T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ATLAS VERİSİ İLE VEKTÖR BENZERİ AĞIR LEPTONLARIN ARANMASI

Ahmetcan SANSAR

Fizik Anabilim Dalı

Yüksek Enerji ve Plazma Fiziği

DANIŞMAN
Prof. Dr. Aytül ADIGÜZEL

Haziran, 2024

İSTANBUL

Bu çalışma 28.06.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Fizik Anabilim Dalı Yüksek Enerji ve Plazma Fiziğinda Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Prof. Dr. Aytül ADIGÜZEL (Danışman)
İstanbul Üniversitesi
Fen Fakültesi

Prof. Dr. Olcay BÖLÜKBAŞI YALÇINKAYA
İstanbul Üniversitesi
Fen Fakültesi

Prof. Dr. Veysi Erkcan ÖZCAN
Boğaziçi Üniversitesi
Fen Edebiyat Fakültesi

- **İntihal Programı Beyanı**

20.04.2016 tarihli resmi gazetede yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi'nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

- **Tezden Üretilmiş Yayınların Künye Bilgileri**

[]

ÖNSÖZ

Bu tez bireysel bir çalışmanın değil, kayda değer bir sürede elde edilen bir ekip gayretinin sonucudur. İlk olarak yüksek enerji fiziği ile tanışmama vesile olan, tez çalışmalarımda ve yaptığım her çalışmada bana her zaman destek olan, birlikte çalıştığımız süre boyunca çıtayı hep daha yükseğe taşımama teşvik eden çok değerli danışmanım Prof. Dr. Aytül ADIGÜZEL'e en içten duygularımla teşekkür ederim.

Analiz ekibimizin değerli üyelerinden Doç. Dr. N. Gökhan ÜNEL'e, analiz çalışmalarımdaki fizik altyapısına sağladığı çok önemli katkıları için ve hem mesleki hem de hayat tecrübelerini hiçbir zaman esirgemediği için teşekkürlerimi sunarım.

Her ihtiyaç duyduğumda yardımıma koşan, yazılımsal bilgi ve birikimlerini her zaman benimle paylaşan ve bu çalışmadaki teknik altyapıyı kurmamda emeği geçen sevgili çalışma arkadaşım Berare GÖKTÜRK'e teşekkür ederim.

Tez çalışmalarımda kullandığım yöntem olan Analiz Betimleme Dili fikri ve bana bu yöntemi kullanma olanağı sağladığı için Doç. Dr. Sezen SEKMEN'e teşekkür ederim.

Bu süreçte KAHVELab tarafından sağlanan tüm destekler için ve ayrıca tez juri üyeliğini kabul ettiği için Prof. Dr. Erkcan ÖZCAN'a teşekkür ederim.

Tez jüri üyemiz, üniversitemizin değerli öğretim üyelerinden Prof. Dr. Olcay BÖLÜKBAŞI YALÇINKAYA'ya katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Tez çalışmalarım süresince gerekli nümerik hesaplamaları yapabilmem için TÜBİTAK ULAKBİM, Yüksek Başarım ve Grid Hesaplama Merkezi (TRUBA) kaynaklarını kullanma imkanı sağladıkları ve 122F304 numaralı proje ile tarafıma sağladıkları finans desteklerinden ötürü TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Son olarak yıllar boyu süren eğitim ve çalışma süreçlerimde her kararımda arkamda olan, hayatımın her anında bana olan sevgi ve destekleri için minnettar olduğum ve olacağım çok sevgili aileme teşekkür ederim.

Haziran, 2024 Ahmetcan SANSAR

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ ..... **iv**

İÇİNDEKİLER ..... **vii**

ŞEKİL LİSTESİ ..... **xiii**

TABLO LİSTESİ ..... **xiv**

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ ..... **xvi**

ÖZET ..... **xvii**

SUMMARY ..... **xviii**

1. GİRİŞ **1**

2. STANDART MODEL VE ÖTESİ **2**

2.1. STANDART MODEL 2

2.1.1. Kuantum Elektrodinamiği 3

2.1.2. Kuantum Renk Dinamiği 3

2.2. STANDART MODEL ÖTESİ 4

2.2.1. SU(2) Vektör Benzeri Leptonlar 4

3. BÜYÜK HADRON ÇARPIŞTIRICISINDAKİ ATLAS DENEYİ **8**

3.1. BÜYÜK HADRON ÇARPIŞTIRICISI 8

3.2. BÜYÜK HADRON ÇARPIŞTIRICISININ TOROİD APARATI (ATLAS) ALGICI 10

3.2.1. İç Algıç Sistemi 12

3.2.1.1. Piksel Algıcı 12

3.2.1.2. Yarı İletken İz Sürücüsü (SCT) 13

3.2.1.3. Geçiş Işıması İz Sürücüsü (TRT) 13

3.2.2. Kalorimetre Sistemleri 13

3.2.3. Müon Sistemleri 15

3.2.4. Tetikleme ve Veri Toplama Sistemi 15

4. VEKTÖR BENZERİ LEPTONLARIN ARANMASI **17**

4.1. VERİ VE MONTE CARLO ÖRNEKLERİ 17

4.1.1. Çarpışma Veri Seti 17
4.1.2. Sinyal Monte Carlo Örnekleri 17
4.1.3. Standart Model Ardalan Örnekleri 17
4.2. ANALİZ NESNELERİNİN YENİDEN YAPILANDIRILMASI 18
4.2.1. Tetikleme 18
4.2.2. Elektron 19
4.2.3. Müon 19
4.2.4. Jet 20
4.2.5. Kayıp Dikey Enerji 20
4.2.6. Çakışmaları Giderme 20
4.3. ANALİZ YÖNTEMİ 21
4.3.1. ADL/CutLang Analiz Çerçevesi 21
4.3.2. Olay Seçimleri ve Yeniden Yapılandırma 23
4.3.3. χ^2 Algoritması 28
4.3.4. Yeniden Yapılandırma Parametrelerinin Belirlenmesi 30
4.3.4.1. σ_{L_1} *ve* σ_{L_2} 30
4.3.4.2. Jetler için gereken en küçük P_T *şartı* 32
4.3.4.3. Olaydaki en küçük χ^2 *şartı* 32
4.4. KONTROL BÖLGESİ ÇALIŞMALARI 33
4.4.1. Z+jets Kontrol Bölgesi 33
4.4.2. $t\bar{t}$ Kontrol Bölgesi 35
4.4.3. WZ Kontrol Bölgesi 37
4.4.4. ZZ Kontrol Bölgesi 40
4.5. YENİDEN YAPILANDIRILAN BOZON DAĞILIMLARI 41
4.5.1. VLL_μ Bozon Dağılımları 41
4.5.2. VLL_e Bozon Dağılımları 46
4.6. İSTATİSTİKSEL OTURTMA ÖNCESİ VLL KÜTLE DAĞILIMLARI 51
4.6.1. VLL_μ Kütle dağılımları 52
4.6.2. VLL_e Kütle dağılımları 54
4.7. İSTATİSTİKSEL HESAPLAMA VE LİMİT 56
5. BULGULAR 58
5.1. VLL_μ SİNYAL BÖLGESİ 58

5.2. VLL_e SİNYAL BÖLGESİ 60
5.3. Z+JETS KONTROL BÖLGESİ 62
5.4. $t\bar{t}$ KONTROL BÖLGESİ 63
5.5. WZ KONTROL BÖLGESİ 64
5.6. ZZ KONTROL BÖLGESİ 64
5.7. BEKLENEN LİMİT 64
5.7.1. VLL Dublet 65
5.7.2. VLL Singlet 66
6. TARTIŞMA VE SONUÇ 67
KAYNAKLAR 68
EKLER 71
EK 1. Çarpışma verisi, Sinyal ve Ardalan Monte Carlo Örnekleri 71
EK 1.1. Veri 71
EK 1.2. Sinyal 73
EK 2. Diğer Kütle Noktaları için VLL kütle dağılımları 74
EK 2.1. VLL_μ Dublet 74
EK 2.2. VLL_e dublet 93
EK 2.3. VLL_μ singlet 112
EK 2.4. VLL_e Singlet 124
EK 3. ADL formatında χ^2 algoritması 134
ÖZGEÇMİŞ 139

ŞEKİL LİSTESİ

Page No

Şekil 2.1: Standart Model'deki temel parçacıklar ve özellikleri [7]. 3

Şekil 2.2: VLL dublet (üst) ve VLL singlet (alt) üretim ve bozunum süreçlerine ait Feynman diyagramları [36]..... 7

Şekil 2.3: VLL singlet (mavi) ve VLL dublet (kırmızı) üretim tesir kesitleri [36]. 7

Şekil 3.1: BHÇ Run2 süresinde yıllara göre elde edilen veri miktarı. Mavi renkli dağılım fizik analizleri için kullanılabilir durumda olan veriyi, üstündeki sarı renkli dağılım ATLAS algıcının kaydettiği veriyi, üstündeki yeşil renkli dağılım ise BHÇ tarafından sağlanan veriyi göstermektedir [14]..... 9

Şekil 3.2: CERN hızlandırıcı kompleksi [13]. 10

Şekil 3.3: ATLAS algıcının bilgisayarla oluşturulmuş görüntüsü [15]..... 10

Şekil 3.4: ATLAS algıcında kullanılan solenoid ve toroid mıknatıslar [16]..... 11

Şekil 3.5: Kutup açısı ile psödorapidite arasındaki ilişki [17]. 12

Şekil 3.6: İç Algıç Sistemi'nin bilgisayarla oluşturulmuş görüntüsü [19]. 12

Şekil 3.7: ATLAS kalorimetre sistemleri [24]. 14

Şekil 3.8: ATLAS'ta bulunan müon algıç sistemleri. 15

Şekil 4.1: $2\ell\mu$ kanalı önseçim seviyesindeki temel kinematik dağılımlar ve Veri/MC uyumu (S/B > %5 olan adım aralıklarında veri gizlenmiştir). N_{jet} dağılımı (sol-üst), en yüksek momentumlu jetin P_T dağılımı (orta-üst), jetlerin HT (toplam P_T dağılımı) (sağ-üst), en yüksek momentumlu leptonun P_T dağılımı (sol-alt), leptonların HT dağılımı (orta-alt) ve E_T^{miss} dağılımı (sağ-alt). 25

Şekil 4.2: $2\ell\mu$ kanalı WZ sinyal bölgesi $P_T^{jetA} > 100$ GeV ve $P_T^{jetC} > 100$ GeV seviyesindeki temel kinematik dağılımlar ve Veri/MC uyumu (S/B > %5 olan adım aralıklarında veri gizlenmiştir). N_{jet} dağılımı (sol-üst), en yüksek momentumlu jetin P_T dağılımı (orta-üst), jetlerin HT (toplam P_T dağılımı) (sağ-üst), en yüksek momentumlu leptonun P_T dağılımı (sol-alt), leptonların HT dağılımı (orta-alt) ve E_T^{miss} dağılımı (sağ-alt)..... 25

Şekil 4.3: $2\ell\mu$ kanalı WZ sinyal bölgesi $\chi^2 < 10$ seviyesindeki temel kinematik dağılımlar ve Veri/MC uyumu (S/B > %5 olan adım aralıklarında veri gizlenmiştir). N_{jet} dağılımı (sol-üst), en yüksek momentumlu jetin P_T dağılımı (orta-üst), jetlerin HT (toplam P_T dağılımı) (sağ-üst), en yüksek momentumlu leptonun P_T dağılımı (sol-alt), leptonların HT dağılımı (orta-alt) ve E_T^{miss} dağılımı (sağ-alt). 26

Şekil 4.4: WZ bozunum modu için 150 GeV (sol-üst), 200 GeV (orta-üst), 300 GeV (sağ-üst), 400 GeV (sol-alt), 500 GeV (orta-alt) ve 600 GeV (sağ-alt) kütlelerinde yeniden yapılandırılan L_W kütle dağılımları. 30

Şekil 4.5: WZ bozunum modu için 700 GeV (sol-üst), 800 GeV (orta-üst), 900 GeV (sağ-üst), 1000 GeV (sol-orta), 1100 GeV (orta), 1200 GeV (sağ-orta) ve 1300 GeV (orta-alt) kütlelerinde yeniden yapılandırılan L_W kütle dağılımları. 31

Şekil 4.6: WZ bozunum modu için elde edilen VLL kütle belirsizlikleri. 31

Şekil 4.7: WZ bozunum modunda VLL kütlesine karşılık en iyi jet adaylarının P_T dağılımı. Sol-üst ve sol-alttaki dağılımlar $L_W \to W\ell \to 2j1\ell$ sürecindeki jetleri (jetA ve jetB), Sağ-üst ve sağ-alttaki dağılımlar $L_Z \to Z\ell \to 2j1\ell$ sürecine ait jetleri (jetC ve jetD) temsil etmektedir. VLLμ 1000 GeV'lik sinyal örneği kullanılmıştır. 32

Şekil 4.8: Olaydaki χ^2_{toplam} aralıklarına karşılık gelen hadronik W, Z ve Higgs bozonu kütle dağılımları..... 33

Şekil 4.9: Z+jets kontrol bölgesi ön seçim seviyesinde temel kinematik dağılımlar ve Veri/MC uyumu. N_{jet} dağılımı (sol-üst), en yüksek momentumlu jetin P_T dağılımı (orta-üst), jetlerin HT dağılımı (sağ-üst), en yüksek momentumlu leptonun P_T dağılımı (sol-alt), leptonların HT dağılımı (orta-alt) ve E_T^{miss} dağılımı (sağ-alt). 34

Şekil 4.10: Z+jets kontrol bölgesi $P_T^{jetA} > 100$ GeV ve $P_T^{jetC} > 100$ GeV seviyesinde temel kinematik dağılımlar ve Veri/MC uyumu. N_{jet} dağılımı (sol-üst), en yüksek momentumlu jetin P_T dağılımı (orta-üst), jetlerin HT dağılımı (sağ-üst), en yüksek momentumlu leptonun P_T dağılımı (sol-alt), leptonların HT dağılımı (orta-alt) ve E_T^{miss} dağılımı (sağ-alt). 34

Şekil 4.11: Z+jets kontrol bölgesi $\chi^2 < 10$ seviyesinde temel kinematik dağılımlar ve Veri/MC uyumu. N_{jet} dağılımı (sol-üst), en yüksek momentumlu jetin P_T dağılımı (orta-üst), jetlerin HT dağılımı (sağ-üst), en yüksek momentumlu leptonun P_T dağılımı (sol-alt), leptonların HT dağılımı (orta-alt) ve E_T^{miss} dağılımı (sağ-alt). 35

Şekil 4.12: $t\bar{t}$ kontrol bölgesi ön seçim seviyesinde temel kinematik dağılımlar ve Veri/MC uyumu. N_{jet} dağılımı (sol-üst), en yüksek momentumlu jetin P_T dağılımı (orta-üst), jetlerin HT dağılımı (sağ-üst), en yüksek momentumlu leptonun P_T dağılımı (sol-alt), leptonların HT dağılımı (orta-alt) ve E_T^{miss} dağılımı (sağ-alt). 36

Şekil 4.13: $t\bar{t}$ kontrol bölgesi $P_T^{jetA} > 100$ GeV ve $P_T^{jetC} > 100$ GeV seviyesinde temel kinematik dağılımlar ve Veri/MC uyumu. N_{jet} dağılımı (sol-üst), en yüksek momentumlu jetin P_T dağılımı (orta-üst), jetlerin HT dağılımı (sağ-üst), en yüksek momentumlu leptonun P_T dağılımı (sol-alt), leptonların HT dağılımı (orta-alt) ve E_T^{miss} dağılımı (sağ-alt)..... 36

Şekil 4.14: $t\bar{t}$ kontrol bölgesi $\chi^2 < 10$ seviyesinde temel kinematik dağılımlar ve Veri/MC uyumu. N_{jet} dağılımı (sol-üst), en yüksek momentumlu jetin P_T dağılımı (orta-üst), jetlerin HT dağılımı (sağ-üst), en yüksek momentumlu leptonun P_T dağılımı (sol-alt), leptonların HT dağılımı (orta-alt) ve E_T^{miss} dağılımı (sağ-alt). 37

Şekil 4.15: WZ hafif çeşni kontrol bölgesi ön seçim seviyesinde temel kinematik dağılımlar ve Veri/MC uyumu. E_T^{miss} vektörünün ϕ bileşeninin dağılımı (sol-üst), en yüksek momentumlu jetin P_T dağılımı (orta-üst), jetlerin HT dağılımı (sağ-üst), en yüksek momentumlu leptonun P_T dağılımı (sol-alt), leptonların HT dağılımı (orta-alt) ve E_T^{miss} dağılımı (sağ-alt). 38

Şekil 4.16: WZ ağır çeşni kontrol bölgesi ön seçim seviyesinde temel kinematik dağılımlar ve Veri/MC uyumu. E_T^{miss} vektörünün ϕ bileşeninin dağılımı (sol-üst), en yüksek momentumlu jetin P_T dağılımı (orta-üst), jetlerin HT dağılımı (sağ-üst), en yüksek momentumlu leptonun P_T dağılımı (sol-alt), leptonların HT dağılımı (orta-alt) ve E_T^{miss} dağılımı (sağ-alt). 38

Şekil 4.17: WZ hafif çeşni kontrol bölgesi yeniden yapılandırma seviyesinde temel kinematik dağılımlar ve Veri/MC uyumu. E_T^{miss} vektörünün ϕ bileşeninin dağılımı (sol-üst), en yüksek momentumlu jetin P_T dağılımı (orta-üst), jetlerin HT dağılımı (sağ-üst), en yüksek momentumlu leptonun P_T dağılımı (sol-alt), leptonların HT dağılımı (orta-alt) ve E_T^{miss} dağılımı (sağ-alt). 39

Şekil 4.18: WZ ağır çeşni kontrol bölgesi yeniden yapılandırma seviyesinde temel kinematik dağılımlar ve Veri/MC uyumu. E_T^{miss} vektörünün ϕ bileşeninin dağılımı (sol-üst), en yüksek momentumlu jetin P_T dağılımı (orta-üst), jetlerin HT dağılımı (sağ-üst), en yüksek momentumlu leptonun P_T dağılımı (sol-alt), leptonların HT dağılımı (orta-alt) ve E_T^{miss} dağılımı (sağ-alt). 39

Şekil 4.19: ZZ kontrol bölgesi ön seçim seviyesinde temel kinematik dağılımlar ve Veri/MC uyumu. E_T^{miss} vektörünün ϕ bileşeninin dağılımı (sol-üst), en yüksek momentumlu jetin P_T dağılımı (orta-üst), jetlerin HT dağılımı (sağ-üst), en yüksek momentumlu leptonun P_T dağılımı (sol-alt), leptonların HT dağılımı (orta-alt) ve E_T^{miss} dağılımı (sağ-alt). 40

Şekil 4.20: ZZ kontrol bölgesi yeniden yapılandırma seviyesinde temel kinematik dağılımlar ve Veri/MC uyumu. E_T^{miss} vektörünün ϕ bileşeninin dağılımı (sol-üst), en yüksek momentumlu jetin P_T dağılımı (orta-üst), jetlerin HT dağılımı (sağ-üst), en yüksek momentumlu leptonun P_T dağılımı (sol-alt), leptonların HT dağılımı (orta-alt) ve E_T^{miss} dağılımı (sağ-alt). 41

Şekil 4.21: WW 2ℓ bozunum modunda hadronik bozunan W bozonlarının P_T, η, ϕ ve değişmez kütle dağılımları. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir. 42

Şekil 4.22: WZ 2ℓ bozunum modunda hadronik bozunan W (üst) ve Z (alt) bozonlarının P_T, η, ϕ ve değişmez kütle dağılımları. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir..... 42

Şekil 4.23: WH 2ℓ bozunum modunda hadronik bozunan W (üst) ve Higgs (alt) bozonlarının P_T, η, ϕ ve değişmez kütle dağılımları. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir. 43

Şekil 4.24: HZ 2ℓ bozunum modunda hadronik bozunan Higgs (üst) ve Z (alt) bozonlarının P_T, η, ϕ ve değişmez kütle dağılımları. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.. 43

Şekil 4.25: HH 2ℓ bozunum modunda hadronik bozunan Higgs bozonlarının P_T, η, ϕ ve değişmez kütle dağılımları. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir..... 44

Şekil 4.26: ZZ 2ℓ bozunum modunda hadronik bozunan Z bozonlarının P_T, η, ϕ ve değişmez kütle dağılımları. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir. 44

Şekil 4.27: 3ℓ WH bozunum modunda leptonik bozunan W (üst) ve hadronik bozunan Higgs (alt) bozonlarının P_T, η, ϕ ve değişmez kütle dağılımları. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir. 45

Şekil 4.28: 3ℓ WZ bozunum modunda leptonik bozunan W (üst) ve hadronik bozunan Z (alt) bozonlarının P_T, η, ϕ ve değişmez kütle dağılımları. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir. 45

Şekil 4.29: 4ℓ WZ bozunum modunda hadronik bozunan W (üst) ve leptonik bozunan Z (alt) bozonlarının P_T, η, ϕ ve değişmez kütle dağılımları. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir. 46

Şekil 4.30: 4ℓ ZZ bozunum modunda hadronik bozunan Z bozonu (üst) ve leptonik bozunan Z bozonunun (alt) P_T, η, ϕ ve değişmez kütle dağılımları. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir. 46

Şekil 4.31: WW 2ℓ bozunum modunda hadronik bozunan W bozonlarının P_T, η, ϕ ve değişmez kütle dağılımları. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir. 47

Şekil 4.32: WZ 2ℓ bozunum modunda hadronik bozunan W (üst) ve Z (alt) bozonlarının P_T, η, ϕ ve değişmez kütle dağılımları. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir..... 47

Şekil 4.33: WH 2ℓ bozunum modunda hadronik bozunan W (üst) ve Higgs (alt) bozonlarının P_T, η, ϕ ve değişmez kütle dağılımları. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir. 48

Şekil 4.34: HZ 2ℓ bozunum modunda hadronik bozunan Higgs (üst) ve Z (alt) bozonlarının P_T, η, ϕ ve değişmez kütle dağılımları. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.. 48

Şekil 4.35: HH 2ℓ bozunum modunda hadronik bozunan Higgs bozonlarının P_T, η, ϕ ve değişmez kütle dağılımları. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir..... 49

Şekil 4.36: ZZ 2ℓ bozunum modunda hadronik bozunan Z bozonlarının P_T, η, ϕ ve değişmez kütle dağılımları. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir. 49

Şekil 4.37: 3ℓ WH bozunum modunda leptonik bozunan W (üst) ve hadronik bozunan Higgs (alt) bozonlarının P_T, η, ϕ ve değişmez kütle dağılımları. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir. 50

Şekil 4.38: 3ℓ WZ bozunum modunda leptonik bozunan W (üst) ve hadronik bozunan Z (alt) bozonlarının P_T, η, ϕ ve değişmez kütle dağılımları. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir. 50

Şekil 4.39: 4ℓ WZ bozunum modunda hadronik bozunan W (üst) ve leptonik bozunan Z (alt) bozonlarının P_T, η, ϕ ve değişmez kütle dağılımları. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir. 51

Şekil 4.40: 4ℓ ZZ bozunum modunda hadronik bozunan Z bozonu (üst) ve leptonik bozunan Z bozonunun (alt) P_T, η, ϕ ve değişmez kütle dağılımları. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir. 51

Şekil 4.41: İstatistiksel oturtma öncesi sırasıyla 2ℓ WW, WZ, WH, HZ, HH ve ZZ sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_\mu$ 600 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir..... 52

Şekil 4.42: İstatistiksel oturtma öncesi sırasıyla 3ℓ WZ ve WH sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_\mu$ 600 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir..... 52

Şekil 4.43: İstatistiksel oturtma öncesi sırasıyla 4ℓ WZ ve ZZ sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_\mu$ 600 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir..... 53

Şekil 4.44: İstatistiksel oturtma öncesi sırasıyla 2ℓ HZ, HH ve ZZ sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_\mu$ 200 GeV singlet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir. 53

Şekil 4.45: İstatistiksel oturtma öncesi sırasıyla 4ℓ ZZ sinyal bölgelesinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_\mu$ 200 GeV singlet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir. 53

Şekil 4.46: İstatistiksel oturtma öncesi sırasıyla 2ℓ WW, WZ, WH, HZ, HH ve ZZ sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_e$ 600 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir. 54

Şekil 4.47: İstatistiksel oturtma öncesi sırasıyla 3ℓ WZ ve WH sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_e$ 600 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir. 54

Şekil 4.48: İstatistiksel oturtma öncesi sırasıyla 4ℓ WZ ve ZZ sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_e$ 600 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir. 55

Şekil 4.49: İstatistiksel oturtma öncesi sırasıyla 2ℓ HZ, HH ve ZZ sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_e$ 200 GeV singlet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir. 55

Şekil 4.50: İstatistiksel oturtma öncesi sırasıyla 4ℓ ZZ sinyal bölgesinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_e$ 200 GeV singlet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir. 55

Şekil 5.1: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_μ sırasıyla 2ℓ WW, WZ, WH, HZ, HH ve ZZ sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_\mu$ 600 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir. 58

Şekil 5.2: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_μ 3ℓ WZ(sol) ve WH(sağ) sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_\mu$ 600 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir. 59

Şekil 5.3: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_μ 4ℓ WZ(sol) ve ZZ(sağ) sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_\mu$ 600 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir. 59

Şekil 5.4: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_μ 2ℓ HZ(sol), HH(orta) ve ZZ(sağ) sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_\mu$ 200 GeV singlet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir. 59

Şekil 5.5: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_μ 4ℓ ZZ sinyal bölgesinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_\mu$ 200 GeV singlet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir. 60

Şekil 5.6: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_e sırasıyla 2ℓ WW, WZ, WH, HZ, HH ve ZZ sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_e$ 600 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir. 60

Şekil 5.7: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_e 3ℓ WZ(sol) ve WH(sağ) sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_e 600 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir. 61

Şekil 5.8: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_e 4ℓ WZ(sol) ve ZZ(sağ) sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_e 600 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir. 61

Şekil 5.9: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_e 2ℓ HZ(sol), HH(orta) ve ZZ(sağ) sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_e 200 GeV singlet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir. 61

Şekil 5.10: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_e 4ℓ ZZ sinyal bölgesinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_e 200 GeV singlet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir. 62

Şekil 5.11: İstatistiksel oturtma sonrası Z+jets kontrol bölgesinde sırasıyla WW, WZ, WH, HZ, HH ve ZZ bozunum modları için elde edilen mL_{ort} dağılımları. 62

Şekil 5.12: İstatistiksel oturtma sonrası $t\bar{t}$ kontrol bölgesinde sırasıyla WW, WZ, WH, HZ, HH ve ZZ bozunum modları için elde edilen mL_{ort} dağılımları. 63

Şekil 5.13: İstatistiksel oturtma sonrası WZ hafif çeşni(sol) ve WZ ağır çeşni(sağ) kontrol bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. 64

Şekil 5.14: İstatistiksel oturtma sonrası ZZ kontrol bölgesinde elde edilen mL_{ort} dağılımı. 64

Şekil 5.15: İstatistik belirsizlikler dahil olmak üzere, %95 güvenilirlik seviyesinde beklenen limitler. $\mu\mu$ kanalı(sol-üst), ee kanalı(sağ-üst), elektron müon birleşik kanal(alt). Sistematik belirsizlikler dahil edilmemiştir. 65

Şekil 5.16: İstatistik belirsizlikler dahil olmak üzere, %95 güvenilirlik seviyesinde beklenen limitler. $\mu\mu$ kanalı(sol-üst), ee kanalı(sağ-üst), elektron müon birleşik kanal(alt). Sistematik belirsizlikler dahil edilmemiştir. 66

TABLO LİSTESİ

Page No

Tablo 4.1: 2015-2018 veri alım sürecinde kullanılan tek lepton ve çift lepton tetikleme koşulları [36]. 18

Tablo 4.2: Elektron seçim kriterleri [36]. 19

Tablo 4.3: Müon seçim kriterleri [36]. 19

Tablo 4.4: ADL blokları ve görevleri [4]. 22

Tablo 4.5: ADL anahtar kelimeleri ve görevleri [4]. 22

Tablo 4.6: 2ℓ kategorisindeki önseçim şartları. 24

Tablo 4.7: 2ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerine sırasıyla uygulanan seçimler. 24

Tablo 4.8: 3ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerine sırasıyla uygulanan seçimler. 27

Tablo 4.9: 4ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerine sırasıyla uygulanan seçimler. 27

Tablo 5.1: VLL dublet $\mu\mu$, ee ve elektron müon birleşik kanallar için beklenen limitler. 65

Tablo 5.2: VLL singlet $\mu\mu$, ee ve elektron müon birleşik kanallar için beklenen limitler. 66

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler **Açıklama**

A_μ : Elektromanyetik alan

e, $\bar{e}$: Elektron, pozitron

E_T : Dikine Enerji

E_T^{miss} : Kayıp Dikine Enerji

χ^2_{toplam} : Bir Olayda Hesaplanan Toplam χ^2 Değeri

ℓ : Lepton

ψ : Fermiyonik Alan

ϕ : Azimutal Açı

θ : Kutup Açısı

η : Psödorapidite

$F_{\mu\nu}$: Elektromanyetik Alan Tensörü

j : Jet

L : Lagranjiyen

L_X : Yeniden Yapılandırılan Vektör Benzeri Lepton

$\mathscr{L}$: Işınlılık

m : Değişmez Kütle

m_{ll} : Olaydaki Lepton Çiftinin Toplam Değişmez Kütlesi

mL_{ort} : Yeniden Yapılandırılan Vektör Benzeri Lepton Çiftinin Kütlelerinin Ortalaması

m_X^{truth} : Bozon Nominal Kütlesi

m_X^{reco} : Yeniden Yapılandırılan Bozon Adayının Kütlesi

μ, $\bar{\mu}$: Müon, antimüon

ν, $\bar{\nu}$: Nötrino, antinötrino

N_e : Bir Olaydaki Elektron Sayısı

N_{jet} : Bir Olaydaki Jet sayısı

N_μ : Bir Olaydaki Müon Sayısı

p : Proton

P_T : Dikine Momentum

q_{ll} : Olaydaki Lepton Çiftinin Toplam Elektrik Yükü

σ_L : Yeniden Yapılandırılan Vektör Benzeri Leptonların Kütlelerinin Belirsizliği

τ, $\bar{\tau}$: Tau Leptonu

$W^{\pm}$: Pozitif Veya Negatif Yüklü W Bozonu

X_1, X_2 : Yeniden Yapılandırılan Leptonik veya Hadronik Bozonlar

Z : Z Bozonu

H : Higgs Bozonu

γ^{μ} : Dirac Matrisi

Kısaltmalar **Açıklama**

ALICE : Ağır İyon Çarpıştırıcısı Deneyi

ATLAS : Büyük Hadron Çarpıştırıcısının Toroid Aparatı

b : barn

BHÇ : Büyük Hadron Çarpıştırıcısı

CERN : Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi

CMS : Kompakt Müon Solenoid

CSC : Katot Şerit Odası

HLT : Yüksek Seviye Tetikleyici

ID : ATLAS İç Algıç Sistemi

LAr : Sıvı Argon

LHCb : Büyük Hadron Çarpıştırıcısı b-Fiziği Deneyi

LINAC : Doğrusal Hızlandırıcı

MDT : İzlenen Sürüklenme Tüpü Odası

PS : Proton Sinkrotronu

PSB : Proton Sinkrotronu Güçlendiricisi

RPC : Dirençli Plaka Odası

SCT : Yarı İletken İz Sürücüsü

SFOS : Aynı çeşnili zıt yüklü

SM : Standart Model

SPS : Süper Proton Sinkrotronu

TGC : İnce Aralık Odası

TRT : Geçiş Işıması İz Sürücüsü

VLQ : Vektör Benzeri Kuark

VLL : Vektör Benzeri Lepton

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ATLAS VERİSİ İLE VEKTÖR BENZERİ AĞIR LEPTONLARIN ARANMASI

Ahmetcan SANSAR

İstanbul Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Aytül ADIGÜZEL

Bu tezde Standart Model ötesi kuramlar tarafından öngörülen, birinci ve ikinci aile hafif leptonlarıyla çiftlenen vektör benzeri ağır leptonların çift üretimine ait son durumda zıt yüklü 2 lepton, 3 lepton ve 4 lepton içeren bozunum kanalları, VLL singlet ve VLL dublet'ler ayrı ayrı ele alınarak ADL/CutLang analiz çerçevesi kullanılarak araştırılmıştır. ATLAS algıcının 2015 ve 2018 yılları arasında 13 TeV kütle merkezi enerjisinde topladığı 140 fb^{-1} toplam ışınlıktaki proton-proton çarpışma verisi kullanılmıştır. Farklı kütlelere sahip sinyaller ve Standart Model ardalan örnekleri üzerinde kesim yapmaya dayanan olay seçimi yöntemi gerçekleştirilmiştir. Veriye bakılmaksızın CL_S yöntemi ile %95 güvenilirlik seviyesinde beklenen dışarlama limitleri sistematik belirsizlikler olmadan VLL singlet için $460.4^{+27.2}_{-57.5}$ GeV ve VLL dublet için $1328.9^{+7.1}_{-7.7}$ GeV olarak hesaplanmıştır.

Haziran 2024, 157 sayfa.

Anahtar kelimeler: Parçacık Fiziği, Standart Model, Standart Model Ötesi, Veri Analizi, ADL, Cutlang.

SUMMARY

M.Sc. THESIS

SEARCH FOR VECTOR-LIKE HEAVY LEPTONS WITH THE ATLAS DATA

Ahmetcan SANSAR

İstanbul University

Institute of Graduate Studies in Sciences

Physics

Supervisor: Prof. Aytül ADIGÜZEL

In this thesis, pair production of vector like heavy leptons has been searched using the data collected by the ATLAS detector between 2015-2018, corresponding to 140 fb^{-1} of total integrated luminosity at center of mass energy of 13 TeV. The analysis has been conducted by using the ADL/CutLang analysis framework. VLL singlets and VLL doublets are considered separately in the decay channels containing oppositely charged two leptons, three leptons and four leptons in the final states. A cut based selection algorithm is used on Standard Model backgrounds and signal samples with different mass points. Without taking account of the data, expected exclusion limits without systematic uncertainties have been calculated as $460.4^{+27.2}_{-57.5}$ GeV for VLL singlet and $1328.9^{+7.1}_{-7.7}$ GeV for VLL doublet at 95% confidence level using CL_S method.

