TÜBİTAK

Higgs Bozonunun Standart Model Ayar Bozonları ve Üst Kuark ile olan Anomal Bağlaşımlarının Araştırılması

Program Kodu: 3501

Proje No: 116F149

Proje Yürütücüsü:
Dr. Öğr. Üyesi Volkan ÇETİNKAYA

Araştırmacılar:
Doç. Dr. Volkan ARI
Doç. Dr. Ahmet Alper BİLLUR

Bursiyerler:
Cansu SAMANCI
Ali Can CANBAY

NİSAN 2019
KÜTAHYA

Önsöz

Bu projede, Higgs bozonunun Standart Model (SM) ayar bozonları ve üst kuark ile olan anomal bağlaşımları modelden bağımsız olarak efektif lagranjiyen yöntemi kullanılarak araştırılmış, bu kapsamda belirlenen bağlaşım değerlerine %95 güvenirlik seviyesinde (C.L.) sınırlamalar getirilmiştir. Anomal bağlaşım parametrelerine getirilen limitler, literatürdeki sınırlamaları geliştirmiştir. Projede ilk olarak foton indüklü reaksiyonlarda gözlenebilecek anomal Higgs bağlaşımların katkısı olan süreçler somut olarak tespit edilmiş, ikinci olarak bu süreçlerden bazıları seçilerek anomal bağlaşım parametrelerinin belli değerlerine karşılık tesir kesitleri hesaplanmıştır. Projenin son aşamasında ise istatistik analiz neticesinde %95 güvenilirlik seviyesinde anomal bağlaşım parametrelerine kuvvetli sınırlamalar getirilmiştir. Çalışmanın son döneminde somut reaksiyonlardan birine bazı detektör etkilerinin de dâhil edildiği analizler de yapılmıştır. Projenin öneri aşamasında ele alınmayan bu analiz yöntemi, yürütücü ve araştırmacılar tarafından son dönemde öğrenilmeye ve uygulanmaya başlanmıştır. 24 ayda tamamlanan bu projeden iki adet yayın ön basım olarak hazırlanmış, bir çalışma da uluslararası konferansta sözlü bildiri olarak sunulmuştur. Projedeki bir bursiyerin (Cansu Samancı) yüksek lisans tezinin bu dönem sonunda tamamlanması hedeflenmektedir. Projedeki araştırmalar yayınla sonuçlanarak literatüre önemli bir katkıda bulunacaktır.

116F149 No'lu TÜBİTAK projemizin tüm aşamalarında desteğini gördüğümüz Matematik, Fizik Araştırma Destek Grubu'na ve TÜBİTAK 3501 programına en içten teşekkürlerimizi sunarız.

İçindekiler

Önsöz i

İçindekiler ii

Tablolar Listesi iii

Şekiller Listesi iv

Özet v

Abstract vi

1. GİRİŞ 1

2. TEORİKSEL ÇERÇEVE 5

3. TESİR KESİTLERİ VE ANALİZLER 10

3.1 $\gamma e^- \to hZe^-$ Sürecinin İncelenmesi 10

3.2 $\gamma\gamma \to ht\bar{t}$ Sürecinin İncelenmesi 19

4. TARTIŞMA VE SONUÇ 25

Kaynaklar 27

Tablolar Listesi

Tablo 1. $\gamma e^- \rightarrow hZe^-$ süreci için kütle bazı ve ayar bazı arasındaki ilişki……...8

Tablo 2. $\gamma\gamma \rightarrow ht\bar{t}$ süreci için kütle bazı ve ayar bazı arasındaki ilişki……...9

Tablo 3. $\gamma e^- \rightarrow hZe^-$ ($h \rightarrow b\bar{b}$ ve $Z \rightarrow l^-l^+$ ($l^\pm = e^\pm, \mu^\pm$)) sürecinde 1 TeV kütle merkezi (km) enerjisi (WWA) ve farklı toplanmış (yıllık) ışınlık değerleri için $\bar{c}_\gamma, \bar{c}_{HB}, \bar{c}_{HW}, \bar{c}_B$ ve $\bar{c}_H$ anormal bağlaşım parametrelerinin (katsayılarının) %95 C.L. ile duyarlılık limitleri. Burada her bir tekli tarama için diğer parametrelerin etkileri yok sayılmıştır……...11

Tablo 4. Tablo 3 ile aynı, fakat Lazer dağılımı için……...12

Tablo 5. Tablo 3 ile aynı, fakat 1,5 TeV km enerjisi için……12

Tablo 6. Tablo 4 ile aynı, fakat 1,5 TeV km enerjisi için……12

Tablo 7. Tablo 3 ile aynı, fakat 3 TeV km enerjisi için……12

Tablo 8. Tablo 4 ile aynı, fakat 3 TeV km enerjisi için……13

Tablo 9. $\gamma\gamma \rightarrow ht\bar{t}$ ($h \rightarrow b\bar{b}$,t→Wb, (W→leptonik)) sürecinde 1 TeV kütle merkezi (km) enerjisi (WWA) ve farklı toplanmış (yıllık) ışınlık değerleri için $\bar{c}_\gamma$ ve $\bar{c}_{uB}$ anomal bağlaşım parametrelerinin (katsayılarının) %95 C.L. ile duyarlılık limitleri. Burada her bir tekli tarama için diğer parametrelerin etkileri yok sayılmıştır……...19

Tablo 10. Tablo 9 ile aynı, fakat Lazer dağılımı için.....20

Tablo 11. Tablo 9 ile aynı, fakat 1,5 TeV km enerjisi için.....20

Tablo 12. Tablo 10 ile aynı, fakat 1,5 TeV km enerjisi için.....20

Tablo 13. Tablo 9 ile aynı, fakat 3 TeV km enerjisi için.....20

Tablo 14. Tablo 10 ile aynı, fakat 3 TeV km enerjisi için. 20

Şekiller Listesi

Şekil 1. WWA dağılımı için anomal bağlaşımlara (couplings) karşı tesir kesiti grafiği. Kütle merkezi enerjisi 1 TeV (sol üst), 1,5 TeV (sağ üst) ve 3 TeV (alt) şeklindedir. Burada her bir tekli parametre taranırken diğer tüm parametrelerin katkısı yok sayılmıştır.....13

Şekil 2. Şekil 1 ile aynı, fakat Lazer dağılımı için.....14

Şekil 3. WWA dağılımına göre 1 TeV (sol üst), 1,5 TeV (sağ üst) ve 3 TeV (alt) CLIC ve ILC kütle merkezi enerjilerinde kontur grafikleri. Burada grafik içinde etiketlenen her ikili katsayı dışında kalan diğer katsayıların katkısı yok sayılmıştır. Grafik içindeki etiketlerde ilk yazılan katsayılar yatay, ikinci yazılan katsayılar düşey ekseni göstermektedir.....15

Şekil 4. Şekil 3 ile aynı, fakat farklı ikili parametreler için.....16

Şekil 5. Lazer dağılımına göre 1 TeV (sol üst), 1,5 TeV (sağ üst) ve 3 TeV (alt) kütle merkezi enerjilerinde kontur grafikleri. Burada grafik içinde etiketlenen her ikili katsayı dışında kalan diğer katsayıların katkısı yok sayılmıştır. Grafik içindeki etiketlerde ilk yazılan katsayılar yatay, ikinci yazılan katsayılar düşey ekseni göstermektedir.....17

Şekil 6. Şekil 5 ile aynı, fakat farklı ikili parametreler için.....18

Şekil 7. WWA ve lazer dağılımı için $\bar{c}_{\gamma}$ (sol) ve $\bar{c}_{uB}$ (sağ) katsayılarına karşı tesir kesiti grafiği. Kütle merkezi (km) enerjisi 1TeV'dir. Burada her bir tekli parametre taranırken diğer tüm parametrelerin katkısı yok sayılmıştır.....21

Şekil 8. Şekil 7 ile aynı, fakat km enerjisi 1,5 TeV için.....22

Şekil 9. Şekil 7 ile aynı, fakat km enerjisi 3 TeV için.....22

Şekil 10. WWA ve lazer dağılımına göre 1 TeV CLIC ve ILC kütle merkezi (km) enerjisinde kontur grafiği. $\bar{c}_{\gamma}$ ve $\bar{c}_{uB}$ dışında kalan diğer katsayıların katkısı yok sayılmıştır.....23

Şekil 11. Şekil 10 ile aynı, fakat km enerjisi 1,5 TeV için.....23

Şekil 12. Şekil 10 ile aynı, fakat km enerjisi 3 TeV için.....24

Özet

ATLAS ve CMS deneylerinin 2012 yılında Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'nda (LHC) yeni bir skaler parçacığın keşfini duyurduğundan beri bu parçacığın Standart Model'nin öngördüğü Higgs bozonu olup olmadığına dair çalışmalar devam etmektedir. Bu konunun incelenmesinde en önemli ipuçlarından biri Higgs bozonunun diğer Standart Model parçacıklarıyla etkileşiminin modelin öngörüleri ile ne kadar uyumlu olduğunun araştırılmasıdır. Bu projede model bağımsız efektif teoriler kullanılarak bu etkileşimlerin incelenmesi hedeflenmiştir. Bu kapsamda proje önerisinde sunulan foton indüklü reaksiyonlardan $\gamma e^- \rightarrow hZe^-$ ve $\gamma\gamma \rightarrow ht\bar{t}$ süreçleri, e^-e^+ çarpışmasındaki alt süreçler olarak ele alınmıştır. Burada sürece giren fotonlar için Weizsacker-Williams yaklaşımı ve Compton geri saçılmasından gelen fotonlar düşünülmüştür. Bu süreçlerin tesir kesitleri MadGraph5-aMC@NLO kullanılarak 6-boyutlu operatörlerin hZe^- ve $ht\bar{t}$ üretimi üzerindeki etkileri Monte Carlo (MC) benzetimleri ile hesaplanmıştır.

Anahtar kelimeler: Higgs Bozonu, Anomal Bağlaşımlar, Ayar Bozonları, üst kuark, Wilson katsayıları.

Abstract

Since ATLAS and CMS experiments announced the discovery of a new scalar particle in the Large Hadron Collider (LHC) in 2012, studies are underway to determine if this particle is a Higgs boson predicted by the Standard Model. One of the most important clues in this study is to investigate how the Higgs boson interacts with other Standard Model particles to match the predictions of the model. In this project, it is aimed to examine these interactions using model independent effective theories. In this context, $\gamma e^- \rightarrow hZe^-$ ve $\gamma\gamma \rightarrow \mathbf{ht\bar{t}}$ processes from photon induced reactions presented in the project proposal are considered as subprocesses in electron positron collision. For the initial photons in the process, the Weizsacker-Williams approach and the photons from Compton back scattering mechanism have been considered. The effects of these processes on the hZe^- and $\mathbf{ht\bar{t}}$ production of 6-dimensional operators using MadGraph5-aMC @ NLO were calculated by using Monte Carlo (MC) simulations.

Keywords: Higgs Boson, Anomalous Couplings, Gauge Bosons, top quark, Wilson coefficients.

1. GİRİŞ

Standart Model (SM), temel parçacıklar ve onların etkileşmelerini elektrozayıf ölçeğe kadar başarılı bir şekilde açıklamaktadır. Bunların en güncel olanı hiç kuşkusuz Higgs bozonunun keşfidir (Aad, G., vd., 2012; Chatrchyan, S., vd., 2012). Ancak, bu kuramın açıklayamadığı bir takım problemler de çözüm beklemeye devam etmektedir. Örneğin, SM'de yalnızca deneysel ölçümlerle belirlenebilen on sekiz kadar parametre halen kuramca öngörülememektedir. Bu kapsamda, temel fermiyonların Higgs bozonuyla etkileşmeleri sonucunda sahip oldukları kütleler arasındaki büyük farklar dikkat çekicidir. Ayrıca, her ne kadar Evrenin, başlangıç olarak kabul edilen Büyük Patlamadan çok kısa bir süre (bir saniyenin on trilyonda biri) sonrasındaki TeV düzeyinde enerjilere karşılık gelen aşaması Standart Modelce iyi tanımlansa da bundan da önceki anlarına yaklaşmak; yani, modeli yüksek enerjilere uyarlamak güçtür (Denegri vd., 2018). Burada ele alınmayanlar da dâhil, bu problemler SM ötesi çeşitli modellerle çözüme kavuşmayı beklemektedir.

Uzun zamandır deneysel olarak gözlemlenmeyi bekleyen SM'nin en önemli parçasının, Higgs bozonun, keşfi hiç kuşkusuz bu yapbozun en önemli eksikliklerinden birini giderecekti. Bunun için gerekli deneysel donanımların, çarpışma enerjisinin ve ışınlığın sağlanması gerekliydi. ATLAS ve CMS deneyleri 2012 yılında Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'nda (LHC) yeni bir skaler parçacığın keşfini duyurduğundan (Aad, G., vd., 2012; Chatrchyan, S., vd., 2012) beri bu parçacığın SM'nin öngördüğü Higgs bozonu olup olmadığına dair çalışmalar devam etmektedir. İlk olarak parçacığın kütlesinin yaklaşık 125 GeV olması, SM'nin öngördüğü Higgs bozonu olduğuna dair büyük bir işaretti. Bunun yanında, SM'nin Higgs bozonu olduğunu doğrulamak için bu parçacığın spin ve parite ölçümleri de gerekliydi. Bu bağlamda yapılan çalışmalar spin (0) ve parite (+) ölçümlerinin de SM tahminleriyle uyumlu olduğunu doğruladı (Aad vd., 2013a; ATLAS Collab. 2013a, 2013b, 2013c; Chatrchyan vd., 2013a, 2013ç, 2014c; CMS Collab. 2013a). Her ne kadar keşfedilen bozonun temel özellikleri SM'nin öngörüsü ile uyumlu olsa da, bu keşif ile halen elektrozayıf simetri kırılması (Glashow 1961; Salam 1968; Weinberg 1967; Gell-Mann ve Levy, 1960; Nambu ve Jona-Lasinio, 1961; Englert ve Brout, 1964;Guralnik vd., 1964; Higgs, 1964a, 1964b, 1966; Kibble, 1967) sorununun çözüldüğü söylenemez. Bunun açıklığa kavuşması için daha fazla verinin toplanmasına ve analizine ihtiyaç varmış gibi görünmektedir.

Higgs bozonunun temel özelliklerinin yanında fermiyon ve bozonlarla olan bağlaşımlarının da hassas bir şekilde ölçülmesi gereklidir. Böylelikle deneysel gözlemlerin SM'nin tahminleri ile

uyumlu olup olmadığı kontrol edilebilir. Bunun için de deneyde gözlenen üretim hızının SM'nin öngördüğü hıza oranı 1 olmalıdır. Bu hızlar Higgs bozonunun fermiyon ve ayar bozonları ile olan etkileşmelerine gerek üretim, gerekse de bozunum seviyesinde bağlıdırlar. Öyle ki, günümüze kadar ulaşan deney sonuçları, istatistiksel ve sistematik belirsizlikler dâhilinde, SM öngörüleri ile tutarlıdır (Aad vd., 2013b, 2013c, 2014a, 2014c, 2014ç, 2014d; ATLAS Collab. 2014a, 2019a Chatrchyan vd., 2013b, 2013c, 2013d, 2014a, 2014b, 2014ç, 2014d; CMS Collab. 2013b, 2019b; Khachatryan vd., 2014). Higgs bozonunun belirli bozunma modlarını veren bu sonuçları genişletmek için diğer fermiyonların da olduğu bozunma modları da ölçülmelidir. Belki de bunun için çarpıştırıcının özelliklerinin güncellenmesi gerekecek. Bu da SM öngörüleri ile deney sonuçlarının uyumsuzluğunu ortaya koyacak yeni fizik ipuçlarını verebilir. Günümüzde LHC'deki ATLAS ve CMS deney grupları yeni fiziğin pek çok araştırmasını sürdürmektedir. Bu araştırmalar süpersimetri, ek boyutlar gibi bazı SM ötesi modellerin öngörülerini doğrulamaya odaklanmışlardır. Ancak, varsa, yeni bir fizik sinyalinin ne şekilde karşımıza çıkacağı bilinmemektedir. Üstelik bunların SM ötesi modellerde öngörülenden farklı şekillerde ortaya çıkma olasılığı vardır ve küçümsenmemelidir. LHC'de çarpışma enerjisi ve ışınlığın yükseltilmesiyle birlikte belki de bu modellerden bazıları güncelliğini yitirecektir. Bu da yeni fizik araştırmalarının bir modele bağlı kalmadan yapılmasını mantıklı kılar.

