



## Büyük Ek Boyutlar Modelinin $\gamma\gamma \rightarrow ZZ$ Süreci ile İncelenmesi

### *Investigation of Large Extra Dimensions via $\gamma\gamma \rightarrow ZZ$ Process*

Eda Alıcı\* 

Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Zonguldak, Türkiye

### Öz

Son zamanlarda, Standart Model'deki hiyerarşi problemini çözmek için yüksek boyutlu yeni uzay zaman teorileri öne sürülmüştür. Bunlardan bir tanesi, Arkani-Hamed, Dimopoulos ve Dvali (ADD) büyük ek boyutlar modelidir. Bu çalışmada LHC' nin, ADD ek boyutlar modelini saptama potansiyeli  $\gamma\gamma \rightarrow ZZ$  alt süreci aracılığı ile tartışılmıştır. ADD modelin  $\Lambda_T$  parametresi üzerindeki kısıtlamaları fotoüretim süreçleri yoluyla elde edilmiştir. Sayısal hesaplamalar sırasında çeşitli dedektör kabullenim değerleri dikkate alınmıştır.  $\Lambda_T$  için duyarlılık limitleri %95 güvenirlilik düzeyinde hesaplanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Büyük ek boyutlar, Fotoüretim süreçleri, LHC

### Abstract

Recently new higher dimensional space-time theories have been proposed to solve the hierarchy problem in the Standard Model. One of them is Arkani-Hamed, Dimopoulos and Dvali (ADD) model of large extra dimensions. In this work, we have discussed the potential of the LHC to probe the ADD Model of extra dimensions via the subprocess  $\gamma\gamma \rightarrow ZZ$ . We have obtained the constraints on the  $\Lambda_T$  parameter of the ADD Model through the photoproduction process. During the numerical calculation various values of detector acceptances have been taken into consideration. The sensitivity limits on the  $\Lambda_T$  have been calculated at the 95% confidence level.

**Keywords:** Large extra dimensions, Photoproduction process, LHC

### 1. Giriş

Standart Model (SM), gözlemlenen maddeyi oluşturan elementer parçacıkları ve bu parçacıkların birbirleri ile etkileşmelerinde etkin olan güçlü nükleer kuvvet, zayıf nükleer kuvvet ve elektromanyetik kuvveti bir arada tasvir eden kuantumlu bir teoridir. Parçacık fiziğinin temel teorisi olan SM'de yer alan ve varlığı tespit edilmemiş son parçacık olan Higgs bozonunun LHC'de yapılan deneyler sonucunda keşfedilmesi ile birlikte SM' in tüm öngörülleri doğrulanmıştır. Ancak teorinin içerisinde hala önemli eksiklikler ve cevaplandırılmayan sorular bulunmaktadır. Bu sorunların üstesinden gelebilecek yeni teoriler geliştirmek için önemli araştırmalar yapılmaktadır. Yeni fizik olarak adlandırılan bu çalışma alanlarından birisi de ek boyut modelleridir. Ek boyut modelleri bilinen üç uzay, bir zaman boyutuna ek olarak yeni boyutların düşünüldüğü modellerdir. Bu teorilerin temel amacı SM'de yer alan hiyerarşi problemine

çözüm önerisi sunarak kütle çekim kuvvetini de SM etkileşmelerine dahil edebilmektir. Ek boyut teorilerinden önemli bir tanesi, Arkani-Hamed, Dimopoulos ve Dvali (ADD) tarafından önerilen büyük ek boyutlar teorisidir (Arkani-Hamed vd. 1998). Bu teoride, TeV mertebesindeki enerjilerde ek boyutların etkileri ölçülebilir olduğundan, teorinin doğruluğu LHC benzeri TeV mertebesinde kütle merkezi enerjisine sahip parçacık çarpıştırıcılarında deneysel olarak araştırılabilmektedir. Ek boyutların LHC deneylerinde keşfedilme olasılığını araştıran fenomenolojik çalışmalar da oldukça ilgi duyulan diğer bir araştırma alanıdır. LHC bir proton-proton çarpıştırıcısı olduğundan bu fenomenolojik çalışmalar, genellikle DİS (derin inelastik saçılma) sonucu ortaya çıkan qq, qg veya gg etkileşmeleri ile ilgilidir. Bununla birlikte, fotoüretim süreçleri olan  $\gamma\gamma$  ve  $\gamma q$  etkileşmeleri de LHC'de incelenmektedir. LHC gibi bir hadron çarpıştırıcısı olan Fermilab' daki TEVATRON deneylerinde fotoüretim reaksiyonlarının meydana gelebileceği doğrulanmış ve LHC deneyleri de bu etkileşimlere odaklanmıştır (Abulencia vd. 2007, Aaltonen vd. 2009).