June 2024, 157 pages.

Keywords: Particle Physics, Standard Model, Beyond Standard Model, Data Analysis, ADL, Cutlang.

1. GİRİŞ

Parçacık fiziğinin Standart Modeli (SM), maddeyi oluşturan temel yapı taşlarını ve bunların arasındaki etkileşimleri açıklayan, doğruluğu deneylerle sınanmış en başarılı modeldir. 2012 yılında CERN'deki Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (BHÇ) bünyesindeki ATLAS ve CMS deneyleri tarafından Higgs bozonunun keşfedilmesi [1, 2] ile birlikte SM'nin son eksik parçası da tamamlanmıştır. SM her ne kadar başarılı olsa da karanlık madde, hiyerarşi problemi, renk hapsi hipotezi, sağ sol asimetrisi ve birçok gözlenmiş fenomen için yeterli açıklamaya sahip değildir. Yeni fizik arayışlarında öngörülen parçacıklardan olan vektör benzeri leptonlar (VLL), elektro zayıf etkileşim ile çift olarak üretilen, TeV skalasında oldukları öngörülen SM'nin uzantısı olabilecek varsayımsal fermiyonlardır. Günümüzde VLL araştırmaları oldukça popülerlik kazanmış durumdadır ve CERN'deki ATLAS ve CMS deneylerinde aktif olarak farklı modeller ile VLL arayışları gerçekleştirilmektedir.

Bu tezde, SU(2) singlet ve SU(2) dublet VLL modelleri [3] tarafından öngörülen birinci ve ikinci aile SM leptonları ile etkileşen singlet ve doublet VLL'ler, çoklu leptona sahip son durumlarında, ATLAS algıcı tarafından $\sqrt{s} = 13$ TeV kütle merkezi enerjisinde toplanan 140 fb^{-1} toplam ışınlılıktaki pp çarpışma verisi kullanılarak araştırılmıştır. Analizde singlet ve dublet VLL'ler elektron ve müon kanalları için ayrı ayrı incelenmiştir, VLL'ler son durumlarındaki lepton sayılarına göre 2ℓ, 3ℓ ve 4ℓ olmak üzere üç kategoriye ayrılmıştır. X harfi $W^{\pm}$, Z ve Higgs bozonlarını temsil etmek üzere, $L_X \to X\ell$ şeklinde bozunabilen VLL'lerin çift üretiminde oluşabilecek birçok farklı bozunum moduna karşılık gelen sinyal bölgeleri ve SM kontrol bölgeleri tanımlanmıştır. Monte Carlo simülasyonları ile üretilmiş SM süreçleri ve farklı kütlelerdeki VLL singlet ve dublet sinyal olayları üzerinde kesim yapmaya dayanan olay seçim yöntemi kullanılmıştır ve χ^2 kütle optimizasyonu yöntemi ile en iyi VLL adayları yeniden yapılandırılmıştır. İstatistiksel hesaplamalar ve beklenen limitin elde edilmesi için CL_S yöntemini [5] temel alan TRExFitter [6] yazılım çerçevesi kullanılmıştır.

2. STANDART MODEL VE ÖTESİ

2.1. STANDART MODEL

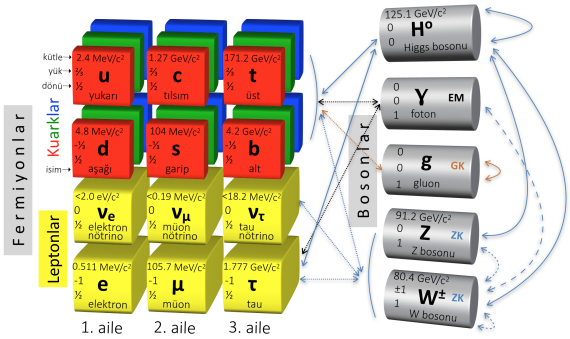
Standart Model, birçok parçacığın varlığını başarılı bir şekilde öngörmüş, doğadaki temel etkileşimleri en iyi şekilde açıklayan kuramdır. Atom altı seviyesindeki parçacıkları ve bunların aralarındaki elektromanyetik, zayıf ve güçlü etkileşimleri açıklar.

SM'de maddenin en temel yapı taşları temel parçacıklar adı altında sınıflandırılmıştır. Temel parçacıklar fermiyonlar ve bozonlar olamak üzere ikiye ayrılır. Fermiyonlar yarım spinli ve Fermi-Dirac istatistiğine, bozonlar ise tam spinli ve Bose-Einstein istatistiğine uyan parçacıklardır.

Mevcut fermiyonlar üç farklı aile altında sınıflandırılır. Her bir ailede iki kuark, bir lepton ve bu leptona karşılık gelen lepton nötrinosu ve bu parçacıklara karşılık gelen karşıt parçacıkları bulunur. Kuarklar altı farklı çeşnide bulunur, bulunduğu ailelere göre (1. aile, 2. aile ve 3. aile) sırasıyla; yukarı (u) ve aşağı (d), tılsım (c) ve tuhaf (s), üst (t) ve alt (b) olarak sınıflandırılırlar. Kuarklar leptonlardan farklı olarak renk yüküne sahip parçacıklardır ve bu sebeple doğada serbest halde değil, birbirleri ile güçlü etkileşim ile bağlanarak baryonlar (kuark veya anti kuark üçlüleri) ya da mezonlar (kuark ve anti kuark çiftleri) olarak bulunabilirler.SM'deki kuvvetler denklem 2.1'de ifade edilen simetri grupları ile ilişkili ayar bozonları tarafından sağlanırlar.

$$SU(3)_C \otimes SU(2)_L \otimes U(1)_Y \tag{2.1}$$

Güçlü etkileşimlerin kuvvet taşıyıcısı, yüksüz ve kütlesiz bir parçacık olan gluonlardır. Gluonlar da kuarklar gibi renk yüküne sahiplerdir ve yalnızca birbirleri ile/veya kuarklar ile etkileşerek renksiz hadronları oluştururlar. Zayıf etkileşimler W^+, W^- ve Z bozonları ile sağlanır. SM'deki bir diğer temel etkileşim olan elektromanyetik etkileşimler ise yüksüz fotonlar ile sağlanır. SM'deki temel parçacıklar ve özellikleri Şekil 2.1'de bulunabilir.



Şekil 2.1: Standart Model'deki temel parçacıklar ve özellikleri [7].

2.1.1. Kuantum Elektrodinamiği

Kuantum elektrodinamiği(KED), SM'de altında yatan simetri grubu $U(1)_Y$ olan ve elektromanyetik etkleşimleri açıklayan göreli bir kuantum alan teorisidir. Deneysel sonuçları çok ince hassasiyetlerle öngörmüş başarılı bir modeldir. KED'de parçacıklar arasındaki etkileşim sanal foton adı verilen kuvvet taşıyıcı parçacık ile sağlanır. En basit elektromanyetik etkileşim yalnızca bir adet sanal foton değiş tokuşu ile sağlanabilir, ancak etkileşen parçacık sayısı arttıkça beraberinde aracılık eden sanal foton sayısı da artmaktadır. Bu parçacığın sanal olarak adlandırılmasının sebebi doğada serbest halde bulunmayıp yalnızca elektromanyetik etkileşmeye aracılık etmesidir. KED etkileşim lagranjiyeni Denklem 2.2'de tanımlanmıştır [8]. KED lagranjiyenindeki ψ fermiyonik alan, $\bar{\psi}$ ise fermiyonik alanın hermitsel eşleniğidir. γ^μ Dirac matrislerini, e elektrik yükünü ve m elektron veya pozitron kütlesini ifade etmektedir. Elektromanyetik alan tensörü, $F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$ şeklinde tanımlanır ve bu ifadede A_μ elektromanyetik alanı temsil eder.

$$L_{KED} = \bar{\psi}(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi - e\bar{\psi}\gamma^\mu \psi A_\mu - \frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} \tag{2.2}$$

2.1.2. Kuantum Renk Dinamiği

Kuantum renk dinamiği(KRD), renk yükü adı verilen kuantum numarasına sahip olan kuarklar ve gluonlar arasındaki güçlü etkileşimleri açıklayan kauntum alan teorisidir. Her kuark bir renk yükü ve her karşıt kuark bir karşıt renk yükü adı verilen kuantum numarası

taşır, her bir gluon ise hem bir renk yükü hem de bir karşıt renk yükü taşır, bu sayede gluonlar birbirleri ile de etkileşirler. SM'de KRD'nin altında yatan simetri grubu $SU(3)_C$'dir ve C harfi renk yükünü temsil eder. KRD etkileşim lagranjiyeni aşağıdaki denklem ile ifade edilir:

$$L_{KRD} = \psi_i(i\gamma^\mu(D^\mu)_{ij} - m\delta_{ij})\psi_j - \frac{1}{4}G^a_{\mu\nu}G^{\mu\nu}_a \tag{2.3}$$

KRD lagranjiyenindeki ψ_i terimi kuark alanını, D^μ_{ij} ise $D^\mu_{ij} = \partial_\mu\delta_{ij} - ig(\frac{\lambda_a}{2})_{ij}A^a_\mu$ olarak tanımlanan ayar kovaryant türevini temsil eder. λ_a Gell-Mann matrisleri, g ise çiftlenim gücü olarak tanımlanır. KED'ye benzer olarak gluon alan tensörü $G^a_{\mu\nu}$ şu şekilde tanımlanır: $G^a_{\mu\nu} = \partial_\mu A^a_\nu - \partial_\nu A^a_\mu + gf^{abc}A^b_\mu A^c_\nu$

Kuarklar ve gluonlar doğada serbest halde değil ancak renksiz hadronlar halinde bulunabilirler, bu durum renk hapsi hipotezi ile açıklanır. Kuarklar ve gluonlar arasındaki güçlü etkileşim aralarındaki mesafe ile doğru orantılı olarak artar, bu güçlü etkileşim yeni kuarkların oluşmasına yol açar. Bu sürecin zincirleme bir şekilde gerçekleşmesine hadronlaşma adı verilir.

2.2. STANDART MODEL ÖTESİ

2.2.1. SU(2) Vektör Benzeri Leptonlar

SM, çok kez test edilip başarısını kanıtlamış bir model olmasına rağmen evrendeki madde antimadde asimetrisi, karanlık madde, kütle hiyerarşi problemi, müon g-2 anomalisi ve Cabibo açısı anomalisi gibi açıklanamayan durumlar SM ötesi yeni parçacıkların araştırılmasını zorunlu kılmıştır. Bu durumlara cevap olması umulan parçacıklardan bazıları vektmr benzeri kuarklar (VLQ) ve vektör benzeri leptonlardır (VLL).

ATLAS ve CMS deneylerinde aktif olarak VLL araştırmaları sürmektedir. Geçen yıllarda CMS tarafından $\sqrt{s} = 13$ TeV enerjide toplanan 77.4 fb^{-1} toplam ışınlılıktaki proton proton çarpışma verisi ile gerçekleştirilen çalışma sonucunda, yalnızca üçüncü aile SM leptonları ile çiftlenen dublet VLL'ler için 120-790 GeV kütle aralığı %95 güvenilirlik seviyesinde dışarlanmıştır [9]. ATLAS kolaborasyonunun $\sqrt{s} = 13$ TeV enerjide 139 fb^{-1}

büyüklüğündeki veri ile yaptığı benzer araştırmada, üçüncü aile dublet VLL'ler 130-900 GeV kütle aralığında %95 güvenilirlik seviyesinde dışarlanmıştır [10].

$\ell'_{L,R}$ ve anti parçacık olarak $\bar{\ell}'_{L,R}$ şeklinde temsil edilen SU(2) singlet VLL'lerin ve $L_{L,R}$ ve anti parçacığı $\overline{L}_{L,R}$ olan SU(2) dublet VLL'lerin ($L_{L,R} = \ell'_{L,R}, \nu'_{\ell'}$) $SU(3)_C \otimes SU(2)_L \otimes U(1)_Y$ simetri grupları altında dönüşümü aşağıda tarif edilmiştir:

$$\ell'_{L,R} + \bar{\ell}'_{L,R} = (1,1,-1) + (1,1,1) \tag{2.4}$$

$$L_{L,R} + \overline{L}_{L,R} = (1,2,-1/2) + (1,2,1/2) \tag{2.5}$$

Denklem 2.4 ve 2.5'te tarif edilen dönüşümlerdeki parantez içindeki ilk terim bu parçacıkların renk singlet yani renk yükü olarak nötr olduklarını ifade eder. İkinci terim 1 olduğunda parçacıkların SU(2) altında singlet olarak, terim 2 olduğunda ise SU(2) altında dublet olarak dönüştükleri anlamına gelir. Son terim ise parçacıkların hiperyük değerini yansıtır.

Singlet ve dublet VLL'lere ait etkileşim lagranjiyenleri Denklem 2.6 ve 2.7'de ifade edilmiştir:

$$L_{singlet} = \frac{g s_W^2}{c_W} Z_\mu \left(\ell^\dagger \bar{\gamma}^\mu \ell' - \bar{\ell}^\dagger \bar{\gamma}^\mu \bar{\ell}' \right) - e A_\mu \left(\ell^\dagger \bar{\gamma}^\mu \ell' - \bar{\ell}^\dagger \bar{\gamma}^\mu \bar{\ell}' \right) \tag{2.6}$$

$$\begin{aligned} L_{dublet} = & \frac{g}{\sqrt{2}} W_\mu^+ \left(\ell^\dagger \gamma^\mu \nu + \nu^\dagger \gamma^\mu \ell' \right) + \frac{g}{\sqrt{2}} W_\mu^- \left(\ell'^\dagger \gamma^\mu \nu' + \nu'^\dagger \gamma^\mu \ell \right) - e A_\mu \left(\ell^\dagger \gamma^\mu \ell' - \ell'^\dagger \gamma^\mu \ell \right) \\ & + \frac{g}{c_W} \left(s_W^2 - \frac{1}{2} \right) Z_\mu \left(\ell^\dagger \gamma^\mu \ell' - \ell'^\dagger \gamma^\mu \ell \right) + \frac{g}{2 c_W} Z_\mu \left(\nu^\dagger \gamma^\mu \nu' - \nu'^\dagger \gamma^\mu \nu \right) \end{aligned} \tag{2.7}$$

Singlet lagranjiyeninin ilk terimi VLL'lerin Z bozonu ile olan etkileşimlerini, ikinci terimi ise fotonlar ile gerçekleşen etkileşimlerini tarif etmektedir. Burada g harfi $SU(2)_L$ çiftlenim sabiti, e harfi de elektrik yükü olarak kullanılmaktadır. s_W ve c_W kısaltmaları ise zayıf karışım açısının sinüs ve kosinüs bileşenlerini temsil etmektedir. Doublet lagranjiyeninde ise singletten farklı olarak ağır Dirac nötrinosu içeren süreçlerin $W^{\pm}$ ve Z bozonları ile gerçekleştirdiği etkileşimler ayrı terimlerle ifade edilmiştir. Dublet lagranjiyenindeki $W_{\mu}^{\pm}$ ve Z_{μ} terimleri $W^{\pm}$ ve Z bozonu alanlarını temsil etmektedir.

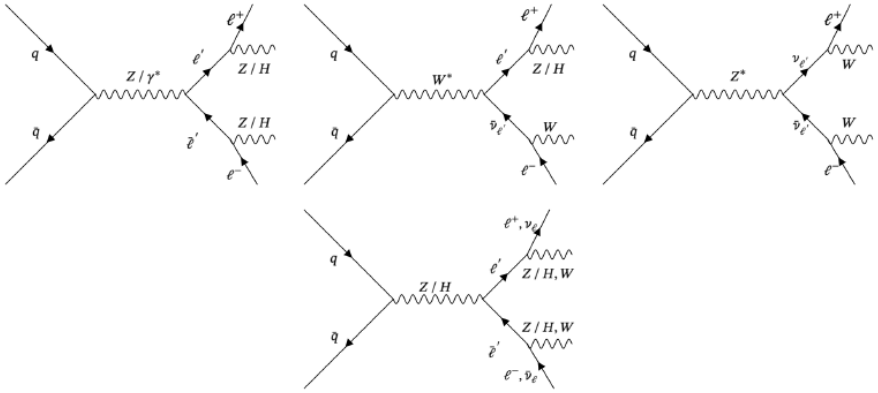
Denklem 2.8'de singlet VLL'lerin üretim süreci ifade edilmiştir. Singlet VLL'ler s-kanalında Z bozonu ya da γ aracılığı ile üretilirler.

$$pp \to Z/\gamma \to \ell'^{+}\ell'^{-} \tag{2.8}$$

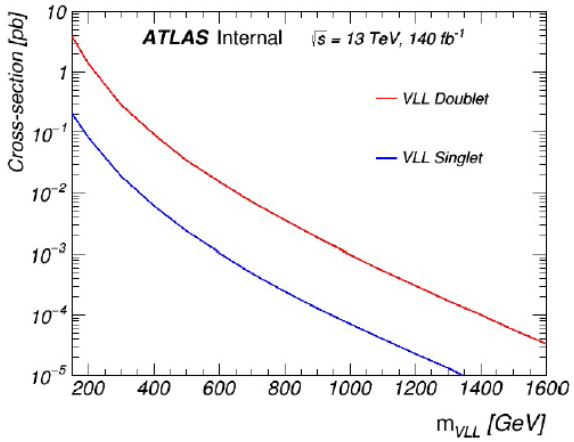
Denklem 2.7'ye ek olarak dublet VLL üretiminde yüklü VLL'nin yanında vektör benzeri ağır Dirac nötrinosu da açığa çıkabilir ve bu süreçler Z ve γ'ya ek olarak $W^{\pm}$ bozonları aracılığıyla da üretilebilir. Ağır Dirac nötrinosu içeren süreçler Denklem 2.8'de gösterilmiştir.

$$\begin{aligned} pp &\to Z/\gamma \to \nu'_{\ell'}\bar{\nu}'_{\ell'}, \\ pp &\to W^{+} \to \nu'_{\ell'}\ell'^{+}, \\ pp &\to W^{-} \to \bar{\nu}'_{\ell'}\ell'^{-}. \end{aligned} \tag{2.9}$$

Dublet VLL'ler sayıca daha fazla üretim moduna sahip olduğu için singlet VLL'lere göre daha yüksek üretim tesir kesitine sahiplerdir. Singlet ve dublet VLL'lerin üretim ve bozunum modlarına ait Feynman diyagramları Şekil 2.2 ve $\sqrt{s} = 13$ TeV enerjide üretim tesir kesitleri, VLL kütlesinin fonksiyonu olarak Şekil 2.3'te gösterilmiştir.



Şekil 2.2: VLL dublet (üst) ve VLL singlet (alt) üretim ve bozunum süreçlerine ait Feynman diyagramları [36].



Şekil 2.3: VLL singlet (mavi) ve VLL dublet (kırmızı) üretim tesir kesitleri [36].

3. BÜYÜK HADRON ÇARPIŞTIRICISINDAKİ ATLAS DENEYİ

CERN (Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi), merkezi İsviçre-Fransa sınırına yakın olan Cenevre kentinde bulunan, dünyanın en büyük parçacık fiziği laboratuvarıdır. Bünyesinde 2700 çalışan ve dünyanın birçok ülkesinden kullanıcı statüsünde 12000 bilim insanı barındırır [11]. CERN'de bilimsel araştırmalarda kullanılan birçok hızlandırıcı ve algıç sistemleri bulunmaktadır. Tezin bu kısmında CERN'deki Büyük Hadron Çarpıştırıcısı ve bu hızlandırıcı üzerinde bulunan ATLAS deneyi detaylı olarak açıklanmıştır.

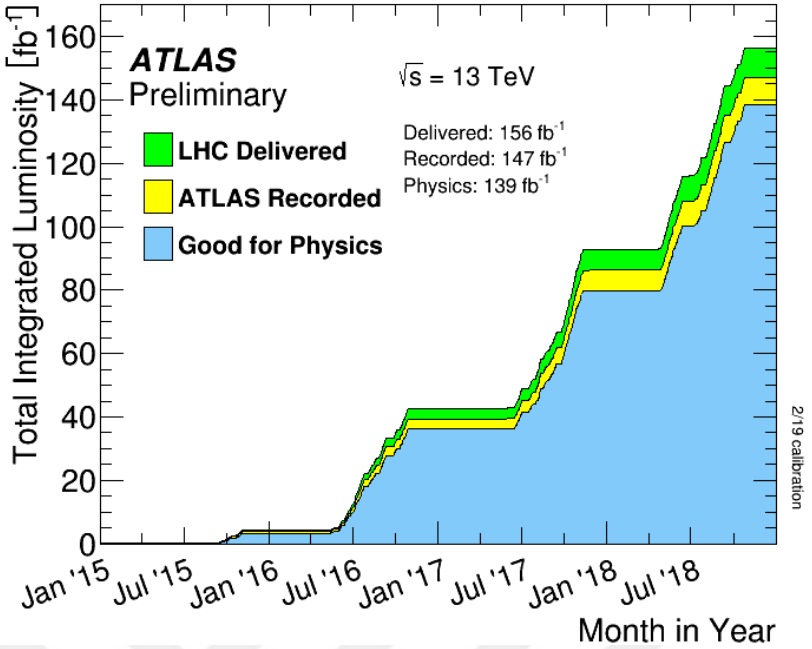
3.1. BÜYÜK HADRON ÇARPIŞTIRICISI

Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (BHÇ) [12], 27 km uzunluğuyla dünya üzerinde inşa edilmiş en büyük ve en güçlü dairel parçacık hızlandırıcısıdır. Proton-proton çarpışmaları için tasarım enerjisi $\sqrt{s}$ = 14 TeV'dir, ek olarak proton-iyon ve iyon-iyon çarpışmaları için de tasarlanmıştır. BHÇ'de protonlar demetler halinde hızlandırılır, her bir demet arasında geçen süre 25 ns'dir ve tasarım ışınlılık değeri $\mathscr{L} = 10^{34}\ cm^{-2}\ s^{-1}$'dir.

Işınlılık, BHÇ fiziğindeki önemli kavramlardan birisidir. Işınlılık bir saniyede bir santimetre kare başına gerçekleşen proton proton çarpışmalarının sayısıdır. Algıç fiziğinde ise genellikle toplam ışınlılık (L= $\int L\,dt$) kullanılır ve barn biriminin tersi cinsinden ifade edilir (1 barn= 10^{-28}m), aynı zamanda toplanan verinin büyüklüğünün ölçüsüdür. Şekil 3.1, ATLAS deneyi tarafından Run2 süresinde toplanan veri miktarını göstermektedir. Run, BHÇ'de gerçekleşen çarpışma verilerinin toplandığı süreç olarak tanımlanmaktadır. BHÇ'de belirli bir fizik süreci için beklenen olay sayısı, toplam ışınlılık (L), ve tesir kesiti (σ) ve algıç verimliliğinin (ε) çarpılması ile elde edilir (Denklem 3.1).

$$N = \sigma \times L \times \varepsilon \tag{3.1}$$

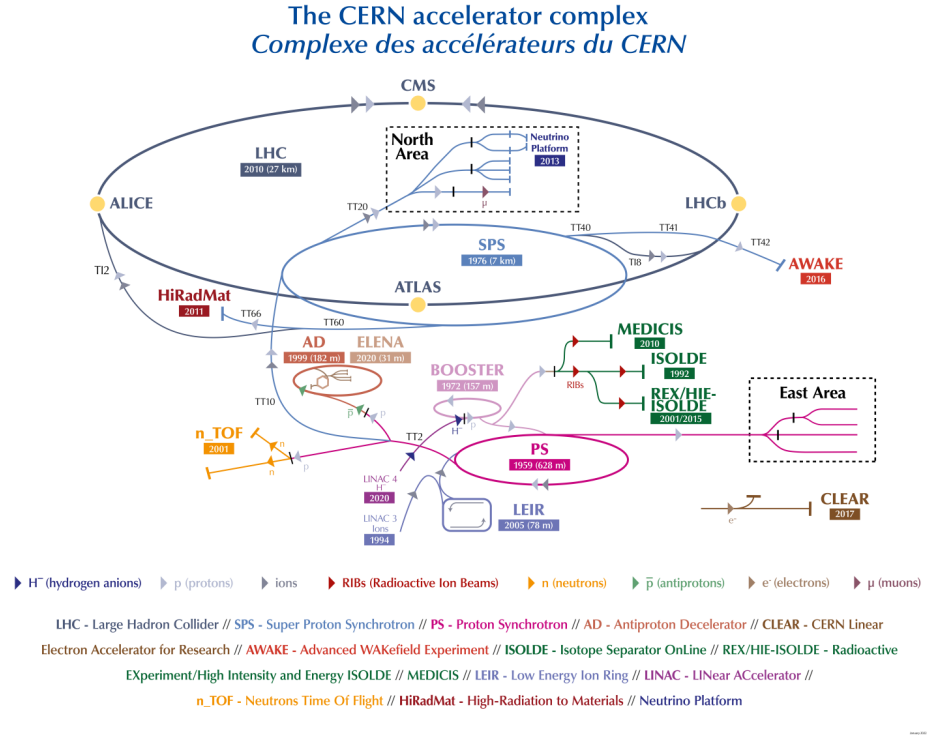
BHÇ'de hızlandırılacak proton demetleri öncesinde birkaç aşamalı hızlandırma sürecinden



Şekil 3.1: BHÇ Run2 süresinde yıllara göre elde edilen veri miktarı. Mavi renkli dağılım fizik analizleri için kullanılabilir durumda olan veriyi, üstündeki sarı renkli dağılım ATLAS algıcının kaydettiği veriyi, üstündeki yeşil renkli dağılım ise BHÇ tarafından sağlanan veriyi göstermektedir [14].

geçmektedir(Şekil 3.2). Ön hızlandırma aşamaları sırasıyla: LINAC4, Proton Sinkrotron Güçlendiricisi(PSB), Proton Sinkrotronu ve Süper Proton Sinkrotronu(SPS)'dur. İlk olarak LINAC4'te negatif Hidrojen iyonları elektronlarından ayrılarak protonlar 160 MeV'e kadar hızlandırılarak PSB'ye aktarılırlar, ardından PSB'de 2 GeV'e hızlandırılan protonlar PS'e iletilir ve PS'te 26 GeV'e kadar hızlandırılan protonlar son aşama olarak SPS'te 450 GeV'e kadar hızlandırılırlar.

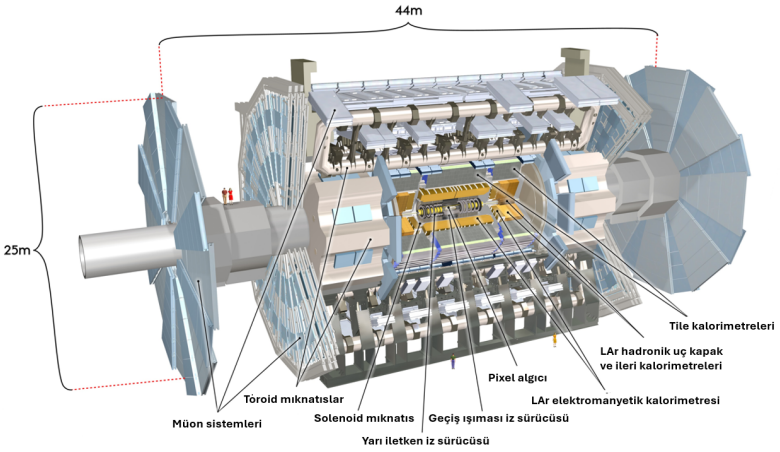
BHÇ'deki çarpışmaları kullanarak parçacık fiziğinin farklı kulvarlarında araştırma yapan dört büyük algıç sistemi vardır: ATLAS, CMS, ALICE ve LHCb. ATLAS ve CMS deneyleri Standart Model ve Standart Model Ötesi fizik araştırmaları için kurulmuş genel amaçlı algıçlardır. ALICE deneyinde ağır iyon çarpışmaları ile kuark gluon plazması elde ederek evrenin başlangıç koşulları üzerine araştırmalar yapılmaktadır. LHCb deneyinde ise alt kuark içeren fizik süreçleri incelenerek evrendeki madde-antimadde asimetrisinin nedeni araştırılmaktadır.



Şekil 3.2: CERN hızlandırıcı kompleksi [13].

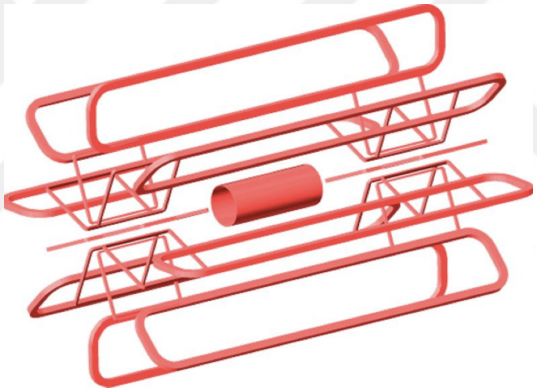
3.2. BÜYÜK HADRON ÇARPIŞTIRICISININ TOROİD APARATI (ATLAS) ALGICI

ATLAS algıcı, yüksek enerjili proton çarpışmaları sonucu açığa çıkan parçacıkları algılamak için kullanılan, şimdiye kadar birçok önemli keşfe imza atmış ve güncel olarak da bünyesinde yeni fizik araştırmaları sürdürülen genel amaçlı parçacık algıcıdır. 46 metre uzunluğu, 25 metre çapı ve 7000 tonluk kütlesiyle şimdiye kadar inşaa edilmiş en büyük parçacık algıcıdır.



Şekil 3.3: ATLAS algıcının bilgisayarla oluşturulmuş görüntüsü [15].

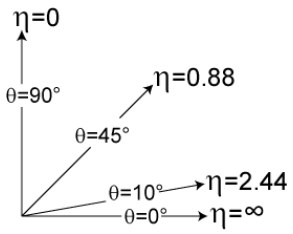
ATLAS bünyesinde farklı algıç alt sistemlerini barındırır, her bir alt sistem belirli parçacıklar ve belirli nicelikleri ölçmek için tasarlanmıştır. Bu alt sistemler: İç Algıç Sistemi (ID), elektromanyetik ve hadronik kalorimetre sistemleri ve müon spektrometreleridir. ATLAS algıcında süperiletken solenoid ve toroid mıknatıs sistemleri kullanılır. Bu mıknatıs sistemlerinin sağladıkları güçlü manyetik alan ile yüklü parçacıkların izledikleri yollar bükülerek parçacıkların momentumları ve yükleri ölçülmektedir. ID'nin etrafı 5.6 metre uzunluğunda ve 2.56 metre çapında 2 Tesla büyüklüğünde manyetik alan sağlayan solenoid mıknatısla çevrilidir. ATLAS'ta müonların momentumlarını ölçmek için 3.5 Tesla manyetik alan sağlayan üç farklı toroid mıknatıs sistemi konumlandırılmıştır. Bu toroidlerden ikisi ATLAS'ın uç kapak adı verilen baş ve son kısımlarında, bir tanesi ise ATLAS'ın tamamını çevreleyecek şekilde yerleştirilmiştir. ATLAS'taki solenoid ve toroid mıknatısların konumları Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4: ATLAS algıcında kullanılan solenoid ve toroid mıknatıslar [16].

ATLAS algıcında kartezyen koordinat sistemi(x-y-z) kullanılmaktadır. Koordinat sisteminin başlangıç noktası çarpışma noktasıdır. BHÇ'deki demet hattına paralel eksen z ekseni olarak, bu eksenin pozitif kısmı A tarafı ve negatif kısmı ise C tarafı olarak isimlendirilmiştir. y ekseni yukarı yönü işaret eder ve x ekseni ise BHÇ merkezini işaret eder. Demet hattına dik olan x-y ekseni ise dikey eksen olarak adlandırılır ve bu eksende ölçülen enerji ve momentum nicelikleri P_T ve E_T olarak ifade edilmektedir. Kartezyen koordinat sisteminin yanı sıra, algıç çalışmaları ve veri analizlerinde sıklıkla küresel koordinat sistemi(r-ϕ-θ) kullanılır. Küresel koordinatlarda r mesafesi demet hattına olan uzaklığı, azimutal açı ϕ demet ile x ekseni arasındaki açıyı ve kutup açısı θ ise pozitif z ekseni ile olan açıyı ifade eder. Kutup açısı yerine çoğunlukla denklem 3.2'deki psödorapidite η niceliği kullanılmaktadır. θ ile η arasındaki ilişki Şekil 3.5'teki gibidir. Kullanılan yaygın niceliklerden bir diğeri ise η-ϕ uzayında tanımlanan ΔR mesafesidir ve $\Delta R = \sqrt{\Delta\eta^2 + \Delta\phi^2}$ şeklinde tanımlanır.

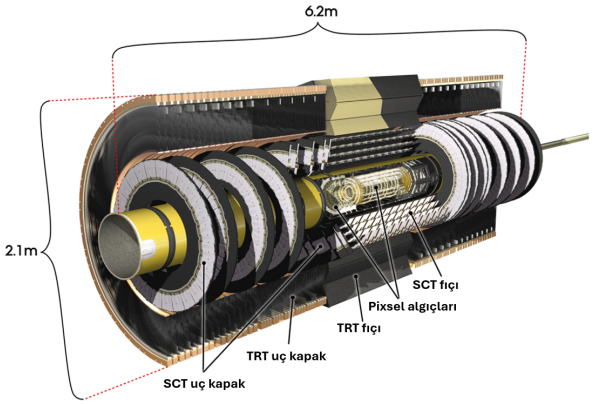
$$\eta = -ln(tan(\frac{\theta}{2})) \tag{3.2}$$



Şekil 3.5: Kutup açısı ile psödorapidite arasındaki ilişki [17].

3.2.1. İç Algıç Sistemi

ATLAS İç Algıç Sistemi(ID) [18] üç farklı algıç sisteminden oluşur: Piksel algıcı, Yarı İletken İz Sürücüsü (SCT) ve Geçiş Işıması İz Sürücüsü (TRT). ID sisteminde solenoid mıknatısın sağladığı 2.0 T büyüklüğündeki manyetik alan ile $|\eta| < 2.5$ menzilindeki yüklü parçacıkların izlerini yeniden yapılandırma ve parçacık tanılama (PID) çalışmaları yürütülmektedir.



Şekil 3.6: İç Algıç Sistemi'nin bilgisayarla oluşturulmuş görüntüsü [19].

