

THDM-LS Çerçevesinde FCC-ee'de Yüklü Higgs Araştırmaları

Ali ÇİÇİ^a Zerrin KIRCA^b Cem Salih ÜN^b

^a T.C. Millî Eğitim Bakanlığı

^b Bursa Uludağ Üniversitesi

25 May, 2025

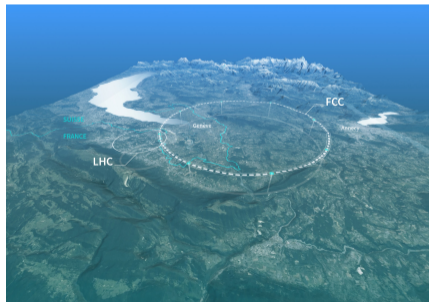
- 1 FCC-ee
- 2 Motivasyon
- 3 Model (THDM-LS)
- 4 Yöntem
- 5 Parçacık (Yüklü Higgs)
- 6 Analiz (Kesim Tabanlı - BDT)
- 7 Sonuçlar

- **Genel Mimari**

91 km dairesel tünel, 4 etkileşim noktası; enerji aşamaları $\sqrt{s} = 90, 160, 240, 350$ GeV, her biri yüksek entegre ışınımlık ($L_{\text{int}} \approx 150, 12, 5, 1.5 \text{ ab}^{-1}$ sırasıyla).

- **Uzun Vadeli Yol Haritası**

2040'larda çalışmaya başlayacak ve 15 yıl sürecek.



Neden FCC-ee?

- Leptonik süreçlerde arkaplan düşük ve sinyal temiz elde edilebilir.
- 90-350 GeV kütle merkezi enerjisi, LEP ulaşamadı, LHC'ye göre daha hassas.
- Yüksek ışınımllık (luminosity).

Neden THDM-LS ve Yüklü Higgs?

- Henüz dışarlanmamış 100 - 175 GeV arası yüklü Higgs.
- Yüksek $\tan \beta$ değerlerinde leptofilik kuarkfobik yüklü Higgs.
- Yüklü Higgs'in tau ve tau nötrinosuna dallanma oranı 1'e yakın.
- Yüklü Higgs kuarkfobik olduğu için nadir B-mezon bozunumlarından gelen sınırlandırmalardan kurtulabilir.

Neden İki Higgs Dubletli Model?

- * Standart Model'in Higgs sektörü minimal olmak zorunda değil.
- * SM'e ikinci bir skaler dublet eklenerek modelin Higgs sektörü zenginleştirilebilir.
- * $m_t/m_b \approx 40$
- * Çeşni değiştiren nötral akımlar (FCNC)
- * Süpersimetrik Modeller (MSSM)
- * Önerdiği Ekstra Higgs'ler ile müon $g-2$ ölçümlerine cevap olabilme ihtimali

$$\Phi_1 = \begin{pmatrix} \phi_1 + i\phi_2 \\ \phi_3 + i\phi_4 \end{pmatrix} ; \quad \Phi_2 = \begin{pmatrix} \phi_5 + i\phi_6 \\ \phi_7 + i\phi_8 \end{pmatrix} .$$

$$v_{SM}^2 = v_1^2 + v_2^2 .$$

$$\tan \beta_H = \frac{v_2}{v_1}, \quad v_2 = v \sin \beta_H, \quad v_1 = v \cos \beta_H$$

$$\begin{aligned} V_{\text{yumuşak}, Z_2}(\Phi_1, \Phi_2) = & -m_1^2 \Phi_1^\dagger \Phi_1 - m_2^2 \Phi_2^\dagger \Phi_2 - \frac{1}{2} m_3^2 (\Phi_1^\dagger \Phi_2 + \Phi_2^\dagger \Phi_1) \\ & + \lambda_1 (\Phi_1^\dagger \Phi_1)^2 + \lambda_2 (\Phi_2^\dagger \Phi_2)^2 + \frac{1}{4} \lambda_3 (\Phi_1^\dagger \Phi_2 + \Phi_2^\dagger \Phi_1)^2 \\ & - \frac{1}{4} \lambda_4 (\Phi_1^\dagger \Phi_2 - \Phi_2^\dagger \Phi_1)^2 + \lambda_5 \Phi_1^\dagger \Phi_1 \Phi_2^\dagger \Phi_2 . \end{aligned}$$

