



Araştırma Makalesi – Research Article

Geliş Tarihi / Received: 02/10/2024

Kabul Tarihi / Accepted: 26/01/2025

Yayın Tarihi / Published: 30/11/2025

Yüksek Işınlıklı Büyük Hadron Çarpıştırıcısı Bazlı Müon-Proton Çarpıştırıcılarında Uyarılmış Müon Üretimi

Excited Muon Production at High Luminosity Large Hadron Collider-Based Muon-Proton Colliders

Abdüllatif Çalışkan¹, Mehmet Şahin^{2*}

¹ Gümüşhane Üniversitesi/ Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi/ Fizik Mühendisliği Bölümü/ Gümüşhane, Türkiye/ acaliskan@gumushane.edu.tr/ <https://orcid.org/0000-0001-5485-6881>

^{2*} Uşak Üniversitesi/ Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi/ Bilgisayar Mühendisliği Bölümü/ Uşak, Türkiye/ mehmet.sahin@usak.edu.tr/ <https://orcid.org/0000-0001-6777-3938>

Teşekkür: Uşak Üniversitesi, Enerji, Çevre ve Sürdürülebilirlik Uygulama ve Araştırma Merkezi'ne bu çalışmaya verdiği destekten dolayı teşekkür ederiz.

Etik Beyan: Bu çalışmanın hazırlanma sürecinde bilimsel ve etik ilkelere uyulduğu ve yararlanılan tüm çalışmaların kaynakçada belirtildiği beyan olunur.

Yapay Zeka Etik Beyanı: Yazar bu makalenin hazırlanma sürecinin hiç bir aşamasında yapay zekadan faydalanılmadığını; bu konuda tüm sorumluluğun kendisine(kendilerine) ait olduğunu beyan etmektedir.

Çıkar Çatışması: Çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Finansman: Bu araştırmayı desteklemek için dış fon kullanılmamıştır.

Lisans: CC BY-NC 4.0

Acknowledgements: We would like to thank Uşak University, Energy, Environment and Sustainability Application and Research Center for their support of this study.

Ethical Statement: It is declared that scientific and ethical principles were followed during the preparation of this study and that all studies used are stated in the bibliography.

Artificial Intelligence Ethical Statement: The author declares that artificial intelligence was not utilized at any stage of the preparation process of this article and accepts full responsibility in this regard.

Conflicts of Interest: The author(s) has no conflict of interest to declare.

Grant Support: The author(s) acknowledge that they received no external funding to support this research.

License: CC BY-NC 4.0

Yüksek Işınlıklı Büyük Hadron Çarpıştırıcısı Bazlı Müon-Proton Çarpıştırıcılarında Uyarılmış Müon Üretimi

ÖZ

Bu çalışmada müon+foton son durumuna sahip spin-1/2 uyarılmış müonun Yüksek Işınlıklı Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (YI-BHÇ) bazlı müon-proton çarpıştırıcısında üretimi incelenmiştir. Kütle merkezi enerjisi 9,16 TeV ve yıllık ışınlık değeri 15 fb^{-1} olan μp çarpıştırıcısında, uyarılmış müonların kontak etkileşim yöntemiyle üretilip ayar etkileşimi yöntemiyle fotonlu kanala bozunumu araştırılmıştır. Uyarılmış müon sinyalini ardalardan ayırmak için sinyal-ardalan analizi yapılmıştır. Bu analiz sonucunda belirlenen keşif sınırlamaları uygulanarak YI-BHÇ bazlı müon-proton çarpıştırıcısında uyarılmış müonun kütlesi için keşif, gözlem ve dışarlama limitleri tespit edilmiştir. Bu sonuçlara göre kompozitlik skalasının $\Lambda = m_{\mu^*}$ değeri için uyarılmış müonlar 6570 GeV'e kadar bu çarpıştırıcıda keşfedilebilecektir.

Anahtar Kelimeler- Uyarılmış Müon, Yüksek Işınlıklı Büyük Hadron Çarpıştırıcısı, Kompozit Modeller

Öne Çıkanlar

- Bu çalışmada kütle merkezi enerjisi 9,16 TeV ve yıllık ışınlık değeri 15 fb^{-1} olan YI-BHÇ bazlı bir müon-proton çarpıştırıcısında uyarılmış müonların kontak etkileşim yöntemiyle üretilip müon+foton sonlu duruma bozunumu incelenmiştir.
- Uyarılmış müon sinyalini ardalardan ayırmak için sinyal-ardalan analizi yapılmıştır. Yapılan sinyal-ardalan analizinde son durum parçacıkları olan müon, foton ve jet'e ait enine momentum ve psedö-rapidity dağılımlarında, ve müon+foton değişmez kütle dağılımlarında en uygun sınırlamalar belirlenmiştir.
- Bu analiz sonucunda belirlenen keşif sınırlamaları uygulanarak YI-BHÇ bazlı müon-proton çarpıştırıcısında uyarılmış müonun kütlesi için keşif, gözlem ve dışarlama limitleri tespit edilmiştir.
- Bu sonuçlara göre YI-BHÇ bazlı μp çarpıştırıcısı uyarılmış müonları $\Lambda = m_{\mu^*}$ için 6570 GeV ve $\Lambda = 10 \text{ TeV}$ için 5565 GeV'e kadar keşfedilebilecektir.

Excited Muon Production at High Luminosity Large Hadron Collider-Based Muon-Proton Colliders

ABSTRACT

In this study, we investigated the production of spin-1/2 excited muons with a muon+photon final state at a High Luminosity Large Hadron Collider (HL-LHC) - based muon - proton collider. In the μp collider, which has a center of mass energy of 9.16 TeV and an annual luminosity of 15 fb^{-1} , the production of excited muons by the contact interaction method and their decay into the photon channel by the gauge interaction method were investigated. Signal-background analysis was performed to separate the excited muon signals from the background. By applying the discovery cuts determined as a result of this analysis, the discovery, observation, and exclusion limits for the mass of the excited muon in the HL-LHC-based muon-proton collider were determined. According to these results, for $\Lambda = m_{\mu^*}$, excited muons can be discovered up to 6570 GeV at this collider.