3.2.1.1. Piksel Algıcı

Piksel algıcı [20] ID sisteminin en iç kısmındadır ve BHÇ demet hattının 3.3 cm uzağına konumlandırılmıştır. Dört katmandan oluşur ve yaklaşık 92 milyon piksel adı verilen elektronik kanala sahiptir. Çarpışma noktasında oluşan parçacıklar piksellerde enerji birikintileri bırakırlar ve bu sayede 10 μm çözünürlükle parçacıkların momentum ve konum ölçümleri yapılır.

3.2.1.2. Yarı İletken İz Sürücüsü (SCT)

SCT algıcı [21], Piksel algıcından sonra gelen ve yüklü parçacıkların izlerini tespit edip yeniden yapılandırmak için kullanılan yarı iletken teknolojisine dayalı bir algıç sistemidir. SCT'nin içerisinde yaklaşık 4000 adet elektronik modül ve bu modüllerin içerisinde toplam 6 milyon silikon sensör bulundurur. Varil kısmında 4, her bir uç kapakta ise 9 adet silindirik katman vardır. Bu katmanlar algıçtan geçecek her bir parçacığın en az 4 adet katmandan geçeceği şekilde tasarlanmıştır. Böylelikle 25 μm hassasiyet ile gelen parçacıkların izleri tespit edilebilmektedir.

3.2.1.3. Geçiş Işıması İz Sürücüsü (TRT)

TRT [22], [23], ID'nin en dış kısmında konumlandırılan ve geçiş ışıması prensibi ile yüklü parçacıkları varlayan gazlı bir algıç sistemidir. TRT yaklaşık olarak $|\eta| < 2.0$ içerisindeki bölgeyi kapsar ve Fıçı, Uç Kapak A ve Uç Kapak C olmak üzere üç kısma ayrılır. TRT'de parçacıkların algılanması pipet adı verilen içerisi gazla dolu elektronik devreler tarafından gerçekleştirilir. Toplam 298304 adet karbonla güçlendirilmiş kapton pipet bulunur, her bir pipet 4 mm çapındadır ve merkezlerinde 31 μm çapında altın kaplama tungsten anot tel bulunur. Fıçı kısmında 52544 adet pipet 560 mm < r < 1080 mm ve |z| < 712 mm içerisindeki bölgeleri kapsayacak şekilde demet eksenine paralel olarak konumlandırılmıştır. Her bir uç kapakta 122880 adet pipet bulunur ve uç kapak pipetleri demet eksenine dik olarak 644 mm < r < 1004 mm ve 827 mm < |z| < 2744 mm bölgelerini çevreleyecek şekilde konumlandırılmıştır. TRT sistemi süreklenme odası prensibi ile çalışır: Yüklü parçacıklar pipetlerin içerisinden geçtikten sonra ortamdaki aktif gazı iyonize ederler ve Townsend çığı etkisi ile ortamda iyonizasyon elektronları oluşur. Ardından bu elektronlar pipet duvarı ile merkezdeki anot tel arasındaki -1500 V potansiyel fark ile merkeze doğru sürüklenirler ve veri alım devreleri tarafından okunabilir elektrik sinyallerine dönüştürülürek parçacıkların izleri yeniden yapılandırılır.

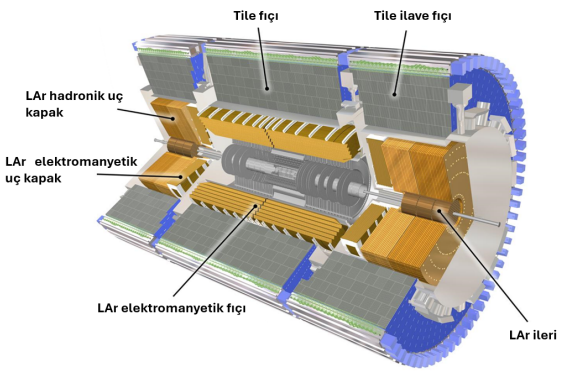
3.2.2. Kalorimetre Sistemleri

Kalorimetre sistemleri, elektromanyetik ve güçlü kuvvetler aracılığıyla etkileşen parçacıkların enerjilerini ölçmek için tasarlanmıştır. ID'den sonra yer alırlar ve çarpışma sonucu açığa çıkan parçacıklar tüm enerjilerini kalorimetrelerde bırakarak durdurulurlar.

ATLAS kalorimetrelerinde iki tür katman yapısı bulunur: Yüksek yoğunluklu katmanlar parçacıkları durdurur ve aralıklı olarak yerleştirilen aktif katmanlar ise parçacıkların enerjilerini ölçülebilir elektrik sinyallerine dönüştürür. ATLAS'taki kalorimetre sistemleri Sıvı Argon (LAr) kalorimetresi ve Tile kalorimetresinden oluşur.(Şekil 3.7)

LAr kalorimetre sistemi [25], içerisinde elektromanyetik, hadronik ve ileri kalorimetreleri barındırır. Bu kalorimetrelerde soğurucu malzeme olarak kurşun metalin, aktif malzeme olarak sıvı Argon kullanılır. LAr'ın elektromanyetik bölümünün fıçı kısmı $|\eta| < 1.475$, uç kapak kısımları ise $1.375 < |\eta| < 3.2$ içerisinde kalan bölgeyi kapsar. Elektromanyetik kalorimetreye ulaşan elektronlar kurşun katman ile etkileşirler ve bremsstrahlung süreci ile fotonlar açığa çıkar, oluşan fotonlar bozunarak elektron pozitron çifti açığa çıkarırlar ve elektromanyetik yağmur adı verilen bu süreç aynı şekilde devam eder. LAr'a ulaşan fotonlar elektromanyetik yağmur sürecine çift üretimi ile başlarlar. Kurşun katmanlardan sonra elektromanyetik yağmur sonucu oluşan parçacıklar sıvı argonu iyonlaştırırlar ve iyonlaşma sonucu ölçülebilir elektrik sinyalleri elde edilir. Hadronik uç kapak kalorimetreleri $1.5 < |\eta| < 3.2$ bölgesini kapsar ve elektromanyetik kalorimetreden farklı olarak soğurucu malzeme olarak bakır kullanılır. Yüksek enerjili hadronların müon algıçlarına ulaşmasına engel olmak için elektromanyetik ve hadronik kalorimetrelerin ardına ileri kalorimetreleri yerleştirilmiştir. Bu kalorimetreler $3.1 < |\eta| < 4.9$ içerisindeki bölgeyi kapsar.

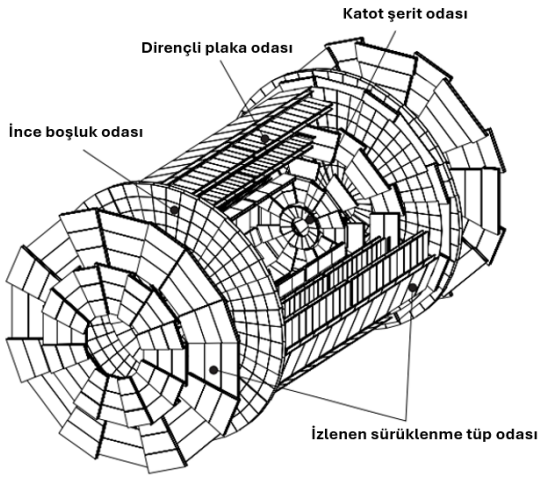
Tile hadronik kalorimetre sistemi, LAr sisteminin hemen arkasında konumlandırılmıştır ve LAr tarafından durdurulamayan hadronik parçacıkları durdurmak için tasarlanmıştır. Soğurucu malzeme olarak çelik kullanılır ve soğurulan parçacıklar hadronik duş oluşturarak kalorimetre içerisindeki parıldaklar ile üretilen fotonlar sayesinde algılanabilir sinyallere dönüştürülürler.



Şekil 3.7: ATLAS kalorimetre sistemleri [24].

3.2.3. Müon Sistemleri

Müon algıç sistemleri [26] ATLAS algıcının en dış kısmında bulunurlar ve öncesindeki algıçlar ile etkileşmeden ilerleyen müonları tespit etmek ve yüksek hassasiyet ile momentumlarını ölçmek için tasarlanmıştır. Müon sistemi dört farklı algıç barındırır (Şekil 3.8): İzlenen Sürüklenme Tüp Odası (MDT), Katot Şerit Odası (CSC), Dirençli Plaka Odası (RPC) ve İnce Aralık Odası (TGC). MDT, $|\eta| < 2.0$ bölgesinde yüksek hassasiyetle müon izlerini ölçer ve bu sayede müonların momentum bilgisi elde edilir. MDT'nin ardından $2.0 < |\eta| < 2.7$ bölgesinde CSC bulunur. CSC, çok telli orantılı sayaç (MWPC) olarak çalışır ve birbirine dik olarak konumlandırılmış çok sayıda anot ve katot tel ile yüksek hassasiyetle iki boyutlu konum ölçümü yapmaya olanak sağlar. RPC ve TGC algıçları tetikleme amacıyla kullanılır. RPC, $|\eta| < 1.05$ bölgesini; TGC ise $1.05 < |\eta| < 2.4$ bölgelerini kapsamaktadır.



Şekil 3.8: ATLAS'ta bulunan müon algıç sistemleri.

3.2.4. Tetikleme ve Veri Toplama Sistemi

BHÇ'nin Run2 veri alım periyodunda proton-proton çarpışmalarının sıklığı 40 MHz'dir ve her bir olay yaklaşık 1 MB büyüklüğündedir. Bu durum BHÇ'de gerçekleşen bütün çarpışmaları kaydetmeyi teknolojik olarak imkansız kılmaktadır. Bütün olayları kaydetmek yerine yalnızca fiziksel olarak anlamlı olanların kabul edilmesi için ATLAS'ta iki seviyeli tetikleme sistemi kullanılmaktadır. Seviye 1 tetikleyicisi tür olarak bir donanım

tetikleyicisidir ve ATLAS'daki kalorimetre ve müon sistemlerindeki parçacık bilgileri ile uygun olaylar için tetikleme sağlar. Seviye 1 Kalorimetre Tetikleyicisi (L1Calo), elektron, foton, jetler ve E_T^{miss} için tetiklenir. Seviye 1 Müon Tetikleyicisi (L1Muon), RPC ve TGC algıçlarındaki momentum ve geometrik bilgiler sayesinde müonları tetikler. Seviye 1 tetiklemenin ardından olay sıklığı 100 kHz'e kadar düşmektedir, elde edilen olay bilgisi Yüksek Seviye Tetikleyici (HLT) sistemine aktarılır. HLT'de çoğunlukla nesnelerin P_T'lerine belirli eşik değerleri koyularak olayların elenmesi sağlanır ve tercih edilen şartları sağlayan olaylar ile analiz nesneleri yeniden yapılandırılır. HLT'nin ardından elde edilen olayların sıklığı yaklaşık 1 kHz'dir.

4. VEKTÖR BENZERİ LEPTONLARIN ARANMASI

4.1. VERİ VE MONTE CARLO ÖRNEKLERİ

4.1.1. Çarpışma Veri Seti

Bu analizde, ATLAS algıcının 2015 ile 2018 yılları arasında $\sqrt{s} = 13$ TeV kütle merkezi enerjisinde topladığı 140 fb^{-1} toplam ışınlılıktaki proton-proton çarpışma verisi kullanılmıştır. Her bir yıla ait verilerde kullanılan iyi runların listesine EK 1.1'de yer verilmiştir.

4.1.2. Sinyal Monte Carlo Örnekleri

VLLe ve VLLμ singlet ve doublet sinyal olayları MadGraph5_aMC@NLO v2.9.5 [27] olay üretecinde NNPDF_nlo_as_0118 parton dağılım fonksiyonu (PDF) kullanılarak üst seviye diyagram (NLO) seviyesinde üretilmiştir. Hadronlaştırma ve parton yağmuru için Pythia 8.245 [28] ve son aşama olan algıç simülasyonu için ATLAS Fast Simulation [29] kullanılmıştır. VLL sinyal örnekleri, elektron singlet/doublet ve müon singlet/doublet olmak üzere dört kategoride üretilmiştir. VLL dublet sinyalleri 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1100, 1200, 1300, 1400 GeV olmak üzere 14 farklı kütle noktasında üretilmiştir. VLL singlet sinyalleri için 1400 GeV kütleli sinyal üretilmemiştir. Sinyal Monte Carlo örneklerinin veri seti numaralarını (DSID) içeren detaylı listeye EK 1.2'de yer verilmiştir.

4.1.3. Standart Model Ardalan Örnekleri

$t\bar{t}$ olayları Powheg-Box [30] olay üreteci ile üretilip sonrasında bu olaylara Pythia8 kullanılarak parton yağmuru süreci uygulanmıştır. Wt ve $t\bar{t}$ süreçleri arasındaki örtüşmeler, diyagram çıkarma yöntemi [31] ile engellenmiştir.

Dibozon ardalan örnekleri, $t\bar{t}Z/\gamma^*$ ve yüksüz akım Drel-Yan (DY) $Z/\gamma^* \rightarrow ll$ benzetimi Sherpa 2.2.1 olay üretecinde NNPDF3.0NNLO PDF kullanılarak gerçekleştirilmiştir [32].

Analizde kullanılan tZ, ttWW, ttHH, ttWH, ttZZ, WtZ ve VVV süreçleri düşük üretim tesir kesitlerine sahip olduklarından nadir rastlanan süreçlerdir. Bu sebeple analiz süresinde elde edilen dağılımlarda "Others" adı altında toplanmışlardır.

4.2. ANALİZ NESNELERİNİN YENİDEN YAPILANDIRILMASI

4.2.1. Tetikleme

Analizde kullanılacak olayların tetikleme kriterlerinden geçmesi gerekmektedir. Bu tetikleyiciler tek lepton (tek elektron, tek müon) veya çift lepton(ee, eμ, $\mu\mu$) olmak üzere iki genel kategoriye ayrılır.

Tablo 4.1: 2015-2018 veri alım sürecinde kullanılan tek lepton ve çift lepton tetikleme koşulları [36].

	Tek lepton tetikleri (2015)
μ	HLT_mu20_iloose_L1MU15, HLT_mu50
e	HLT_e24_lhmedium_L1EM20VH, HLT_e60_lhmedium, HLT_e120_lhloose
	Çift tetikleri (2015)
$\mu\mu$ (asimetrik)	HLT_mu18_mu8noL1
ee (simetrik)	HLT_2e12_lhloose_L12EM10VH
$e\mu, \mu e$ ($\sim$simetrik)	HLT_e17_lhloose_mu14
	Tek lepton tetikleri (2016)
μ	HLT_mu26_ivarmedium, HLT_mu50
e	HLT_e26_lhtight_nod0_ivarloose, HLT_e60_lhmedium_nod0, HLT_e140_lhloose_nod0
	Çift tetikleri (2016)
$\mu\mu$ (asimetrik)	HLT_mu22_mu8noL1
ee (simetrik)	HLT_2e17_lhvloose_nod0
$e\mu, \mu e$ ($\sim$simetrik)	HLT_e17_lhloose_nod0_mu14
	Tek lepton tetikleri (2017 / 2018)
μ	HLT_mu26_ivarmedium, HLT_mu50
e	HLT_e26_lhtight_nod0_ivarloose, HLT_e60_lhmedium_nod0, HLT_e140_lhloose_nod0
	Çift tetikleri (2017 / 2018)
$\mu\mu$ (asimetrik)	HLT_mu22_mu8noL1
ee (simetrik)	HLT_2e24_lhvloose_nod0
$e\mu, \mu e$ ($\sim$simetrik)	HLT_e17_lhloose_nod0_mu14

4.2.2. Elektron

Elektronlar iç dedektör tarafından yeniden yapılandırılan yüklü parçacık izleri ile ilişkilendirilen elektromanyetik kalorimetredeki enerji kümeleri ile yeniden yapılandırılmıştır [33]. Elektron adaylarından $P_T > 10$ GeV ve $|\eta| < 2.47$ şartlarını sağlayanlar, ayrıca kalorimetre geçiş bölgesi olan $1.37 < |\eta| < 1.52$ sınırları içerisinde olmayan adaylar kabul edilmiştir. Elektronların izolasyonu için `FCLoose` kriteri uygulanmıştır.

Tablo 4.2: Elektron seçim kriterleri [36].

Özellik	Kriter
Tanılama	`Tight Likelihood`
İzolasyon	`FC Loose`
Psödorapidite aralığı	$(\|\eta\| < 1.37) \quad \| \quad (1.52 < \|\eta\| < 2.47)$
Enerji kalibrasyonu	`es2018_R21_v0` (ESModel)
Dikey momentum	$P_T > 20\ GeV$

4.2.3. Müon

Müonlar iç dedektörde yeniden yapılandırılan yüklü parçacık izleri ile müon spektrometrelerindeki izlerin birleştirilmesi ile yeniden yapılandırılmıştır [34]. Adayların öncelikle $P_T > 10$ ve $|\eta| < 2.5$ şartlarını sağlaması aranmıştır. Yeniden yapılandırılan müonlara `FCLoose` izolasyon kriteri ve MediumID tanılama kriterleri uygulanmıştır.

Tablo 4.3: Müon seçim kriterleri [36].

Özellik	Kriter
Tanılama	`Medium`
İzolasyon	`FC Loose`
psödorapidite aralığı	$\|\eta\| < 2.5$
Momentum kalibrasyonu	`Sagitta düzeltmesi`
Dikey momentum	$P_T > 20\ GeV$

4.2.4. Jet

Jetler anti-k_t [37] algortiması kullanılarak yarıçap parametresi $R = 0.4$ uygulanarak yeniden yapılandırılmıştır. Jet adaylarından $P_T > 25\ GeV$ ve $|\eta| < 2.5$ şartlarını sağlayan adaylar kabul edilmiştir. Bir olayda farklı proton-proton etkileşimlerinden gelen katkılardan dolayı oluşan pileup (yığılma) etkisini azaltmak için Jet Vertex Tagger (JVT) [38] algoritması uygulanmıştır ve $P_T < 60$ GeV ve $|\eta| < 2.4$ şartlarını sağlayan jetler elenmiştir.

4.2.5. Kayıp Dikey Enerji

Analizdeki belirli son durumları yeniden yapılandırmak ve SM ardalan modellemesinin tutarlılığını test etmek için Kayıp Dikey Enerji (E_T^{miss}) niceliği kullanılmıştır. Kayıp dikey momentum vektörü [39], yeniden yapılandırılan tüm fizik nesnelerinin ve algıçlarda iz bırakan ancak herhangi bir fizik nesnesine atanmamış kalan enerjinin negatif vektörel toplamı olarak tanımlanmıştır. Bir olaydaki kayıp dikey enerji, bu vektörün büyüklüğüdür.

4.2.6. Çakışmaları Giderme

Algıçlarda birbirlerine benzer izler bırakan parçacıkları ayırt etmek ve aynı nesneleri birden fazla kez saymamak için çakışmaları giderme prosedürü uygulanmıştır. Bu prosedürün adımları sırasıyla aşağıda açıklanmıştır:

1. Elektron müon çakışması: Eğer kalorimetre tarafından işaretlenen bir müon, iç algıçtaki bir elektron ile aynı ize sahipse bu müon elenir. Bu sürecin tam tersi söz konusu olduğunda elektron elenir.

2. Jet elektron çakışması (Jet elemesi): İlk aşamayı geçen elektron eğer bir jet ile ΔR(jet,elektron) < 0.2 sınırları içinde bulunuyorsa jet elenir.

3. Jet elektron çakışması (Elektron elemesi): Eğer bir elektron ile bir önceki aşamayı geçen jet ΔR(elektron,jet) < 0.4 sınırları içinde bulunuyorsa, elektron elenir.

4. Jet müon çakışması (Jet elemesi): Eğer bir jete ait iz sayısı ikiden fazla değilse ve bir müon ile jet ΔR(jet,müon) < 0.2 sınırları içerisindeyse jet elenir.

5. Jet müon çakışması (Müon elemesi): Kalan jet ile müon ΔR(müon,jet) < 0.4 sınırları içerisindeyse müon elenir.

4.3. ANALİZ YÖNTEMİ

Bu bölümde, VLL'lerin aranmasında izlenen analiz stratejisi ve kullanılan metotlar detaylı olarak açıklanmıştır. VLL çiftleri elektron ve müon kanalları için ayrı ayrı, son durumda iki lepton, üç lepton ve dört lepton içeren son durumlarda aranmıştır. Yeniden yapılandırılan VLL çiftlerinin kütlelerini optimize etmek için χ^2 algoritması kullanılmıştır. Ardalan kestirimi için her bir son durum için çeşitli kontrol bölgeleri tanımlanmıştır. Analizin olay seçimleri ve yeniden yapılandırma algoritmasının tanımlanması ve uygulanması aşamaları ADL/CutLang analiz çerçevesi [4] kullanılarak, istatistiksel hesaplamalar ve limit için TRExFitter yazılım çerçevesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sinyal bölgeleri incelenirken histogramlarda Sinyal/Ardalan (S/B) oranı %5'in üzerinde olan adım aralıklarında veri gizlenmiştir.

4.3.1. ADL/CutLang Analiz Çerçevesi

Analiz Betimleme Dili (ADL) ve ADL'nin çalışma zamanı yorumlayıcısı CutLang, Yüksek Enerji Fiziği (YEF) analizlerini genel amaçlı programlama dillerini temel alan yaygın analiz çerçevelerinin teknik detaylarından net bir şekilde ayıran alana özgü bildirimsel bir dildir.

ADL'de bir analizin fizik algoritması, yalın sözdizimi kuralları sayesinde kolay okunabilir düz metin dosyaları halinde ifade edilir. ADL sözdiziminde analize ait nesne, değişken ve olay seçimi tanımları net olarak ayrılmış bloklar ve bloklara ait anahtar kelimeler ile yapılır. Mantıksal ve matematiksel işlemciler, karşılaştırma ve optimizasyon işlemcileri, YEF'e özgü fonksiyonlar ve Lorentz vektör işlemleri bu anahtar kelimeler kullanılarak uygulanır. ADL'de basit bir analiz örneği aşağıda gösterilmiştir:

```
# Z ANALYSIS

object goodMuon : MUON
    select Pt(MUON) > 15
    select AbsEta(MUON) < 2.4
```

```
define Zcandidate : goodMuon[0] goodMuon[1]

region Zmumu
    select ALL
    select Size(MUON) >= 2
    select Size(goodMuon) == 2
    histo hZcandidateMass, "Invariant mass of Z candidate (GeV)",
    100, 60, 120, m(Zcandidate)
```

ADL sözdizimine ait bloklar ve anahtar kelimeler tablo 4.4 ve tablo 4.5'te detaylandırılmıştır. CutLang çalışma zamanı yorumlayıcısı ADL'yi olaylar üzerinden herhangi bir derlemeye gerek olmadan gerçek zamanlı çalıştırır. CutLang, ROOT veri analiz paketini [41] temel alarak tüm analiz nesnelerini ve değişkenlerini önceden tanımlanmış standart parçacık nesne tiplerine dönüştürür. Bu sayede hem aynı ADL dosyası birden fazla veri tipi için çerçevelerden bağımsız olarak çalıştırılabilir hem de kullanıcıyı teknik olarak karmaşık kodlar yazmak zorunda bırakmaz.

Tablo 4.4: ADL blokları ve görevleri [4].

Blok amacı	Blok ismi
Analiz nesneleri tanımlama	object
Olay seçimleri	region
Analiz veya ADL bilgisi	info
Tablo	table

Tablo 4.5: ADL anahtar kelimeleri ve görevleri [4].

Anahtar kelime amacı	Anahtar kelime
Değişkenleri ve sabitleri tanımlama	define
Nesne veya olay seçimi	select
Nesne veya olay reddetmek	reject
Ana nesneyi çağırma	take
Olay ağırlıkları uygulama	weight
Değişkenkeri ekrana yazdırmak	print
Analiz nesnelerini sıralamak	sort
Histogram tanımlama	histo
değişkenleri kaydetmek	save

4.3.2. Olay Seçimleri ve Yeniden Yapılandırma

VLL sinyal bölgeleri, VLL_μ ve VLL_e'ler ayrı olarak ele alınacak şekilde, 2ℓ, 3ℓ ve 4ℓ son durumları için kategorize edilmiştir. Olaydaki toplam lepton sayısından bağımsız olmak üzere VLL çifti, son durumlarında birer zıt yüklü elektron olacak şekilde yeniden yapılandırılanlar VLL_e, birer zıt yüklü müon ile yeniden yapılandırılanlar ise VLL_μ sinyal bölgeleri kapsamında araştırılmıştır.

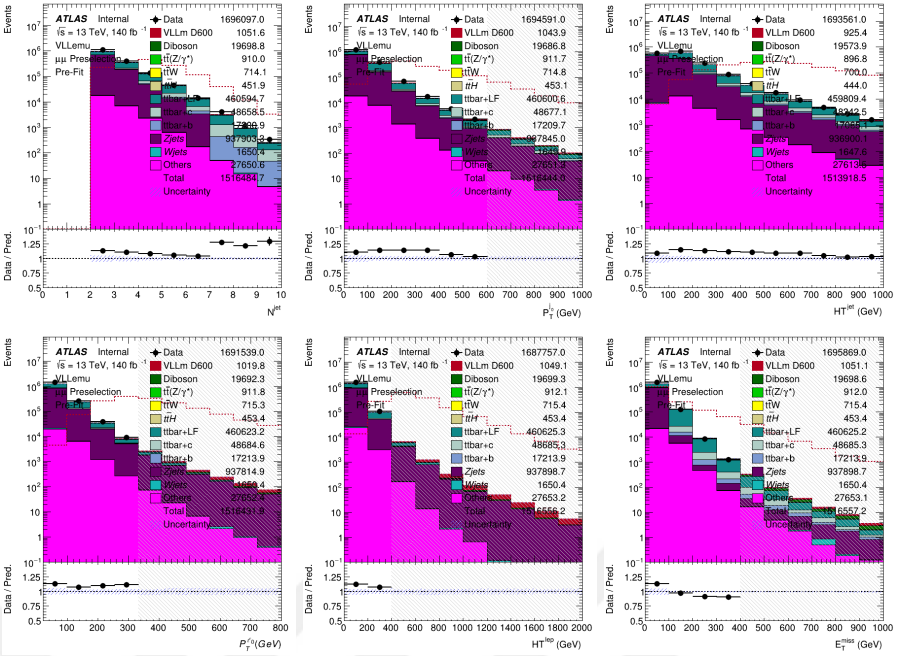
2ℓ kategorisinde, son durumda 2ℓ ve $4j$ içeren 6 farklı bozunum modu incelenmiştir: WW, WZ, WH, HZ, HH, ZZ. Bu kategoride VLL_μ ve VLL_e sinyal bölgeleri olmak üzere toplam 12 adet sinyal bölgesi tanımlanmıştır. Her bir sinyal bölgesi için ortak olan bir dizi önseçim şartı uygulanmıştır. İlk olarak en az 20 GeV'den büyük P_T'ye sahip zıt yüklü iki lepton seçilmiştir. Düşük kütle rezonanslarını baskılamak için iki leptonun toplam değişmez kütlesinin 15 GeV'den büyük ve değişmez kütlenin Z kütle aralığının dışında olduğu ($|m_{ll} - 91.2| > 10GeV$) olaylar kabul edilmiştir. Son olarak olaydaki jet sayısı en az 2 olacak şekilde sınırlandırılmıştır (Tablo 4.6). Tablo 4.7'de sırasıyla sinyal bölgesine uygulanan diğer seçimler verilmiştir. $2\ell\mu$ kanalında ön seçim seviyesindeki, P_T^{jetA} >100 GeV ve P_T^{jetC} >100 GeV şartı seviyesindeki ve χ^2 < 10 GeV şartı seviyesindeki temel kinematik dağılımlar sırasıyla Şekil 4.1, 4.2 ve 4.3'te gösterilmiştir. Bu bölümde tarif edilen bütün olay seçimleri, yeniden yapılandırma ve olay ağırlıklarının uygulanması aşamaları ADL/CutLang kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen olay çıktıları TRExFitter'a girdi olarak tanımlanarak herhangi bir ilave nümerik hesaplama uygulanmadan veri, sinyal ve ardalan örneklerinin bir arada bulunduğu yığın çizimleri elde edilmiştir. Bu yığın çizimlerinde her bir örnek için elde edilen olay sayıları, şekillerin sağ tarafında gösterilmiştir. Her bir şekildeki mavi taralı alan istatistiksel belirsizlikleri temsil etmektedir.

Tablo 4.6: 2ℓ kategorisindeki önseçim şartları.

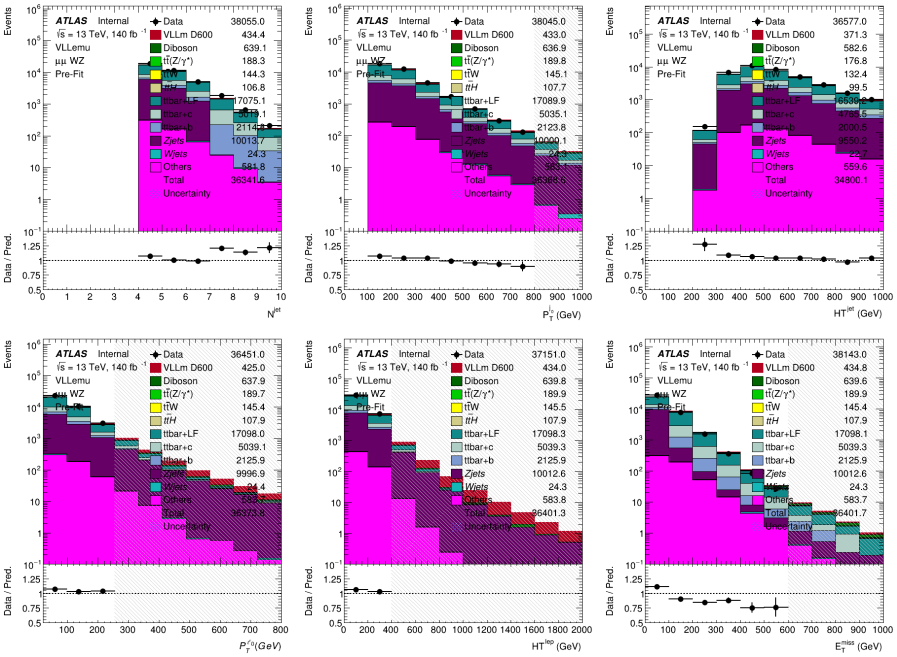
Kriter	$\mu\mu$	ee
Olaydaki lepton Sayısı	$N_\mu = 2$	$N_e = 2$
Leptonlar için en küçük P_T sınırı	$P_T^{lep} > 20\ GeV$	
Lepton Kalitesi	Medium ID	TightLH ID
Zıt yüklü leptonlar	$q_{ll} = 0$	
Leptonların toplam değişmez kütlesi	$m_{ll} > 15\ GeV$	
Z kütle penceresi dışında olan leptonlar	$\mid m_{ll} - 91.2 \mid > 10\ GeV$	
Olaydaki jet sayısı	$N_{jet} \geq 2$	

Tablo 4.7: 2ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerine sırasıyla uygulanan seçimler.

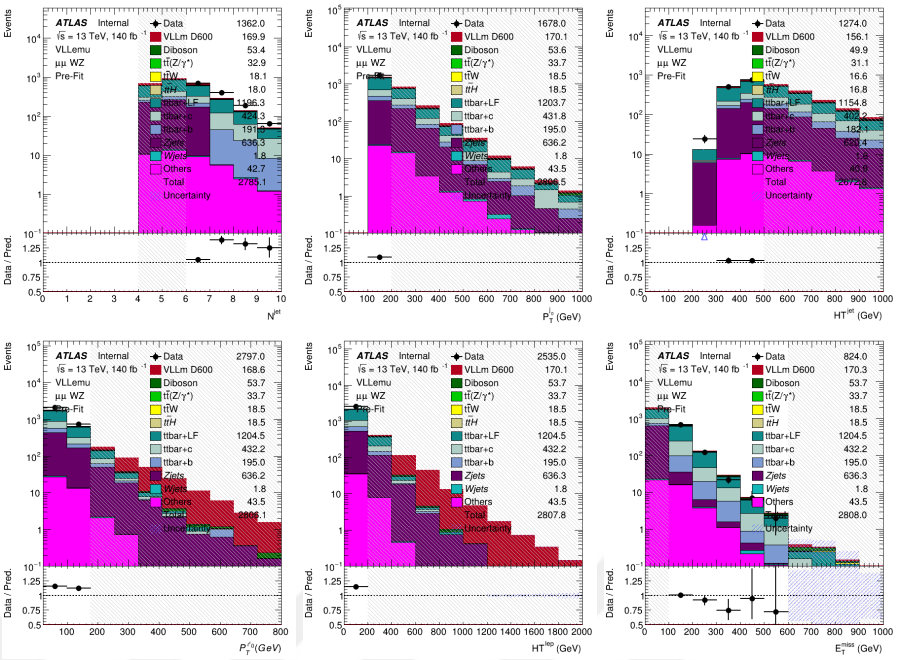
Kriter	WW	WZ	WH	HZ	HH	ZZ
Olaydaki jet sayısı	$N_{jet} \geq 4$					
χ^2*minimizasyonu*	$\chi^2_{toplam_{WW}} \sim = 0$	$\chi^2_{toplam_{WZ}} \sim = 0$	$\chi^2_{toplam_{WH}} \sim = 0$	$\chi^2_{toplam_{HZ}} \sim = 0$	$\chi^2_{toplam_{HH}} \sim = 0$	$\chi^2_{toplam_{ZZ}} \sim = 0$
Jetlere uygulanan en düşük P_T sınırı	$P_T^{jetA} > 100\ GeV$ *ve* $P_T^{jetC} > 100\ GeV$					
En küçük χ^2 sınırı	$\chi^2_{toplam_{WW}} < 10$	$\chi^2_{toplam_{WZ}} < 10$	$\chi^2_{toplam_{WH}} < 10$	$\chi^2_{toplam_{HZ}} < 10$	$\chi^2_{toplam_{HH}} < 10$	$\chi^2_{toplam_{ZZ}} < 10$



Şekil 4.1: $2\ell\mu$ kanalı önseçim seviyesindeki temel kinematik dağılımlar ve Veri/MC uyumu (S/B > %5 olan adım aralıklarında veri gizlenmiştir). N_{jet} dağılımı (sol-üst), en yüksek momentumlu jetin P_T dağılımı (orta-üst), jetlerin HT (toplam P_T dağılımı) (sağ-üst), en yüksek momentumlu leptonun P_T dağılımı (sol-alt), leptonların HT dağılımı (orta-alt) ve E_T^{miss} dağılımı (sağ-alt).