Ağaç seviyesinde FCNC'yi engellemek için;

$$\Phi_1 \rightarrow \Phi_1 \text{ ve } \Phi_2 \rightarrow -\Phi_2$$

$$\Phi_1 \rightarrow -\Phi_1 \text{ ve } \Phi_2 \rightarrow \Phi_2$$

$$D_{jR} \rightarrow \mp D_{jR} \quad U_{jR} \rightarrow -U_{jR} \text{ ve } E_{jR} \rightarrow \mp E_{jR} .$$

	Φ_1	Φ_2	u_R	d_R	ℓ_R	Q_L, L_L
Tip-1	+	-	-	-	-	+
Tip-2	+	-	-	+	+	+
Lepton Spesifik	+	-	-	-	+	+

Farklı tipte THDM'ler için Z_2 simetrisi yükleri

$$\begin{aligned}\Phi_1 &\rightarrow -\Phi_1 \text{ ve } \Phi_2 \rightarrow \Phi_2 \\ D_{jR} &\rightarrow D_{jR} \quad U_{jR} \rightarrow U_{jR} \text{ ve } E_{jR} \rightarrow -E_{jR} .\end{aligned}$$

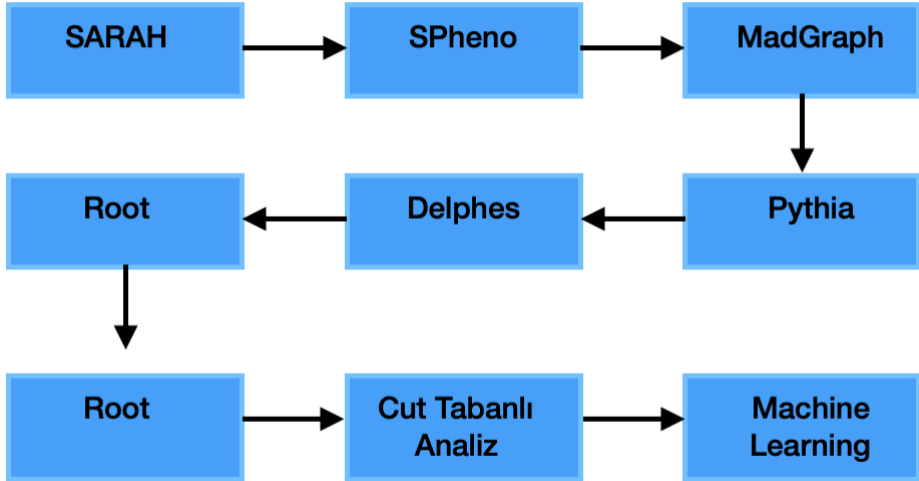
simetrisi altında LS-THDM'nin Yukawa lagranjiyeni;

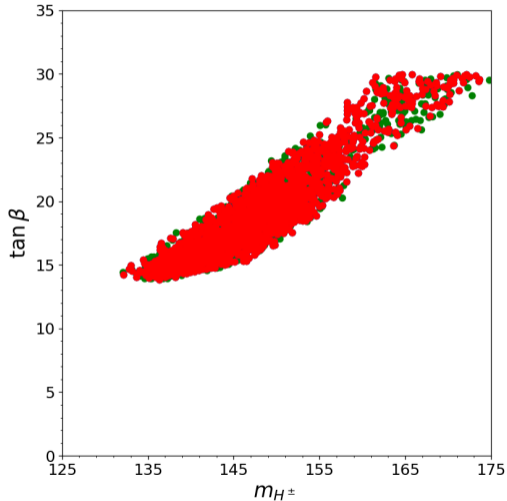
$$-\mathcal{L}_{YLS} = \eta_{ij}^U \bar{Q}_{iL} \tilde{\Phi}_2 U_{jR} + \eta_{ij}^D \bar{Q}_{iL} \Phi_2 D_{jR} + Y_{ij}^E \bar{l}_{iL} \Phi_1 E_{jR} + h.c.$$