Keywords- Excited Muon, High Luminosity Large Hadron Collider, Composite Models

Highlights

- In this study, the decay process of excited muons into a muon and photon final state was examined through contact interaction at a YI-LHC-based muon-proton collider, which operates with a center-of-mass energy of 9.16 TeV and an integrated luminosity of 15 fb^{-1} .
- A signal-background analysis was conducted to distinguish the excited muon signals from background noise. This analysis identified the optimal constraints on the transverse momentum and pseudo-rapidity distributions of the final-state particles, including muons, photons, and jets, as well as the muon-photon invariant mass distributions.
- By applying the discovery constraints derived from this analysis, the discovery, observation and exclusion limits for the mass of the excited muon at the YI-LHC-based muon-proton collider were determined..
- According to these findings, the YI-LHC-based collider is capable of detecting excited muons with masses up to 6570 GeV for $\Lambda = m_{\mu^*}$ and 5565 GeV for $\Lambda = 10 \text{ TeV}$.

I. GİRİŞ

Parçacık fiziğinde Standart Model (SM), temel parçacıkları ve bu parçacıklar arasındaki etkileşimleri tanımlayan temel bir teoridir. SM; kuarkları, leptonları, aracı parçacıklar olan bozonları ve bunların birbirleriyle olan elektromanyetik, zayıf ve güçlü nükleer etkileşimlerini de iyi bir şekilde açıklar. Avrupa Nükleer Araştırma Merkezindeki ATLAS [1] ve CMS [2] dedektörlerinde 2012 yılında gerçekleştirilen deneyler, 1960'larda önerilen Higgs parçacığının varlığını doğruladı ve böylece temel parçacıkların kütle kazanım mekanizması da SM tarafından açıklanabilir hale geldi. Bununla birlikte SM; kuantum kütleçekimi, parametre enflasyonu, nötrino salınımları, Yük-Parite (CP) ihlali ve karanlık madde gibi pek çok fenomeni açıklamada yetersizdir. SM'nin yetersiz kaldığı bu olayları açıklayabilmek için SM ötesi teorilere ihtiyaç duyulmaktadır.

SM ötesi teorilerden en çok bilinenleri; Büyük Birleşim Teorileri (BBT), Süpersimetri, Ekstra Boyutlar, ve Kompozitlik Modellerdir. Kompozit modeller, yukarıda bahsedilen parametre enflasyonu sorununa iyi bir çözüm getirmektedir. Çünkü kompozit modeller kuark, lepton ve bozonların preon olarak adlandırılan daha temel parçacıklardan oluştuğunu ileri sürerek temel parçacık enflasyonu probleminde bir çözüm sunmaktadır. J. C. Pati ve Abdus Salam'ın yazdığı iki makale kompozitlik modellerle ilgili ilk makalelerdendir [3, 4]. Günümüze kadar parçacık fizikçileri tarafından pek çok model önerilmiş [5-19] ve bu modeller kapsamında uyarılmış fermiyonlar, leptokuarklar, leptogluonlar ve renk sekizlisi kuarklar gibi çeşitli yeni tip parçacıkların varlığı öne sürülmüştür.

En bilinen kompozit modellerden biri Harari-Shupe modelidir [5, 6]. Bu modelde lepton ve kuarklar T ve V rishonu (preon) olarak adlandırılan, kütsesiz ve spini $\frac{1}{2}$ olan iki temel preondan oluşmaktadır. Bu preonlar renk ve ilave olarak hiperrenk olarak adlandırılan yüklerin ikisini de taşımaktadır. Fermiyonlar arasındaki yeni hiperrenk etkileşimleri, preonları birbirine bağlayan ve kompozitlik enerji skalası olarak adlandırılan bir enerji skalasında meydana gelir. Tüm kompozit modellerde önemli bir parametre olan kompozitlik skalası, Λ ile sembolize edilmektedir. Bu modele göre, kuark ve leptonlar üç preondan oluşur ve bunlar hiperrenk teklileri olup Λ 'dan daha düşük enerjilerde gözlemlenir. Bu enerji bölgesinde tüm preonlar kompozit parçacıklar içerisinde hapsolmüştür ve doğada serbest halde doğrudan gözlenemezler.

Eğer SM fermiyonlarının bir iç yapısı varsa kompozitliğin bir sonucu olarak bunların uyarılmış durumları da olmalıdır. Bu yüzden uyarılmış fermiyonlar taban durumunda bulunan SM fermiyonlarının uyarılmış durumu olarak ele alınabilir. Preonik modeller tarafından önerilen uyarılmış lepton ve kuarklar, spin-1/2 ve spin- 3/2 spin durumlarına sahip olabilir. Uyarılmış fermiyonların kütleleri SM fermiyonlarına göre çok daha büyük olması beklenmektedir. Uyarılmış fermiyonlarla ilgili ilk çalışma 1965 yılında "Heavy electrons and muons" isimli makale ile yapılmıştır [20]. Sonraki yıllarda ise uyarılmış fermiyonlarla ilgili daha kapsamlı teorik ve fenomenolojik çalışmalar yapılmıştır [21-40]. Teorik çalışmaların yanı sıra uyarılmış fermiyonlarla ilgili çok sayıda deneysel araştırmalar da yapılmaktadır [41-49].

Deneysel çalışmalarda şimdiye kadar uyarılmış fermiyonlarla ilgili herhangi bir keşif (5σ) veya gözlem (3σ) yapılamamıştır. Fakat bu deneysel çalışmalarla uyarılmış fermiyonların kütlelerine dışarlama (2σ) getirilmiştir. Bu çalışmanın da konusunu oluşturan uyarılmış müonların kütlelerine ait en güncel limitler, CERN'deki CMS deneyinde elde edilen sonuçlardan gelmiştir. Uyarılmış müonun kütlelerinin kompozitlik skalasına eşit olduğu durum için elde edilen sonuçlara göre uyarılmış müonların kütlesi ayar etkileşimli fotonlu bozunum için 3,8 TeV [48] ve kontak etkileşimli bozunum için 5,7 TeV'e kadar dışarılanmıştır [49]. Bu çalışmada uyarılmış müonların ayar etkileşimler vasıtasıyla müon+foton son durumlu bozunumu incelendiği için 3,8 TeV'den büyük olan kütle bölgesi dikkate alınmıştır. Uyarılmış fermiyonların olası bir keşfi kompozitliğin varlığına doğrudan bir kanıt oluşturacaktır. Bu yüzden uyarılmış fermiyonlarla ilgili yapılan çalışmalar kompozit modellerle ilgili çalışmalara önemli katkı sunmaktadır.

