

Left-Right Simetrik Modelde Sağ Elli W Bozonu Aracılığıyla Birinci Aile Majorana Nötrinosunun HE-LHC'de Üretilmesi

¹Necmi Erden, ¹Mithat Kaya, ²Mehmet Şahin

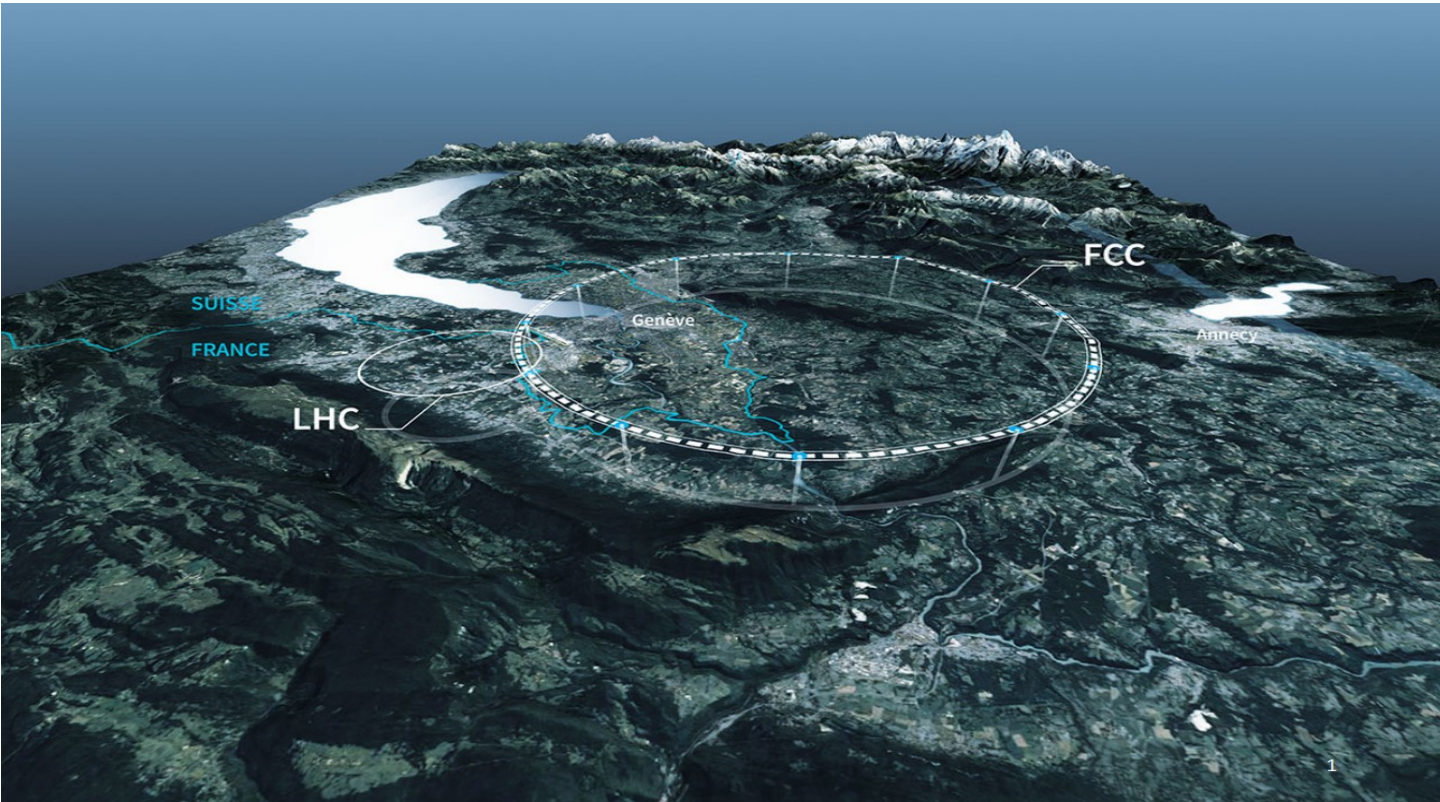
¹Marmara Üniversitesi

²Uşak Üniversitesi

Gelecek Nesil Hızlandırıcılar

CERN tarafından önerilen gelecekteki bir dairesel çarpıştırıcı

FCC-hh , HE-LHC, FCC-ee , FCC-eh:



Ref.1 : "Future Circular Collider conceptual layout", CERN, 2020. <https://fcc.web.cern.ch>

Proje	Tipi	Enerji (\sqrt{s})	Ana Hedef
FCC-ee	e^+e^-	90–365 GeV	Hassas ölçümler (Z, Higgs, top)
FCC-hh	pp	100 TeV	Yeni parçacık keşfi (BSM, WR, Z', SUSY)
FCC-eh	e^-p	~3.5–5 TeV	Proton yapısı, leptoquark arayışı
HE-LHC	pp	27 TeV	LHC sınırını aşmak, FCC öncesi adım

Ref.2 : FCC Conceptual Design Report (CDR) - CERN (2019)

Parameter	Unit	FCC-hh		HE-LHC	(HL-)LHC
Centre-of-mass energy	TeV	100		27	14
Peak luminosity per IP	$10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	5	30	16	(5, levelled) 1
Luminosity per year (160 days)	fb^{-1}	≥ 250	≥ 1000	500	(350) 55

Ref.3 : Eur. Phys. J. Special Topics 228, 1109{1382 (2019)

Standard Model

Standard Model of Elementary Particles

		three generations of matter (fermions)			interactions / force carriers (bosons)	
		I	II	III		
QUARKS	mass	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
	charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
	spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
		u up	c charm	t top	g gluon	H higgs
		$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
		$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	
		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
		d down	s strange	b bottom	γ photon	
LEPTONS	mass	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$	
	charge	-1	-1	-1	0	
	spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
		e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson	
		$< 1.0 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 80.433 \text{ GeV}/c^2$	
		0	0	0	± 1	
		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
		ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	

SCALAR BOSONS

Gauge Bosons
Vector Bosons

SM – LRSM FARKI

Özellik	Standart Model (SM)	Left-Right Simetrik Model (LRSM)
Gauge Grubu	$SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$	$SU(3)_C \times SU(2)_L \times SU(2)_R \times U(1)_{B-L}$
Gauge Bozonları	g (gluon), W^\pm , Z, γ	g, W_{L^\pm} , W_{R^\pm} , Z_L , Z_R , γ
Fermiyon Yapısı	Sol el dublet, sağ el singlet	Sol ve sağ el dubletler
Higgs Yapısı	1 Higgs dubleti	Higgs dubletleri/tripletleri
Lagranjiyen Terimleri	Gauge + Fermiyon + Higgs + Yukawa	Gauge + Fermiyon + Higgs + Yukawa (LR)
Sağ-elli zayıf etkileşim	Yok	Var ($SU(2)_R$ ile)
Neutrino kütlesi	Doğrudan açıklanamaz	Majorana kütlesi doğal açıklanır
Parite simetrisi	Bozulmuş	Yüksek enerjide korunur
Ekstra gauge bozonları	Yok	W_{R^\pm} , Z_R
B-L sayısı	Gömülü değil	Gauge simetri olarak yer alır

Standart Model (SM)

$$SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$$

→ Y = Hypercharge

→ Y sadece elektromanyetik yük ile ilişkilidir.

→ SM'de lepton sayısı korunur, Majorana terimleri yok

Left-Right Simetrik Model (LRSM)

$$SU(3)_C \times SU(2)_L \times SU(2)_R \times U(1)_{B-L}$$

→ B-L fiziksel anlam taşır

→ Lepton sayısı ihlali mümkündür

→ LRSM'de Majorana kütleler ve $\Delta L=2$ süreçler doğaldır

Ref. 4: G. Senjanovic & R. N. Mohapatra, "Exact Left-Right Symmetry and Spontaneous Violation of Parity", Phys. Rev. D12, 1502 (1975)

DOI: 10.1103/PhysRevD.12.1502

Proton-Proton Etkileşme Süreci

$$pp \rightarrow W_R^\pm, W_L^\pm \rightarrow e^\pm N_e \rightarrow e^\pm e^\pm jj$$

$$u + \bar{d} \rightarrow W_R^+ \quad \text{veya} \quad d + \bar{u} \rightarrow W_R^-$$

$$W_R^+ \rightarrow e^+ + N_e \quad (\text{ağır Majorana nötrino})$$

Majorana nötrino, kendi anti-parçacığı olduğundan hem e^+ hem de e^- oluşturabilir.

$$N_e \rightarrow e^+ + j + j \quad \text{veya} \quad N_e \rightarrow e^- + j + j$$

$$e^\pm e^\pm + jj \quad (2 \text{ lepton} + 2 \text{ jet})$$

Süreç	Leptonlar	Jet	MET	ΔL
$pp \rightarrow W^+ W^- \rightarrow e^+ e^- \nu \bar{\nu}$	e^+, e^-	0	✓ (nötrinolar)	0
$pp \rightarrow W_R^+ \rightarrow e^+ e^+ jj$	e^+, e^+	2	✗ (yok)	+2

Left-Right Simetrik Model

Standart Model (SM) Gauge Group

$$SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$$

Left-Right Symmetric Model (LRSM) Gauge Group

$$SU(3)_C \times SU(2)_L \times SU(2)_R \times U(1)_{B-L}$$

$$\mathcal{L}_{W_R-q-q'} = \frac{-\kappa_R^q g}{\sqrt{2}} \sum_{i,j=u,d,\dots} \bar{u}_i V_{ij}^{\text{CKM}'} W_{R\mu}^+ \gamma^\mu P_R d_j + \text{H.c.} \quad P_{R(L)} = \frac{1}{2}(1 \pm \gamma^5)$$

$$\mathcal{L}_{W_R-\ell-\nu/N} = \frac{-\kappa_R^\ell g}{\sqrt{2}} \sum_{\ell=e,\mu,\tau} \left[\sum_{m=1}^3 \overline{\nu}_m^c X_{\ell m} + \sum_{m'=1}^3 \overline{N}_{m'} Y_{\ell m'} \right] W_{R\mu}^+ \gamma^\mu P_R \ell^- + \text{H.c.}$$