\*Sorumlu yazarın e-posta adresi: [edaalici@beun.edu.tr](mailto:edaalici@beun.edu.tr)

Literatürde ADD ek boyutlar modelini fenomenolojik olarak fotoüretim süreçleri ile inceleyen birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalardan  $\gamma\gamma$  etkileşmelerine örnek olarak  $pp \rightarrow p\gamma\gamma p \rightarrow p\ell^+\ell^-p$  (Atağ vd. 2009),  $pp \rightarrow p\gamma\gamma p \rightarrow p\gamma\gamma p$  (Atağ vd. 2010, Sun 2014),  $pp \rightarrow p\gamma\gamma p \rightarrow p\Phi p$  (Goncalvez ve Sauter 2010),  $pp \rightarrow p\gamma\gamma p \rightarrow p\ell\ell p$  (İnan ve Billur 2011),  $pp \rightarrow p\gamma\gamma p \rightarrow pGp$  (İnan 2012) süreçleri ile ADD ek boyutlar modeli araştırılmıştır. Ayrıca fotoüretim süreçlerinden foton-kuark etkileşmelerine örnek olarak  $pp \rightarrow p\gamma p \rightarrow p\gamma qX$  (Şahin vd. 2013),  $pp \rightarrow p\gamma p \rightarrow pGqX$  (Şahin vd. 2015) süreçleri ile de ADD ek boyutlar modeli araştırılmıştır.  $\gamma\gamma$  etkileşmeleri, DİS sonucu ortaya çıkan parton kalıntılarına sebep olmadığından deneysel olarak SM ötesindeki yeni fizik ile ilgili sinyallerin tespiti açısından  $\gamma q$  etkileşmelerine göre daha faydalıdır. Bu sebeple çalışmamızda foton-foton etkileşmeleri sonucu oluşan  $pp \rightarrow p\gamma\gamma p \rightarrow pZZp$  süreci araştırılmıştır.

## 2. Gereç ve Yöntem

ADD ek boyutlar modeli, ek boyutlar aracılığıyla elektrozayıf skala  $\sim O(100\text{GeV})$  ile kütle çekim skalası  $\sim O(10^{19}\text{GeV})$  arasındaki büyük fark olarak adlandırılan hiyerarşi problemine çözüm önerisi sunmaktır. ADD modele göre SM parçacıkları 3-Duvar adı verilen bölgede hapsolmuş halde bulunmakta, kütle çekim kuvvetinin aracı parçacığı graviton ise  $\delta$  ek boyutun yer aldığı  $4+\delta$  boyutlu 'büyük uzay-zaman' da yayılmaktadır. Bu ek boyutlar uzaysal, düz ve kompakt boyutlar olmakla birlikte R yarıçaplı bir torus şeklindedir. Ek boyutların varlığı ile Planck skalası yerini daha düşük mertebede yeni fiziğin skalasına bırakır. 4-boyutlu uzay-zamandaki Planck skalası  $\bar{M}_{Pl}$  ile yüksek boyutlu teorinin Planck skalası arasındaki ilişki (1) denkleminde verilmektedir,

$$\bar{M}_{Pl}^2 = M_D^{2+\delta} V_\delta \quad (1)$$

$\delta$  boyutta kompakt torusun hacmi;  $V_\delta = (2\pi R)^\delta$  olarak alınarak  $\bar{M}_{Pl}$  yerine yazıldığında,  $M_D$  yeni fiziğin skalası TeV mertebesinde seçildiğinde ek boyutların kompaktlık yarıçapı olan R günümüz deney koşullarında ölçülebilir büyüklükte olacaktır. Bu sebeple ADD ek boyutlar modeli büyük ek boyutlar modeli olarak da adlandırılır.

