimiz fiziği doğrulamamız için ve yeni fizik arayışı için elzemdir. Bu tez çalışmasında elektron-proton çarpışmasında  $e^- p \rightarrow \nu_e h q$  süreci yoluyla üst kuark-Higgs bozonu-yukarı sektör hafif kuarkların çeşni değiştiren yüksüz akım köşesi  $t \rightarrow hu(c)$  ve  $h \rightarrow b\bar{b}$  kanalları aracılığıyla incelenmiştir. Kullanılan parametreler gelecekte kurulması planlanan LHeC ve FCC-eh elektron-proton çarpıştırıcılarına uygun bir şekilde seçilmiştir.  $tuh$  ve  $tch$  anormal FCNC bağlaşımlarının gözlemlenebilirliği hesaplanmıştır.  $\kappa_{tuh}$  ve  $\kappa_{tch}$  bağlaşım parametrelerinin iyi istatistik veren değerleri bu parametrelerin eşit olduğu senaryoda belirlenmiş ve buna karşılık üst kuarkın  $t \rightarrow hu(c)$  bozunumuna dallanma oranına koyabileceği sınırlar hesaplanmıştır. Elde edilen sınırlar LHC’de, ATLAS ve CMS deneylerinden gelen sınırlarla karşılaştırılmıştır.

Ekim 2017, 74 sayfa.

**Anahtar kelimeler:** Higgs Bozonu, Üst Kuark, Anormal FCNC Bağlaşımları, Geleceğin Elektron-Proton Çarpıştırıcıları.

## SUMMARY

M.Sc. THESIS

### SEARCH FOR FLAVOUR CHANGING NEUTRAL CURRENT COUPLINGS OF HIGGS-UP SECTOR QUARKS AT ELECTRON-PROTON COLLIDERS

Burak HACIŞAHİNOĞLU

İstanbul University

Institute of Graduate Studies In Science and Engineering

Department of Physics

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ayberk YILMAZ

Co-Supervisor: Assoc. Prof. Dr. İlkey TÜRK ÇAKIR

In the search for new physics beyond the Standard Model, FCNC is a good research topic in terms of the observability at future colliders. Increased Higgs production with higher energy and luminosity in colliders is essential for verification of our knowledge of physics and the search for new physics. In this thesis, flavour changing neutral current vertex of top quark-Higgs boson-up sector light quarks have been investigated with  $t \rightarrow hu(c)$  and  $h \rightarrow b\bar{b}$  channels through the  $e^-p \rightarrow \nu_e h q$  electron-proton collision process. The parameters used were chosen in accordance with the planned LHeC and FCC-eh electron-proton colliders in the future. The observability of anomalous FCNC couplings  $tuh$  and  $tch$  are calculated. The good statistical values of the  $\kappa_{tuh}$  and  $\kappa_{tch}$  coupling parameters are determined in the scenario that these parameters are equal and then the limits that top quarks branching ratio into  $t \rightarrow hu(c)$  decay are calculated. Obtained limits were compared with those from ATLAS and CMS experiments in LHC.

October 2017, 74 pages.

**Keywords:** Higgs Boson, Top Quark, Anomalous FCNC Couplings, Future Electron-Proton Colliders.

## 1. GİRİŞ

Üst kuarkın kütlesinin büyük olması nedeniyle üst kuark fiziği elektrozayıf ayar simetrisinin kırıldığı dinamiği araştırmak için oldukça önemlidir. Üst kuark diğer Standart Model (SM) parçacıklarıyla ayar etkileşimleri ve Yukawa etkileşimleri yoluyla etkileşir. Elektrozayıf ve güçlü sektörde üst kuark etkileşimlerini içeren birçok önemli sonuç, Tevatron ve LHC deneylerinde ortaya çıkmıştır. Son zamanlarda ATLAS ve CMS deneyleri üst kuarkın birçok özelliğini yüksek bir hassasiyetle ölçmüştür. Bu ölçümlerin LHC'nin çarpışma kütle merkezi enerjisi 13 TeV veya 14 TeV de daha çok veri ile daha hassas ölçümleri yapılacaktır.

Çeşni değiştiren yüksüz akım (FCNC) bağlaşımları SM'de ağaç seviyesinde yoktur. Ancak ilmek seviyesinde Glashow-Iliopoulos-Maiani (GIM) mekanizması [1] ile bastırılmış olarak ortaya çıkmaktadır. İlmek seviyesinde üst kuarkın FCNC bozunma oranı  $10^{-12}$  [2] veya daha azdır. Standart Model Ötesindeki (BSM) yeni fizik modellerinde bu FCNC oranları birkaç mertebe yükselebilir. Böylece bu etkileşimler mevcut deneysel veriler kullanılarak algılanabilir ve gelecek çarpıştırıcılarda üst kuark-Higgs çeşni değiştiren yüksüz akımları çalışmak hem teorik açıdan hem de deneysel açıdan oldukça önem taşımaktadır.

Üst kuark, Higgs bozonu ve yukarı veya tılsımlı kuark ( $t_{uh}$  ve  $t_{ch}$ ) arasındaki anormal çeşni değiştiren yüksüz akım Yukawa etkileşimleri Liu ve diğ.nin [3] çalışmasında incelenmiştir. Burada bahsedilen çalışmada 14 TeV LHeC ve 150 GeV elektron demeti enerjilerinde  $200 \text{ fb}^{-1}$  toplanmış ışınlıkla üst kuarkın Higgs bozonu ve hafif kuarka bozunum dallanma oranı<sup>1</sup>  $1.34 \times 10^{-4}$  olarak verilmiştir. Bunun FCNC parametresine dönüştürülmesi sonucu  $\kappa_{tqh}$  limiti 0.0162 olarak elde edilmiştir.

ATLAS işbirliği ( $\sqrt{s} = 8 \text{ GeV}$ ,  $L_{int} = 20.3 \text{ fb}^{-1}$ )  $tqh$  FCNC bağlaşımlarını  $h \rightarrow b\bar{b}$  kanalı ile arayışında dallanma oranlarına koyduğu limit güvenilirlik seviyesi %95 CL ile  $\text{BR}(t \rightarrow ch) < \%0.56$  ve  $\text{BR}(t \rightarrow uh) < \%0.61$ 'dir. Bu veriyi  $h \rightarrow \gamma\gamma$ ,  $h \rightarrow WW^*$  ve  $h \rightarrow \tau^+\tau^-$  kanalları ile birleştirdiklerinde limitleri  $\text{BR}(t \rightarrow ch) < \%0.46$  ve  $\text{BR}(t \rightarrow uh) < \%0.45$  değerlerine indirgemektedirler [4].

CMS işbirliği ( $\sqrt{s} = 8 \text{ GeV}$ ,  $L_{int} = 19.7 \text{ fb}^{-1}$ )  $tqh$  FCNC bağlaşımlarının arayışında Higgs bozonunun  $h \rightarrow \gamma\gamma$ ,  $h \rightarrow ZZ^*$ ,  $h \rightarrow WW^*$ ,  $h \rightarrow \tau^+\tau^-$  ve  $h \rightarrow b\bar{b}$  bozunum kanalları

---

<sup>1</sup>Bir parçacığın tüm bozunum kanalları arasından belirli bir bozunumun gerçekleşme olasılığı bu bozunumun dallanma oranı olarak ifade edilir.

aracılığıyla dallanma oranlarına koyduğu limit güvenilirlik seviyesi %95 CL ile  $BR(t \rightarrow ch) < \%0.40$  ve  $BR(t \rightarrow uh) < \%0.55$ 'tir [5].

Bu çalışmada elektron - proton çarpışmasında  $e^- p \rightarrow \nu_e h \bar{q}$  ( $\bar{q} = \bar{u}, \bar{c}$ ) süreci yoluyla üst kuark - Higgs bozonu - yukarı sektör hafif kuarkların çeşni değiştiren yüksüz akım köşesi incelenmiştir. Alınan enerjiler ve kullanılan algıç kartları gelecekte yapılması planlanan FCC-eh ve LHeC elektron-proton çarpıştırıcılarına olabildiğince uygun bir şekilde seçilmiştir.

2. bölümde çalışmanın genel kısımları verilmiştir. Temel parçacıklar ve temel etkileşmeler, üst kuark ve özellikleri, Higgs bozonu ve etkileşmeleri, Standart Model'in eksikleri ve yeni fizik, gelecekteki elektron proton çarpıştırıcıları verilmiştir.

3. bölümde çalışmayı kapsayan teorik bilgilere yer verilmiştir. İlgili sürece ait Feynman diyagramları çizilmiştir. Tesir kesiti hesabı ve hızlı algıç benzetimi yaparken kullanılan yöntemlere değinilmiştir.

4. bölümde elde edilen bulgulara yer verilmektedir. Tesir kesitleri, bu tesir kesitlerinin verimlilik çarpımları, tesir kesitlerinin  $\kappa_{tqh}$  FCNC parametreleri ile ilişkisi, arka plana yüksek katkı yapabilecek süreçlerin tesir kesiti hesapları, elektron polarizasyonunun tesir kesitleri ile ilişkisi, ilgilenilen her bir süreç için algıç benzetiminden gelen verilerle elde edilen üç jetin<sup>2</sup> kinematik dağılım grafikleri ve sinyal süreçlerinden gelen değişmez kütle grafikleri hem FCC-eh hem de LHeC için verilmiştir. İstatistiksel önem (SS) değerleri hesaplanmıştır. Parametre ile dallanma oranı arasındaki ilişki hesaplanmıştır.

5. bölümde LHeC ve FCC-eh'nin  $\kappa_{tqh}$  FCNC parametrelerine koyabileceği sınırlar hesaplanmıştır. Bu parametreler ile dallanma oranı arasındaki ilişki tartışılmıştır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar literatürdeki benzer bir çalışmanın sonuçları ile ve ATLAS ve CMS deneylerinde elde edilen sınırlar ile karşılaştırılmıştır.

---

<sup>2</sup>Kuarkların ve karşıt kuarkların hadronlaşması ile veya gluonların kuark-karşıt kuark çiftleri üreterek hadronlaşması yoluyla ortaya çıkan ve yayılırken bir koni biçimi oluşturan parçacık kümesine jet denir. Bu parçacıklar algıç tarafından görülüp yapılandırılırlar ve böylece ana kuarkın ya da gluonun jet sinyalini ortaya çıkarırlar. Yüksek enerji fiziği çarpışmalarında bir jet, iki jet veya çoklu jetler ortaya çıkabilir.

## 2. GENEL KISIMLAR

### 2.1. TEMEL PARÇACIKLAR VE TEMEL ETKİLEŞMELER

Doğayı iyi anlamak için maddenin en temelini oluşturan temel parçacıkları anlamak gereklidir. Bu amaç adına yapılan çalışmalar yüzyıllar öncesine dayanır. Günümüzde geldiğimiz noktada ise Standart Model, kuramsal olarak ve deneysel destekle birikimlerimizi en iyi tanımlayan ve sınıflandıran modeldir.

Standart Model, temel parçacıkları ve bunların aralarındaki etkileşimleri açıklayan, eksikleriyle birlikte şu anda oldukça geçerli ve iyi bir modeldir. Bu model Kuantum Alan Teorisine (KAT) dayanır. Temel parçacıkları noktasal, alanları ise bunlara eşlik eden kavramlar olarak düşünülebilir. KAT'ta parçacıklar alanların özel bir durumu olan kuantize formudur. KAT, kuantum fiziği ile özel rölativiteyi birleştirmenin yanında hem alanların hem de parçacıkların ifade edilebildiği, zamanla parçacık sayısının ve tipinin değişebildiği temel düzeydeki süreçlerin ifade edilebileceği bir matematiksel yapıdır.

Standart Model'in temel parçacıklarını [6, 7] spin istatistiğine göre fermiyonik ve bozonik olarak ikiye ayırabiliriz:

1) Fermiyonik parçacıklar; Fermi-Dirac istatistiğine uyarlar, buçuklu spine sahiptirler. Bu sınıfa giren alt gruplar leptonlar ve kuarklardır. Özdeş iki fermiyon aynı kuantum durumunda bulunamazlar, bu olgu Pauli dışarılama ilkesiyle açıklanmaktadır.

2) Bozonik parçacıklar; Bose-Einstein istatistiğine uyarlar, tam sayılı spine sahiptirler. Bu sınıfa giren parçacıklar ayar bozonları ve Higgs bozonudur. Özdeş iki bozon aynı kuantum durumunda bulunabilirler.

Temel parçacıkları leptonlar, kuarklar ve bozonlar olarak sınıflandırabiliriz.

Leptonlar; elektron, müon, tau, elektron nötrinosu, müon nötrinosu, tau nötrinosu ve bunların karşıt parçacıkları olmak üzere 12 tanedir. Bir parçacığın karşıt parçacığı, kendisiyle aynı kütle ve spine sahiptir, elektrik yükü ters işaretlidir.

Kuarklar; yukarı (u), aşağı (d), tılsımlı (c), acayip (s), üst (t), alt (b) olmak üzere 6 farklı çeşnide kuark tipi vardır. Her kuark 3 farklı renk yüküne sahip olabilir. Karşıt kuarkları da hesaba kattığımızda 36 tane kuark vardır.

Bozonlar; foton ( $\gamma$ ),  $W^-$ ,  $W^+$ ,  $Z^0$ , gluon (g) ve Higgs (H) bozonundan oluşur.

Temel etkileşmeler; elektromanyetik etkileşme, zayıf etkileşme, güçlü etkileşme ve gravitasyonel etkileşmedir. Elektromanyetik etkileşmenin kuvvet taşıyıcı parçacığı fotondur. Elektrik yükü taşıyan parçacıklar arasında gerçekleşir. Zayıf etkileşmenin kuvvet taşıyıcı parçacıkları  $W^-$ ,  $W^+$  ve  $Z^0$ 'dır. Bütün leptonlar ve bütün kuarklar zayıf etkileşmede bulunabilirler. Güçlü etkileşmenin kuvvet taşıyıcısı gluondur. Yalnızca kuarklar ve gluonlar güçlü etkileşmede bulunabilirler.

Gravitasyonel etkileşmeler SM'ye dâhil edilmemiştir. Gravitasyonel etkileşmeyi şu anda en iyi açıklayan kuram genel rölativitedir. Gravitasyonel dalgaların varlığı 2015'te gözlemlenmiştir [8] ancak bu deney gravitasyonel dalgaların kuantasına dair bir gözlem değildir.

## 2.2. ÜST KUARK VE ÖZELLİKLERİ

Üst kuark 1995 de Fermilab Tevatron çarpıştırıcısında, kütle merkezi enerjisi  $\sqrt{s} = 1.8$  TeV'de toplanmış ışınık  $L_{int} \approx 50 \text{ pb}^{-1}$  ile  $p\bar{p}$  çarpışmalarında keşfedilmiştir [9, 10]. Bilinen en ağır temel parçacıktır. Güçlü etkileşmenin en direk ölçümü üst kuark çift oluşumunda gözlemlenmiştir. O güne kadar gözlemlenmemiş olan zayıf etkileşimin ölçümü, üst kuark bozunumunda ve üst kuark üretiminde yapılmıştır. Üst kuarkın büyük kütlesi ( $\approx 173 \text{ GeV}/c^2$ ), onun doğada özel bir rolü olacağını düşündürmektedir. Büyük kütlesinden ve buna karşılık gelen kısa ömründen ( $\Gamma_{top} = 1.41^{+0.19}_{-0.15} \text{ GeV}$  [11] bozunma genişliği ile ömrü  $\tau_{top} = 4.67^{0.56}_{0.55} \times 10^{-25} \text{ s}$  olarak hesaplanmıştır.) dolayı diğer bütün kuarklardan farklı şekilde davranır. Üst kuark hadronize olmadan önce bozunur, spin bilgileri bozunduğu parçacıklara geçer. Bu nedenle üst kuarkın spinine bağlı olan gözlemlenebilirleri ölçmek mümkündür. Standart Modeli test için ve Standart Model Ötesi (BSM) arayışı için eşsiz bir ortam sağlar [12].

## 2.3. HIGGS BOZONU VE ETKİLEŞMELERİ

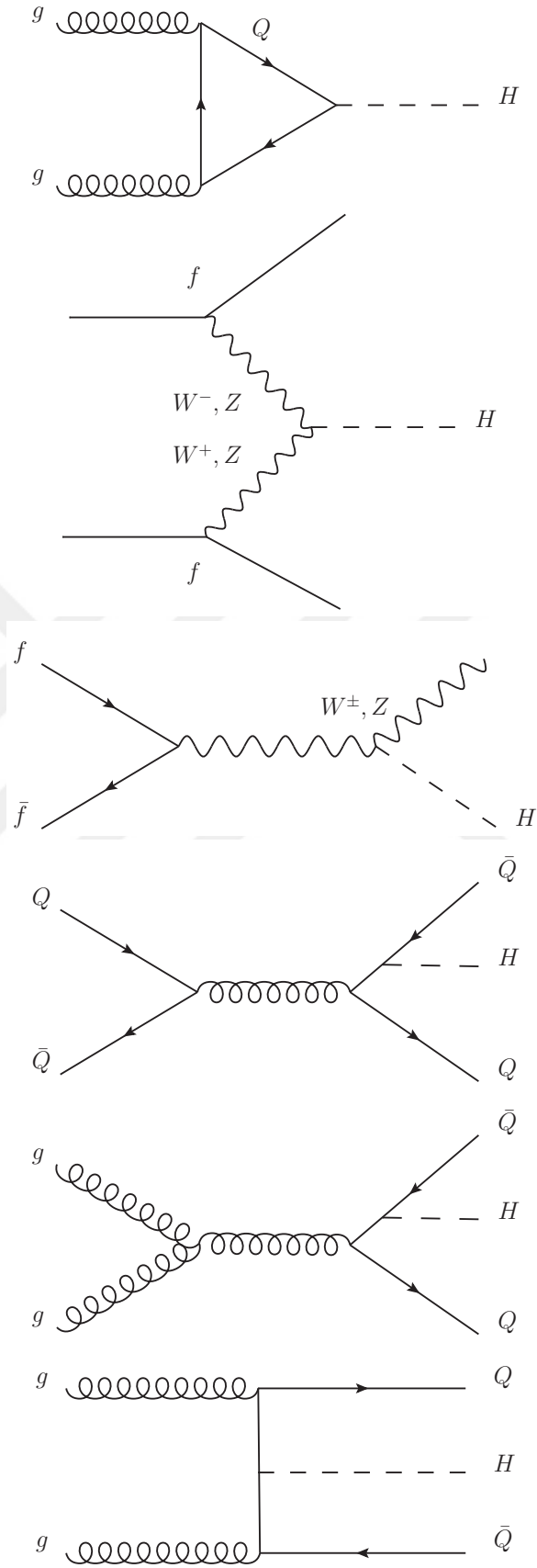
Temel parçacıkların elektromanyetik ve zayıf etkileşmelerini birleştiren elektrozayıf teori, 1970'den beri, bilim tarihinde benzeri görülmemiş bir hassasiyette deneysel destek almıştır. Bu birleşme, kütsüz foton ile kütleli W ve Z vektör bozonu arasındaki yakın ilişkiyi içermektedir. Higgs mekanizmasının keşfinden önce, kütleli ve kütsüz kuvvet taşıyıcıları içerebilen bir yerel simetri ile tutarlı bir rölativistik alan teorisinin nasıl formüle edileceği bilinmiyordu.

1962'de, Goldstone teoremi bir rölativistik alan teorisindeki kendiliğinden simetri kırılmasının o tarihte deneysel olarak dışlanmış olan kütsüz spin-0 bozonları ile sonuçlanacağını göstermektedir. Peter Higgs'in 15 Eylül 1964'te Physics Letters'da yayınlanan makalesinde [13], bir rölativistik teoride yerel simetri kendiliğinden kırıldığı

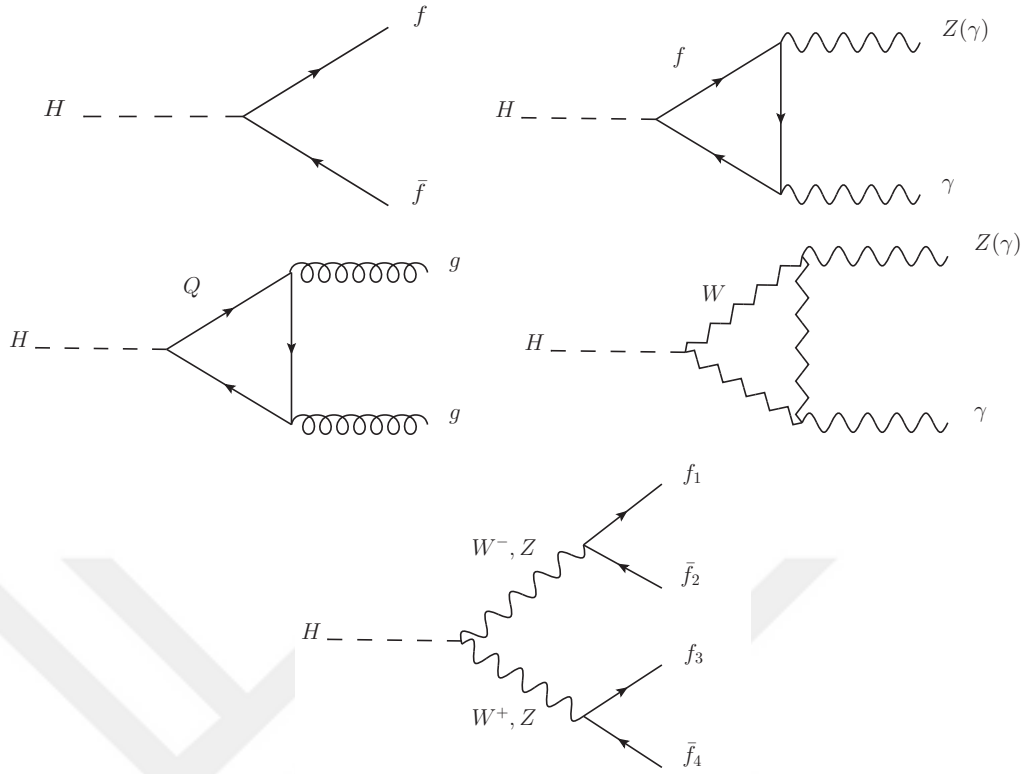
zaman Goldstone bozonlarının meydana gelmesine gerek olmadığını göstermiştir. Bunun yerine, Goldstone modu kütleli vektör alanının üçüncü polarizasyonunu sağlar. Orijinal skaler ikilinin diğer modu bir kütleli spin-0 parçacık olan Higgs bozonu olarak kalır [14].

Higgs bozonunun keşfi Temmuz 2012’de LHC’de ATLAS deneyinde, kütle merkezi enerjisi  $\sqrt{s} = 7$  TeV’de toplanmış ışıklık  $L_{int} \approx 4.8 fb^{-1}$  ile ve  $\sqrt{s} = 8$  TeV’de  $L_{int} \approx 5.8 fb^{-1}$  ile; CMS deneyinde  $\sqrt{s} = 7$  TeV’de  $L_{int} \approx 5.1 fb^{-1}$  ile ve  $\sqrt{s} = 8$  TeV’de  $L_{int} \approx 5.3 fb^{-1}$  ile toplanan verilerin analizi neticesinde  $pp$  çarpışmalarında keşfedilmiştir [15, 16].

Higgs bozonu dikkat çekici karakteristik özelliklere sahiptir ve bu özellikler onu temel parçacıklar arasında eşsiz bir konuma koyar. Spin 1/2 ve spin 1 olan diğer tüm temel parçacıkların aksine 0 spine sahiptir. Higgs bozonunun bir diğer eşsiz özelliği ise parçacıklarla yaptığı bağlaşım, o parçacıkların kütleleriyle orantılı olmasıdır. SM’nin en ağır parçacığı üst (t) kuarkla,  $W^{\pm}$  ve Z bozonlarıyla güçlü bir şekilde bağlaşım yapar. Daha az oranda sırasıyla alt (b) kuarkla, tau leptonuyla, tılsımlı (c) kuarkla ve daha az oranda acayip (s), aşağı (d) ve yukarı (u) kuarkla bağlaşım yapar. Fotonların ve gluonların kütleleri olmadığından doğrudan Higgs ile bağlaşımları yoktur ancak, kuantum dalgalanmalar yoluyla dolaylı bir şekilde olabilir. Higgs-foton-foton ve Higgs-gluon-gluon bağlaşımları üçgen ilmekler vasıtasıyla gerçekleşebilir. Higgs üretiminin hadron çarpıştırıcılarındaki ana kanalları Şekil 2.1’de gösterilmiştir. Şu ana kadarki en baskın kanal iki gluonun füzyonunda üçgen üst kuark ilmeği aracılığıyla Higgs bozonunun üretildiği kanaldır. Bir sonraki baskın kanal  $W^{\pm}$  ve Z vektör bozonlarının füzyonu aracılığıyla oluşan Higgs kanalı ve sonraki kanallar sırasıyla  $W^{\pm}$  ve Z bozonlarının Higgs radyasyonu yaptığı, ve üst (t) kuarkın Higgs radyasyonu yaptığı kanallardır [17].



**Şekil 2.1:** Higgs bozonunun hadron çarpıştırıcılarındaki ana üretim kanallarını gösteren Feynman diyagramları.



**Şekil 2.2:** Higgs bozonunun bozunum modlarını gösteren Feynman diyagramları.

Şekil 2.2’de Higgs bozonunun bozunum modları verilmiştir. En baskın bozunum modu yaklaşık %58 ile Higgs’in  $b$  ve  $\bar{b}$ ’a bozunumudur. Bu tez çalışma boyunca Higgs’i yapılandırmak için Higgs’in  $b\bar{b}$ ’a bozunumu ile ilgilenilmiştir.

#### 2.4. STANDART MODELİN EKSİKLERİ VE YENİ FİZİK

Standart Model her anlamıyla tamamlanmış ve hiçbir soruna mahal vermeyen bir model değildir. Bir takım gözlemlerimizi açıklayamamakta ve bazı sorularımızı cevaplayamamaktadır.

SM’nin en önemli eksikliklerinden biri, gözlemini ilk ve en kolay yaptığımız gravitasyonel kuvvetin teorisinin SM’de yer almamasıdır.

Evrende gözlemlediğimiz galaksiler zamanla birbirlerinden hızlanarak uzaklaşmaktadırlar. Büyük Patlama’dan sonra evrenin genişlemesinin kütle çekim kuvveti ile zamanla azalmasını bekleriz. Bu genişlemenin aksine hızlanarak artıyor olması evreni kaplayan negatif basınçlı bir enerjinin varlığını düşündürmüştür. Bu enerjiye Karanlık Enerji denmektedir. Bu enerjinin evrenin %68’ini oluşturduğu ileri sürülmüştür [18]. SM bu gözleme net bir açıklama getirememektedir.