$$\mathcal{L}_{H^\pm} = -H^+ \left(\frac{\sqrt{2} V_{ud}}{v} \bar{u} (m_u X P_L + m_d Y P_R) d + \frac{\sqrt{2} m_\ell}{v} Z \bar{\nu}_L \ell_R \right) + \text{H.C}$$

	Type I	Type II	Lepton-specific	Flipped
X	$\cot \beta$	$\cot \beta$	$\cot \beta$	$\cot \beta$
Y	$\cot \beta$	$-\tan \beta$	$\cot \beta$	$-\tan \beta$
Z	$\cot \beta$	$-\tan \beta$	$-\tan \beta$	$\cot \beta$

Table: Yüklü Higgs - fermiyon etkileşimindeki X, Y, Z parametreleri





Yüklü Higgs kütlesi– $\tan\beta$ arasındaki ilişki.

$$1.95 \times 10^{-9} \leq BR(B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-) \leq 3.43 \times 10^{-9} (2\sigma)$$

$$2.99 \times 10^{-4} \leq BR(B_s \rightarrow X_s \gamma) \leq 3.87 \times 10^{-4} (2\sigma)$$

$$123.0 \leq h_1 \text{ ya da } h_2 \leq 127.0 \text{ GeV, SM Higgs'i}$$

- Bütün çözümler HiggsTools'tan geçmiştir.
- **Yeşil noktalar:** SM Higgs koşulunu sağlayan çözümler
- **Kırmızı noktalar:** SM Higgs + nadir B-mezon şartını sağlayan çözümler.

- İnceleyeceğimiz sinyal süreci: $e^-e^+ \rightarrow H^+H^-, (H^+ \rightarrow \tau^+\nu_\tau), (H^- \rightarrow \tau^-\bar{\nu}_\tau)$
- CP-even hafif $m_{h_1} = 95.95$ GeV,
- CP-even ağır $m_{h_2} = 123.11$ GeV (Standart Model Higgs'i),
- $m_{H^\pm} = 132.12$ GeV,
- CP-odd Higgs $m_A = 156.78$ GeV,
- $BR(H^\pm \rightarrow \tau\nu_\tau) \simeq 1$ olarak bulunmuştur.

Sinyal ve Arkaplan Tesir Kesitleri

	Süreç	Tesir Kesiti (pb)
Sinyal	$e^-e^+ \rightarrow H^+H^-, (H^\pm \rightarrow \tau\nu_\tau)$	$6.46 \cdot 10^{-2}$
Arka Plan 1	$e^-e^+ \rightarrow W^+W^-, (W^\pm \rightarrow \tau\nu_\tau)$	$1.344 \cdot 10^{-1}$
Arka Plan 2	$e^-e^+ \rightarrow ZZ, (Z \rightarrow \tau\tau/\nu_l\nu_l)$	$9.187 \cdot 10^{-3}$
Arka Plan 3	$e^-e^+ \rightarrow \tau\tau$	$8.657 \cdot 10^{-1}$
Arka Plan 4	$e^-e^+ \rightarrow \tau\tau\nu_\tau\nu_\tau$	$1.403 \cdot 10^{-1}$
Arka Plan 5	$e^-e^+ \rightarrow Zh, (Z \rightarrow \nu_l\nu_l, h \rightarrow \tau\tau)$	$1.021 \cdot 10^{-3}$
Arka Plan 6	$e^-e^+ \rightarrow t\bar{t}, (t \rightarrow Wb, W \rightarrow \tau\nu_\tau)$	$2.605 \cdot 10^{-3}$
Arka Plan 7	$e^-e^+ \rightarrow h\nu_l\nu_l, (h \rightarrow \tau\tau)$	$2.174 \cdot 10^{-3}$
Arka Plan 8	$e^-e^+ \rightarrow \tau\tau jj$	$2.67 \cdot 10^{-2}$
Arka Plan 9	$e^-e^+ \rightarrow \tau\tau\gamma$	$1.988 \cdot 10^{-1}$