Şekil 4.2: $2\ell\mu$ kanalı WZ sinyal bölgesi $P_T^{jetA} > 100$ GeV ve $P_T^{jetC} > 100$ GeV seviyesindeki temel kinematik dağılımlar ve Veri/MC uyumu (S/B > %5 olan adım aralıklarında veri gizlenmiştir). N_{jet} dağılımı (sol-üst), en yüksek momentumlu jetin P_T dağılımı (orta-üst), jetlerin HT (toplam P_T dağılımı) (sağ-üst), en yüksek momentumlu leptonun P_T dağılımı (sol-alt), leptonların HT dağılımı (orta-alt) ve E_T^{miss} dağılımı (sağ-alt).



Şekil 4.3: $2\ell\mu$ kanalı WZ sinyal bölgesi $\chi^2 < 10$ seviyesindeki temel kinematik dağılımlar ve Veri/MC uyumu (S/B > %5 olan adım aralıklarında veri gizlenmiştir). N_{jet} dağılımı (sol-üst), en yüksek momentumlu jetin P_T dağılımı (orta-üst), jetlerin HT (toplam P_T dağılımı) (sağ-üst), en yüksek momentumlu leptonun P_T dağılımı (sol-alt), leptonların HT dağılımı (orta-alt) ve E_T^{miss} dağılımı (sağ-alt).

3ℓ kategorisinde WZ ve WH bozunum modları için son durumda 3ℓ ve $2j$ içeren olaylar VLL_μ ve VLL_e olarak toplam 4 farklı sinyal bölgesinde incelenmiştir. 2ℓ kategorisinden farklı olarak W bozonunun leptonik son durumları yeniden yapılandırılmıştır. 3ℓ sinyal bölgeleri için ortak önseçim şartları aşağıda sırasıyla listelenmiştir:

- $P_T^{lepton} > 20$ GeV
- Elektronlar ve müonlar için FCLooseIsolation şartı
- $N_{jet} \geq 1$
- $N_{lepton} = 3$
- $|q_{toplam}^{lepton}| = 1$
- $|m_{ll}^{SFOS} - 91.2| > 10\ GeV$

Önseçimleri sağlayan olaylar elde edildikten sonra WZ ve WH sinyal bölgelerinde VLL'ler

yeniden yapılandırılmıştır. 3ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerine sırasıyla uygulanan seçimler Tablo 4.8'de verilmiştir.

Tablo 4.8: 3ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerine sırasıyla uygulanan seçimler.

Kriter	WZ $\mu\mu$	WZ ee	WH $\mu\mu$	WH ee
Olaydaki jet sayısı	$N_{jet} \geq 2$			
χ^2*minimizasyonu*	$\chi^2_{toplam_{WZ}} \sim= 0$		$\chi^2_{toplam_{WH}} \sim= 0$	
Aynı çeşnili 2 lepton	$\|ID_{lepB}\| = 13$& $\|ID_{lepC}\| = 13$	$\|ID_{lepB}\|$ 11& $\|ID_{lepC}\| = 11$	$\|ID_{lepB}\| = 13$& $\|ID_{lepC}\| = 13$	$\|ID_{lepB}\| = 11$& $\|ID_{lepC}\| = 11$
Zıt yüklü 2 lepton	$q_{lepB} + qlepC = 0$			

4ℓ kategorisinde WZ ve ZZ bozunum modları için son durumda 4ℓ ve $2j$ içeren olaylar VLL_μ ve VLL_e olarak toplam 4 farklı sinyal bölgesinde incelenmiştir. Bu sinyal bölgelerinde her olayda mutlaka bir adet leptonik Z bozonu olma şartı uygulanmıştır. 4ℓ sinyal bölgeleri için ortak önseçim şartları aşağıda sırasıyla listelenmiştir:

- $P_T^{lepton} > 20$ GeV
- Elektronlar ve müonlar için FCLooseIsolation kriteri
- $N_{jet} \geq 1$
- $N_{lepton} = 4$
- $|q^{lepton}_{toplam}| = 0$

4ℓ kategorisinde önseçim şartlarından sonra uygulanan diğer seçimler sırasıyla Tablo 4.9'da gösterilmiştir.

Tablo 4.9: 4ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerine sırasıyla uygulanan seçimler.

Kriter	WZ $\mu\mu$	WZ ee	ZZ $\mu\mu$	ZZ ee
χ^2*minimizasyonu*	$\chi^2_{toplam_{WZ}} \sim= 0$		$\chi^2_{toplam_{WZ}} \sim= 0$	
Yeniden yapılandırılan leptonik Z bozonunun yükü	$q_{Zlep} == 0$			

4.3.3. χ^2 Algoritması

Yeniden yapılandırılan W/Z/Higgs bozonları ve bu bozonlar kullanılarak yeniden yapılandırılan VLL'ler içerisinden en iyi adayları bulmak için iki aşamalı χ^2 minimizasyonu uygulanmıştır. İlk aşamada araştırılan son durumlara uygun olan leptonik veya hadronik bozunan bozonlar (X_1 ve X_2), olaydaki tüm iki lepton veya iki jet kombinasyonları ile yeniden yapılandırılmıştır. Bu kombinasyonlar içerisinden en küçük $\chi^2_{X_1X_2}$ değerine sahip X_1 ve X_2 bozonları en iyi adaylar olarak saklanmıştır. İkinci aşamada en iyi X_1 ve X_2 adayları ile birer leptonun Lorentz vektörleri (ℓ_i ve ℓ_j) toplanarak VLL çifti (L_1 ve L_2) tüm bozon ve lepton kombinasyonları için yeniden yapılandırılmıştır. Son olarak bir önceki aşamadakine benzer şekilde en küçük χ_{total} değerine sahip en iyi L_1 ve L_2 adayları saklanmıştır. χ^2 algoritmasının ADL'de nasıl uygulandığının bilgisine EK 3'te yer verilmiştir.

χ^2 algoritmasının adımları, $2\ell 4j$ son durumları için aşağıda ayrıntılı olarak açıklanmıştır:

- Olaydaki herhangi 4 jet kombinasyonu seçilir.
- Bütün ikili jet kombinasyonları için öncelikle herhangi iki jetin (jetA ve jetB olarak isimlendirilmiştir) Lorentz vektörleri toplanarak X_1 bozonu adayı yeniden yapılandırılır, ardından kalan iki jet (jetC ve jetD) için de aynı şekilde X_2 bozonu yeniden yapılandırılır.
- Her bir kombinasyon için $\chi^2_{X_1X_2} \equiv \frac{(m^{reco}_{X_1} - m^{truth}_{X_1})^2}{\sigma^2_{X_1}} + \frac{(m^{reco}_{X_2} - m^{truth}_{X_2})^2}{\sigma^2_{X_2}}$ değeri hesaplanır. m^{truth}_X değişkenleri W, Z ve H bozonları için Monte Carlo üretiminde girdi olarak belirlenen kütle değerlerini temsil etmektedir [40].
- En küçük $\chi^2_{X_1X_2}$ değerine sahip X_1 ve X_2 bozonları en iyi adaylar olarak saklanır.
- En iyi X_1 ve X_2 adayları bulunduktan sonra olaydaki bütün X_1 + ℓ_i ve X_2 + ℓ_j kombinasyonları için VLL adayları yeniden yapılandırılır.
- Her bir kombinasyon için $\chi^2_{toplam} \equiv \frac{(m^{reco}_{L_{X_1}} - m^{reco}_{L_{X_2}})^2}{\sigma^2_{L_{X_1}} + \sigma^2_{L_{X_2}}} + \chi^2_{X_1X_2}$ değeri hesaplanır.
- Olaydaki en küçük χ^2_{toplam} değerine sahip kombinasyon saklanarak en iyi VLL çifti adayı olarak kabul edilir.

3ℓ kategorisi için χ^2 algoritmasının aşamaları:

- Olaydaki herhangi üç lepton ve iki jet kombinasyonu seçilir.
- Jetlerin dört momentumu kullanılarak Z veya Higgs bozonu adayları yeniden yapılandırılır, üç leptondan herhangi bir tanesi ve E_T^{miss} vektörü kullanılarak W bozon adayı yeniden yapılandırılır.
- Her bir kombinasyon için $\chi^2_{W,H/Z} \equiv \frac{(m_W^{reco} - m_W^{truth})^2}{\sigma_W^2} + \frac{(m_{H/Z}^{reco} - m_{H/Z}^{truth})^2}{\sigma_{H/Z}^2}$ değeri hesaplanır.
- En küçük $\chi^2_{W,H/Z}$ değerine sahip kombinasyon en iyi adaylar olarak saklanır.
- En iyi bozon adayları bulunduktan sonra, kalan zıt yüklü iki lepton, her bir W + ℓ_i and H/Z + ℓ_j kombinasyonu için VLL çiftini yeniden yapılandırmak için kullanılır.
- Her bir bozon ve lepton kombinasyonu için $\chi^2_{total} \equiv \frac{(m_{L_W}^{reco} - m_{L_{H/Z}}^{reco})^2}{\sigma^2_{L_W} + \sigma^2_{L_{H/Z}}} + \chi^2_{W,H/Z}$ değeri hesaplanır.
- Olaydaki en küçük χ^2_{toplam} değerine sahip kombinasyon saklanarak en iyi VLL çifti adayı olarak kabul edilir.

4ℓ kategorisi için χ^2 algoritmasının aşamaları:

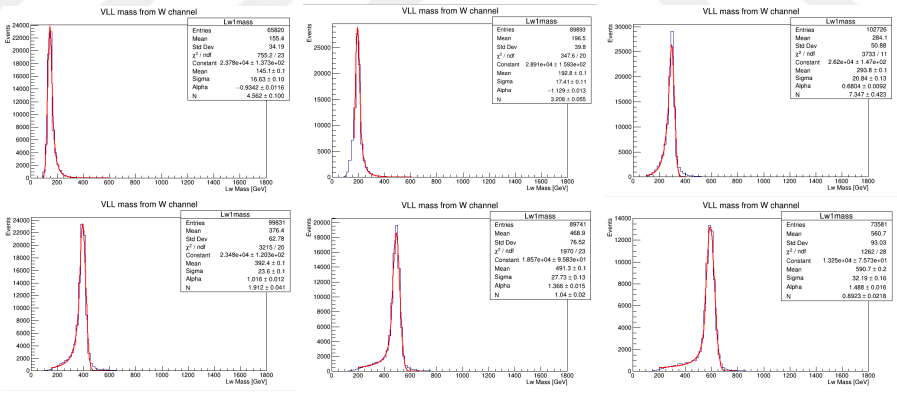
- Olaydaki herhangi dört lepton ve iki jet kombinasyonu seçilir.
- iki jetin dört momentumu ile hadronik bozunan W veya Z bozonu adayları, dört leptondan ikisi ile de leptonik bozunan Z adayı yeniden yapılandırılır.
- Her bir kombiansyon için $\chi^2_{Whad/Zhad,Zlep} \equiv \frac{(m_{Whad/Zhad}^{reco} - m_{WZhad}^{truth})^2}{\sigma^2_{WZhad}} + \frac{(m_{Zlep}^{reco} - m_{Zlep}^{truth})^2}{\sigma^2_{Zlep}}$ değeri hesaplanır.
- En küçük $\chi^2_{WZhad,Zlep}$ değerine sahip kombinasyon en iyi bozon adayları olarak saklanır.
- En iyi bozon adayları bulunduktan sonra kalan iki zıt yüklü lepton kullanılarak VLL çiftleri her bir Whad/Zhad + ℓ_i ve Zlep + ℓ_j kombinasyonu için hesaplanır.
- Her bir bozon ve lepton kombinasyonu için $\chi^2_{toplam} \equiv \frac{(m_{L_{WZhad}}^{reco} - m_{L_{Zlep}}^{reco})^2}{\sigma^2_{L_{WZhad}} + \sigma^2_{L_{Zlep}}} + \chi^2_{WZhad,Zlep}$ değeri hesaplanır.

- En küçük χ^2_{toplam} değerine sahip olan kombinasyon en iyi VLL çift adayı olarak saklanır.

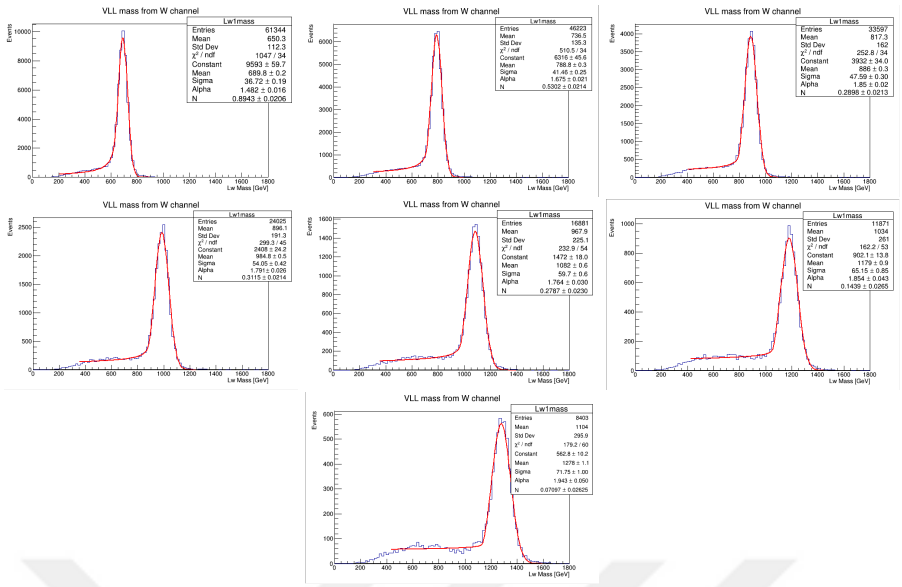
4.3.4. Yeniden Yapılandırma Parametrelerinin Belirlenmesi

4.3.4.1. σ_{L_1} *ve* σ_{L_2}

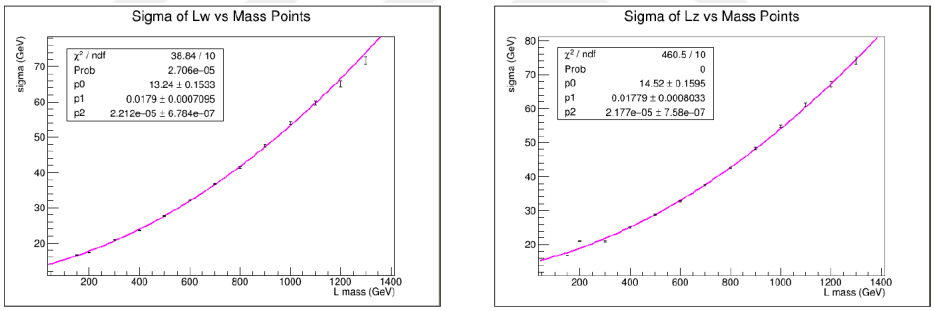
Farklı kütlelerde yeniden yapılandırılan VLL'lerin kütleleri üzerindeki belirsizlikler (σ_{L_1} ve σ_{L_2}), VLL kütlesine göre değişkenlik göstermektedir. Bu sebeple her bir olayda hesaplanan χ^2 değerini VLL kütlesinden bağımsız hale getirmek için yeniden yapılandırılan VLL'lerin σ parametreleri, VLL kütlesinin bir fonksiyonu olarak ifade edilmiştir. Her bir kütledeki sinyal MC örnekleri kullanılarak VLL kütle dağılımları elde edilmiştir ve ardından bu dağılımlara Şekil 4.4 ve 4.5'de gösterildiği üzere Crystal Ball fonksiyonu [35] uydurulmuştur. Daha sonra her bir kütle noktası için uydurulan eğrilerin σ parametreleri elde edilmiştir. Elde edilen σ değerlerinin her biri, ait olduğu kütleye karşılık çizdirildikten sonra elde edilen grafik 2. dereceden bir polinoma uydurulmuştur (Şekil 4.6). Uydurulan eğrinin p0, p1 ve p2 parametreleri, χ^2 algoritmasında VLL kütle belirsizliklerini ifade etmek için kullanılmıştır.



Şekil 4.4: WZ bozunum modu için 150 GeV (sol-üst), 200 GeV (orta-üst), 300 GeV (sağ-üst), 400 GeV (sol-alt), 500 GeV (orta-alt) ve 600 GeV (sağ-alt) kütlelerinde yeniden yapılandırılan L_W kütle dağılımları.



Şekil 4.5: WZ bozunum modu için 700 GeV (sol-üst), 800 GeV (orta-üst), 900 GeV (sağ-üst), 1000 GeV (sol-orta), 1100 GeV (orta), 1200 GeV (sağ-orta) ve 1300 GeV (orta-alt) kütlelerinde yeniden yapılandırılan L_W kütle dağılımları.



Şekil 4.6: WZ bozunum modu için elde edilen VLL kütle belirsizlikleri.

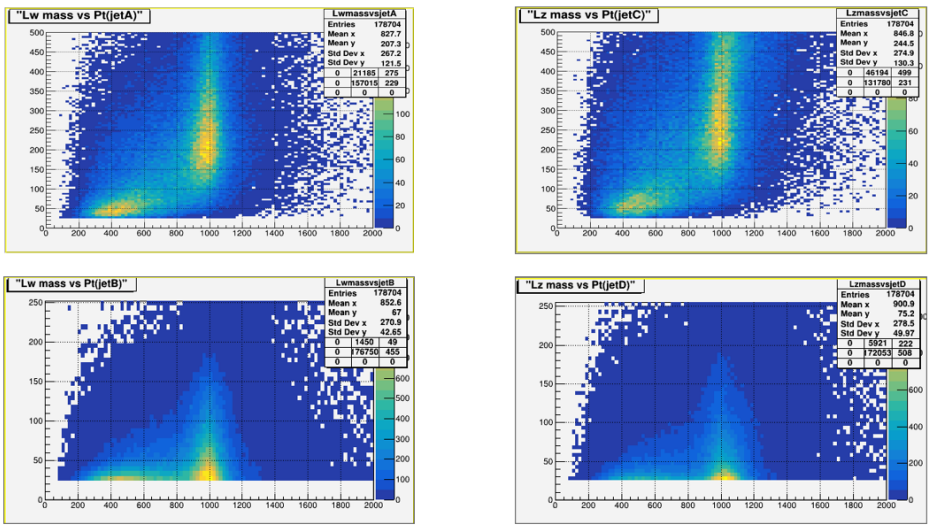
Bu sonuçlara göre WZ bozunum modu için elde edilen σ_{L_w} ve σ_{L_z} değerleri denklem 4.1 ve denklem 4.2'de VLL kütlesinin fonksiyonu olarak sırasıyla ifade edilmiştir:

$$\sigma_{L_w} = 2.212 \times 10^{-5} \times {m_{L_w}}^2 + 0.0179 \times m_{L_w} + 13.24\,\text{GeV} \tag{4.1}$$

$$\sigma_{L_z} = 2.177 \times 10^{-5} \times {m_{L_z}}^2 + 0.01779 \times m_{L_z} + 14.52\,\text{GeV} \tag{4.2}$$

4.3.4.2. *Jetler için gereken en küçük P_T şartı*

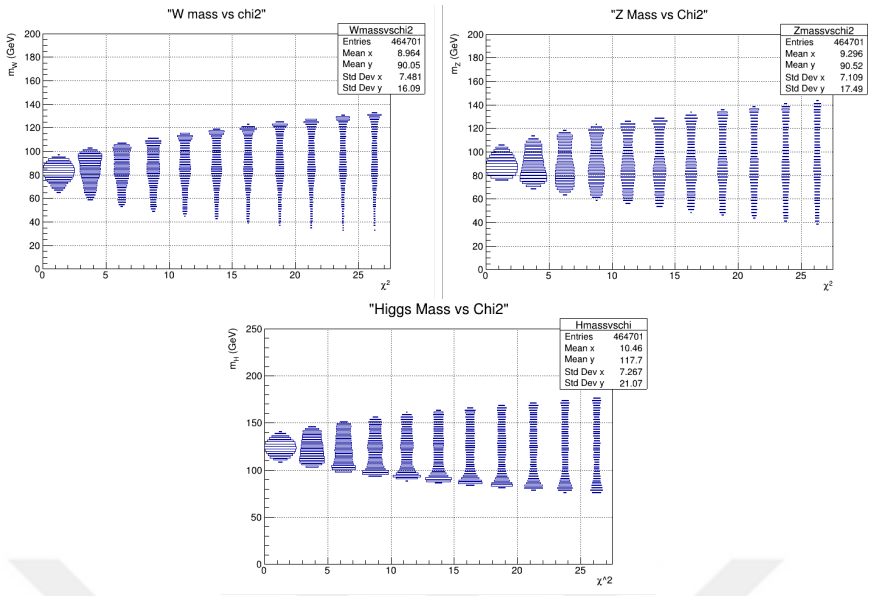
2ℓ kategorisinde yeniden yapılandırılmış VLL'lerin son durumdaki jetlerden kaynaklanan düşük kütle katkılarını baskılamak ve ayrıca sinyal anlamlılığını arttırmak için bu jetlere P_T şartı uygulanmıştır. χ^2 algoritmasında en iyi adayları bulduktan sonra VLL kütlesinin bir fonksiyonu olarak jetlerin P_T değerleri incelenmiştir. Bu iki boyutlu histogramlardaki (Şekil 4.7) yoğunluklara bakılarak jetlere uygulanacak en küçük P_T şartı 100 GeV olarak belirlenmiş ve $P_T^{jetA} > 100$ GeV ve $P_T^{jetC} > 100$ GeV şartlarını sağlayan olaylar seçilerek VLL kütleleri optimize edilmiştir.



Şekil 4.7: WZ bozunum modunda VLL kütlesine karşılık en iyi jet adaylarının P_T dağılımı. Sol-üst ve sol-alttaki dağılımlar $L_W \to W\ell \to 2j1\ell$ sürecindeki jetleri (jetA ve jetB), Sağ-üst ve sağ-alttaki dağılımlar $L_Z \to Z\ell \to 2j1\ell$ sürecine ait jetleri (jetC ve jetD) temsil etmektedir. VLLμ 1000 GeV'lik sinyal örneği kullanılmıştır.

4.3.4.3. *Olaydaki en küçük χ^2 şartı*

2ℓ kategorisinde χ^2 minimizasyonunun ardından yeniden yapılandırılan hadronik bozonları birbirinden ayırmak için ilave bir kütle optimizasyon şartı uygulanmıştır. Her bir olayda hesaplanan χ^2_{toplam} aralıklarına karşılık gelen W, Z ve Higgs bozonu kütle dağılımları Şekil 4.8'de gösterilmiştir. Bu dağılımlara göre $\chi^2_{toplam} < 10$ şartı uygulanarak bir optimizasyon gerçekleştirilmiştir.

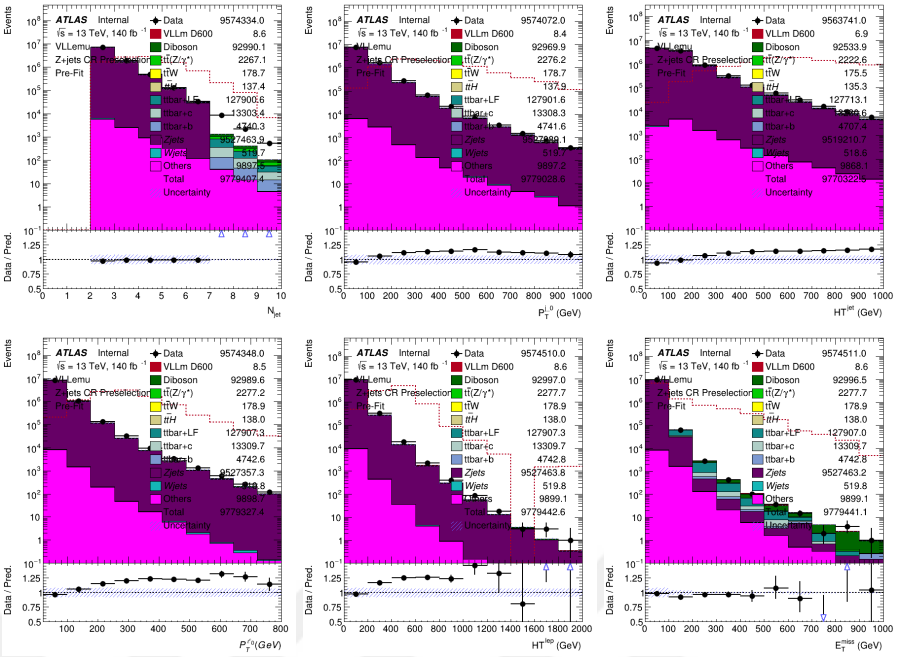


Şekil 4.8: Olaydaki χ^2_{toplam} aralıklarına karşılık gelen hadronik W, Z ve Higgs bozonu kütle dağılımları.

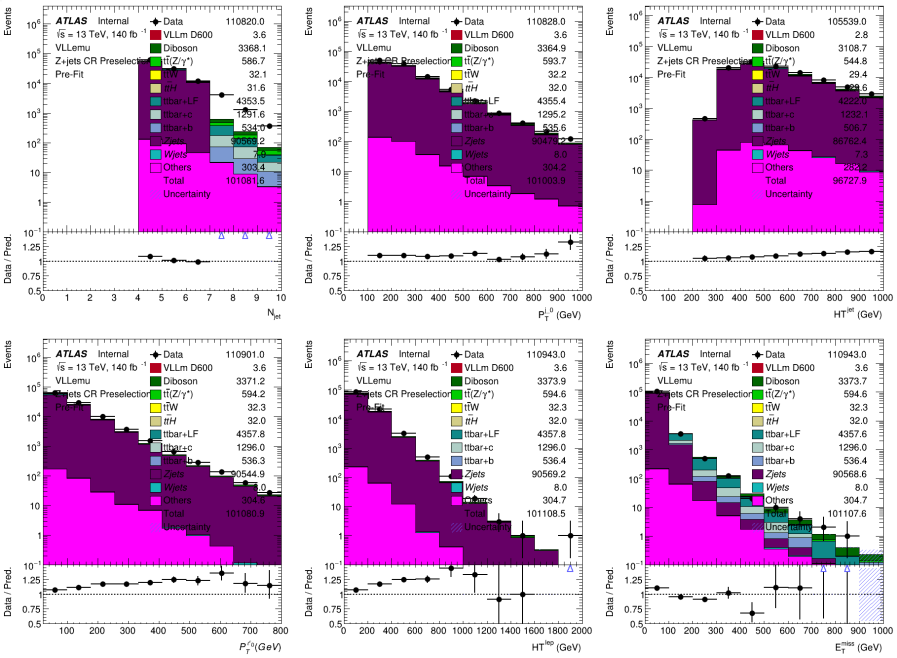
4.4. KONTROL BÖLGESİ ÇALIŞMALARI

4.4.1. Z+jets Kontrol Bölgesi

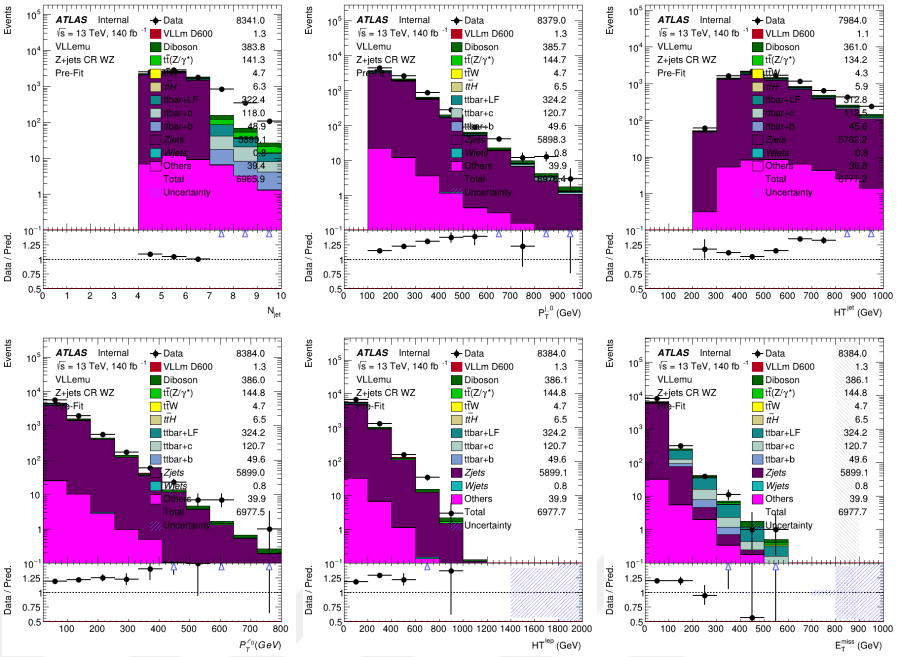
Z+jets ardalan olayları 2ℓ son durumlu olaylarda en baskın olan ardalanlardan birisidir ve analizdeki indirgenemeyen ardalanlar arasındadır. Bu kontrol bölgesinin sinyal bölgelerinden tek farkı Z kütle penceresi seçiminin ters çevrilmesidir. $|m_{ll} - 91.2| < 10\ GeV$ şartı ile birlikte sinyal bölgelerine göre diklik sağlanmış, sinyal kirliliği en aza indirilmiştir. Z+jets kontrol bölgesi ön seçim seviyesinde elde edilen temel kinematik dağılımlar Şekil 4.9'da gösterilmiştir. Bu seviyedeki olaylar Z+jets süreçleri bakımından $\sim$ % 97 saflıktadır. Ön seçimlerin ardından Bölüm 4.3.3'te açıklanan χ^2 algoritması ve olay seçimleri uygulanmıştır. $P_T^{jetA} > 100$ GeV ve $P_T^{jetC} > 100$ GeV seviyesindeki olaylar $\sim$ % 90 saflıktadır (Şekil 4.10). $\chi^2 < 10$ seviyesindeki olaylar $\sim$ % 85 saflıktadır (Şekil 4.11). Her üç olay seçimi seviyesinde de Z+jets ardalanlarının iyi modellenememesinden kaynaklanan Veri/MC uyumsuzlukları mevcuttur. Z+jets süreçlerine uygulanacak yeni ölçek faktörleri ile bu uyumsuzlukların giderilebileceği öngörülmektedir.



Şekil 4.9: Z+jets kontrol bölgesi ön seçim seviyesinde temel kinematik dağılımlar ve Veri/MC uyumu. N_{jet} dağılımı (sol-üst), en yüksek momentumlu jetin P_T dağılımı (orta-üst), jetlerin HT dağılımı (sağ-üst), en yüksek momentumlu leptonun P_T dağılımı (sol-alt), leptonların HT dağılımı (orta-alt) ve E_T^{miss} dağılımı (sağ-alt).



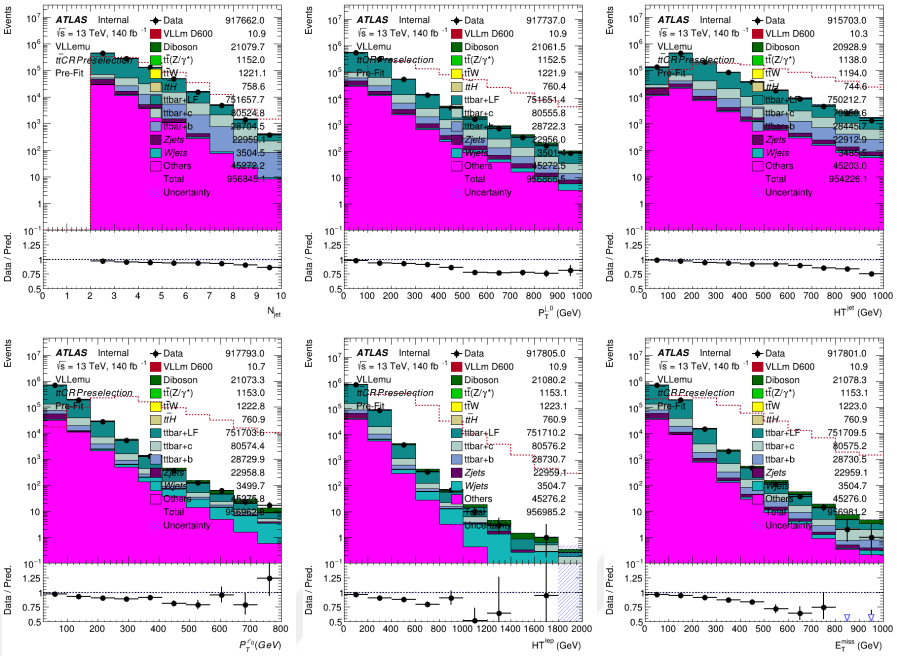
Şekil 4.10: Z+jets kontrol bölgesi $P_T^{jetA} > 100$ GeV ve $P_T^{jetC} > 100$ GeV seviyesinde temel kinematik dağılımlar ve Veri/MC uyumu. N_{jet} dağılımı (sol-üst), en yüksek momentumlu jetin P_T dağılımı (orta-üst), jetlerin HT dağılımı (sağ-üst), en yüksek momentumlu leptonun P_T dağılımı (sol-alt), leptonların HT dağılımı (orta-alt) ve E_T^{miss} dağılımı (sağ-alt).



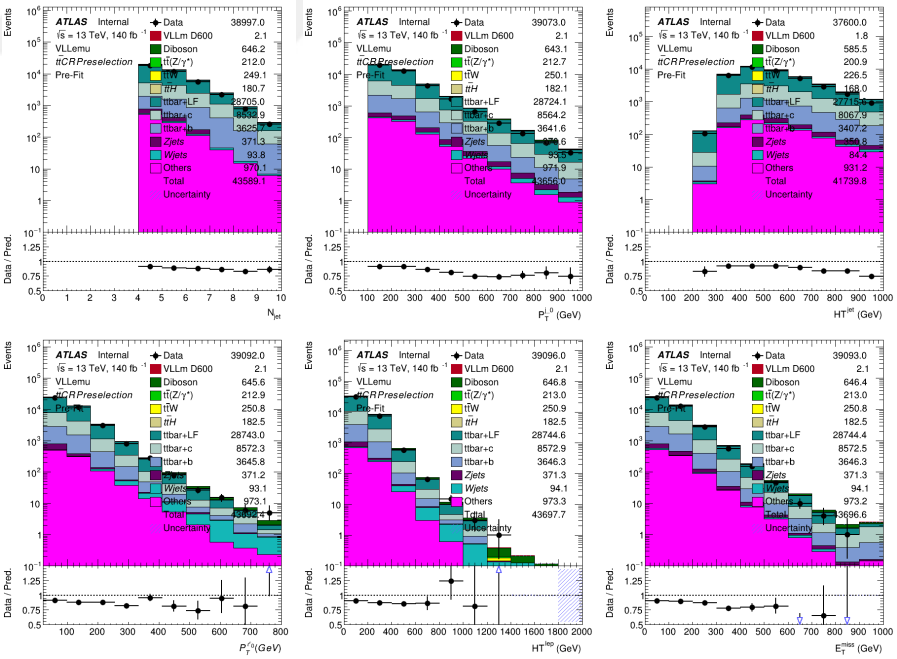
Şekil 4.11: Z+jets kontrol bölgesi $\chi^2 < 10$ seviyesinde temel kinematik dağılımlar ve Veri/MC uyumu. N_{jet} dağılımı (sol-üst), en yüksek momentumlu jetin P_T dağılımı (orta-üst), jetlerin HT dağılımı (sağ-üst), en yüksek momentumlu leptonun P_T dağılımı (sol-alt), leptonların HT dağılımı (orta-alt) ve E_T^{miss} dağılımı (sağ-alt).