Galaksilerdeki güneş sistemlerini incelediğimizde gezegenlerin Kepleryan hareket ettiklerini gözlemliyoruz. Güneş sisteminde merkezden uzağa gidildikçe dış yörüngedeki

gezegenlerin çok daha uzun bir yörüngesi olduğunu, bu yörüngedeki bir tam turunu tamamlamak için daha fazla zamana ihtiyacı olduğunu görüyoruz. Ancak galaksilere bütün olarak baktığımızda, tıpkı kollarını açmış bir semazen gibi, neredeyse bütün olarak döndüğünü görüyoruz. Merkezden uzağa gidildikçe gezegenlerin hızı, güneş sistemi benzeri bir durumda yavaşlaması gerekirken, neredeyse aynı kalmaktadır [19]. Galaksilerin uç kısımlarının bu denli hızlı oluşu göremediğimiz bir maddenin varlığını düşündürmüştür. Bu maddeye Karanlık Madde denmektedir. Evrenin %27'sinin bu maddeyle dolu olduğu ileri sürülmüştür. SM bu probleme çözüm önerememektedir.

Karanlık Enerji ve Karanlık Maddedeki karanlık kelimesi sadece ne olduklarını göremediğimiz ve etkilerini çok dolaylı olarak görebildiğimiz için uygun görülmüş bir adlandırmadan kaynaklanmaktadır. Eğer bu gözlemler için yapılan Karanlık Enerji ve Karanlık Madde yorumları doğru ise, SM evrenin yalnızca %5'ini açıklayabiliyor demektir.

Bunlara ek olarak gravitasyonel kuvvet ile elektromanyetik kuvvet arasında ciddi bir mertebe farkı olması ve farklı ailelerin parçacıkları arasında ciddi bir kütle farkı olması, evrendeki madde ile karşıt madde arasındaki asimetri, nötrino salınımlarını açıklamak için nötrinoların kütleli olarak ifade edilmeye ihtiyaç duyulması, CP simetri kırılmasının yanı sıra neden elektrik yükü kuantize oluyor, neden üç tane lepton üç tane kuark ailesi var, neden kozmik sabit çok küçüktür ancak sıfır değildir [20] gibi sorulara cevap verilememesinin SM'nin eksikliklerinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Standart Model'in ötesinde Süpersimetri, Büyük Birleşik Kuramlar, Teknikolor, Sicim Kuramı, Ek boyutlar vb. çalışmalar ile yeni fizik arayışları vardır. FCNC bağlaşımlarının araştırılması, gelecekteki çarpıştırıcılarda gözlemlenebilirliği artacağından dolayı yeni fizik için önem taşımaktadır.

Üst kuarkın çeşni değiştiren yüksüz akım etkileşmesi (FCNC) en düşük mertebede yoktur. İlmek seviyesinde ise  $t \rightarrow qh$  ve  $t \rightarrow qV$  süreçleri bastırılmıştır. Bu ilmek seviyesinde etkileşmelerde yeni parçacıklar veya yeni etkileşmeler ilmekte katkıda bulunabilir. SM çerçevesinde  $10^{-14} - 10^{-12}$  mertebesinde olan dallanma oranları SM ötesinde yeni fizik senaryolarında  $10^{-6} - 10^{-5}$  mertebelerine gelmektedir. Bu şekilde bir dallanma oranının gözlenmesi SM ötesi fiziği için bir kanıt olacaktır. Bu tez çalışmasında üst kuark, Higgs bozonu ve yukarı tipli hafif kuarkların etkin etkileşme köşeleri gelecekteki elektron proton çarpıştırıcılarında incelenmiştir.

## 2.5. GELECEKTEKİ ELEKTRON PROTON ÇARPIŞTIRICILARI

Geleceğin Dairesel Çarpıştırıcısı (FCC) çalışmaları, LHC sonrası dönem için farklı dairesele çarpıştırıcı tasarımları üzerinde yoğunlaşmıştır. Bu çarpıştırıcılar, daha yüksek enerjilere ve benzeri görülmemiş ışınlıklara ulaşmak, doğanın temel yasalarının keşfedilmesine ve açıklanamayan gözlemlerin araştırılmasına imkân tanıyacaktır. Yeni enerji ölçekleri, karanlık madde, madde ve antimadde arasındaki asimetri, sıfır olmayan nötrino kütleleri ve karanlık enerji hakkındaki sorulara ışık tutacaktır. Dairesel parçacık hızlandırıcısı, 21. yüzyılda bu hedefe ulaşmak için uygulanabilir bir seçenektir. Böyle bir çarpıştırıcının kurulması, iyi odaklanmış bir teknoloji Ar-Ge programı ve kararlı bir bilimsel işbirliği gerektirmektedir. Güvenilir ve sürdürülebilir bir şekilde çalışabilecek bir çarpıştırıcı inşa etmek, yeni teknolojilerin geliştirilmesi ve yeni malzemelerin sanayileşmesini gerektirmektedir.

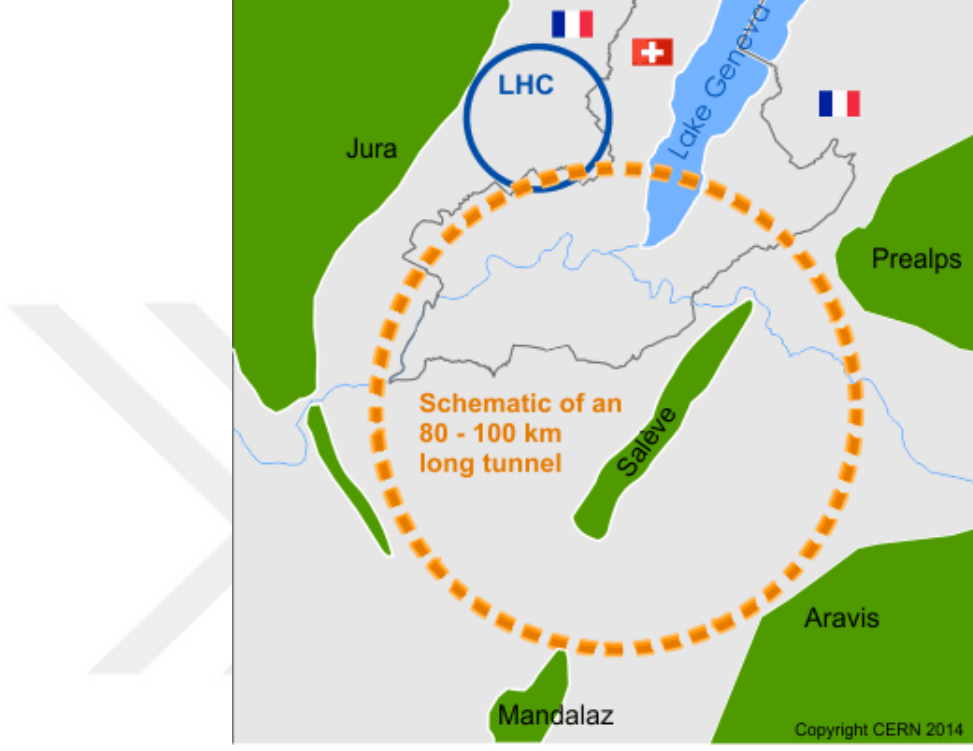
Ayrıca, Geleceğin Dairesel Çarpıştırıcısı (FCC), Evrenin bilinmeyen % 95'ini keşfetmek için bir pencere açabilir: Karanlık madde, süpersimetrik parçacıklar, sözde hiyerarşi problemi, başka temel etkileşimler olup olmadığı hakkında bize bilgi verecektir.

Daha önce kurulmuş olan Büyük elektron-pozitron Çarpıştırıcısı (LEP) ve Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (LHC), büyük bir hızlandırıcı kompleksinin ve parçacık detektörlerinin tasarımı ve inşası için 30 yıllık bir zaman diliminin uygun olduğunu göstermiştir. LHC'den sonra dünyanın parçacık fiziği programının devam etmesini sağlamak için, küresel olarak eşgüdümlü faaliyetleri birleştirme stratejisi gerekir. FCC bilimsel işbirliği, dünyanın dört bir yanından 70'ten fazla üniversite/enstitü arasında oluşturulmuş uluslararası bir işbirliğidir. Sürekli büyüyen FCC işbirliği, üniversitelere, bilimsel enstitülere ve yüksek teknoloji şirketlerine açıktır. Fizik araştırması ve teknoloji ilerlemesinde yeni sınırların açılmasının yanı sıra, büyük hızlandırıcı araştırma altyapılarının sosyal ve ekonomik yararları üzerine odaklanmaktadır. Yeni enerji ve yoğunluk sınırlarına ulaşmak için gereken teknolojik ilerlemeleri belirleyecek ve ilk aşamayı teknoloji fizibilite değerlendirmeleri yaparak gerçekleştirecektir. Ayrıca, kriyojenik, süperiletkenlik, materyal bilimi ve yeni veri işleme ve veri yönetimi kavramları da dâhil olmak üzere bilgisayar bilimi gibi farklı alanlarda yenilikçi teknolojiler geliştirilmesine yol açacaktır.

Bu bilimsel işbirliği, bir sonraki Avrupa Parçacık Fiziği Stratejisi için 2018'in sonuna kadar bir Kavramsal Tasarım Raporu (CDR) hazırlayacaktır. Yaklaşık yüz yıl önce başlayan bir çaba olan, Evrene olan derin araştırmamızın devam ettirilmesi için yön belirlemenin sağlam bir temelini sağlayacaktır [21].

FCC bilimsel işbirliği kapsamında, gelecekte yüksek enerjili, yüksek ışınlıklı elektron-pozitron, elektron-hadron ve hadron-hadron çarpıştırıcıları inşa etmek için

çeşitli senaryolar sunulmuştur: Geleceğin Dairesel hadron-hadron Çarpıştırıcısı (FCC-hh), Geleceğin Dairesel elektron-pozitron Çarpıştırıcısı (FCC-ee) ve bunlarla birlikte Enerji dönüşümlü doğrusal hızlandırıcı (ERL) ile birlikte kullanılarak Geleceğin Dairesel hadron-elektron Çarpıştırıcısı (FCC-eh). Gelecekte yapılması planlanan FCC'nin şematik gösterimi Şekil 2.3'te verilmiştir.



**Şekil 2.3:** Geleceğin Dairesel Çarpıştırıcısı (FCC) şeması.

Bu tez kapsamında, elektronları bir Enerji Dönüşüm Doğrusal Hızlandırıcısından (ERL), protonları Geleceğin Dairesel hadron-hadron Çarpıştırıcısından (FCC-hh) alan ve elektron-proton çarpışmasını sağlayan Geleceğin Dairesel hadron-elektron Çarpıştırıcısının (FCC-eh) parametreleri kullanılmıştır. FCC-eh yapılandırması, başlangıç durumlarının asimetrik olması sebebiyle ileri ve geri saçılmanın çözülebilmesi, güçlü etkileşim süreçlerinden gelen bastırılmış arka planlar ile birlikte temiz bir ortam sağlaması, yığılmalar, çoklu etkileşimler vb. sorunlardan arınmış olması ve bu tarz makinelerin protonun dinamik özelliklerinin Elektrozayıf (EW) ve Kuantum Renk Dinamiği (QCD) etkilerinin eşzamanlı denemesine izin veren hassas ölçümleri ile biliniyor olması bakımından daha avantajlıdır.

$E_e = 60$  GeV'den 120 GeV'e olan bir ERL enerjisi seçimi,  $E_p = 50$  (7) TeV proton enerjisi ile birlikte, FCC-hh (LHC) protonlarını kullanan FCC-eh'de (LHeC)  $\sqrt{s} \approx 3.5$  (1.3) TeV'den 5.0 (1.8) TeV'e olan bir kütle merkezi enerjisi sağlar. FCC-eh, çift Higgs bozonu üretimi aracılığıyla Higgs bozonunun kendisiyle olan etkileşmesini incelemek için yeterli enerjiye sahip olurdu. FCC-eh'de Higgs bozonu üretimi tesir

kesitinin önerilen 100 km'lik dairesel  $e^+e^-$  çarpıştırıcısındakinden beş kat daha fazla olacağı öngörülmektedir [22].

CERN'de gelecekte kurulması planlanan Büyük Hadron-elektron Çarpıştırıcısı (LHeC) [23–25], Büyük Hadron Çarpıştırıcısındaki (LHC) ve muhtemel Geleceğin Dairesel Hadron Çarpıştırıcısındaki (FCC-hh) yoğun hadron (proton ve iyon) hüzmeleri ile yeni bir elektron hızlandırıcısını birleştirmek amacıyla tasarımı yapılan bir projedir. LHeC, enerji sınırının hızlandırıcı araştırmasının bir parçası olarak, derin inelastik saçılma (DIS) fiziğinin evriminde bir sonraki mantıklı ve büyük adımdır. W ve Z bozonlarının kütlelerinin karesini geçen çok yüksek  $Q^2$ 'de ve LHeC'de  $x \simeq 10^{-6}$ 'ya kadar genişleyen çok düşük  $x \propto 1/s$ 'de Higgs veya lepto-quark gibi yeni parçacıkların yüksek kütlelerinde yeni DIS olayları ortaya çıkabilir. LHC'den gelen 7 TeV proton demeti ve 60 GeV elektron demeti karışımı ile LHeC'nin kinematik menzili Hadron Elektron Halka Hızlandırıcısınınkini (HERA) yaklaşık 20 faktörü ile geçiyor. Işınlığının varsayılan tasarım değeri  $10^{33} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  olacak şekilde muhtemelen  $10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  kadar yüksek ışınlığa erişebileceği öngörülmüştür. Bu, HERA'nın ışınlığından yaklaşık bin kat daha büyüktür ve bu LHeC'yi potansiyel bir hassas Higgs üretim tesisi yapar ve çok çeşitli yeni ölçümlere ve araştırmalara olanak sağlar.

Lepton-hadron çarpışmaları maddenin yapısının incelenmesinde önemli yer tutmaktadır. Örneğin, kuark-parton modeli yüksek enerjili elektronların durgun çekirdeklerden saçılması deneyleri sonucunda oluşmuştur. 1992 - 2007 yılları arasında çalıştırılan dünyanın ilk elektron-proton çarpıştırıcısı HERA ( $\sqrt{s} \approx 0.3 \text{ TeV}$ ) bu konuda sabit hedef deneylerine göre kinematik bölgenin büyük  $Q^2$  ve küçük  $x$  'in her ikisinde de iki merteye daha öteye kadar uzandığı yeni bir dönem açmıştır. Bununla birlikte, parton yoğunluğu doyumunun ortaya çıkacağı, yeterince küçük  $x$  ( $< 10^{-5}$ ) ve eş zamanlı olarak yüksek  $Q^2$  ( $> 10 \text{ GeV}^2$ ) bölgesi bugün için ulaşılmış değildir. Aşırı küçük  $x$  ve aynı zamanda yeterince büyük  $Q^2$  değerlerinde fizik olaylarının araştırılması çekirdekten partonlara kadar bütün seviyelerde kuvvetli etkileşmelerin anlaşılması için çok önemlidir.

Sonuç olarak, TeV kütle merkezi enerjisine sahip lepton-hadron çarpıştırıcıları Standart Model Ötesi fiziğin araştırılması bakımından hadron ve lepton çarpıştırıcılarına tamamlayıcı rol oynayacaktır.

### 3. MALZEME VE YÖNTEM

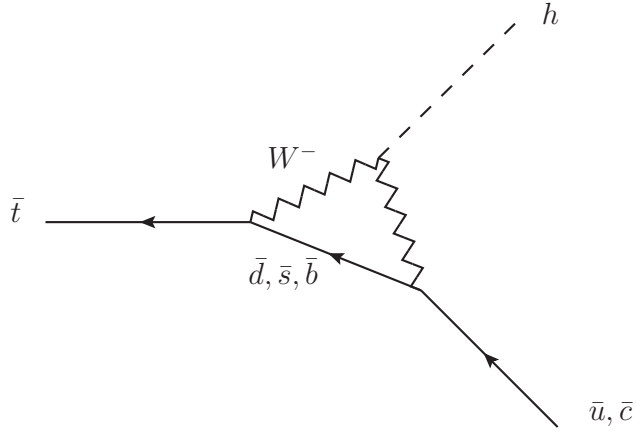
#### 3.1. ÜST KUARK - HIGGS ARASINDAKİ ÇEŞNİ DEĞİŞTİREN YÜKSÜZ AKIM ETKİLEŞMELERİ

Higgs ile üst sektör kuarklar arasındaki FCNC bağlaşımlarının araştırılması, üst kuarkın Higgs bozonuna ve  $u$  kuarka ya da  $c$  kuarka dallanması ile ( $t \rightarrow hq$  ( $q = u, c$ )) yapılmıştır. Olay üretiminde üst kuarkın kütle kabuğunda olması için sınırlandırma getirilmemiştir. Üst kuarkın bozunumunda Higgs bozonu yerine foton, gluon ve  $Z$  bozonu ile FCNC için mümkün araştırma senaryoları vardır.  $t - u - h$  ve  $t - c - h$  arasındaki bağlaşımlar için bir diğer arama kanalı Higgs bozonunun sanal üst kuark ve  $u$  veya  $c$ 'ye bozunumudur. Bu çalışma boyunca yalnızca  $t \rightarrow hq$  FCNC bağlaşımlarıyla ilgilenilmiştir. FCNC bağlaşımları SM'de ağaç seviyesinde olmadığından ilmek seviyesinde üçgen, kutu ya da penguen diyagramlarıyla gösterilmektedir. Böyle bir bağlaşım için üçgen diyagramı Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Burada  $htq$  bağlaşımlarının mümkün olduğu varsayımına uygun etkin bir lagranjiyen ile çalışılabilir.

Çeşni değiştiren yüksüz akım Yukawa etkileşimleri aşağıdaki etkin lagranjiyen[3, 4] ile yazılabilir:

$$L = \kappa_{tuh} \bar{t}uh + \kappa_{tch} \bar{t}ch + h.c. \quad (3.1)$$

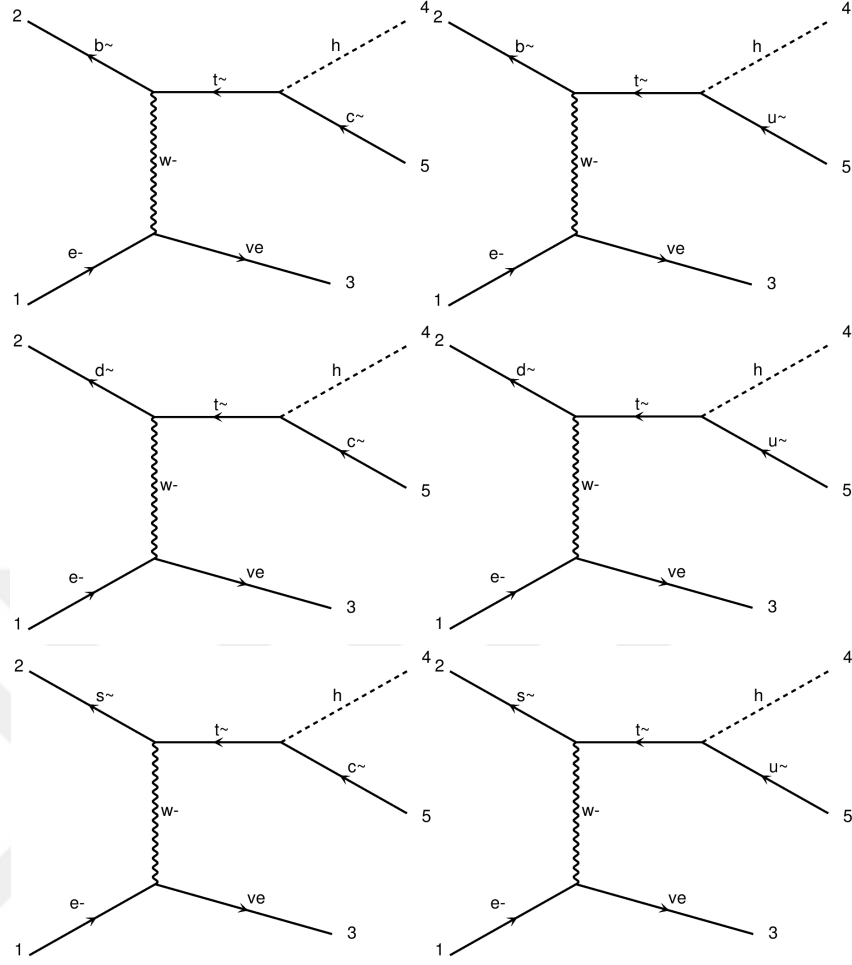
Burada  $\kappa_{tuh}$  ve  $\kappa_{tch}$  Higgs'in üst tip kuarklarla çeşni değiştiren yüksüz akım bağlaşım parametreleridir,  $\bar{t}uh$  ve  $\bar{t}ch$  bu üçlü bağlaşımları göstermektedir ve h.c. hermitsel eşlenik anlamına gelmektedir. SM lagranjiyenine bu terimler eklenerek hesap için ihtiyaç duyulan lagranjiyen oluşturulmuştur.



Şekil 3.1:  $\bar{t} \rightarrow h\bar{q}$  bozunumu ile üst-Higgs FCNC diyagramı

### 3.2. ELEKTRON-PROTON ÇARPIŞMASINDA $ep \rightarrow \nu_e h q$ SÜRECİNİN İNCELENMESİ

Elektron proton çarpışmasında  $e^- p \rightarrow \nu_e h \bar{q}$  ( $\bar{q} = \bar{u}, \bar{c}$ ) sürecinde üst - Higgs FCNC bağlaşımlarını içeren Feynman diyagramları Şekil 3.2’de verilmiştir. İlk durumdaki proton tanımına alt (b) kuarklar da eklenerek bu süreç değerlendirilmiştir. Son durumda elektrik yükü  $-\frac{2}{3}$  olan kuark olması istendiğinden dolayı ilk durumda elektronun yanında alt sektör kuarkların karşıtları gelmiştir. En baskın sinyal süreci alt (b) kuark aracılığıyla gerçekleşmektedir. İlk durumda üst kuark olmadığından dolayı arada üst kuark olmasının en doğal yolu  $W^-$  aracılığıyla kuarklar arasındaki yüklü bir akım olmasıdır. Bir elektron ile bir kuark ancak elektrozayıf olarak etkileşebilir. FCNC katkısı olarak yalnızca  $t - u - h$  ve  $t - c - h$  arasındaki bağlaşımlar SM’nin lagranjyenine eklenmiş olduğundan ilk durumdaki kuarkın çeşni değiştirebilmesi için yüklü bir akım gerçekleşmesi gerekmektedir. Aradaki üst kuarkın bozunumunun gerçekleştiği köşeler bu çalışmada ilgilenilen  $t - u - h$  ve  $t - c - h$  bağlaşımlarını ifade eden sinyelimizi göstermektedir.



Şekil 3.2:  $e^- p \rightarrow \nu_e h \bar{q}$  ( $\bar{q} = \bar{u}, \bar{c}$ ) sürecinde sinyalin Feynman diyagramları.

Arka plan katkısı için SM çerçevesinde  $q = u, d, c, s, b, \bar{u}, \bar{d}, \bar{c}, \bar{s}, \bar{b}$  olmak üzere  $e^- p \rightarrow \nu_e h q$ ,  $e^- p \rightarrow \nu_e Z q$ ,  $e^- p \rightarrow \nu_e W^- q$  ve  $e^- p \rightarrow \nu_e \bar{t}$  süreçleriyle ilgilenilmiştir. Tüm bu ilgilenilen süreçlerden gelen arka plan diyagramlarının sayısı fazla olduğundan burada gösterilmemiştir. Örneğin sinyal sürecinin arka plan oluşturan alt süreçlerinden biri  $e^- c \rightarrow \nu_e h s$  ve diğerleri ilk durumda  $c$  kuark yerine  $u$  kuark, son durumda  $s$  kuark yerine  $b$  kuark veya  $d$  kuark olacak şekildeki tüm kombinasyonlardan oluşur. Bu alt süreçlerin her biri beşer diyagramdan oluşur. Her bir sinyal alt süreçlerinin de mümkün olan beş diyagramının dördü arka plan oluşturmaktadır.

### 3.3. OLAY ÜRETİMİ VE HIZLI ALGIÇ BENZETİMİ

Bu çalışmada MadGraph5\_aMC@NLO [26] (sürüm 2.4.3) çok amaçlı olay üretici kullanılmıştır. Programın temeli keyfi seçilen süreçler için ağaç seviyesi ve bir ilmek seviyesi bağlaşımların genliklerinin hesabına dayanmaktadır. Programda SM ve BSM çalışılabilir, varsayılan olarak SM lagranjiyeni yer almaktadır. BSM çalışmak için ilgilenilen lagranjiyeni programa dâhil etmek gereklidir. Bunun için lagranjiyene uygun bir model dâhil edilir. İşbu çalışmada ilgilenilen üst kuark - Higgs FCNC bağlaşımları

için uygun model programın içindeki model dosyasında yer almadığından FeynRules'dan [27] hazır paket olarak alınmıştır. Etkin lagranjyenimiz için uygun model TFCNC\_UFO [28, 29] isimli modelidir. Modelde parametrelerin tanımlandığı dosyaya Wolfenstein parametreleri ( $A = 0.808$ ,  $\lambda = 0.2253$ ,  $\rho = 0.132$ ,  $\eta = 0.341$ ) dâhil edilmiştir ve CKM matris elemanları bunlara bağlı olacak şekilde değiştirilmiştir. Bu matris elemanları  $CKM_{11} = 1 - \lambda^2/2$ ,  $CKM_{12} = \lambda$ ,  $CKM_{13} = A\lambda^3(\rho - i\eta)$ ,  $CKM_{21} = -\lambda$ ,  $CKM_{22} = 1 - \lambda^2/2$ ,  $CKM_{23} = A\lambda^2$ ,  $CKM_{31} = A\lambda^3(1 - \rho - i\eta)$ ,  $CKM_{32} = -A\lambda^2$ ,  $CKM_{33} = 1$  şeklindedir. Böylece üçüncü aile kuarklarının birinci ve ikinci aile kuarkları ile karışımını hesaba katmak mümkün olmuştur.

Olay üretimi ve genlik hesabı sonrasında girilen sürece uygun olarak çıkan parçacıkların hadronizasyonlarının ve bozunumlarının gerçekleştirilmesi için Pythia [30] (sürüm 6.426) programı, Pythia programından geçen parçacıkların algıç benzetimi için ise Delphes (sürüm 3.3.3) programı kullanılmıştır.

Delphes'in amacı fenomenolojik çalışmalar için çok amaçlı algıç benzetimi yapmaya olanak tanımadır. Bu benzetim manyetik alana yerleştirilmiş iz yayılım (track propagation) sistemi, elektromanyetik ve hadron kalorimetreleri ve müon tanımlama sistemini içerir. Delphes'in yapısı ileri seviye algıç çalışmaları için uygun değildir, bunun için çok daha hassas araçlar gereklidir. Çoğu fenomenolojik çalışma için algıç tepkisini parametrize etmeyi temel alan basitleştirilmiş bir yaklaşım genel anlamda yeterince iyidir ve Delphes bunu yapmaktadır. Bu şekilde benzetimi çok daha hızlı yapmak mümkündür. En yaygın olay üreticinin çıktısını girdi olarak alır, hızlı ve gerçekçi bir benzetim ortaya koyar. Sonuç olarak jetler, kayıp enerji, izole elektronlar, müonlar, fotonlar ve taular yapılandırılabilir [31].