ADD büyük ek boyutlar modelinin önemli bir başarısı, kütle çekim kuvvetinin temel denklemleri olan Einstein alan denklemlerine çözüm sunmasıdır. Bu çözüm ile dört boyutlu uzayda Kaluza - Klein kulesi adı verilen kütle modlarının bir toplamına ulaşılmaktadır. Kaluza-Klein gravitonları olarak adlandırılan tek bir kütle durumunun

SM alanları ile etkileşmeleri zayıf olsa da, çok sayıda kütle durumunun toplanması sonucu SM alanları ile etkileşmeleri oldukça güçlü olacaktır. Bu sayede günümüz deney koşulları ile ölçülebilir ek boyut etkileri olması beklenmektedir. Bu çalışmada, ADD uzaysal ek boyutlar modelinin LHC deney koşullarında etkileri iki foton etkileşmeleri sonucu ortaya çıkan  $pp \rightarrow p\gamma\gamma p \rightarrow pZZp$  süreci ile fenomenolojik olarak araştırılmıştır.

Çalışmada incelenen  $\gamma\gamma$  etkileşmeleri, proton demeti içerisindeki bazı protonların kafa kafaya çarpışmalar gerçekleştirilmeden geliş doğrultularından çok küçük açılarla saçılarak ileri yönde foton yayımlaması sonucu gerçekleşir. Fotoüretim süreci sonucu ortaya çıkan düşük virtüelliğe sahip ( $Q^2 = -q^2$ ) bu fotonlar birbirleri ile etkileşmelere girerek yeni süreçler meydana getirebilirler. İleri yönde saçılan yarı-reel bu fotonlara "Weisacker- Williams" fotonu da denilir ve eş değer foton yaklaşımı (EPA) ile incelenir. Eşdeğer foton spektrumu

$$f = \frac{dN_\gamma}{dE_\gamma dQ^2} = \frac{\alpha}{\pi} \frac{1}{E_\gamma Q^2} \left[ \left(1 - \frac{E_\gamma}{E}\right) \left(1 - \frac{Q_{\min}^2}{Q^2}\right) F_E + \frac{E_\gamma^2}{2E^2} F_M \right] \quad (2)$$

şeklinde verilmektedir (Budnev vd. 1975, Piotrkowski 2001, Kepka ve Royon 2008). Denklem içerisinde yer alan foton virtüelliği ve foton enerjisi, E gelen proton demetinin enerjisi,  $Q_{\min}$  fotonun alacağı minimum virtüellik değeri,  $F_E$  ve  $F_M$  elektrik ve manyetik form faktörleridir. Bu nicelikler,

$$Q_{\min}^2 = \frac{m_p^2 E_\gamma^2}{E(E - E_\gamma)}, \quad F_E = \frac{4m_p^2 G_E^2 + Q^2 G_M^2}{4m_p^2 + Q^2} \quad (3)$$

$$G_E^2 = \frac{G_M^2}{\mu_p^2} = \left(1 + \frac{Q^2}{Q_0^2}\right)^{-4}, \quad F_M = G_M^2 \quad (4)$$

biçiminde tanımlanırlar. Protonun manyetik momenti  $\mu_p^2 = 7.78$ ,  $Q_{\max}^2 = 2\text{GeV}^2$  ve  $Q_0^2 = 0,71\text{GeV}^2$  olarak alınır (Piotrkowski 2001, Rouby 2008, Schul 2011).

LHC deneylerinde gerçekleşen pp etkileşmeleri saçılan parçacıkların merkez detektörler tarafından tespiti ile incelenmektedir. Bu detektörler, ATLAS, CMS, ALICE, LHCb, LHCf, TOTEM olmak üzere altı tanedir. Bu merkez detektörlerin dışında ATLAS ve CMS ana detektörlerinin çarpışma noktalarından 220m ve 420m uzakta bulunan ileri detektörler bulunmaktadır. İleri ve merkez detektörlerin koordineli çalışması vasıtası ile fotoüretim süreçlerinin araştırılacağı bir deney programı da bulunmaktadır. İleri detektörler, enine momentumunun bir kısmını kaybederek ana detektörlerden kaçan etkileşmeye girmemiş olan protonları  $\xi_{\min} < \xi < \xi_{\max}$  momentum