Uyarılmış lepton ve kuarklarla ilgili çalışmaları daha ileriye götürebilmek için daha yüksek enerjili ve ışıklı çarpıştırıcılara ihtiyaç vardır. Bu çarpıştırıcılardan biri de Yüksek Işıklı Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (YI-BHÇ) projesidir [50]. CERN tarafından geliştirilmekte olan bu proje, mevcut Büyük Hadron Çarpıştırıcısının (BHÇ) ışıklığını yaklaşık 10 kat artırmayı amaçlamaktadır. Önümüzdeki yıllarda hayata geçirilmesi planlanan YI-BHÇ projesinde kütle merkezi enerjisi 14 TeV ve yıllık toplam ışık değeri 350 fb^{-1} olan dairesel bir proton-proton çarpıştırıcısı önerilmiştir [51]. YI-BHÇ projesi baz alınarak yapılan teorik bir çalışmada proton halkasına teğetsel olarak bir müon hızlandırıcısının kurulması önerilmiştir. Bu sayede pp çarpışmalarına ek olarak μp çarpışma opsiyonu da elde edilmiş olacaktır. Farklı müon demeti enerjileri için yapılan çalışmada üç tane μp çarpıştırıcısı önerilmiş ve bu çarpıştırıcılara ait ışıklık gibi temel parametreler hesaplanmıştır [52]. Bu parametreler Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. YI-BHÇ bazlı müon-proton çarpıştırıcılara ait temel parametreler.

$E_p [\text{TeV}]$	$E_\mu [\text{TeV}]$	$\sqrt{s} [\text{TeV}]$	Anlık Işıklık [$10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$]	Yıllık Işıklık [$\text{fb}^{-1} \text{ y}^{-1}$]
7	0,75	4,58	1,4	14
7	1,5	6,48	2,1	21
7	3	9,16	1,5	15

Ayar etkileşimleri vasıtasıyla müon+foton son durumlu kanala bozunan uyarılmış müonların kütlelerine CMS deneyinden 3,8 TeV’lik deneysel bir kütle limiti getirilmiştir. Tablo 1’deki YI-BHÇ bazlı müon-proton çarpıştırıcılarından kütle merkezi enerjileri 4,58 ve 6,48 TeV olan çarpıştırıcılar hesaplamalarımızda dikkate alınmamıştır. Çünkü uyarılmış müonun kütlelerine getirilen deneysel limitin 3,8 TeV olmasından dolayı, bu çarpıştırıcılarda uyarılmış müonun gözlemi (3σ) ve keşfedilmesi (5σ) için yeterli parametre uzayı kalmamaktadır. Bununla ilgili detaylı bilgi olarak bu makalede 9,16 TeV kütle merkezli YI-BHÇ bazlı müon-proton çarpıştırıcısında, $\Lambda = 10 \text{ TeV}$ durumunda uyarılmış müonlar ancak 5565 GeV’e kadar keşfedilebilecektir (5σ). Tablo 1’deki 4,58 ve 6,48 TeV kütle merkezi enerjili çarpıştırıcıların uyarılmış müonları keşif değerleri 9,16 TeV enerjili YI-BHÇ’den çok daha az olacağı için, bu çalışmada Tablo 1’deki çarpıştırıcılardan sadece kütle merkezi enerjisi 9,16 TeV olan μp çarpıştırıcısı tercih edilmiştir.

YI-BHÇ bazlı müon-proton çarpıştırıcılarında spin-1/2 uyarılmış müonların keşif, gözlem ve dışarlama değerlerinin araştırıldığı bu çalışmanın ikinci kısmında, uyarılmış müonların iki farklı etkileşim türüne ait etkin Lagranjiyen ifadeleri verilerek bozunum genişliği, tesir kesitleri ve sinyal-ardalan analizi yapılmıştır. Analiz sonucu elde edilen bulgular üçüncü kısımda verilmiş olup, son kısımda ise sonuçlara yer verilmiştir.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

A. Uyarılmış Müonlar ve Etkileşim Lagranjiyenleri

Spin-1/2 uyarılmış leptonların ayar bozonları vasıtasıyla SM leptonlarıyla etkileşimlerini tanımlayan Lagranjiyen ifadesi Denklem 1’deki formülde verilmiştir [41, 53]. Bu denklemde Λ kompozitlik ölçeğini, L_L ve L_R^* sırasıyla sol-elli SM leptonu ve sağ elli uyarılmış leptonu temsil etmektedir. σ ifadesi, γ^μ Dirac matrisini göstermek üzere $\sigma^{\mu\nu} = i(\gamma^\mu \gamma^\nu - \gamma^\nu \gamma^\mu)/2$ ile tanımlıdır. f ve f' boyutsuz serbest parametreleri, Y hiperyükü, $\vec{\tau}$ ise Pauli matrislerini, g ve g' bağlaşım sabitlerini, $\vec{W}_{\mu\nu}$ ve $B_{\mu\nu}$ ise alan şiddeti tensörlerini göstermektedir.

$$L_A = \frac{1}{2\Lambda} \bar{L}_R^* \sigma^{\mu\nu} \left[f g \frac{\vec{\tau}}{2} \cdot \vec{W}_{\mu\nu} + f' g' \frac{Y}{2} B_{\mu\nu} \right] L_L + h.c. \quad (1)$$

Uyarılmış leptonlar kontak etkileşim olarak adlandırılan bir başka mekanizmayla da etkileşime girebilir. Dörtlü fermiyon kontak etkileşimini tanımlayan Lagranjiyen ifadesi Denklem 2 ve 3’de verilmiştir [41, 53]. Bu denklemlerde Λ kompozitlik skalasını, $g_*^2 = 4\pi$ olmak üzere g_* etkileşim sabitini, j_μ sol-elli akımları, $\eta_L, \eta'_L, \eta''_L$ ise bu akımlara ait katsayıları göstermektedir. Bu çalışmada bu katsayılar için $\eta_L = \eta'_L = \eta''_L = 1$ değeri kullanılmıştır. f ve f^* ise sırasıyla SM ve uyarılmış fermiyon alanlarını temsil etmektedir.

$$L_K = \frac{g_*^2}{\Lambda^2} \frac{1}{2} j^\mu j_\mu \quad (2)$$

$$j_\mu = \eta_L \bar{f}_L \gamma_\mu f_L + \eta'_L \bar{f}_L^* \gamma_\mu f_L^* + \eta''_L \bar{f}_L^* \gamma_\mu f_L + h.c. + (L \rightarrow R) \quad (3)$$

Λ kompozitlik skalası, her iki Lagranjiyen ifadesinde de ters orantılıdır. L_A ayar etkileşim Lagranjiyeni Λ ile, L_K kontak etkileşim Lagranjiyeni ise Λ^2 ile ters orantılıdır. Bu yüzden yüksek Λ değerlerinde ayar, düşük Λ değerlerinde ise kontak etkileşim mekanizmasının baskın olacağı beklenmektedir.