$N_\tau = 2$	$1.5 \leq \Delta R(\tau_1, \tau_2) \leq 4.0$	$10 \leq E_T^{\text{Miss}} \leq 120.0 \text{ GeV}$
$N_b = 0$	$1.8 \leq \Delta R(\tau_1, E_T^{\text{Miss}}) \leq 4.25$	$m_{\text{inv}}(\tau_1, \tau_2) \leq 200.0 \text{ GeV}$
$-2.3 \leq \eta_{\tau_1} \leq 2.3$	$0.2 \leq \Delta R(\tau_2, E_T^{\text{Miss}}) \leq 3.8$	$20 \leq P_T^{\tau_1} + E_T^{\text{Miss}} \leq 230.0 \text{ GeV}$
$-3.0 \leq \eta_{\tau_2} \leq 3.0$	$P_T^{\tau_1} \leq 130.0 \text{ GeV}$	$10 \leq P_T^{\tau_1} + P_T^{\tau_2} + E_T^{\text{Miss}} \leq 325.0 \text{ GeV}$
$\eta_{E_T^{\text{Miss}}} \leq 4.96$	$P_T^{\tau_2} \leq 100.0 \text{ GeV}$	$25 \leq m_{\text{inv}}(\tau_1, E_T^{\text{Miss}}) \leq 250.0 \text{ GeV}$
	$E_{\gamma_1} \leq 120.0 \text{ GeV}$	$m_{\text{inv}}(\tau_2, E_T^{\text{Miss}}) \leq 150.0 \text{ GeV}$
	$E_{\gamma_2} \leq 60.0 \text{ GeV}$	$15 \leq P_T^{\tau_2} + E_T^{\text{Miss}} \leq 160.0 \text{ GeV}$
		$20 \leq M_T(\tau_1, E_T^{\text{Miss}}) \leq 225.0 \text{ GeV}$
		$M_T(\tau_2, E_T^{\text{Miss}}) \leq 125.0 \text{ GeV}$

Table: FCC-ee ($\sqrt{s} = 350$ GeV) için sinyal ve arka-plan süreçlerinde kesim verimi. $\epsilon \equiv N_{\text{after}}^{\text{MC}} / N_{\text{before}}^{\text{MC}}$.

Process	Cross-Section [pb]	$N_{\text{before}}^{\text{MC}}$	$N_{\text{after}}^{\text{MC}}$	ϵ
Signal	6.46×10^{-2}	6.46×10^4	26 084	0.404
Total background	1.38089	1.38089×10^6	104 380	0.076

$$Z = \frac{N_S}{\sqrt{N_S + N_B}} \text{ (Significance)}$$

$$Z = \frac{N_S^{\text{Expected}}}{\sqrt{N_S^{\text{Expected}} + N_B^{\text{Expected}}}}$$

$$N_S^{\text{Expected}} = \sigma_S \times L^{\text{Cut}} \times \epsilon_S^{\text{Cut}}$$