Ref. 5 : R. N. Mohapatra & J. C. Pati, "A Natural Left-Right Symmetry", Phys. Rev. D 11, 2558 (1975)

DOI: 10.1103/PhysRevD.11.2558

MadGraph5_aMC@NLO Özellikleri

- MadGraph5_aMC@NLO = MadGraph5 + automated NLO + Pythia/Delphes entegrasyonu
- LO ve NLO süreç üretimi, parton shower, hadronizasyon ve detektör simülasyonu imkânı sağlar.
- SM ve SM ötesi fenomenoloji için gerekli tüm bileşenleri sağlayan bir pakettir.
- Tesir kesiti hesabı ve olay üretimi yapar.
- Parçacıkların momentumu, Enerjileri, Dağılıma açıları gibi bilgileri içeren dosyalar üretir (.lhe)



events.lhe.gz

Ref. 6: J. Alwall et al. The automated computation of tree-level and next-to-leading order differential cross sections, and their matching to parton shower simulations. <https://launchpad.net/mg5amcnlo>

Model Dosyamız- (Standard Model + Heavy Neutrino + Right-handed W boson with NLO support)

📁 **SM_HeavyN_WR_NLO/**

- |— **particles.py**
- |— **interactions.py**
- |— **couplings.py**
- |— **parameters.py**
- |— **lorentz.py**
- |— **vertices.py**
- |— **coupling_orders.py**
- |— **function_library.py**
- |— **nlo_operators.py (veya similar)**
- |— **QCD_UFO/ (QCD düzeltmeleri varsa)**
- |— **init.py**

Ref. 7 : Degrande, C., et al. "*UFO - The Universal FeynRules Output*", *Computer Physics Communications*, 183, 1201–1214 (2012).

DOI: [10.1016/j.cpc.2012.01.022](https://doi.org/10.1016/j.cpc.2012.01.022)

MG5_aMC kullanılarak yapılan olay üretimi, bozunma ve analiz süreçleri

- ✓ **param_card.dat**
- ✓ **run_card.dat**
- ✓ **madspin_card.dat**
- ✓ **delphes_card.dat**

Kart Dosyası	Ne Yapar?	Ne Zaman Kullanılır?
param_card.dat	Kütleler, kuplajlar, sabitler	Model parametrelerini değiştirmek için
run_card.dat	Enerji, olay sayısı, kesikler, PDF	Olay üretim ayarları
madspin_card.dat	Spin-korunmalı parçacık bozunmaları	WR \rightarrow e ⁺ N gibi bozunmalar için
delphes_card.dat	Detektör cevabı, parçacık verimlilikleri	Gerçekçi analiz ve son görünüm için

LO-NLO Hesaplamaları

Parçacık fiziğinde kullanılan pertürbasyon teorisinin yaklaşımlarını ifade eder.

LO

Ağaç seviyesi etkileşimleri içerir.

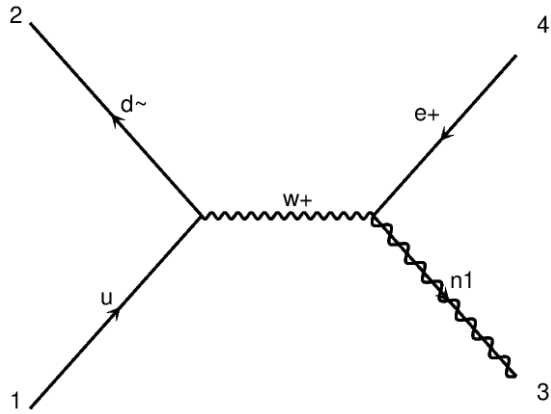
NLO

LO sürecine bir tane ek loop katkısının gelmesiyle oluşan etkileşimleri içerir.

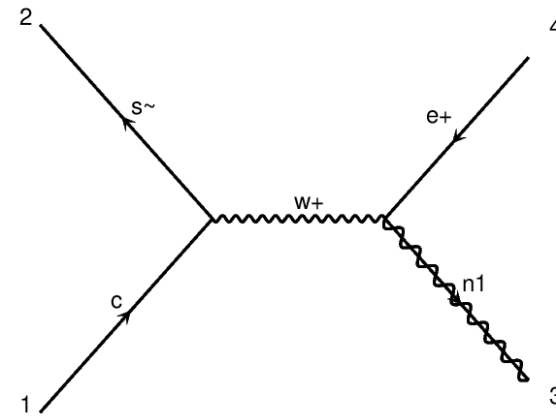
Hesaplamalarda Karşılaşılan Temel Hata Kaynakları

1. Deneysel Hatalar (Detektör Tabanlı)
 - . Dedektörün kendi ölçümünden kaynaklı hatalar (Sistemik ve istatistiksel)
2. Sistemik Hatalar
 - . PDF lerden kaynaklı hatalar
 - . Renormalization ve Faktörizasyon Scale'den kaynaklı

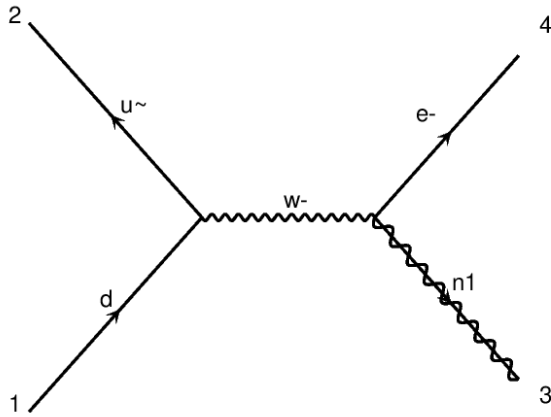
Feynman Diagramları - LO -



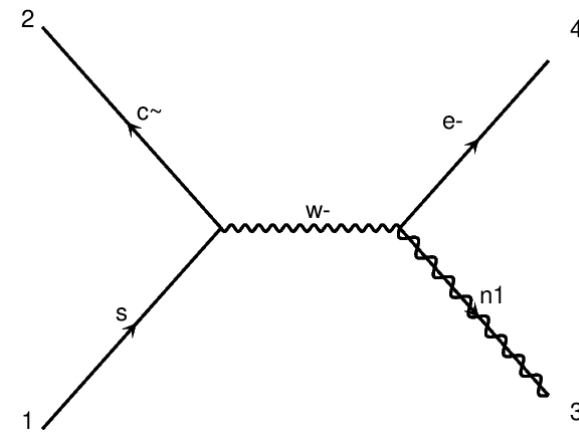
$p p \rightarrow w^+ \rightarrow e^+ \nu e^-$