B. Bozunum Genişliği ve Tesir Kesitleri

Denklem 1’de Lagranjiyen ifadesi verilen ayar etkileşimlerine göre uyarılmış müonlar için üç bozunum kanalı mümkündür. Uyarılmış müonlar foton kanalına $\mu^* \rightarrow \mu\gamma$, Z-kanalına $\mu^* \rightarrow \mu Z$ ve W-kanalına ise $\mu^* \rightarrow$

νW şeklinde bozunur. SM leptonlarının kütlelerini ihmal edersek bu kanalların bozunum genişliğini veren analitik formül Denklem 4'de verilmiştir.

$$\Gamma(l^* \rightarrow lV) = \frac{\alpha m^{*3}}{4\Lambda^2} f_V^2 \left(1 - \frac{m_V^2}{m^{*2}}\right)^2 \left(1 + \frac{m_V^2}{2m^{*2}}\right) \quad (4)$$

Bu denklemde m_V ayar bozonlarının kütlelerini, m^* uyarılmış müonun kütlelerini, V ayar bozonlarını, f_V ise etkileşim sabitini ifade etmektedir. Etkileşim sabitinin formülü γ , Z ve W için sırasıyla Denklem 5, 6 ve 7'de ayrıca verilmiştir.

$$f_Y = fT_3 + f' \frac{Y}{2} \quad (5)$$

$$f_Z = fT_3 \cos^2 \theta_W - f' \frac{Y}{2} \sin^2 \theta_W \quad (6)$$

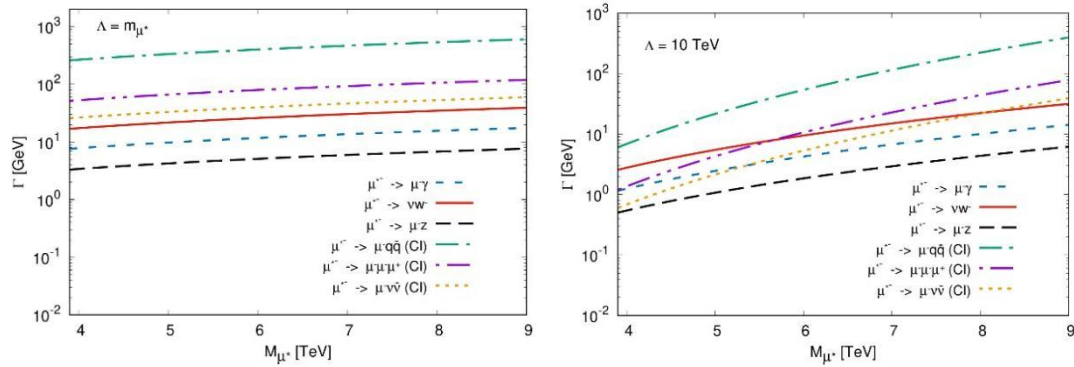
$$f_W = \frac{f}{\sqrt{2}} \quad (7)$$

Bu denklemlerde T_3 zayıf izospinin üçüncü bileşenini göstermekte olup uyarılmış müon için $T_3 = -1/2$ değerine, Y hiperyük olup $Y = -1$ değerine sahiptir. θ_W ise zayıf karışım açısını temsil etmektedir.

Uyarılmış müonlar kontak etkileşim mekanizmasına göre yine üç tane bozunum kanalına sahiptir. Bu bozunum kanalları $\mu^* \rightarrow \mu q \bar{q}$, $\mu^* \rightarrow \mu^- \mu^- \mu^+$, $\mu^* \rightarrow \mu \nu \bar{\nu}$ şeklinde sıralanabilir. Burada q ve $\bar{q}$ sırasıyla kuark ve anti-kuarkları temsil etmektedir. Denklem 8, kontak etkileşimli bu kanalların bozunum genişliğini veren analitik formülü göstermektedir. Bu denklemde l^* uyarılmış leptonu, l SM leptonunu, F ve $\bar{F}$ sırasıyla fermiyon ve anti-fermiyonları, m_l^* uyarılmış leptonun kütlelerini, Λ kompozitlik skalasını göstermektedir. N'_c renk faktörünü temsil etmekte olup değeri leptonlar için 1, kuarklar için 3'tür. S' kombinatoriyal faktördür, değeri $f \neq l$ için 1, $f = l$ için lepton durumunda 4/3, kuark durumunda ise 2'dir.

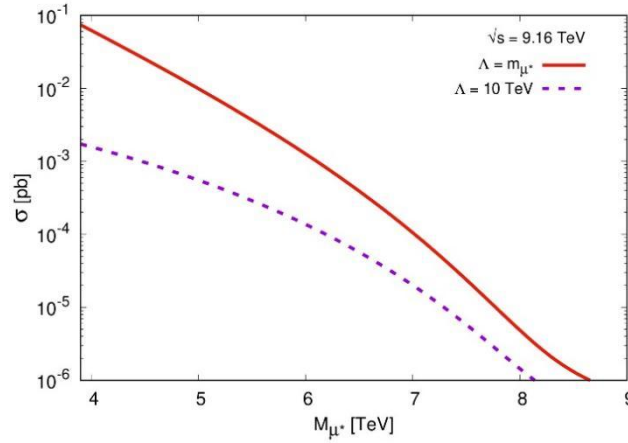
$$\Gamma(l^* \rightarrow lF\bar{F}) = \frac{m_l^*}{96\pi} \left(\frac{m_l^*}{\Lambda}\right)^4 N'_c S' \quad (8)$$

Uyarılmış müonlara ait nümerik hesaplamalar yapabilmek için CalcHEP benzetim programı kullanıldı [54]. Bu amaçla, Denklem 1 ve 2'deki Lagranjiyenler ve LanHEP yazılımı [55] kullanılarak CalcHEP programı için gerekli model dosyası hazırlandı. Her iki etkileşimi içeren CalcHEP model dosyası sayesinde uyarılmış müonlara ait bozunum genişliği ve tesir kesiti hesaplamaları yapıldı. İlk olarak her iki etkileşimdeki olası altı kanala ait bozunum genişliği hesaplamaları yapıldı ve karşılaştırmak için aynı grafikte üst üste çizdirildi. Şekil 1, iki farklı Λ değeri için ($\Lambda = m_{\mu^*}$ ve $\Lambda = 10$ TeV) elde edilen kısmî bozunum genişliği grafiklerini göstermektedir.