kayıpları bölgesinde dedekte edebilir. Verilen bu aralık ileri detektörler için kabullenim (acceptance) olarak adlandırılır. Burada  $\xi = (|\vec{p} - |\vec{p}'|)|/|\vec{p}|$  kayıp momentum kesri olarak ifade edilir.  $\xi$  ifadesinde yer alan  $\vec{p}$  gelen protonun momentumunu,  $\vec{p}'$  ise parçalanmadan saçılan protonun momentumunu göstermektedir. ATLAS ileri dedektörü için öngörülen kabullenim aralığı  $0.0015 < \xi < 0.15$ , (Albrow vd.2008, Royon vd.2007), CMS-TOTEM ileri dedektörleri için ise,  $0.0015 < \xi < 0.5$  dir (Avati and Osterberg 2006, Kepka and Royon 2008). Güncellenmiş olan kabullenim aralıkları ise  $0,015 < \xi < 0,5, 0,015 < \xi < 0,15$ , ve  $0,02 < \xi < 0,3$  şeklindedir (TOTEM Collaboration 2013). İleri dedektörler esnek saçılan protonları, momentum kayıp oranı  $\xi$ 'nin sürekli bir aralığında tespit edebilirler. Bu sebeple, ileri dedektör kabullenim aralığının bir alt bölgesini seçecek şekilde kesilimler koymak ve bu alt bölgede çalışmak mümkündür. AFP(ATLAS Forward Physics) ve CMS-TOTEM tarafından önerilen kabullenimlerin alt aralıkları  $0.1 < \xi < 0.15$  ve  $0.1 < \xi < 0.5$  dir.

### 3. Sonuçlar

Bu çalışmada virtüel graviton değişim süreci olan  $pp \rightarrow p\gamma\gamma p \rightarrow pZZp$  süreci için LHC deney koşulları ile ADD uzaysal ek boyutlar modeli araştırılmıştır. Ana sürecin Feynman diyagramı Şekil 1'deki gibidir.

$pp \rightarrow p\gamma\gamma p \rightarrow pZZp$  sürecinin alt süreci olan  $\gamma\gamma \rightarrow ZZ$  süreci SM'de yer almayan bir süreç olduğundan ağaç mertebesinde tek bir Feynman diyagramı bulunmaktadır. Bu diyagram Şekil 2'de verilmiştir.

Kaluza-Klein gravitonlarının SM alanları ile etkileşmeleri için Giudice, Rattazi ve Wells' in (1999) çalışmalarında yer alan Feynman kuralları kullanılarak genlik kare hesabı yapılmıştır. Sürecin genlik karesi Mathematica programı yardımıyla analitik olarak hesaplanmıştır. Elde edilen genlik kare ifadesi şu şekildedir,

$$|M|^2 = -\frac{|D(\hat{s})|^2}{4\overline{M}_{Pl}^4} 8(m_z^4 - 2\hat{t}m_z^2 + \hat{s}^2 + \hat{t}(\hat{s} + \hat{t})) (\hat{s}^2 + 3(m_z^4 - 2\hat{t}m_z^2 + \hat{t}(\hat{s} + \hat{t}))) \quad (5)$$