$p p \rightarrow w^+ \rightarrow e^+ \nu e^-$

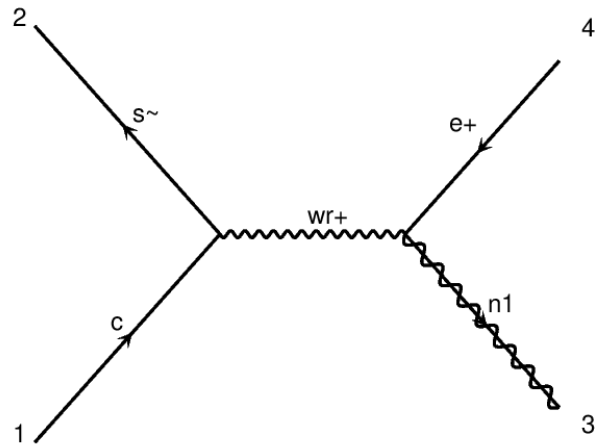


$p p \rightarrow w^- \rightarrow e^- \nu e^-$

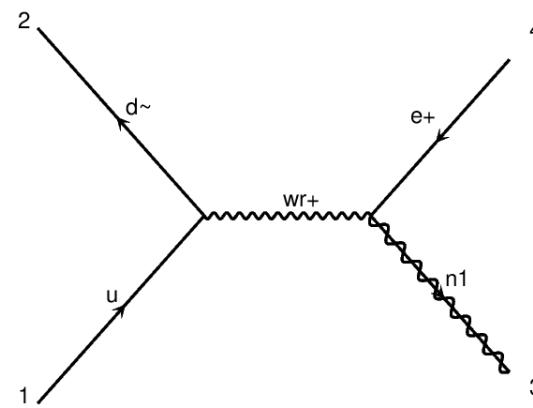


$p p \rightarrow w^- \rightarrow e^- \nu e^-$

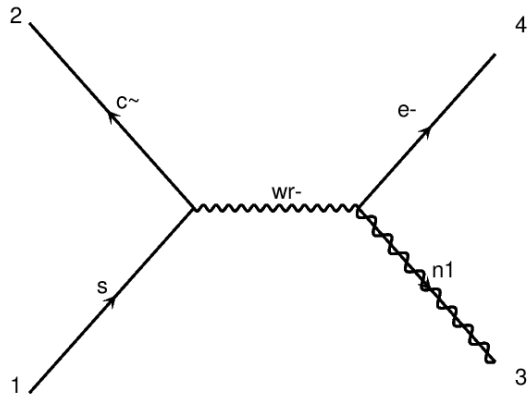
Feynman Diagramları - LO -



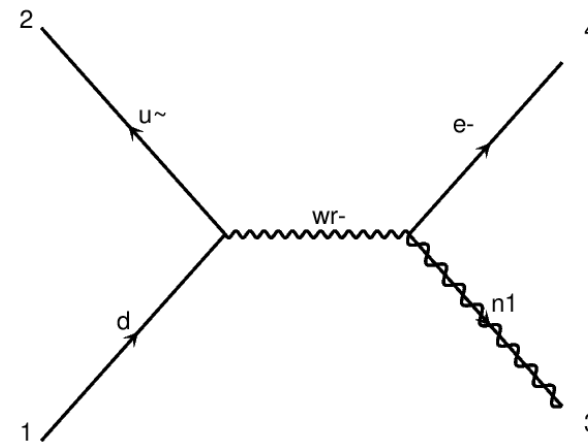
$p p > WR+ > e+ N1, (N1 > e+ jj)$



$p p > WR+ > e+ N1, (N1 > e+ jj)$

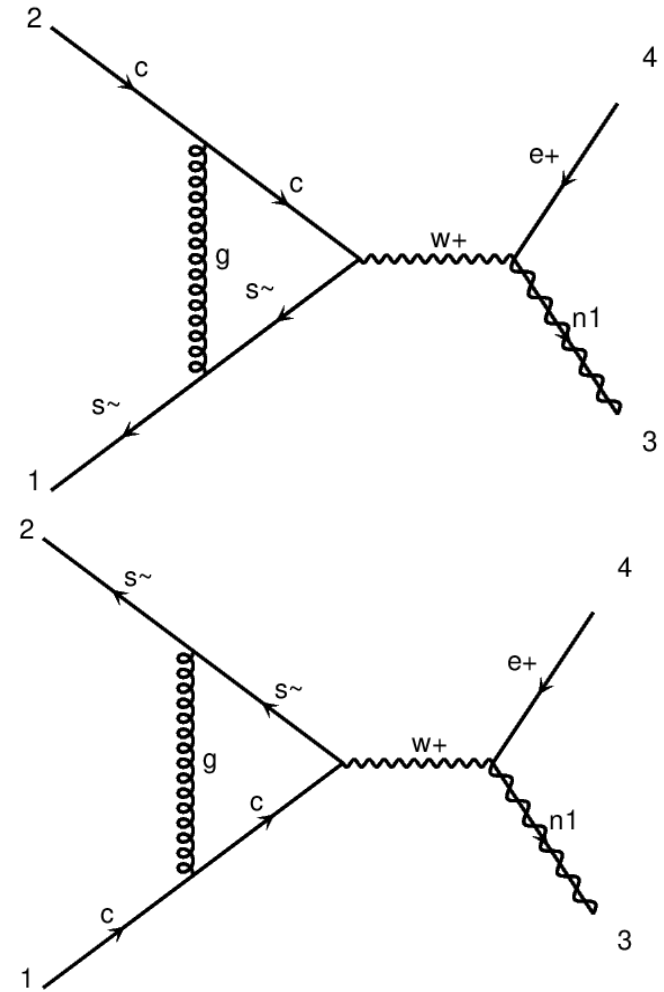
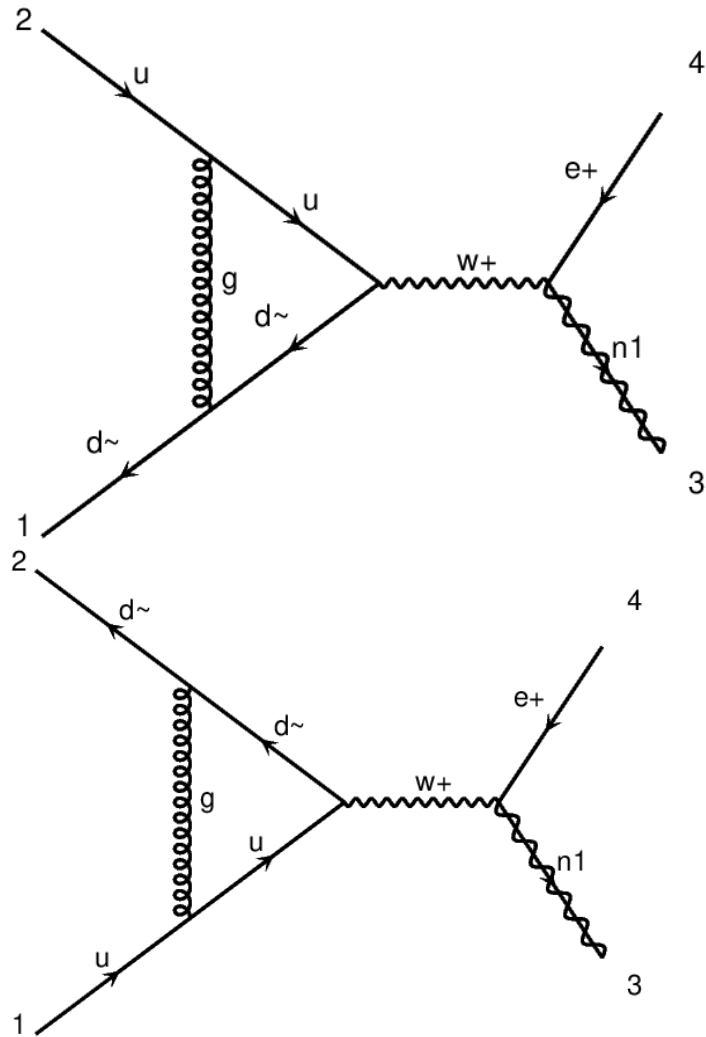


$p p > WR- > e- N1, (N1 > e- jj)$

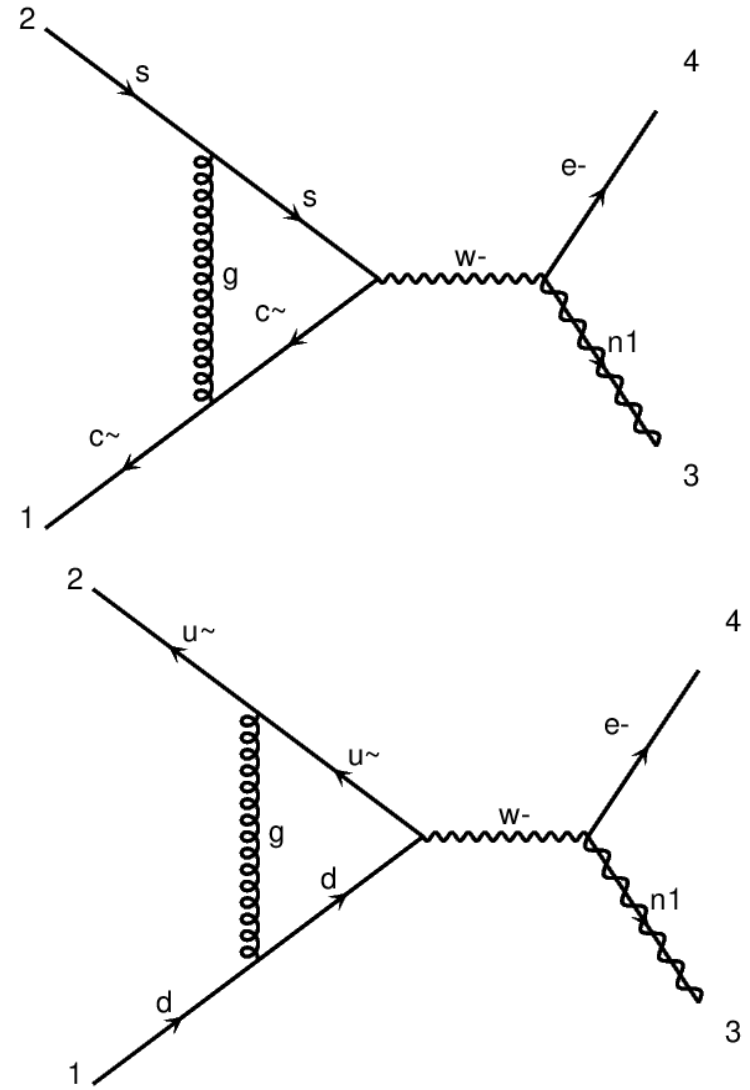
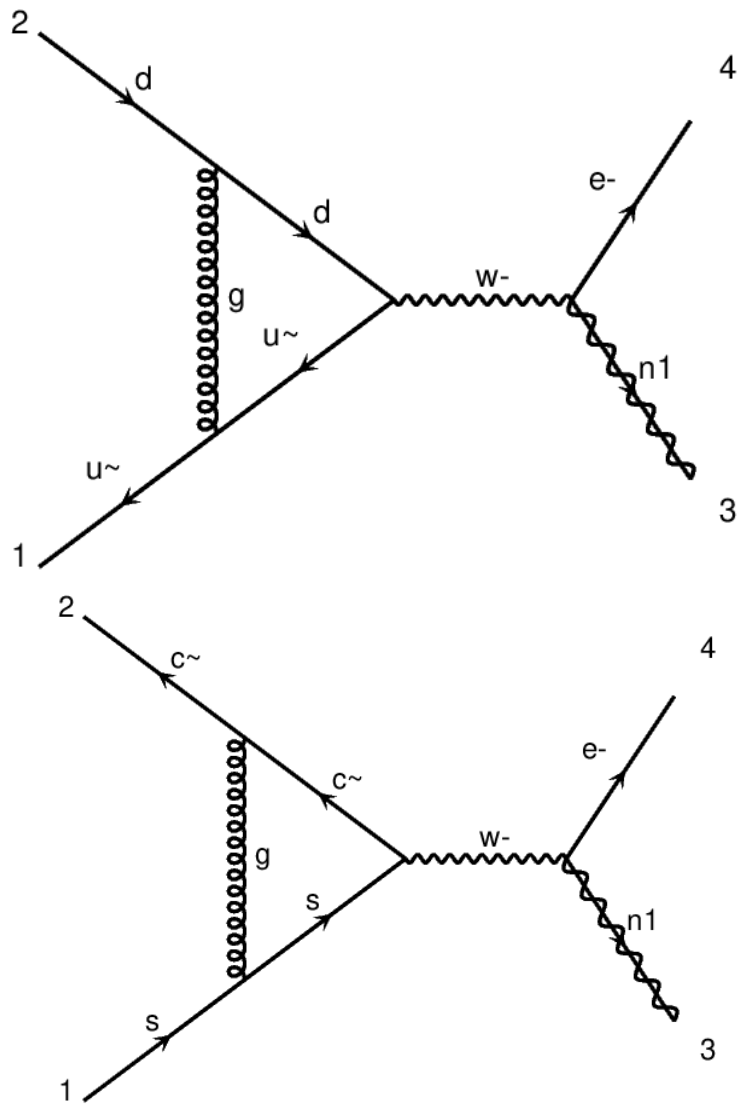