Şekil 1. $\Lambda = m_{\mu^*}$ ve $\Lambda = 10$ TeV için uyarılmış müonun altı farklı bozunum kanalı için bozunum genişliğinin kütleyle değişim grafikleri

Şekil 1'deki grafikler incelendiğinde kontak etkileşime ait olan $\mu q \bar{q}$ kanalının en baskın bozunum kanalı olduğu görülmektedir. Fakat bu bozunum kanalının seçilmesi durumunda son durumda üç tane jet olacaktır. Bu jetler dedektörde büyük belirsizliklere sahip olacağı için sinyali ardalardan ayırmamızı zorlaştıracaktır. νW^- ve $\mu \nu \bar{\nu}$ kanalları da baskın olan bozunum süreçleri arasındadır. Fakat bu iki bozunum kanalında ortaya çıkacak olan nötrinoların dedektörde gözlenememesinden dolayı bu iki kanalın çalışılması da oldukça zordur. μZ bozunum kanalına göre daha baskın diğer iki süreç $\mu \mu \mu^+$ ve $\mu \gamma$ bozunum kanallarıdır. Bu iki kanalın son durum parçacıkları dedektörde daha düşük belirsizliklere sahip olacağı için diğerlerine göre daha avantajlıdır. $\mu \gamma$ bozunum kanalı ise daha yüksek kompozitlik skalası değerlerine izin verdiği için [48] bu çalışmada $\mu^* \rightarrow \mu \gamma$ bozunum süreci seçilmiştir. Bu yüzden sinyal sürecimiz $\mu p \rightarrow \mu^* j + X \rightarrow \mu \gamma j + X$ olarak belirlenmiştir.



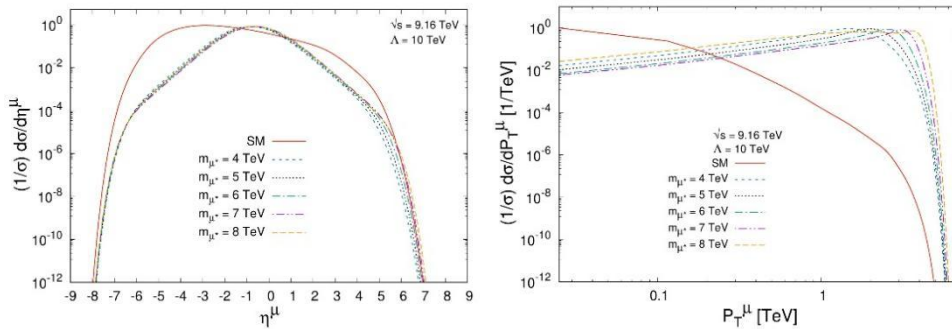
Şekil 2. Kütle merkezi enerjisi 9,16 TeV olan YI-BHÇ bazlı müon-proton çarpıştırıcısında, $\Lambda = m_{\mu^*}$ ve $\Lambda = 10$ TeV değerleri için elde edilen tesir kesitlerinin kütleyle göre değişim grafikleri

Kütle merkezi enerjisi 9,16 TeV olan μp çarpıştırıcısı için $\mu p \rightarrow \mu^* j + X \rightarrow \mu \gamma j + X$ sinyal sürecine ait tesir kesiti değerleri hesaplandı. Bu hesaplamalarda CT10 kuark dağılım fonksiyonları kullanılmıştır [56]. Kompozitlik skalasının $\Lambda = m_{\mu^*}$ ve $\Lambda = 10$ TeV'lik değerleri kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen grafik Şekil 2'de verilmiştir. Bu grafik incelendiğinde Λ değeri arttıkça tesir kesitinin azaldığı görülmektedir. Yıllık toplam ışınık değeri 15 fb^{-1} olan μp çarpıştırıcısı çalışmaya başladıktan sonraki ilk yılda, bu tesir kesitleriyle yeterli miktarda uyarılmış müon olay sayısına ulaşabilecektir.

C. Sinyal ve Ardalan Analizi

Çalışmanın bu kısmında uyarılmış müonlar için sinyal-ardalan analizi yapılmıştır. Önceki bölümde de belirtildiği gibi YI-BHÇ bazlı müon-proton çarpıştırıcısında üretilen uyarılmış müonlara ait sinyal süreci $\mu p \rightarrow \mu^* j + X \rightarrow \mu \gamma j + X$ şeklindedir. Buradaki j harfi jetleri temsil etmekte olup $u, \bar{u}, d, \bar{d}, c, \bar{c}, s, \bar{s}, b, \bar{b}$ kuark ve anti-kuarklarını içermektedir. Uyarılmış müon sinyaline karşılık gelen SM ardalan süreci ise $\mu p \rightarrow \mu \gamma j + X$ şeklindedir.

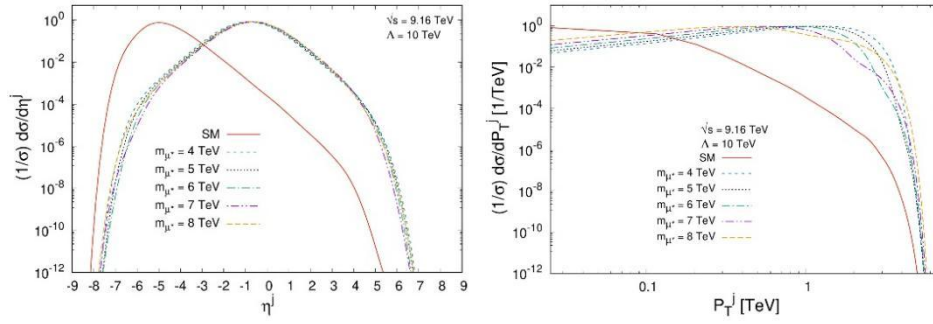
Sinyal-ardalan analizinde ilk olarak son durum parçacıkları olan müon, foton ve jetlere ait enine momentum (P_T) ve psedö-rapidity (η) dağılımlarına bakıldı. Hem sinyal hem de ardalan için elde edilen bu dağılımları karşılaştırmak için aynı grafikte çizdirildi. Enine momentum dağılımlarında müon, foton ve jetlere 25 GeV'lik bir sınırlama uygulanmıştır. Bu sınırlama parçacıkların dedektörde daha hassas ölçümünü sağlayacaktır. Şekil 3, müon parçacığına ait normalize olmuş η ve P_T dağılımlarını göstermektedir.