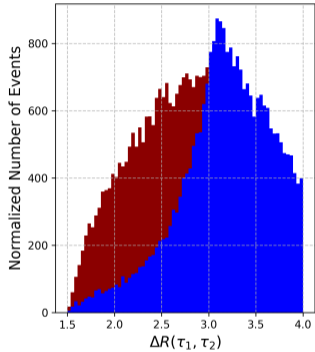
$$N_B^{\text{Expected}} = \sigma_B \times L^{\text{Cut}} \times \epsilon_B^{\text{Cut}}$$

Table: İstatistiksel anlamlılık seviyeleri ve yorumları

Z (σ)	Karşılık gelen güven düzeyi (CL)	HEP'deki yorum
1σ	68.27 %	önemsiz
2σ	95.45 %	zayıf işaret
3σ	99.73 %	Kanıt
4σ	99.9937 %	Çok güçlü kanıt
5σ	99.99994 %	Keşif

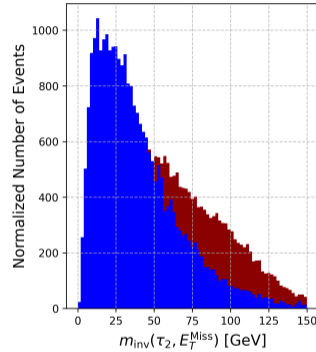
Table: Gerekli Luminosite Değerleri

Anlamlılık Seviyesi	Olay Seçiminden Önce pb^{-1}	Olay Seçiminden Sonra pb^{-1}
3σ	3117.4	1725.9
5σ	8659.45	4794.16



(a) τ_1 ile τ_2 arasındaki açısal uzaklık

■ Signal
■ Background

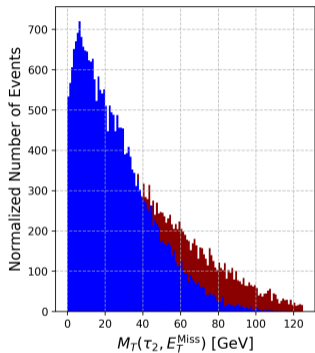


(b) τ_2 ile enine kayıp enerjinin invaryant kütlesi

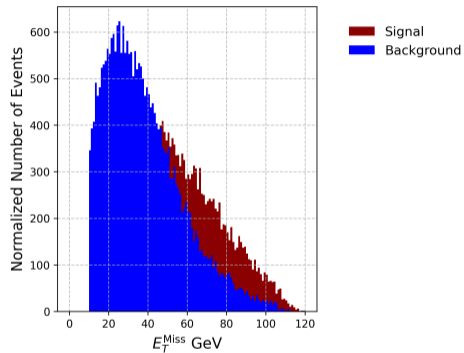
■ Signal
■ Background

Figure: Kesimler sonrası sinyal ve arkaplan dağılımları.

Olay Seçiminden Sonra



(a) τ_2 ile enine kayıp enerjinin enine kütlesi

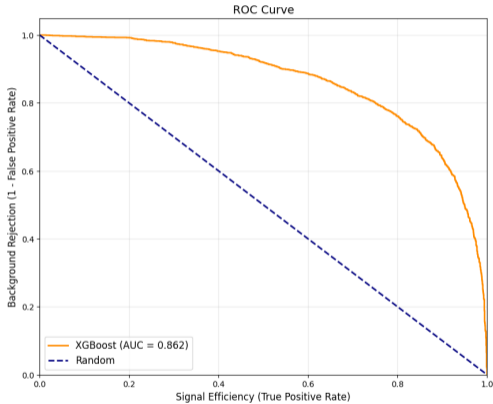


(b) Enine kayıp enerji

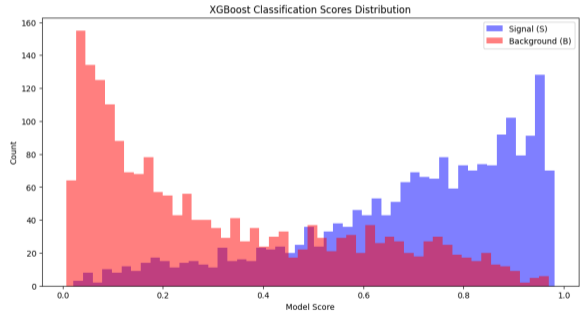
Figure: Kesimler sonrası sinyal ve arkaplan dağılımları.