$p p > WR- > e- N1, (N1 > e- jj)$

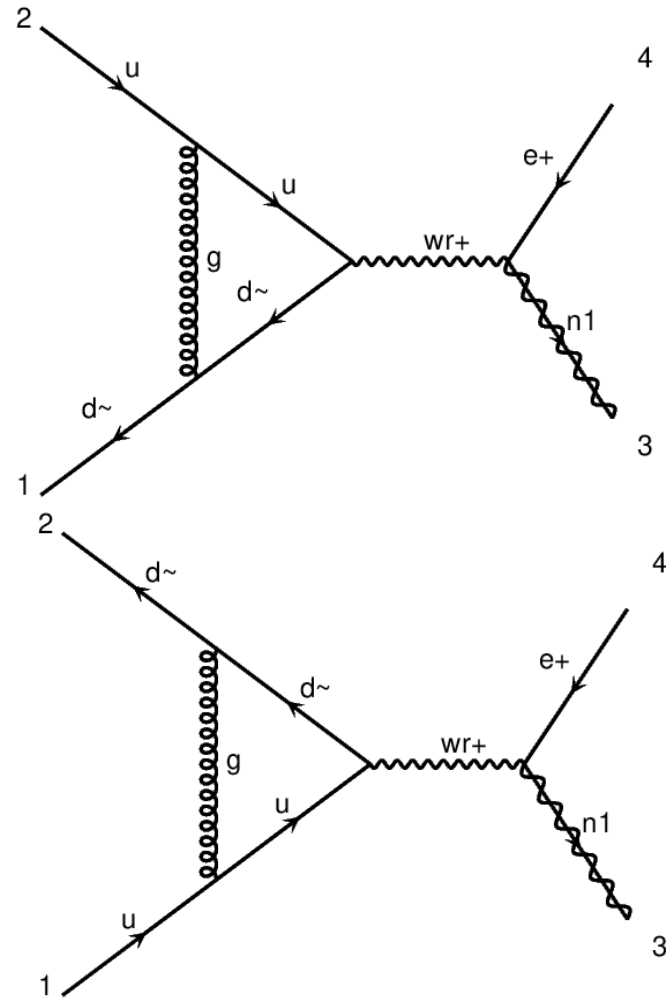
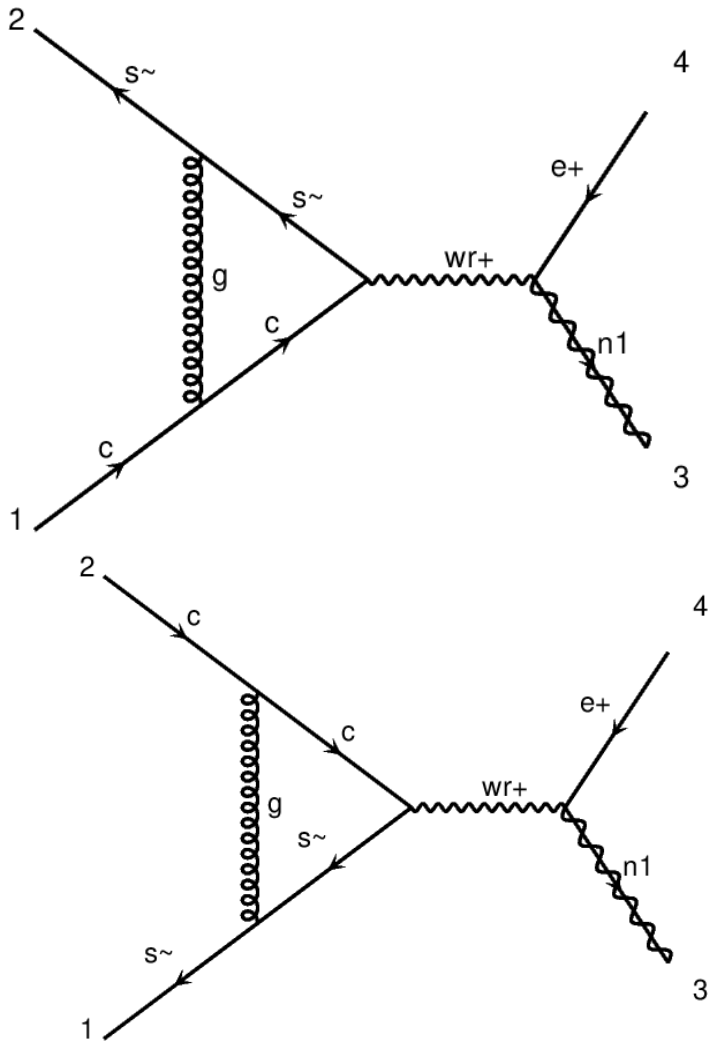
$p p \rightarrow w^+ \rightarrow e^+ \nu_e$ süreci - NLO -



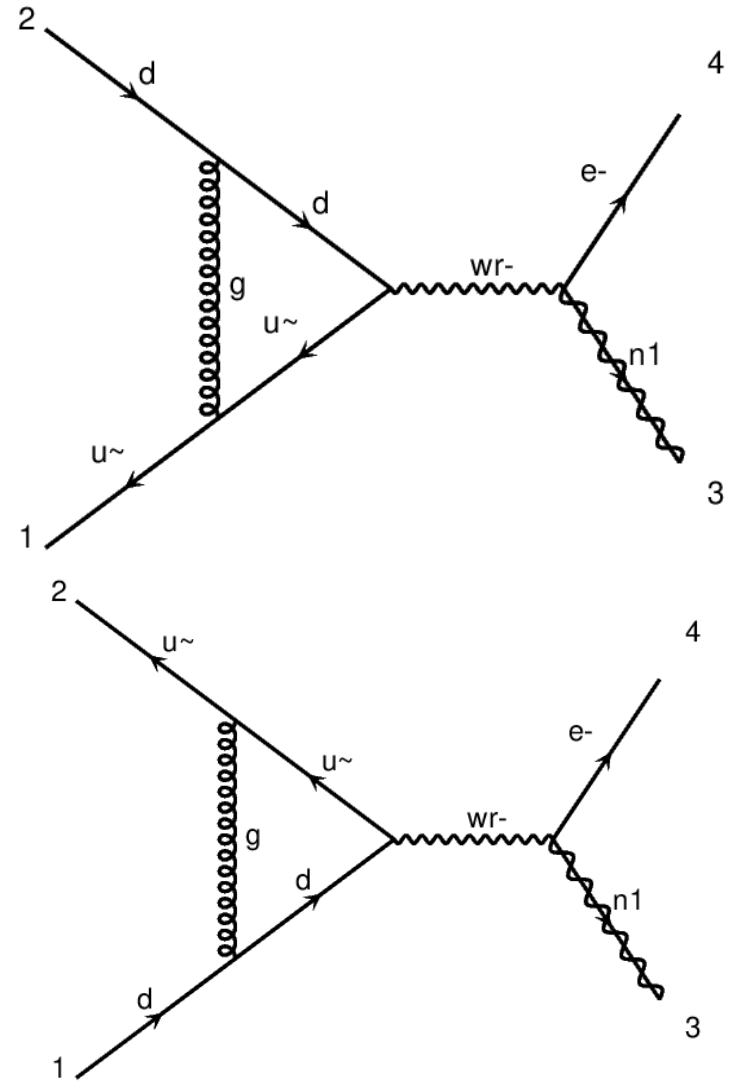
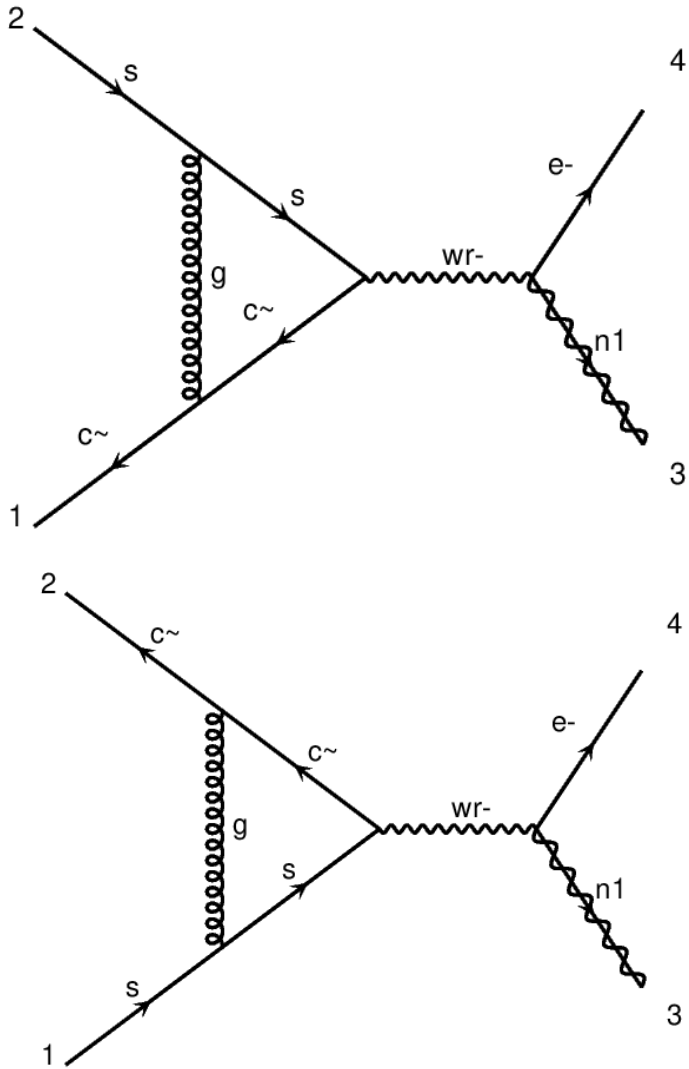
$p p \rightarrow w^- \rightarrow e^- \nu_e$ süreci - NLO -