Şekil 3. YI-BHÇ bazlı müon-proton çarpıştırıcısında sinyal ve ardalan için müon son durum parçacığına ait psedö-rapidity ve enine momentum dağılımları.

Kompozitlik skalasının 10 TeV'e eşit olduğu durum için elde edilen bu dağılımlarda, uyarılmış müon sinyali için $m_{\mu^*} = 4, 5, 6, 7$ ve 8 TeV'lik kütle değerleri kullanılmıştır. Uyarılmış müon sinyalini ön plana çıkarmak için ardalanı baskılayacak sınırlamalar uygulamamız gerekmektedir. Müon'a ait η grafiğinde $-2,5 < \eta^\mu < 2,5$ ve P_T grafiğinde $P_T^\mu > 200$ GeV sınırlamalarını seçersek bu durum uyarılmış müon sinyalini çok fazla etkileyecektir. Fakat ardalanı ise büyük oranda azaltacaktır.

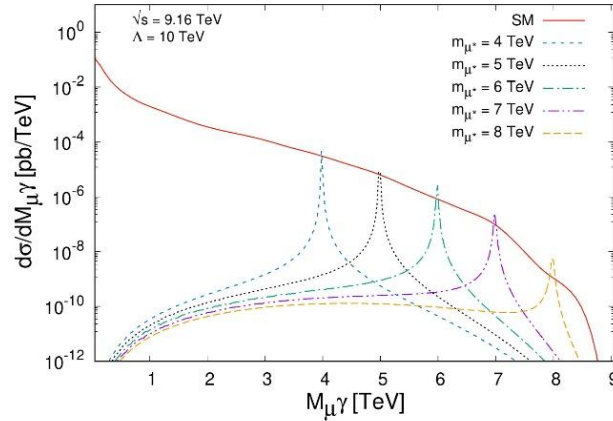
Diğer bir son durum parçacığı olan fotona ait dağılımlar müonların dağılımlarıyla benzer davranış gösterdiği için fotona ait η ve P_T dağılım grafikleri burada gösterim olarak verilmemiştir. Dağılım grafikleri benzer olduğu için seçilen sınırlamalar da aynıdır.



Şekil 4. YI-BHÇ bazlı müon-proton çarpıştırıcısında sinyal ve ardaan için jet son durumuna ait psedö-rapidity ve enine momentum dağılımları.

Son durumda bulunan üçüncü parçacık olan jetlere ait dağılımlar ise Şekil 4’de gösterilmiştir. Buradaki sinyal ve ardaan dağılımları incelendiğinde sinyali ön plana çıkarmak için en uygun seçim $-3 < \eta^j < 3$ ve $P_T^j > 200$ GeV sınırlamaları olacaktır.

Sinyal-ardalan analizinde son durum parçacıklarına ait η ve P_T dağılımlarına ek olarak müon-foton değişmez kütle dağılımları incelenmiştir. Şekil 5, sinyal ve ardalana ait değişmez kütle dağılımlarını göstermektedir. Bu dağılımlar incelendiğinde ardalana ait dağılımın oldukça etkili olduğu görülmektedir. Uyarılmış müon sinyaline ait değişmez kütle dağılımları ardaan dağılımını ancak pik değerlerinde geçmektedir. Dolayısıyla ardaanı bastırmak için $M_{\mu^*} - 2\Gamma_{\mu^*} < M_{\mu\gamma} < M_{\mu^*} + 2\Gamma_{\mu^*}$ şeklinde bir değişmez kütle sınırlaması uygulamak uygun olacaktır. Burada Γ_{μ^*} uyarılmış müona ait bozunum genişliğidir.

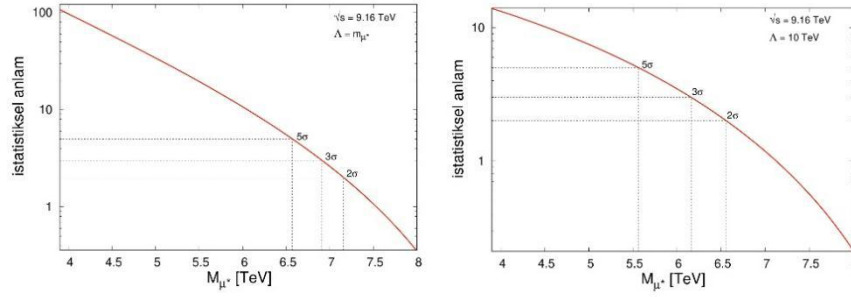


Şekil 5. YI-BHÇ bazlı müon-proton çarpıştırıcısında sinyal ve ardaan için uyarılmış müonun değişmez kütle grafiği.

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Önceki alt-bölümde yapılan sinyal-ardalan analizi sonucunda ardaanı bastırıp sinyali ön plana çıkartan en uygun keşif sınırlamaları belirlenmiştir. Belirlenen bu sınırlamalar hem de ardaan için uygulanarak uyarılmış müona ait İstatistiksel Anlamlılık (İA) hesapları yapılmıştır. Bu hesaplama için kütle merkezi enerjisi 9,16 TeV olan μp çarpıştırıcısının 15 fb^{-1} olan yıllık ışınlık değeri ve Denklem 9’da verilen formül kullanılmıştır [57]. Denklem 9’daki S ve B harfleri sırasıyla sinyal ve ardaan’a ait olay sayılarını temsil etmektedir.

$$\text{IA} = \sqrt{2[(S + B) \ln \left(1 + \left(\frac{S}{B}\right)\right)] - S} \quad (9)$$



Şekil 6. YI-BHÇ bazlı müon-proton çarpıştırıcısında $\Lambda = m_{\mu^*}$ ve $\Lambda = 10$ TeV için istatistiksel anlamlılığın uyarılmış müonun kütlesine göre değişim grafikleri.