Şimdiye kadar, Parçacık fiziğinin Standart Modeli, doğayı elektrozayıf ölçekte betimlemeyi başarmıştır. Ne var ki, TeV ölçeğinin ötesinde SM'nin parçacık fiziğinin nihai teorisi olmadığına inanılır. Güncel deneysel sonuçlarda yeni fizik izine rastlanmadığı dikkate alınırsa, bu yeni fizik etkileri daha yüksek boyutlu efektif (etkin) operatörlerin sonsuz bir seri açılımından oluşan SM'nin efektif alan teorisi genişletmesinde ortaya çıkabilir. Bu yaklaşım, olası yeni fizik etkilerini parametrize eden bir araçtır (Buchmuller ve Wyler, 1986; Einhorn ve Wudka, 2013; Grzadkowski vd., 2010; Hagiwara vd., 1993; Leung vd., 1986; Willenbrock ve Zhang, 2014). Buradaki operatörler $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$ ayar simetrileri ve Lorentz değişmezliğine uyan SM alanlarının tüm olası kombinasyonlarından oluşur. Efektif lagranjiyen, SM lagranjiyenine dört-boyutlu operatörlerden daha yüksek yeni operatörler ekleyerek elde edilebilir. Baryon ve lepton sayısının korunumunu varsayan 6-boyutlu operatörler SM eylemine eklenen ilk düzeltmelerdir. Efektif lagranjiyen şu şekilde yazılabilir:

$$\mathcal{L}_{\text{eff}} = \mathcal{L}_{\text{SM}} + \sum_i \frac{c_i \mathcal{O}_i}{\Lambda^2} \tag{1.1}$$

Burada Λ, yeni fizik etkilerinin ortaya çıkmasının beklendiği enerji ölçeği; $\mathcal{O}_i$, uygun bazdaki 6-boyutlu bağımsız operatörler ve $\mathbf{c_i}$'ler boyutsuz Wilson katsayılarıdır. SM efektif alan teorisi bağlamında bu operatörlerin araştırılması ve bu operatörlere, dolayısıyla bu katsayılara sınırlama getirme çalışmaları kendisine literatürde fazlasıyla yer bulmuştur (Amar vd., 2015; Arbey vd., 2016; Banerjee vd., 2015; Bar-Shalom ve Soni, 2018; Barklow vd., 2018; Berthier ve Trott, 2016; Buckley vd., 2015; Buckley vd., 2016; Corbett vd., 2015; Craig vd., 2016; Dedes vd., 2017; Dedes vd., 2018; Denizli ve Senol, 2018; Ellis vd., 2014; Ellis vd., 2015; Ellis vd., 2017; Englert vd., 2016; Fichet vd., 2017; Gu vd., 2017; Hartmann vd., 2017; He vd., 2019; Hesari vd., 2018; Jana ve Nandi, 2018; Khanpour ve Najafabadi, 2017a; Khanpour vd., 2017b; Kim vd., 2017; Kuday vd., 2018; Li vd., 2019; Murphy, 2018; Rindani ve Singh, 2019; Shi vd., 2019). Bu çalışmalara ek olarak ATLAS ve CMS kollabrasyonlarının HVV (V, ayar bozonları) üzerine şimdiye kadar ki deneysel sınırlama çalışmaları literatürde mevcuttur (Aad vd. 2013a; ATLAS Collab. 2015; ATLAS Collab. 2016; ATLAS Collab. 2017; ATLAS Collab. 2018a; ATLAS Collab. 2018b; ATLAS Collab. 2019b; Chatrchyan vd. 2013a; Chatrchyan vd. 2014c; CMS Collab. 2015a;. CMS Collab. 2015b; CMS Collab. 2016; CMS Collab. 2017; CMS Collab. 2018; CMS Collab. 2019a; CMS Collab. 2019b).

LHC gibi bir proton-proton derin inelastik saçılması sürecinde, gelen protonlar çarpışma sonrasında partonlarına ayrışırlar. Böylece, parton kalıntıları çarpışmanın ardalanını büyük ölçüde oluşturduğu için, alışılmış derin inelastik süreçler temiz bir çevresel ortam sağlayamazlar. Diğer taraftan, hemen hemen gerçek fotonla ($Q^2 \approx 0$) oluşturulan $\gamma^*\gamma^*$ ve γ^*p süreçlerindeki protonlar, fotonları yaydıktan sonra bozulmamış olarak kalırlar. Yayınlanan hemen hemen gerçek fotonlar düşük bir sanallığa (virtuality) sahip oldukları için proton yapısını bozmazlar. $\gamma^*\gamma^*$ süreci, proton kalıntıları olmaması sebebiyle incelenebilecek süreçler arasında en temiz süreçlerdendir. γ^*p sürecinde ise gelen protonlardan biri partonlarına ayrışırken diğer foton yayan proton bozulmamış olarak kalır. Sonuç olarak $\gamma^*\gamma^*$ ve γ^*p süreçleri pp süreçlerine göre daha az belirsizliğe sahiptir. Bu nedenle yeni fizik sinyallerini araştırmak için bize önemli bir fırsat sağlar. Bozulmamış protonlar etkileşme noktasından çeşitli uzaklıklara yerleştirilen ekstra detektörlerle belirlenirler (Royon vd., 2007; Albrow vd., 2009). Bununla birlikte, lepton çarpıştırıcıları genel olarak LHC'den daha temiz bir ardalana sahiptir ve yeni parçacıkların ve etkileşmelerin araştırılmasında çok önemli bir role sahiptir. Şu anda CLIC (Accomando vd., 2004; Abramowicz vd., 2013; Dannheim vd., 2012) ve ILC (Abe vd., 2001; Baer vd., 2013; Brau vd., 2007; Djouadi vd., 2007) gibi yüksek kütle merkezi enerjileri ve ışınlıklarına sahip bazı lepton çarpıştırıcı projeleri, yüksek hassasiyetli SM parametrelerinin ölçümünün yanı sıra Higgs bozonu bağlaşımlarını tam bir kesinlikte araştırmak için iyi bir olanak sunar. Gerek LHC,

gerekse de CLIC ve ILC'de çarpıştırıcının normal moduna ek olarak foton indüklü reaksiyonlar kendiliğinden oluşacaktır ve bugün gerekli ekipmanların kullanılmasıyla bu çarpışmalar çarpıştırıcının ana modundan ayırt edilebilme potansiyeline sahiptir. Higgs bozonunun üretim süreçleri hem foton-Higgs bağlaşımı hem de Higgs bozonunun diğer bağlaşımları açısından son derece ilginç özellikler doğurabilir. Foton indüklü reaksiyonlar bu proje süresince ele alınmıştır. Literatürde lepton-foton ya da foton-foton gibi çarpıştırıcılarla çalışılan süreçler olsa da anomal Higgs bağlaşımlarının incelenmesi yok denecek kadar azdır (Choudhury ve Mamta, 2006; Han vd., 2006).

Bu çalışmada proje önerisinde sunulan foton indüklü reaksiyonlardan $\gamma e^- \rightarrow hZe^-$ ve $\gamma\gamma \rightarrow ht\bar{t}$ süreçleri, e^-e^+ çarpışmasındaki alt süreçler olarak ele alınmıştır. Çarpıştırıcıların kütle merkezi enerjisi her iki süreç için de 1 TeV, 1,5TeV ve 3 TeV olarak alınmış ancak kullanılan foton dağılımına göre enerji aktarımları farklı olmuştur. Weizsaecker-Williams Yaklaşımında (WWA) gelen pozitron, enerjisinin yaklaşık %10'unu fotona aktarırken, lazer foton (Compton geri saçılan foton) yaklaşımında bu oran yaklaşık %83 olur. Tüm hesaplamalarda bu iki dağılımlar göz önünde bulundurulmuş ve sonuçlar ilk defa karşılaştırılmıştır. Ayrıca χ^2 analizi ile anomal bağlaşımlara %95 güvenirlik seviyesinde (C.L.) sınırlamalar getirilmiştir. Bu çalışmada bölümler, sırasıyla, şu şekilde ele alınacaktır: 2. bölüm efektif alan teorisi ve kullanılan yönteme ayrılmıştır. Yukarıdaki hesaplamaların bulguları 3. bölümde verilmiş, son bölümde de sonuçlar tartışılmıştır.

2. TEORİKSEL ÇERÇEVE

Higgs bozonunun, çevresindeki hiçbir şey ile etkileşmemesi durumundaki kütlesi çıplak kütlesi olarak bilinir. Deneysel kütlesi ise çıplak kütlesi üzerinde, sanal ilmekli (loop) diyagramların katkı sağladığı, kuantumsal (ışınımsal) düzeltmeler yapılan kütlesidir. Renormalizasyon denilen yöntemle Higgs'in kütlesinin sonlu kalması sağlanır. Çünkü bu yöntem Higgs'in çıplak kütlesinin değerini ıraksayan düzeltmeleri karşılayacak şekilde yeniden tanımlar. Ancak TeV ötesindeki Λ enerji ölçeğinde yeni etkileşmelerin olması beklenmektedir. Buradaki kuantumsal düzeltmeler ise (yani çıplak Higgs kütlesinin karesine eklenecek olan kütle kare terimi) Λ^2 ile orantılıdır. Böylelikle enerji ölçeğinin çok büyümesiyle bu düzeltme terimi çıplak kütlenin karesine eklenerek çok büyük bir Higgs kütlesi verecektir. Süpersimetri, ek boyutlar gibi modeller bu probleme çözüm getirmeye çalışmaktadır. Bütün bu ıraksamalar ve çözüm olarak sunulan renormalizasyon zorunluluğu Standart Modelin temel parçacıklar arasındaki etkileşmeleri açıklayan nihai teori olmadığının bir işaretidir. Bu anlamda Standart Model, daha temel ve ıraksama problemi olmayan bir teorinin; yani, efektif bir teorinin düşük enerji limitindeki teorisi olarak ele alınabilir. Böyle bir durum kabul edildiğinde de yeni fizik çalışmaları efektif lagranjiyen metodu ile incelenebilir.

Standart Model (SM) kuramının temel noktası, sistemi betimleyen lagranjiyeni (lagrange yoğunluğunu) yazabilmektir. Bunlar ayar teorileri yardımıyla belirlenir ve serbest parçacıkların enerjilerini ve bunların diğer parçacıklarla olan etkileşmelerini içerir. SM Lagranjiyenine yeni terimler eklenerek efektif lagranjiyen elde edilir. Bu yeni terimler SM'de olmayan parçacıkların SM parçacıklarıyla olan etkileşmelerini içerebilir. Bunun dışında, yalnızca SM parçacıkları ele alınarak SM'de olmayan etkileşmeler de yeni terimler olarak yazılabilir. Bu tür etkileşmeler anomal (anomalous) etkileşmeler olarak bilinir. SM lagranjiyenine eklenecek terimler SM'nin yanında oldukça küçük katkılar verirler. Bu tür etkileşmelerin şimdiye kadar gözlenememesinin en büyük sebebi budur. Ancak çarpışma enerjilerinin ve ışınlığın artmasıyla böyle etkileşmelerin gelecekte gözlenmesi öngörülmektedir. Bununla birlikte, eklenecek olan yeni terimler lagranjiyenin boyutunu değiştirmemeli ve SM'nin simetri özelliği, lepton ve baryon sayısı korunumu gibi bazı özellikleriyle tutarlı olmalıdır. Ancak bu lagranjiyenler daha yüksek boyutlu (renormalize-edilmemiş) işlemciler içermektedirler. Bu ekstra terimlerin renormalize edilememe özellikleri nedeniyle bunlar yalnızca sınırlandırılmış bir enerji ölçeği bölgesinde kullanılabilirler. Yani efektif lagranjiyenin geçerli olduğu enerji ölçeği, yeni fiziğin başladığı ölçeğin altında kalmalıdır. Böylelikle yeni fiziğin enerji ölçeğinin ters kuvvetleri, Lagranjiyenin boyutunu düşürmek için, yeni terimlerle çarpılmalıdır.

Bu çalışmada 6-boyutlu efektif alan teorisi operatörleri için takip edilecek formalizm (Englert vd., 2016; Alloul vd., 2014a; Artoisenet vd., 2013) referansında verilmiştir. Efektif lagranjiyenin çalışmayla ilgili kısmı aşağıdaki gibidir.

$$\mathcal{L}_{\text{eff}} = \mathcal{L}_{\text{SM}} + \mathcal{L}_{\text{SILH}} + \mathcal{L}_{\text{F}_1} + \mathcal{L}_{\text{F}_2} \tag{2.1}$$

Burada ilkşnci terim, L_{SILH}, Higgs ikilisini içeren bir dizi CP koruyan 6- boyutu operatörlerden oluşur ve Higgs alanının güçlü bir etkileşen sektörün bir parçası olduğu modellerden esinlenir. Üçüncü terim, Higgs alanlarıyla lepton ya da kuarkların bir çifti arasındaki etkileşmeleri içerir. Son terim ise, tekli bir Higgs alanı ve bir ayar bozonuyla bir kuark ya da lepton çiftinin etkileşmelerini ifade eder. Efektif lagranjiyenin bu terimleri şöyle yazılır:

$$\begin{aligned}
\mathcal{L}_{\text{SILH}} = {} & \frac{\bar{c}_H}{2v^2}\partial^\mu\left[\Phi^\dagger\Phi\right]\partial_\mu\left[\Phi^\dagger\Phi\right] + \frac{\bar{c}_T}{2v^2}\left[\Phi^\dagger\overleftrightarrow{D}^\mu\Phi\right]\left[\Phi^\dagger\overleftrightarrow{D}_\mu\Phi\right] - \frac{\bar{c}_6\lambda}{v^2}\left[\Phi^\dagger\Phi\right]^3 \\
& - \left[\frac{\bar{c}_u}{v^2}y_u\Phi^\dagger\Phi\ \Phi^\dagger\cdot\bar{Q}_L u_R + \frac{\bar{c}_d}{v^2}y_d\Phi^\dagger\Phi\ \Phi\bar{Q}_L d_R + \frac{\bar{c}_l}{v^2}y_\ell\ \Phi^\dagger\Phi\ \Phi\bar{L}_L e_R + \text{h.c.}\right] \\
& + \frac{ig\ \bar{c}_W}{m_W^2}\left[\Phi^\dagger T_{2k}\overleftrightarrow{D}^\mu\Phi\right]D^\nu W^k_{\mu\nu} + \frac{ig'\ \bar{c}_B}{2m_W^2}\left[\Phi^\dagger\overleftrightarrow{D}^\mu\Phi\right]\partial^\nu B_{\mu\nu} \\
& + \frac{2ig\ \bar{c}_{HW}}{m_W^2}\left[D^\mu\Phi^\dagger T_{2k}D^\nu\Phi\right]W^k_{\mu\nu} + \frac{ig'\ \bar{c}_{HB}}{m_W^2}\left[D^\mu\Phi^\dagger D^\nu\Phi\right]B_{\mu\nu} \\
& + \frac{g'^2\ \bar{c}_\gamma}{m_W^2}\Phi^\dagger\Phi B_{\mu\nu}B^{\mu\nu} + \frac{g_s^2\ \bar{c}_g}{m_W^2}\Phi^\dagger\Phi G^a_{\mu\nu}G_a^{\mu\nu}\,,
\end{aligned} \tag{2.2}$$

Burada Φ, Higgs bozon alanını içeren bir zayıf ikili; $G^{\mu\nu}$, $B^{\mu\nu}$ ve $W^{\mu\nu}$ kuvvetli ve elektrozayıf alan şiddet tensörleridir. Bununla birlikte $\bar{c}_i$'ler boyutsuz Wilson katsayılarıdır. Ayrıca, λ Higgs bozonu dörtlü bağlaşımı ve υ, 246 GeV değerindeki vakum beklenen değeridir.