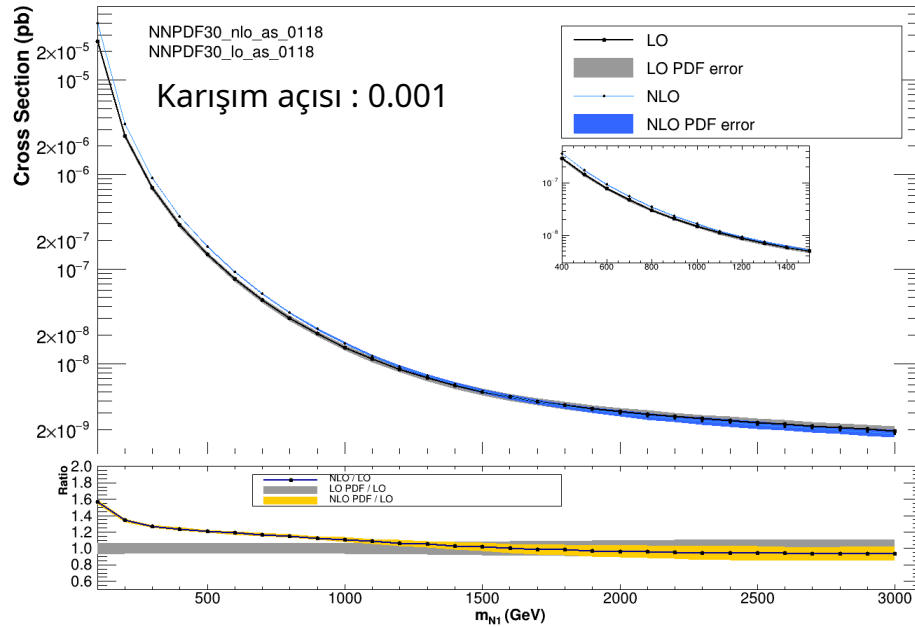
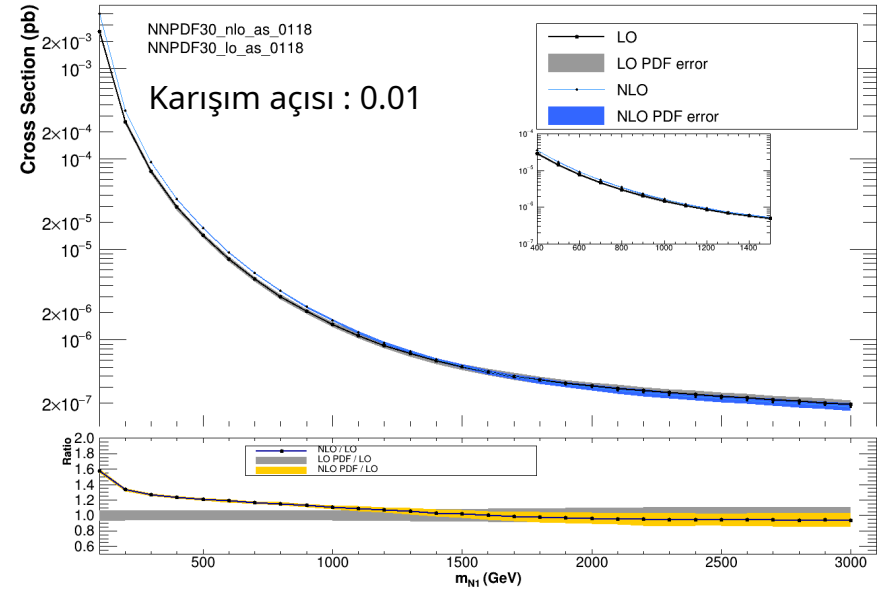
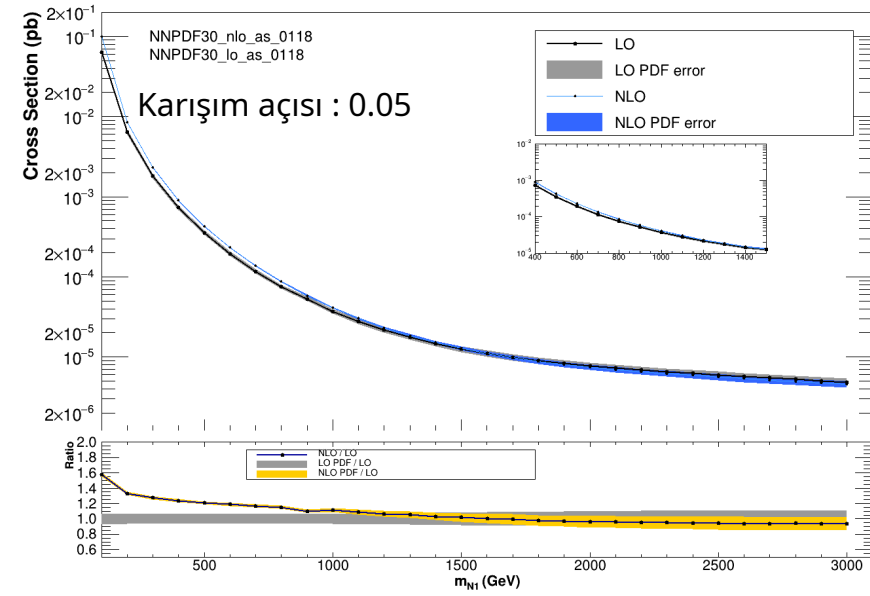
$p p > WR^+ > e^+ N1, (N1 > e^+ j j)$ süreci - NLO -



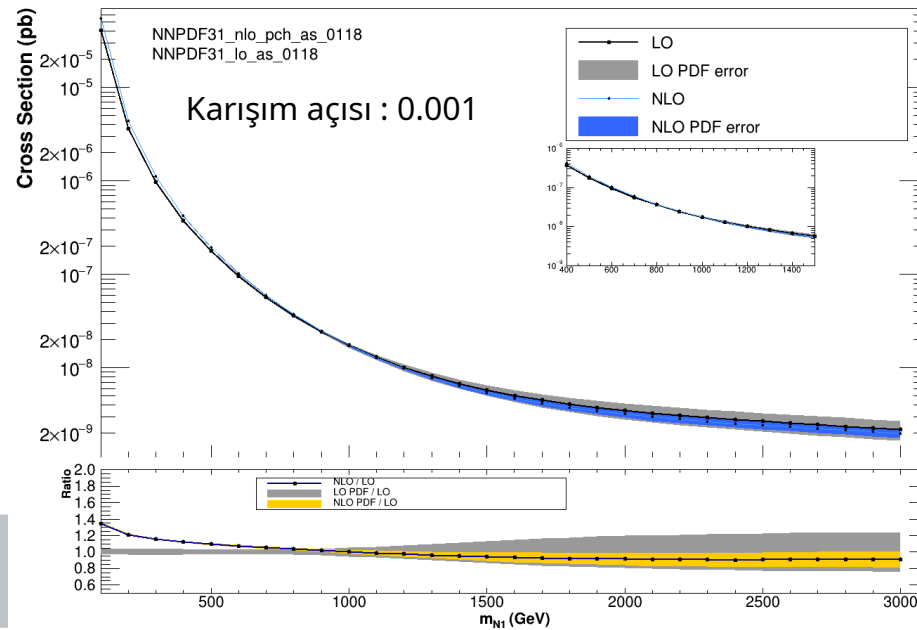
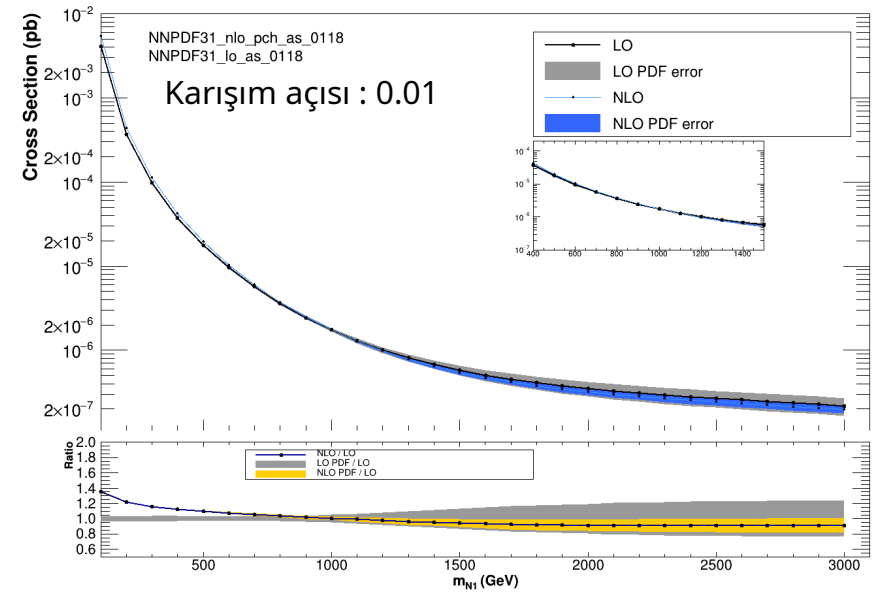
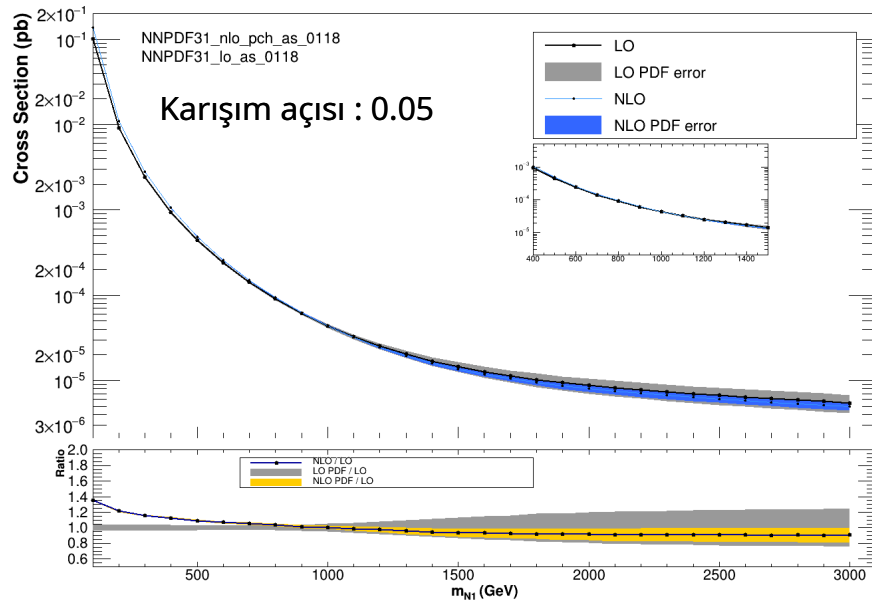
$p p > WR^- \rightarrow e^- N1, (N1 > e^- jj)$ süreci - NLO -