4.4.2. $t\bar{t}$ Kontrol Bölgesi

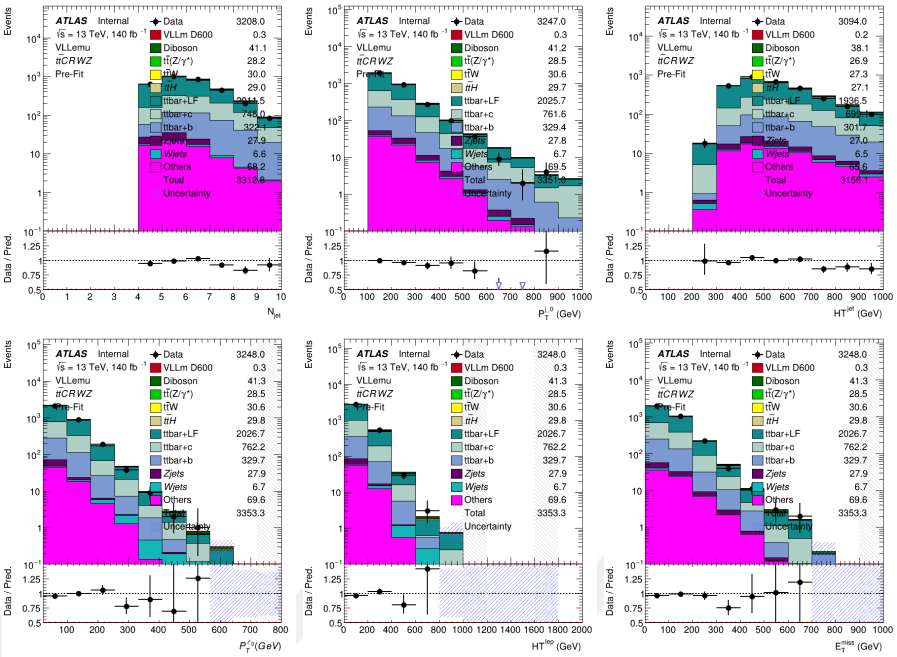
Bu kontrol bölgesinde VLL sinyali ile $t\bar{t}$ ardalan olaylarını birbirinden ayırmak için olaydaki iki leptonun çeşnilerine farklı bir şart uygulanmıştır. Farklı çeşnide iki lepton içeren olaylar seçilerek bu bölgedeki VLL sinyalleri baskılanmıştır. $t\bar{t}$ kontrol bölgesi ön seçim seviyesinde elde edilen temel kinematik dağılımlar Şekil 4.12'de gösterilmiştir. Bu seviyedeki olaylar $t\bar{t}$ süreçleri bakımından $\sim$ % 90 saflıktadır. Ön seçimlerin ardından Bölüm 4.3.3'te açıklanan χ^2 algoritması ve olay seçimleri uygulanmıştır. $P_T^{jetA} > 100$ GeV ve $P_T^{jetC} > 100$ GeV seviyesinde elde edilen kinematik dağılımlar Şekil 4.13'te gösterilmiştir, olaylar $\sim$ % 94 saflıktadır. $\chi^2 < 10$ seviyesindeki kinematik dağılımlar Şekil 4.14'te gösterilmiştir, bu seviyedeki olaylar $\sim$ % 93 saflıktadır.



Şekil 4.12: $t\bar{t}$ kontrol bölgesi ön seçim seviyesinde temel kinematik dağılımlar ve Veri/MC uyumu. N_{jet} dağılımı (sol-üst), en yüksek momentumlu jetin P_T dağılımı (orta-üst), jetlerin HT dağılımı (sağ-üst), en yüksek momentumlu leptonun P_T dağılımı (sol-alt), leptonların HT dağılımı (orta-alt) ve E_T^{miss} dağılımı (sağ-alt).



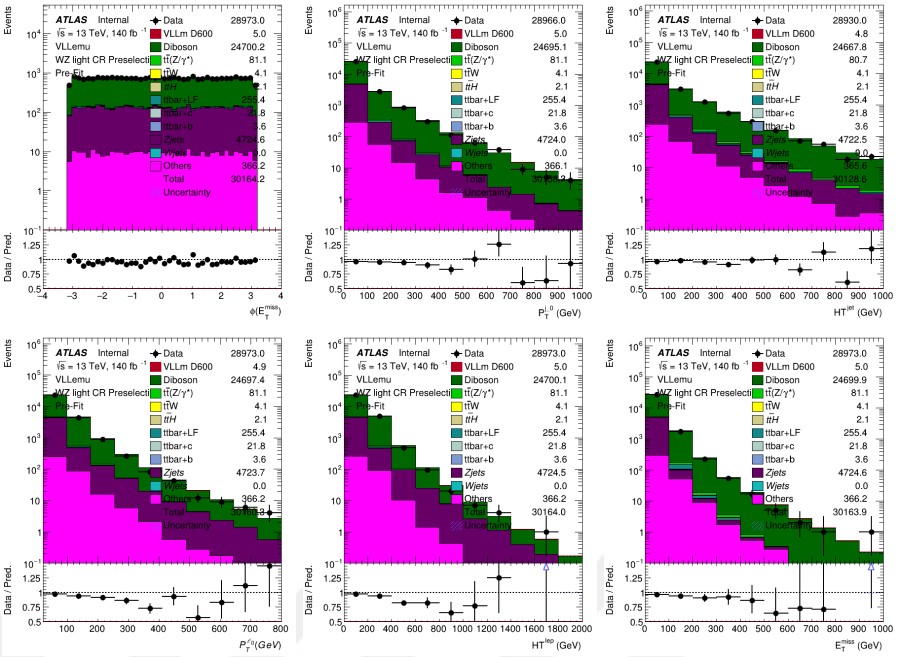
Şekil 4.13: $t\bar{t}$ kontrol bölgesi $P_T^{jetA} > 100$ GeV ve $P_T^{jetC} > 100$ GeV seviyesinde temel kinematik dağılımlar ve Veri/MC uyumu. N_{jet} dağılımı (sol-üst), en yüksek momentumlu jetin P_T dağılımı (orta-üst), jetlerin HT dağılımı (sağ-üst), en yüksek momentumlu leptonun P_T dağılımı (sol-alt), leptonların HT dağılımı (orta-alt) ve E_T^{miss} dağılımı (sağ-alt).



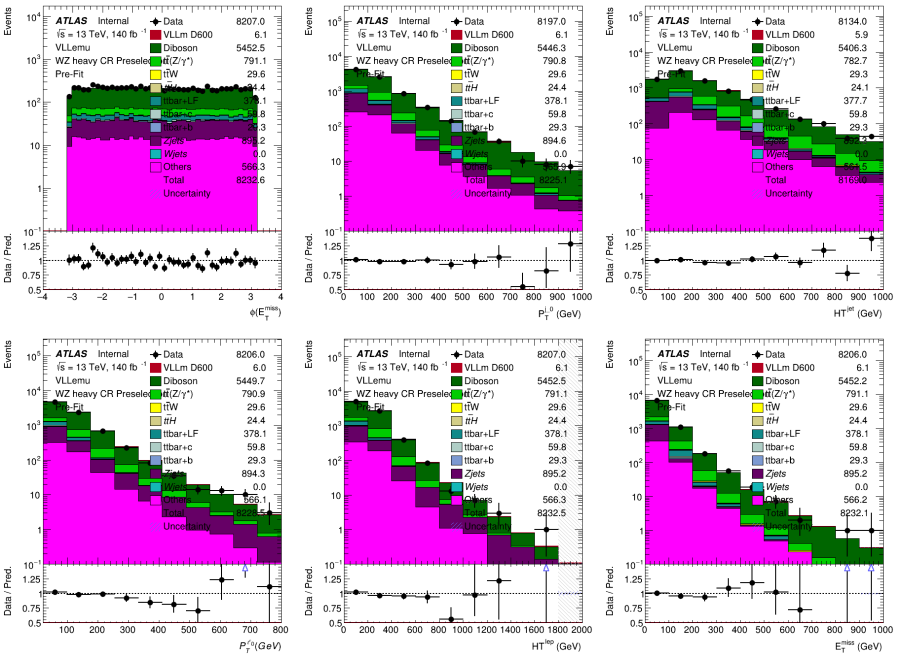
Şekil 4.14: $t\bar{t}$ kontrol bölgesi $\chi^2 < 10$ seviyesinde temel kinematik dağılımlar ve Veri/MC uyumu. N_{jet} dağılımı (sol-üst), en yüksek momentumlu jetin P_T dağılımı (orta-üst), jetlerin HT dağılımı (sağ-üst), en yüksek momentumlu leptonun P_T dağılımı (sol-alt), leptonların HT dağılımı (orta-alt) ve E_T^{miss} dağılımı (sağ-alt).

4.4.3. WZ Kontrol Bölgesi

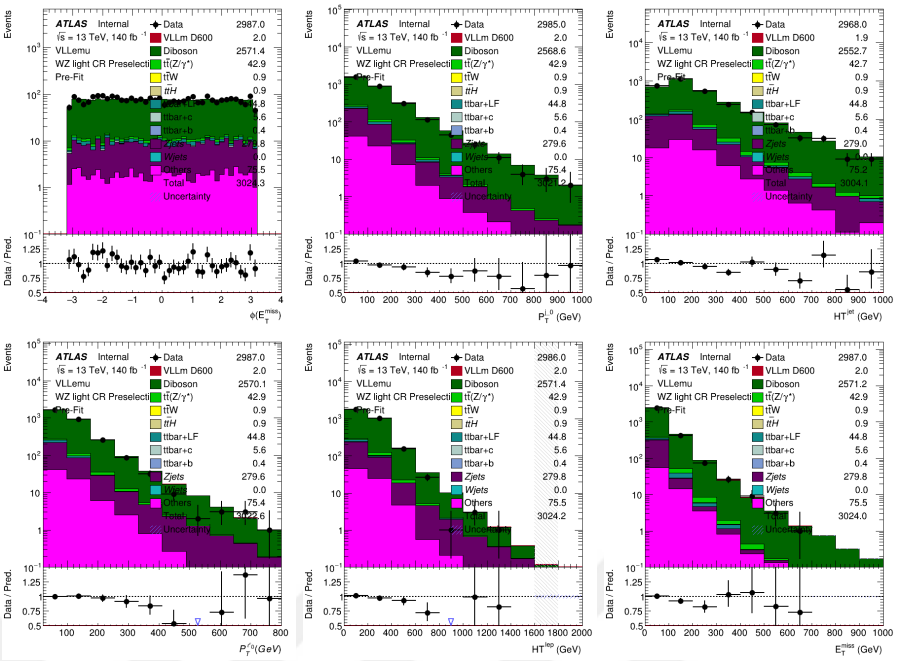
3ℓ kategorisinde tanımlanan WZ kontrol bölgesinin VLL sinyallerine olan hassasiyetini azaltmak için olaylarda bir adet leptonik bozunan Z bozonu olması şartı aranmıştır ($|m_{ll}^{SFOS}$ - 91.2| < 10 GeV). WZ kontrol bölgesi WZ hafif çeşni ve WZ ağır çeşni bozunumları olarak ikiye ayrılmıştır: Bu ayrım WZ hafif çeşni için N_{bjet}= 0, WZ ağır çeşni için $N_{bjet} \geq 1$ seçimleriyle gerçekleştirilmiştir. Her iki durum için de VLL sinyal bölgeleri ile dikliği sağlayan ön seçimler uygulandıktan sonra 3ℓ kategorisi için tanımlanan χ^2 algoritması WZ kontrol bölgelerine de uygulanıp mL_{ort} değişkeni yeniden yapılandırılmıştır. WZ hafif çeşni ve ağır çeşni kontrol bölgesinde uygulanan önseçimler sonucu elde edilen kinematik dağılımlar Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'ta verilmiştir. Bu seviyedeki saflık değerleri sırasıyla $\sim$ %82 ve $\sim$ % 66'dır. Yeniden yapılandırma seviyesinde her iki kontrol bölgesi için de elde edilen kinematik dağılımlar Şekil 4.17 ve Şekil 4.18'de gösterilmiştir. Bu aşamadaki saflık değerleri sırasıyla $\sim$ %85 ve $\sim$ % 67'dir.



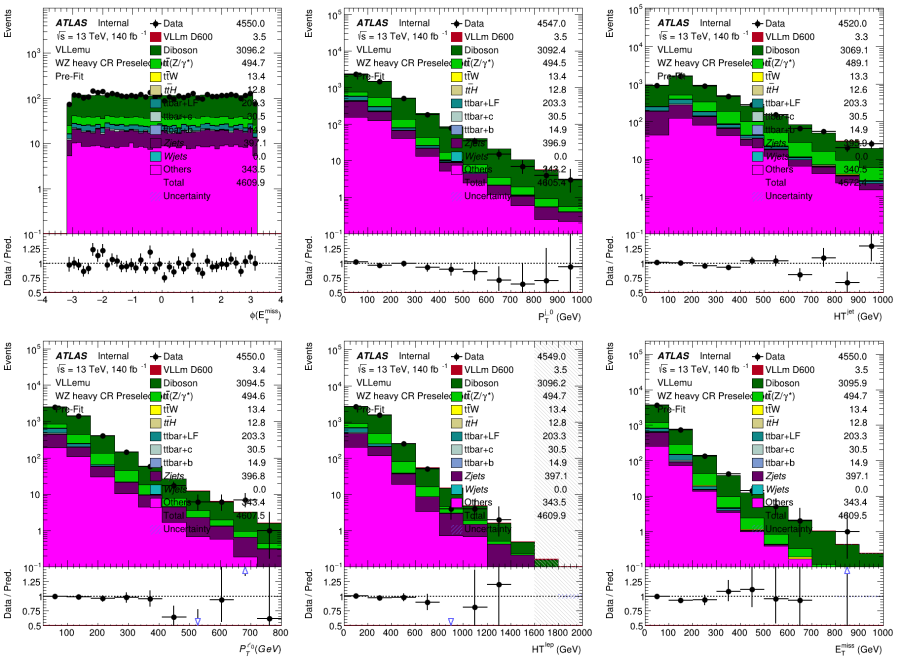
Şekil 4.15: WZ hafif çeşni kontrol bölgesi ön seçim seviyesinde temel kinematik dağılımlar ve Veri/MC uyumu. E_T^{miss} vektörünün ϕ bileşeninin dağılımı (sol-üst), en yüksek momentumlu jetin P_T dağılımı (orta-üst), jetlerin HT dağılımı (sağ-üst), en yüksek momentumlu leptonun P_T dağılımı (sol-alt), leptonların HT dağılımı (orta-alt) ve E_T^{miss} dağılımı (sağ-alt).



Şekil 4.16: WZ ağır çeşni kontrol bölgesi ön seçim seviyesinde temel kinematik dağılımlar ve Veri/MC uyumu. E_T^{miss} vektörünün ϕ bileşeninin dağılımı (sol-üst), en yüksek momentumlu jetin P_T dağılımı (orta-üst), jetlerin HT dağılımı (sağ-üst), en yüksek momentumlu leptonun P_T dağılımı (sol-alt), leptonların HT dağılımı (orta-alt) ve E_T^{miss} dağılımı (sağ-alt).



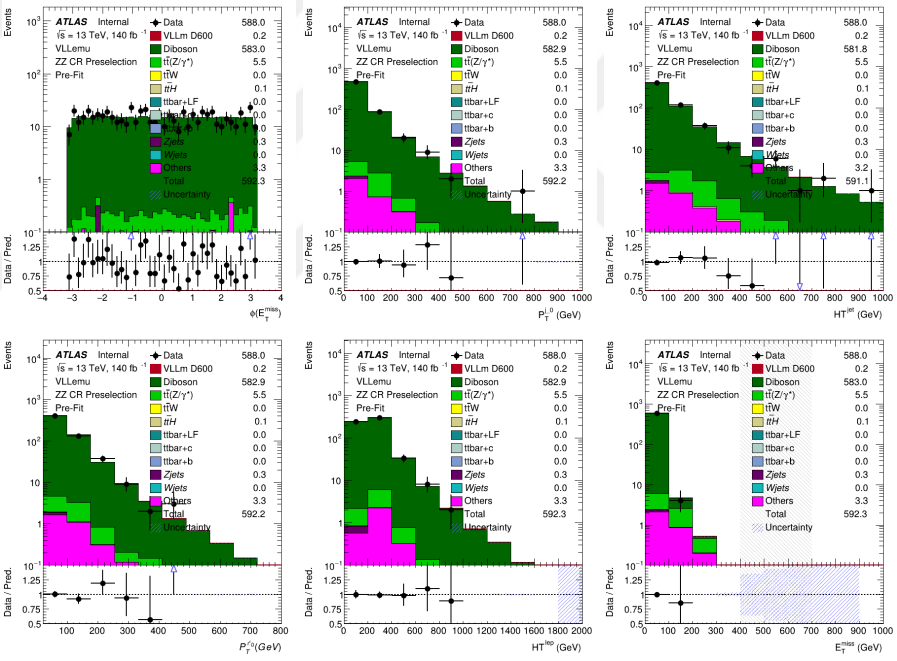
Şekil 4.17: WZ hafif çeşni kontrol bölgesi yeniden yapılandırma seviyesinde temel kinematik dağılımlar ve Veri/MC uyumu. E_T^{miss} vektörünün ϕ bileşeninin dağılımı (sol-üst), en yüksek momentumlu jetin P_T dağılımı (orta-üst), jetlerin HT dağılımı (sağ-üst), en yüksek momentumlu leptonun P_T dağılımı (sol-alt), leptonların HT dağılımı (orta-alt) ve E_T^{miss} dağılımı (sağ-alt).



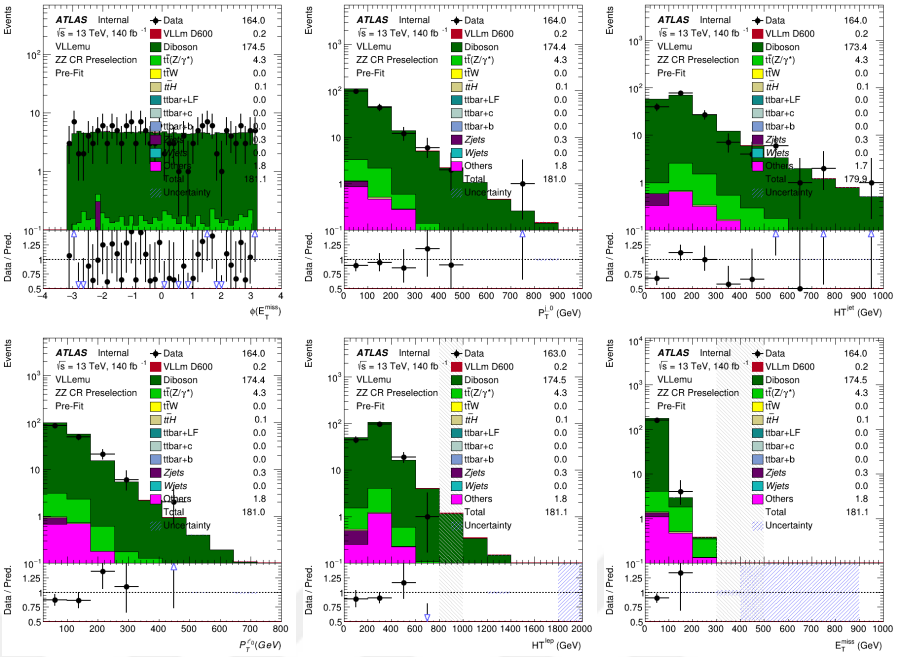
Şekil 4.18: WZ ağır çeşni kontrol bölgesi yeniden yapılandırma seviyesinde temel kinematik dağılımlar ve Veri/MC uyumu. E_T^{miss} vektörünün ϕ bileşeninin dağılımı (sol-üst), en yüksek momentumlu jetin P_T dağılımı (orta-üst), jetlerin HT dağılımı (sağ-üst), en yüksek momentumlu leptonun P_T dağılımı (sol-alt), leptonların HT dağılımı (orta-alt) ve E_T^{miss} dağılımı (sağ-alt).

4.4.4. ZZ Kontrol Bölgesi

4ℓ kategorisi için tanımlanan ZZ kontrol bölgesinde, doğrudan VLL bozunumlarından açığa çıkacak yüksek enerjili leptonları elemek için her bir olaydaki iki adet lepton çiftini kullanarak iki adet leptonik Z bozonu yeniden yapılandırılmıştır. Bu sayede 4ℓ sinyal bölgeleri ile diklik şartı sağlanarak olası VLL sinyalleri en aza indirgenmiştir. Ardından bu kontrol bölgesinin limit hesabına dahil edilebilmesi için χ^2 algoritması ile mL_{ort} değişkeni yeniden yapılandırılmıştır. Ön seçim seviyesinde elde edilen temel kinematik dağılımlar Şekil 4.19'da, yeniden yapılandırma seviyesindeki aynı dağılımlar Şekil 4.20'de gösterilmiştir. Her iki seviyedeki saflık değerleri sırasıyla $\sim$ % 98 ve $\sim$ % 96'dır.



Şekil 4.19: ZZ kontrol bölgesi ön seçim seviyesinde temel kinematik dağılımlar ve Veri/MC uyumu. E_T^{miss} vektörünün ϕ bileşeninin dağılımı (sol-üst), en yüksek momentumlu jetin P_T dağılımı (orta-üst), jetlerin HT dağılımı (sağ-üst), en yüksek momentumlu leptonun P_T dağılımı (sol-alt), leptonların HT dağılımı (orta-alt) ve E_T^{miss} dağılımı (sağ-alt).



Şekil 4.20: ZZ kontrol bölgesi yeniden yapılandırma seviyesinde temel kinematik dağılımlar ve Veri/MC uyumu. E_T^{miss} vektörünün ϕ bileşeninin dağılımı (sol-üst), en yüksek momentumlu jetin P_T dağılımı (orta-üst), jetlerin HT dağılımı (sağ-üst), en yüksek momentumlu leptonun P_T dağılımı (sol-alt), leptonların HT dağılımı (orta-alt) ve E_T^{miss} dağılımı (sağ-alt).

4.5. YENİDEN YAPILANDIRILAN BOZON DAĞILIMLARI

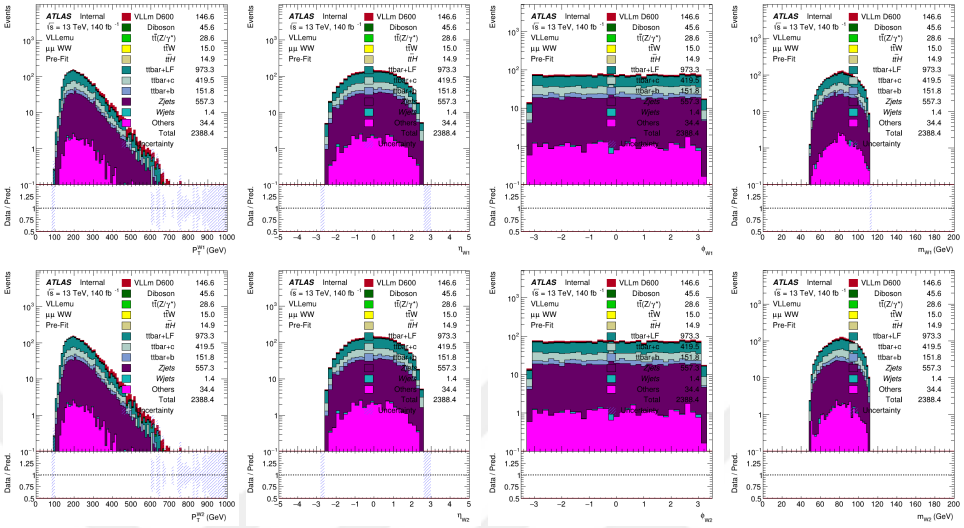
Bu bölümde, Bölüm 4.3.2'deki olay seçim şartları dikkate alınarak ve Bölüm 4.3.3'te açıklanan χ^2 algoritması kullanılarak 2ℓ, 3ℓ ve 4ℓ kategorilerindeki ee ve $\mu\mu$ sinyal bölgelerinde yeniden yapılandırılan bozon dağılımlarına yer verilmiştir.

4.5.1. VLL_μ Bozon Dağılımları

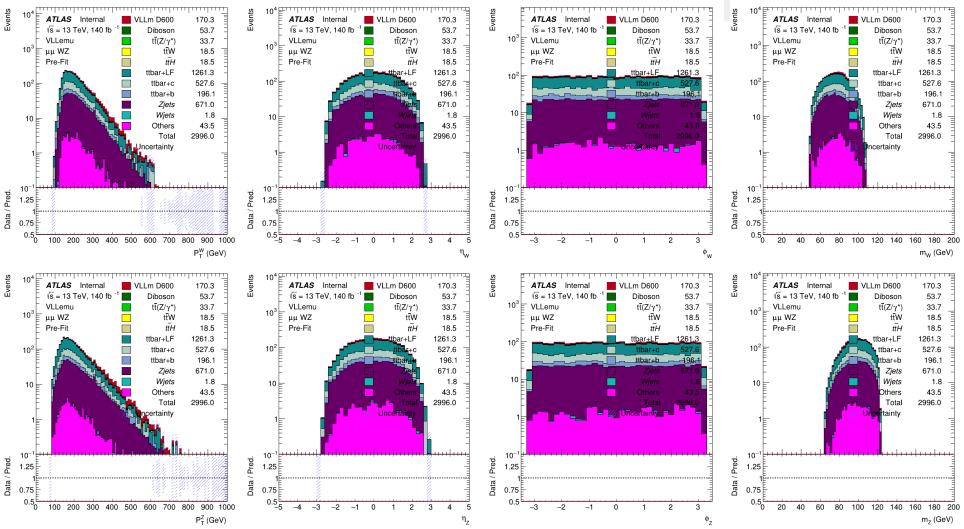
2ℓ VLL_μ sinyal bölgelerinde Tablo 4.6 ve Tablo 4.7'deki bütün olay seçimleri sırasıyla uygulandıktan sonra WW, WZ, WH, HZ, HH ve ZZ bozunum modlarında yeniden yapılandırılan bozonlara ait P_T, η, ϕ ve değişmez kütle dağılımları sırasıyla Şekil 4.21, 4.22, 4.23, 4.24, 4.25 ve 4.26'da verilmiştir.

3ℓ VLL_μ sinyal bölgelerindeki ön seçimler ve Tablo 4.8'deki bütün seçimler sırasıyla uygulandıktan sonra WH ve WZ bozunum modlarında yeniden yapılandırılan bozonlara ait dağılımlar sırasıyla şekil 4.27 ve 4.28'de verilmiştir.

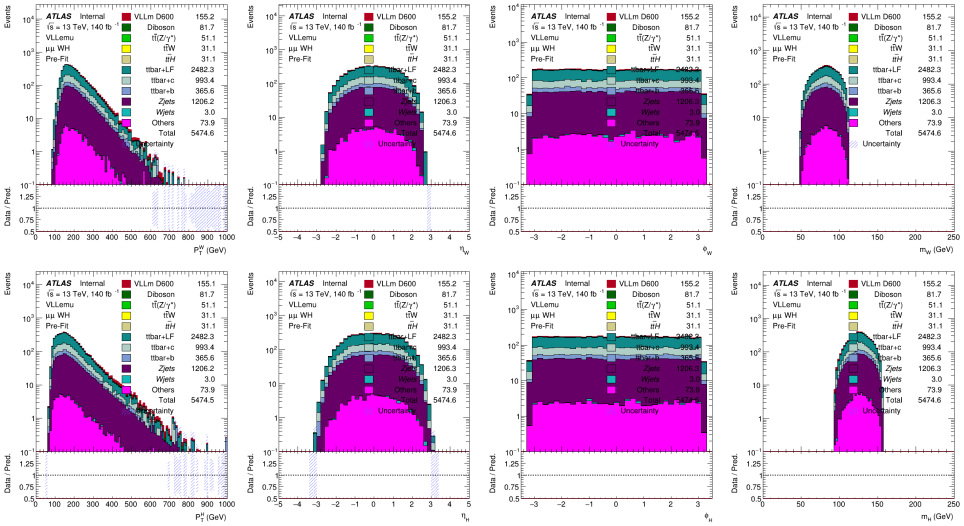
4ℓ VLL_μ sinyal bölgelerindeki ön seçimler ve Tablo 4.9'daki büyün seçimler sırasıyla uygulandıktan sonra WZ ve ZZ bozunum modlarında yeniden yapılandırılan bozon dağılımları sırasıyla Şekil 4.29 ve 4.30'da verilmiştir.