Olay üretimi, tesir kesiti hesabı, hadronizasyon ve algıç benzetimi tamamlandıktan sonra analiz için Root [32] (sürüm 6.06/6) programı kullanılmıştır. Kinematik dağılımlar ve değişmez kütle grafikleri elde edilmiştir.

Bu çalışma boyunca FCC-eh için proton enerjisi 50 TeV, elektron enerjisi 60 GeV, Delphes algıç kartı olarak 3.3.3 sürümü içindeki FCC kartı (JetPTMin parametresi 50.0 yerine 20.0 ile); LHeC için proton enerjisi 7 TeV, elektron enerjisi 60 GeV, Delphes algıç kartı olarak ATLAS kartı kullanılmıştır.

## 4. BULGULAR

### 4.1. ÜRETİM TESİR KESİTLERİNİN HESAPLANMASI

#### 4.1.1. Sinyalin Hesaplanması

Bu bölümde sinyal sürecinin tesir kesitlerinin hesabı LHeC ve FCC-eh için verilmiştir. Yapılan hesaplarda sinyalin tesir kesiti ile ilgilenildiği için Higgs bozonuna eşlik eden kuark yalnızca  $\bar{u}$  ve  $\bar{c}$  olabilecek şekilde tanımlanmıştır.

Tablo 4.1'de  $e^- p \rightarrow \nu_e h \bar{q}$  ( $\bar{q} = \bar{u}, \bar{c}$ ) süreci için farklı parametre değerleri ile sinyal + arka plan tesir kesitleri LHeC enerjisi olan 60 GeV elektron - 7 TeV proton demeti için verilmiştir.

Tablo 4.2'de, Tablo 4.1'deki değerlerin arka plan tesir kesitinden farkı ile verimlilik çarpımı verilmiştir. Higgs'in  $b$  kuarka ve  $\bar{b}$  kuarka dallanma oranı 0.58,  $b$  kuarkların her birinin etiketlendirme verimleri %60 olarak alınmıştır. Böylece bu çarpım  $\Delta\sigma \times BR(H \rightarrow b\bar{b}) \times 0.6 \times 0.6$  şeklindedir.

**Tablo 4.1:** LHeC'de  $e^- p \rightarrow \nu_e h \bar{q}$  ( $\bar{q} = \bar{u}, \bar{c}$ ) süreci için farklı parametre değerleri ile elde edilen tesir kesitleri (pb). Arka plan tesir kesiti  $\sigma_b = 1.104 \times 10^{-2}$  pb'dir.

| LHeC                     | $\kappa_{tch} = 10^{-1}$ | $\kappa_{tch} = 10^{-2}$ | $\kappa_{tch} = 10^{-3}$ | $\kappa_{tch} = 10^{-4}$ |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| $\kappa_{tuh} = 10^{-1}$ | $3.300 \times 10^{-2}$   | $2.199 \times 10^{-2}$   | $2.198 \times 10^{-2}$   | $2.188 \times 10^{-2}$   |
| $\kappa_{tuh} = 10^{-2}$ | $2.237 \times 10^{-2}$   | $1.133 \times 10^{-2}$   | $1.125 \times 10^{-2}$   | $1.123 \times 10^{-2}$   |
| $\kappa_{tuh} = 10^{-3}$ | $2.226 \times 10^{-2}$   | $1.117 \times 10^{-2}$   | $1.104 \times 10^{-2}$   | $1.111 \times 10^{-2}$   |
| $\kappa_{tuh} = 10^{-4}$ | $2.224 \times 10^{-2}$   | $1.122 \times 10^{-2}$   | $1.109 \times 10^{-2}$   | $1.108 \times 10^{-2}$   |

**Tablo 4.2:** Sinyal tesir kesiti ile dallanma oranı ve verimlilik çarpımı sonuçları. Sinyal ile girişim yapan arka plan katkısı  $2.305 \times 10^{-3}$  pb olarak hesaplanmıştır.

| LHeC                     | $\kappa_{tch} = 10^{-1}$ | $\kappa_{tch} = 10^{-2}$ | $\kappa_{tch} = 10^{-3}$ | $\kappa_{tch} = 10^{-4}$ |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| $\kappa_{tuh} = 10^{-1}$ | $4.585 \times 10^{-3}$   | $2.119 \times 10^{-3}$   | $2.284 \times 10^{-3}$   | $2.263 \times 10^{-3}$   |
| $\kappa_{tuh} = 10^{-2}$ | $2.366 \times 10^{-3}$   | $6.055 \times 10^{-5}$   | $4.385 \times 10^{-5}$   | $3.967 \times 10^{-5}$   |
| $\kappa_{tuh} = 10^{-3}$ | $2.343 \times 10^{-3}$   | $2.714 \times 10^{-5}$   | $0.000 \times 10^0$      | $1.462 \times 10^{-5}$   |
| $\kappa_{tuh} = 10^{-4}$ | $2.339 \times 10^{-3}$   | $3.758 \times 10^{-5}$   | $1.044 \times 10^{-5}$   | $8.352 \times 10^{-6}$   |

Tablo 4.3'de  $e^- p \rightarrow \nu_e h \bar{q}$  ( $\bar{q} = \bar{u}, \bar{c}$ ) süreci için farklı parametre değerleri ile sinyal + arka plan tesir kesitleri FCC-eh enerjisi olan 60 GeV elektron - 50 TeV proton demeti için verilmiştir.

Tablo 4.4’de, Tablo 4.3’deki değerlerin arka plan tesir kesitinden farkı ile verimlilik çarpımı verilmiştir. Tıpkı Tablo 4.2’de alındığı gibi, bu arpım  $\Delta\sigma \times BR(H \rightarrow b\bar{b}) \times 0.6 \times 0.6$  şeklinde dir.

**Tablo 4.3:** FCC-eh’de  $e^-p \rightarrow \nu_e h \bar{q}$  ( $\bar{q} = \bar{u}, \bar{c}$ ) süreci için farklı parametre değerleri ile elde edilen tesir kesitleri (pb). Arka plan tesir kesiti  $\sigma_b = 9.279 \times 10^{-2}$  pb’dir.

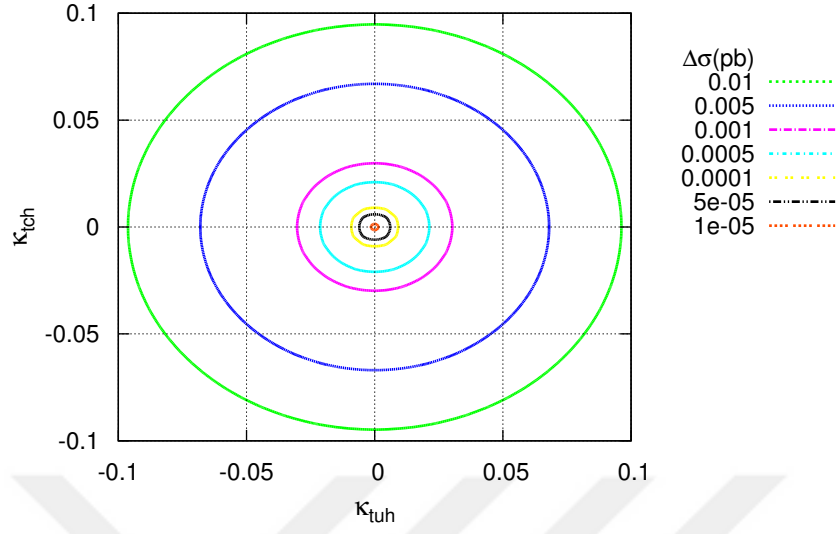
| FCC-eh                   | $\kappa_{tch} = 10^{-1}$ | $\kappa_{tch} = 10^{-2}$ | $\kappa_{tch} = 10^{-3}$ | $\kappa_{tch} = 10^{-4}$ |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| $\kappa_{tuh} = 10^{-1}$ | $2.692 \times 10^{-1}$   | $1.798 \times 10^{-1}$   | $1.802 \times 10^{-1}$   | $1.794 \times 10^{-1}$   |
| $\kappa_{tuh} = 10^{-2}$ | $1.826 \times 10^{-1}$   | $9.507 \times 10^{-2}$   | $9.383 \times 10^{-2}$   | $9.390 \times 10^{-2}$   |
| $\kappa_{tuh} = 10^{-3}$ | $1.829 \times 10^{-1}$   | $9.347 \times 10^{-2}$   | $9.294 \times 10^{-2}$   | $9.295 \times 10^{-2}$   |
| $\kappa_{tuh} = 10^{-4}$ | $1.824 \times 10^{-1}$   | $9.411 \times 10^{-2}$   | $9.311 \times 10^{-2}$   | $9.281 \times 10^{-2}$   |

**Tablo 4.4:** Sinyal tesir kesiti ile dallanma oranı ve verimlilik çarpımı sonuçları. Sinyal ile girişim yapan arka plan katkısı  $1.937 \times 10^{-2}$  pb olarak hesaplanmıştır.

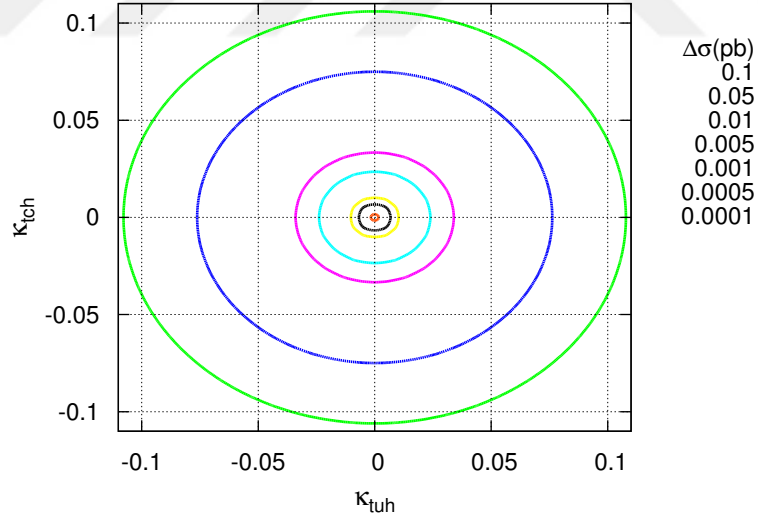
| FCC-eh                   | $\kappa_{tch} = 10^{-1}$ | $\kappa_{tch} = 10^{-2}$ | $\kappa_{tch} = 10^{-3}$ | $\kappa_{tch} = 10^{-4}$ |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| $\kappa_{tuh} = 10^{-1}$ | $3.683 \times 10^{-2}$   | $1.817 \times 10^{-2}$   | $1.825 \times 10^{-2}$   | $1.808 \times 10^{-2}$   |
| $\kappa_{tuh} = 10^{-2}$ | $1.875 \times 10^{-2}$   | $4.761 \times 10^{-4}$   | $2.172 \times 10^{-4}$   | $2.318 \times 10^{-4}$   |
| $\kappa_{tuh} = 10^{-3}$ | $1.881 \times 10^{-2}$   | $1.420 \times 10^{-4}$   | $3.132 \times 10^{-5}$   | $3.341 \times 10^{-5}$   |
| $\kappa_{tuh} = 10^{-4}$ | $1.871 \times 10^{-2}$   | $2.756 \times 10^{-4}$   | $6.682 \times 10^{-5}$   | $4.176 \times 10^{-6}$   |

$\kappa_{tuh}$  ve  $\kappa_{tch}$  parametrelerinin farklı sinyal tesir kesit alan değerleri ile elde edilen kontur grafikleri şekil 4.1’de ve şekil 4.2’de verilmiştir.

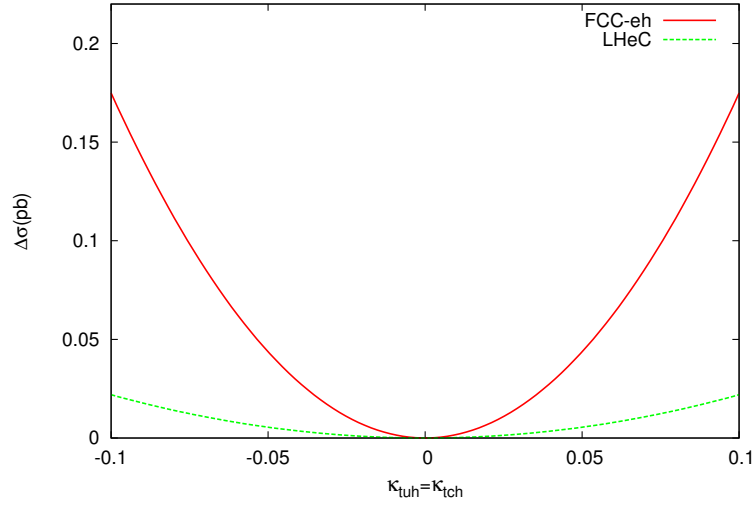
Bu verileri kullanarak hangi parametre değeri ile yılda kaç olay gözleneceğini hesaplamak için algıç akseptansı %1 ve ışınlığı  $100 \text{ fb}^{-1}$  alalım. Grafiklerden  $\Delta\sigma = 0.01 \text{ pb}$ ’ye karşılık (Burada  $\Delta\sigma$  toplam tesir kesiti ile arka plan tesir kesitinin farkıdır.) okunan parametre değerleri FCC-eh için  $\kappa_{tuh} = 0.034$  ve  $\kappa_{tch} = 0.034$ , LHeC için  $\kappa_{tuh} = 0.095$  ve  $\kappa_{tch} = 0.097$  şeklinde dir. Bu kabullerimiz ile yılda 10 olaya kadar  $thq$  bağlaşımı görebiliriz. Benzer şekilde yılda n tane olay gözlemleyebilmek için parametrelerin hangi aralıkta olması gerektiği bu grafiklerden yorumlanabilir.



**Şekil 4.1:** 60 GeV - 7 TeV LHeC de  $\Delta\sigma$  sinyal tesir kesitine göre  $\kappa_{tuh}$  ve  $\kappa_{tch}$  parametreleri için kontur grafiği.



**Şekil 4.2:** 60 GeV - 50 TeV FCC-eh de  $\Delta\sigma$  sinyal tesir kesitine göre  $\kappa_{tuh}$  ve  $\kappa_{tch}$  parametreleri için kontur grafiği.



**Şekil 4.3:** 60 GeV - 50 TeV FCC-eh ve 60 GeV - 7 TeV LHeC için  $\Delta\sigma$  sinyalin aynı  $\kappa_{tuh} = \kappa_{tch}$  parametrelerine bağlılığı.

Şekil 4.3’de, eşit bağlaşım parametrelerinin olduğu durum için sinyal tesir kesitinin FCNC parametrelerine bağlılığı verilmiştir.  $\kappa_{tuh} = \kappa_{tch} = 0.1$  parametre değerine karşılık gelen sinyal tesir kesiti FCC-eh’de 17.5 pb, LHeC’de 2.2 pb’dir. Grafiklerin üstel artışını kıyaslayacak olursak FCC-eh’nin FCNC parametrelerine bağlılığının daha fazla olduğu açıkça görülmektedir.

#### 4.1.2. Arka Planın Hesaplanması

Bu çalışmada, aranan  $tuh$  ve  $tch$  anormal bağlaşımları için ilgilenilen sinyal sürecinin son durumunda Higgs bozununu ve bir tane jet vardır. Analizde Higgs’i yapılandırmak için Higgs bozununun  $b\bar{b}$ ’a bozunumuna bakılmaktadır. Son durumda aranan üç jete benzer algıç sinyali arka plan oluşturur ve bu arka plan katkısının hesaplanması gerekmektedir.

Arka plan katkısı için SM lagranjiyeni ile  $q$  tüm kuarklar olmak üzere  $e^-p \rightarrow \nu_e h q$ ,  $e^-p \rightarrow \nu_e Z q$ ,  $e^-p \rightarrow \nu_e W^- q$  ve  $e^-p \rightarrow \nu_e \bar{t}$  süreçlerinin tesir kesitleri hesaplanmıştır. Elde edilen tesir kesitleri (pb) Tablo 4.5’de verilmiştir. Bu tabloda LHeC ve FCC-eh durumlarında birinci sütunlar ( $\sigma_1$  ve  $\sigma_2$ ) hesaplanan tesir kesitlerini, ikinci sütunlar ( $\sigma_1 \times BR \times \epsilon_b$  ve  $\sigma_2 \times BR \times \epsilon_b$ ) bu tesir kesitlerinin ilgili dallanma oranları ve  $b$  kuarkların her birinin etiketlendirme verimleri ( $\epsilon_b = 0.6$ ) ile çarpımıdır. Bu çarpımlar kullanılarak istenilen toplanmış ışınlık değeri ile üretilecek olay sayısı hesaplanabilir.

$e^-p \rightarrow \nu_e h q$  sürecinde Higgs bozununun  $b\bar{b}$ ’ye dallanma oranı  $BR(H \rightarrow b\bar{b}) = 0.58$  [33],  $e^-p \rightarrow \nu_e Z q$  sürecinde  $Z$  bozununun  $b\bar{b}$ ’ye dallanma oranı  $BR(Z \rightarrow b\bar{b}) = 0.15$ ,  $e^-p \rightarrow \nu_e W^- q$  sürecinde  $W^-$  bozununun  $b\bar{c}$ ’ye dallanma oranı  $BR(W^- \rightarrow b\bar{c}) = 5.59 \times 10^{-4}$ ,  $e^-p \rightarrow \nu_e \bar{t}$  sürecinde  $\bar{t}$ ’nin  $W^-$  ve  $b\bar{c}$ ’ye dallanma oranı  $BR(\bar{t} \rightarrow W^- b\bar{c}) = 1$  olarak alınmıştır.  $e^-p \rightarrow \nu_e \bar{t}$  sürecinde  $\bar{t}$ ’den çıkan  $W^-$ ’nin  $b\bar{c}$ ’ye bozunumu için tesir kesitleri

tekrar dallanma oranı ile çarpılmıştır. Bu çarpım  $\sigma \times BR(\bar{t} \rightarrow W^- \bar{b}) \times BR(W^- \rightarrow b\bar{c}) \times \varepsilon_b^2$  şeklindedir.

**Tablo 4.5:** Arka plan tesir kesitine katkıda bulunan süreçler ve karşılık gelen tesir kesitleri (pb).

| Süreç                             | LHeC                  |                                             | FCC-eh                |                                             |
|-----------------------------------|-----------------------|---------------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------------|
|                                   | $\sigma_1$            | $\sigma_1 \times BR \times \varepsilon_b^2$ | $\sigma_2$            | $\sigma_2 \times BR \times \varepsilon_b^2$ |
| $e^- p \rightarrow \nu_e hq$      | $9.03 \times 10^{-2}$ | $1.89 \times 10^{-2}$                       | $3.18 \times 10^{-1}$ | $6.64 \times 10^{-2}$                       |
| $e^- p \rightarrow \nu_e Zq$      | $4.92 \times 10^{-1}$ | $2.66 \times 10^{-2}$                       | $2.03 \times 10^0$    | $1.10 \times 10^{-1}$                       |
| $e^- p \rightarrow \nu_e W^- q$   | $2.87 \times 10^0$    | $5.78 \times 10^{-4}$                       | $1.91 \times 10^1$    | $3.84 \times 10^{-3}$                       |
| $e^- p \rightarrow \nu_e \bar{t}$ | $2.06 \times 10^0$    | $4.15 \times 10^{-4}$                       | $1.65 \times 10^1$    | $3.32 \times 10^{-3}$                       |

#### 4.1.3. Polarize Elektron ile Tesir Kesiti Hesabı

Bu alt bölümde elektron proton çarpışmasında kullanılacak olan elektronların polarize edilerek sinyal ve arka plan tesir kesitleri yeniden hesaplanmıştır. Polarizasyon etkisinin anormal bağlaşımlar üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Tablo 4.6'da LHeC enerjisi kullanılarak elektronun %80 sol polarize olması durumunda ve %80 sağ polarize olması durumunda ilgilenilen süreçler için sinyal ve arka plan tesir kesitleri hesaplanmıştır. Aynı hesaplamalar FCC-eh enerjisi için de yapılarak Tablo 4.7'de verilmiştir.

**Tablo 4.6:** LHeC'de sinyal ( $\kappa_{qh} = 0.05$ ) ve arka plan süreçleri için elektron demeti polarize olmadan ve polarize durumda tesir kesitleri (pb). Burada NP=0 arka plana karşılık gelmektedir, NP=1 ise sinyal ve arka planı birlikte içermektedir.

| Süreç                                    | Polarize Olmadan       | Sol Polarize           | Sağ polarize           |
|------------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| $e^- p \rightarrow \nu_e hq$ (NP=1)      | $9.603 \times 10^{-2}$ | $1.725 \times 10^{-1}$ | $1.916 \times 10^{-2}$ |
| $e^- p \rightarrow \nu_e hq$ (NP=0)      | $9.029 \times 10^{-2}$ | $1.627 \times 10^{-1}$ | $1.806 \times 10^{-2}$ |
| $e^- p \rightarrow \nu_e Zq$ (NP=0)      | $4.917 \times 10^{-1}$ | $8.863 \times 10^{-1}$ | $9.838 \times 10^{-2}$ |
| $e^- p \rightarrow \nu_e W^- q$ (NP=0)   | $2.868 \times 10^0$    | $5.161 \times 10^0$    | $5.743 \times 10^{-1}$ |
| $e^- p \rightarrow \nu_e \bar{t}$ (NP=0) | $2.061 \times 10^0$    | $3.71 \times 10^0$     | $4.124 \times 10^{-1}$ |

**Tablo 4.7:** FCC-eh'de sinyal ( $\kappa_{qh} = 0.05$ ) ve arka plan süreçleri için elektron demeti polarize olmadan ve polarize durumda tesir kesitleri (pb). Burada NP=0 arka plana karşılık gelmektedir, NP=1 ise sinyal ve arka planı birlikte içermektedir.

| Süreç                                    | Polarize Olmadan       | Sol Polarize           | Sağ polarize           |
|------------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| $e^- p \rightarrow \nu_e hq$ (NP=1)      | $3.635 \times 10^{-1}$ | $6.544 \times 10^{-1}$ | $7.268 \times 10^{-2}$ |
| $e^- p \rightarrow \nu_e hq$ (NP=0)      | $3.186 \times 10^{-1}$ | $5.729 \times 10^{-1}$ | $6.375 \times 10^{-2}$ |
| $e^- p \rightarrow \nu_e Zq$ (NP=0)      | $2.035 \times 10^0$    | $3.663 \times 10^0$    | $4.057 \times 10^{-1}$ |
| $e^- p \rightarrow \nu_e W^- q$ (NP=0)   | $19.06 \times 10^0$    | $34.28 \times 10^0$    | $3.815 \times 10^0$    |
| $e^- p \rightarrow \nu_e \bar{t}$ (NP=0) | $16.52 \times 10^0$    | $29.7 \times 10^0$     | $3.304 \times 10^0$    |

$W^-$  ile etkileşime giren elektronlar sol elli olduğu için bütün sinyal ve arka plan süreçlerinde sol polarizasyon durumundaki tesir kesitleri artarken, sağ polarizasyon durumunda ise tesir kesitleri azalmaktadır.

## 4.2. KİNEMATİK DAĞILIMLAR

LHeC ve FCC-eh enerjilerinde üretilen olayların Algıç benzetimi için MadGraph5\_aMC@NLO programında Pythia ve Delphes programları kullanılmıştır. Benzetimler sinyal için  $e^-p \rightarrow \nu_e h q$  ( $q = u, d, c, s, b, \bar{u}, \bar{d}, \bar{c}, \bar{s}, \bar{b}$ ) süreci ile yapılmıştır. Burada ve arka plan süreçlerinde son durumdaki  $q$  çoklu parçacığı arka plan katkısını doğru elde etmek amacıyla ( $q = u, d, c, s, b, \bar{u}, \bar{d}, \bar{c}, \bar{s}, \bar{b}$ ) şeklinde tanımlanmıştır.

Bu benzetimlerden elde edilen son durum parçacıklarıyla kinematik dağılım grafikleri çizilmiştir. Bu kinematik dağılımlar yardımıyla Higgs'in ve üst kuarkın değişmez kütle yapılandırmaları yapılmıştır.

Enine momentum ve sanki-hızlılık dağılımları üç tane öncü jet kullanılarak elde edilmiştir. Birinci öncü jet son durumda çıkan jetler arasında en yüksek enine momentuma sahiptir, ikinci ve üçüncü öncü jetler de büyüklüklerine göre isimlendirilmişlerdir. Yani sıralama  $jet1_{pt} > jet2_{pt} > jet3_{pt}$  şeklindedir.

Analiz için olayları seçerken tüm süreçlerde öncü jetlerin b-etiketli olup olmadığına bakılmıştır,  $\eta$  bölgesi  $|\eta| < 3.0$  olarak,  $E_T$  bölgesi  $E_T < 25$  GeV olarak seçilmiştir.

### 4.2.1. Sinyalin Kinematik Dağılımları

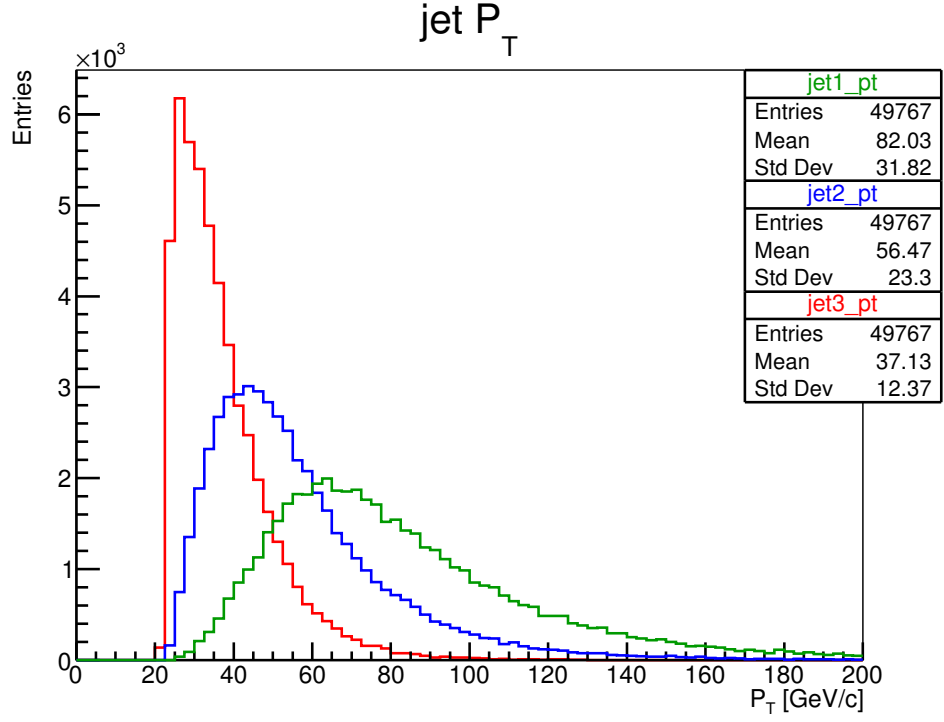
Bu bölümde sinyalin kinematik dağılımları; enine momentum<sup>1</sup> ( $P_T$ ), sanki-hızlılık<sup>2</sup> ( $\eta$ ) ve kayıp enine enerji<sup>3</sup> ( $E_T$ ) dağılımları verilmiştir. Bu dağılımlar yardımıyla değişmez kütle grafikleri yapılandırılırken daha iyi analiz yapmak mümkündür.