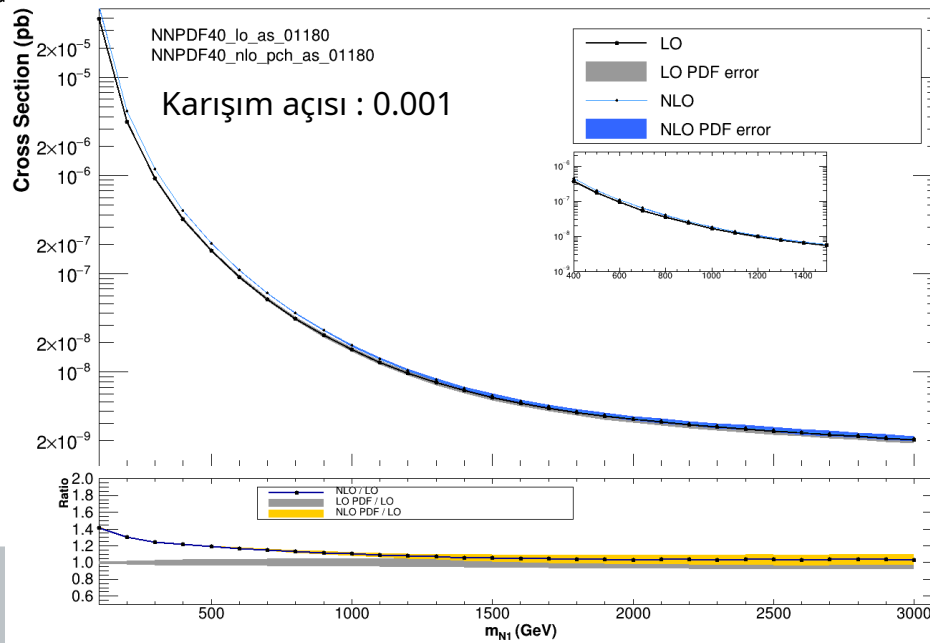
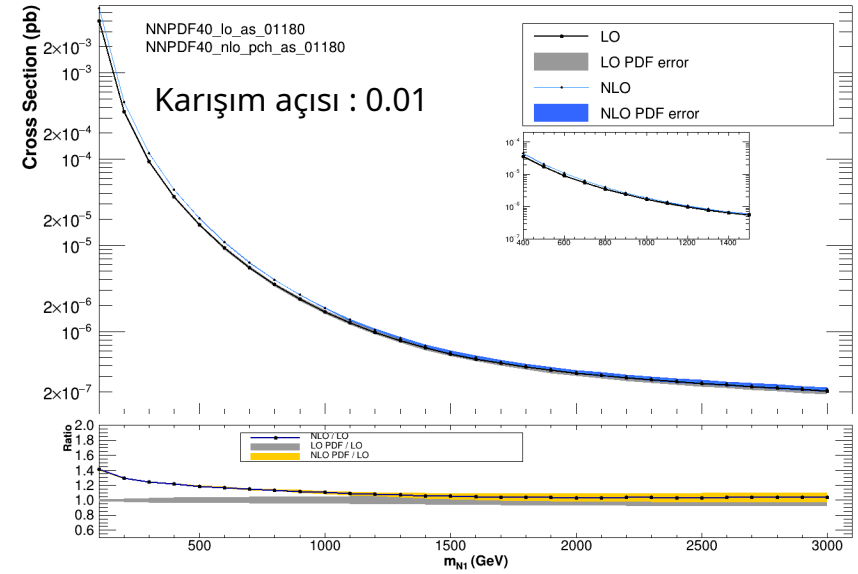
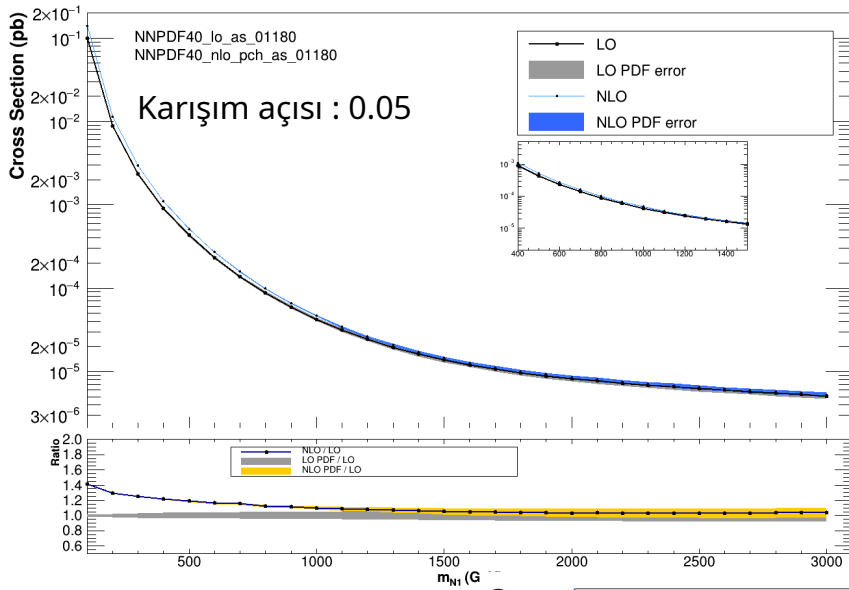
Tesir Kesitleri WR:6.5 TeV



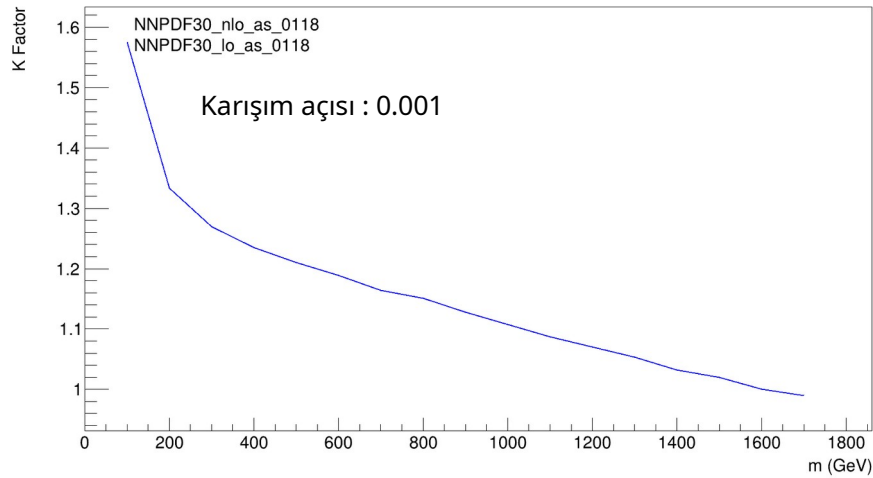
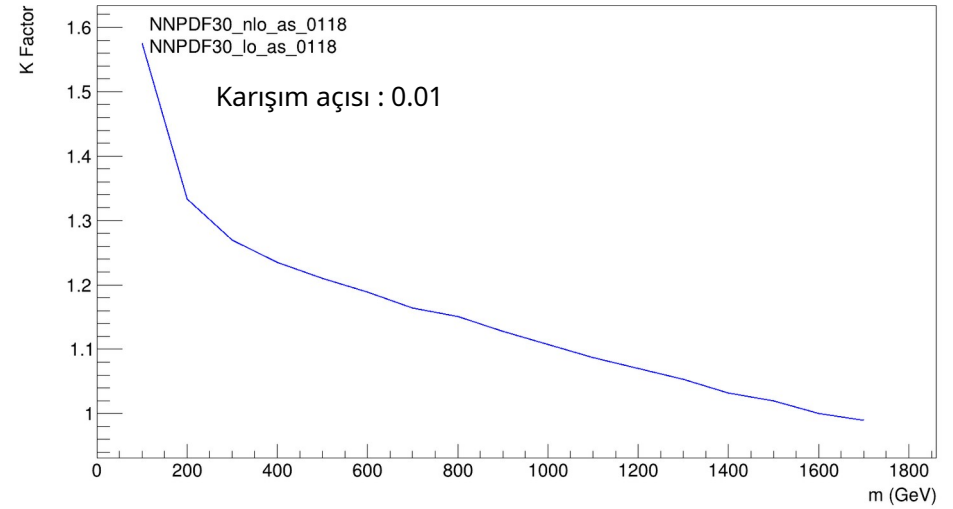
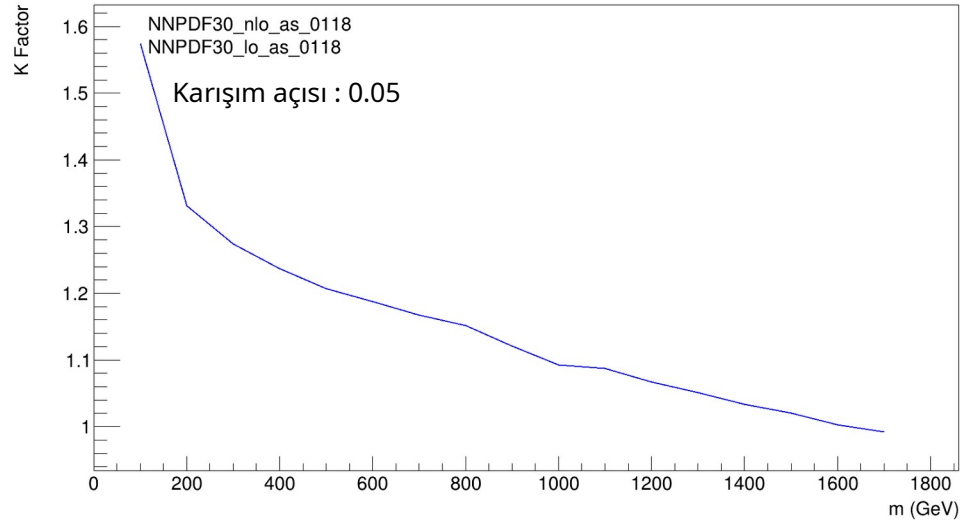
Tesir Kesitleri WR:6.5 TeV