Efektif lagranjiyenin üçüncü ve dördüncü terimleri ise şöyle yazılır:

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_{F_1} = & \frac{i\bar{c}_{HQ}}{v^2}\left[\bar{Q}_L\gamma^\mu Q_L\right]\left[\Phi^\dagger \overleftrightarrow{D}_\mu \Phi\right] + \frac{4i\bar{c}'_{HQ}}{v^2}\left[\bar{Q}_L\gamma^\mu T_{2k} Q_L\right]\left[\Phi^\dagger T_2^k \overleftrightarrow{D}_\mu \Phi\right] \\ & + \frac{i\bar{c}_{Hu}}{v^2}\left[\bar{u}_R\gamma^\mu u_R\right]\left[\Phi^\dagger \overleftrightarrow{D}_\mu \Phi\right] + \frac{i\bar{c}_{Hd}}{v^2}\left[\bar{d}_R\gamma^\mu d_R\right]\left[\Phi^\dagger \overleftrightarrow{D}_\mu \Phi\right] \\ & - \left[\frac{i\bar{c}_{Hud}}{v^2}\left[\bar{u}_R\gamma^\mu d_R\right]\left[\Phi \cdot \overleftrightarrow{D}_\mu \Phi\right] + \text{h.c.}\right] \\ & + \frac{i\bar{c}_{HL}}{v^2}\left[\bar{L}_L\gamma^\mu L_L\right]\left[\Phi^\dagger \overleftrightarrow{D}_\mu \Phi\right] + \frac{4i\bar{c}'_{HL}}{v^2}\left[\bar{L}_L\gamma^\mu T_{2k} L_L\right]\left[\Phi^\dagger T_2^k \overleftrightarrow{D}_\mu \Phi\right] \\ & + \frac{i\bar{c}_{He}}{v^2}\left[\bar{e}_R\gamma^\mu e_R\right]\left[\Phi^\dagger \overleftrightarrow{D}_\mu \Phi\right]\end{aligned} \tag{2.3}$$

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_{F_2} = & \Bigg[- \frac{2g'\,\bar{c}_{uB}}{m_W^2} y_u\, \Phi^\dagger \cdot \bar{Q}_L \gamma^{\mu\nu} u_R\, B_{\mu\nu} - \frac{4g\,\bar{c}_{uW}}{m_W^2} y_u\, \Phi^\dagger \cdot \left(\bar{Q}_L T_{2k}\right)\gamma^{\mu\nu} u_R\, W^k_{\mu\nu} \\ & - \frac{4g_s\,\bar{c}_{uG}}{m_W^2} y_u\, \Phi^\dagger \cdot \bar{Q}_L \gamma^{\mu\nu} T_a u_R G^a_{\mu\nu} + \frac{2g'\,\bar{c}_{dB}}{m_W^2} y_d\, \Phi \bar{Q}_L \gamma^{\mu\nu} d_R\, B_{\mu\nu} \\ & + \frac{4g\,\bar{c}_{dW}}{m_W^2} y_d\, \Phi\left(\bar{Q}_L T_{2k}\right)\gamma^{\mu\nu} d_R\, W^k_{\mu\nu} + \frac{4g_s\,\bar{c}_{dG}}{m_W^2} y_d\, \Phi \bar{Q}_L \gamma^{\mu\nu} T_a d_R G^a_{\mu\nu} \\ & + \frac{2g'\,\bar{c}_{eB}}{m_W^2} y_\ell\, \Phi \bar{L}_L \gamma^{\mu\nu} e_R\, B_{\mu\nu} + \frac{4g\,\bar{c}_{eW}}{m_W^2} y_\ell\, \Phi\left(\bar{L}_L T_{2k}\right)\gamma^{\mu\nu} e_R\, W^k_{\mu\nu} + \text{h.c.}\Bigg]\end{aligned} \tag{2.4}$$

Proje süresince ele alınan iki somut süreçte de MadGraph5-aMC@NLO (Alwall vd. 2011, 2014, 2015) kullanılarak 6-boyutlu operatörlerinin HZγ ve $\mathrm{Ht\bar{t}}$ üretimi üzerindeki etkiler Monte Carlo (MC) benzetimleri ile hesaplanmıştır. (2.1) eşitliğinde sunulan lagranjiyen, FeynRules paketinde (Alloul vd., 2014b) ve daha sonra (Alloul vd., 2014a; Artoisenet vd., 2013)' te bulunan MadGraph5-aMC@NLO'da uygulanmıştır. Her iki süreçte de hangi Wilson katsayılarının ele alınacağı belirlenirken MadGraph paket programındaki tüm Feynman diyagramları elde edilmiştir. NP=1 (New Physics) durumunda Higgs bozonu ile olan etkileşme köşeleri dikkate alınmıştır. Bunun için kütle bazındaki etkileşme köşeleri ve bunların Wilson katsayılarını içeren ayar bazındaki karşılıkları dikkate alınmıştır (bkz. Tablo1 ve Tablo 2)

İlk çalışmada, $\gamma e^- \rightarrow hZe^-$ süreci aşağıdaki efektif lagranjiyen parametre setine karşı hassastır:

$$\bar{c}_\gamma, \bar{c}_{HB}, \bar{c}_{HW}, \bar{c}_W, \bar{c}_B, \bar{c}_H, \bar{c}_T, \bar{c}_{eW}, \bar{c}_{eB}, \bar{c}_l \tag{2.5}$$

Elektrozayıf hassas ölçümlerden ölçülen oblique parametreleri T ve S, SILH lagranjiyenindeki serbest parametre sayısını azaltır. T ve S parametreleri üzerine sınırlamalar $\bar{c}_T = 0$ ve $\bar{c}_B +$

$\bar{c}_W = 0$ olmasına yol açar (Barbieri vd. 2004; Contino vd., 2013; Ellis vd., 2015; Giudice vd., 2007). Bu da (2.5) ile verilen serbestlik derecesi sayısını 10'dan 8'e düşürür. Bununla birlikte, $\bar{c}_{eW}$ ve $\bar{c}_{eB}$ parametreleri (2.4) eşitliğinden gelir. Elektronun Yukawa bağlaşımı çok küçük olduğundan $\bar{c}_{eW}, \bar{c}_{eB}$ ve $\bar{c}_l$ tesir kesitinde incelemeye değer bir değişikliğe yol açmaz. Sonuç olarak bu çalışmada $\bar{c}_\gamma, \bar{c}_{HB}, \bar{c}_{HW}, \bar{c}_B$ ve $\bar{c}_H$ olmak üzere kalan 5 parametreye sınır getirme çalışması yapılmıştır.

Ayar bazında yazılan efektif lagranjiyen, elektrozayıf simetri kırılmasından sonra kütle bazında ifade edilebilir. Üniter ayarda ve kütle bazında anomal Higgs bağlaşımlarını içeren lagranjiyen, Alloul vd. (2014a)'dan şu şekilde yazılır (yukarıda bahsi geçen 5 parametre katkı sağlayacağı için yalnızca onlar dikkate alınmıştır):

$$L = -\frac{1}{4} g^{(1)}_{hzz} Z_{\mu\nu} Z^{\mu\nu} h - g^{(2)}_{hzz} Z_\nu \partial_\mu Z^{\mu\nu} h + \frac{1}{2} g^{(3)}_{hzz} Z_\mu Z^\mu h - \frac{1}{2} g^{(1)}_{haz} Z_{\mu\nu} F^{\mu\nu} h - g^{(2)}_{haz} Z_\nu \partial_\mu F^{\mu\nu} h \quad (2.6)$$

Burada Burada a, fotonu temsil etmektedir. Ayrıca $Z^{\mu\nu}$ ve $F^{\mu\nu}$ sırasıyla Z-bozon ve fotonun alan şiddet tensörleridirler. Kütle bazındaki bağlaşımlar ile ayar bazındaki katsayılar arasındaki ilişki Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. $\gamma e^- \rightarrow hZe^-$ süreci için kütle bazı ve ayar bazı arasındaki ilişki.

Kütle bazı	Ayar bazı
$g^{(1)}_{hzz}$	$\frac{2g}{c_W^2 m_W}\left[\bar{c}_{HB} s_W^2 - 4\bar{c}_\gamma s_W^4 + c_W^2 \bar{c}_{HW}\right]$
$g^{(2)}_{hzz}$	$\frac{g}{c_W^2 m_W}\left[(\bar{c}_{HW} + c_W) c_W^2 + (\bar{c}_B + \bar{c}_{HB}) s_W^2\right]$
$g^{(3)}_{hzz}$	$\frac{g m_W}{c_W^2}\left[1 - \frac{1}{2}\bar{c}_H - 2\bar{c}_T + 8\bar{c}_\gamma \frac{s_W^4}{c_W^2}\right]$
$g^{(1)}_{haz}$	$\frac{g s_W}{c_W m_W}\left[\bar{c}_{HW} - \bar{c}_{HB} + 8\bar{c}_\gamma s_W^2\right]$
$g^{(2)}_{haz}$	$\frac{g s_W}{c_W m_W}\left[\bar{c}_{HW} - \bar{c}_{HB} - \bar{c}_B + \bar{c}_W\right]$

Bu tablonun daha fazla anomal Higgs bağlaşımları içeren tam listesi Alloul vd. (2014a)'da bulunabilir.

Benzer şekilde, $\gamma\gamma \to h t\bar{t}$ sürecinde de etkileşme köşeleri tek tek ele alınmış ve bu sürecin hassas olduğu efektif lagranjiyen parametre seti şu şekilde bulunmuştur:

$$\bar{c}_\gamma, \bar{c}_u, \bar{c}_{HB}, \bar{c}_{HW}, \bar{c}_W, \bar{c}_B, \bar{c}_H, \bar{c}_{uW}, \bar{c}_{uB}, \bar{c}_6, \tilde{c}_\gamma, \tilde{c}_{HW}, \tilde{c}_{HB} \quad (2.7)$$

Burada $\tilde{c}_i$'ler CP-bozan terimlerdir. $\bar{c}_\gamma$ ve $\bar{c}_{uB}$ dışındaki tüm parametreler tesir kesitine ihmal edilebilecek ölçüde küçük katkılar vermişlerdir. Dolayısıyla çalışmanın bu kısmında yalnızca $\bar{c}_\gamma$ ve $\bar{c}_{uB}$ parametrelerine sınır getirilmiştir. Tablo 2, bu süreç için anomal bağlaşımlar ve Wilson katsayıları arasındaki ilişkiyi göstermektedir.

Tablo 2. $\gamma\gamma \to h t\bar{t}$ süreci için kütle bazı ve ayar bazı arasındaki ilişki.

Kütle bazı	Ayar bazı
$g_{h\gamma\gamma}$	$a_H - \frac{8 g s_W^2}{m_W} \bar{c}_\gamma$
$g^{(\partial)}_{h\gamma uu}$	$\frac{\sqrt{2} g s_W}{m_W^2} y_u [\bar{c}_{uB} + \bar{c}_{uW}]$

Burada Higgs bozonunun iki foton ile bağlaşımına katkı sağlayan SM ilmeği (loop), a_H ile gösterilmiştir.

Böylece bu süreç için üniter ayarda ve kütle bazında lagranjiyen şöyle yazılır:

$$L = -\frac{1}{4} g_{h\gamma\gamma} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} h + g^{(\partial)}_{h\gamma uu} [\bar{u} \gamma^{\mu\nu} P_R u] F_{\mu\nu} h \quad (2.8)$$

3. TESİR KESİTLERİ VE ANALİZLER

Bu kesimde yapılan hesaplamalar neticesinde elde elde edilen bulgular ve sonuçları tartışılacaktır. Çalışmalar ayrı iki başlık altında incelenecektir.

3.1 $\gamma e^- \rightarrow hZe^-$ Sürecinin İncelenmesi

Bu çalışmada $\gamma e^- \rightarrow hZe^-$ süreci ele alınmış, $h \rightarrow b\bar{b}$ ve $Z \rightarrow l^- l^+$ ($l^{\pm} = e^{\pm}, \mu^{\pm}$) bozunumları da dâhil edilerek anomal Higgs etkileşmeleri ve Standart Model ardalan için tesir kesiti değerleri, bir önceki bölümde tespit edilen katsayı parametrelerinin ($\bar{c}_\gamma, \bar{c}_{HB}, \bar{c}_{HW}, \bar{c}_B, \bar{c}_H$) her bir değerine karşı, CLIC ve ILC enerjileri; yani, 3 TeV ve 1,5 TeV ve 1 TeV kütle merkezi enerjilerinde hesaplanmıştır. Burada lazer dağılım fonksiyonu olarak, MadGraph programında bulunan WWA kullanılmıştır. Ancak proje kapsamında yapılan önemli işlerden bir tanesi de MadGraph programında mevcut olmayan lazer fotonu (Compton geri saçılan foton) için dağılım fonksiyonlarının programa dâhil edilmesidir (Çakır vd., 1999; Aydın vd., 1996). Bir lineer çarpıştırıcıda enerjik foton demetlerini üretmek için en umut verici mekanizma Compton geri saçılımıdır (Compton backscattering). Compton geri saçılan fotonların spektrumu (Ginzburg vd., 1984; Telnov, 1990) aşağıdaki gibi verilir.

$$f_\gamma(x) = \frac{1}{g(y)}\left[1 - x + \frac{1}{1-x} - \frac{4x}{y(1-x)} + \frac{4x^2}{y^2(1-x)^2}\right] \tag{3.1}$$

burada $g(y)$, x, y ve x_{maks} sırasıyla aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$g(y) = \left(1 - \frac{4}{y} - \frac{8}{y^2}\right)\log(y+1) + \frac{1}{2} + \frac{8}{y} - \frac{1}{2(y+1)^2} \tag{3.2}$$

$$x = \frac{E_\gamma}{E_e}, \quad y = \frac{4E_0 E_e}{M_e^2}, \quad x_{maks} = \frac{y}{1+y} \tag{3.3}$$

Burada E_0 ve E_e sırasıyla, gelen lazer fotonunun enerjisi ve Compton geri saçılmasından önce elektron demetinin başlangıç enerjisidir. E_γ ise geri saçılan fotonun enerjisidir. y=4,8 olduğunda x'in maksimum değeri yaklaşık olarak 0,83 olur.

Lazer foton dağılımının MadGraph programına dâhil edilmesi ile başlayan bu süreç, programın bu kısmının öğrenilmesi ve çalıştırılması da dâhil, oldukça uzun sürmüştür. Bu aşamada pek çok süreç ele alınmış ve bu süreçlerin test hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Böylelikle yukarıda verilen katsayı parametrelerinin WWA ile 3 TeV, 1,5 TeV ve 1 TeV'lik kütle merkezi

enerjilerindeki tekli taramaları (-0.5, -0.45, -0.4,…,0.45, 0.5 katsayı değerlerine karşı tesir kesiti değerleri) lazer fotonu yaklaşımıyla da tekrarlanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Tüm bu sonuçlar %95 güvenirlilik düzeyi için Mathematica programında fit fonksiyonu kullanılarak hesaplanmış ve bu katsayılar için duyarlılık limitleri farklı ışınlık değerlerine karşı elde edilmiştir (Tablo 3-8). Bu hesaplamaların her birinde tek bir parametre değerleri taranırken diğer tüm parametreler sıfır alınmıştır. Ayrıca bu duyarlılık limitleri (hem tek hem de iki parametre için) belirlenirken aşağıdaki gibi bir χ^2 analizi uygulanmıştır.

$$\chi^2 = \left(\frac{\sigma_{SM}-\sigma_{NP}}{\sigma_{SM}}\right)^2 \tag{3.4}$$

Burada σ_{SM} yalnızca SM tesir kesitini temsil ederken, σ_{NP} SM ve yeni fizik katkılarını içeren toplam tesir kesitini verir.

Tablo 3-8'deki sonuçlara bakıldığında getirilen sınırlamaların literatüre göre daha duyarlı olduğu görülmektedir. Daha önemlisi, yalnızca tablolardaki sonuçlardan Lazer dağılımının WWA'ya göre daha duyarlı limitler verdiğidir. Dikkat edilirse, beklendiği gibi, çarpıştırıcının kütle merkezi enerjisi ve ışınlığı arttırıldıkça duyarlılık limitleri iyileşmektedir.