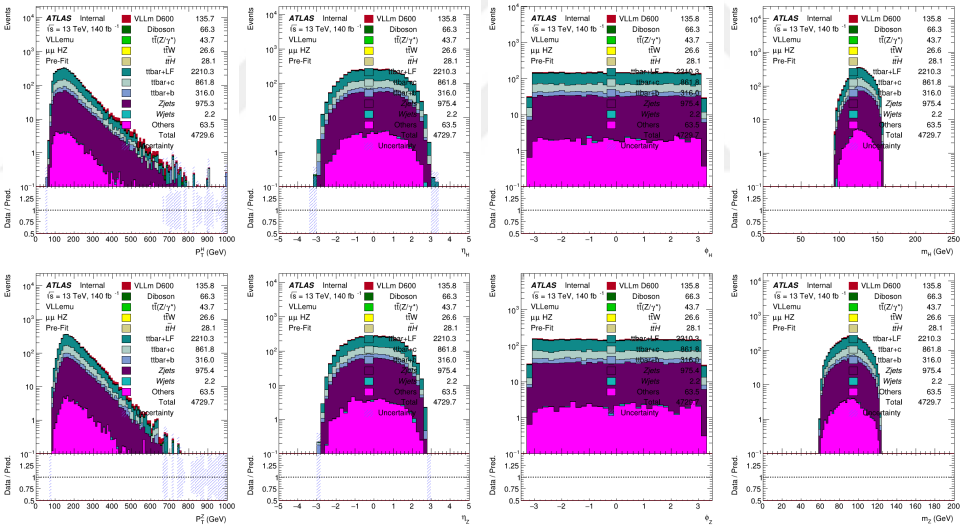
Şekil 4.21: WW 2ℓ bozunum modunda hadronik bozunan W bozonlarının P_T, η, ϕ ve değişmez kütle dağılımları. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



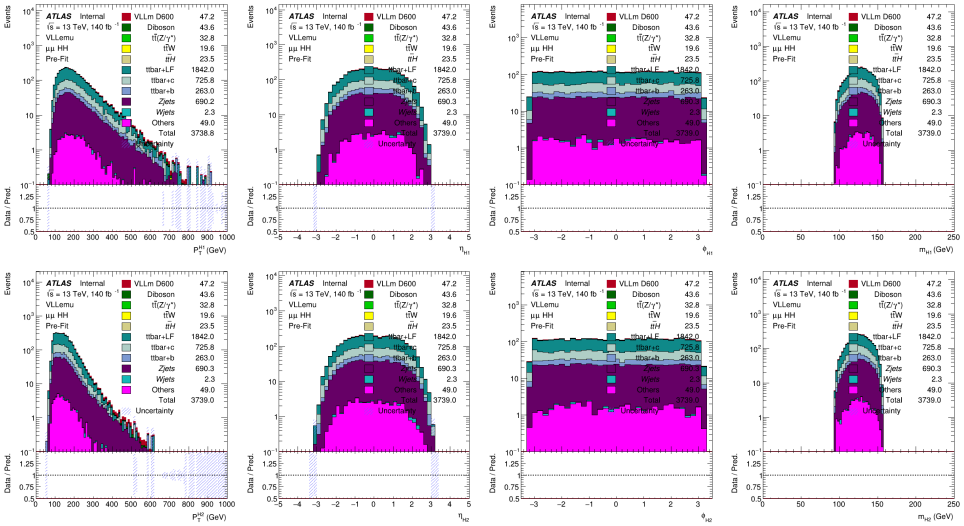
Şekil 4.22: WZ 2ℓ bozunum modunda hadronik bozunan W (üst) ve Z (alt) bozonlarının P_T, η, ϕ ve değişmez kütle dağılımları. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



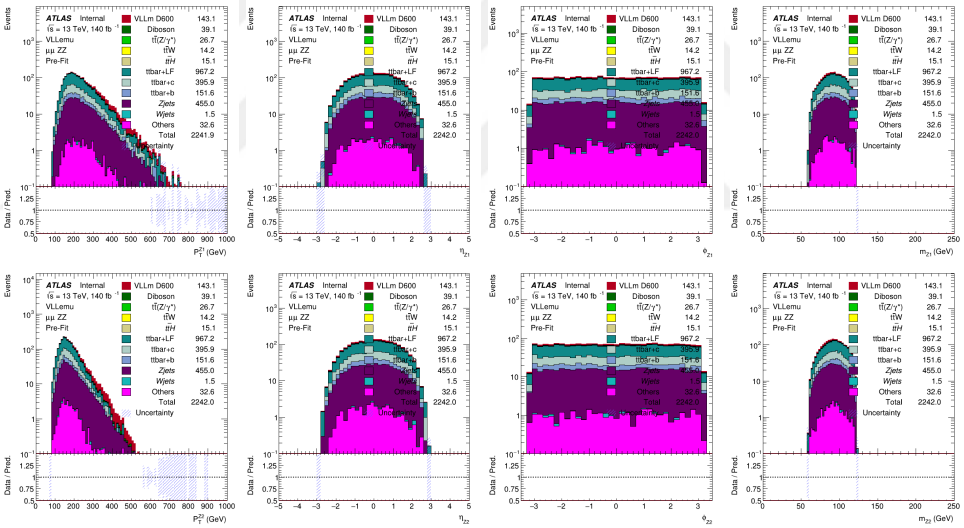
Şekil 4.23: WH 2ℓ bozunum modunda hadronik bozunan W (üst) ve Higgs (alt) bozonlarının P_T, η, ϕ ve değişmez kütle dağılımları. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



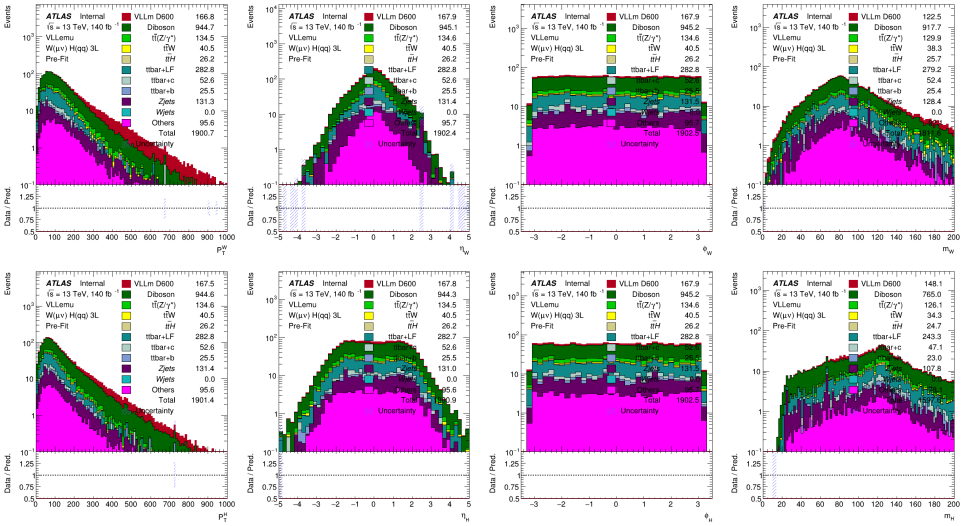
Şekil 4.24: HZ 2ℓ bozunum modunda hadronik bozunan Higgs (üst) ve Z (alt) bozonlarının P_T, η, ϕ ve değişmez kütle dağılımları. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



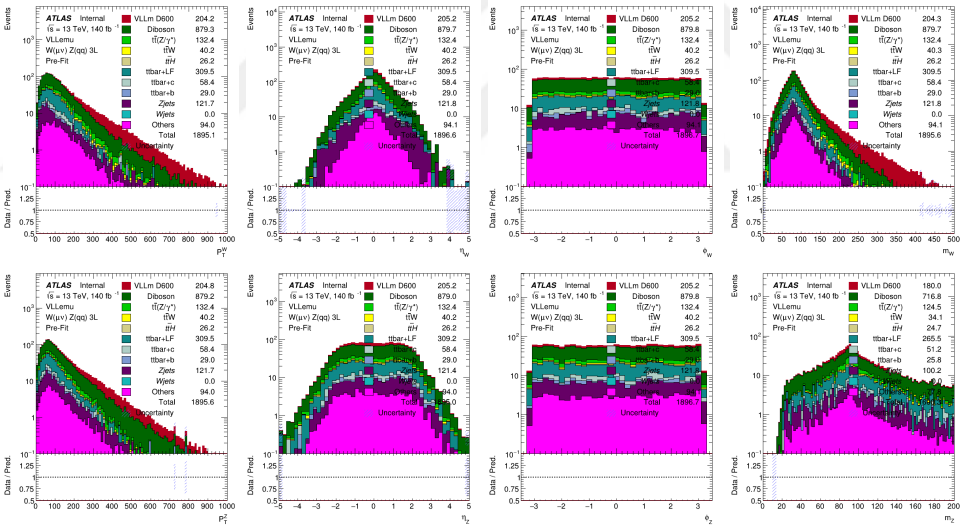
Şekil 4.25: HH 2ℓ bozunum modunda hadronik bozunan Higgs bozonlarının P_T, η, ϕ ve değişmez kütle dağılımları. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



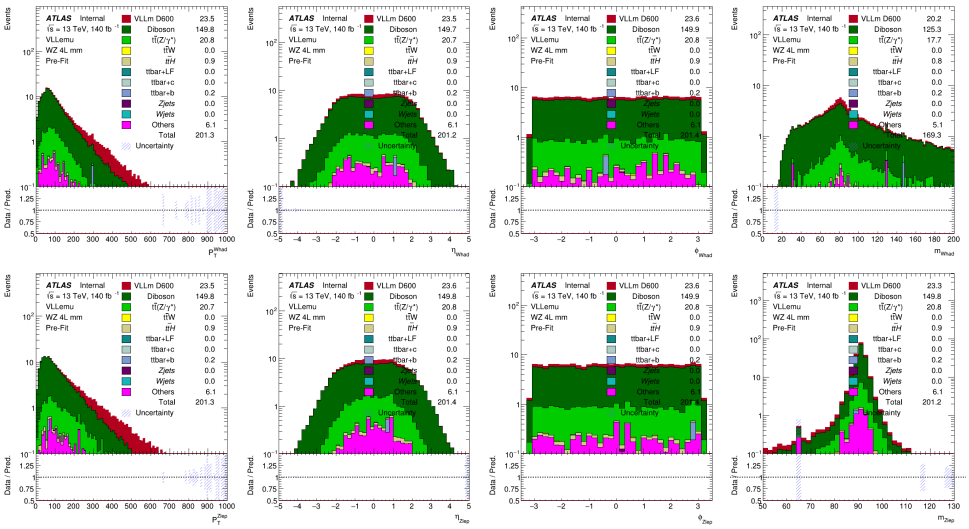
Şekil 4.26: ZZ 2ℓ bozunum modunda hadronik bozunan Z bozonlarının P_T, η, ϕ ve değişmez kütle dağılımları. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



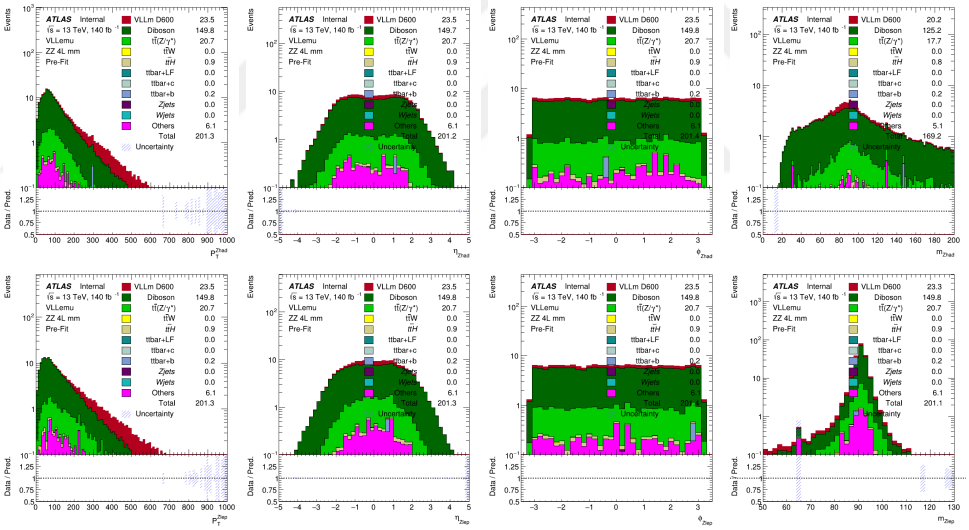
Şekil 4.27: 3ℓ WH bozunum modunda leptonik bozunan W (üst) ve hadronik bozunan Higgs (alt) bozonlarının P_T, η, ϕ ve değişmez kütle dağılımları. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



Şekil 4.28: 3ℓ WZ bozunum modunda leptonik bozunan W (üst) ve hadronik bozunan Z (alt) bozonlarının P_T, η, ϕ ve değişmez kütle dağılımları. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



Şekil 4.29: 4ℓ WZ bozunum modunda hadronik bozunan W (üst) ve leptonik bozunan Z (alt) bozonlarının P_T, η, ϕ ve değişmez kütle dağılımları. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



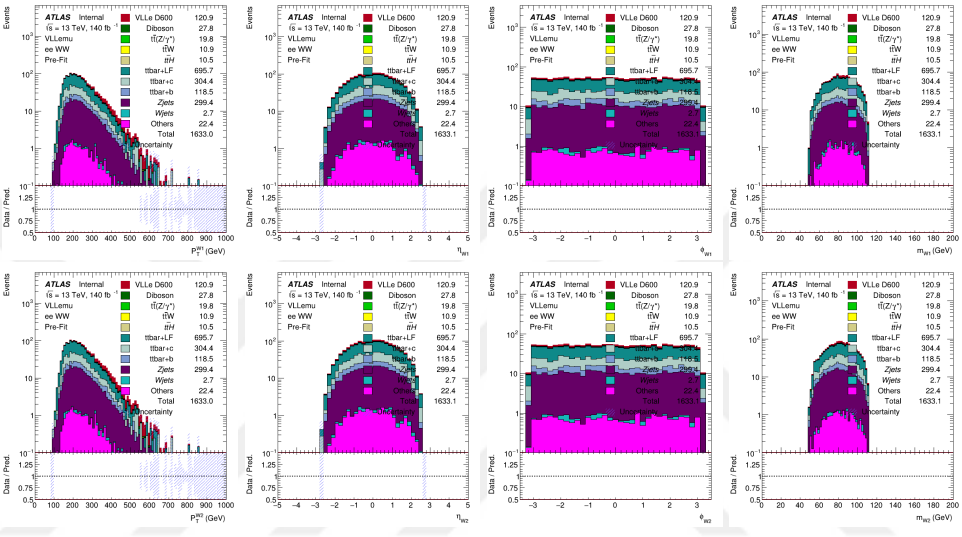
Şekil 4.30: 4ℓ ZZ bozunum modunda hadronik bozunan Z bozonu (üst) ve leptonik bozunan Z bozonunun (alt) P_T, η, ϕ ve değişmez kütle dağılımları. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.

4.5.2. VLL_e Bozon Dağılımları

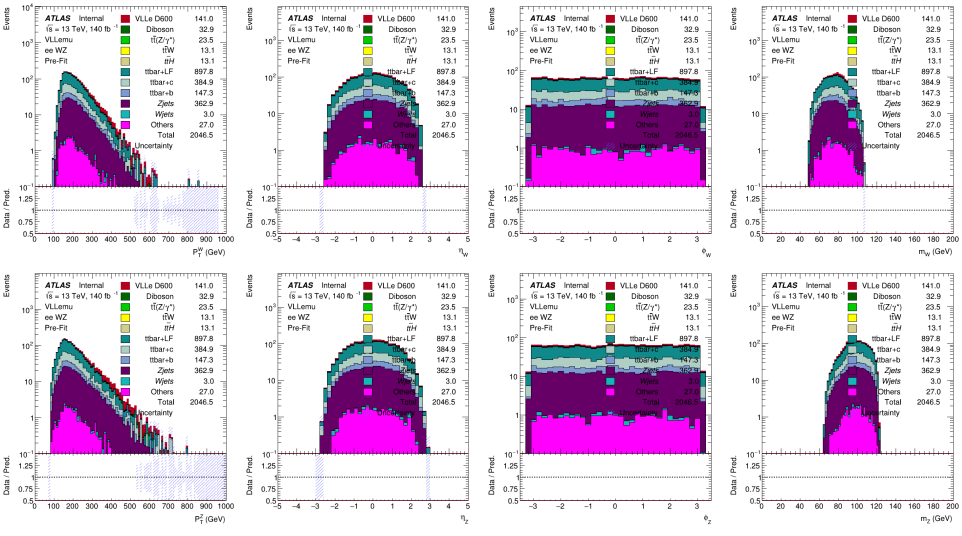
2ℓ VLL_e sinyal bölgelerindeki Tablo 4.6 ve Tablo 4.7'deki bütün olay seçimleri sırasıyla uygulandıktan sonra WW, WZ, WH, HZ, HH ve ZZ bozunum modlarında yeniden yapılandırılan bozonlara ait P_T, η, ϕ ve değişmez kütle dağılımları sırasıyla Şekil 4.31, 4.32, 4.33, 4.34, 4.35 ve 4.36'da verilmiştir.

3ℓ VLL$_e$ sinyal bölgelerindeki ön seçimler ve Tablo 4.8'deki bütün seçimler sırasıyla uygulandıktan sonra WH ve WZ bozunum modlarında yeniden yapılandırılan bozonlara ait dağılımlar sırasıyla şekil 4.37 ve 4.38'de verilmiştir.

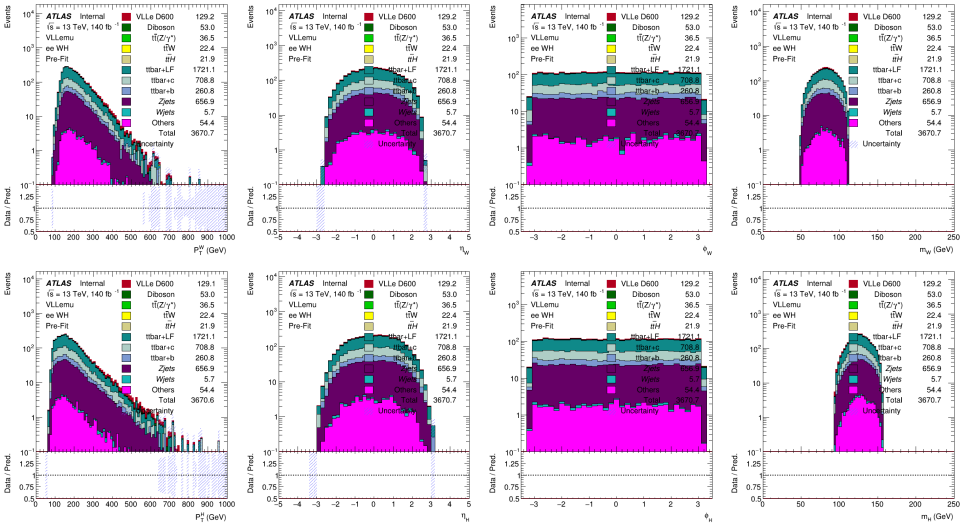
4ℓ VLL$_e$ sinyal bölgelerindeki ön seçimler ve Tablo 4.9'daki bütün seçimler sırasıyla uygulandıktan sonra WZ ve ZZ bozunum modlarında yeniden yapılandırılan bozon dağılımları sırasıyla Şekil 4.39 ve 4.40'da verilmiştir.



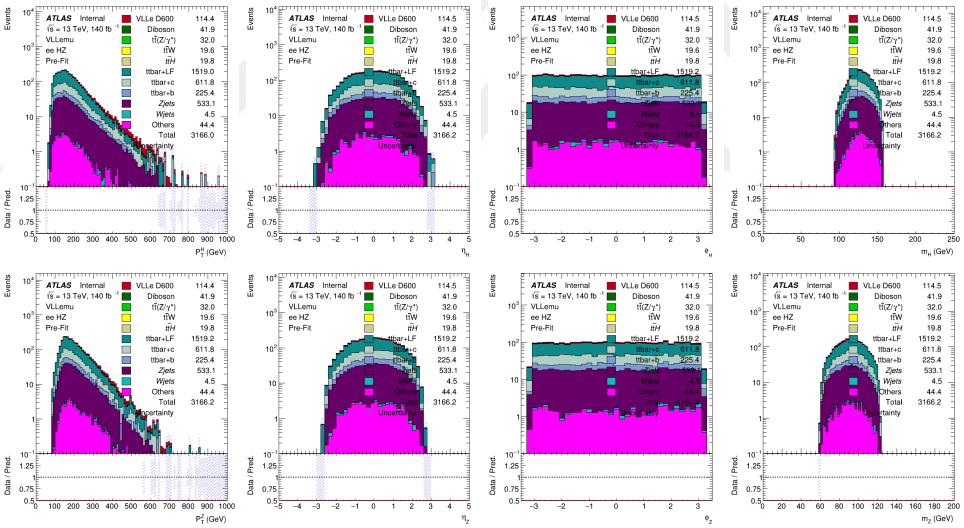
Şekil 4.31: WW 2ℓ bozunum modunda hadronik bozunan W bozonlarının P_T, η, ϕ ve değişmez kütle dağılımları. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



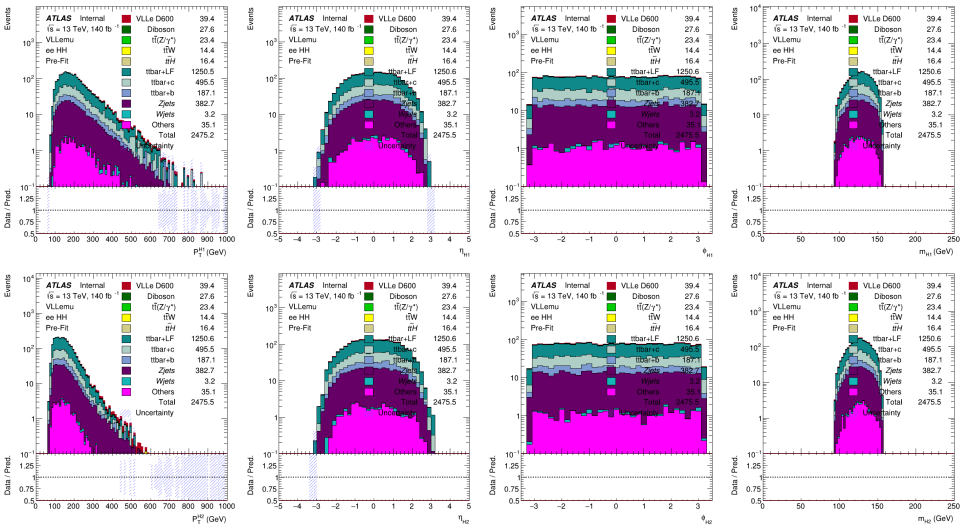
Şekil 4.32: WZ 2ℓ bozunum modunda hadronik bozunan W (üst) ve Z (alt) bozonlarının P_T, η, ϕ ve değişmez kütle dağılımları. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



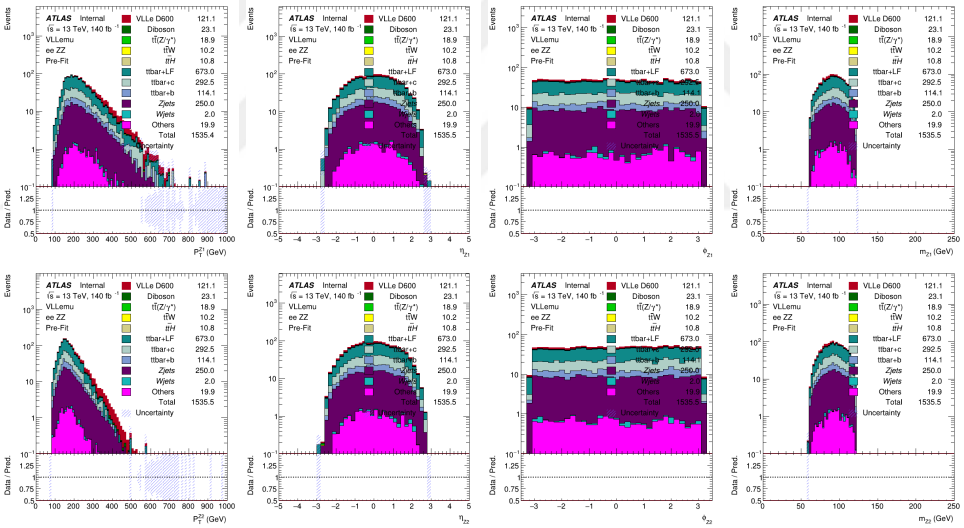
Şekil 4.33: WH 2ℓ bozunum modunda hadronik bozunan W (üst) ve Higgs (alt) bozonlarının P_T, η, ϕ ve değişmez kütle dağılımları. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



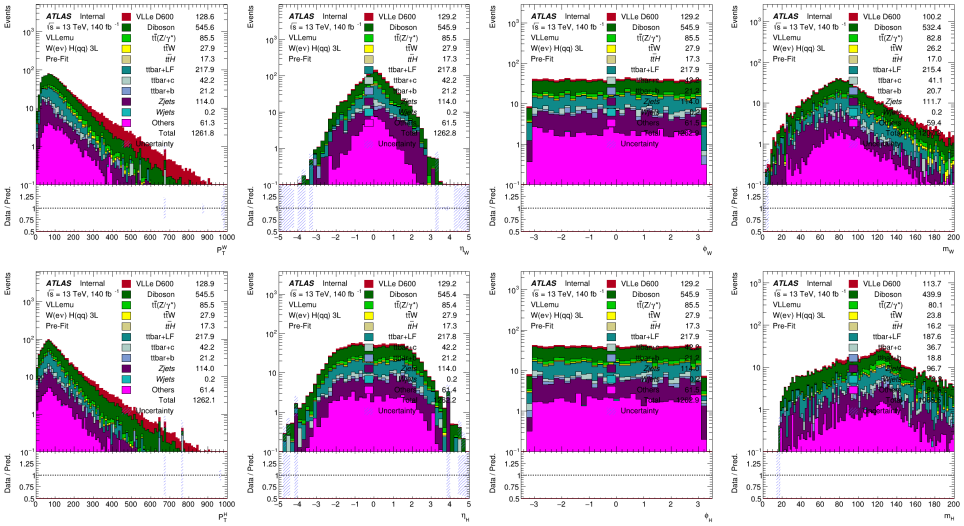
Şekil 4.34: HZ 2ℓ bozunum modunda hadronik bozunan Higgs (üst) ve Z (alt) bozonlarının P_T, η, ϕ ve değişmez kütle dağılımları. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



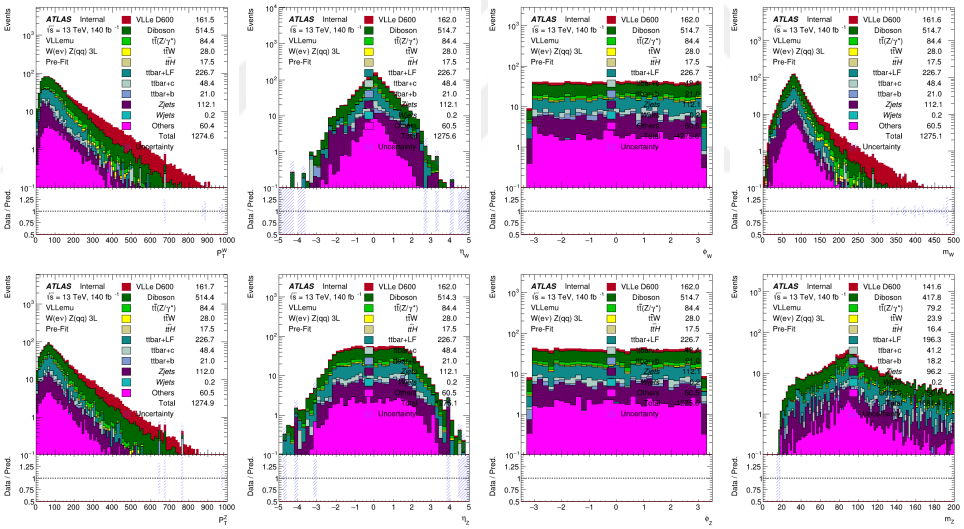
Şekil 4.35: HH 2ℓ bozunum modunda hadronik bozunan Higgs bozonlarının P_T, η, ϕ ve değişmez kütle dağılımları. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



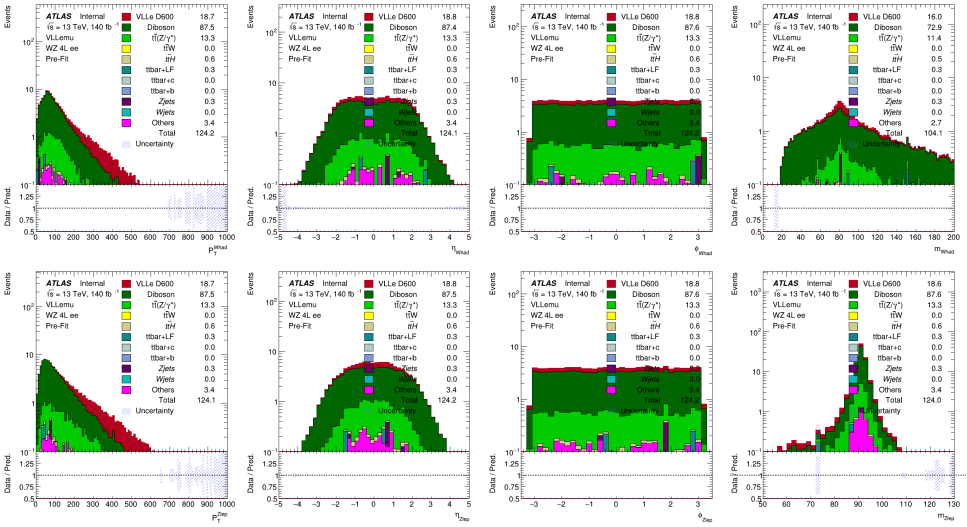
Şekil 4.36: ZZ 2ℓ bozunum modunda hadronik bozunan Z bozonlarının P_T, η, ϕ ve değişmez kütle dağılımları. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



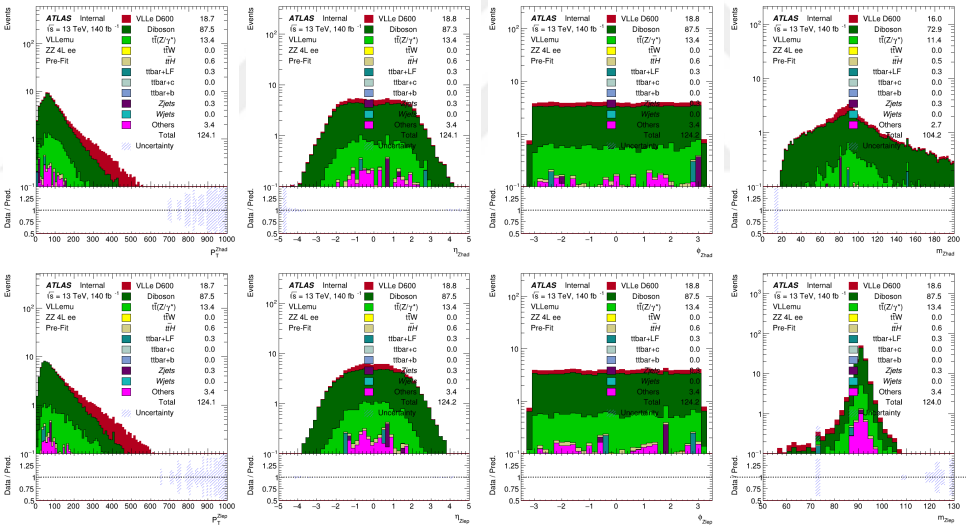
Şekil 4.37: 3ℓ WH bozunum modunda leptonik bozunan W (üst) ve hadronik bozunan Higgs (alt) bozonlarının P_T, η, ϕ ve değişmez kütle dağılımları. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



Şekil 4.38: 3ℓ WZ bozunum modunda leptonik bozunan W (üst) ve hadronik bozunan Z (alt) bozonlarının P_T, η, ϕ ve değişmez kütle dağılımları. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



Şekil 4.39: 4ℓ WZ bozunum modunda hadronik bozunan W (üst) ve leptonik bozunan Z (alt) bozonlarının P_T, η, ϕ ve değişmez kütle dağılımları. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



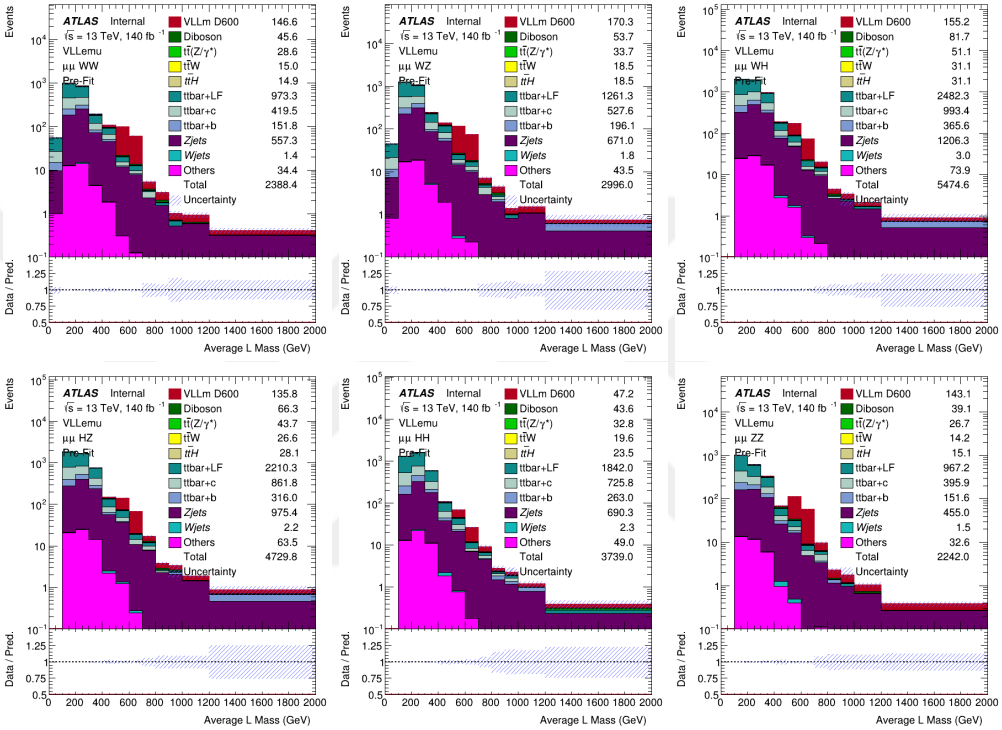
Şekil 4.40: 4ℓ ZZ bozunum modunda hadronik bozunan Z bozonu (üst) ve leptonik bozunan Z bozonunun (alt) P_T, η, ϕ ve değişmez kütle dağılımları. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.

4.6. İSTATİSTİKSEL OTURTMA ÖNCESİ VLL KÜTLE DAĞILIMLARI

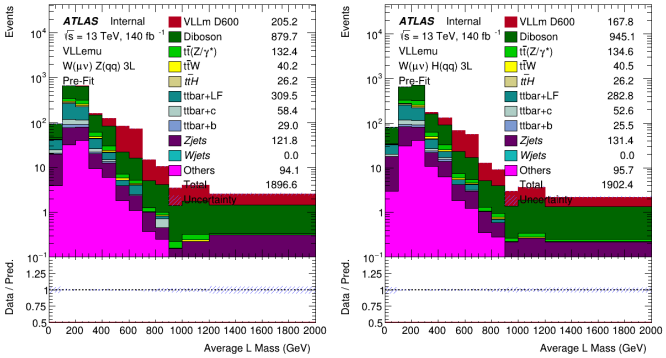
Analizde yeniden yapılandırılan VLL çiftinin kütlelerinin ortalaması (mL_{ort}), istatistiksel hesaplama ve beklenen dışarlama limitinin hesaplanması sürecinde bozunum sürecinden bağımsız tek bir ayırt edici değişken olarak seçilmiştir.

4.6.1. VLL_μ Kütle dağılımları

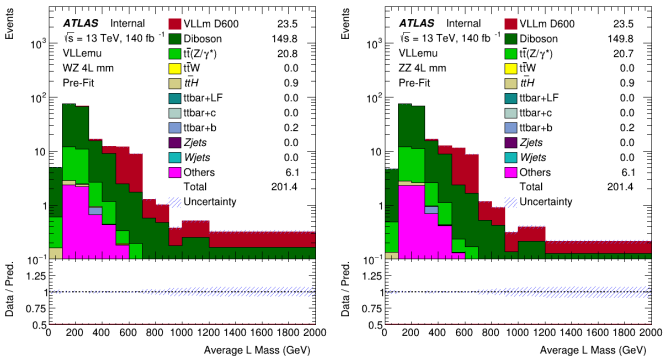
VLL_μ 600 GeV dublet sinyal örneği kullanılarak her bir kategoride elde edilen sinyal bölgesi dağılımları Şekil 4.41, 4.42 ve 4.43'te, VLL_μ 200 GeV singlet sinyal örneği kullanılarak elde edilen sinyal bölgesi dağılımları ise Şekil 4.44 ve 4.45'te gösterilmiştir.