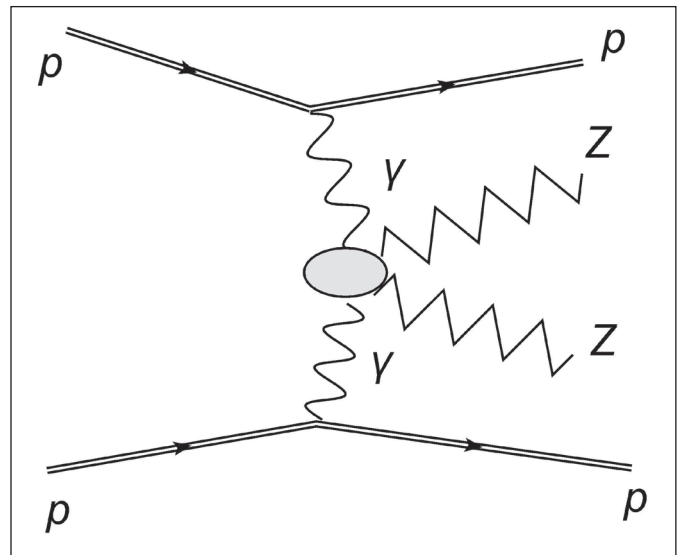
Genlik kare ifadeleri içerisinde yer alan  $\hat{s}, \hat{t}, \hat{u}$  Mandelstam parametreleri,  $m_z$  Z bozonun kütlesi,  $\overline{M}_{Pl} = \frac{M_{Pl}}{\sqrt{8\pi}}$  indirgenmiş Planck kütlesidir. KK kulesinin kütle modları üzerinden bir toplam ifadesi olan gravitonun propagatör faktörü ise, etkileşme  $D(\hat{s})$  kanalında gerçekleştiğinden ile verilir. ADD modelinde, Kaluza-Klein uyarılmış durumları için graviton kütleleri yaklaşık eV mertebesindeki kütle farklarıyla birbirlerinden ayrılmış olduklarından graviton

propagatöründeki toplam ifadesi integrale dönüşür. Bu integral ultraviyole ıraksaklık içerdiğinden  $\Lambda_T$  kesilim skalası konularak regülerize edilir. Literatürde yer alan farklı regülerizasyonlar arasından çalışmamızda Giudice vd. (1999) tarafından gerçekleştirilen regülerizasyon kullanılmıştır.

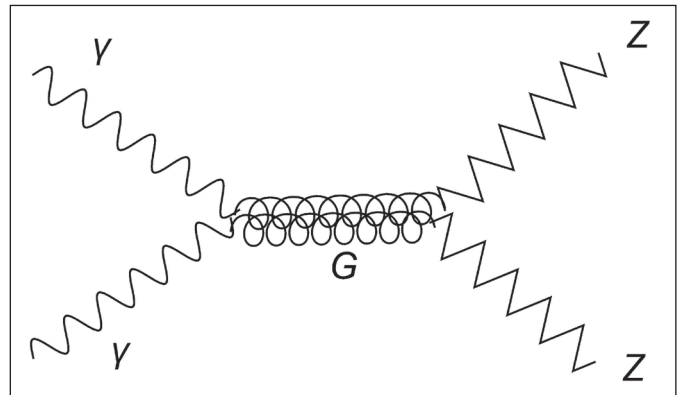
$$\frac{1}{\overline{M}_{Pl}^2} D(\hat{s}) = \frac{1}{\overline{M}_{Pl}^2} \sum_n \frac{1}{\hat{s} - m_n^2} \equiv \frac{4\pi}{\Lambda_T^4} \quad (6)$$

$\Lambda_T$ 'nin temel skala olan  $M_D$ 'ye açık bağlılığı bilinmemekle birlikte sicim kuramına dayanan nedenlerle  $M_D > \Lambda_T$  olduğu kabul edilmiştir. Bu eşitsizliğin bir sonucu olarak  $\Lambda_T$  için bulunmuş bir alt limit  $M_D$  için de bir alt limit olacaktır. Bu bağlamda çalışmamızda  $\Lambda_T$  için alt limit belirlenerek yeni fiziğin Planck skalası olan  $M_D$ 'nin sınırlarını bulmak amaçlanmıştır.

Çalışmamızda ilgilendiğimiz ana süreç olan  $pp \rightarrow p\gamma\gamma p \rightarrow pZZp$  süreci için tesir kesiti, alt sürecinin



Şekil 1.  $pp \rightarrow p\gamma\gamma p \rightarrow pZZp$  süreci için Feynman diyagramı.