LHeC enerjisi için (60 GeV elektron - 7 TeV proton) üretilen  $e^-p \rightarrow \nu_e h q$  sinyal süreci için kinematik dağılımlar Delphes algıç programı kullanılarak elde edilmiş olup Şekil 4.4 , Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da verilmiştir. Bunlar sırasıyla enine momentum, sanki-hızlılık ve kayıp enine enerji dağılımlarıdır. Eta dağılımında üç jet  $-3.1 < \eta < -0.8$  aralığında maksimum yapmıştır. Eta dağılımının maksimumunun yarısına karşılık gelen eta değerleri jet1 için  $\eta = -3.6$  ve  $\eta = -0.6$  , jet2 için  $\eta = -4.0$  ve  $\eta = -0.6$ , jet3 için  $\eta = -3.6$  ve  $\eta = -0.4$ 'tür.

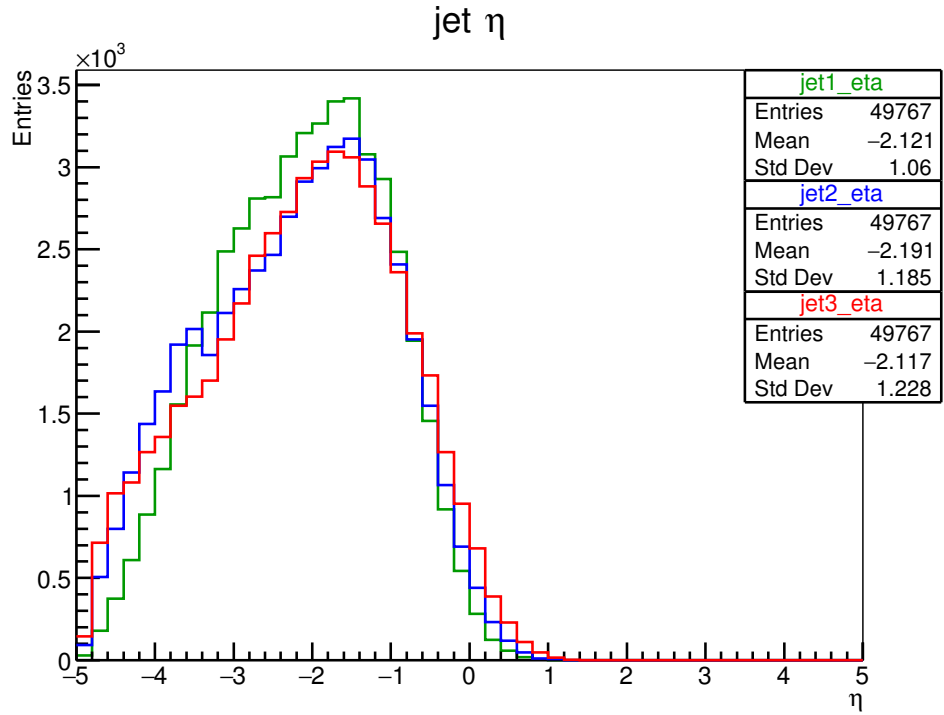
<sup>1</sup>Hızlandırılan parçacıkların çarpışma eksenine dik olan eksenlerdeki momentumları toplamı enine momentum olarak adlandırılır.

<sup>2</sup>Sanki-hızlılık  $\eta \equiv -\ln \tan(\theta/2)$  olarak tanımlanır. Burada  $\theta$  demetin ilerleme eksenine ile çıkan parçacığın yaptığı yükseklik açısıdır.

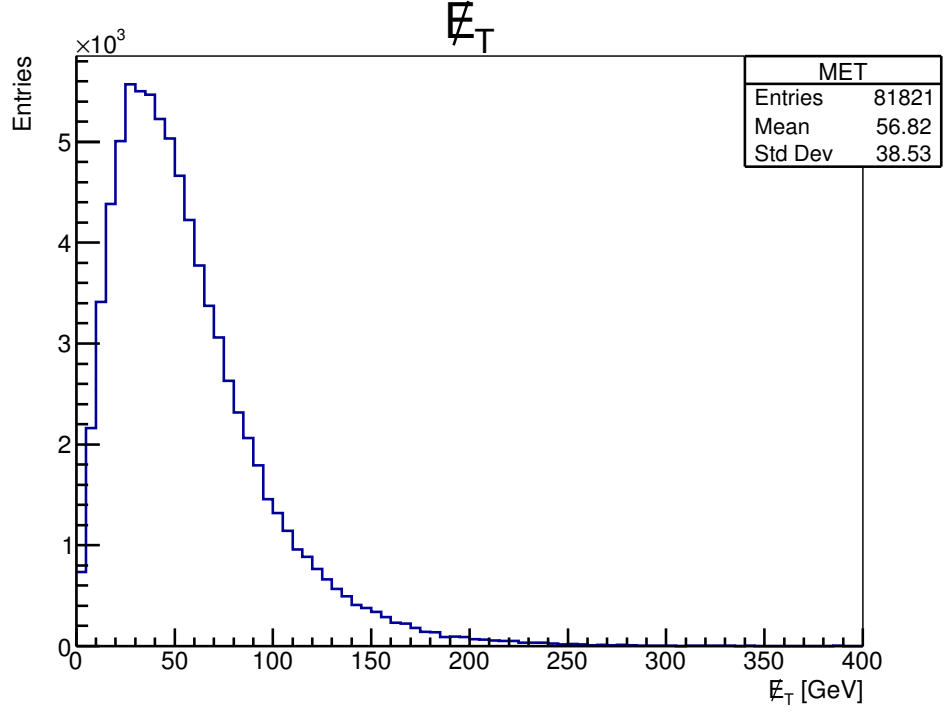
<sup>3</sup>Çarpışmadan önce parçacıklar boyuna hızlandırıldıklarından ve manyetik alanla baskılandırıldıklarından dolayı enine momentumları sıfırdır. Çarpışmadan sonra da toplam enine momentumun sıfır olması gerekir. Bu eşitliği sağlayan kayıp enine momentumun büyüklüğü kayıp enine enerjiyi verir.



**Şekil 4.4:** LHeC çarpıştırıcısında  $\kappa_{tuh} = \kappa_{ch} = 0.05$  parametre değeri ile elde edilen üç jetin enine momentum ( $P_T$ ) grafiği.

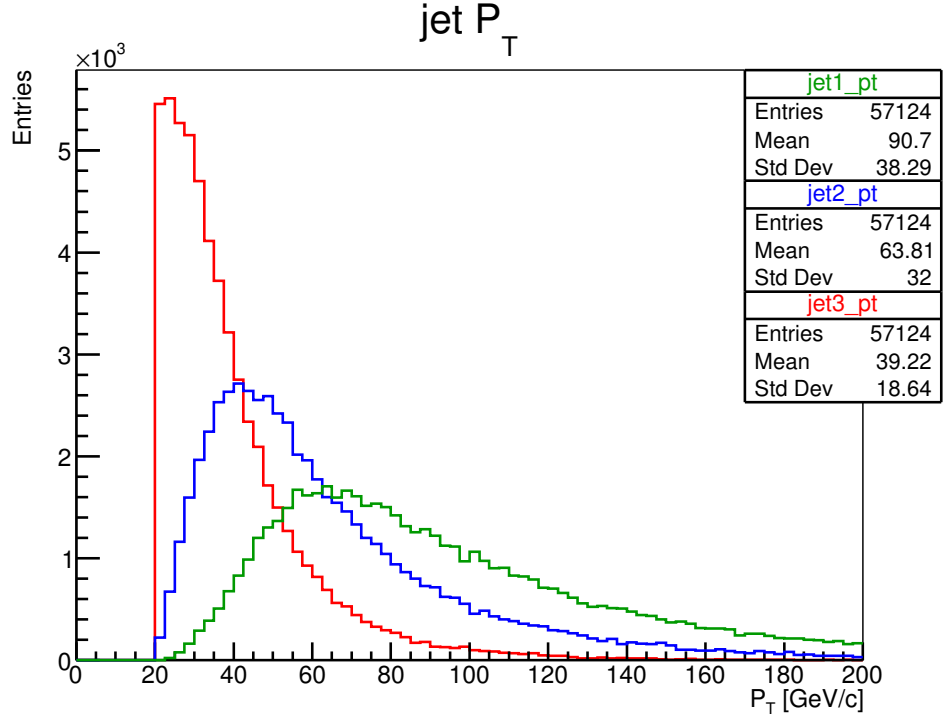


**Şekil 4.5:** LHeC çarpıştırıcısında  $\kappa_{tuh} = \kappa_{ch} = 0.05$  parametre değeri ile elde edilen üç jetin sanki-hızlılık ( $\eta$ ) grafiği.

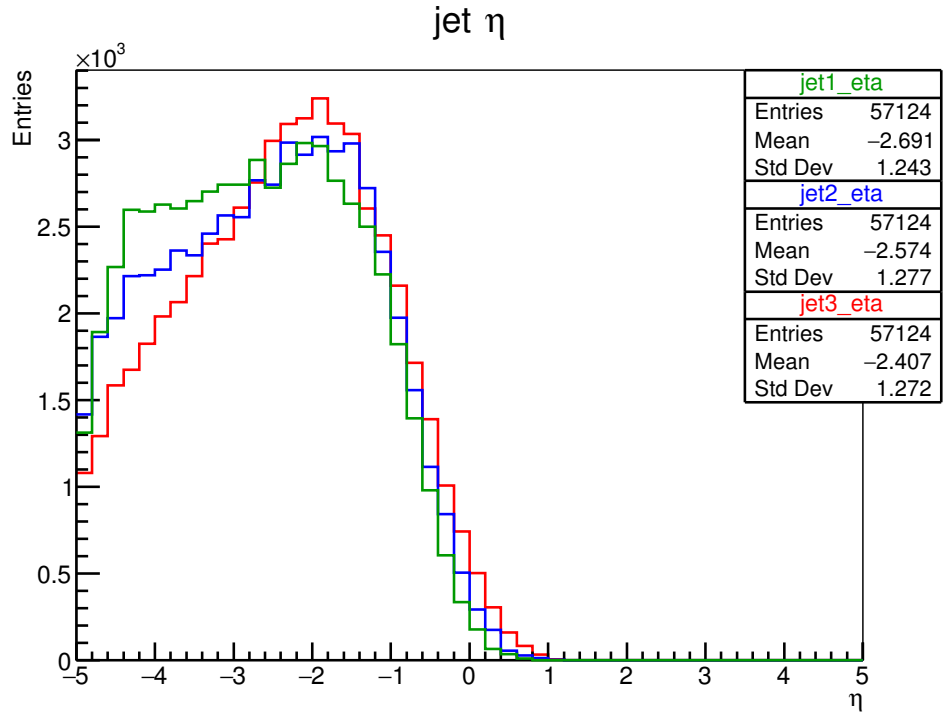


**Şekil 4.6:** LHeC çarpıştırıcısında  $\kappa_{tuh} = \kappa_{tch} = 0.05$  parametre değeri ile elde edilen kayıp enine enerji ( $E_T$ ) grafiği.

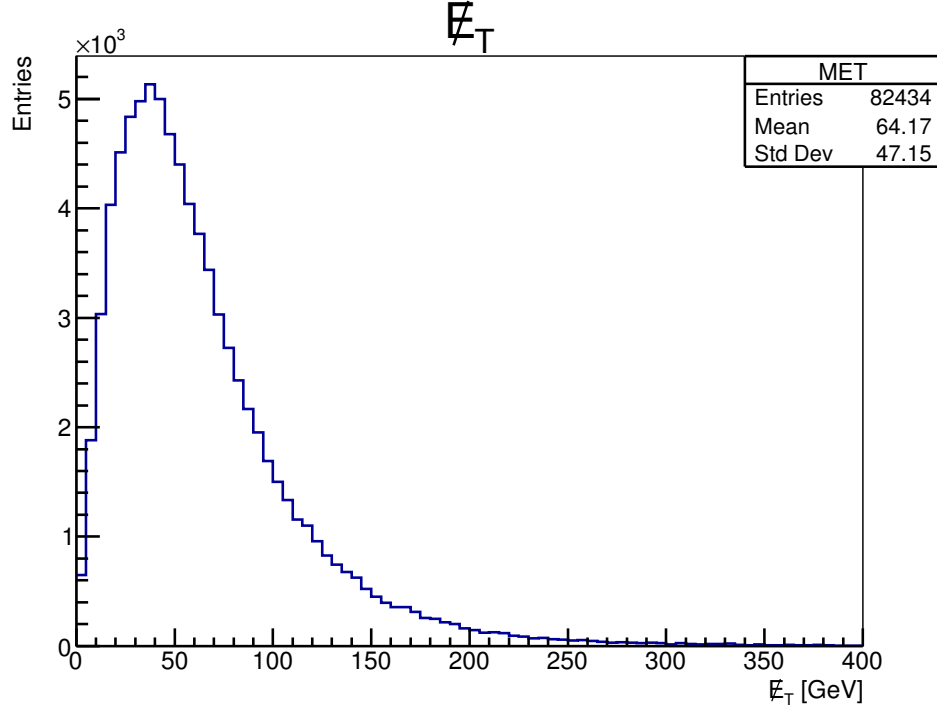
FCC-eh enerjisi (60 GeV elektron - 50 TeV proton) kullanılarak  $e^- p \rightarrow \nu_e h q$  süreci için kinematik dağılımlar, Delphes algıç programı kullanılarak Şekil 4.7, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da verilmiştir. Bunlar sırasıyla enine momentum, sanki-hızlılık ve kayıp enine enerji dağılımlarıdır. Eta dağılımında jet1  $-4.4 < \eta < -1.2$ , jet2 ve jet3  $-3.4 < \eta < -1.0$  aralığında maksimum yapmıştır. Eta dağılımının maksimumunun yarısına karşılık gelen eta değerleri jet1 için  $\eta = -4.8$  ve  $\eta = -0.8$ , jet2 için  $\eta = -0.8$  ve  $\eta = -0.6$ , jet3 için  $\eta = -4.4$  ve  $\eta = -0.6$ 'dır.



**Şekil 4.7:** FCC-eh çarpıştırıcısında  $\kappa_{tuh} = \kappa_{tch} = 0.05$  parametre değeri ile elde edilen üç jetin enine momentum ( $P_T$ ) grafiği.



**Şekil 4.8:** FCC-eh çarpıştırıcısında  $\kappa_{tuh} = \kappa_{tch} = 0.05$  parametre değeri ile elde edilen üç jetin sanki-hızlılık ( $\eta$ ) grafiği.



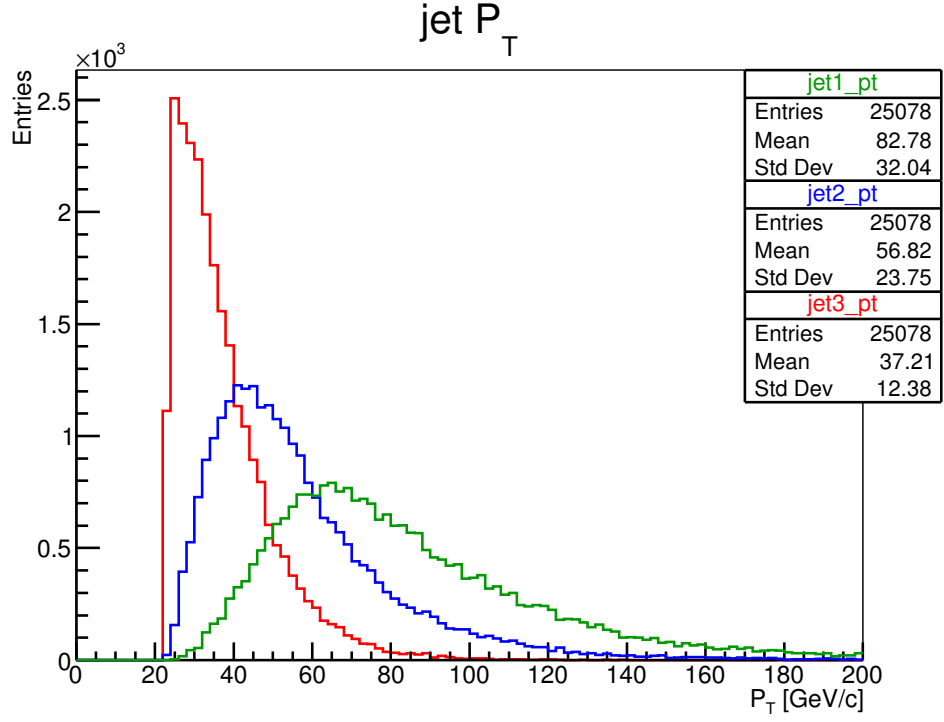
**Şekil 4.9:** FCC-eh çarpıştırıcısında  $\kappa_{tuh} = \kappa_{tch} = 0.05$  parametre değeri ile elde edilen kayıp enine enerji ( $E_T$ ) grafiği.

#### 4.2.2. Arka Planın Kinematik Dağılımları

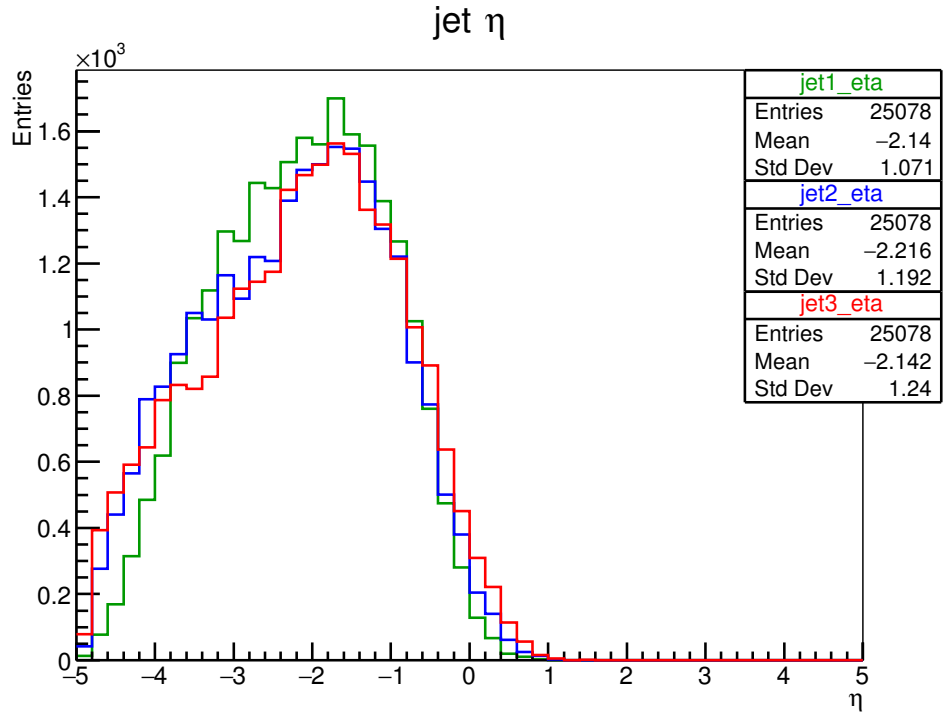
Bu bölümde LHeC ve FCC-eh enerjileri kullanılarak arka planın kinematik dağılımları (enine momentum ( $P_T$ ), sanki-hızlılık ( $\eta$ ) ve kayıp enine enerji ( $E_T$ ) dağılımları) verilmiştir.

##### 4.2.2.1. LHeC’de Arka Plan Süreçlerinin Kinematik Dağılımları

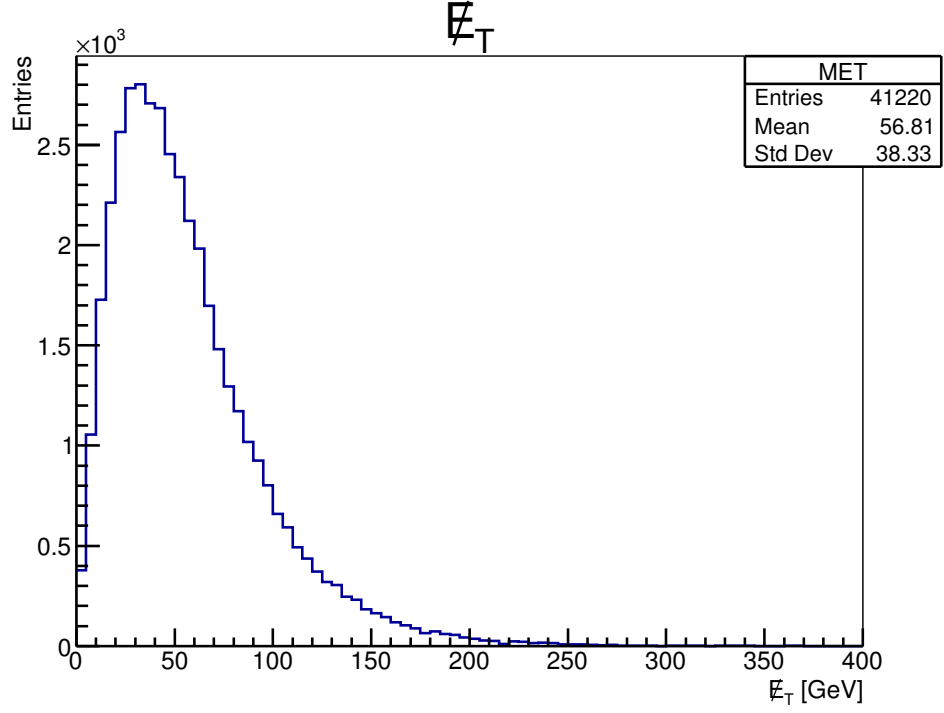
LHeC enerjileri kullanılarak SM çerçevesinde  $e^-p \rightarrow \nu_e h q$  süreci için arka plan kinematik dağılımları Şekil 4.10, Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’de verilmiştir. Bunlar sırasıyla enine momentum, sanki-hızlılık ve kayıp enine enerji dağılımlarıdır. Eta dağılımında üç jet  $-2.4 < \eta < -0.8$  aralığında maksimum yapmıştır. Eta dağılımının maksimumunun yarısına karşılık gelen eta değerleri jet1, jet2 ve jet3 için;  $\eta = -4.1$  ve  $\eta = -0.5$ ’tir.



**Şekil 4.10:** LHeC çarpıştırıcısında  $e^- p \rightarrow \nu_e h q$  sürecinin arka planı için elde edilen üç jetin enine momentum ( $P_T$ ) grafiği.

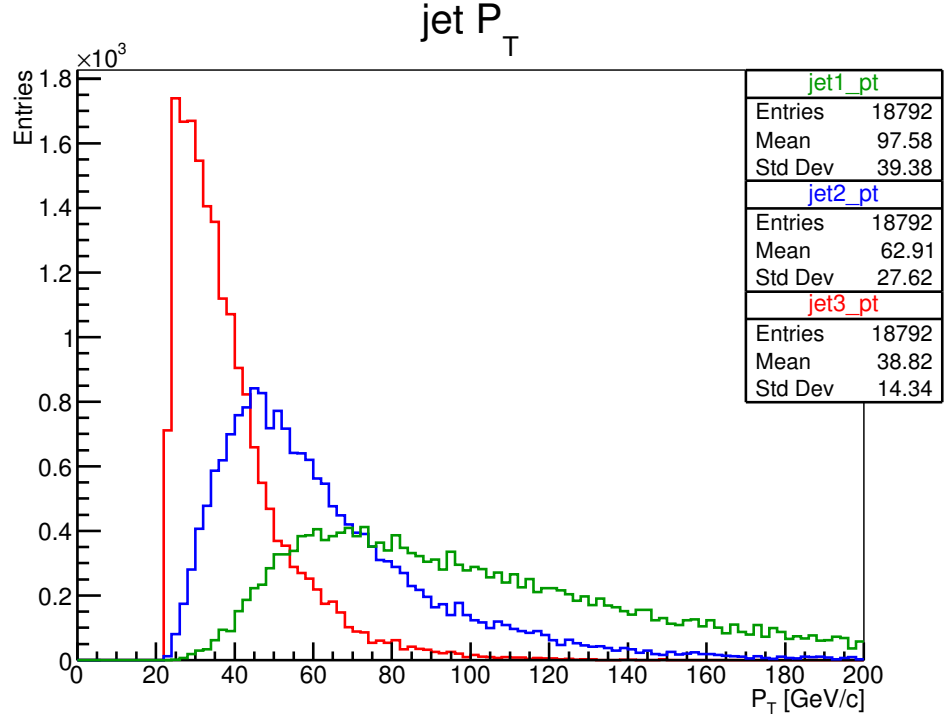


**Şekil 4.11:** LHeC çarpıştırıcısında  $e^- p \rightarrow \nu_e h q$  sürecinin arka planı için elde edilen üç jetin sanki-hızlılık ( $\eta$ ) grafiği.

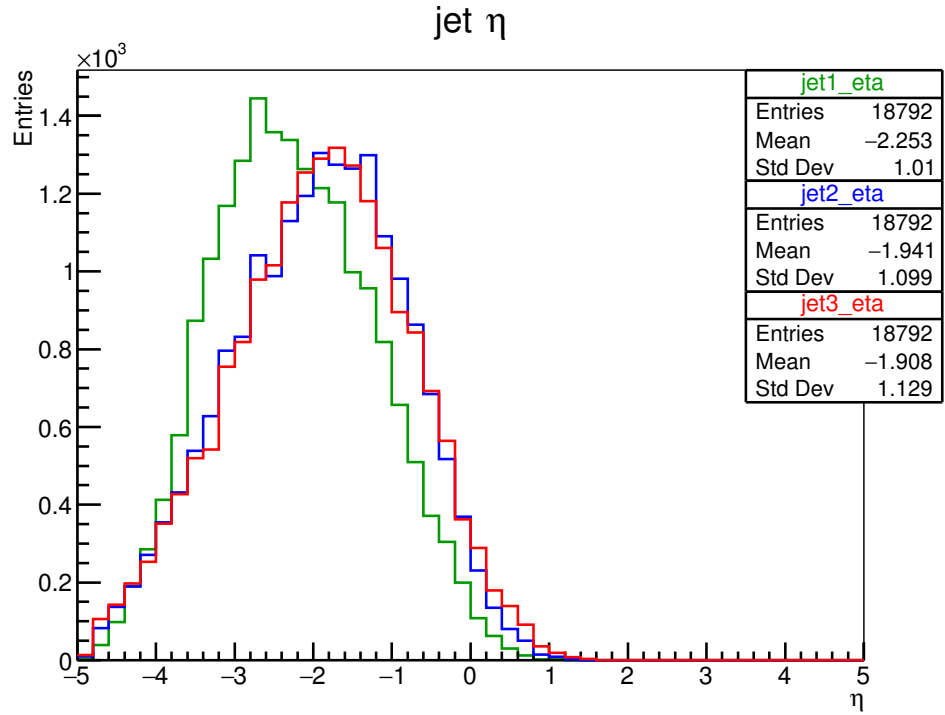


**Şekil 4.12:** LHeC çarpıştırıcısında  $e^-p \rightarrow \nu_e h q$  sürecinin arka planı için elde edilen kayıp enine enerji ( $E_T$ ) grafiği.