Tablo 3. $\gamma e^- \to hZe^-$ ($h \to b\bar{b}$ ve $Z \to l^-l^+$ ($l^\pm = e^\pm, \mu^\pm$)) sürecinde 1 TeV kütle merkezi (km) enerjisi (WWA) ve farklı toplanmış (yıllık) ışınlık değerleri için $\bar{c}_\gamma, \bar{c}_{HB}, \bar{c}_{HW}, \bar{c}_B$ ve $\bar{c}_H$ anormal bağlaşım parametrelerinin (katsayılarının) %95 C.L. ile duyarlılık limitleri. Burada her bir tekli tarama için diğer parametrelerin etkileri yok sayılmıştır.

Couplings	10 fb^{-1}	50 fb^{-1}	100 fb^{-1}	500 fb^{-1}	1000 fb^{-1}
c_γ $(\times 10^{-1})$	[-1.53;1.49]	[-1.03;0.99]	[-0.87;0.83]	[-0.59;0.55]	[-0.50;0.46]
c_{HB} $(\times 10^{-1})$	[-2.88;2.67]	[-1.96;1.76]	[-1.67;1.46]	[-1.15;0.95]	[-0.99;0.78]
c_{HW} $(\times 10^{-1})$	[-2.16;1.69]	[-1.54;1.07]	[-1.34;0.87]	[-0.99;0.52]	[-0.88;0.41]
c_H	[-4.76;7.96]	[-2.82;6.01]	[-2.22;5.41]	[-1.22;4.41]	[-0.92;4.11]
c_B $(\times 10^{-1})$	[-2.14;2.14]	[-1.43;1.43]	[-1.20;1.20]	[-0.80;0.81]	[-0.68;0.68]

Tablo 4. Tablo 3 ile aynı, fakat Lazer dağılımı için.

Couplings	10 fb^{-1}	50 fb^{-1}	100 fb^{-1}	500 fb^{-1}	1000 fb^{-1}
c_γ $(\times 10^{-2})$	[-5.83;5.80]	[-3.90;3.87]	[-3.28;3.26]	[-2.20;2.17]	[-1.85;1.83]
c_{HB} $(\times 10^{-2})$	[-10.7;9.24]	[-7.38;5.96]	[-6.33;4.92]	[-4.51;3.09]	[-3.93;2.51]
c_{HW} $(\times 10^{-2})$	[-8.58;5.40]	[-6.41;3.23]	[-5.73;2.55]	[-4.60;1.42]	[-4.26;1.09]
c_H	[-2.32;6.15]	[-1.25;5.09]	[-0.94;4.78]	[-0.47;4.30]	[-0.34;4.18]
c_B $(\times 10^{-2})$	[-7.71;8.80]	[-4.98;6.08]	[-4.12;5.21]	[-2.60;3.69]	[-2.11;3.21]

Tablo 5. Tablo 3 ile aynı, fakat 1,5 TeV km enerjisi için.

Couplings	10 fb^{-1}	100 fb^{-1}	500 fb^{-1}	1000 fb^{-1}	1500 fb^{-1}
c_γ $(\times 10^{-1})$	[-1.13;1.09]	[-0.65;0.61]	[-0.44;0.40]	[-0.37;0.33]	[-0.34;0.30]
c_{HB} $(\times 10^{-1})$	[-1.78;1.66]	[-1.03;0.91]	[-0.71;0.59]	[-0.61;0.49]	[-0.56;0.43]
c_{HW} $(\times 10^{-1})$	[-1.32;1.05]	[-0.81;0.54]	[-0.60;0.33]	[-0.53;0.26]	[-0.50;0.23]
c_H	[-5.86;13.75]	[-2.46;10.35]	[-2.22;9.14]	[-0.92;8.81]	[-0.76;8.65]
c_B $(\times 10^{-1})$	[-1.41;1.52]	[-0.77;0.88]	[-0.50;0.61]	[-0.41;0.52]	[-0.37;0.48]

Tablo 6. Tablo 4 ile aynı, fakat 1,5 TeV km enerjisi için.

Couplings	10 fb^{-1}	100 fb^{-1}	500 fb^{-1}	1000 fb^{-1}	1500 fb^{-1}
c_γ $(\times 10^{-2})$	[-4.19;3.99]	[-2.40;2.20]	[-1.63;1.44]	[-1.39;1.20]	[-1.27;1.08]
c_{HB} $(\times 10^{-2})$	[-5.69;5.63]	[-3.21;3.15]	[-2.16;2.10]	[-1.82;1.76]	[-1.65;1.59]
c_{HW} $(\times 10^{-2})$	[-4.63;3.19]	[-3.00;1.56]	[-2.34;0.89]	[-2.14;0.69]	[-2.04;0.59]
c_H	[-2.77;8.25]	[-1.10;6.58]	[-0.54;6.02]	[-0.39;5.87]	[-0.32;5.80]
c_B $(\times 10^{-2})$	[-4.11;6.51]	[-1.95;4.34]	[-1.09;3.48]	[-0.83;3.22]	[-0.71;3.11]

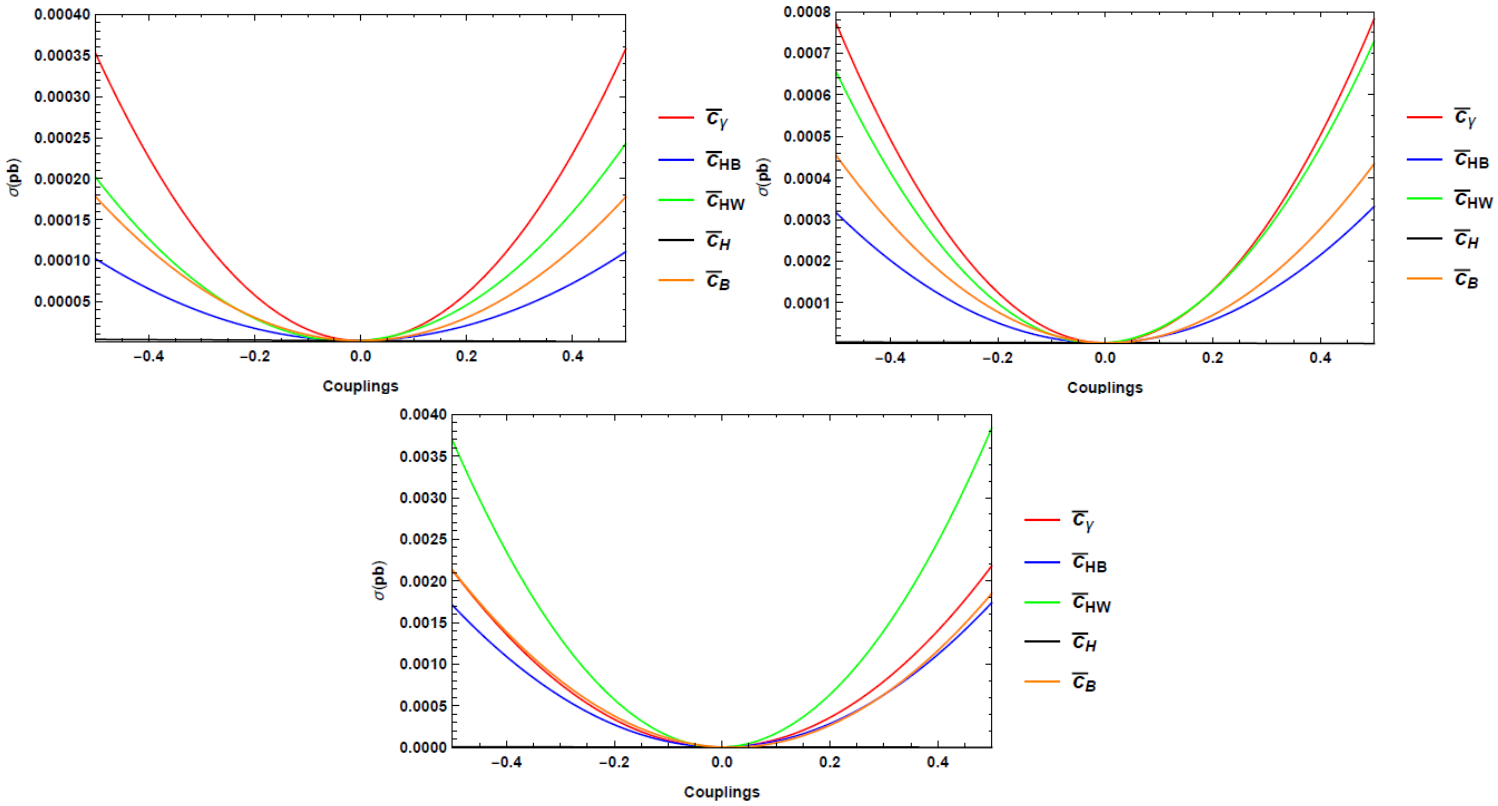
Tablo 7. Tablo 3 ile aynı, fakat 3 TeV km enerjisi için.

Couplings	100 fb^{-1}	500 fb^{-1}	1000 fb^{-1}	1500 fb^{-1}	2000 fb^{-1}
c_γ $(\times 10^{-1})$	[-0.44;0.38]	[-0.31;0.24]	[-0.26;0.20]	[-0.24;0.18]	[-0.23;0.16]
c_{HB} $(\times 10^{-1})$	[-0.48;0.43]	[-0.33;0.28]	[-0.28;0.24]	[-0.25;0.21]	[-0.24;0.19]
c_{HW} $(\times 10^{-1})$	[-0.36;0.26]	[-0.26;0.16]	[-0.23;0.13]	[-0.21;0.12]	[-0.20;0.10]
c_H	[-1.91;6.37]	[-0.99;5.46]	[-0.74;5.20]	[-0.62;5.08]	[-0.54;5.00]
c_B $(\times 10^{-1})$	[-0.28;0.64]	[-0.16;0.52]	[-0.12;0.47]	[-0.10;0.46]	[-0.09;0.44]

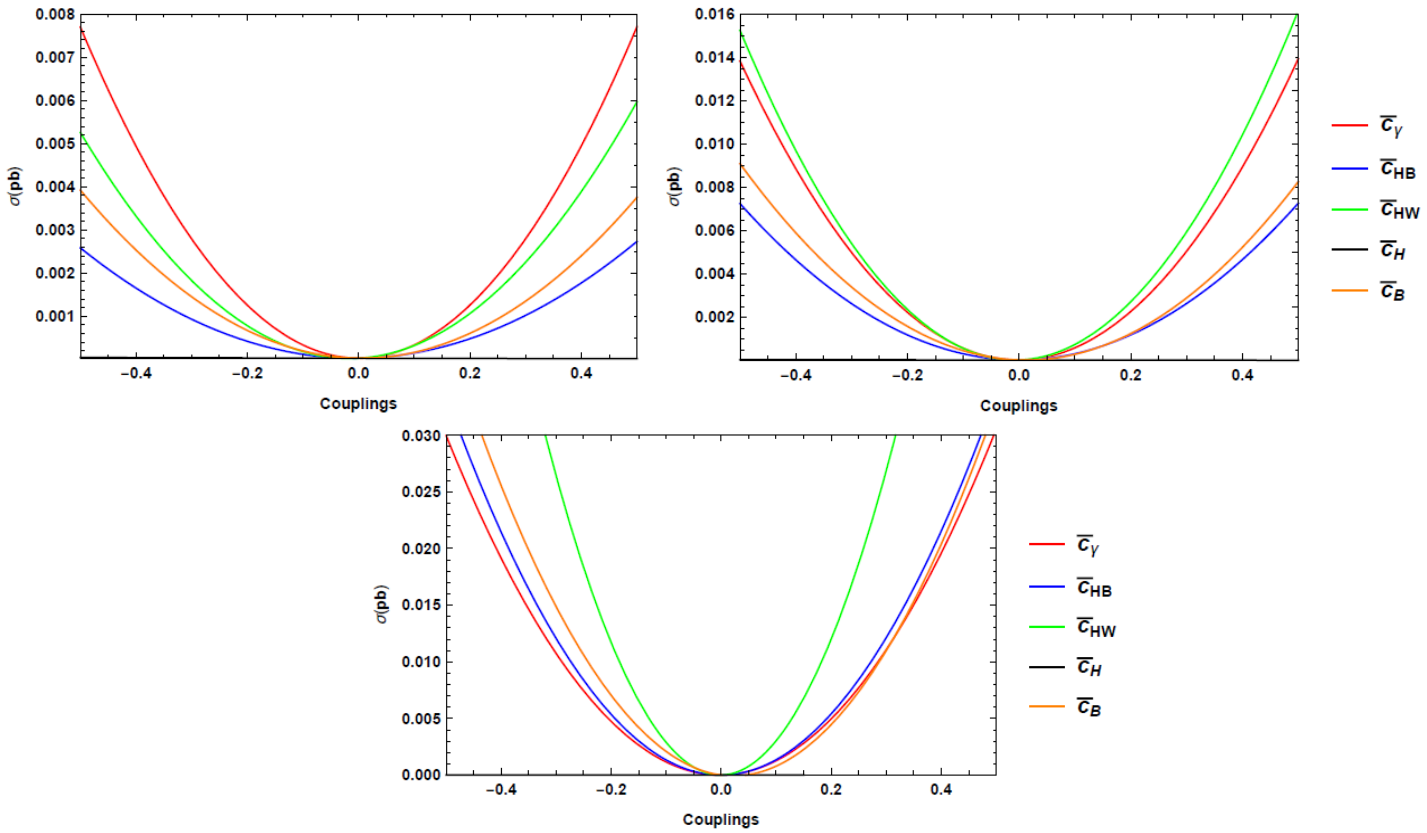
Tablo 8. Tablo 4 ile aynı, fakat 3 TeV km enerjisi için.

Couplings	100 fb^{-1}	500 fb^{-1}	1000 fb^{-1}	1500 fb^{-1}	2000 fb^{-1}
c_γ $(\times 10^{-2})$	[-1.57;1.11]	[-1.14;0.69]	[-1.00;0.55]	[-0.94;0.48]	[-0.89;0.44]
c_{HB} $(\times 10^{-2})$	[-1.29;1.21]	[-0.88;0.80]	[-0.75;0.66]	[-0.68;0.60]	[-0.63;0.55]
c_{HW} $(\times 10^{-2})$	[-0.98;0.73]	[-0.70;0.46]	[-0.61;0.37]	[-0.57;0.32]	[-0.54;0.30]
c_H	[-1.46;7.17]	[-0.73;6.44]	[-0.53;6.24]	[-0.44;6.15]	[-0.38;6.10]
c_B $(\times 10^{-2})$	[-0.31;4.81]	[-0.14;0.4.65]	[-0.10;4.61]	[-0.08;4.59]	[-0.07;4.58]

Ayrıca bu tekli taramaların neticesinde her bir anomal bağlaşım katsayısına (coupling) karşılık tesir kesiti grafikleri de 1 TeV, 1,5 TeV ve 3 TeV kütle merkezi enerjisinde hem Lazer hem de WWA dağılımı için ayrı ayrı elde edilmiştir (Şekil 1 ve 2). Şekil 1 ve 2'den görüleceği gibi tesir kesiti değerleri, enerjinin ve bağlaşım değerlerinin artmasıyla artmaktadır.