Şekil 2.  $\gamma\gamma \rightarrow ZZ$  Alt süreci için Feynman diyagramı.

tesir kesitinin foton dağılım fonksiyonları üzerinden integrasyonu ile hesaplanır.

$$\sigma(pp \rightarrow p\gamma\gamma p \rightarrow pZZp) = \int_{M_{inv}/\sqrt{s}}^{\xi_{1max}} 2zdz \left( \int_{z^2/\xi_{1max}}^{\xi_{1max}} \frac{dx_1}{x_1} N(x_1) N\left(\frac{z^2}{x_1}\right) \right) \hat{\sigma}_{\gamma\gamma \rightarrow ZZ}(\hat{s}) \quad (7)$$

Denklemden yer alan  $x_1$  saçılan foton ile gelen protonun enerji oranı,  $\hat{s}(\hat{s} = x_1 x_2 s)$  alt süreçler için kütle merkezi enerjisinin karesi,  $s$  ana süreç için kütle merkezi enerjisinin karesi ve  $z$  değişkeni  $z = \sqrt{x_1 x_2}$  şeklindedir.  $N(x_1)$ ,  $N\left(\frac{z^2}{x_1}\right)$  nicelikleri foton dağılım fonksiyonudur ve gelen foton demetleri için eşdeğer foton yaklaşımı kabul edilmiş olup bu nedenle denklem (2)'de yer alan eşdeğer foton dağılım spektrumu kullanılmıştır.

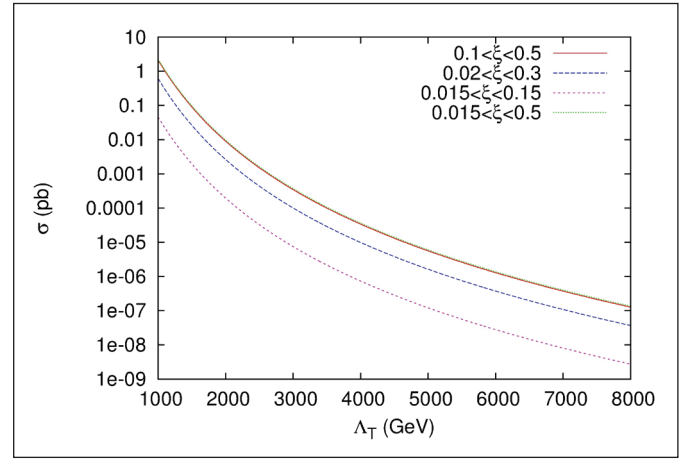
İlgilenilen sürecin hesaplanan tesir kesiti, bu sürecin SM ötesindeki fiziğe katkısı hakkında bilgi verecektir. Bu süreç ile ilgili olarak dört farklı ileri dedektör kabullenim aralığı için tesir kesitinin  $\Lambda_T$  parametresine bağlılığı Şekil 3'de incelenmiştir.

KK gravitonlarının tesir kesitleri üzerindeki etkilerinin deneysel olarak ölçülebilir olup olmadığını belirlemek için istatistiksel analiz yapılması gerekmektedir.  $pp \rightarrow p\gamma\gamma p \rightarrow pZZp$  süreci için istatistiksel analizi ADD modeli kapsamında gerçekleştirdik. İncelediğimiz bu sürecin alt süreci olan  $\gamma\gamma \rightarrow ZZ$  süreci için tesir kesiti hesabı yapılırken, ağaç mertebesinde Standart Model katkıları bulunmadığından ve SM katkıları en az 1-halka mertebesinde olduğundan, SM katkısı olmadığı düşünülmüştür. Bu sebeple SM olay sayısı sıfır olarak alınmıştır. Beklenen olay sayısının düşük olduğu durumlarda kullanılan bir istatistiksel analiz metodu olan Poisson analizi ile  $\Lambda_T$  parametresi için alt limitler %95 güvenilirlik düzeyinde belirlenmiştir (Particle data group 2012). LHC deney koşulları altında Poisson analizi ile yapılan duyarlılık hesaplarında gözlenen olay sayısı  $N = \sigma L$  bağıntısı ile bulunur. Burada  $\sigma$  toplam tesir kesitini,  $L_{INT}$  integre edilmiş LHC ışınlılığını göstermektedir. Poisson analizi sonucunda dört farklı ileri dedektör kabullenim aralığı için  $\Lambda_T$ 'nin alt limitlerinin integre edilmiş LHC ışınlılığına göre değişimi Şekil 4' de incelenmiştir.