Hesaplamalar sonucunda elde edilen grafikler Şekil 6’da verilmiştir. Λ ’nın uyarılmış müonun kütlesine göre değişimini ifade eden bu grafikler kompozitlik skalasının $\Lambda = m_{\mu^*}$ ve $\Lambda = 10$ TeV’lik değerleri için elde edilmiştir. Bu grafiklere göre kütle merkezi enerjisi 9,16 TeV olan μp çarpıştırıcısı $\Lambda = m_{\mu^*}$ durumunda uyarılmış müonları 6570 GeV’e kadar keşif, 6910 GeV’e kadar gözlem ve 7156 GeV’e kadar dışarlayabilecektir. $\Lambda = 10$ TeV durumunda ise uyarılmış müonları 5565 GeV’e kadar keşif (5σ), 6160 GeV’e kadar gözlem (3σ) ve 6560 GeV’e kadar dışarlama (2σ) potansiyeline sahip olacaktır.

IV. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada kütle merkezi enerjisi 9,16 TeV ve yıllık ışınlık değeri 15 fb^{-1} olan YI-BHÇ bazlı bir müon-proton çarpıştırıcısında uyarılmış müonların kontak etkileşim yöntemiyle üretilip müon+foton sonlu duruma bozunumu incelenmiştir. Yapılan sinyal-ardalan analizinde son durum parçacıkları olan müon, foton ve jet’e ait enine momentum ve psedö-rapidity dağılımlarında, ve müon+foton değişmez kütle dağılımlarında en uygun sınırlamalar belirlenmiştir. Bu sınırlamaların hem sinyal hem de ardalana uygulanmasıyla çarpıştırıcının uyarılmış müonu keşfetme (5σ), gözlemlleme (3σ) ve dışarlama (2σ) kütle limitleri tespit edilmiştir.

Bu sonuçlara göre YI-BHÇ bazlı μp çarpıştırıcısı uyarılmış müonları $\Lambda = m_{\mu^*}$ için 6570 GeV ve $\Lambda = 10$ TeV için 5565 GeV’e kadar keşfedebilecektir. Sonuç olarak YI-BHÇ bazlı μp çarpıştırıcısı uyarılmış müon üretimini araştırma çalışmalarında iyi bir potansiyele sahip olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Aad, G., Abajyan, T., Abdallah, J., Khalek, S. A., Abdelalim, A. A., vd. (2012). Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC. *Physics Letters B*, 716 (1), 1-29.
- [2] Chatrchyan, S., Khachatryan, V., Sirunyan, A.M., Tumasyan, A., Adam, W., vd. (2012). Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC. *Physics Letters B*, 716 (1), 30-61.
- [3] Pati, J. C., Salam, A. (1974). Lepton number as the fourth color. *Physical Review D*, 10, 275-289.
- [4] Pati, J. C., Salam, A., Strathdee, J. A. (1975). Are quarks composite?. *Physics Letters B*, 59 (3), 265-268.
- [5] Harari, H. (1979). A schematic model of quarks and leptons. *Physics Letters B*, 86 (1), 83-86.
- [6] Shupe, M. A. (1979). A composite model of leptons and quarks. *Physics Letters B*, 86 (1), 87-92.
- [7] Terazawa, H., Chikashige, Y., Akama, K. (1977). Unified model of the Nambu-Jona-Lasinio type for all elementary-particle forces. *Physical Review D*, 15 (2), 480-487.
- [8] Terazawa, H. (1980). Subquark model of leptons and quarks. *Physical Review D*, 22 (1), 184-199.
- [9] Terazawa, H., Yaseu, M., Akama, K., Hayashi, M. (1982). Observable effects of the possible sub-structure of leptons and quarks. *Physics Letters B*, 112 (4-5), 387-392.
- [10] Terazawa, H. (1983). A fundamental theory of composite particles and fields. *Physics Letters B*, 133 (1-2), 57-60.
- [11] Fritzsch, H., Mandelbaum, G. (1981). Weak interactions as manifestations of the substructure of leptons and quarks. *Physics Letters B*, 102 (5), 319-322.
- [12] Lyons, L. (1983). An introduction to the possible substructure of quarks and leptons. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 10, 227-304.
- [13] Eichten, E. J., Lane, K. D., Peskin, M. E. (1983). New tests for quark and lepton substructure. *Physical Review Letters*, 50, 811-814.
- [14] D’Souza, I. A., Kalman, C. S. (1992). Preons: Model of leptons, quarks, and gauge bosons as composite objects. *World Scientific*, Singapore, 120.
- [15] Çelikel, A., Kantar, M., Sultansoy, S. (1998). A search for sextet quarks and leptogluons at the LHC. *Physics Letters B*, 443 (1-4), 359-364.