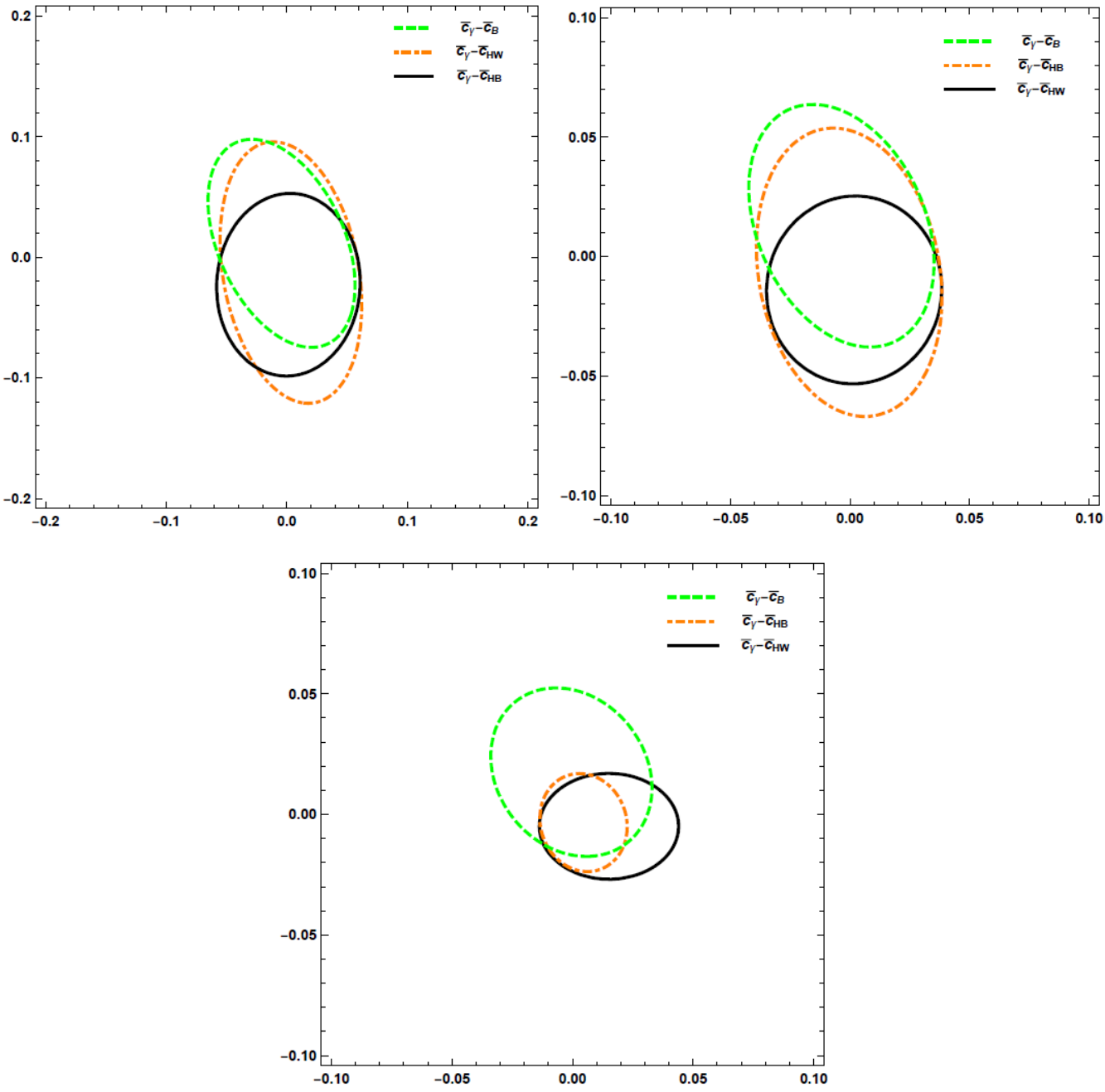


Şekil 1. WWA dağılımı için anomal bağlaşımlara (couplings) karşı tesir kesiti grafiği. Kütle merkezi enerjisi 1 TeV (sol üst), 1,5 TeV (sağ üst) ve 3 TeV (alt) şeklindedir. Burada her bir tekli parametre taranırken diğer tüm parametrelerin katkısı yok sayılmıştır.

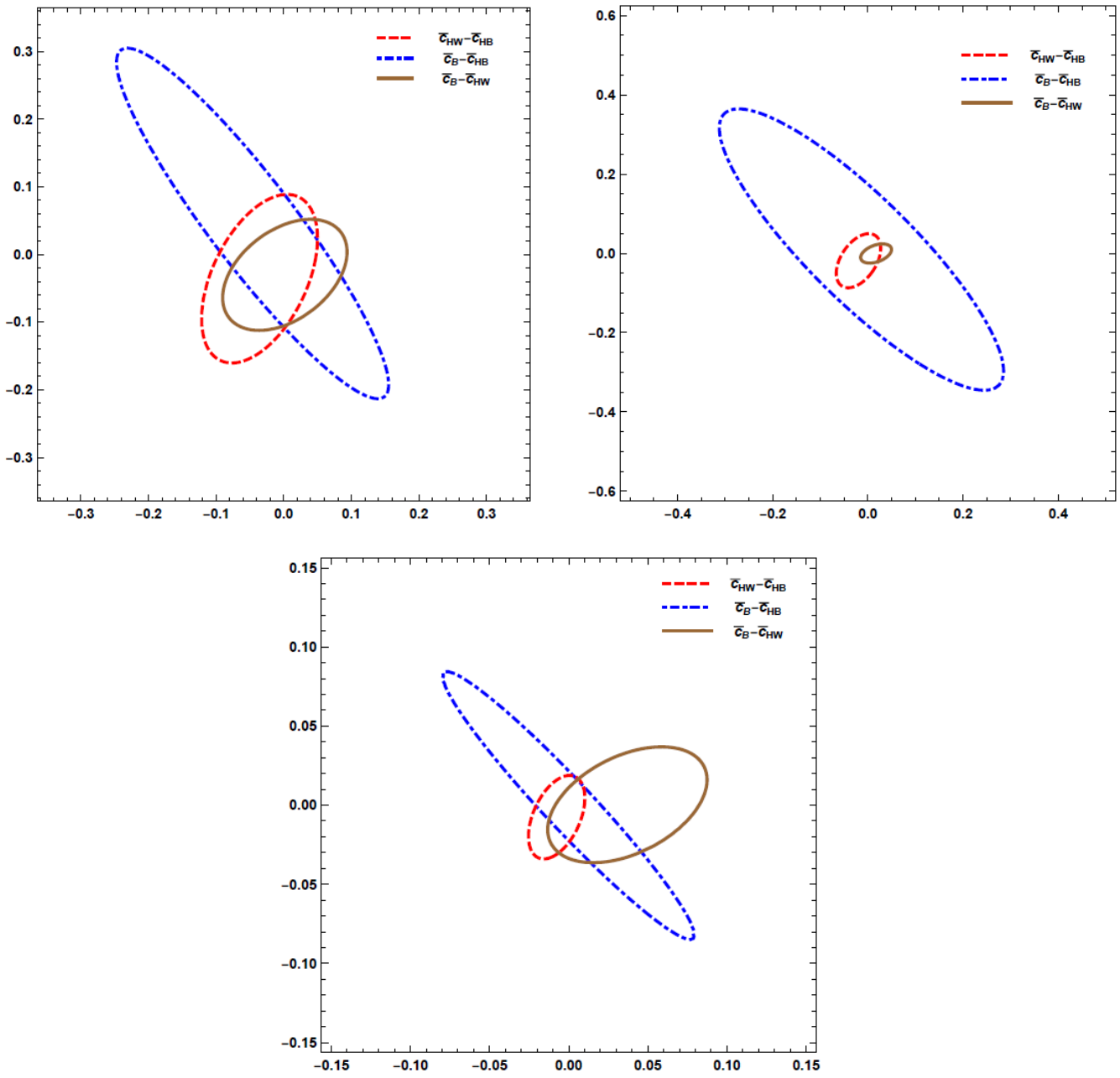


Şekil 2. Şekil 1 ile aynı, fakat Lazer dağılımı için.

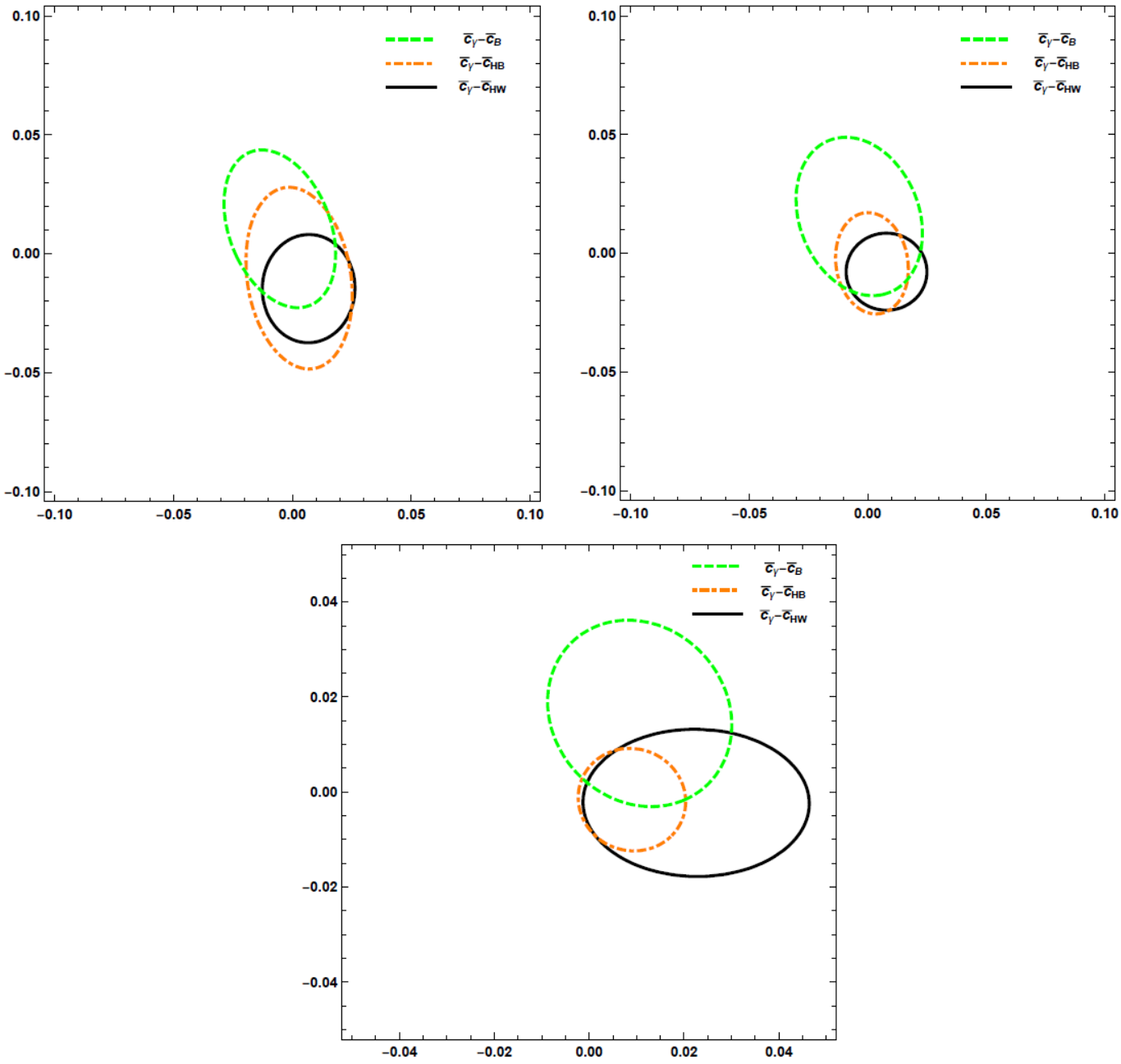
Son olarak her bir anomal bağlaşım katsayısının birbirleriyle olan ikili korelasyonları ($\bar{c}_\gamma - \bar{c}_{HB}$, $\bar{c}_{HB} - \bar{c}_{HW}$, vb.) detaylı bir şekilde incelenmiştir. Buna göre, katsayıların birbirine göre iki-boyutlu kontur (contour) grafikleri WWA (Şekil 3 ve 4) ve Lazer dağılımı (Şekil 5 ve 6) için ayrı ayrı elde edilmiştir. Bunlar, iki parametrenin aynı anda gözlendiği durumlar için iki parametrenin de sınırlandırıldığı grafiklerdir. Bu grafikler elde edilirken 1 TeV, 1,5 TeV ve 3 TeV kütle merkezi enerjileri için sırasıyla 1000fb^{-1}, 1500fb^{-1} ve 3000fb^{-1} yıllık ışınlık (integreted luminosity) değerleri kullanılmış ve yine % 95 güvenirlilik seviyesi dikkate alınmıştır.



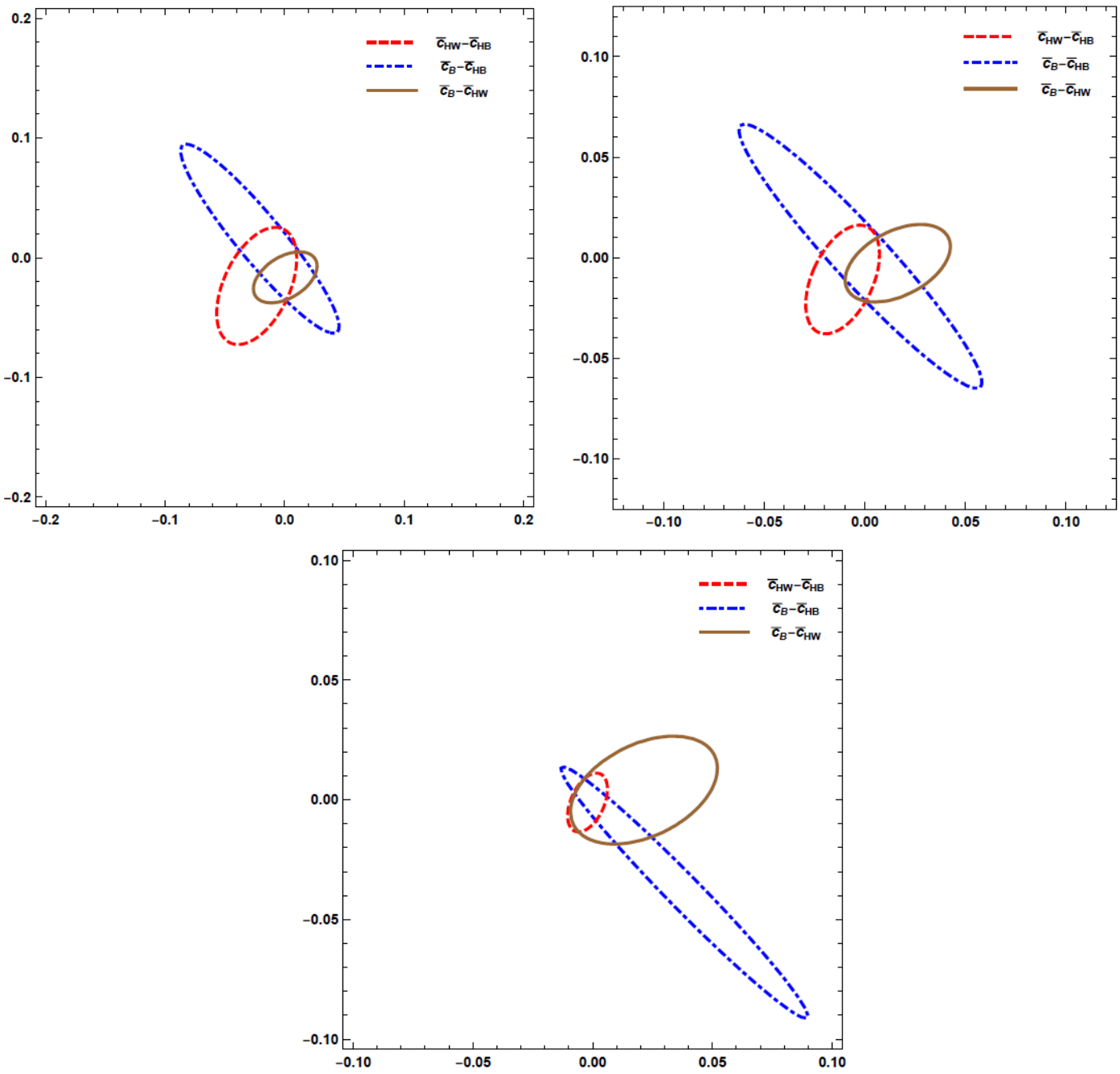
Şekil 3. WWA dağılımına göre 1 TeV (sol üst), 1,5 TeV (sağ üst) ve 3 TeV (alt) CLIC ve ILC kütle merkezi enerjilerinde kontur grafikleri. Burada grafik içinde etiketlenen her ikili katsayı dışında kalan diğer katsayıların katkısı yok sayılmıştır. Grafik içindeki etiketlerde ilk yazılan katsayılar yatay, ikinci yazılan katsayılar düşey ekseni göstermektedir.