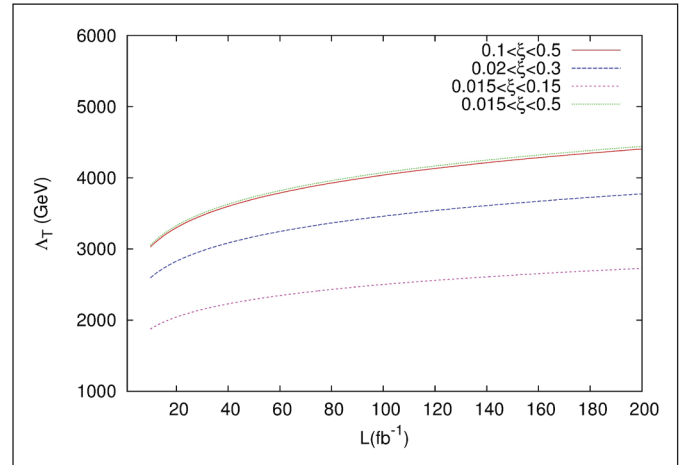
#### 4. Tartışma

Bu çalışmada fotoüretim süreçlerinden birisi olan  $pp \rightarrow p\gamma\gamma p \rightarrow pZZp$  süreci vasıtası ile ADD büyük ek boyutlar modelinin varlığı LHC deney koşulları dikkate alınarak incelenmiştir. İncelenilen süreç fotoüretim

süreçlerinden  $\gamma\gamma$  süreci olduğundan elektromanyetik arka plan ışınlarından bağımsız, temiz bir etkileşme kanalı sunmuştur. Ancak bu avantajı yanında  $\gamma q$  etkileşmelerine göre  $\gamma\gamma$  etkileşmeleri düşük etkin ışınlılık değerine sahip olduğundan etkileşmenin tesir kesiti daha önceki çalışmalarımızda incelemiş olduğumuz  $\gamma q$  etkileşmelerinden daha küçük olmuştur (Şahin vd 2013, Şahin vd 2015). Literatürde araştırılmış  $\gamma\gamma$  etkileşmeleri olan  $pp \rightarrow p\gamma\gamma p \rightarrow pt\bar{t}p$  ve  $pp \rightarrow p\gamma\gamma p \rightarrow pl^+l^-p$  süreçlerinden ise daha yüksek etkileşme olasılığına sahipken, başka bir  $\gamma\gamma$  etkileşmesi örneği olan  $pp \rightarrow p\gamma\gamma p \rightarrow p\gamma\gamma p$  sürecinden daha zayıf etkileşme olasılığı vermiştir (İnan ve Billur 2011, Atağ vd. 2009, Atağ vd. 2010, Sun 2014). Bu çalışmaların alt süreçleri olan  $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma, \gamma\gamma \rightarrow t\bar{t}$  ve  $\gamma\gamma \rightarrow l^+l^-$  için  $0.1 < \xi < 0.5$  ileri dedektör kabullenim



Şekil 3.  $pp \rightarrow p\gamma\gamma p \rightarrow pZZp$  sürecinin toplam tesir kesitinin farklı ileri dedektör kabullenimleri için  $\Lambda_T$  parametresine bağlılığı.



Şekil 4.  $pp \rightarrow p\gamma\gamma p \rightarrow pZZp$  süreci için  $\Lambda_T$ 'nin %95 güvenilirlik düzeyindeki alt sınırlarının farklı ileri dedektör kabullenimleri için integre edilmiş ışınlılığa göre grafiği.



aralığında integre edilmiş ışınllık değeri  $100 \text{ fb}^{-1}$  için  $\Lambda_T$  nin %95 güvenilirlik düzeyindeki alt sınırları sırası ile 5100 GeV, 2700 GeV ve 3500 GeV olarak bulunmuştur. Bu çalışmada ise incelenen alt süreci için, aynı ileri detektör kabullenimi ve integre edilmiş ışınllık değeri için yapılan istatistik analiz sonucunda  $\Lambda_T$  nin %95 güvenilirlik düzeyindeki alt sınırı 4000 GeV olarak elde edilmiştir. Yaptığımız çalışmada incelediğimiz dört farklı ileri dedektör kabullenimi arasında en kuvvetli sonucu veren  $0.1 < \xi < 0.5$  aralığı CMS-TOTEM ve AFP kabullenim aralıklarının yüksek enerjili bir bölgesini içeren bir alt aralıktır. İncelediğimiz sürecin tesir kesiti ifadesi yüksek momentum bağlılığına sahip olduğundan, diğer ileri detektör kabullenim aralıklarında elde edilen sınırlamalardan daha iyi sonuçlar vermiştir. Bu sonuçlar ışığında incelenilen sürecin ADD ek boyutlar modelinin parçacık çarpıştırıcılarında araştırılması açısından oldukça dikkate değer olduğu görülmektedir.