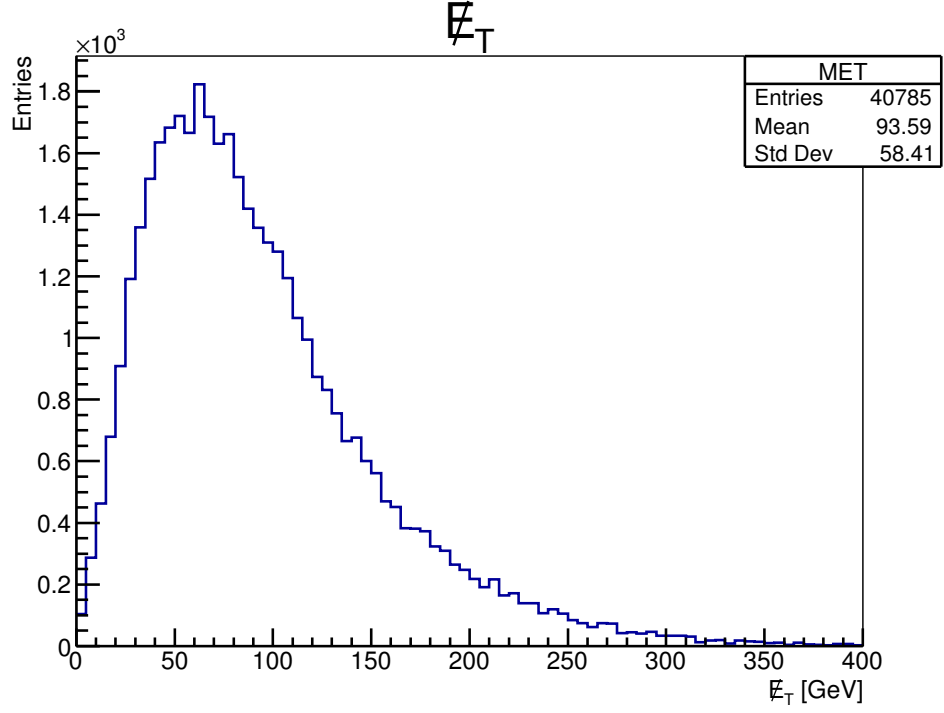
Şekil 4.13, Şekil 4.14 ve Şekil 4.15'te LHeC için SM çerçevesinde,  $e^-p \rightarrow \nu_e Z q$  sürecinin arka plan kinematik dağılımları verilmiştir. Bunlar sırasıyla enine momentum, sanki-hızlılık ve kayıp enine enerji dağılımlarıdır. Eta dağılımında jet1  $-3.2 < \eta < -1.5$ , jet2 ve jet3  $-2.8 < \eta < -0.8$  aralığında maksimum yapmıştır. Eta dağılımının maksimumunun yarısına karşılık gelen eta değerleri jet1 için  $\eta = -3.6$  ve  $\eta = -1.0$ , jet2 ve jet3 için  $\eta = -3.1$  ve  $\eta = -0.4$ 'tür.



**Şekil 4.13:** LHeC çarpıştırıcısında  $e^- p \rightarrow \nu_e Z q$  arka plan süreci için elde edilen üç jetin enine momentum ( $P_T$ ) grafiği.

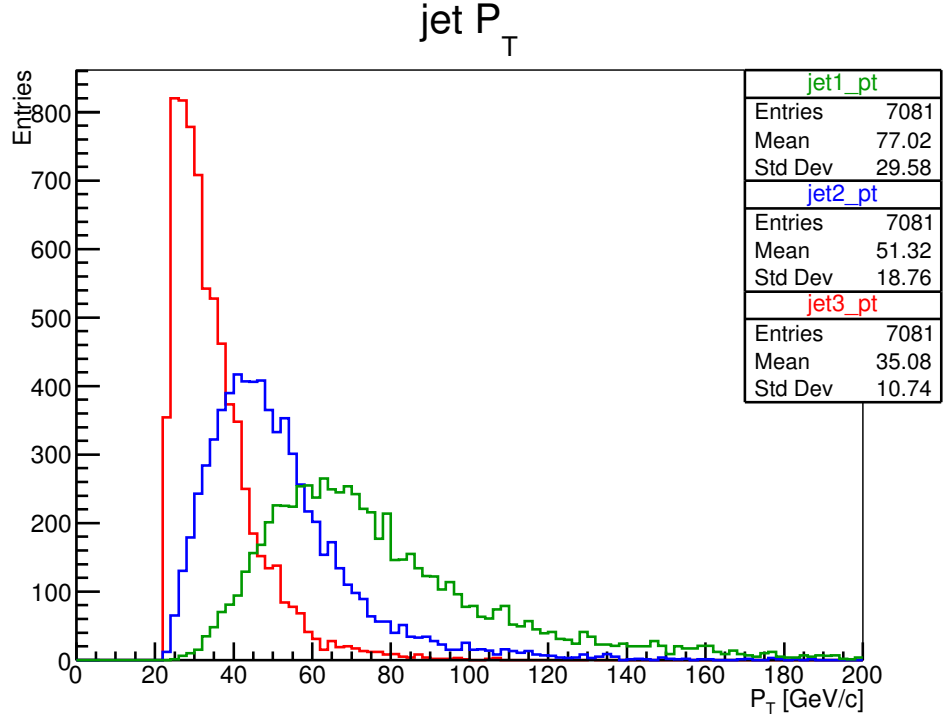


**Şekil 4.14:** LHeC çarpıştırıcısında  $e^- p \rightarrow \nu_e Z q$  arka plan süreci için elde edilen üç jetin sanki-hızlılık ( $\eta$ ) grafiği.

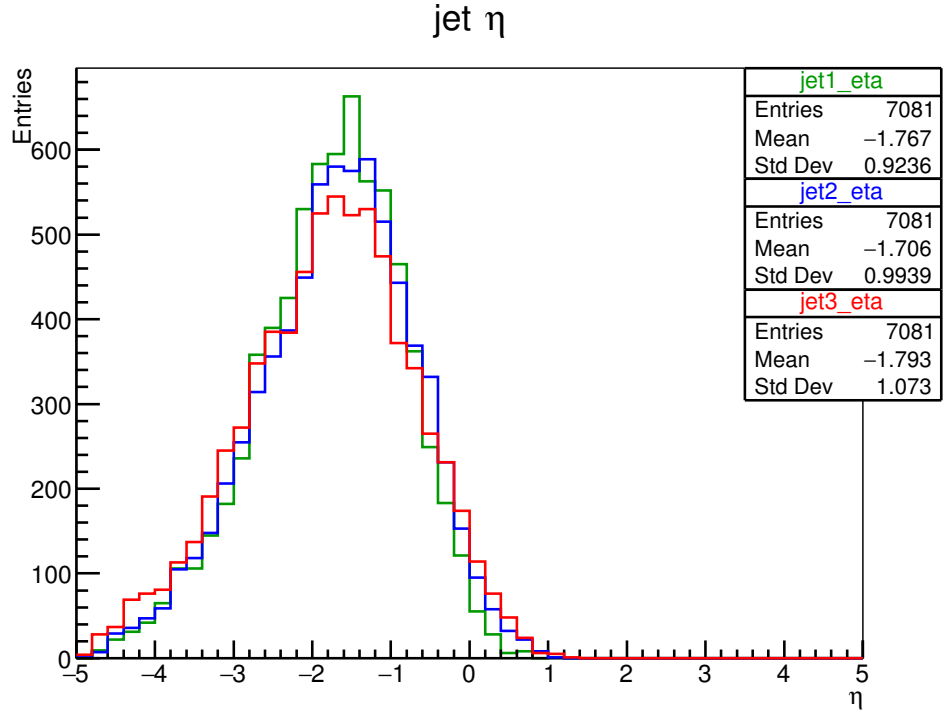


**Şekil 4.15:** LHeC çarpıştırıcısında  $e^-p \rightarrow \nu_e Z q$  arka plan süreci için elde edilen kayıp enine enerji ( $E_T$ ) grafiği.

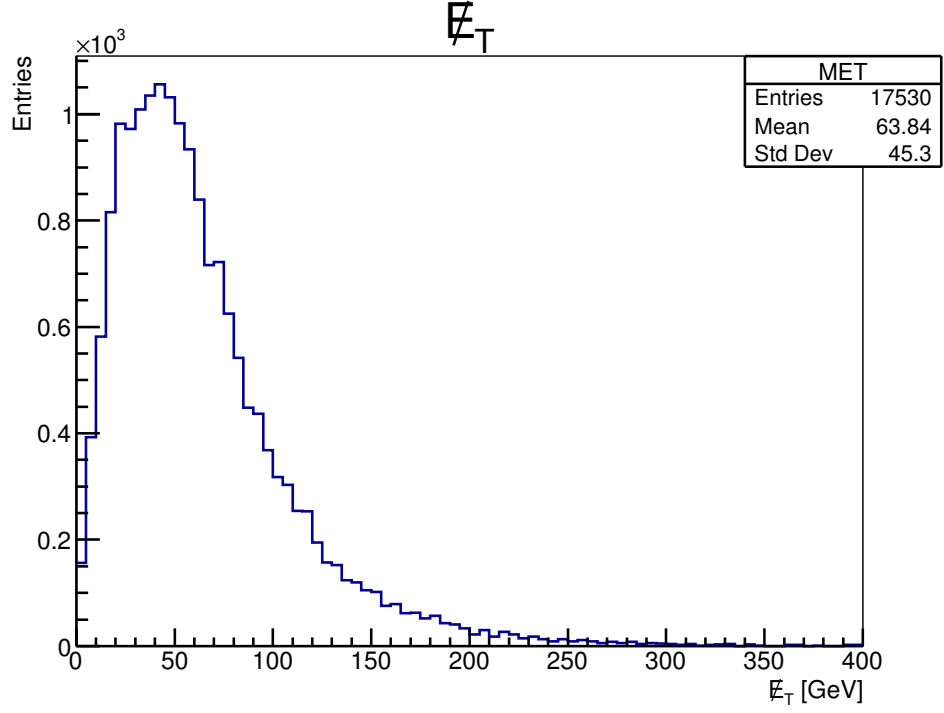
LHeC enerjileri kullanılarak SM çerçevesinde  $e^-p \rightarrow \nu_e W^- q$  süreci için arka plan kinematik dağılımları Şekil 4.16, Şekil 4.17 ve Şekil 4.18’de verilmiştir. Bunlar sırasıyla enine momentum, sanki-hızlılık ve kayıp enine enerji dağılımlarıdır. Eta dağılımında üç jet  $-2.2 < \eta < -1.0$  aralığında maksimum yapmıştır. Eta dağılımının maksimumunun yarısına karşılık gelen eta değerleri jet1 ve jet3 için  $\eta = -2.8$  ve  $\eta = -0.6$ , jet2 için  $\eta = -2.8$  ve  $\eta = -0.4$ ’tür.



**Şekil 4.16:** LHeC çarpıştırıcısında  $e^-p \rightarrow \nu_e W^- q$  arka plan süreci için elde edilen üç jetin enine momentum ( $P_T$ ) grafiği.

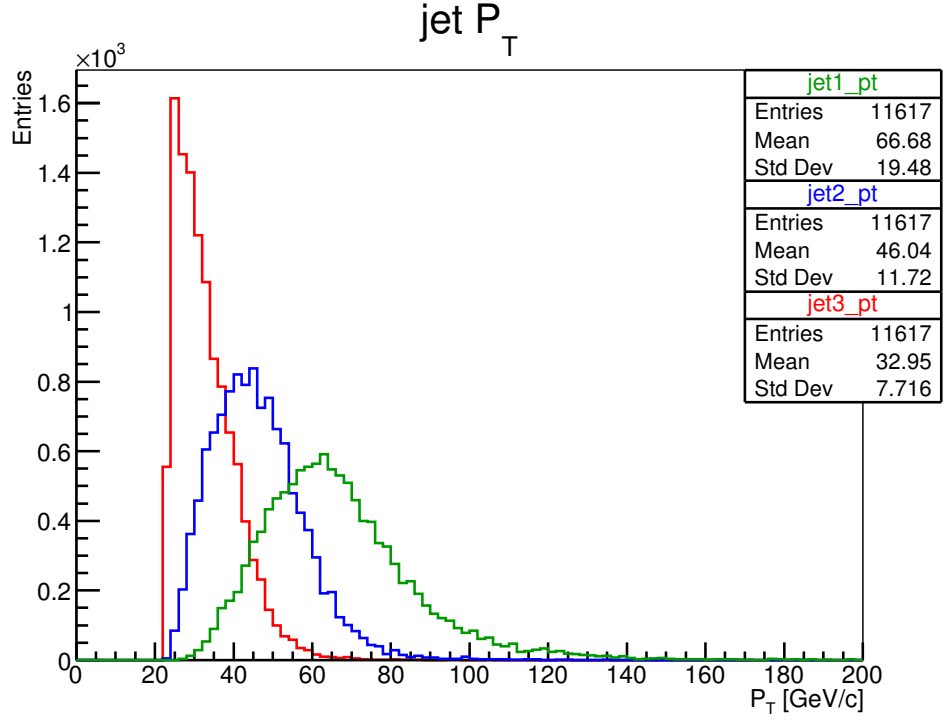


**Şekil 4.17:** LHeC çarpıştırıcısında  $e^-p \rightarrow \nu_e W^- q$  arka plan süreci için elde edilen üç jetin sanki-hızlılık ( $\eta$ ) grafiği.

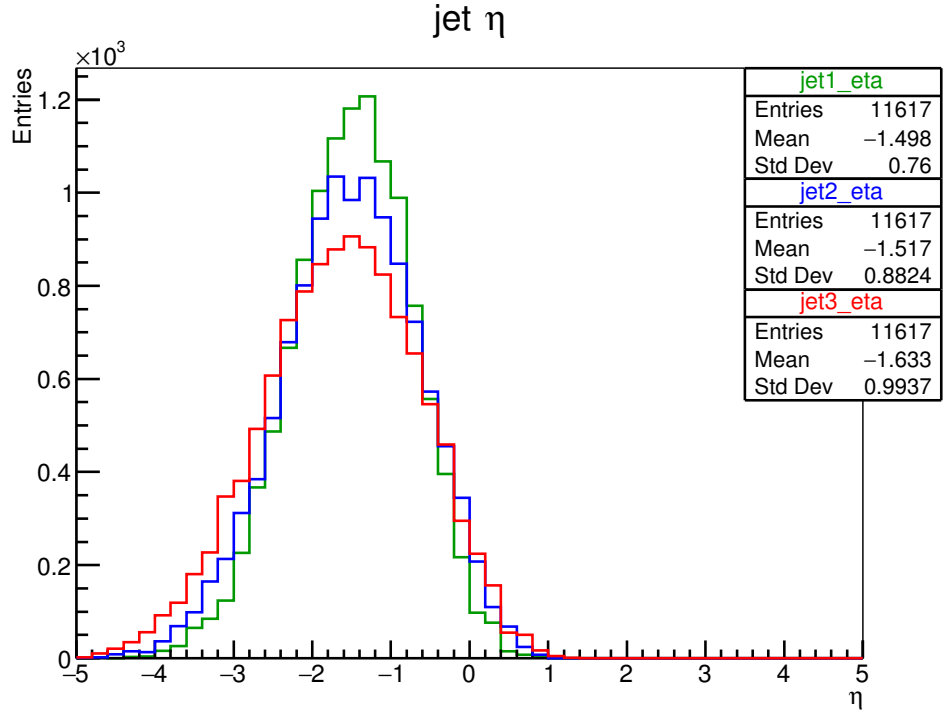


**Şekil 4.18:** LHeC çarpıştırıcısında  $e^-p \rightarrow \nu_e W^- q$  arka plan süreci için elde edilen kayıp enine enerji ( $E_T$ ) grafiği.

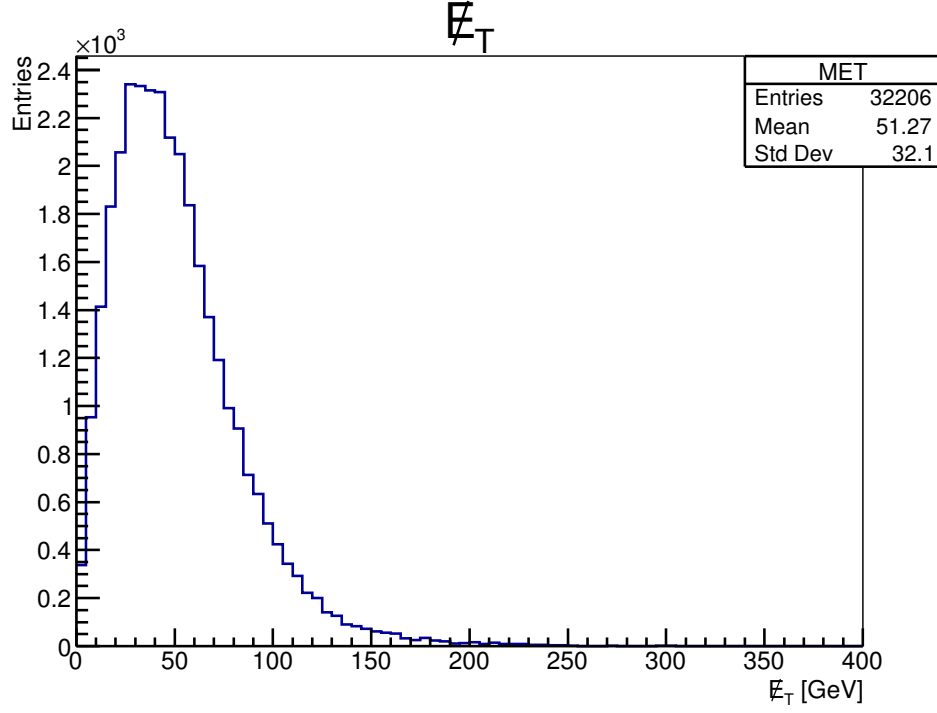
Şekil 4.19, Şekil 4.20 ve Şekil 4.21’de LHeC için SM çerçevesinde,  $e^-p \rightarrow \nu_e \bar{l}$  sürecinin arka plan kinematik dağılımları verilmiştir. Bunlar sırasıyla enine momentum, sanki-hızlılık ve kayıp enine enerji dağılımlarıdır. Eta dağılımında üç jet  $-2.2 < \eta < -0.6$  aralığında maksimum yapmıştır. Eta dağılımının maksimumunun yarısına karşılık gelen eta değerleri jet1 için  $\eta = -2.4$  ve  $\eta = -0.6$ , jet2 için  $\eta = -2.4$  ve  $\eta = -0.4$ , jet3 için  $\eta = -2.8$  ve  $\eta = -0.3$ ’tür.



**Şekil 4.19:** LHeC çarpıştırıcısında  $e^-p \rightarrow \nu_e \bar{t}$  arka plan süreci için elde edilen üç jetin enine momentum ( $P_T$ ) grafiği.



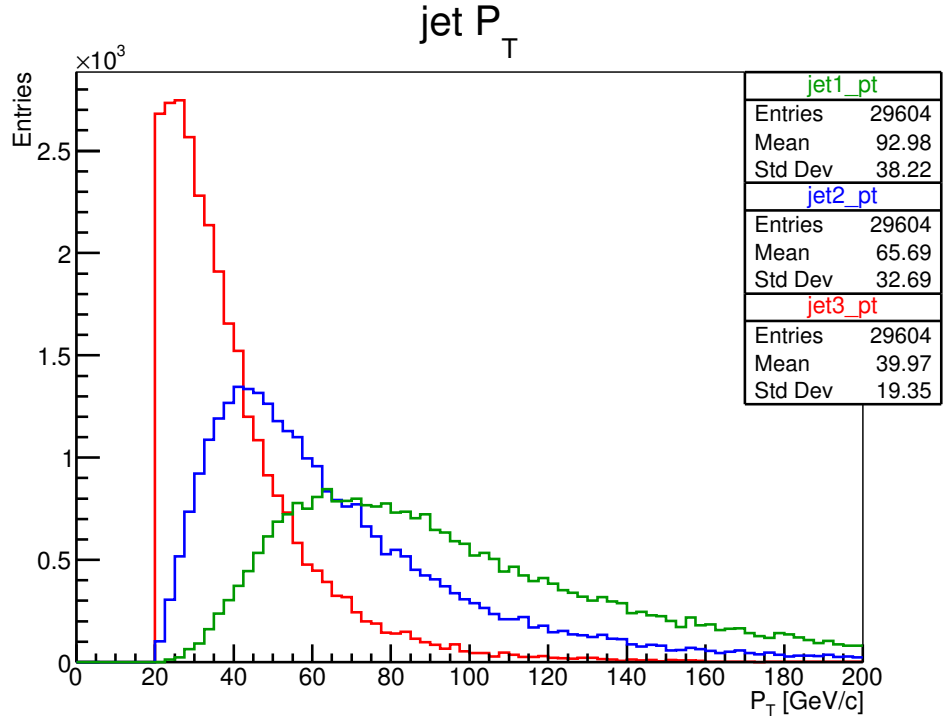
**Şekil 4.20:** LHeC çarpıştırıcısında  $e^-p \rightarrow \nu_e \bar{t}$  arka plan süreci için elde edilen üç jetin sanki-hızlılık ( $\eta$ ) grafiği.



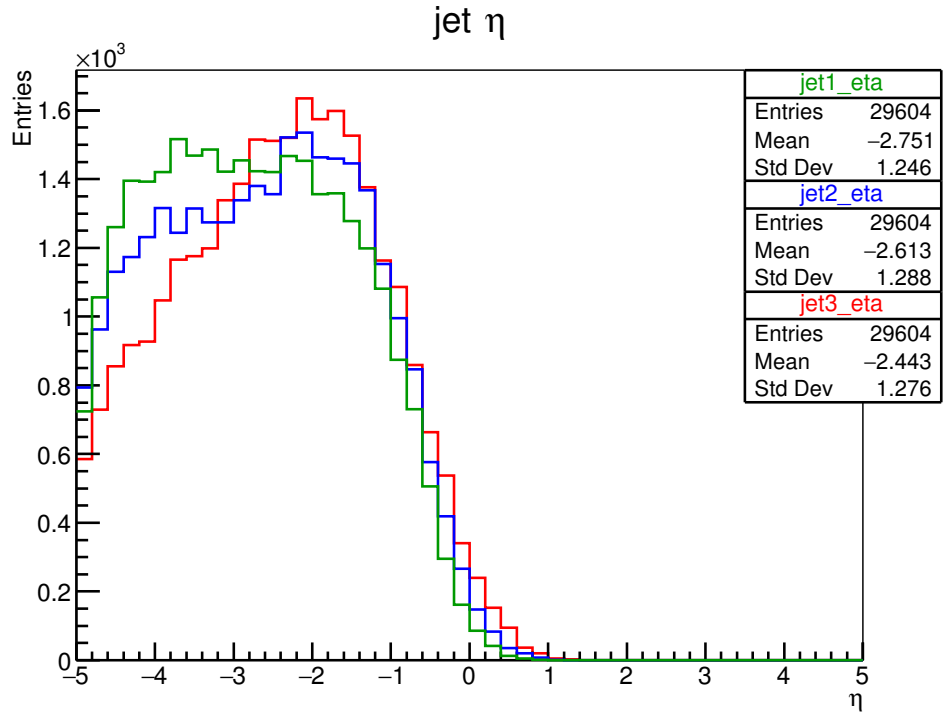
**Şekil 4.21:** LHeC çarpıştırıcısında  $e^-p \rightarrow \nu_e \bar{l}$  arka plan süreci için elde edilen kayıp enine enerji ( $E_T$ ) grafiği.

#### 4.2.2.2. FCC-eh'de Arka Plan Süreçlerinin Kinematik Dağılımları

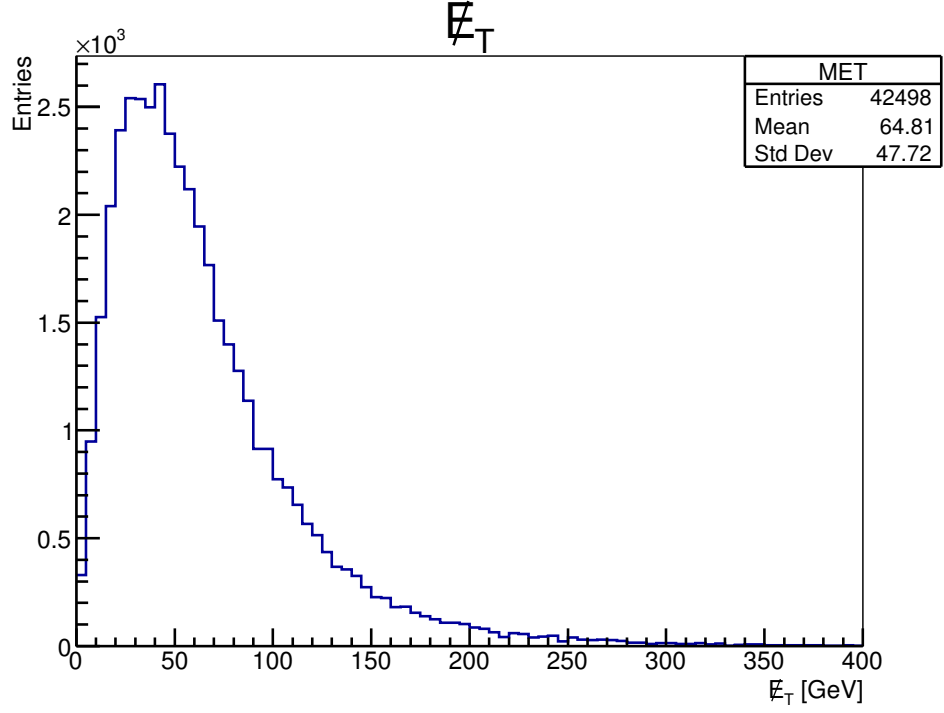
FCC-eh enerjileri kullanılarak SM çerçevesinde  $e^-p \rightarrow \nu_e h q$  süreci için arka plan kinematik dağılımları Şekil 4.22, Şekil 4.23 ve Şekil 4.24'te verilmiştir. Bunlar sırasıyla enine momentum, sanki-hızlılık ve kayıp enine enerji dağılımlarıdır. Eta dağılımında jet1  $-4.4 < \eta < -1.6$ , jet2 ve jet 3  $-3.4 < \eta < -1.2$  aralığında maksimum yapmıştır. Eta dağılımının maksimumunun yarısına karşılık gelen eta değerleri jet1 için  $\eta = -4.8$  ve  $\eta = -0.8$ , jet2 için  $\eta = -5.0$  ve  $\eta = -0.6$ , jet3 için  $\eta = -4.6$  ve  $\eta = -0.6$ 'dır.