Şekil 4. Şekil 3 ile aynı, fakat farklı ikili parametreler için.



Şekil 5. Lazer dağılımına göre 1 TeV (sol üst), 1,5 TeV (sağ üst) ve 3 TeV (alt) kütle merkezi enerjilerinde kontur grafikleri. Burada grafik içinde etiketlenen her ikili katsayı dışında kalan diğer katsayıların katkısı yok sayılmıştır. Grafik içindeki etiketlerde ilk yazılan katsayılar yatay, ikinci yazılan katsayılar düşey ekseni göstermektedir.



Şekil 6. Şekil 5 ile aynı, fakat farklı ikili parametreler için.

Kontur grafiklerinden de görüleceği gibi kütle merkezi enerjisi ve dolayısıyla seçilen toplanmış ışınlık değerleri arttıkça ikili parametrelerin duyarlılık limitleri iyileşmektedir. Ayrıca hem tekli hem de ikili parametre sonuçları göstermiştir ki, lazer dağılımı kullanıldığında WWA'ya göre yine parametreler daha duyarlı hale gelmişlerdir.

3.2 $\gamma\gamma \rightarrow ht\bar{t}$ Sürecinin İncelenmesi

Üst kuarkın araştırılması yeni fizik araştırmaları kapsamında görünmese de $t\bar{t}$ çiftinin üretim tesir kesiti ve üst kuarkın bozunumu incelenerek SM öngörüleriyle olan tutarlılığının sürekli test edilmesi gerekmektedir. Artan çarpıştırıcı enerjileri ve ışınlık değerleri düşünüldüğünde ileri bir tarihte deney sonuçlarının SM ile tutarsızlık göstermesi de olasılıklar arasındadır. Yeni fizik araştırmaları düşünüldüğünde üst kuark üretimi hakkındaki bilginin eksiksiz olması çok önemlidir. Çünkü böyle bir ardalan ile uğraşmak istemeyiz. LHC deneyleri halen üst kuark araştırmalarını sürdürmektedir (Sirunyan vd., 2018). Öyle ki, 14 TeV kütle merkezi enerjisi ve 10^{34} $cm^{-1}s^{-1}$ ışınlık değeri düşünüldüğünde saniyede neredeyse on kadar $t\bar{t}$ çiftinin üretilmesi öngörülür. Bu da yılda milyonları bulan olay üretimi demektir. Bu olaylar analiz edilerek üst kuark hakkındaki pek çok bilinmezlik ortadan kaldırılabilir.

Bu çalışmada $ht\bar{t}$ üretimi yine foton indüklü reaksiyonlardan elde edilmiştir. $\gamma\gamma \rightarrow ht\bar{t}$ süreci yine e^-e^+ çarpıştırıcılarının alt süreci olarak ele alınmıştır. Önceki çalışmada olduğu gibi, $h \rightarrow b\bar{b}$ ve bunun yanında t→Wb, W→leptonik bozunumlarıyla birlikte anomal Higgs etkileşmeleri ve Standart Model ardalan için tesir kesiti değerleri, $\bar{c}_\gamma$ ve $\bar{c}_{uB}$ parametrelerinin her bir değerine karşı, CLIC ve ILC enerjileri; yani 3 TeV ve 1,5 TeV ve 1 TeV kütle merkezi enerjilerinde hesaplanmıştır. Ancak burada yine bu enerjilerin kullanılan foton dağılımına göre azalacağı unutulmamalıdır. Bir önceki çalışmada kullanılan yöntem, kütle merkezi enerjileri ve ışınlık değerleri aynı şekilde ele alınmış ve bu iki katsayıya gerek tek parametre gerekse de çift parametre olarak sınırlamalar getirilmiştir. Tablo 9-13'te tek parametre limitleri görünmektedir. Yine artan kütle merkezi enerjisi ve ışınlık değerlerinde limitler daha duyarlı hale gelmekte ve fotonların lazer dağılımı seçildiğinde sonuçlar, WWA'ya göre oldukça iyileşmektedir.

Tablo 9. $\gamma\gamma \rightarrow ht\bar{t}$ ($h \rightarrow b\bar{b}$,t→Wb, (W→leptonik)) sürecinde 1 TeV kütle merkezi (km) enerjisi (WWA) ve farklı toplanmış (yıllık) ışınlık değerleri için $\bar{c}_\gamma$ ve $\bar{c}_{uB}$ anomal bağlaşım parametrelerinin (katsayılarının) %95 C.L. ile duyarlılık limitleri. Burada her bir tekli tarama için diğer parametrelerin etkileri yok sayılmıştır.

Couplings	10 fb^{-1}	50 fb^{-1}	100 fb^{-1}	500 fb^{-1}	1000 fb^{-1}
c_γ $(\times 10^{-1})$	[-1.77;1.85]	[-1.17;1.25]	[-0.98;1.06]	[-0.65;0.73]	[-0.54;0.62]
c_{uB} $(\times 10^{-2})$	[-4.40;3.77]	[-3.07;2.43]	[-2.64;2.01]	[-1.90;1.27]	[-1.67;1.04]

Tablo 10. Tablo 9 ile aynı, fakat Lazer dağılımı için.

Couplings	10 fb^{-1}	50 fb^{-1}	100 fb^{-1}	500 fb^{-1}	1000 fb^{-1}
c_γ $(\times 10^{-2})$	[-2.50;3.50]	[-1.57;2.57]	[-1.28;2.28]	[-0.80;1.79]	[-0.65;1.65]
c_{uB} $(\times 10^{-2})$	[-1.22;0.52]	[-0.91;0.21]	[-0.81;0.11]	[-0.61;0.10]	[-0.53;0.17]

Tablo 11. Tablo 9 ile aynı, fakat 1,5 TeV km enerjisi için.

Couplings	10 fb^{-1}	100 fb^{-1}	500 fb^{-1}	1000 fb^{-1}	1500 fb^{-1}
c_γ $(\times 10^{-2})$	[-8.99;9.59]	[-5.09;5.69]	[-1.66;2.26]	[-3.01;3.61]	[-2.77;3.37]
c_{uB} $(\times 10^{-2})$	[-2.75;2.33]	[-1.63;1.21]	[-0.47;0.05]	[-0.99;0.58]	[-0.92;0.49]

Tablo 12. Tablo 10 ile aynı, fakat 1,5 TeV km enerjisi için.

Couplings	10 fb^{-1}	100 fb^{-1}	500 fb^{-1}	1000 fb^{-1}	1500 fb^{-1}
c_γ $(\times 10^{-2})$	[-2.64;3.17]	[-2.10;2.62]	[-3.50;4.10]	[-1.89;2.42]	[-1.87;2.40]
c_{uB} $(\times 10^{-2})$	[-1.18;0.89]	[-0.91;0.62]	[-1.15;0.73]	[-0.79;0.51]	[-0.78;0.50]

Tablo 13. Tablo 9 ile aynı, fakat 3 TeV km enerjisi için.

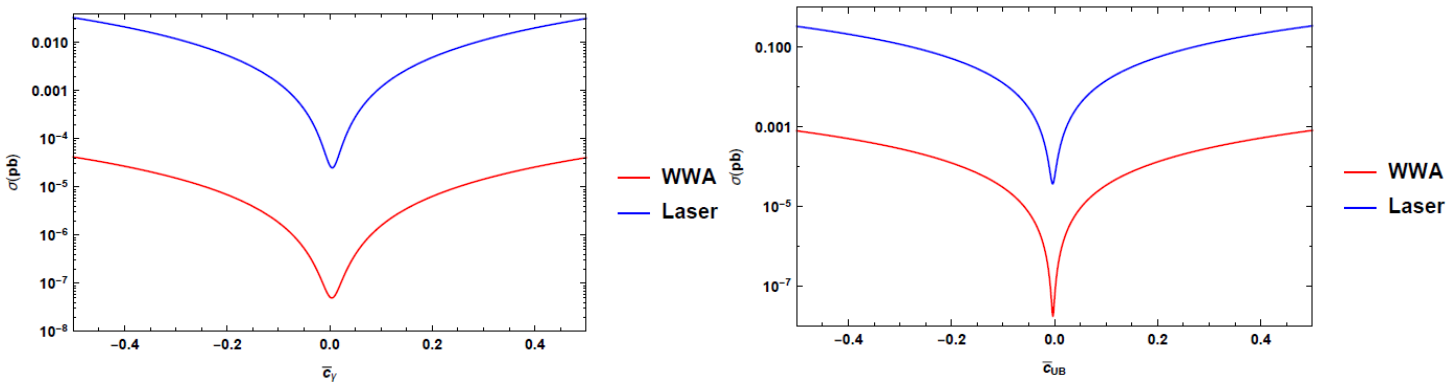
Couplings	100 fb^{-1}	500 fb^{-1}	1000 fb^{-1}	1500 fb^{-1}	2000 fb^{-1}
c_γ $(\times 10^{-2})$	[-2.92;3.14]	[-2.22;2.45]	[-2.03;2.25]	[-1.94;2.16]	[-1.88;2.10]
c_{uB} $(\times 10^{-2})$	[-1.04;0.85]	[-0.73;0.54]	[-0.63;0.44]	[-0.58;0.39]	[-0.54;0.36]

Tablo 14. Tablo 10 ile aynı, fakat 3 TeV km enerjisi için.

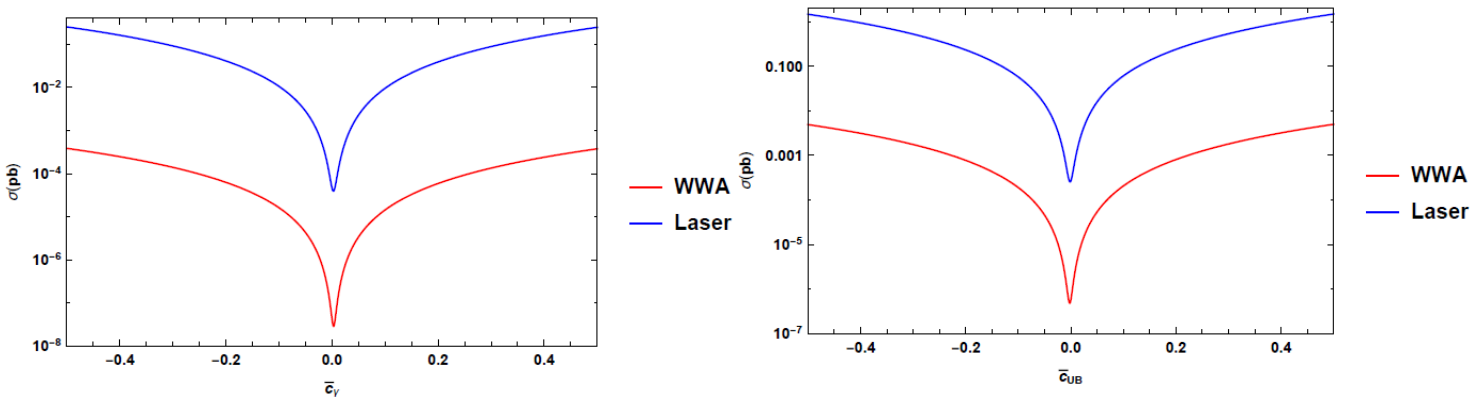
Couplings	100 fb^{-1}	500 fb^{-1}	1000 fb^{-1}	1500 fb^{-1}	2000 fb^{-1}
c_γ $(\times 10^{-2})$	[-1.28;1.47]	[-1.23;1.41]	[-1.22;1.39]	[-1.21;1.39]	[-1.20;1.39]
c_{uB} $(\times 10^{-2})$	[-0.53;0.45]	[-0.47;0.40]	[-0.46;0.39]	[-0.45;0.38]	[-0.45;0.38]

Bu tekli taramaların neticesinde $\bar{c}_\gamma$ ve $\bar{c}_{uB}$ anomal bağlaşım katsayı değerlerine karşı tesir kesiti grafikleri de 1 TeV, 1,5 TeV ve 3 TeV kütle merkezi enerjisinde hem Lazer hem de WWA dağılımı için ayrı ayrı elde edilmiştir (Şekil 7, 8 ve 9). Şekil 7, 8 ve 9'dan görüleceği gibi tesir kesiti değerleri, enerjinin ve katsayı değerlerinin artmasıyla artmaktadır. Bununla birlikte,

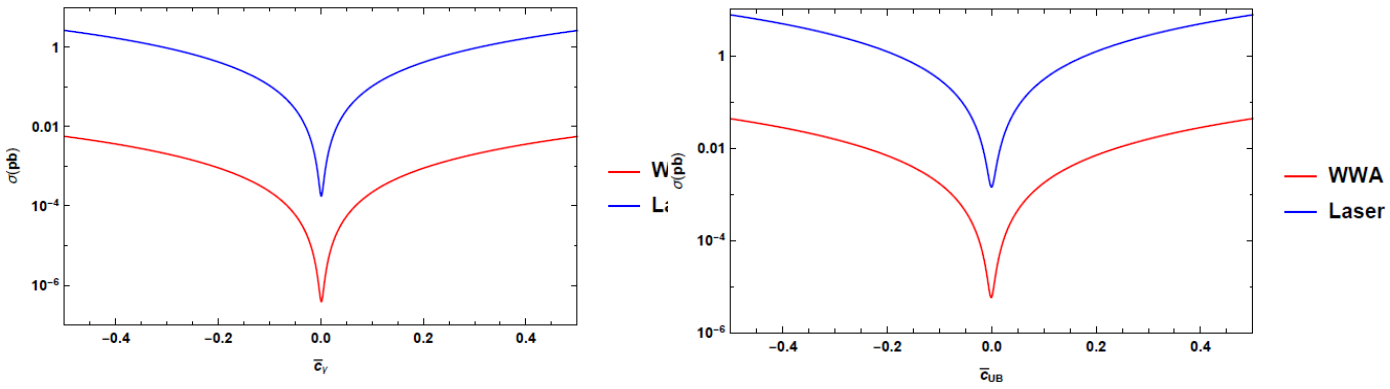
beklendiği gibi, lazer dağılımına sahip fotonlarla yapılan hesaplamalarda tesir kesiti değerleri WWA'ya göre daha fazladır.



Şekil 7. WWA ve lazer dağılımı için $\bar{c}_\gamma$ (sol) ve $\bar{c}_{uB}$ (sağ) katsayılarına karşı tesir kesiti grafiği. Kütle merkezi (km) enerjisi 1TeV'dir. Burada her bir tekli parametre taranırken diğer tüm parametrelerin katkısı yok sayılmıştır.

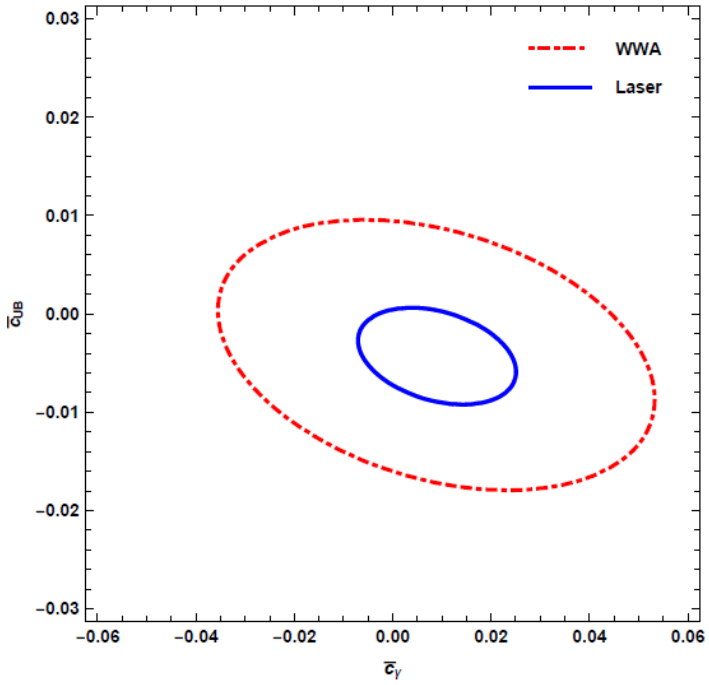


Şekil 8. Şekil 7 ile aynı, fakat km enerjisi 1,5 TeV için.