## 5. Kaynaklar

- Albrow, MG., FP420 & D Collaboration 2008.** The FP420 R&D Project: Higgs ve new physics with forward protons at the LHC. *arXiv:0806.0302*.
- Arkani-Hamed, N., Dimopoulos, S., Dvali, GR. 1998.** The hierarchy problem ve new dimensions at a millimeter. *Phys. Lett. B*, 429: 263-272.
- Atağ, S., İnan, SC., Şahin, İ. 2009.** Extra dimensions in photon induced two lepton final states at the CERN-LHC. *Phys. Rev. D*, 80: 075009.
- Atağ, S., İnan, SC., Şahin, İ. 2010.** Extra dimensions in process at the LHC. *JHEP*, 1009: 042.
- Avati, V., Osterberg, K. 2006.** Acceptance calculations methods for low- $\beta^*$  optics. Report No. CERN-TOTEM-NOTE-2005-002.
- Bundev, VM., Ginzburg, IF., Meledin, GV., Serbo, VG. 1975.** The two photon particle production mechanism. physical problems. applications. equivalent photon approximation. *Phys. Rep.*, 15: 181.
- Giudice, GF., Rattazzi, R., Wells, JD. 1999.** Quantum gravity and extra dimensions at high energy colliders. *Nucl. Phys. B*, 544: 3-38.
- Goncalves, VP., Sauter, WK. 2009.** Radion production in exclusive processes at CERN LHC. *Phys. Rev. D*, 82: 056009.
- Han, T., Lykken, JD., Zang, RJ. 1999.** Kaluza-Klein states from large extra dimensions. *Phys. Rev. D*, 59: 105006.
- Hewett, J., Spiropulu, M. 2002.** Particle physics probes of extra spacetime dimensions. *Annu. Rev. Nucl. Part. Phys.*, 52: 397-424.
- Kepka, O., Royon C. 2008.** Anomalous WW coupling in photon-induced processes using forward detectors at the LHC. *Phys. Rev. D*, 78: 073005.
- Particle Data Group, 2012.** Review of particle physics. *Phys. Rev. D*, 86: 010001.
- Piotrkowski, K. 2001.** Tagging two photon production at the CERN Large Hadron Collider. *Phys. Rev. D*, 63: 071502.
- Rouby, X. 2008.** Measurements of photon induced processes in CMS and forward proton detection at the LHC. *Ph. D. Thesis*, Universite Catholique de Louvain, 204 p.
- Royon, C., RP220 Collaboration 2007.** Project to install roman pot detectors at 220 m in ATLAS. *Proceedings for the DIS 2007 workshop*, Munich, April.
- Schull, N. 2011.** Measurements of two-photon interactions at the LHC. *Ph. D. Thesis*, Universite Catholique de Louvain, 200 p.
- Sun, H. 2014.** Large extra dimension effects through light-by-light scattering at the CERN LHC. *Eur. Phys. J. C*, 74:2977.
- Şahin, İ., Billur, AA. 2011.** Anomalous WW $\gamma$  couplings in  $\gamma\gamma$  collision at the LHC. *Phys. Rev. D*, 83: 035011.
- Şahin, İ., Billur, AA., İnan, SC., Şahin, B., Köksal, M., Tektaş, P., Alıcı, E., Yıldırım, R. 2013.** Probe of extra dimensions in at the LHC. *Phys. Rev. D*, 88: 09501.
- Şahin, İ., Köksal, M., İnan, SC., Billur, AA., Şahin, B., Tektaş, P., Alıcı, E., Yıldırım, R. 2015.** Graviton production through photon-quark scattering at the LHC. *Phys. Rev. D*, 91: 035017
- TOTEM Collaboration 2013.** TOTEM upgrade proposal CERN-LHCC-2013-009.