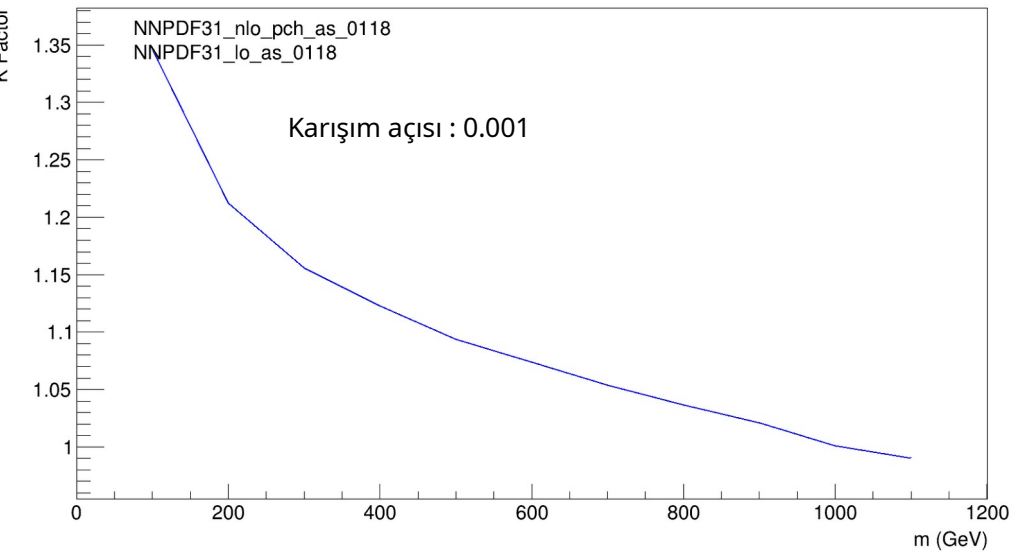
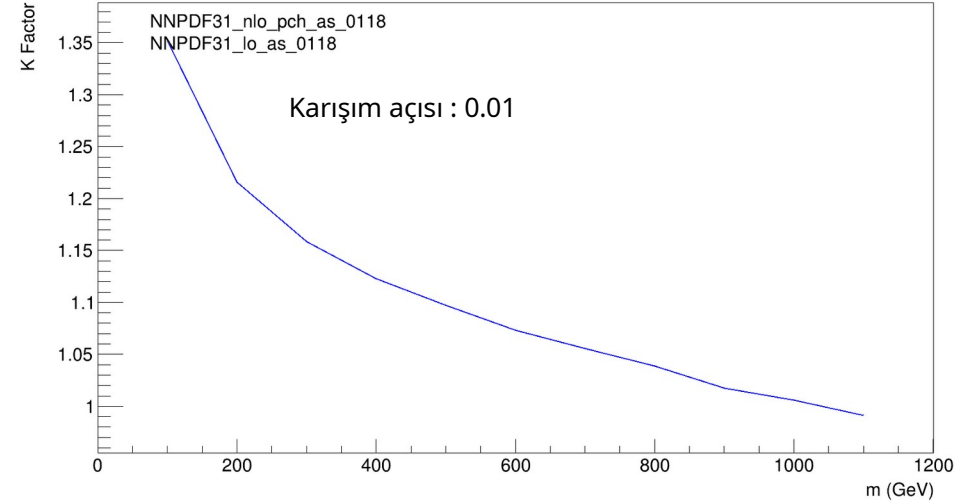
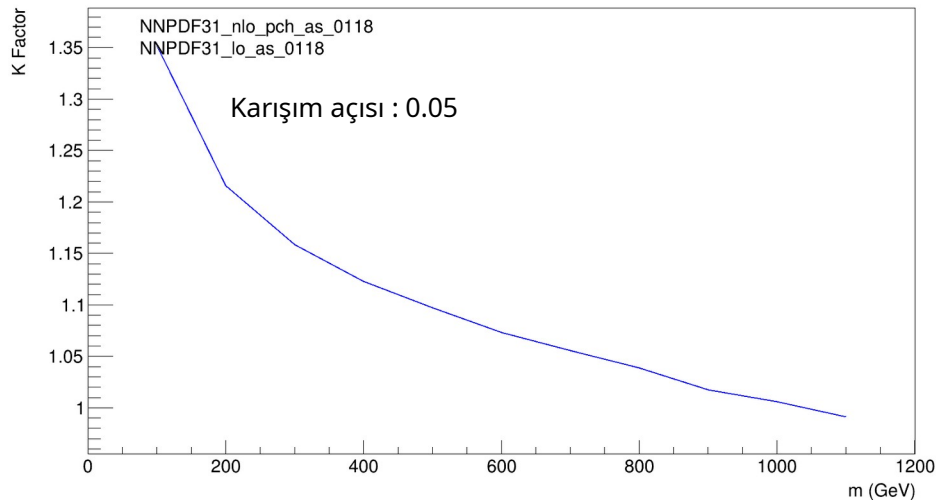
Tesir Kesitleri WR:6.5 TeV



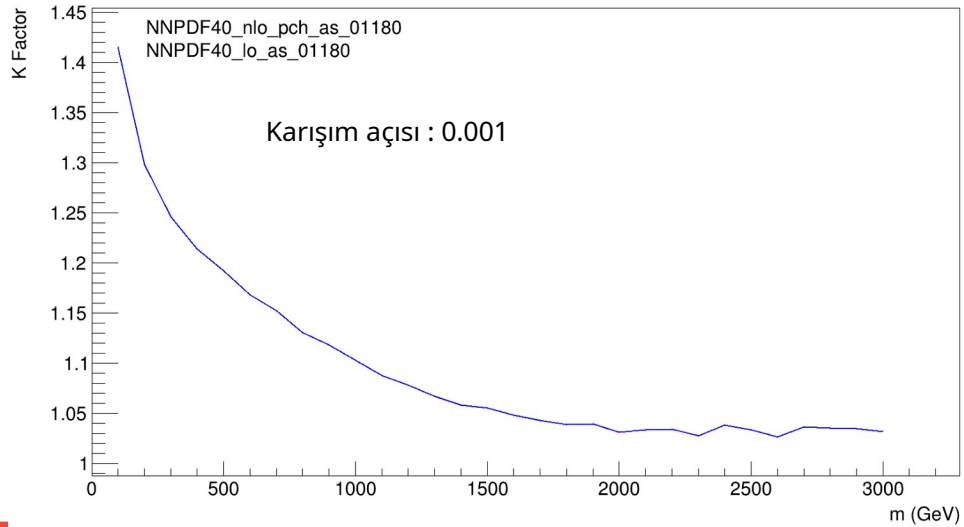
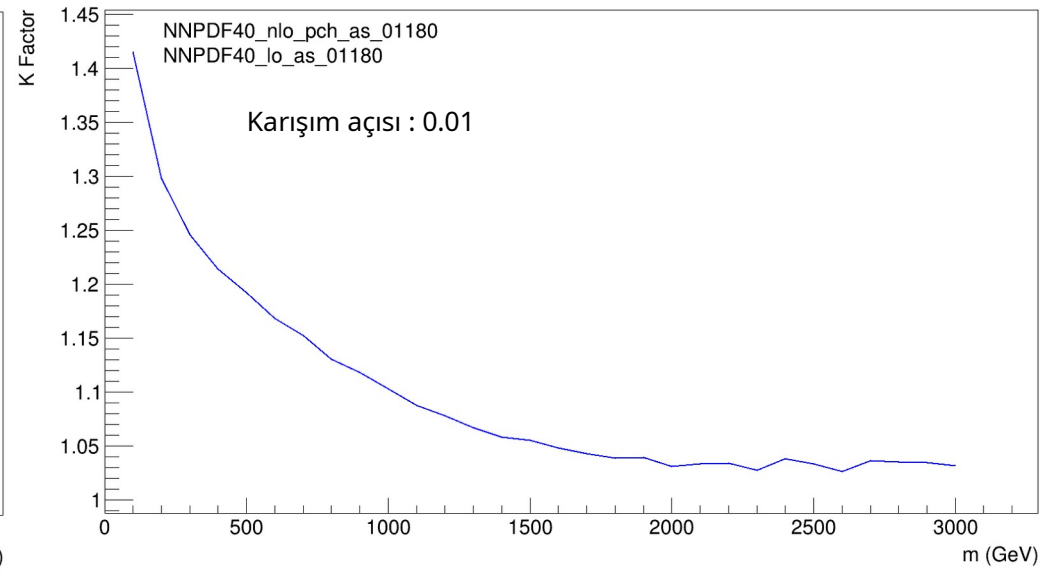
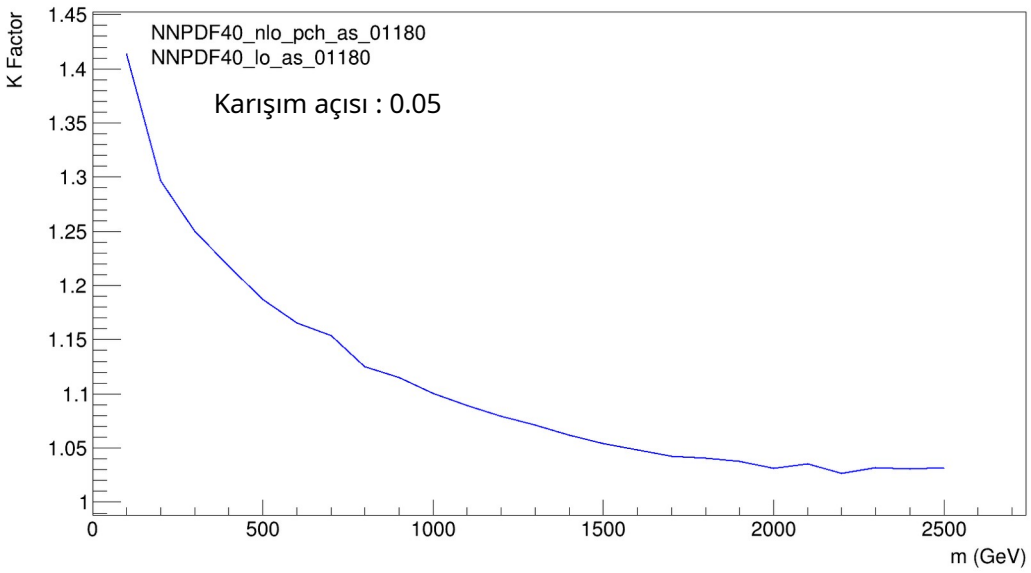
K Faktörleri – $m_{\nu} = 6.5$ Tev