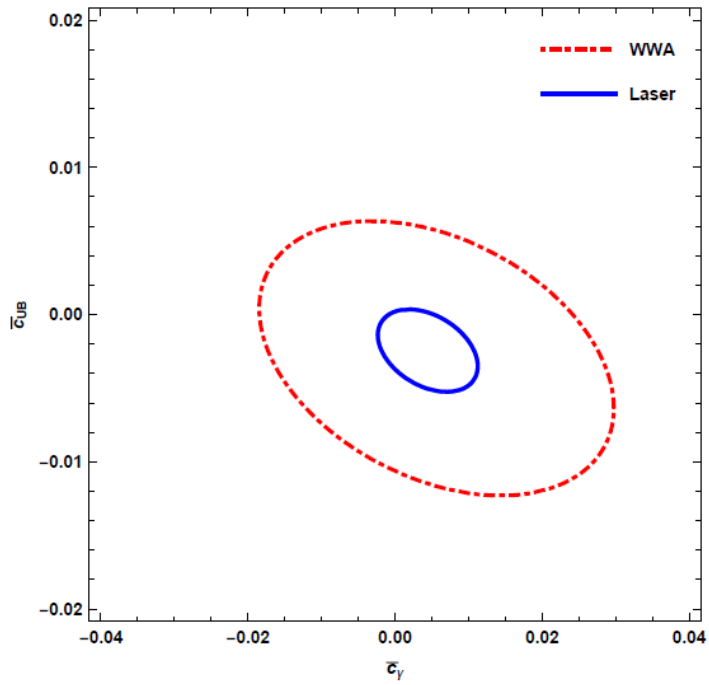


Şekil 9. Şekil 7 ile aynı, fakat km enerjisi 3 TeV için.

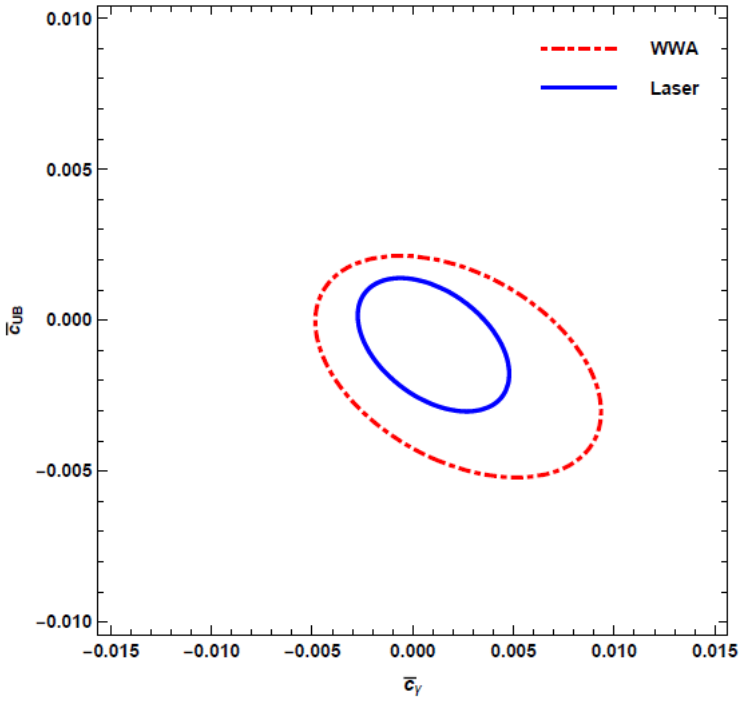
Benzer şekilde, Son olarak $\bar{c}_{\gamma}$ ve $\bar{c}_{uB}$ anomal bağlaşım katsayılarının birbirleriyle olan ikili korelasyonları incelenmiştir. Buna göre, katsayıların birbirine göre iki-boyutlu kontur (contour) grafikleri WWA ve lazer dağılımı (Şekil 10, 11 ve 12) için elde edilmiştir. Bunlar, iki parametrenin aynı anda gözlendiği durumlar için iki parametrenin de sınırlandırıldığı grafiklerdir. Bu grafikler elde edilirken 1 TeV, 1,5 TeV ve 3 TeV kütle merkezi enerjileri için sırasıyla 1000fb^{-1}, 1500fb^{-1} ve 3000fb^{-1} yıllık ışınlık (integreted luminosity) değerleri kullanılmış ve yine % 95 güvenirlilik seviyesi dikkate alınmıştır.



Şekil 10. WWA ve lazer dağılımına göre 1 TeV CLIC ve ILC kütle merkezi (km) enerjisinde kontur grafiği. $\bar{c}_{\gamma}$ ve $\bar{c}_{uB}$ dışında kalan diğer katsayıların katkısı yok sayılmıştır.



Şekil 11. Şekil 10 ile aynı, fakat km enerjisi 1,5 TeV için.



Şekil 12. Şekil 10 ile aynı, fakat km enerjisi 3 TeV için.

4. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada proje önerisinde sunulan konular üzerinde 24 ay boyunca çalışılmış sonuçlara ulaşılmıştır. Bunun yanında, proje önerisinde belirtilmeyen ve projenin son döneminde öğrenilmeye başlanan tam benzetim çalışmaları da proje çalışanları açısından oldukça önemli çalışmalara yol açacaktır.

Proje kapsamında, foton indüklü reaksiyonlar tarafından oluşturulabilecek iki süreç olan $\gamma e^- \to hZe^-$ ve $\gamma\gamma \to ht\acute{t}$ süreçlerinin tesir kesitleri, sürece giren fotonların Weizsacker-Williams ve Compton geri saçılması durumları için hesaplanmıştır. Bu süreçler için gelecekte kurulması planlanan CLIC ve ILC çarpıştırıcılarının güncel parametreleri gözönüne alınmıştır. Proje süresinde MadGraph5-aMC@NLO simülasyon programına Higgs bozonunun yeni etkileşme köşeleri içeren alt programlar eklenerek planlanan süreçler için tesir kesiti hesaplamaları yapılmıştır. Bu hesaplamalar daha sonra ki-kare istatistiksel analizinde kullanılarak model bağımsız efektif teorisindeki etkileşme sabitlerine güncel deneysel limitlerden daha kuvvetli sınırlamalar getirilmiştir. Tablo 3-8 de, $\gamma e^- \to hZe^-$ ($h \to b\acute{b}$ ve $Z \to l^{-l^+}$ ($l^{\pm} = e^{\pm}, \mu^{\pm}$)) bozunumları da gözönüne alınarak sınırlamalar getirilmiştir.

Kütle merkezi enerjileri ve ışınlık değerleri için kurulması planlanan çarpıştırıcıların güncel parametere değerleri alınmış ve yeni fizik bağlaşımlarına gerek tek parametre gerekse de çift parametre olarak sınırlamalar getirilmiştir. Artan kütle merkezi enerjileri ve ışınlık değerlerinde yeni fizik parametrelerine daha iyi sınırlamalar getirildiği tablolardan görülebilir. Ayrıca Tablo 3-8'deki, sonuçlardan Lazer (Compton geri saçılması) dağılımının WWA'ya göre daha duyarlı limitler verdiği de açıktır. Şekil 3-6'da iki farklı yeni fizik parametresinin birden tesir kesitine katkısı olduğu durumlar düşünülerek bu parametrelere getirilebilecek sınırlamalar kontur grafiklerinde gösterilmiştir. Burada yeni fizik bağlaşımlarının, davranışlarının farklılık gösterdiği yine bu grafiklerden görülebilir. Ayrıca elde edilen sınırlamalar güncel deneysel sınırlamalardan yine daha kuvvetlidir.

Tablo 9-13'te $\gamma\gamma \to ht\acute{t}$ ($h \to b\bar{b}$,t→Wb, (W→leptonik)) süreci için tek parametre limitleri görünmektedir. Yine artan kütle merkezi enerjisi ve ışınlık değerlerinde limitler daha duyarlı hale gelmekte ve fotonların lazer dağılımı seçildiğinde sonuçlar, WWA'ya göre oldukça iyileşmektedir.

Projenin öneri aşamasında ele alınmayan, detektör etkilerinin dikkate alındığı, analiz yöntemi, yürütücü ve araştırmacılar tarafından son dönemde öğrenilmeye ve uygulanmaya

başlanmıştır. 24 ayda tamamlanan bu projeden bir adet yayın ön basım olarak hazırlanmış (gönderim aşamasında), diğer bir çalışma yayın olarak hazırlanma aşamasında, bir çalışma da uluslararası konferansta sözlü bildiri olarak sunulmuştur. Projedeki araştırmalar yayınla sonuçlanarak literatüre önemli bir katkıda bulunacaktır.

Projede 2 yüksek lisans öğrencisi bursiyer olarak desteklenmiş ve parçacık fiziğinin bu alanında deneyim kazanmaya başlamışlardır. Yüksek lisans öğrencisi Cansu Samancı'nın "Higgs bozonunun anormal bağlaşımlarının incelenmesi" başlıklı tezinin bu dönem sonunda tamamlanması beklenmektedir.

Kaynaklar

Aad, G., vd. 2012. “Observation of a new particle in the search for the standard model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC”, Phys. Lett. B 716, 1.

Aad, G., vd. 2013a. “Evidence for the spin-0 nature of the Higgs boson using ATLAS data”, Phys. Lett. B 726, 120–144.

Aad, G., vd. 2013b. “Measurements of Higgs boson production and couplings in diboson final states with the ATLAS detector at the LHC”, Phys. Lett. B 726, 88; **Bu kaynağın düzeltilen hatası (corrigendum) için bkz.: Phys. Lett. B 734 (2014) 406**.

Aad, G., vd. 2013c. “Measurements of Higgs boson production and couplings in diboson final states with the ATLAS detector at the LHC”, Phys. Lett. B 726, 88.

Aad, G., vd. 2014a. “Measurement of Higgs boson production in the diphoton decay channel in pp collisions at center-of-mass energies of 7 and 8 TeV with the ATLAS detector”, Phys. Rev. D 90, 112015.

Aad, G., vd. 2014b. “Measurement of the Higgs boson mass from the H → γγ and H → ZZ* → 4l channels with the ATLAS detector using 25 fb−1 of pp collision data”, Phys. Rev. D 90, 052004.

Aad, G., vd. 2014c. “Search for Higgs boson decays to a photon and a Z boson in pp collisions at √s = 7 and 8 TeV with the ATLAS detector”, Phys. Lett. B 732, 8.

Aad, G., vd. 2014ç. “Search for invisible decays of a Higgs Boson produced in association with a Z Boson in ATLAS”, Phys. Rev. Lett. 112, 201802.

Aad, G., vd. 2014d. “Measurement of Higgs boson production in the diphoton decay channel in pp collisions at center-of-mass energies of 7 and 8 TeV with the ATLAS detector”, Phys. Rev. D 90, 112015.

Abe, T., vd. 2001. “Linear Collider Physics Resource Book for Snowmass 2001 - Part 3: Studies of Exotic and Standard Model Physics”, arXiv:hep-ex/0106057.

Abramowicz, H, vd. 2013. “Physics at the CLIC e+e- Linear Collider -- Input to the Snowmass process 2013”, arXiv:1307.5288 (hep-ex).

Accomando, E. vd. 2004. “Physics at the CLIC Multi-TeV Linear Collider”, arXiv: hep-ph/0412251 (hep-ph), CERN-2004-005.

Albrow, M. G., vd. 2009. “The FP420 R&D project: Higgs and New Physics with forward protons at the LHC”, JINST 4, T10001.

Alloul, A., Fuks, B., Sanz, V. 2014a. “Phenomenology of the Higgs effective Lagrangian via FeynRules”, J. High Energy Phys. 04 110.

Alloul, A., Christensen, N. D., Degrande, C., Duhr, C., Fuks, B. 2014b. “FeynRules 2.0 — A complete toolbox for tree-level phenomenology”, Comput. Phys. Commun. 185, 2250.

Alwall, J., Herquet, M., Maltoni, F., Mattelaer, O., Stelzer, T. 2011. “MadGraph 5 : Going Beyond”, J. High Energy Phys. 06 128.

Alwall, J., Frederix, R., Frixione, S., Hirschi, V., Maltoni, F., Mattelaer, O., Shao, H.-S., Stelzer, T., Torrielli, P., Zaro, M. 2014. “The automated computation of tree-level and next-to-leading order differential cross sections, and their matching to parton shower simulations” J. High Energy Phys. 07 079.

Alwall, J., Duhr, C., Fuks, B., Mattelaer, O., Öztürk, D. G., Shen, C.-H. 2015. “Computing decay rates for new physics theories with FeynRules and MadGraph5/aMC@NLO” ,Comput. Phys. Commun. 197, 312.

Amar, G., Banerjee, S., Buddenbrock, S. von, Cornell, A. S., Mandal, T., Mellado, B. Mukhopadhyaya, B. 2015. “Exploration of the tensor structure of the Higgs boson coupling to weak bosons in e^+ e^- collisions”, J. High Energy Phys. 02 128.

Arbey, A., Fichet, S., Mahmoudi, F., Moreau, G. 2016. “The correlation matrix of Higgs rates at the LHC”, J. High Energy Phys. 11 097.

Artoisenet, P., vd. 2013. “A framework for Higgs characterisation” J. High Energy Phys. 11 043.

ATLAS Collab. 2013a. “Measurements of the properties of the Higgs-like boson in the four lepton decay channel with the ATLAS detector using 25fb^{-1} of proton-proton collision data”, Report No. ATLAS-CONF-2013-013.

ATLAS Collab. 2013b. “Study of the spin of the Higgs-like boson in the two photon decay channel using 20.7 fb^{-1} of pp collisions collected at $\sqrt{s}$ = 8 TeV with the ATLAS detector”, Report No. ATLAS-CONF-2013-029.

ATLAS Collab. 2013c. “Study of the spin properties of the Higgs-like boson in the $H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow e\nu\mu\nu$ channel with $21fb^{-1}$ of $\sqrt{s}$ = 8TeV data collected with the ATLAS detector”, Report No. ATLAS-CONF-2013-031.

ATLAS Collab. 2014a. “Constraints on New Phenomena via Higgs Boson Coupling Measurements with the ATLAS Detector”, ATLAS-CONF-2014-010.

ATLAS Collab. 2015. “Study of the spin and parity of the Higgs boson in diboson decays with the ATLAS detector”, Eur. Phys. J. C 75 476.

ATLAS Collab. 2016. “Test of CP invariance in vector-boson fusion production of the Higgs boson using the optimal observable method in the ditau decay channel with the ATLAS detector”, Eur. Phys. J. C 76 658.

ATLAS Collab. 2017. “Measurement of inclusive and differential cross sections in the $H \rightarrow ZZ^{*} \rightarrow 4l$ decay channel in pp collisions at $\sqrt{s}$ = 13 TeV with the ATLAS detector”, JHEP 10 132.

ATLAS Collab. 2018a. “Measurement of the Higgs boson coupling properties in the $H \rightarrow ZZ^{*} \rightarrow 4l$ decay channel at $\sqrt{s}$ = 13 TeV with the ATLAS detector”, JHEP 03 095.

ATLAS Collab. 2018b. “Measurements of Higgs boson properties in the diphoton decay channel with 36 fb−1 of pp collision data at $\sqrt{s}$ = 13 TeV with the ATLAS detector”, Phys. Rev. D 98 052005.

ATLAS Collab. 2019a. “Measurement of the production cross section for a Higgs boson in association with a vector boson in the $H \rightarrow WW^{*} \rightarrow l\nu l\nu$ channel in pp collisions at $\sqrt{s}$ = 13 TeV with the ATLAS detector”, arXiv:1903.10052 (hep-ex).

ATLAS Collab. 2019b. “Measurement of VH, $H \rightarrow b\bar{b}$ production as a function of the vector boson transverse momentum in 13 TeV p p collisions with the ATLAS detector”, arXiv:1903.04618 (hep-ex).