- [16] Terazawa, H., Yasue, M. (2014). Composite higgs boson in the unified subquark model of all fundamental particles and forces. *Journal of Modern Physics*, 5 (5), 205-208.
- [17] Terazawa, H., Yasue M. (2016). Excited gauge and higgs bosons in the unified composite model. *Nonlinear Phenomena in Complex Systems*. 19 (1), 1-6.
- [18] Fritzsch, H. (2016). Composite weak bosons at the large hadronic collider. *Modern Physics Letters A*, 31 (20), 1630019.
- [19] Kaya, Ü., Öner, B. B., Sultanov, S. (2018). A minimal fermion-scalar preonic model. *Turkish Journal of Physics*, 42 (3), 235-241.
- [20] Low, F. E. (1965). Heavy electrons and muons. *Physical Review Letters*, 14, 238-239.
- [21] Renard, F. M. (1983). Excited quarks and new hadronic states. *II Nuova Cimento A*, 77 (1), 1-20.
- [22] Rujula, A., Maiani, L., Petronzio, R. (1984). Search for excited quarks. *Physics Letters B*, 140 (3-4), 253-258.
- [23] Kühn, J., Zerwas, P. (1984). Excited quarks and leptons. *Physics Letters B*, 147 (1-3), 189-196.
- [24] Tosa, Y., Marshak, R. E. (1985). Exotic fermions. *Physical Review D*, 32 (3), 774-780.
- [25] Cakir, O., Mehdiyev, R. R. (1999). Excited quark production at the CERN LHC. *Physical Review D*, 60 (3), 032004.
- [26] Cakir, O., Leroy, C., Mehdiyev, R. R. (2000). Search for excited quarks with the ATLAS experiments at the CERN LHC: Double jets channel. *Physical Review D*, 62 (11), 114018.
- [27] Cakir, O., Leroy, C., Mehdiyev, R. R. (2001). Search for excited quarks with the ATLAS experiments at the CERN LHC: W/Z+ channel. *Physical Review D*, 63 (9), 094014.
- [28] Eboli, O. J. P., Lietti, S. M., Mathews, P. (2002). Excited leptons at the CERN large hadron collider. *Physical Review D*, 65 (7), 075003.
- [29] Cakir, O., Yilmaz, A., Sultansoy, S. (2004). Single production of excited electrons at future e^-e^+ , ep and pp colliders. *Physical Review D*, 70 (7), 075011.
- [30] Çakır, O., Ozansoy, A. (2008). Search for excited spin-3/2 and spin-1/2 leptons at linear colliders. *Physical Review D*, 77 (3), 035002.
- [31] Caliskan, A. (2017). Excited neutrino search potential of the FCC-based electron-hadron colliders. *Advance in High Energy Physics*, 2017, 4726050.
- [32] Caliskan, A., Kara, S. O., ve Ozansoy, A. (2017). Excited muon searches at the FCC-based muon-hadron colliders. *Advances in High Energy Physics*, 2017, 1540243.
- [33] Caliskan, A. (2018). Single production of the excited muons at the SPPC-based ultimate μp collider. *Turkish Journal of Physics*, 42 (4), 343-349.
- [34] Caliskan, A. (2019). Search for excited muons at the future SPPC-based muon-proton colliders. *Acta Physica Polonica B*, 50, 1409-1422.
- [35] Caliskan, A. (2020). Single production of composite electrons at the future SPPC-based lepton-hadron colliders. *Canadian Journal of Physics*, 98 (4), 1-21.
- [36] Caliskan, A., ve Kara, S. O. (2018). Single production of the excited electrons in the future FCC-based lepton-hadron colliders. *International Journal of Modern Physics A*, 33 (24) 1850141.
- [37] Günaydin, Y. O., Sahin, M., ve Sultansoy, S. (2018). Resonance production of excited u quark at FCC-based γp colliders. *Acta Physica Polonica B*, 10 (49), 1763-1779.
- [38] Sahin, M., Aydin, G., ve Günaydin, Y. O. (2019). Excited quarks production at FCC and SppC pp colliders. *International Journal of Modern Physics A*, 34 (29), 1950169.
- [39] Sahin, M., ve Caliskan, A. (2023). Excited muon production in muon colliders via contact interaction. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, 50 (2), 025002.
- [40] Akay, A. N., Günaydin, Y. O., Sahin, M., ve Sultansoy, S. (2019). Search for excited u and d quarks in dijet final states at future pp colliders. *Advances in High Energy Physics*, 2019, 9090785.
- [41] Hagiwara, K., Komamiya, S., Zeppenfeld, D. (1985). Excited lepton production at LEP and HERA. *Zeitschrift für Physik C – Particles and Fields*, 29, 115-122.
- [42] Adloff, C., Andreev, V., Andrieu, B., Arkadov, V., Astvatsatourov, A., vd. (2000). A search for excited fermions at HERA. *The European Physical Journal C*, 17, 567-581.
- [43] Chekanov, S., Derrick, M., Krakauer, D., Magill, S., Musgrave, B., vd. (2002). Searches for excited fermions in ep collisions at HERA. *Physics Letters B*, 549 (1-2), 32-47.
- [44] Chatrchyan, S., Khachatryan, V., Sirunyan, A. M., Tumasyan, A., Adam, W., vd. (2011). Search for resonances in the dijet mass spectrum from 7 TeV pp collision at CMS. *Physics Letters B*, 704 (3), 123-142.
- [45] Aad, G., Abajyan, T., Abbott, B., Abdallah, J., Khalek, S. A., vd. (2014). Search for new phenomena in photon+jet events collected in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector. *Physics Letters B*, 728, 562-578.
- [46] Acciarri, M., Achard, P., Adriani, O., Benitez, M. A., Alcaraz, J., vd. (2001). Search for excited leptons in e^+e^- interactions at $s=192-202$ GeV. *Physics Letters B*, 502 (1-4), 37-50.

- [47] Khachatryan, V., Sirunyan, A. M., Tumasyan, A., Adam, W., Bergauer, T., vd. (2014). Search for excited quarks in the $\gamma + \text{jet}$ final state in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV. *Physics Letters B*, 738, 274-293.
- [48] Sirunyan, A. M., Tumasyan, A., Adam, W., Ambrogio, F., Asilar, E., vd. (2019). Search for excited leptons in $l\bar{l}\gamma$ final states in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV. *Journal of High Energy Physics*, 2019 (15), 1-36.
- [49] Sirunyan, A. M., Tumasyan, A., Adam, W., Ambrogio, F., Bergauer, T., vd. (2020). Search for an excited lepton that decays via a contact interaction to a lepton and two jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV. *Journal of High Energy Physics*, 2020 (52), 1-39.
- [50] Alonso, I. B., Brüning, O., Fessia, P., Lamont, M., Rossi, L., Taviani, L., Zerlauth, M. (2020). Vol. 10: High-Luminosity Large Hadron Collider (HL-LHC). *Technical Design Report*. Geneva, CERN.
- [51] Benedikt, M., Schulte, D., Ziemmermann, F. (2015). Optimizing integrated luminosity of future hadron colliders. *Physical Review Accelerators and Beams*, 18 (10), 101002.
- [52] Ketenoğlu, B., Dağlı, B., Öztürk, A., Sultansoy, S. (2022). Review of muon-proton and muon-nucleus collider proposals. *Modern Physics Letters A*, 37 (38), 2230013.
- [53] Baur, U., Spira, M., Zerwas, P. M. (1990). Excited-quark and -lepton production at hadron colliders. *Physical Review D*, 42 (3), 815-824.
- [54] Belyaev, A., Christensen, N. D., Pukhov, A. (2013). CalcHEP 3.4 for collider physics within and beyond the Standard Model. *Computer Physics Communications*, 184, 1729-1769.
- [55] Semenov, A. (2016). LanHEP – A package for automatic generation of Feynman rules from the Lagrangian version 3.2. *Computer Physics Communications*, 201, 167-170.
- [56] Lai, H. L., Guzzi, M., Huston, J., Li, Z., Nadolsky, P. M., Pumplin, J., Yuan, C. P. (2010). New parton distributions for collider physics. *Physical Review D*, 82 (7), 074024.
- [57] Cowan, G., Cranmer, K., Gross, E., Vitells, O. (2011). Asymptotic formulae for likelihood-based tests of new physics. *The European Physical Journal C*, 71 (1554), 1-19.