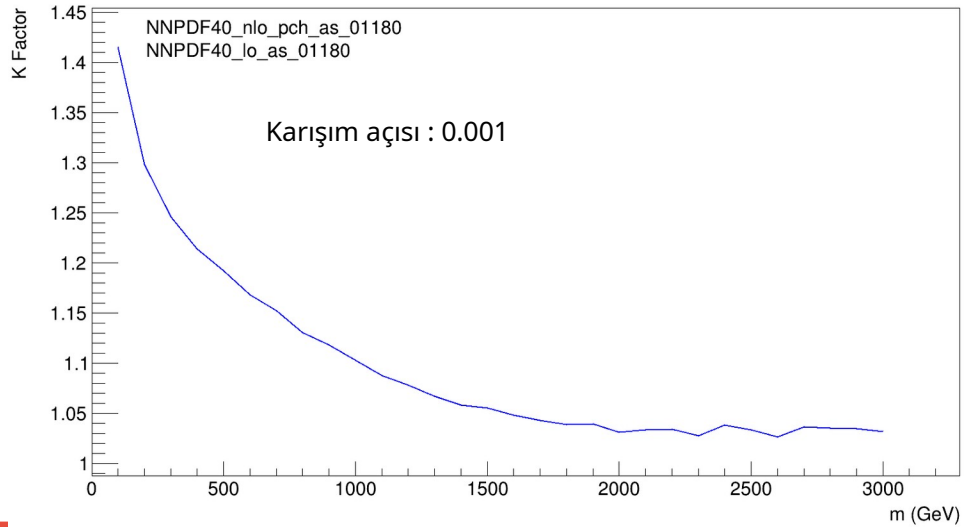
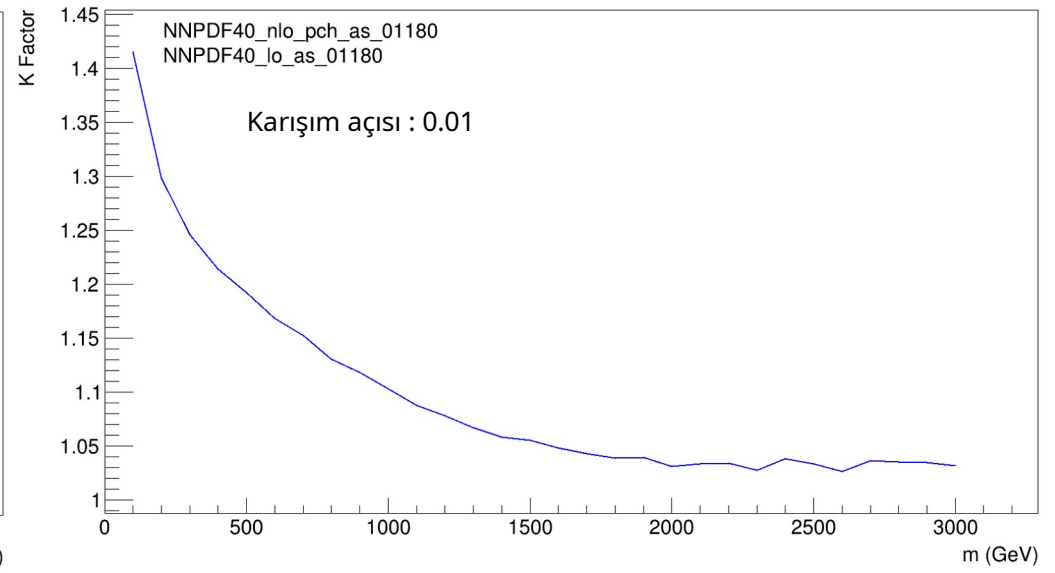
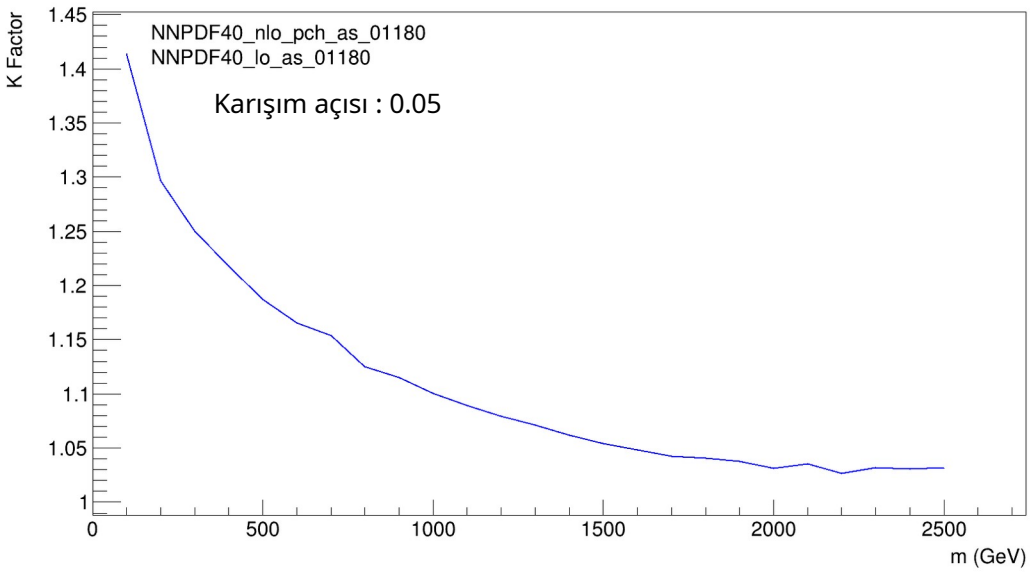
K Faktörleri – $m_{\nu} = 6.5$ Tev



K Faktörleri – $m_{\nu r} = 6.5$ Tev



K Faktörleri – $m_{\nu r} = 6.5$ Tev



Sonuç ve Gelecek Çalışmalar

- . Bu çalışmada, sinyal süreci için farklı sağ-elli nötrino–lepton karışım açlarına bağlı olarak LO ve NLO tesir kesitleri hesaplanmış ve bunlar üzerinden K-faktörleri elde edilmiştir. K-faktörler bu aşamada yalnızca karşılaştırmalı analiz amacıyla değerlendirilmiştir.
- . İzleyen aşamada, ilgili background süreçleri için de benzer şekilde K-faktörleri hesaplanacak ve analiz süreci, hadron seviyesinden detektör seviyesine taşınacaktır. Bu amaçla Delphes tabanlı gerçekçi bir dedektör simülasyonu gerçekleştirilecektir.
- . Yapılan hesaplamalarda üç farklı PDF seti karşılaştırılmış; LO düzeyinde **NNPDF40_lo_as_01180**, NLO düzeyinde **NNPDF40_nlo_pch_as_** setlerinin daha düşük teorik belirsizlik sunduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle ilerleyen çalışmalarda bu PDF setleri tercih edilecektir.
- . Sonraki adımda, söz konusu PDF setleri ve dedektör seviyesi analiz altyapısı kullanılarak, belirli karışım açıları için ilgili süreçlerin keşif ve gözlem limitleri çıkarılacaktır. Bu analizler, özellikle FCC-hh gibi yüksek enerjili hadron çarpıştırıcıları bağlamında yeni fizik arayışları açısından önemli bir katkı sağlayacaktır.

Referanslar

1. "Future Circular Collider conceptual layout", CERN, 2020. <https://fcc.web.cern.ch>
2. FCC Conceptual Design Report (CDR) - CERN (2019)
3. Eur. Phys. J. Special Topics 228, 1109{1382 (2019)
4. G. Senjanovic & R. N. Mohapatra, "Exact Left-Right Symmetry and Spontaneous Violation of Parity", Phys. Rev. D12, 1502 (1975)
5. R. N. Mohapatra & J. C. Pati, "A Natural Left-Right Symmetry", Phys. Rev. D 11, 2558 (1975)
6. J. Alwall et al. The automated computation of tree-level and next-to-leading order differential cross sections, and their matching to parton shower simulations.
7. Degrande, C., et al. "UFO - The Universal FeynRules Output", Computer Physics Communications, 183, 1201–1214 (2012).