Aydın, Z. Z., vd. 1996. Int. Jour. Of Mod. Phy. A, Vol. 11, 2019-2044.

Baer, H., vd. 2013. “The International Linear Collider Technical Design Report - Volume 2: Physics”, arXiv:1306.6352 (hep-ph).

Banerjee, S., Mandal, T., Mellado, B., Mukhopadhyaya, B. 2015. “Cornering dimension-6 HVV interactions at high luminosity LHC: The role of event ratios”, J. High Energy Phys. 09 057.

Bar-Shalom, S., Soni, A. 2018. “A universally enhanced lightquarks Yukawa couplings paradigm”, arXiv:1804.02400 (hep-ph).

Barbieri, R., Pomarol, A., Rattazzi, R., Strumia, A. 2004. “Electroweak symmetry breaking after LEP1 and LEP2”, Nucl. Phys. B703, 127.

Barklow, T., Fujii, K., Jung, S., Karl, R., List, J., Ogawa, T., Peskin, M. E., Tian, J. 2018. “Improved formalism for precision Higgs coupling fits”, Phys. Rev. D 97, 053003.

Berthier, L., Trott, M. 2016. “Consistent constraints on the standard model effective field theory”, J. High Energy Phys. 02 069.

Brau, J., vd. 2007. “ILC Reference Design Report Volume 1 - Executive Summary”, arXiv: 0712.1950 (physics.acc-ph).

Buchmuller, W., Wyler, D. 1986. “Effective lagrangian analysis of new interactions and flavour conservation”, Nucl. Phys. B 268 621.

Buckley, A., Englert, C., Ferrando, J. Miller, D. J., Moore, L., Russell, M., White, C. D. 2015. “Global fit of top quark effective theory to data, Phys. Rev. D 92, 091501.

Buckley, A., Englert, C., Ferrando, J. Miller, D. J., Moore, L., Russell, M., White, C. D. 2016. “Constraining top quark effective theory in the LHC run II era”, J. High Energy Phys. 04 015.

Chatrchyan, S., vd. 2012. “Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC”, Phys. Lett. B 716, 30.

Chatrchyan, S., vd. 2013a. “Study of the mass and spin-parity of the Higgs boson candidate via its decays to Z boson pairs”, Phys. Rev. Lett. 110, 081803.

Chatrchyan, S., vd. 2013b. “Observation of a new boson with mass near 125 GeV in pp collisions at √s =7 and 8 TeV”, J. High Energy Phys**.** 06, 081.

Chatrchyan, S., vd. 2013c. “Search for the standard model Higgs boson produced in association with a top-quark pair in pp collisions at the LHC”, JHEP 05, 145.

Chatrchyan, S., vd. 2013ç. “Study of the mass and spin-parity of the Higgs boson candidate via its decays to Z boson pairs”, Phys. Rev. Lett. 110, 081803.

Chatrchyan, S., vd. 2013d. “Search for a Higgs boson decaying into a Z and a photon in pp collisions at √s = 7 and 8 TeV”, Phys. Lett. B 726, 587.

Chatrchyan, S., vd. 2014a. “Search for the standard model Higgs boson produced in association with a W or a Z boson and decaying to bottom quarks”, Phys. Rev. D 89, 012003.

Chatrchyan, S., vd. 2014b. “Measurement of Higgs boson production and properties in the WW decay channel with leptonic final states”, JHEP 01, 096.

Chatrchyan, S., vd. 2014c. “Measurement of the properties of a Higgs boson in the four-lepton final state”, Phys. Rev. D 89, 092007.

Chatrchyan, S., vd. 2014ç. “Evidence for the 125 GeV Higgs boson decaying to a pair of τ leptons”, JHEP 05, 104.

Chatrchyan, S., vd. 2014d. “Search for invisible decays of Higgs bosons in the vector boson fusion and associated ZH production modes”, Eur. Phys. J. C 74 2980.

Choudhury, D. ve Mamta 2006. “Anomalous Higgs couplings at an eγ collider”, Phys. Rev. D 74, 115019.

Çakır, O. vd. 1999. J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 25 1187.

CMS Collab. 2013a. “Properties of the Higgs-like boson in the decay H→ZZ→4l in pp collisions at √s = 7 and 8TeV”, Report No. HIG-13-002-pas.

CMS Collab. 2013b. “Update on the search for the standard model Higgs boson in pp collisions at the LHC decaying to W^+W^- in the fully leptonic final state”, Report No. HIG-13-003-pas.

CMS Collab. 2015a. “Constraints on the spin-parity and anomalous HVV couplings of the Higgs boson in proton collisions at 7 and 8 TeV”, Phys. Rev. D 92 012004.

CMS Collab. 2015b “Limits on the Higgs boson lifetime and width from its decay to four charged leptons”, Phys. Rev. D 92 072010.

CMS Collab. 2016. “Combined search for anomalous pseudoscalar HVV couplings in VH(H → $\mathbf{b\bar{b}}$) production and H → VV decay”, Phys. Lett. B 759 672.

CMS Collab. 2017. “Constraints on anomalous Higgs boson couplings using production and decay information in the four-lepton final state”, Phys. Lett. B 775 1.

CMS Collab. 2018. “Search for Higgs boson pair production in events with two bottom quarks and two tau leptons in proton-proton collisions at sqrt(s) = 13 TeV”, Phys. Lett. B 778 101

CMS Collab. 2019a. “Measurements of the Higgs boson width and anomalous HVV couplings from on-shell and off-shell production in the four-lepton final state”, arXiv:1901.00174 (hep-ex).

CMS Collab. 2019b. “Constraints on anomalous HVV couplings from the production of Higgs bosons decaying to τ lepton pairs”, arXiv:1903.06973 (hep-ex).

Contino, R., Ghezzi, M., Grojean, C., Muhlleitner, M., Spira, M. 2013. “Effective Lagrangian for a light Higgs-like scalar”, J. High Energy Phys. 07 035.

Corbett, T., Eboli, O. J. P., Goncalves, D., Gonzalez-Fraile, J. Plehn, T. Rauch, M. 2015. “The Higgs legacy of the LHC run I”, J. High Energy Phys. 08 156.

Craig, N., Gu, J., Liu, Z., Wang, K. 2016. “Beyond Higgs couplings: Probing the Higgs with angular observables at future $e^+ e^-$ colliders”, J. High Energy Phys. 03 050.

Dannheim, D., Lebrun, P., Linssen, L., Schulte, D., Simon, F., Stapnes, S., Toge, N., Weerts, H., Wells, J. 2012. “CLIC e+e- Linear Collider Studies”, arXiv: 1208.1402 (hep-ex).

Dedes, A., Materkowska, W., Paraskevas, M., Rosiek, J. Suxho, K. 2017. “Feynman rules for the Standard Model Effective Field Theory in R_ξ – gauges”, J. High Energy Phys. 06 143.

Dedes, A., Paraskevas, M., Rosiek, J. Suxho, K., Trifyllis, L. 2018. “The decay h → γ γ in the Standard-Model Effective Field Theory”, J. High Energy Phys. 08 103.

Denegri, D., Guyot, C., Hoecker, A, Roos, L. 2018. HIGGS ve CERN (1. Basım). İstanbul: ALFA.

Denizli, H., Senol, A. 2018. “Constraints on Higgs effective couplings in $\boldsymbol{Hv\overline{v}}$ production of CLIC at 380 GeV”, Adv. High Energy Phys. 1627051.

Djouadi, A, vd. 2007. “International Linear Collider Reference Design Report Volume 2: PHYSICS AT THE ILC”, arXiv:0709.1893 (hep-ph).

Einhorn, M. B., Wudka, J. 2013. “The Bases of Effective Field Theories” Nucl. Phys. B 876 556.

Ellis, J. Sanz, V. You, T. 2014. “Complete Higgs sector constraints on dimension-6 operators”, J. High Energy Phys. 07 036.

Ellis, J., Sanz, V. You, T. 2015. “The effective standard model after LHC run I, J. High Energy Phys. 03 157.

Ellis, J., Roloff, P., Sanz, V. You, T. 2017. “Dimension-6 operator analysis of the CLIC sensitivity to new physics”, J. High Energy Phys. 05 096.

Englert, C., Kogler, R., Schulz, H., Spannowsky, M. 2016. “Higgs coupling measurements at the LHC”, Eur. Phys. J. C 76, 393.

Englert, F., Brout, R. 1964. “Broken symmetry and the mass of gauge vector mesons”, Phys. Rev. Lett. 13, 321.

Fichet, S., Tonero, A., Teles, P. R. 2017. “Sharpening the shape analysis for higher-dimensional operator searches”, Phys. Rev. D 96, 036003.

Gell-Mann, M., Levy, M. 1960. “The axial vector current in β decay”, Nuovo Cim. 16, 705.

Ginzburg, I. F., vd. 1984. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. 219, 5.

Giudice, G. F., Grojean, C., Pomarol, A., Rattazzi, R. 2007. “The strongly-interacting light Higgs”, J. High Energy Phys. 06 045.

Glashow, S. L. 1961. “Partial-symmetries of weak interactions”, Nucl. Phys. 22, 579.

Grzadkowski, B., Iskrzynski, M., Misiak, M., Rosiek, J. 2010. **"**Dimension-six terms in the Standard Model Lagrangian", J.High Energy Phys. 1010 085.

Gu, J., Li, H., Liu, Z., Su, S., Su, W. 2017. "Learning from Higgs Physics at Future Higgs Factories", J. High Energy Phys. 12 153.

Guralnik, G., Hagen, C., Kibble, T. 1964. "Global conservation laws and massless particles", Phys. Rev. Lett. 13, 585.

Hagiwara, K., Ishihara, S., Szalapski, R., Zeppenfeld, D. 1993. "Low energy effects of new interactions in the electroweak boson sector", Phys. Rev. D 48 2182.

Han, T., Kuang, Y-P., Zhang, B. 2006. "Anomalous gauge couplings of the Higgs boson at high energy photon colliders", Phys. Rev. D 73, 055010.

Hartmann, C., Shepherd, W., Trott, M. 2017. "The Z decay width in the SMEFT: y_t and λ corrections at one loop", J. High Energy Phys. 03 060.

He, H-R., Wan, X., Wang, Y-K. 2019. "Constraining the anomalous HZZ couplings in off-shell Higgs region", arXiv:1902.04756 (hep-ph).

Hesari, H., Khanpour, H., Najafabadi, M. M. 2018. "Study of Higgs effective couplings at electron-proton colliders", Phys. Rev. D 97, 095041.

Higgs, P.W. 1964a. "Broken symmetries, massless particles and gauge fields", Phys. Lett. 12, 132.

Higgs, P.W. 1964b. "Broken symmetries and the masses of gauge bosons, Phys. Rev. Lett. 13, 508.

Higgs, P.W. 1966. "Spontaneous symmetry breakdown without massless bosons", Phys. Rev. 145, 1156.

Jana, S., Nandi, S. 2018. "New Physics Scale from Higgs Observables with Effective Dimension-6 Operators", arXiv:1710.00619 (hep-ph).

Khachatryan, V. vd. 2014. "Observation of the diphoton decay of the Higgs boson and measurement of its properties", Eur. Phys. J. C 74, 3076.

Khanpour, H. Najafabadi, M. M. 2017a. “Constraining Higgs boson effective couplings at electron-positron colliders”, Phys. Rev. D 95, 055026.

Khanpour, H., Khatibi, S. Najafabadi, M. M. 2017b. “Probing Higgs boson couplings in H + γ production at the LHC”, Phys. Lett. B 773, 462.

Kibble, T. 1967. “Symmetry breaking in nonabelian gauge theories”, Phys. Rev. 155,1554.

Kilian, W., Sun, S., Yan, Q. S., Zhao, X., Zhao, Z. 2017. “New physics in multi-Higgs boson final states”, J. High Energy Phys. 06 145.

Kim, J. H., Sakaki, Y., Son, M. 2018. “Combined analysis of double Higgs production via gluon fusion at the HL-LHC in the effective field theory approach” ,Phys. Rev. D 98, 015016.

Kuday, S., Saygin, H., Hos, I., Cetin, F. 2018. “Projections forneutral Di-Boson and Di-Higgs interactions at FCC-he collider”, arXiv:1702.00185 (hep-ph).

Leung, C. N., Love, S. T., Rao, S. 1986. “Low-energy manifestations of a new interactions scale: Operator analysis”, Z. Phys. C 31 433.

Li, H-D., Lu, C-D., Shan, L-Y. 2019. “Sensitivity study of anomalous HZZ couplings at future Higgs factory”, arXiv:1901.10218 (hep-ex, hep-ph).

Murphy, C. W. 2018. “Statistical approach to Higgs boson couplings in the standard model effective field theory”, Phys. Rev. D 97, 015007.

Nambu, Y., Jona-Lasinio, G. 1961. “Dynamical model of elementary particles based on an analogy with superconductivity”, Phys. Rev. 122, 345.

Rindani, S. D., Singh, B. 2019. “Indirect measurement of triple-Higgs coupling at an electron-positron collider with polarized beams”, arXiv:1805.03417 (hep-ph, hep-ex).

Royon, C., vd. 2007. “Project to install roman pot detectors at 220 m in ATLAS”, arXiv: physics.ins-det/0706.1796v1.

Salam, A. 1968. “Weak and electromagnetic interactions”, Conf.Proc. C680519, 367-377.

Shi, L., Liang, Z., Liu, B., He, Z. 2019. “Constraining the anomalous Higgs boson coupling in H+γ production”, Chinese Physics C Vol. 43, No. 4 04300.

Sirunyan, A. M. vd., 2018. “Observation of $t\bar{t}H$ Production”, Phys. Rev. Lett. 120, 231801.

Telnov, V. I. 1990. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A 294, 72.

Weinberg, S. 1967. “A model of leptons”, Phys. Rev. Lett. 19, 1264.

Willenbrock, S., Zhang, C. 2014. “Effective Field Theory Beyond the Standard Model”, Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 64 83.

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Dr. Öğr. Üyesi VOLKAN ÇETİNKAYA
Proje No:	116F149
Proje Başlığı:	Higgs Bozonunun Standart Model Ayar Bozonları ve Üst Kuark İle Olan Anomal Bağlaşımlarının Araştırılması
Proje Türü:	3501 - Kariyer
Proje Süresi:	24
Araştırmacılar:	AHMET ALPER BİLLUR, VOLKAN ARI
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	DUMLUPINAR Ü. FEN-EDEBİYAT F. FİZİK B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	15/02/2017 - 15/02/2019
Onaylanan Bütçe:	144740.0
Harcanan Bütçe:	101511.6
Öz:	ATLAS ve CMS deneylerinin 2012 yılında Büyük Hadron Çarpıştırıcısı?nda (LHC) yeni bir skaler parçacığın keşfini duyurduğundan beri bu parçacığın Standart Model?nin öngördüğü Higgs bozonu olup olmadığına dair çalışmalar devam etmektedir. Bu konunun incelenmesinde en önemli ipuçlarından biri Higgs bozonunun diğer Standart Model parçacıklarıyla etkileşiminin modelin öngörüleri ile ne kadar uyumlu olduğunun araştırılmasıdır. Bu projede model bağımsız efektif teoriler kullanılarak bu etkileşimlerin incelenmesi hedeflenmiştir. Bu kapsamda proje önerisinde sunulan foton indüklü reaksiyonlardan ?e- ? hZe- ve ?? ? htt ? süreçleri, e-e+ çarpışmasındaki alt süreçler olarak ele alınmıştır. Burada sürece giren fotonlar için Weizsacker-Williams yaklaşımı ve Compton geri saçılmasından gelen fotonlar düşünülmüştür. Bu süreçlerin tesir kesitleri MadGraph5-aMC@NLO kullanılarak 6-boyutlu operatörlerin hZe- ve htt ? üretimi üzerindeki etkileri Monte Carlo (MC) benzetimleri ile hesaplanmıştır.
Anahtar Kelimeler:	Higgs Bozonu, Anomal Bağlaşımlar, Ayar Bozonları, üst kuark, Wilson katsayıları.
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır
Projeden Yapılan Yayınlar:	1- Search for Higgs Effective Couplings at Photon Induced Reactions (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),

TÜBİTAK