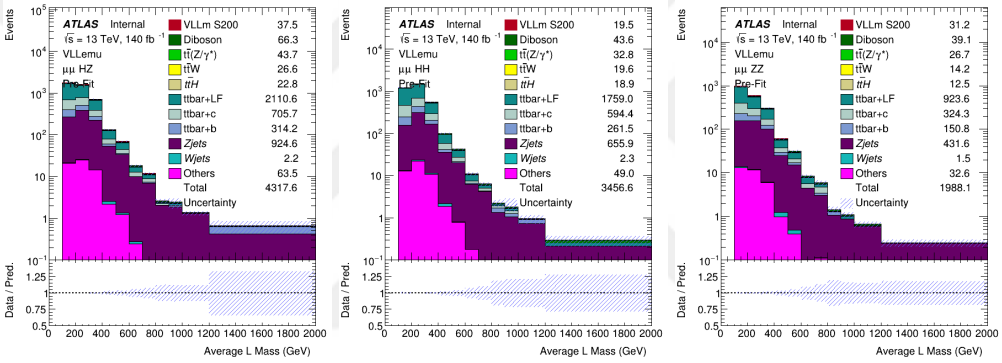
Şekil 4.41: İstatistiksel oturtma öncesi sırasıyla 2ℓ WW, WZ, WH, HZ, HH ve ZZ sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_μ 600 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



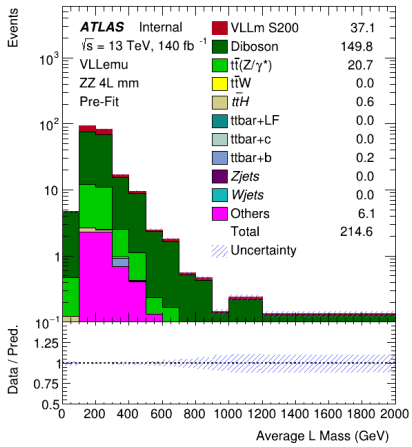
Şekil 4.42: İstatistiksel oturtma öncesi sırasıyla 3ℓ WZ ve WH sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_μ 600 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



Şekil 4.43: İstatistiksel oturtma öncesi sırasıyla 4ℓ WZ ve ZZ sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_\mu$ 600 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



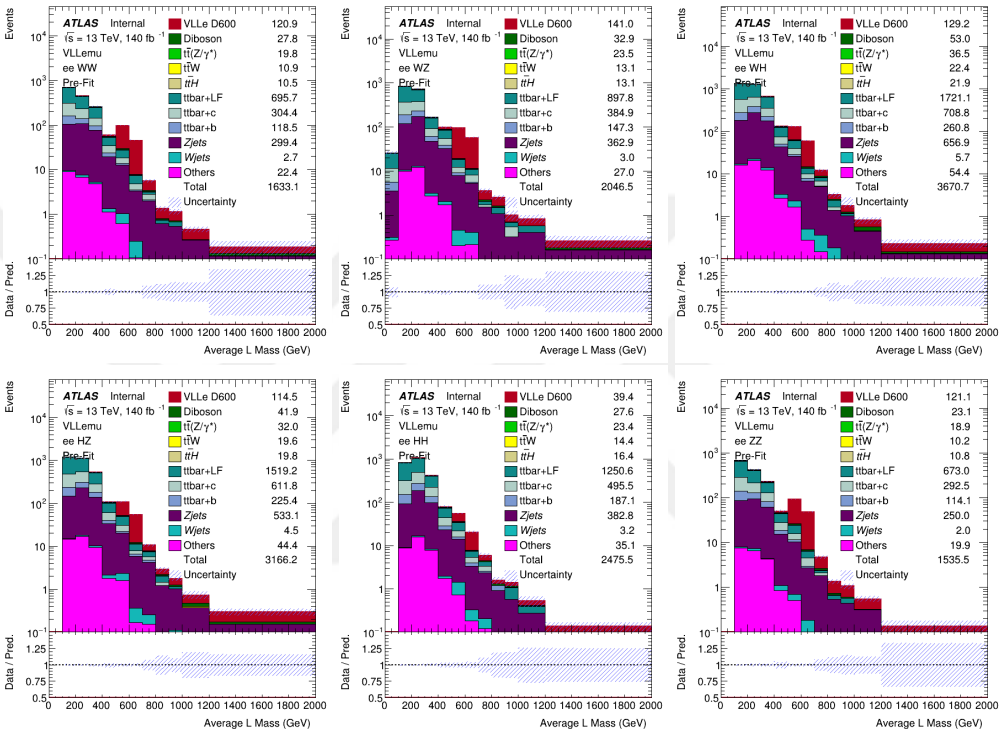
Şekil 4.44: İstatistiksel oturtma öncesi sırasıyla 2ℓ HZ, HH ve ZZ sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_\mu$ 200 GeV singlet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



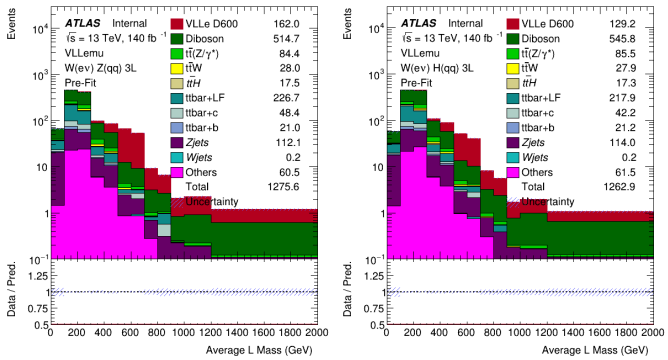
Şekil 4.45: İstatistiksel oturtma öncesi sırasıyla 4ℓ ZZ sinyal bölgelesinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_\mu$ 200 GeV singlet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.

4.6.2. VLL_e Kütle dağılımları

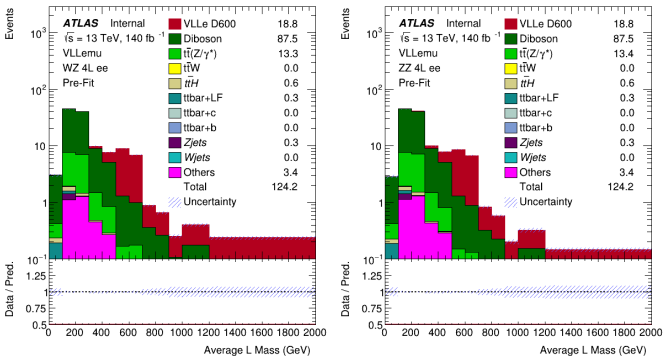
VLL_e 600 GeV dublet sinyal örneği kullanılarak her bir kategoride elde edilen sinyal bölgesi dağılımları Şekil 4.46, 4.47 ve 4.48'te, VLL_e 200 GeV singlet sinyal örneği kullanılarak elde edilen sinyal bölgesi dağılımları ise Şekil 4.49 ve 4.50'te gösterilmiştir.



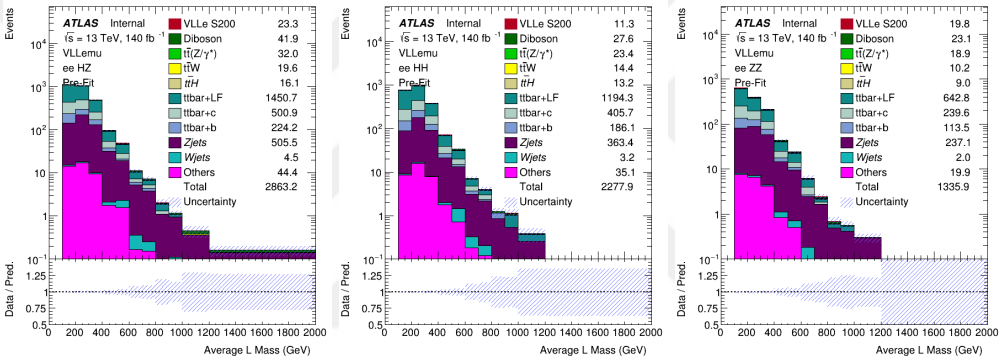
Şekil 4.46: İstatistiksel oturtma öncesi sırasıyla 2ℓ WW, WZ, WH, HZ, HH ve ZZ sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_e 600 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



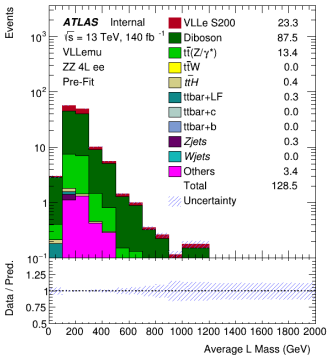
Şekil 4.47: İstatistiksel oturtma öncesi sırasıyla 3ℓ WZ ve WH sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_e 600 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



Şekil 4.48: İstatistiksel oturtma öncesi sırasıyla 4ℓ WZ ve ZZ sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_e$ 600 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



Şekil 4.49: İstatistiksel oturtma öncesi sırasıyla 2ℓ HZ, HH ve ZZ sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_e$ 200 GeV singlet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



Şekil 4.50: İstatistiksel oturtma öncesi sırasıyla 4ℓ ZZ sinyal bölgesinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_e$ 200 GeV singlet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.

4.7. İSTATİSTİKSEL HESAPLAMA VE LİMİT

Analizdeki istatistiksel hesaplamalar TRExFitter yazılım çerçevesi ile gerçekleştirilmiştir. TRExFitter, istatistiksel modelleri HistFactory [42] formatına dönüştürerek ROOT veri analiz paketi altındaki RooFit [43] sınıfları aracılığıyla istatistiksel hesaplamaları gerçekleştirmek için geliştirilen bir paket programdır.

İstatistiksel oturtma süreci, VLL_μ ve VLL_e kanalları ayrı ayrı ele alınmak üzere, bütün sinyal ve kontrol bölgeleri üzerine profil olasılık uydurumu [44] yöntemi uygulanmıştır. Profil olasılık fonksiyonu $L(\mu,\theta)$ şeklinde tanımlanır. Burada μ test edilmek istenen hipoteze göre VLL sinyal sayısının çarpılacağı katsayı olarak tanımlanır, θ paremetresi ise test edilecek hipoteze bağlı olarak olasılık fonksiyonunu maksimize edecek parametreyi ifade eder. Limit hesabı için gerekli olan ölçme istatistiği Denklem 4.3'te ifade edilmiştir. Bu denklemde θ_μ parametresi koşullu μ değeri için olasılık fonksiyonunu maksimize eden parametreyi, $\theta_{\hat{\mu}}$ ise değişken μ değerine bağlı olarak olasılık fonksiyonunu maksimize eden parametreyi temsil etmektedir.

$$t_\mu = -2\ln\frac{L(\mu,\theta_\mu)}{L(\hat{\mu},\theta_{\hat{\mu}})} \tag{4.3}$$

Ölçme istatistiği hesaplandıktan sonra güvenilirlik seviyelerinin hesabı, yalnızca ardalan (CL_b) ve sinyal + ardalan (CL_{s+b}) hipotezleri için Denklem 4.4 ve 4.5'te verilmiştir.

$$CL_b = \int_{t_{\mu,obs}}^{\infty} f(t_\mu|\mu=0)dt_\mu \tag{4.4}$$

$$CL_{s+b} = \int_{t_{\mu,obs}}^{\infty} f(t_\mu|\mu)dt_\mu \tag{4.5}$$

Yukarıdaki denklemlerde $t_{\mu,obs}$, veride gözlenen t_μ istatistiğini, $f(t_\mu|\mu)dt_\mu$ ise belirli bir μ sinyal kuvveti varsayımıyla t_μ'nün olasılık dağılım fonksiyonu olarak tanımlanır. Beklenen

limit hesaplanırken kontrol bölgeleri için gerçek veri, sinyal bölgeleri içinse Asimov veri seti (sinyal ve SM ardalanlarının toplamı ile elde edilen hayali veri) kullanılmıştır. CL_s güvenilirlik seviyesi Denklem 4.6'da verilmiştir. % 95 güvenilirlik seviyesi $CL_s \leq 0.05$ olarak tanımlanır.

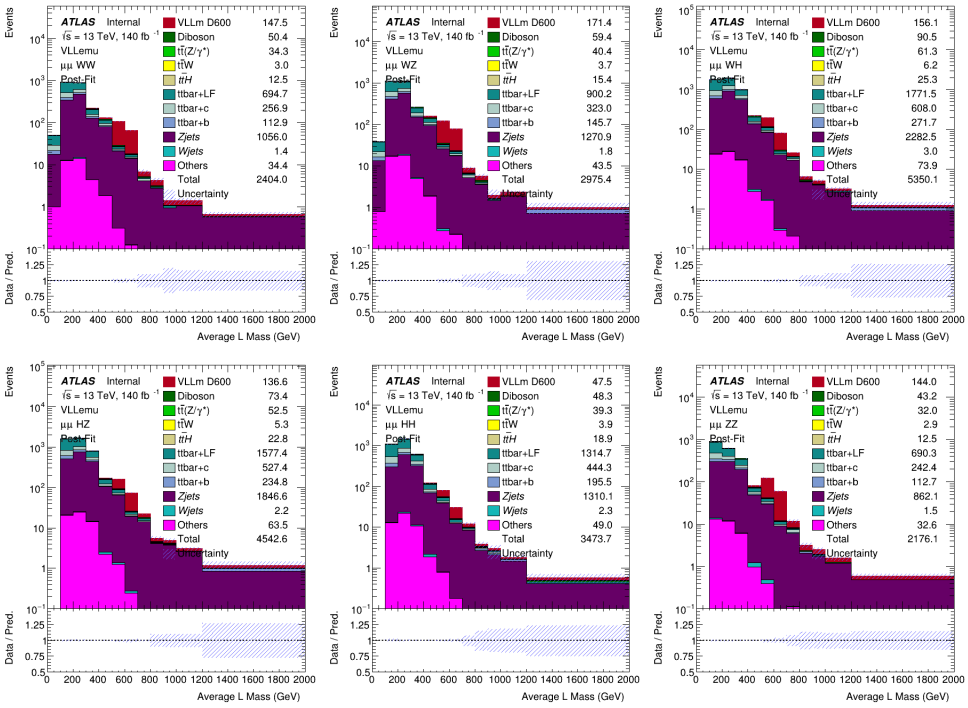
$$CL_s = \frac{CL_{s+b}}{CL_b} \tag{4.6}$$

5. BULGULAR

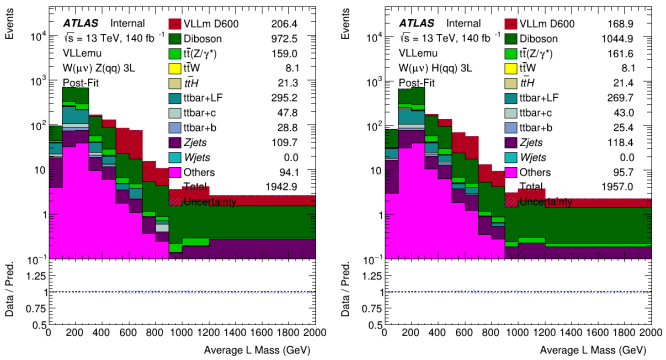
Bu bölümde analiz kapsamında tanımlanan bütün VLL sinyal ve kontrol bölgeleri üzerine uygulanan Sinyal + Ardalan Asimov oturtma sonuçları Bölüm 5.1 ve 5.2'de yer almaktadır. Asimov oturtma süreci Bölüm 4.7'de tarif edilmiştir. Bu çalışmada aranan sinyale dair oluşabilecek önyargıları önlemek amacıyla kör analiz yöntemi izlenmiştir. Bu sebeple sinyal bölgelerindeki istatistiksel hesaplamalara gerçek veri dahil edilmemiştir. Ayrıca istatistiksel oturtma sürecine sistematik belirsizlikler de dahil edilmemiştir.

5.1. VLL_μ SİNYAL BÖLGESİ

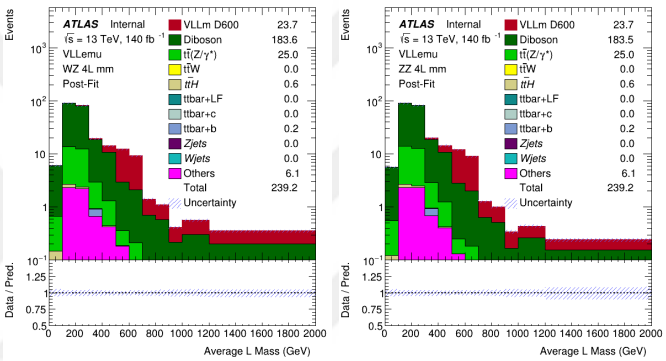
2ℓ, 3ℓ ve 4ℓ kategorilerindeki VLL_μ sinyal bölgelerine ait mL_{ort} dağılımları VLL dublet 600 GeV sinyal örneği için Şekil 5.1, 5.2 ve 5.3'te, VLL singlet 200 GeV sinyal örneği için ise Şekil 5.4 ve 5.5'te gösterilmiştir. Diğer kütle noktaları için elde edilen sinyal dağılımları VLL dublet için EK 2.1'de, VLL singlet için ise EK 2.3'te gösterilmiştir.



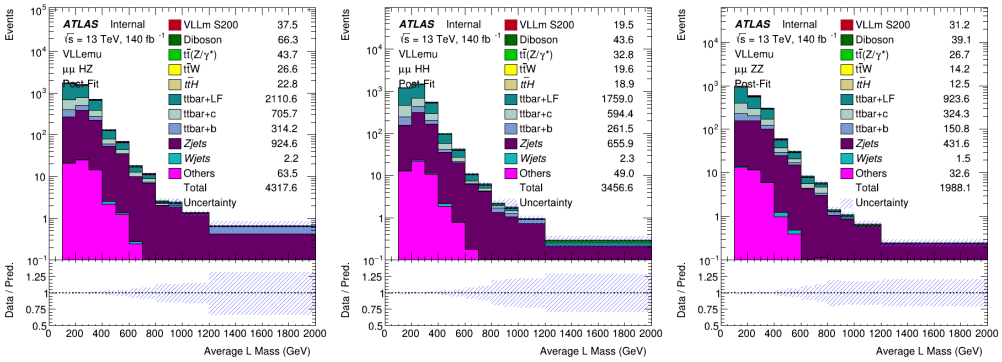
Şekil 5.1: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_μ sırasıyla 2ℓ WW, WZ, WH, HZ, HH ve ZZ sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_μ 600 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



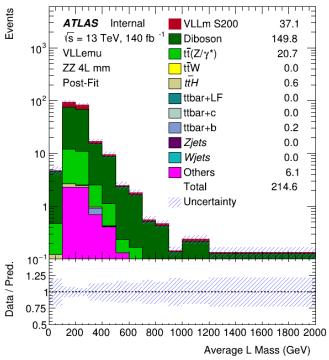
Şekil 5.2: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_μ 3ℓ WZ(sol) ve WH(sağ) sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_μ 600 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



Şekil 5.3: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_μ 4ℓ WZ(sol) ve ZZ(sağ) sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_μ 600 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



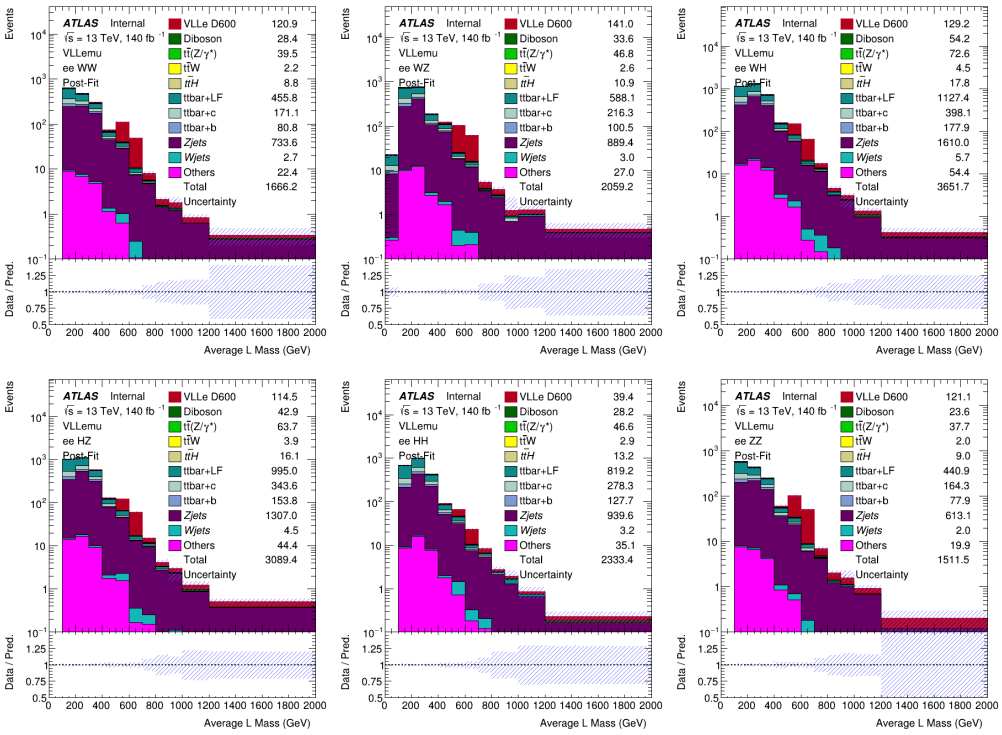
Şekil 5.4: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_μ 2ℓ HZ(sol), HH(orta) ve ZZ(sağ) sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_μ 200 GeV singlet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



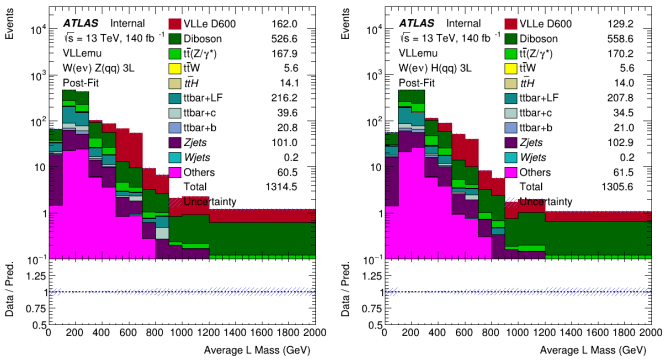
Şekil 5.5: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_{μ} 4ℓ ZZ sinyal bölgesinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_{μ} 200 GeV singlet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.

5.2. VLL_e SİNYAL BÖLGESİ

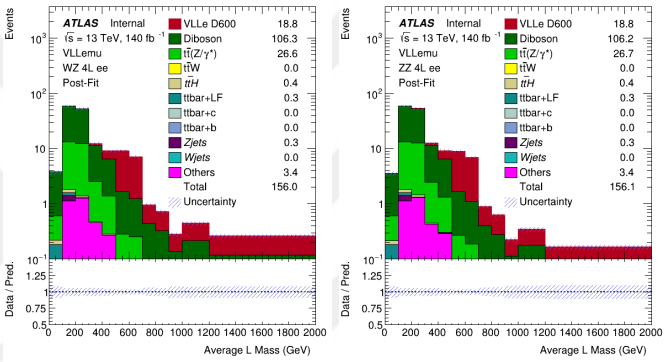
2ℓ, 3ℓ ve 4ℓ kategorilerindeki VLL_e sinyal bölgelerine ait mL_{ort} dağılımları VLL dublet 600 GeV sinyal örneği için Şekil 5.6, 5.7 ve 5.8'de, VLL singlet 200 GeV sinyal örneği için ise Şekil 5.9 ve 5.10'da gösterilmiştir. Diğer kütle noktaları için elde edilen sinyal dağılımları VLL dublet için EK 2.2'de, VLL singlet için ise EK 2.4'te gösterilmiştir.



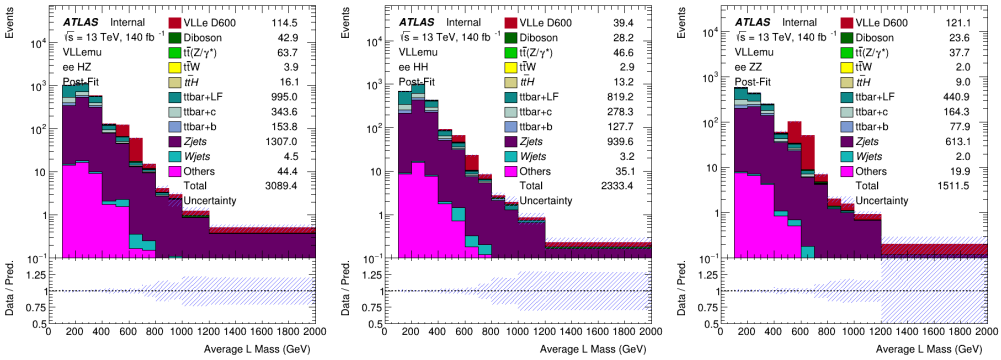
Şekil 5.6: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_e sırasıyla 2ℓ WW, WZ, WH, HZ, HH ve ZZ sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_e 600 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



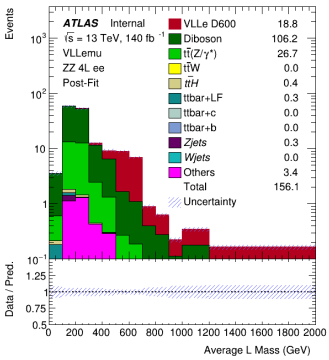
Şekil 5.7: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_e 3ℓ WZ(sol) ve WH(sağ) sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_e$ 600 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



Şekil 5.8: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_e 4ℓ WZ(sol) ve ZZ(sağ) sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_e$ 600 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



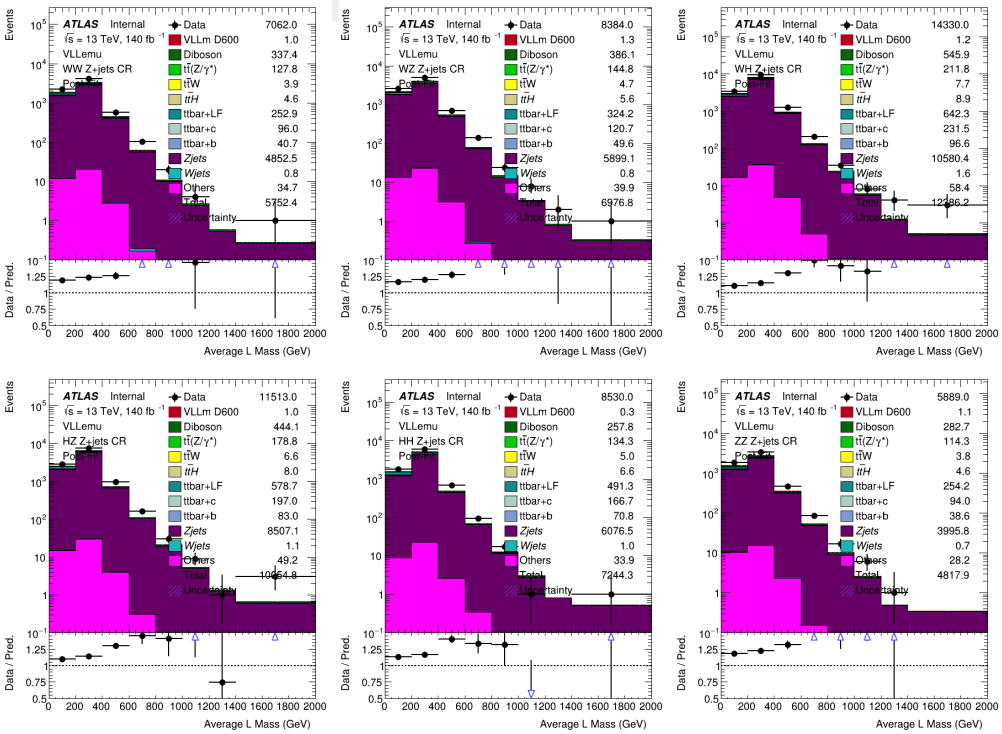
Şekil 5.9: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_e 2ℓ HZ(sol), HH(orta) ve ZZ(sağ) sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_e$ 200 GeV singlet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



Şekil 5.10: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_e 4ℓ ZZ sinyal bölgesinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_e 200 GeV singlet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.

5.3. Z+JETS KONTROL BÖLGESİ

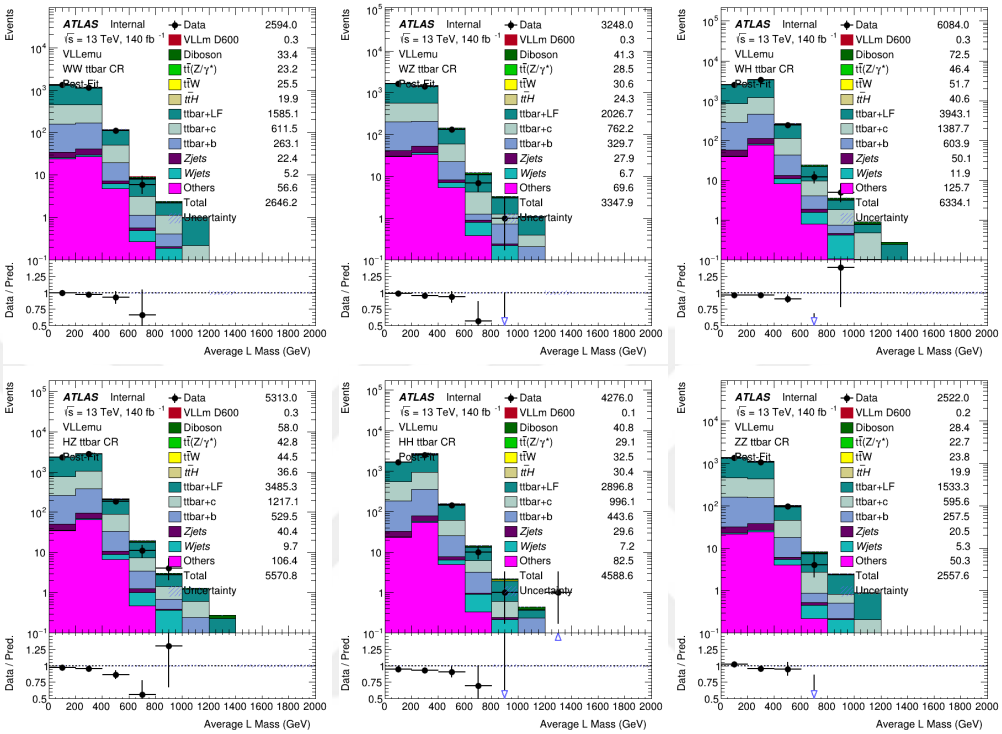
2ℓ kategorisi Z+jets kontrol bölgelerine ait mL_{ort} dağılımları Şekil 5.11'de gösterilmiştir. Yüksek kütlelerde Z+jets ardalan süreçlerinin iyi modellenememesinden kaynaklanan Veri/MC uyumsuzluğu mevcuttur. Bu durumun, Z+jets süreçlerine yeniden ağırlıklandırma uygulanarak uyumsuzlukların giderilmesi öngörülmektedir.



Şekil 5.11: İstatistiksel oturtma sonrası Z+jets kontrol bölgesinde sırasıyla WW, WZ, WH, HZ, HH ve ZZ bozunum modları için elde edilen mL_{ort} dağılımları.

5.4. $t\bar{t}$ KONTROL BÖLGESİ

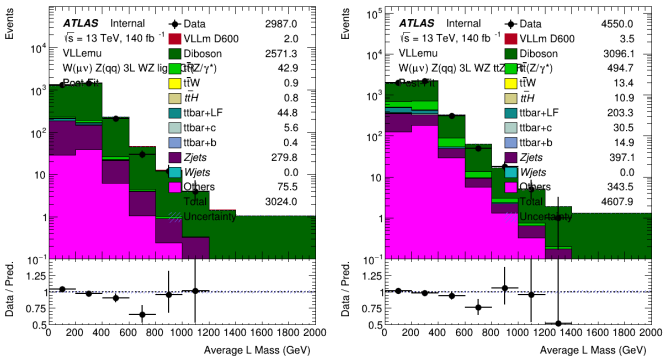
2ℓ kategorisi $t\bar{t}$ kontrol bölgesinde tüm bozunum modları için elde edilen mL_{ort} dağılımları Şekil 5.12'de gösterilmiştir.



Şekil 5.12: İstatistiksel oturtma sonrası $t\bar{t}$ kontrol bölgesinde sırasıyla WW, WZ, WH, HZ, HH ve ZZ bozunum modları için elde edilen mL_{ort} dağılımları.

5.5. WZ KONTROL BÖLGESİ

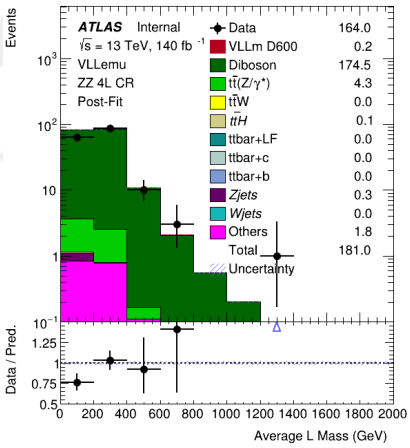
3ℓ WZ hafif çeşni ve WZ ağır çeşni kontrol bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları Şekil 5.13'te gösterilmiştir.



Şekil 5.13: İstatistiksel oturtma sonrası WZ hafif çeşni(sol) ve WZ ağır çeşni(sağ) kontrol bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları.

5.6. ZZ KONTROL BÖLGESİ

4ℓ ZZ kontrol bölgesinde elde edilen mL_{ort} kütle dağılımı Şekil 5.14'te verilmiştir.



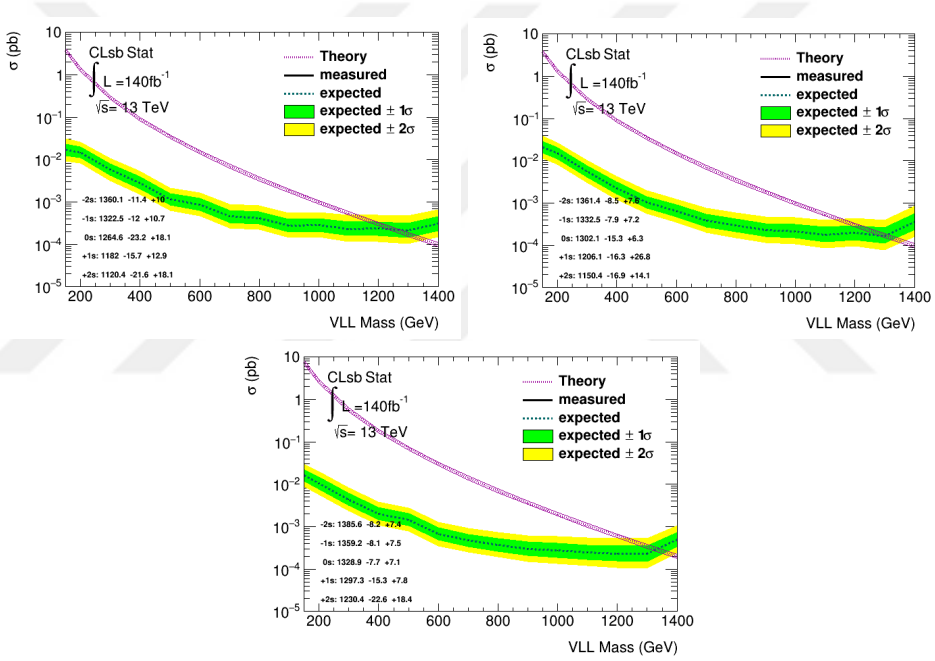
Şekil 5.14: İstatistiksel oturtma sonrası ZZ kontrol bölgesinde elde edilen mL_{ort} dağılımı.

5.7. BEKLENEN LİMİT

Bütün analiz seçimlerinin ardından VLL singlet ve VLL doublet için ayrı ayrı olmak üzere $\mu\mu$, ee ve elektron müon birleşik kanallar için %95 güvenilirlik seviyesinde beklenen dışarlama limitleri TRExFitter yazılım çerçevesi kullanılarak hesaplanmıştır. Ayırt edici değişken olarak mL_{ort} değişkeni kullanılmıştır.