Table: XGBoost Modeli Hiperparametreleri ve Performans Metrikleri

Parametre/Metrik	Değer
Hiperparametreler	
Alt Örnek Oranı (subsample)	0.7
Ağaç Sayısı (n_estimators)	1000
Maksimum Derinlik (max_depth)	5
Öğrenme Oranı (learning_rate)	0.01
Gamma (gamma)	5
Sütun Örnek Oranı (colsample_bytree)	0.8
Performans Metrikleri	
Accuracy (Tüm tahminlerdeki başarı oranı)	0.7805
ROC-AUC (Sinyal-Background ayırt etme)	0.8616
Precision (Sinyal tahminlerinin gerçek sinyal oranı)	0.7644
Recall (Gerçek sinyallerin doğru tahmin edilme oranı)	0.8110
F1 Score (Precision ve Recall harmonik ortalaması)	0.7870



(a) ROC Eğrisi



(b) XGB Skoru

TP: True Positive (Test veri setinde doğru şekilde sinyal olarak etiketlenmiş olaylar.)

FP: False Positive (Test veri setinde background olup yanlış şekilde sinyal olarak etiketlenmiş olaylar.)

$$\epsilon_S^{\text{BDT}} = \frac{\text{TP}}{N_{\text{Test}}} = 0.811$$

$$\epsilon_B^{\text{BDT}} = \frac{\text{FP}}{N_{\text{Test}}} = 0.25$$

$$Z = \frac{N_S^{\text{Expected}}}{\sqrt{N_S^{\text{Expected}} + N_B^{\text{Expected}}}}$$

$$N_S^{\text{Expected}} = \sigma_S \times L^{\text{Cut+BDT}} \times \epsilon_S^{\text{Cut}} \times \epsilon_S^{\text{BDT}}$$

$$N_B^{\text{Expected}} = \sigma_B \times L^{\text{Cut+BDT}} \times \epsilon_B^{\text{Cut}} \times \epsilon_B^{\text{BDT}}$$

Table: Gerekli Luminosite Değerleri

Anlamlılık Seviyesi	L^{Before} pb^{-1}	L^{Cut} pb^{-1}	$L^{\text{Cut+BDT}}$ pb^{-1}
3σ	3117.4	1725.9	950.3
5σ	8659.4	4794.2	2639.8

Çalışmanın Başlıca Bulguları

- LHC ve nadir B -mezon bozunum verileri ile uyumlu, yüksek $\tan \beta$ değerlerinde kuark-fobik ve leptofilik özelliklere sahip olan yüklü Higgs elde edildi.
- THDM-LS kapsamında, $m_{H^\pm} = 132.1$ GeV, $m_A = 156.8$ GeV, $m_{h_1} = 95.9$ GeV, $m_{h_2} = 123.1$ GeV (SM) ve $BR(H^\pm \rightarrow \tau \nu_\tau) \simeq 1$ koşullarını sağlayan çözüm elde edilmiştir.
- Yüklü Higgs çifti üretim tesir kesiti $6.46 \times 10^{-2} \text{ pb}^{-1}$

Anlamlılık Seviyesi	L^{Before} pb^{-1}	L^{Cut} pb^{-1}	$L^{\text{Cut+BDT}}$ pb^{-1}
3σ	3.12×10^3	1.73×10^3	0.95×10^3
5σ	8.66×10^3	4.79×10^3	2.64×10^3
	ϵ^{Cut}	ϵ^{BDT}	$\epsilon^{\text{Cut+BDT}}$
Sinyal	0.404	0.811	0.33
Arkaplan	0.076	0.250	0.02