**Şekil 4.22:** FCC-eh çarpıştırıcısında  $e^- p \rightarrow \nu_e h q$  sürecinin arka planı için elde edilen üç jetin enine momentum ( $P_T$ ) grafiği.

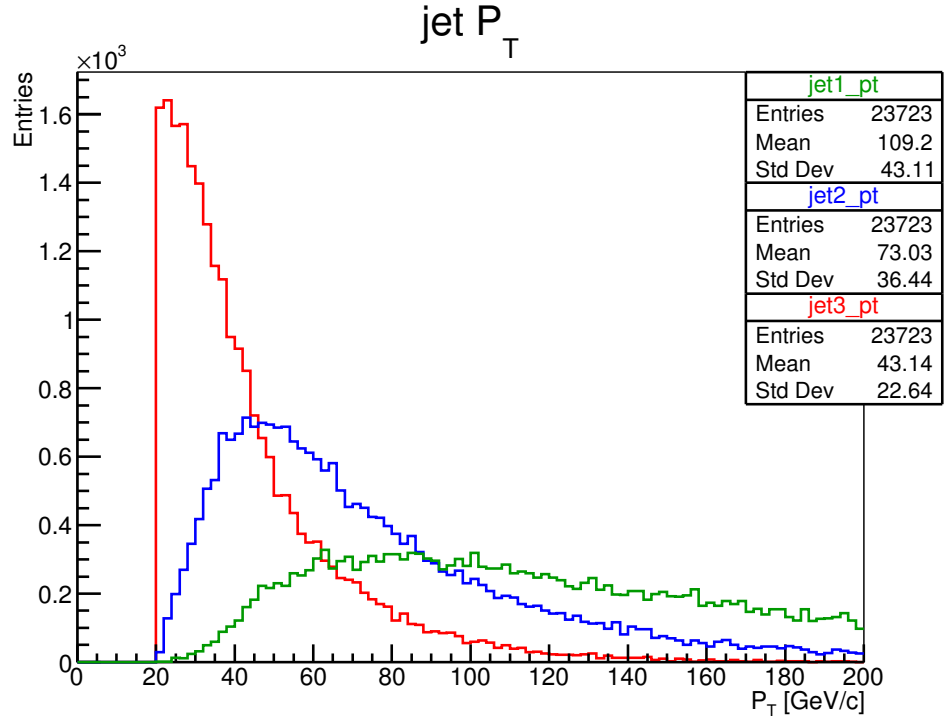


**Şekil 4.23:** FCC-eh çarpıştırıcısında  $e^- p \rightarrow \nu_e h q$  sürecinin arka planı için elde edilen üç jetin sanki-hızlılık ( $\eta$ ) grafiği.

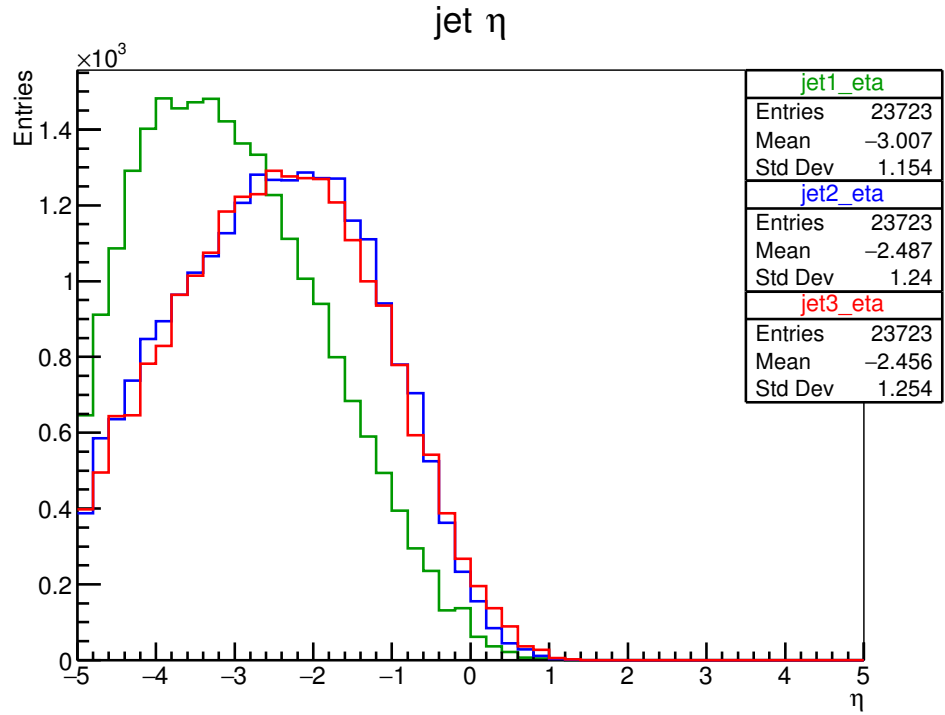


**Şekil 4.24:** FCC-eh çarpıştırıcısında  $e^-p \rightarrow \nu_e h q$  sürecinin arka planı için elde edilen kayıp enine enerji ( $E_T$ ) grafiği.

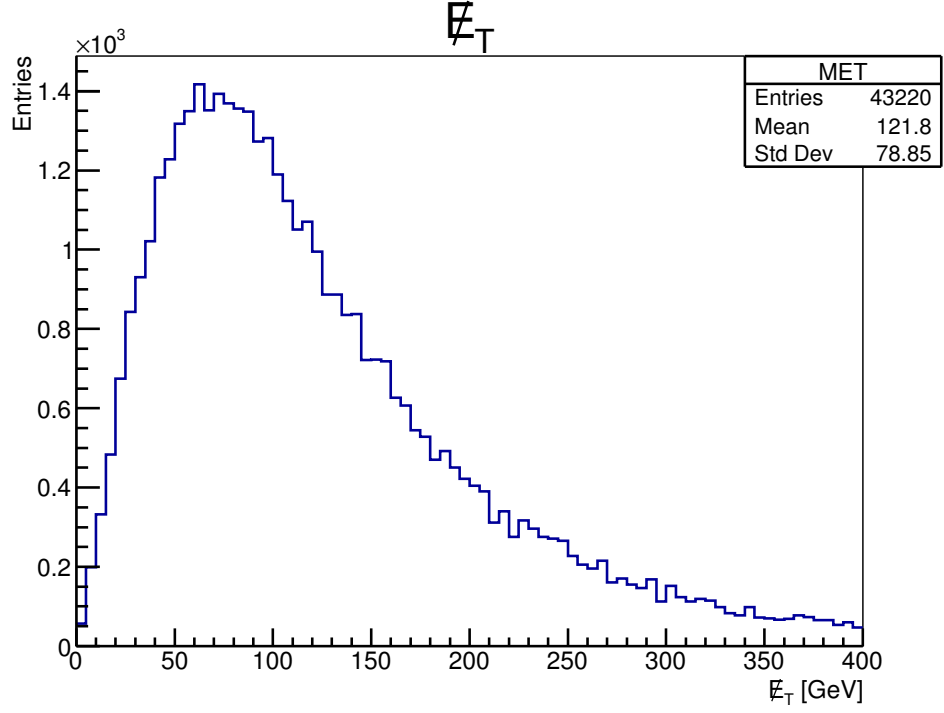
Şekil 4.25, Şekil 4.26 ve Şekil 4.27’de FCC-eh için SM çerçevesinde,  $e^-p \rightarrow \nu_e Z q$  sürecinin arka plan kinematik dağılımları verilmiştir. Bunlar sırasıyla enine momentum, sanki-hızlılık ve kayıp enine enerji dağılımlarıdır. Eta dağılımında jet1  $-4.4 < \eta < -2.6$ , jet2 ve jet3  $-3.4 < \eta < -1.1$  aralığında maksimum yapmıştır. Eta dağılımının maksimumunun yarısına karşılık gelen eta değerleri jet1 için  $\eta = -4.8$  ve  $\eta = -1.6$ , jet2 için  $\eta = -4.6$  ve  $\eta = -0.6$ , jet3 için  $\eta = -4.6$  ve  $\eta = -0.8$ ’dir.



**Şekil 4.25:** FCC-eh çarpıştırıcısında  $e^- p \rightarrow \nu_e Z q$  arka plan süreci için elde edilen üç jetin enine momentum ( $P_T$ ) grafiği.

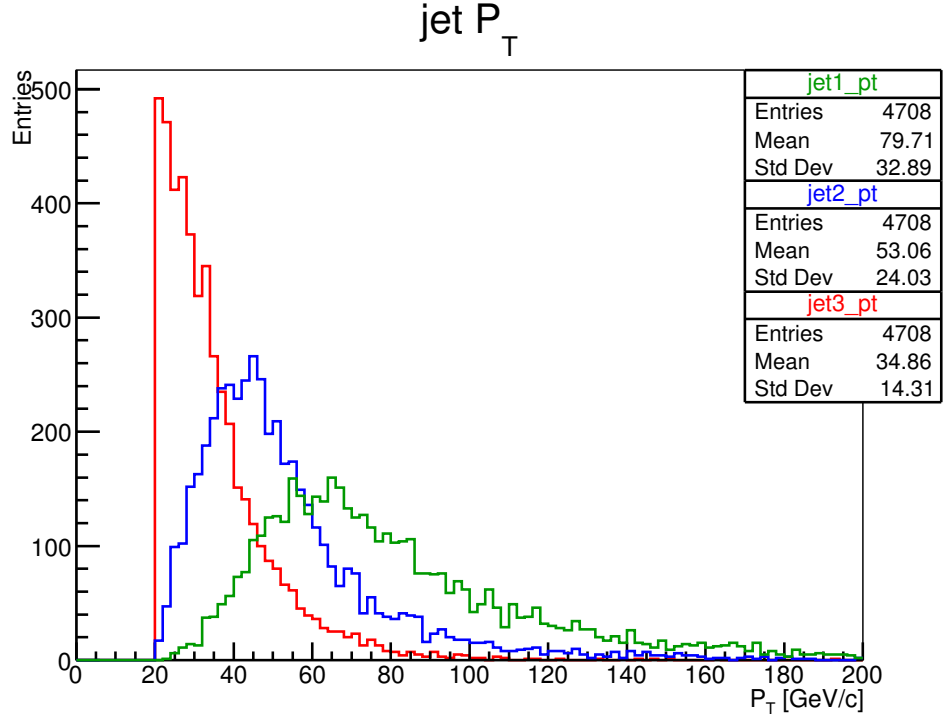


**Şekil 4.26:** FCC-eh çarpıştırıcısında  $e^- p \rightarrow \nu_e Z q$  arka plan süreci için elde edilen üç jetin sanki-hızlılık ( $\eta$ ) grafiği.

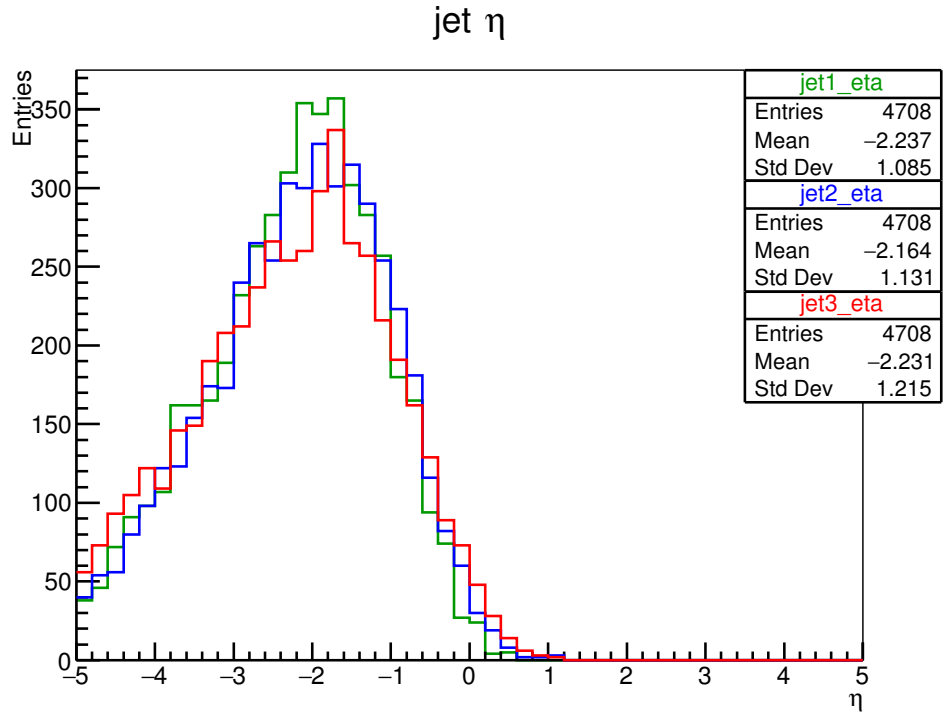


**Şekil 4.27:** FCC-eh çarpıştırıcısında  $e^-p \rightarrow \nu_e Z q$  arka plan süreci için elde edilen kayıp enine enerji ( $E_T$ ) grafiği.

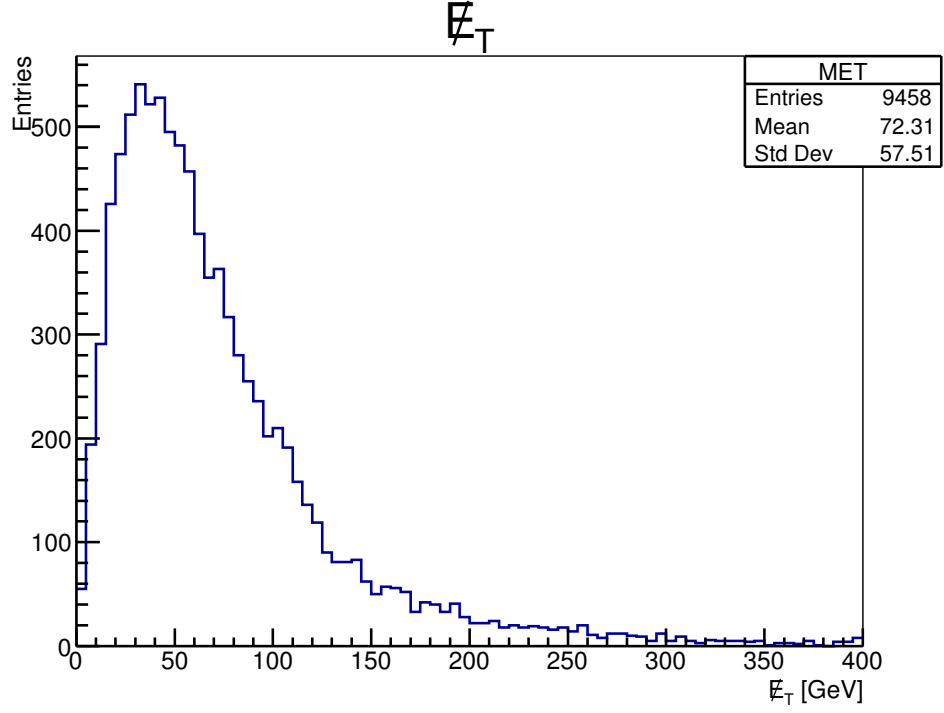
FCC-eh enerjileri kullanılarak SM çerçevesinde  $e^-p \rightarrow \nu_e W^- q$  süreci için arka plan kinematik dağılımları Şekil 4.28, Şekil 4.29 ve Şekil 4.30’da verilmiştir. Bunlar sırasıyla enine momentum, sanki-hızlılık ve kayıp enine enerji dağılımlarıdır. Eta dağılımında üç jet  $-3.0 < \eta < -1.0$  aralığında maksimum yapmıştır. Eta dağılımının maksimumunun yarısına karşılık gelen eta değerleri jet1 için  $\eta = -3.1$  ve  $\eta = -0.8$ , jet2 için  $\eta = -3.4$  ve  $\eta = -0.6$ , jet3 için  $\eta = -3.4$  ve  $\eta = -0.8$ ’dir.



**Şekil 4.28:** FCC-eh çarpıştırıcısında  $e^- p \rightarrow \nu_e W^- q$  arka plan süreci için elde edilen üç jetin enine momentum ( $P_T$ ) grafiği.

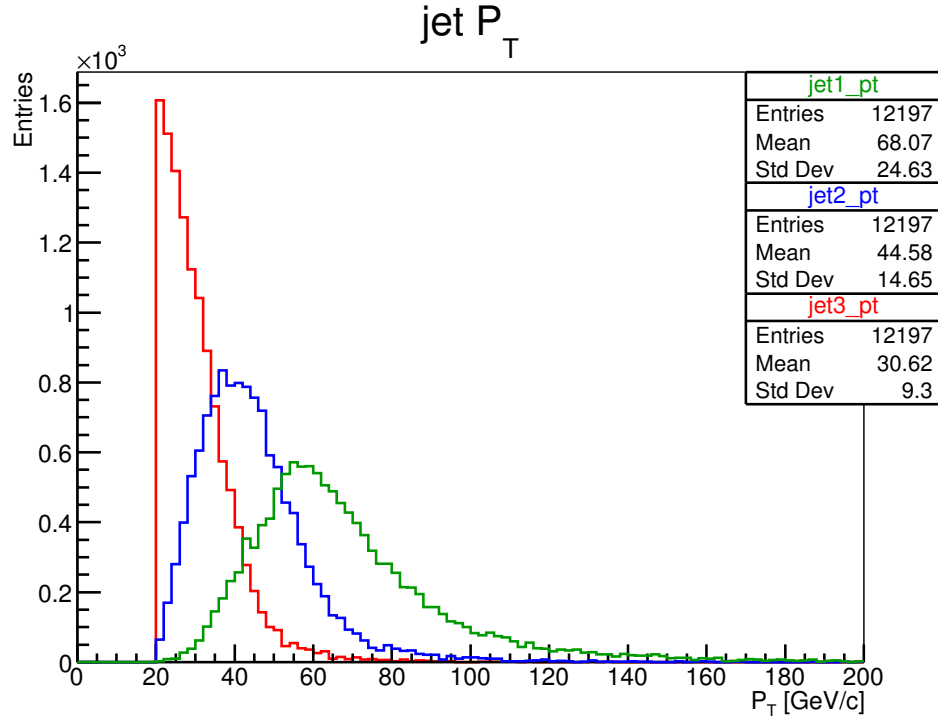


**Şekil 4.29:** FCC-eh çarpıştırıcısında  $e^- p \rightarrow \nu_e W^- q$  arka plan süreci için elde edilen üç jetin sanki-hızlılık ( $\eta$ ) grafiği.

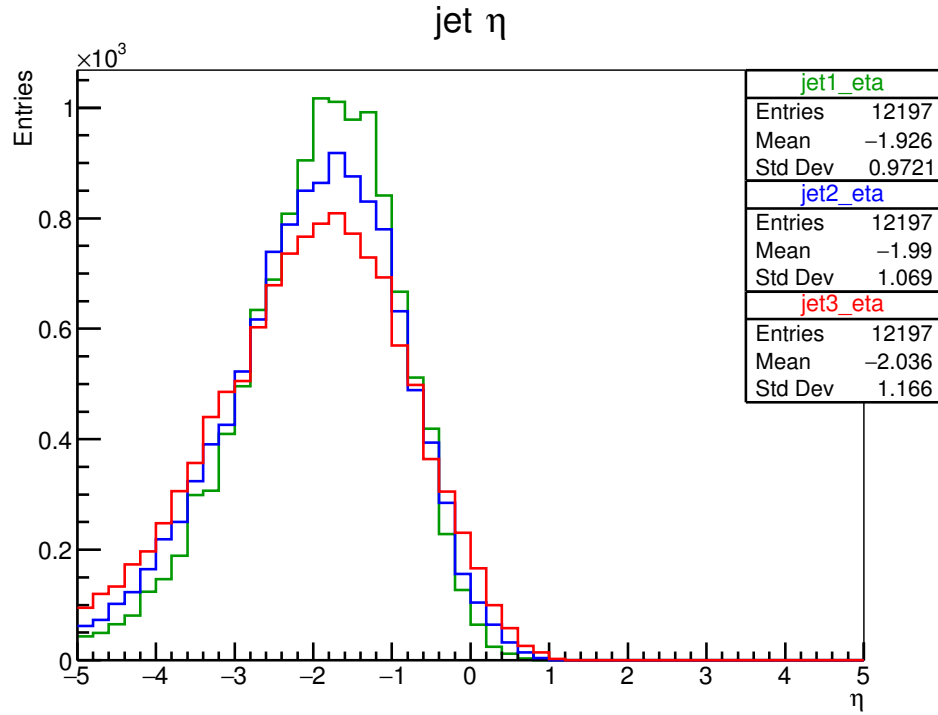


**Şekil 4.30:** FCC-eh çarpıştırıcısında  $e^- p \rightarrow \nu_e W^- q$  arka plan süreci için elde edilen kayıp enine enerji ( $E_T$ ) grafiği.

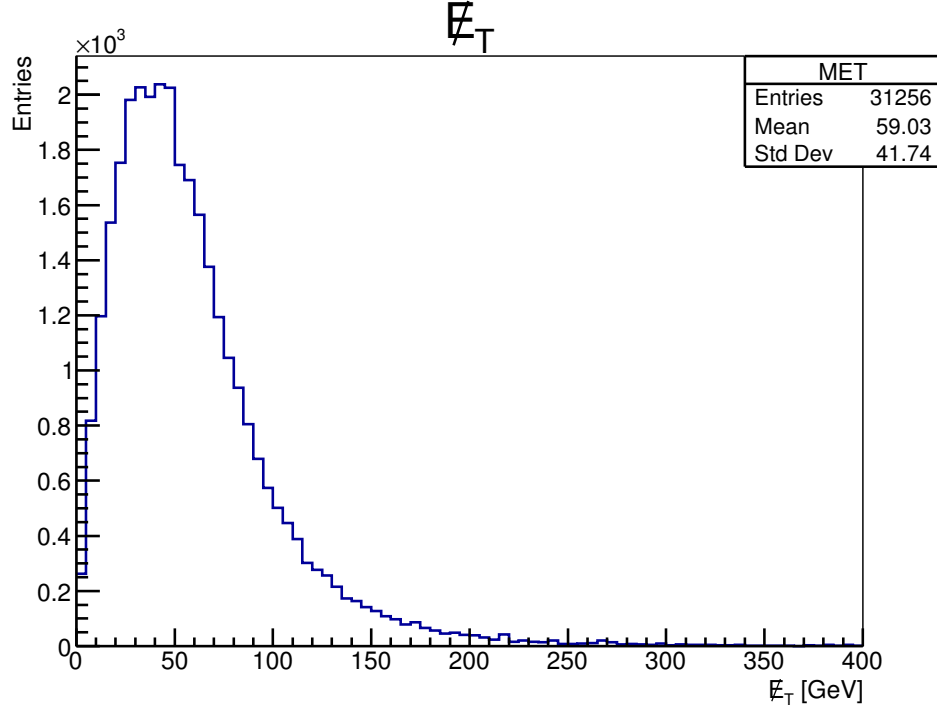
Şekil 4.31, Şekil 4.32 ve Şekil 4.33’de FCC-eh için SM çerçevesinde,  $e^- p \rightarrow \nu_e \bar{t}$  sürecinin arka plan kinematik dağılımları verilmiştir. Bunlar sırasıyla enine momentum, sanki-hızlılık ve kayıp enine enerji dağılımlarıdır. Eta dağılımında üç jet  $-2.8 < \eta < -0.8$  aralığında maksimum yapmıştır. Eta dağılımının maksimumunun yarısına karşılık gelen eta değerleri jet1 için  $\eta = -2.8$  ve  $\eta = -0.8$ , jet2 için  $\eta = -3.0$  ve  $\eta = -0.6$ , jet3 için  $\eta = -3.4$  ve  $\eta = -0.6$ ’dır.



**Şekil 4.31:** FCC-eh çarpıştırıcısında  $e^-p \rightarrow \nu_e \bar{t}$  arka plan süreci için elde edilen üç jetin enine momentum ( $P_T$ ) grafiği.



**Şekil 4.32:** FCC-eh çarpıştırıcısında  $e^-p \rightarrow \nu_e \bar{t}$  arka plan süreci için elde edilen üç jetin sanki-hızlılık ( $\eta$ ) grafiği.



**Şekil 4.33:** FCC-eh çarpıştırıcısında  $e^- p \rightarrow \nu_e \bar{l}$  arka plan süreci için elde edilen kayıp enine enerji ( $E_T$ ) grafiği.

### 4.3. BULGULARIN ANALİZİ

#### 4.3.1. İstatistik Gözlenirlik

Elde edilen tesir kesitleri; dallanma oranları, etiketlendirme verimleri ve toplanmış ışınlık ( $L_{int}$ ) ile çarpılarak sinyalin olay sayısı (S), ve arka planın olay sayısı (B) elde edilmiştir. Bu istatistiksel veriler ile yapılan istatistiksel önem (SS) hesabı aşağıdaki gibidir:

$$SS = \sqrt{2[(S+B)\ln(1 + \frac{S}{B}) - S]} \quad (4.1)$$

İstatistiksel önemin büyüklüğü elde edilen sonucun doğruluğunun ne seviyede olduğunu gösterir. SS değerleri ne kadar büyükse elde edilen sonucun rastlantısal olma olasılığı o kadar düşüktür.

Tablo 4.8’de LHeC ve FCC-eh için  $100 fb^{-1}$  ışınlık değeri kullanılarak farklı anormal bağlaşım parametrelerine karşılık gelen SS değerleri verilmiştir.

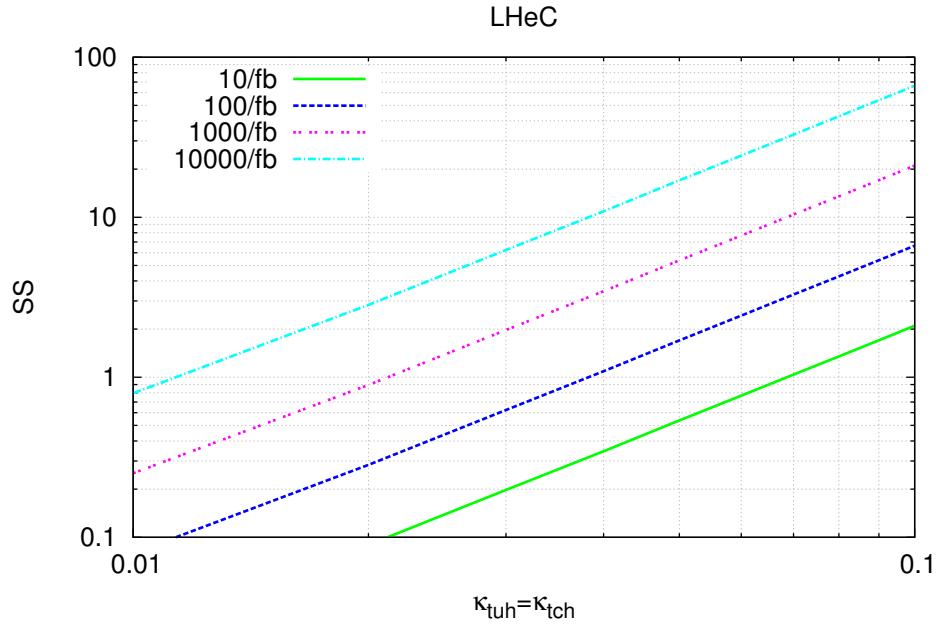
Tablo 4.8’deki SS değerlerinden faydalanarak, farklı toplanmış ışınlık değerleri için SS’nin  $\kappa_{tuh} = \kappa_{ich}$  parametrelerine bağlılığı LHeC için Şekil 4.34’te ve FCC-eh için Şekil 4.35’te verilmiştir.

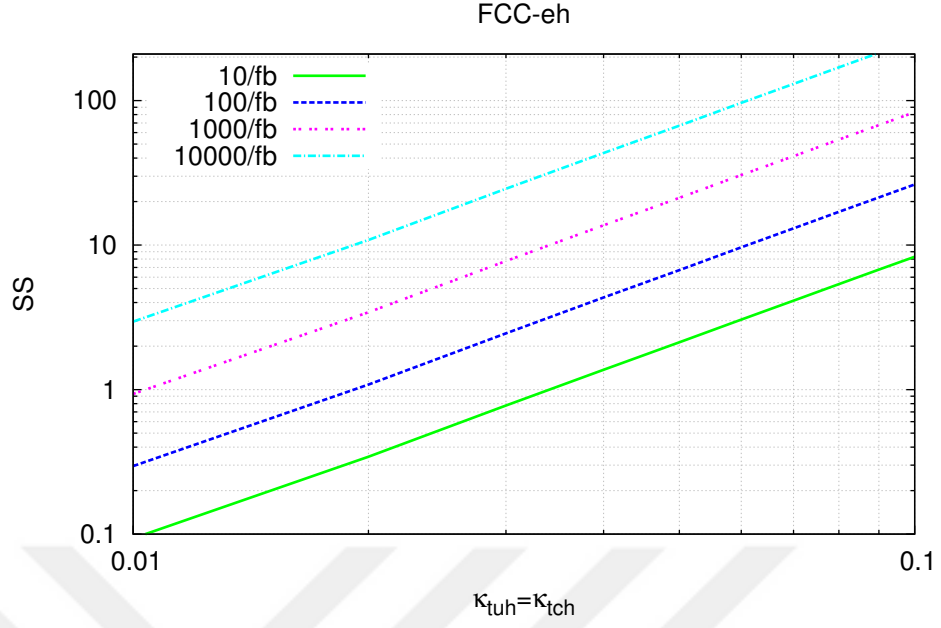
**Tablo 4.8:** İstatistiksel Önem (SS) tablosu.

| $\kappa_{tuh} = \kappa_{tch}$ | SS (LHeC)              | SS (FCC-eh)            |
|-------------------------------|------------------------|------------------------|
| 0.1                           | $6.637 \times 10^0$    | $2.627 \times 10^{+1}$ |
| 0.09                          | $5.388 \times 10^0$    | $2.139 \times 10^{+1}$ |
| 0.08                          | $4.272 \times 10^0$    | $1.698 \times 10^{+1}$ |
| 0.07                          | $3.287 \times 10^0$    | $1.305 \times 10^{+1}$ |
| 0.06                          | $2.427 \times 10^0$    | $9.655 \times 10^0$    |
| 0.05                          | $1.700 \times 10^0$    | $6.712 \times 10^0$    |
| 0.04                          | $1.090 \times 10^0$    | $4.338 \times 10^0$    |
| 0.03                          | $6.245 \times 10^{-1}$ | $2.453 \times 10^0$    |
| 0.02                          | $2.833 \times 10^{-1}$ | $1.084 \times 10^0$    |
| 0.01                          | $7.941 \times 10^{-2}$ | $2.955 \times 10^{-1}$ |
| 0.005                         | $1.727 \times 10^{-2}$ | $4.993 \times 10^{-2}$ |
| 0.001                         | $0.000 \times 10^0$    | $2.313 \times 10^{-2}$ |
| 0.0001                        | $1.226 \times 10^{-2}$ | $3.084 \times 10^{-3}$ |

Şekil 4.34'de  $100\text{ fb}^{-1}$  ve  $1000\text{ fb}^{-1}$  toplanmış ışınlık değerlerinde 2 SS'yi veren parametre değerleri sırasıyla  $\kappa_{tuh} = \kappa_{tch} = 0.054$  ve  $\kappa_{tuh} = \kappa_{tch} = 0.030$ 'dur.

Şekil 4.35'de  $100\text{ fb}^{-1}$  ve  $1000\text{ fb}^{-1}$  toplanmış ışınlık değerlerinde 2 SS'yi veren parametre değerleri sırasıyla  $\kappa_{tuh} = \kappa_{tch} = 0.027$  ve  $\kappa_{tuh} = \kappa_{tch} = 0.015$ 'tir.

**Şekil 4.34:** LHeC çarpıştırıcısında farklı toplanmış ışınlık değerleri ile SS -  $\kappa$  grafiği.



**Şekil 4.35:** FCC-eh çarpıştırıcısında farklı toplanmış ışınlık değerleri ile SS -  $\kappa$  grafiği.

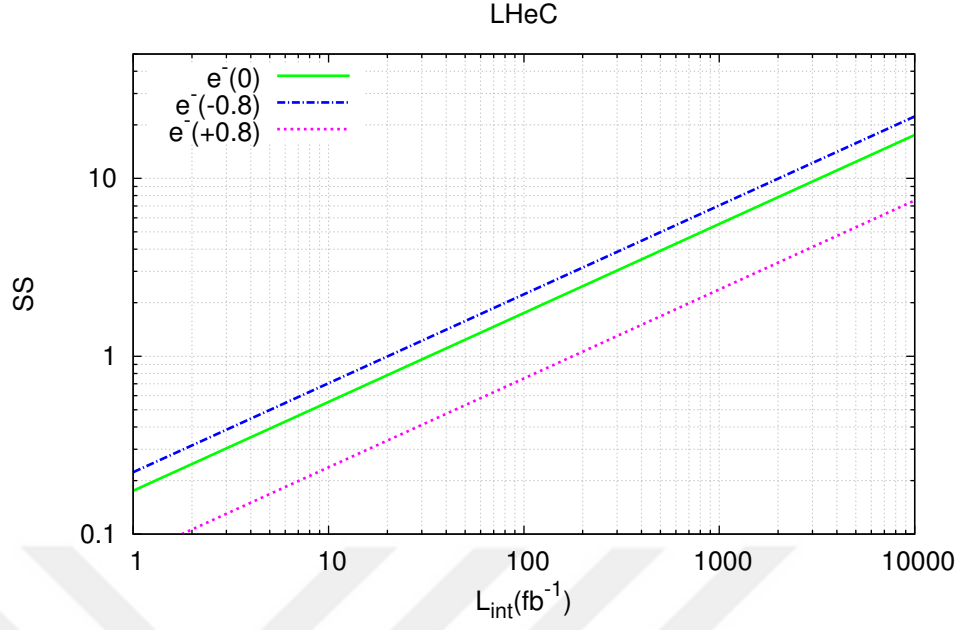
4.1.3 bölümünde verilen tesir kesiti hesaplarından faydalanarak elektronun sağ polarize ve sol polarize olduğu durumlar için istatistiksel önem (SS) - toplam ışınlık ( $L_{int}$ ) grafikleri LHeC için Şekil 4.36’da ve FCC-eh için Şekil 4.37’de verilmiştir. Bu şekillerde “0” elektronun polarize olmadığını, “-0.8” %80 sol polarize, ”+0.8” ise %80 sağ polarize olduğunu göstermektedir.

Şekil 4.36’da LHeC’de  $100fb^{-1}$  toplanmış ışınlığa karşılık okunan SS değerleri elektron polarize olmadan, %80 sol polarize iken ve %80 sağ polarize iken sırasıyla  $SS = 1.75$ ,  $SS = 2.22$  ve  $SS = 0.75$ ’tir.

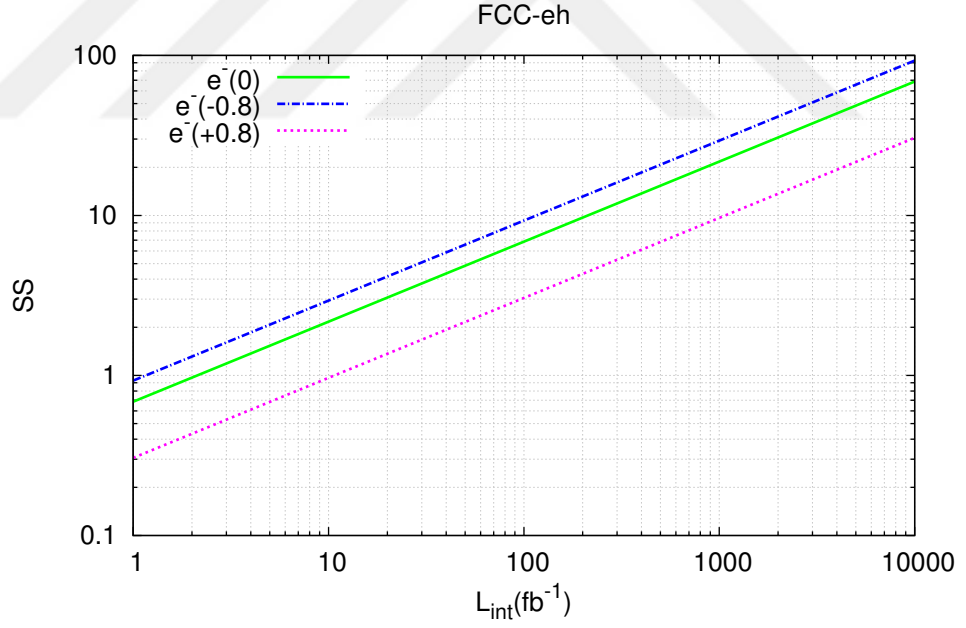
Elektronun sol polarize olması halinde SS değeri 1.27 katına çıkmıştır. Bu da örneğin hızlandırıcıda herhangi bir süre içinde elde edilen  $L_{int}$ ’in 1.61 katına çıkmasına eşdeğer bir sonuçtur.

Şekil 4.37’da FCC-eh’de  $100fb^{-1}$  toplanmış ışınlığa karşılık okunan SS değerleri elektron polarize olmadan, %80 sol polarize iken ve %80 sağ polarize iken sırasıyla  $SS = 6.83$ ,  $SS = 9.26$  ve  $SS = 3.06$ ’dır.

Elektronun sol polarize olması halinde SS değeri 1.36 katına çıkmıştır. Bu da örneğin hızlandırıcıda herhangi bir süre içinde elde edilen  $L_{int}$ ’in 1.84 katına çıkmasına eşdeğer bir sonuçtur.



**Şekil 4.36:** LHeC çarpıştırıcısında  $\kappa_{uh} = \kappa_{ch} = 0.05$  parametre değerinde elde edilen elektronun farklı polarizasyon durumları için SS -  $L_{int}$  grafiği.

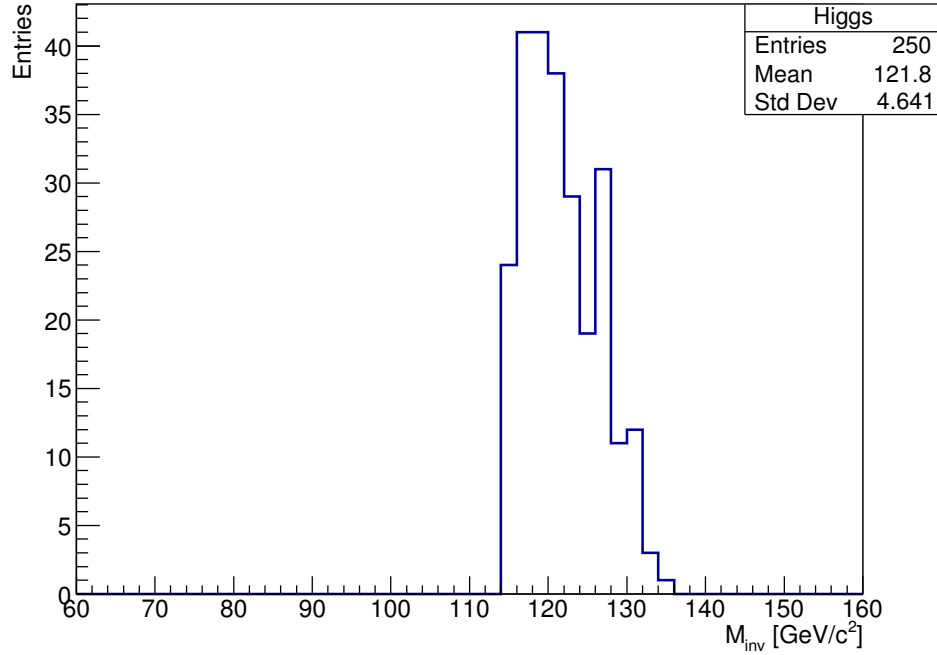


**Şekil 4.37:** FCC-eh çarpıştırıcısında  $\kappa_{uh} = \kappa_{ch} = 0.05$  parametre değerinde elde edilen elektronun farklı polarizasyon durumları için SS -  $L_{int}$  grafiği.

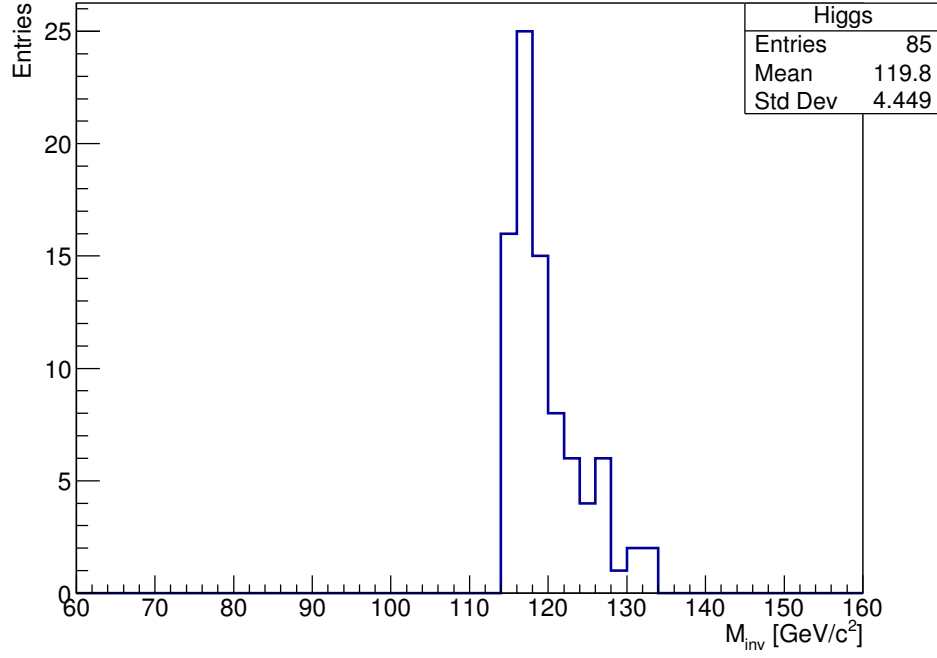
### 4.3.2. Değişmez Kütle Yapılandırmaları

Higgs'in bozunumundan gelen iki jet ve Higgs'e eşlik eden bir jet olmak üzere üç tane jet ile ilgilenilmiştir. Bu üç jet üst kuarkın bozunumundan geldiğinden üçünün değişmez kütleleri toplamı üst kuarkın değişmez kütlelerini, iki tanesinin değişmez kütleleri toplamı da Higgs'in değişmez kütlelerini vermesi beklenmektedir.

Higgs' in  $b\bar{b}$ 'ye bozunumuna bakarak Higgs'in değişmez kütlesi yapılandırılmıştır. Elde edilen değişmez kütle grafikleri LHeC için Şekil 4.38'de ve FCC-eh için Şekil 4.39'da verilmiştir. Bu grafikler elde edilirken sinyalin kinematik dağılım grafikleri yorumlanmıştır ve olabildiğince uygun kesme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.38 (LHeC için) ve Şekil 4.39'da (FCC-eh için) uygulanan kesme işlemleri olayda  $b$  etiketli olan  $jet1$  ve  $jet2$  var iken  $|(m_{jet1} + m_{jet2}) - 125| < 10 \text{ GeV}/c^2$ ,  $jet1, jet2, jet3 P_T > 50 \text{ GeV}$ ,  $jet1, jet2, jet3 |\eta| < 3$  ve  $\cancel{E}_T > 25 \text{ GeV}$  şeklindedir. Bu koşulları sağlayan veriler seçilerek histogram doldurulmuştur. Benzer şekilde  $b$  etiketli olan  $jet2 - jet3$  ve  $jet1 - jet3$  için de aynı kesme işlemleri ile histogram doldurulmuştur.



**Şekil 4.38:** LHeC çarpıştırıcısında  $\kappa_{tth} = \kappa_{tch} = 0.05$  parametre değeri ile elde edilen Higgs değişmez kütle grafiği.

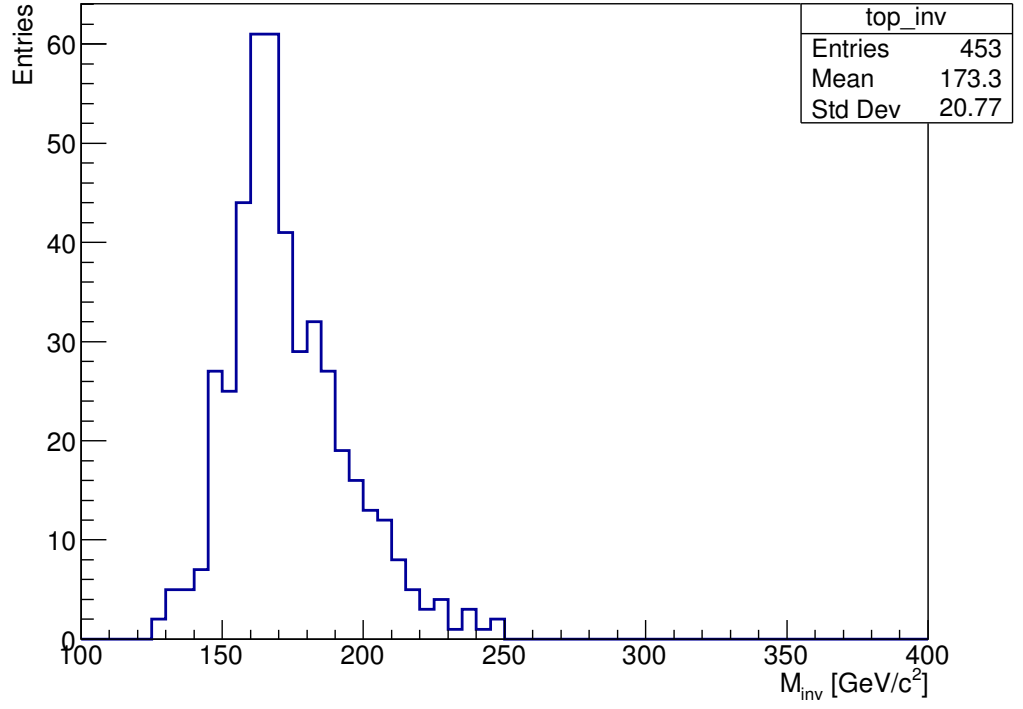


**Şekil 4.39:** FCC-eh çarpıştırıcısında  $\kappa_{tuh} = \kappa_{tch} = 0.05$  parametre değeri ile elde edilen Higgs değişmez kütle grafiği.

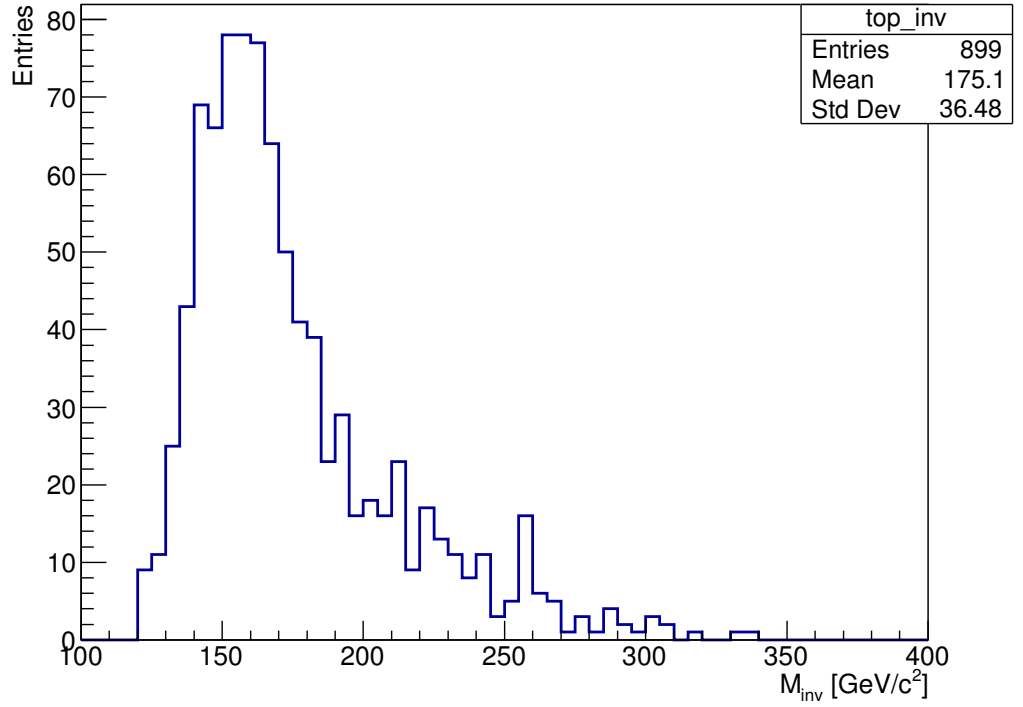
İkisi  $b$  etiketli olan üç jetin değişmez kütlesi ile üst kuarkın değişmez kütlesi yapılandırılmıştır. Elde edilen değişmez kütle grafikleri LHeC için Şekil 4.40'da ve FCC-eh için Şekil 4.41'de verilmiştir.

Şekil 4.40'da (LHeC için) uygulanan kesme işlemleri olayda  $b$  etiketli olan  $jet1$  ve  $jet2$  var iken  $jet3$   $P_T > 50$  GeV,  $jet3$   $-2.36 < \eta < -0.8$  ve  $|(m_{jet1} + m_{jet2}) - 125| < 20$  GeV/c<sup>2</sup> şeklindedir. Benzer şekilde  $b$  etiketli olan  $jet2 - jet3$  ve  $jet1 - jet3$  için de aynı kesme işlemleri ile histogram doldurulmuştur.

Şekil 4.41'de (FCC-eh için) uygulanan kesme işlemleri olayda  $b$  etiketli olan  $jet1$  ve  $jet2$  var iken  $jet3$   $P_T > 43$  GeV,  $jet3$   $-3.59 < \eta < -1.0$  ve  $|(m_{jet1} + m_{jet2}) - 125| < 25$  GeV/c<sup>2</sup> şeklindedir. Benzer şekilde  $b$  etiketli olan  $jet2 - jet3$  ve  $jet1 - jet3$  için de aynı kesme işlemleri ile histogram doldurulmuştur.



**Şekil 4.40:** LHeC çarpıştırıcısında  $\kappa_{tuh} = \kappa_{tch} = 0.05$  parametre değeri ile elde edilen üst kuark değişmez kütle grafiği.



**Şekil 4.41:** FCC-eh çarpıştırıcısında  $\kappa_{tuh} = \kappa_{tch} = 0.05$  parametre değeri ile elde edilen üst kuark değişmez kütle grafiği.

#### 4.4. DALLANMA ORANI İLE BAĞLAŞIM PARAMETRESİ ARASINDAKİ İLİŞKİ

Üst kuarkın toplam bozunum genişliği  $\Gamma_t$ , SM kapsamında yüzde yüze yakın oranda baskın olan  $t \rightarrow W^- b$  ve FCNC Yukawa etkileşmelerinin de dâhil edildiği haliyle şu şekildedir:

$$\Gamma_t = \Gamma_{t \rightarrow W^- b}^{SM} + \Gamma_{t \rightarrow c H} + \Gamma_{t \rightarrow u H}. \quad (4.2)$$

$$\Gamma_0(t \rightarrow W^- b) = \frac{G_F m_t^3}{8\sqrt{2}\pi} |V_{tb}|^2 \beta_W^4 (3 - 2\beta_W^2). \quad (4.3)$$

4.3 numaralı denklemde üst kuarkın ağaç seviyesindeki bozunum genişliği verilmiştir. Burada  $G_F$  Fermi sabiti,  $V_{tb}$  CKM matris elemanının karesi t den b ye geçişin gerçekleşme olasılığını,  $\beta_W = (1 - m_W^2/m_t^2)^{1/2}$  ise W bozonunun üst kuark çerçevesindeki hızını gösterir.

Üst kuarkın yukarı ya da tılsımlı kuarka bozunum genişliği  $\Gamma_{t \rightarrow u(c)H}$  şu şekildedir:

$$\Gamma_{t \rightarrow u(c)H} = \frac{\kappa_{tu(c)H}^2}{16\pi} m_t [(\tau_{u(c)} + 1)^2 - \tau_H^2] \times \sqrt{1 - (\tau_H - \tau_{u(c)})^2} \sqrt{1 - (\tau_H + \tau_{u(c)})^2}. \quad (4.4)$$

Burada  $\tau_H = \frac{m_H}{m_t}$ ,  $\tau_{u(c)} = \frac{m_{u(c)}}{m_t}$  dir.  $m_u$  ve  $m_c$  kütleleri ihmal edilince  $\tau_{u(c)}$  sıfır olur.

$$\Gamma_{t \rightarrow u(c)H} = \frac{\kappa_{tu(c)H}^2}{16\pi} m_t [1 - \tau_H^2] \times \sqrt{1 - \tau_H^2} \sqrt{1 - \tau_H^2}$$

$$\Gamma_{t \rightarrow u(c)H} = \frac{\kappa_{tu(c)H}^2}{16\pi} m_t [1 - \tau_H^2]^2. \quad (4.5)$$

Şimdi elimizdeki denklemleri kullanarak  $t \rightarrow u(c)H$  bozunumunun dallanma oranını hesaplayalım:

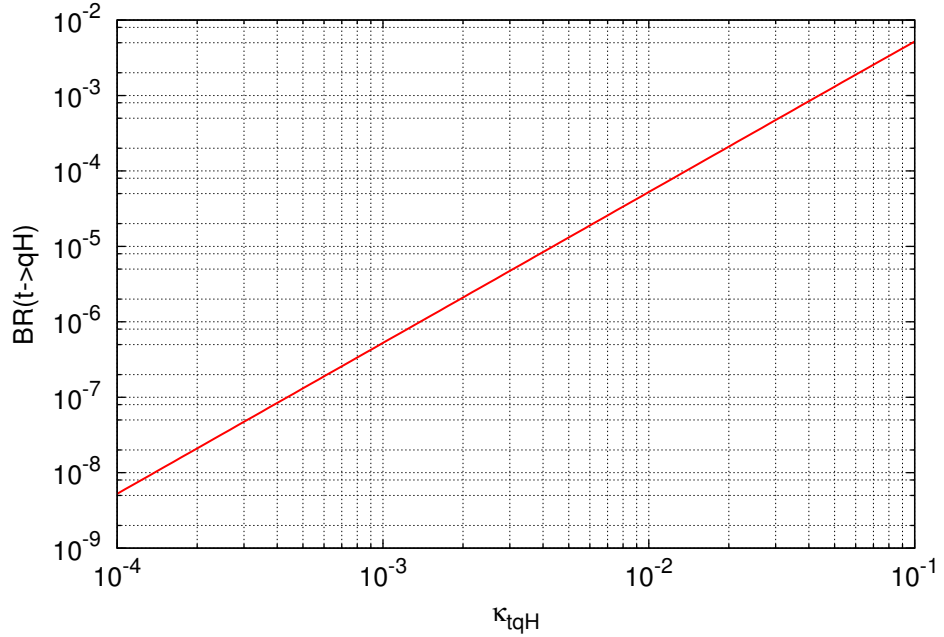
$$Br(t \rightarrow u(c)H) = \frac{\Gamma_{t \rightarrow u(c)H}}{\Gamma_{t \rightarrow W^- b}^{SM} + \Gamma_{t \rightarrow cH} + \Gamma_{t \rightarrow uH}} \quad (4.6)$$

Hesabı basitleştirmek adına üst (t) kuarkın yalnızca ağaç seviyesindeki bozunumu alalım. Bağlaşım parametrelerini eşit ( $\kappa_{tuH} = \kappa_{tcH}$ ) ve  $|V_{tb}|^2 = 1$  alacak olursak,

$$Br(t \rightarrow u(c)H) = \frac{\frac{\kappa_{tu(c)H}^2}{16\pi} m_t [1 - \tau_H^2]^2}{\frac{G_F m_t^3}{8\sqrt{2}\pi} |V_{tb}|^2 \beta_W^4 (3 - 2\beta_W^2) + 2 \left\{ \frac{\kappa_{tu(c)H}^2}{16\pi} m_t [1 - \tau_H^2]^2 \right\}} \quad (4.7)$$

$$Br(t \rightarrow u(c)H) = \frac{\kappa_{tu(c)H}^2}{\sqrt{2} G_F m_t^2} \frac{(1 - m_H^2/m_t^2)^2}{(1 - m_W^2/m_t^2)^2 (1 + 2m_W^2/m_t^2)} \quad (4.8)$$

$$Br(t \rightarrow u(c)H) \approx 0.519 \kappa_{tu(c)H}^2. \quad (4.9)$$



**Şekil 4.42:** Dallanma oranının anormal FCNC bağlaşım sabiti ile ilişkisi ( $\kappa_{tuh} = \kappa_{tch}$ ).

4.9 numaralı denklem kullanılarak  $\kappa_{tuh}$  ve  $\kappa_{tch}$  FCNC bağlaşım parametrelerinin eşit

olduğu durum için dallanma oranının parametreye bağlılığını gösteren grafik Şekil 4.42’de verilmiştir. Bu grafik vasıtasıyla güvenilebilir bir istatistik veren parametre değerinin hangi dallanma oranına karşılık geldiğini görebiliriz. Böylece araştırması yapılan bağlaşımlara LHeC ve FCC-eh’nin göstereceği hassasiyeti belirleyebiliriz.

LHeC’de  $100\text{ fb}^{-1}$  ve  $1000\text{ fb}^{-1}$  toplanmış ışnlık ile yapılan SS hesabında 2 SS’yi veren parametre değerlerine karşılık gelen dallanma oranı sırasıyla %0.153 ve %0.047’dir.

FCC-eh’de  $100\text{ fb}^{-1}$  ve  $1000\text{ fb}^{-1}$  toplanmış ışnlık ile yapılan SS hesabında 2 SS’yi veren parametre değerlerine karşılık gelen dallanma oranı sırasıyla %0.038 ve %0.012’dir.



## 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada  $e^-p \rightarrow \nu_e h \bar{q}$  ( $\bar{q} = \bar{u}, \bar{c}$ ) süreci aracılığıyla, süreçte dolaylı olarak üretilen üst kuarkın  $\bar{t} \rightarrow h \bar{q}$  bozunumu ve  $h \rightarrow b \bar{b}$  bozunumu ile üst kuark ve Higgs bozonu arasındaki FCNC bağlaşımlarının gelecekteki elektron proton çarpıştırıcıları LHeC ve FCC-eh'deki gözlenebilirliği hesaplanmıştır. Bu çarpıştırıcıların, üst kuarkın  $t \rightarrow hu(c)$  dallanma oranına getirebileceği sınırlar hesaplanmıştır.

LHeC için tez boyunca yaptığımız hesaplamalar göz önüne alındığında, ilgilendiğimiz süreçte sinyal tesir kesiti ve arka plan tesir kesitinin aynı mertebede (yaklaşık  $10^{-2}$ ) olduğu görülmüştür. Anormal bağlaşım sabitlerinin  $\kappa_{tuh} = \kappa_{tch} = 10^{-3}$  ve daha küçük değerleri için hesaplanan tesir kesitleri, sinyal ile arka planın ayrıştırılamayacak düzeyde olduğunu göstermektedir.  $\kappa_{tuh} = \kappa_{tch} = 10^{-2}$  değerindeki bağlaşımın gözlenebilirliği için istatistiksel önem ve anormal bağlaşım ilişkisi göz önüne alındığında  $10 ab^{-1}$  gibi yüksek bir toplanmış ışınlık ile 1 SS'den düşük bir değer verdiği görülmektedir, yani güvenilirlik seviyesi (CL) %68'den düşüktür, iyi bir istatistiğe sahip değildir. LHeC için alınan 60 GeV elektron - 7 TeV proton çarpışması ile LHeC'nin  $10^{-2}$  parametre değerinin altına hassasiyet göstermediği sonucuna varılmıştır.

Buna ek olarak elektronun %80 sol polarize olması durumunda SS değerlerinin yaklaşık 1.3 katına çıktığı görülmüştür.

LHeC'de %95 CL için 2 SS'ye karşılık okunan parametre değerleri  $100 fb^{-1}$  ve  $1 ab^{-1}$  toplanmış ışınlık değerleri ile sırasıyla  $\kappa_{tuh} = \kappa_{tch} = 0.054$  ve  $\kappa_{tuh} = \kappa_{tch} = 0.030$ 'dur.  $t \rightarrow hu(c)$  dallanma oranı ile parametre arasındaki ilişki  $Br(t \rightarrow u(c)H) \approx 0.519 \kappa_{tu(c)H}^2$  olarak hesaplanmıştır. Bu hesap ile verilen parametrelere karşılık  $t \rightarrow hu(c)$  dallanma oranı sırasıyla %0.153 ve %0.047'dir.

Benzer şekilde FCC-eh için tez boyunca yaptığımız hesaplamalarda ilgilendiğimiz süreçte sinyal ile arka plan tesir kesitleri arasındaki farkın bir mertebeden az olduğu görülmüştür. Anormal bağlaşım sabitlerinin  $\kappa_{tuh} = \kappa_{tch} = 10^{-3}$  ve daha küçük değerleri için hesaplanan tesir kesitleri, sinyal ile arka planın ayrıştırılamayacak düzeyde olduğunu göstermektedir. İstatistiksel önem ve anormal bağlaşım ilişkisi göz önüne alındığında  $10 ab^{-1}$  toplanmış ışınlık ile  $\kappa_{tuh} = \kappa_{tch} = 10^{-2}$  parametre değerine karşılık gelen SS değerinin 3 civarında olduğu görülmektedir, yani güvenilirlik seviyesi %99'dan büyüktür, çok iyi bir istatistiğe sahiptir. FCC-eh için alınan 60 GeV elektron - 50 TeV

proton çarpışmasında yüksek denebilecek birkaç  $ab^{-1}$  mertebesinde toplanmış ışınlık değeri ile FCC-eh'nin  $10^{-2}$  parametre sınırını zorlayabileceği sonucuna varılmıştır.

Buna ek olarak elektronun %80 sol polarize olması durumunda SS değerlerinin yaklaşık 1.4 katına çıktığı görülmüştür.

FCC-eh'de %95 CL için 2 SS'ye karşılık okunan parametre değerleri  $100fb^{-1}$  ve  $1ab^{-1}$  toplanmış ışınlık değerleri ile sırasıyla  $\kappa_{tuh} = \kappa_{tch} = 0.027$  ve  $\kappa_{tuh} = \kappa_{tch} = 0.015$ 'tir. Bu parametrelere karşılık gelen  $t \rightarrow hu(c)$  dallanma oranı sırasıyla %0.038 ve %0.012 olarak hesaplanmıştır.

Bu parametre sınırlarını literatürdeki sınırlarla karşılaştırmakta fayda vardır:

LHC'de ATLAS ( $\sqrt{s} = 8$  GeV,  $L_{int} = 20.3 fb^{-1}$ ,  $h \rightarrow bb, \tau\tau, \gamma\gamma, WW$ ) ve CMS ( $\sqrt{s} = 8$  GeV,  $L_{int} = 19.7 fb^{-1}$ ,  $h \rightarrow bb, \tau\tau, \gamma\gamma, WW, ZZ$ ) deneylerinden gelen verilerle dallanma oranlarına koyulan limitler %95 CL'de sırasıyla  $BR(t \rightarrow ch) < \%0.46$ ,  $BR(t \rightarrow uh) < \%0.45$  ve  $BR(t \rightarrow ch) < \%0.40$ ,  $BR(t \rightarrow uh) < \%0.55$ 'tir.

Literatürde bu tezdekine benzer bir hesap Liu ve diğ. [3] tarafından LHeC (14 TeV - 150 GeV,  $h \rightarrow bb$ ) için yapılmıştır,  $L_{int} = 10 fb^{-1}$ 'de  $BR(t \rightarrow u(c)h)$  dallanma oranına koyulan limit %95 CL ile %0.043 olarak verilmiştir.

İşbu tezde LHeC (60 GeV - 7 TeV) ve FCC-eh (60 GeV - 50 TeV) için yapılan hesaplar  $L_{int} = 10 fb^{-1}$  ile %95 CL'de sırasıyla  $BR(t \rightarrow u(c)h) < \%0.49$  ve  $BR(t \rightarrow u(c)h) < \%0.13$  sınırlarını getirmiştir.

Şimdi CMS ve ATLAS verileri ile kıyaslayacak olursak LHeC hesabımızın daha küçük  $L_{int}$  ile yakın sınırlar getirdiği, FCC-eh hesabımızın ise yine daha küçük  $L_{int}$  ile yaklaşık dört kat daha hassas olduğu görülmektedir.

Liu ve diğ.nin çalışmasındaki sonuçlar LHeC için daha yüksek enerjiler alındığından LHeC hesabımızdaki limitlerden yaklaşık bir mertebe daha iyi, FCC-eh hesabımızdaki limitlerden ise yaklaşık üç kat daha iyidir. FCC-eh ye göre daha düşük proton enerjisi ve daha yüksek elektron enerjisi ile daha hassas sonuçlar alınmış olması dikkate değerdir.

LHeC ve FCC-eh'de deneylerin hayata geçmesi ve veri toplanıp analiz edilmesi yapılan bu çalışmalar için tamamlayıcı olacaktır.

## KAYNAKLAR

- [1]. Glashow, S., Iliopoulos, J., Maiani, L., 1970, Weak Interactions with Lepton-Hadron Symmetry, *Phys. Rev. D* 2, 1285.
- [2]. Aguilar-Saavedra, J. A., 2005, Top flavour-changing neutral interactions: theoretical expectations and experimental detection, arXiv:hep-ph/0409342v4.
- [3]. Liu W., Sun H., Wang X. and Luo X., 2015, Probing the anomalous FCNC top-Higgs Yukawa couplings at the Large Hadron Electron Collider, *Physical Review, D* 92, 074015.
- [4]. ATLAS Collaboration, 2015, Search for flavour-changing neutral current top quark decays  $t \rightarrow Hq$  in pp collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector, *J. High Energy Phys.*, (2015) 2015: 61. doi:10.1007/JHEP12(2015)061.
- [5]. CMS Collaboration, 2017, Search for top quark decays via Higgs-boson-mediated flavor-changing neutral currents in pp collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV, *J. High Energy Phys.*, (2017) 2017: 79. doi:10.1007/JHEP02(2017)079.
- [6]. Griffiths, D., 2008, *Introduction to Elementary Particles*, Wiley, ISBN: 978-3527406012.
- [7]. Sultansoy, S., 2016, Ders1 (Temel Parçacıklar), <http://www.ssultansoy.etu.edu.tr/sunumlar/StandartModelMBN315Ders1.pdf>, [Ziyaret tarihi: 5 Aralık 2016].
- [8]. LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration, 2016, Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger, *Phys. Rev. Lett.* 116 , 061102.
- [9]. D0 Collaboration, 1995, Observation of the Top Quark, *Phys. Rev. Lett.* 74, 2632.
- [10]. CDF Collaboration, 1995, Observation of Top Quark Production in  $\bar{p}p$  Collisions with the Collider Detector at Fermilab, *Phys. Rev. Lett.* 74, 2626.
- [11]. Patrignani, C. et al., Particle Data Group, 2016, *Chin. Phys. C*, 40, 100001.
- [12]. Quadt, A., 2007, *Top Quark Physics at Hadron Colliders*, Springer Berlin Heidelberg, New york, ISBN: 978-3-540-71059-2.
- [13]. P.W. Higgs, *Phys. Lett.* 12 (1964) 132.
- [14]. <http://www.ph.ed.ac.uk/higgs/brief-history>, [Ziyaret tarihi: 12 Şubat 2017].

- [15]. ATLAS Collaboration, 2012, Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC, *Physics Letters B* 716 (2012), 1–29.
- [16]. CMS Collaboration, 2012, Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC, *Physics Letters B* 716, 30–61.
- [17]. Djouadi, A. and Grazzini, M., 2016, *The Higgs Boson in the Standard Model, Discovery of the Higgs Boson*, In: Nisati, A. and Sharma, V. (ed.), 1, World Scientific, ISBN: 978-981-4425-46-9, 1-44.
- [18]. <https://science.nasa.gov/astrophysics/focus-areas/what-is-dark-energy>, [Ziyaret tarihi: 1 Mayıs 2017].
- [19]. Rubin, V.C. et al., 1978, Extended rotation curves of high-luminosity spiral galaxies IV. systematic dynamical properties Sa→Sc, *Astrophysical Journal* 225, 107-111.
- [20]. Özpıneci, A., 2011, Parçacıkların Standard Modeli ve BHC, [http://p409a.physics.metu.edu.tr/~ozpıneci/HOMEPAGE/Popular\\_Presetations\\_files/KTU.pdf](http://p409a.physics.metu.edu.tr/~ozpıneci/HOMEPAGE/Popular_Presetations_files/KTU.pdf), [Ziyaret tarihi: 3 Şubat 2017].
- [21]. <https://fcc.web.cern.ch/Pages/default.aspx>, [Ziyaret tarihi: 12 Şubat 2017].
- [22]. Kumar, M. et al., 2016, Probing anomalous couplings using di-Higgs production in electron–proton collisions, *Physics Letters B*, 764 (10), 247-253.
- [23]. Abelleira Fernandez, J. L. et al., 2012, A large hadron electron collider at CERN: report on the physics and design concepts for machine and detector, *J. Phys. G*, 39 (7), 075001.
- [24]. Bruening, O., Klein, M., 2013, The large hadron electron collider, *Mod. Phys. Lett. A*, 28 (16), 1330011.
- [25]. Abelleira Fernandez, J. L. et al., On the relation of the LHeC and the LHC, arXiv: 1211.5102.
- [26]. Alwall, J. et al., 2014, The automated computation of tree-level and next-to-leading order differential cross sections, and their matching to parton shower simulations, [arXiv:1405.0301[hep-ph]].
- [27]. <https://feynrules.irmp.ucl.ac.be/>, [Ziyaret tarihi: 15 Ağustos 2016].
- [28]. <http://feynrules.irmp.ucl.ac.be/wiki/TFCNC>, [Ziyaret tarihi: 15 Ağustos 2016].
- [29]. Degrande, C., Duhr, C., Fuks, B., Grellscheid, D., Mattelaer, O. and Reiter, T., 2012, UFO - The Universal FeynRules Output, *Computer Physics Communications*, 183 (6), 1201-1214.
- [30]. Sjöstrand, T. et al., 2006, PYTHIA 6.4 physics and manual, *Journal of High Energy*

Physics, Volume 2006, JHEP05(2006).

- [31]. The DELPHES 3 collaboration, 2014, DELPHES 3: a modular framework for fast simulation of a generic collider experiment, J. High Energ. Phys., 2014: 57. doi:10.1007/JHEP02(2014)057.
- [32]. <https://root.cern.ch/>, [Ziyaret tarihi: 6 Temmuz 2016].
- [33]. Dorigo, T, 2016, Higgs to bbbar at ICHEP 2016, <https://amva4newphysics.wordpress.com/2016/08/09/higgs-to-bbbar-at-ichep-2016/>, [Ziyaret tarihi: 28 Aralık 2016].



## EKLER

**EK 1.** Kinematik dağılım grafikleri için kullanılan örnek kodlar.

```
void pt_eta_met(const char *inputFile) {
gSystem->Load("libDelphes");

//Girdi dosyasını kullanan Root ağaçlarından zincir oluşturulur.
TChain chain("Delphes");
chain.Add(inputFile);

//ExRootTreeReader sınıfı nesnesi oluşturulur.
//Girdi sayısı ile bir tamsayı tanımlanır.
ExRootTreeReader *treeReader = new ExRootTreeReader(&chain);
Long64_t numberOfEntries = treeReader->GetEntries();

//Analizde kullanılacak olan dallar ile işaretçiler tanımlanır.
TClonesArray *branchJet = treeReader->UseBranch("Jet");
TClonesArray *branchMissingET = treeReader->UseBranch("MissingET");

//Üç jetin PT ve etaları için ve met için histogramlar tanımlanır.
TH1 *histJetPT1 = new TH1F("#color[418]{jet1_pt}", "jet P_{T}", 80.0, 0.0, 200.0);
TH1 *histJetPT2 = new TH1F("#color[4]{jet2_pt}", "jet P_{T}", 80.0, 0.0, 200.0);
TH1 *histJetPT3 = new TH1F("#color[2]{jet3_pt}", "jet P_{T}", 80.0, 0.0, 200.0);
TH1 *histJetEta1 = new TH1F("#color[418]{jet1_eta}", "jet #eta", 50, -5.0, 5.0);
TH1 *histJetEta2 = new TH1F("#color[4]{jet2_eta}", "jet #eta", 50, -5.0, 5.0);
TH1 *histJetEta3 = new TH1F("#color[2]{jet3_eta}", "jet #eta", 50, -5.0, 5.0);
TH1 *histMissingETMET = new TH1F("MET", "#slash{E}_{T}", 80.0, 0.0, 400.0);

//Tüm olaylar üzerinden döngü başlatılır.
for(Int_t entry = 0; entry < numberOfEntries; ++entry) {

//Belirlenen olaylar için seçilmiş olan dallar yüklenir.
treeReader->ReadEntry(entry);

//Olayın içinde en az üç jet olması koşulu koyulur ve öncü jetlere işaretçi atanır.
if(branchJet->GetEntries() > 2) {
Jet *jet1 = (Jet*) branchJet->At(0);
Jet *jet2 = (Jet*) branchJet->At(1);
Jet *jet3 = (Jet*) branchJet->At(2);

//PT histogramları doldurulur.
histJetPT1->Fill(jet1->PT);
```

```
histJetPT2->Fill(jet2->PT);
histJetPT3->Fill(jet3->PT);
```

```
//Eta histogramları doldurulur.
histJetEta1->Fill(jet1->Eta);
histJetEta2->Fill(jet2->Eta);
histJetEta3->Fill(jet3->Eta); }
```

//Olayların içinde en az bir met olması koşulu koyulur ve daldaki öncü met ile işaretçi tanımlanır.

```
if(branchMissingET->GetEntriesFast() > 0) {
MissingET *met = (MissingET*) branchMissingET->At(0);
```

```
//met histogramı doldurulur.
histMissingETMET->Fill(met->MET); } }
```

//Tuvaller oluşturulur ve her bir pt, her bir eta ve met histogramları ayrı tuvallere çizilir.

//Tuvaller bir dosyaya yazdırılır.

```
TCanvas *c1= new TCanvas("c1","c1");
c1->cd();
histJetPT3->Draw("HIST");
histJetPT2->Draw("HIST SAMES");
histJetPT1->Draw("HIST SAMES");
c1->Print("pt.eps");
```

```
TCanvas *c2= new TCanvas("c2","c2");
c2->cd();
histJetEta3->Draw("HIST");
histJetEta2->Draw("HIST SAMES");
histJetEta1->Draw("HIST SAMES");
c2->Print("eta.eps");
```

```
TCanvas *c3= new TCanvas("c3","c3");
c3->cd();
histMissingETMET->Draw("HIST");
c3->Print("met.eps"); }
```

**EK 2.** Değişmez kütle grafikleri için kullanılan örnek kodlar.

//kesme işlemleri için sabitler tanımlanır. Bu sabitler yardımıyla koşullar hızlı bir şekilde değiştirilebilir.

```
static const double interval=10;
static const double ptcut=50;
static const double etacut=3;
```

```
void higgs_inv(const char *inputFile) {
gSystem->Load("libDelphes");
```

```

//Girdi dosyasını kullanarak Root ağaçlarından zincir oluşturulur.
TChain chain("Delphes");
chain.Add(inputFile);

//ExRootTreeReader sınıfı nesnesi oluşturulur.
//Girdi sayısı ile bir tamsayı tanımlanır.
ExRootTreeReader *treeReader = new ExRootTreeReader(&chain);
Long64_t numberOfEntries = treeReader->GetEntries();

//Analizde kullanılacak olan dallar ile işaretçiler tanımlanır.
TClonesArray *branchJet = treeReader->UseBranch("Jet");
TClonesArray *branchMissingET = treeReader->UseBranch("MissingET");

//Yapılandırılacak olan iki jet için histogram tanımlanır.
TH1 *histMass1 = new TH1F("Higgs", "", 50, 60.0, 160.0);

//Tüm olaylar üzerinden döngü başlatılır.
for(Int_t entry = 0; entry < numberOfEntries; ++entry) {

//Belirlenen olaylar için seçilmiş olan dallar yüklenir.
treeReader->ReadEntry(entry);

//Olayların içinde en az bir met olması koşulu koyulur ve daldaki öncü met ile işaretçi tanımlanır.
if(branchMissingET->GetEntries()>0){
MissingET *met = (MissingET*) branchMissingET->At(0);

//met için kesme işlemi tanımlanır.
if(met->MET<=25.0) continue;

//Olayın içinde en az üç jet olması koşulu koyulur ve öncü jetlere işaretçi atanır.
if(branchJet->GetEntries() > 2){
Jet *jet1 = (Jet*) branchJet->At(0);
Jet *jet2 = (Jet*) branchJet->At(1);
Jet *jet3 = (Jet*) branchJet->At(2);

//iki jetin b etiketli olması durumunda kesme işlemleri uygulanır ve koşulların sağlandığı olaylarda bu iki jetin değişmez kütlesiyle histogram doldurulur.

if(jet1->BTag==1 && jet2->BTag==1){
if(jet1->PT>=ptcut && jet2->PT>=ptcut && abs(jet1->Eta)<etacut &&
abs(jet2->Eta)<etacut && jet3->PT>=ptcut && abs(jet3->Eta)<etacut) {
if(abs(((jet1->P4()) + (jet2->P4())).M()-125.0) >interval) continue;
histMass1->Fill(((jet1->P4()) + (jet2->P4())).M()); } }

else if(jet1->BTag==1 && jet3->BTag==1){
if(jet1->PT>=ptcut && jet3->PT>=ptcut && abs(jet1->Eta)<etacut &&
abs(jet3->Eta)<etacut && jet2->PT>=ptcut && abs(jet2->Eta)<etacut){
if(abs(((jet1->P4()) + (jet3->P4())).M()-125.0) >interval) continue;
histMass1->Fill(((jet1->P4()) + (jet3->P4())).M()); } }

```

```

else if(jet2->BTag==1 && jet3->BTag==1){
if(jet2->PT>=ptcut && jet3->PT>=ptcut && abs(jet2->Eta)<etacut &&
abs(jet3->Eta)<etacut && jet1->PT>=ptcut && abs(jet1->Eta)<etacut){
if(abs(((jet2->P4()) + (jet3->P4())).M()-125.0) >interval) continue;
histMass1->Fill(((jet2->P4())+ (jet3->P4())).M()); } } } }

//Tuval oluşturulur ve histogram bu tuvale çizilir.
TCanvas *c1=new TCanvas("c1");
c1->cd();
histMass1->Draw("HIST");
c1->Print("higgs_inv.eps");

```



## ÖZGEÇMİŞ

| Kişisel Bilgiler |                                                                          |
|------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| Adı Soyadı       | Burak HACIŞAHİNOĞLU                                                      |
| Doğum Yeri       | Rize                                                                     |
| Doğum Tarihi     | 06.03.1991                                                               |
| E-posta Adresi   | burak3519@gmail.com                                                      |
| Uyruğu           | <input checked="" type="checkbox"/> T.C. <input type="checkbox"/> Diğer: |

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

| Yüksek Lisans    |                                |
|------------------|--------------------------------|
| Üniversite       | İstanbul Üniversitesi          |
| Enstitü Adı      | Fen Bilimleri Enstitüsü        |
| Anabilim Dalı    | Fizik                          |
| Programı         | Yüksek Enerji ve Plazma Fiziği |
| Mezuniyet Tarihi | 2017                           |

| Makale ve Bildiriler                                                                                                                                                                                                                                                  |  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| Kartal, S., Hacışahinoğlu, B., Türk Çakır, İ., Yılmaz, A., Bölükbaşı, O., Çakır, O., A Study On FCNC Couplings of Higgs-Up Sector Quarks at ep-Colliders, Poster Sunumu, <i>Türk Fizik Derneği 32. Uluslararası Fizik Kongresi</i> , 6–9 Eylül 2016, Bodrum/ Türkiye. |  |
| Hacisahinoglu, B., Turk Cakir, I., Cakir, O., Kartal, S., Yilmaz, A., Probing FCNC Couplings of Higgs-Top at FCC-ep and LHeC, <i>1st FCC Physics Workshop</i> , Poster Presentation, 16-20 January 2017, CERN/ Switzerland.                                           |  |