5.7.1. VLL Dublet

Sistematik belirsizlikler olmaksızın, VLL dublet beklenen limitleri 2ℓ, 3ℓ ve 4ℓ kategorilerinde 10 VLL_μ ve 10 VLL_e olarak 20 farklı sinyal bölgesi ve 15 farklı kontrol bölgesi dahil edilerek hesaplanmış ve limit değerleri $\mu\mu$ kanalında $1264.6^{+18.1}_{-23.2}$ GeV, ee kanalında $1302.1^{+6.3}_{-15.3}$ GeV ve elektron müon birleşik kanalda $1328.9^{+7.1}_{-7.7}$ GeV'dir (Tablo 5.1). Şekil 5.15'te VLL kütlesinin bir fonksiyonu olarak VLL üretim tesir kesidi üzerindeki %95 güvenilirlik seviyesindeki VLL dublet beklenen limit değerleri gösterilmiştir.



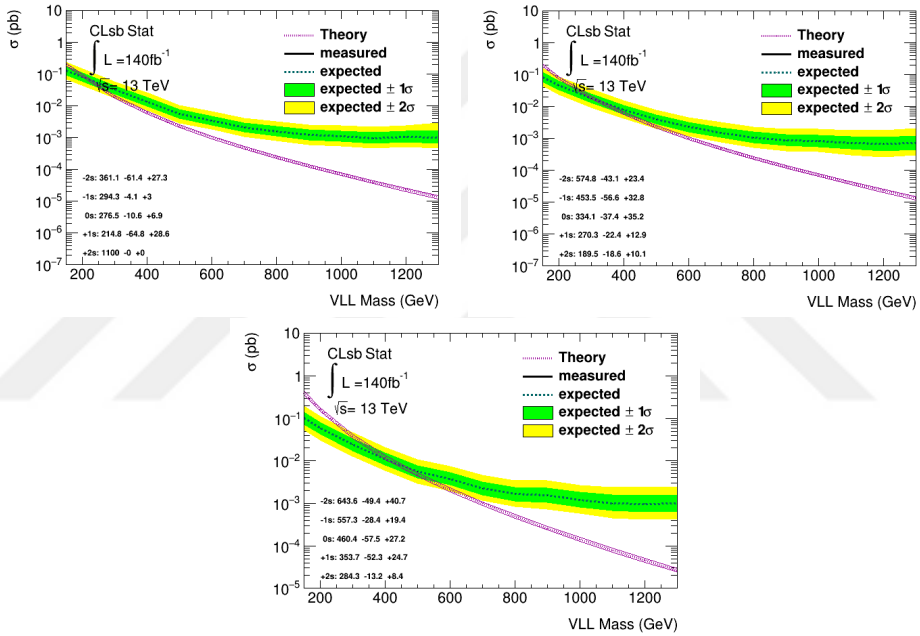
Şekil 5.15: İstatistik belirsizlikler dahil olmak üzere, %95 güvenilirlik seviyesinde beklenen limitler. $\mu\mu$ kanalı(sol-üst), ee kanalı(sağ-üst), elektron müon birleşik kanal(alt). Sistematik belirsizlikler dahil edilmemiştir.

Tablo 5.1: VLL dublet $\mu\mu$, ee ve elektron müon birleşik kanallar için beklenen limitler.

Ayırt edici değişken	$\mu\mu$ kanalı	ee kanalı	e+μ kanalı
mL_{ort}	$1264.6^{+18.1}_{-23.2}$ GeV	$1302.1^{+6.3}_{-15.3}$ GeV	$1328.9^{+7.1}_{-7.7}$ GeV

5.7.2. VLL Singlet

Sistematik belirsizlikler olmadan VLL singlet için beklenen limit, 2ℓ kategorisinde HZ, HH ve ZZ sinyal ve kontrol bölgeleri ve 4ℓ kategorisinde ZZ sinyal ve kontrol bölgeleri dahil edilerek hesaplanmış ve limit değerleri $\mu\mu$ kanalında $276.5^{+6.9}_{-10.6}$ GeV, ee kanalında $334.1^{+35.2}_{-37.4}$ GeV ve elektron müon birleşik kanalda $460.4^{+27.2}_{-57.5}$ GeV'dir (Tablo 5.2). Şekil 5.16'da VLL kütlesinin bir fonksiyonu olarak VLL üretim tesir kesidi üzerindeki %95 güvenilirlik seviyesindeki VLL singlet beklenen limit değerleri gösterilmiştir.



Şekil 5.16: İstatistik belirsizlikler dahil olmak üzere, %95 güvenilirlik seviyesinde beklenen limitler. $\mu\mu$ kanalı(sol-üst), ee kanalı(sağ-üst), elektron müon birleşik kanal(alt). Sistematik belirsizlikler dahil edilmemiştir.

Tablo 5.2: VLL singlet $\mu\mu$, ee ve elektron müon birleşik kanallar için beklenen limitler.

Ayırt edici değişken	$\mu\mu$ kanalı	ee kanalı	e+μ kanalı
mL_{ort}	$276.5^{+6.9}_{-10.6}$ GeV	$334.1^{+35.2}_{-37.4}$ GeV	$460.4^{+27.2}_{-57.5}$ GeV

6. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada, SU(2) singlet ve SU(2) dublet modeli tarafından öngörülen birinci ve ikinci aile SM leptonları ile çiftlenen vektör benzeri ağır leptonlar (VLL), ATLAS algıcı tarafından toplanan 140 fb^{-1} toplam ışınlılıktaki proton-proton çarpışma verisinde ADL/CutLang analiz çerçevesi kullanılarak VLL_{μ} ve VLL_{e} ayrı ayrı olmak üzere birçok farklı son durumda araştırılmıştır. ATLAS tarafından yapılan önceki çalışmada 139 fb^{-1} büyüklüğündeki veride yalnızca üçüncü aile dublet VLL'ler araştırılmış ve 130-900 GeV kütle aralığı %95 güvenilirlik seviyesinde dışarlanmıştır [10].

VLL'lerin son durumlarında 2ℓ, 3ℓ ve 4ℓ hafif yüklü lepton içeren farklı bozunum modları her bir sinyal kütle noktası ve Standart Model ardalanları kullanılarak χ^2 kütle optimizasyonu algoritması ile yeniden yapılandırılmış ve uygulanan olay seçimlerinin ardından sistematik belirsizlikler dahil edilmeden beklenen limit değerleri hesaplanmıştır. VLL singlet elektron ve müon ortak kanalı için beklenen limit değeri $460.4^{+27.2}_{-57.5}$ GeV, VLL dublet elektron ve müon ortak kanalı için $1328.9^{+7.1}_{-7.7}$ GeV olarak elde edilmiştir. Singlet limitlerin dublet limitlere göre daha düşük olmasının sebebi, singlet ve dublet üretim tesir kesitleri arasındaki farktan kaynaklanmaktadır. Beklenen limit hesabında Şekil 2.3'te gösterilen kuramsal tesir kesitleri kullanılmıştır. Sistematik belirsizliklerin dahil edildiği durumda beklenen limit değerlerinin yaklaşık 100 GeV'e kadar daha düşük çıkabileceği öngörülmektedir [36].

Bu tez çalışmasındaki bulgular, kuramsal ve deneysel sistematik belirsizliklerin dahil edilmesiyle genişletilecektir. Sistematik belirsizlik hesaplarının ve sinyal bölgeleri için gerçek verinin dahil edilmesiyle Standart Model'in öngörülerinden bir sapma görülmediği taktirde gözlenen limit değeri hesaplanıp, VLL singlet ve VLL dublet kütleleri üzerine %95 güvenilirlik seviyesinde dışarlama limiti konulacaktır.

KAYNAKLAR

[1]. ATLAS Collaboration, 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, Vol. 716, pp. 1-29

[2]. CMS Collaboration, 2012, *Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC*, Phys. Lett. B, Vol 716, pp. 30-61

[3]. Kumar, N., Martin, S. P., 2015, *Vectorlike leptons at the Large Hadron Collider*, Physical Review D 92

[4]. Unel, G. ve diğ., 2021, *CutLang V2: towards a unified Analysis Description Language*, Front. Big Data 4:659986

[5]. Gross, E., 2008, *LHC Statistics for Pedestrians*, `https://cds.cern.ch/record/1099994`, [Ziyaret Tarihi: 04.06.2024]

[6]. TRExFitter documentation, `https://trexfitter-docs.web.cern.ch/trexfitter-docs/`, [Ziyaret Tarihi: 19.01.2024]

[7]. Wikimedia Commons, Standard Model parçacıkları ve etkileşimleri, 2015, `https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SM_turkce.png`, [Ziyaret Tarihi: 07.06.2024]

[8]. Peskin, M.E. ve Shroeder, D. V., 1995, *An Introduction to Quantum Field Theory*, Frointers in Physics.

[9]. CMS Collaboration, 2019, Search for vectorlike leptons in multilepton final states in proton-proton collisions at $\sqrt{s}$= 13 TeV, Physical Review D, Vol. 100

[10]. ATLAS Collaboration, 2023, *Search for third-generation vector-like leptons in pp collisions at $\sqrt{s}$= 13 TeV with the ATLAS detector*, Journal of High Energy Physics, Vol. 2023, no. 7

[11]. CERN, *CERN Annual Report 2022*, 2023, `https://cds.cern.ch/record/2857560`

[12]. Brüning, O. S., P. Collier, P. Lebrun, S. Myers, R. Ostojic, J. Poole and P. Proudlock, LHC Design Report, CERN Yellow Reports: Monographs, CERN, Geneva, 2004, `https://cds.cern.ch/record/782076`

[13]. Landua, F., The CERN accelerator complex layout in 2022, Complexe des accélérateurs du CERN en janvier 2022, CERN, 2022, `https://cds.cern.ch/record/2813716`

[14]. Public ATLAS Luminosity Results for Run-2 of the LHC, `https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/LuminosityPublicResultsRun2`, [Ziyaret Tarihi: 03.06.2024]

[15]. Joao Pequenao, Computer generated image of the whole ATLAS detector, 2008, https://cds.cern.ch/record/1095924, [Ziyaret Tarihi: 27.05.2024]

[16]. ATLAS Magnet System, https://atlas-magnet-dfs.web.cern.ch, [Ziyaret Tarihi: 07.06.2024]

[17]. Wikimedia Commons, Pseudorapidity, 2007, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pseudorapidity2.png, [Ziyaret Tarihi: 07.06.2024]

[18]. ATLAS Collaboration, 1997, *ATLAS inner detector: Technical Design Report, 1*, https://cds.cern.ch/record/331063

[19]. Joao Pequenao, 2008, *Computer generated image of the ATLAS inner detector*, https://cds.cern.ch/record/1095926, [Ziyaret Tarihi: 27.05.2024]

[20]. ATLAS Collaboration, 2017, Technical Design Report for the ATLAS Inner Tracker Piksel Detector, CERN-LHCC-2017-021, ATLAS-TDR-030, https://cds.cern.ch/record/2285585, [Ziyaret Tarihi: 03.06.2024]

[21]. Ahmad, A. ve diğ., 2007, *The Silicon Microstrip Sensors of the ATLAS SemiConductor Tracker*, Nucl. Instrum. Meth., Vol. A578, pp. 98-118

[22]. Fratina, S., Klinkby, E., 2010, *The Geometry of the ATLAS Transition Radiation Tracker*, ATL-COM-INDET-2010-002, https://cds.cern.ch/record/1232064, [Ziyaret Tarihi: 27.05.2024]

[23]. Aaboud, M. ve diğ., 2017, *Performance of the ATLAS Transition Radiation Tracker inRun 1 of the LHC: tracker properties.*, JINST, Vol 12.

[24]. Joao Pequenao, 2008, *Computer Generated image of the ATLAS calorimeter*, https://cds.cern.ch/record/1095927, [Ziyaret Tarihi: 27.05.2024]

[25]. Spalla, M., 2020, ATLAS LAr Calorimeter Performance in LHC Run 2, ATL-LARG-PROC-2020-001, https://cds.cern.ch/record/2707741, [Ziyaret Tarihi: 27.05.2024]

[26]. ATLAS Collaboration, 1997, *ATLAS muon spectrometer: Technical Design Report*, Technical design report. ATLAS.

[27]. Alwall, J. ve diğ., 2014, *The automated computation of tree-level and next-to-leading order differential cross sections, and their matching to parton shower simulations*, Journal of High Energy Physics, 2014(7), 79

[28]. Sjöstrand, T., Mrenna, S., Skands, P., 2008, *A brief introduction to PYTHIA 8.1*, Computer Physics Communications, Vol 11.

[29]. ATLAS Collaboration, 2010, *The ATLAS Simulation Infrastructure*, The European Physical Journal C, Vol. 70

[30]. Frixione, S., Nason, P., Ridolfi, G., 2007, *A positive-weight next-to-leading-order Monte Carlo for heavy flavour hadroproduction*, Journal of High Energy Physics 09

[31]. Re, E., 2007, *Single-top Wt-channel production matched with parton showers using the POWHEG method*, The European Physical Journal C, Vol. 71

[32]. Ball, R. D., ve diğ., 2015, *Parton distributions for the LHC run II*, Journal of High Energy Physics, 04

[33]. ATLAS Collaboration, 2016, *Electron efficiency measurements with the ATLAS detector using the 2015 LHC proton–proton collision data*, ATLAS-CONF-2016-024, `https://cds.cern.ch/record/2157687`

[34]. ATLAS Collaboration, 2014, *Measurement of the muon reconstruction performance of the ATLAS detector using 2011 and 2012 LHC proton–proton collision data*, The European Physical Journal C, 74, 3130

[35]. Gaiser, J. E., 1982, *Charmonium Spectroscopy From Radiative Decays of the J/ψ and ψ'*, SLAC-0255

[36]. Ağaras, M. ve diğ., 2024, *Search for vector-like leptons coupling to first and second generation Standard Model leptons in multilepton final states in pp collisions at 13 TeV with the ATLAS detector*, `https://cds.cern.ch/record/2878570`, [Ziyaret Tarihi: 01.04.2024]

[37]. Cacciari, M., Salam, G. P., Soyez, G., 2008, *The anti-ktjet clustering algorithm*, Journal of High Energy Physics, 04, 63.

[38]. JetVertexTagger for Run-2 in reco and analysis, `https://twiki.cern.ch/twiki/bin/viewauth/AtlasProtected/JetVertexTaggerTool`, [Ziyaret Tarihi: 28.05.2024]

[39]. ATLAS, 2015, *Performance of missing transverse momentum reconstructionfor the ATLAS detector in the first proton-protoncollisions at $\sqrt{s}$= 13 TeV*, ATL-PHYS-PUB-2015-027

[40]. Particle Data Group, 2024, *Particle Listings*, `https://pdg.lbl.gov/2024/listings/contents_listings.html`, [Ziyaret Tarihi: 07.06.2024]

[41]. Brun, R., ve Rademakers, F., 1996, *ROOT - An Object Oriented Data Analysis Framework*, Proceedings AIHENP'96 Workshop, Lausanne Nucl. Inst. Meth. in Phys. Res. A 389 (1997) 81-86.

[42]. Cranmer, K., ve diğ., 2012, *HistFactory: A tool for creating statistical models for use with RooFit and RooStats*, CERN-OPEN-2012-016.

[43]. Verkerke, W. ve Kirkby, D., *Roofit Users Manual*, `https://roofit.sourceforge.net`, [Ziyaret Tarihi: 07.06.2024]

[44]. Cowan, G. ve diğ., 2011, *Asymptotic formulae for likelihood-based tests of new physics*, The European Physical Journal C, Vol 71.

[45]. *Index of /Atlas/GROUPS/DATABASE/GroupData/GoodRunsLists*, `https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/DATABASE/GroupData/GoodRunsLists/`, [Ziyaret Tarihi: 03.06.2024]

EKLER

EK 1. Çarpışma verisi, Sinyal ve Ardalan Monte Carlo Örnekleri

EK 1.1. Veri

BHÇ Run2 süresince ATLAS tarafından kaydedilen iyi runların listesi [45] aşağıda sırasıyla gösterilmiştir:

2015 yılına ait iyi runların numaraları: 284484, 284427, 284420, 284285, 284213, 284154, 284006, 283780, 283608, 283429, 283270, 283155, 283074, 282992, 282784, 282712, 282631, 282625, 281411, 281385, 281317, 281075, 281074, 281070, 280977, 280950, 280862, 280853, 280753, 280673, 280614, 280520, 280500, 280464, 280423, 280368, 280319, 280273, 280231, 279984, 279932, 279928, 279867, 279813, 279764, 279685, 279598, 279515, 279345, 279284, 279279, 279259, 279169, 278968, 278912, 278880, 276954, 276952, 276790, 276778, 276689, 276511, 276416, 276336, 276329, 276262

2016 yılına ait iyi runların numaraları: 311481, 311473, 311402, 311365, 311321, 311287, 311244, 311170, 311071, 310969, 310872, 310863, 310809, 310738, 310691, 310634, 310473, 310468, 310405, 310370, 310341, 310249, 310247, 310015, 309759, 309674, 309640, 309516, 309440, 309390, 309375, 308084, 308047, 307935, 307861, 307732, 307716, 307710, 307656, 307619, 307601, 307569, 307539, 307514, 307454, 307394, 307358, 307354, 307306, 307259, 307195, 307126, 306451, 306448, 306442, 306419, 306384, 306310, 306278, 306269, 305920, 305811, 305777, 305735, 305727, 305723, 305674, 305671, 305618, 305571, 305543, 305380, 304494, 304431, 304409, 304337, 304308, 304243, 304211, 304198, 304178, 304128, 304008, 304006, 303943, 303892, 303846, 303832, 303638, 303560, 303499, 303421, 303338, 303304, 303291, 303266, 303264, 303208, 303201, 303079, 303007, 302956, 302925, 302919, 302872, 302831, 302737, 302393, 302391, 302380, 302347, 302300, 302269, 302265, 302137, 302053, 301973, 301932, 301918, 301915, 301912, 300908, 300863, 300800, 300784, 300687, 300655, 300600, 300571, 300540, 300487, 300418, 300415, 300345, 300279, 299584, 299243, 299184, 299147, 299144, 299055, 298967, 298862, 298773, 298771, 298690, 298687, 298633, 298609, 298595, 297730

2017 yılına ait iyi runların numaraları: 340453, 340368, 340072, 340030, 339957, 339849, 339758, 339590, 339562, 339535, 339500, 339435, 339396, 339387, 339346, 339205, 339070, 339037, 338987, 338967, 338933, 338897, 338846, 338834, 338767, 338712, 338675, 338608, 338498, 338480, 338377, 338349, 338263, 338259, 338220, 338183, 337833, 337705, 337662, 337542, 337491, 337451, 337404, 337371, 337335, 337263, 337215, 337176, 337156, 337107, 337052, 337005, 336998, 336944, 336927, 336915, 336852, 336832, 336782, 336719, 336678, 336630, 336567, 336548, 336506, 335290, 335282, 335222, 335177, 335170, 335131, 335083, 335082, 335056, 335022, 335016, 334993, 334960, 334907, 334890, 334878, 334849, 334842, 334779, 334737, 334678, 334637, 334588, 334580, 334564, 334487, 334455, 334443, 334413, 334384, 334350, 334317, 334264, 333994, 333979, 333904, 333853, 333828, 333778, 333707, 333650, 333519, 333487, 333469, 333426, 333380, 333367, 333192, 333181, 332955, 332953, 332915, 332896, 332720, 332304, 332303, 331975, 331951, 331905, 331875, 331860, 331825, 331804, 331772, 331742, 331710, 331697, 331239, 331215, 331129, 331085, 331082, 331033, 330470, 330294, 330203, 330166, 330160, 330101, 330079, 330074, 330025, 329964, 329869, 329835, 329829, 329780, 329778, 329716, 328393, 328374, 328333, 328263, 328221, 328099, 328042, 327862, 327860, 327764, 327761, 327745, 327662, 327636, 327582, 327490, 327342, 327265, 327103, 327057, 326945, 326923, 326870, 326834, 326695, 326657, 326551, 326468, 326446, 326439, 325790, 325713

2018 yılına ait iyi runların numaraları: 364292, 364214, 364160, 364098, 364076, 364030, 363979, 363947, 363910, 363830, 363738, 363710, 363664, 363400, 363262, 363198, 363129, 363096, 363033, 362776, 362661, 362619, 362552, 362445, 362388, 362354, 362345, 362297, 362204, 361862, 361795, 361738, 360402, 360373, 360348, 360309, 360293, 360244, 360209, 360161, 360129, 360063, 360026, 359918, 359872, 359823, 359766, 359735, 359717, 359678, 359677, 359623, 359593, 359586, 359541, 359472, 359441, 359398, 359355, 359310, 359286, 359279, 359191, 359171, 359170, 359124, 359058, 359010, 358985, 358656, 358615, 358577, 358541, 358516, 358395, 358333, 358325, 358300, 358233, 358215, 358175, 358115, 358096, 358031, 357962, 357887, 357821, 357772, 357750, 357713, 357679, 357620, 357539, 357500, 357451, 357409, 357355, 357293, 357283, 357193, 356259, 356250, 356205, 356177, 356124, 356095, 356077, 355995, 355877, 355861, 355848, 355754, 355651, 355650, 355599, 355563, 355544, 355529, 355273, 355261, 352514, 352494, 352448, 352436, 352394, 352340,

352274, 352107, 352056, 351969, 351894, 351832, 351698, 351671, 351636, 351628, 351550, 351455, 351364, 351359, 351325, 351296, 351223, 351160, 351062, 350923, 350880, 350848, 350842, 350803, 350751, 350749, 350682, 350531, 350479, 350440, 350361, 350310, 350220, 350184, 350160, 350144, 350121, 350067, 350013, 349977, 349944, 349842, 349841, 349693, 349646, 349637, 349592, 349582, 349534, 349533, 349526, 349498, 349481, 349451, 349335, 349327, 349309, 349268, 349169, 349114, 349111, 349051, 349033, 349014, 349011, 348895, 348894, 348885

EK 1.2. Sinyal

VLL singlet ve dublet sinyallerinin DSID'leri her bir kütle noktası için sırasıyla aşağıda verilmiştir:

VLL_{μ} dublet: 512097, 512098, 512099, 512100, 512101, 512102, 512103, 512104, 512105, 512106, 512107, 512108, 512109, 523768

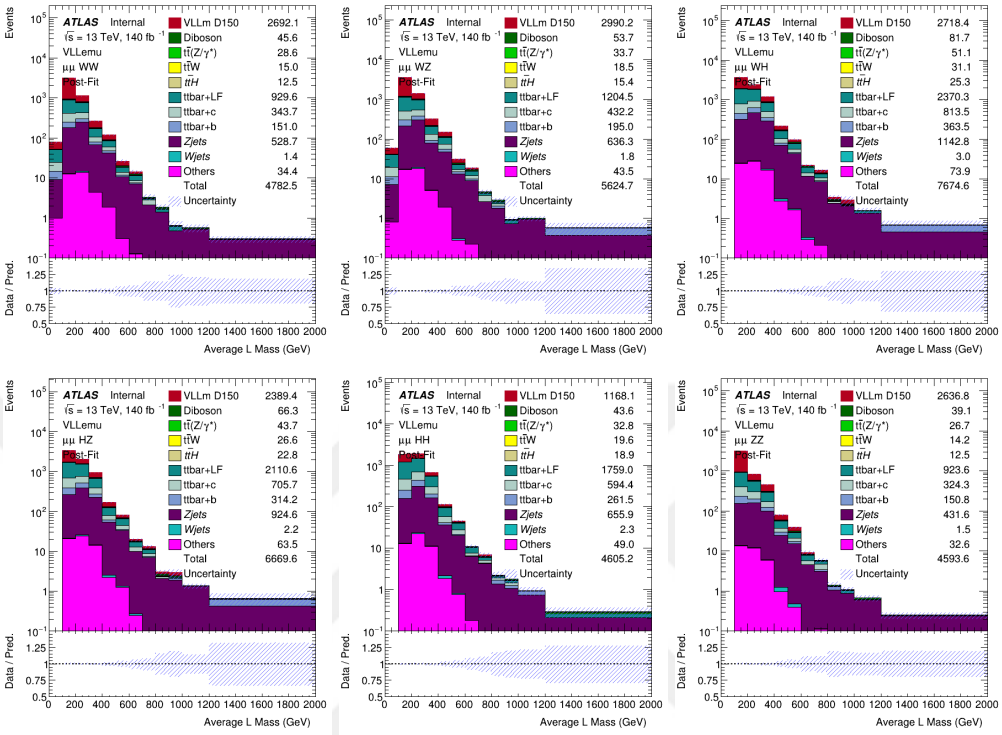
VLL_{μ} singlet: 512110, 512111, 512112, 512113, 512114, 512115, 512116, 512117, 512118, 512119, 512120, 512121, 512122

VLL_{e} dublet: 512071, 512072, 512073, 512074, 512075, 512076, 512077, 512078, 512079, 512080, 512081, 512082, 512083, 523766

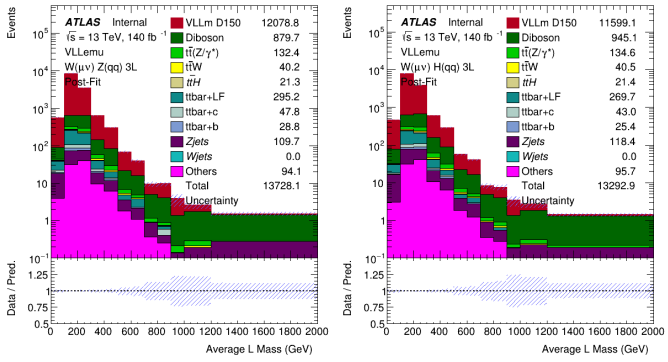
VLL_{e} singlet: 512084, 512085, 512086, 512087, 512088, 512089, 512090, 512091, 512092, 512093, 512094, 512095, 512096

EK 2. Diğer Kütle Noktaları için VLL kütle dağılımları

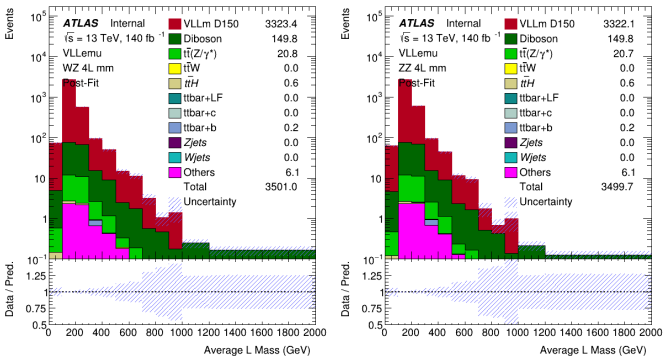
EK 2.1. VLL_μ Dublet



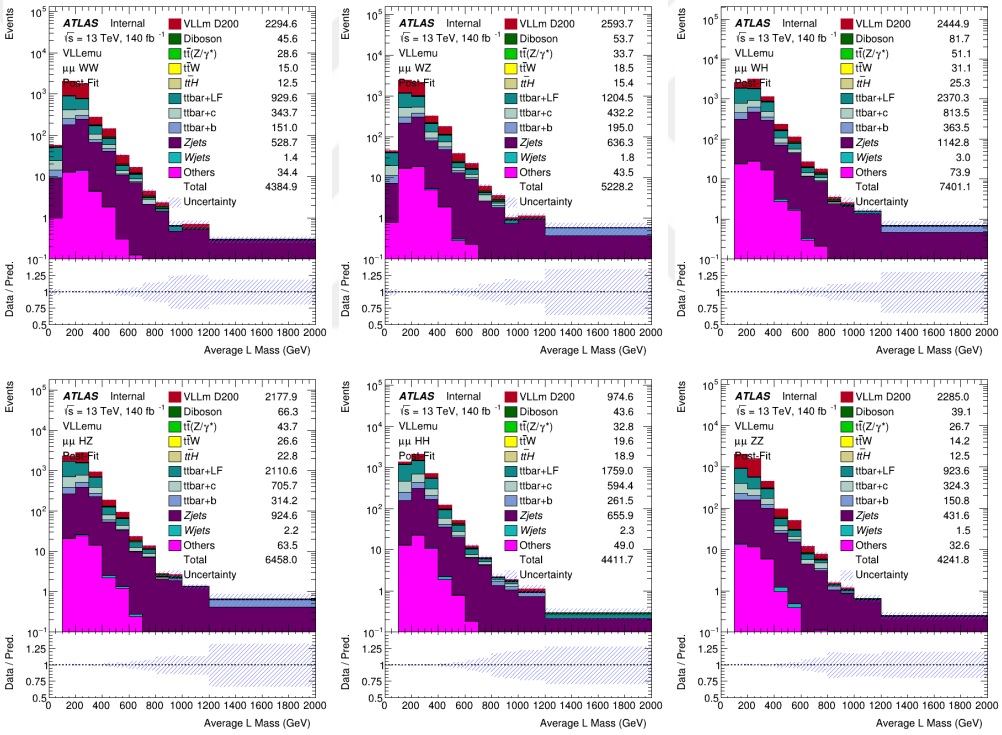
Şekil EK 2.1: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_μ 2ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_μ 150 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



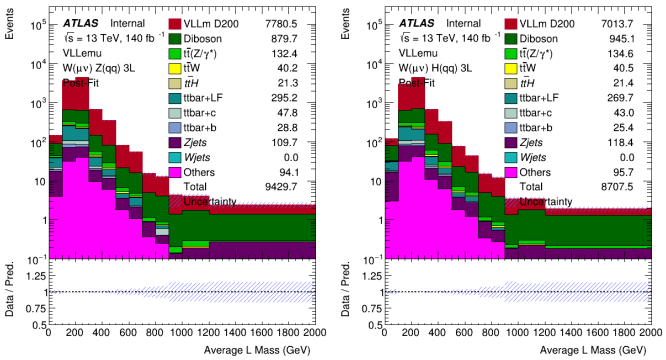
Şekil EK 2.2: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_μ 3ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_μ 150 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



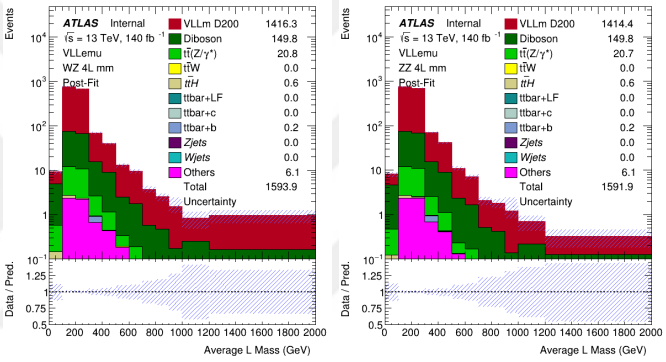
Şekil EK 2.3: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_μ 4ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_μ 150 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



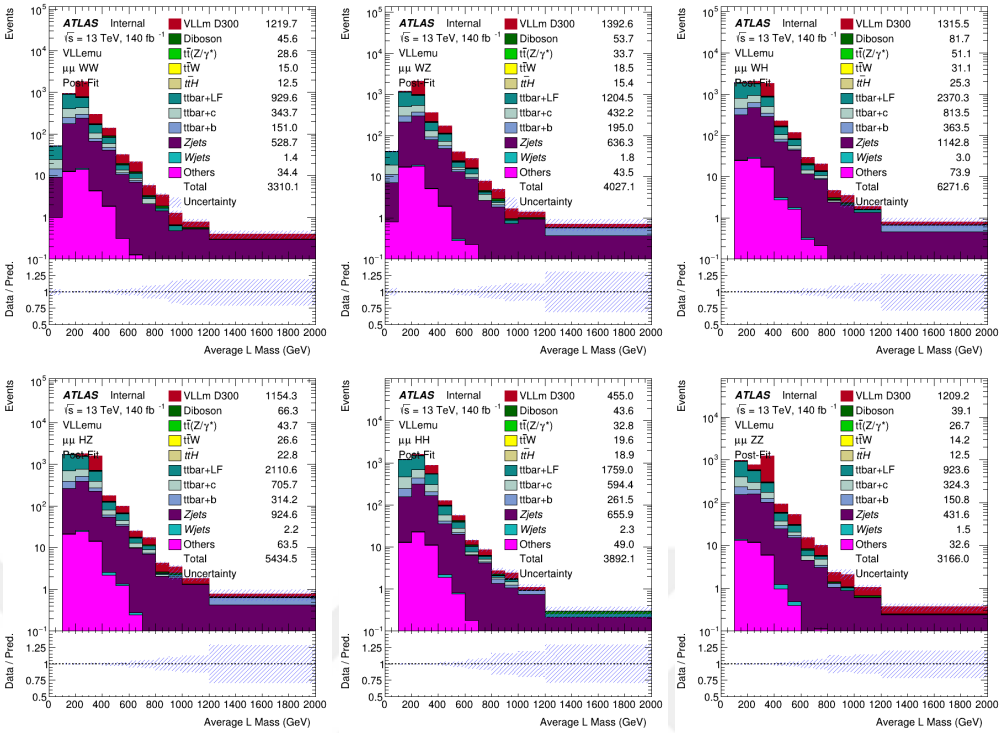
Şekil EK 2.4: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_μ 2ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_μ 200 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



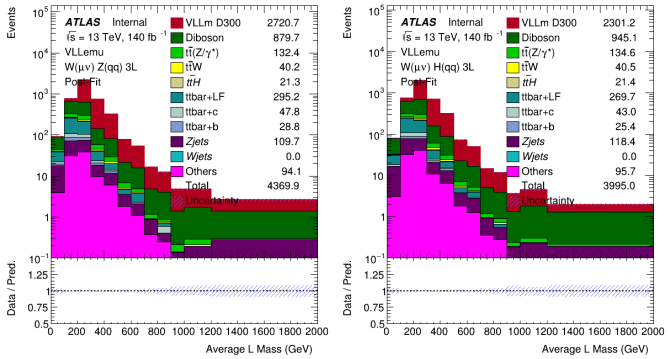
Şekil EK 2.5: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_μ 3ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_μ 200 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



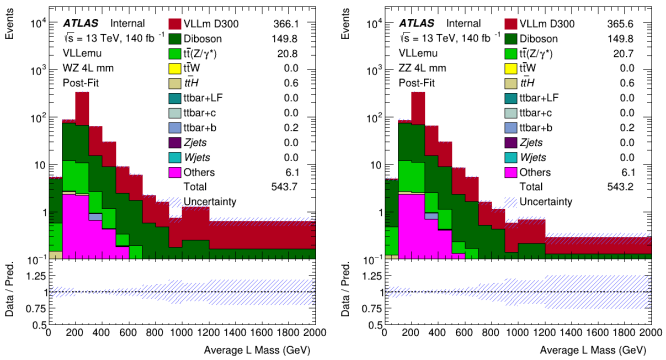
Şekil EK 2.6: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_μ 4ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_μ 200 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



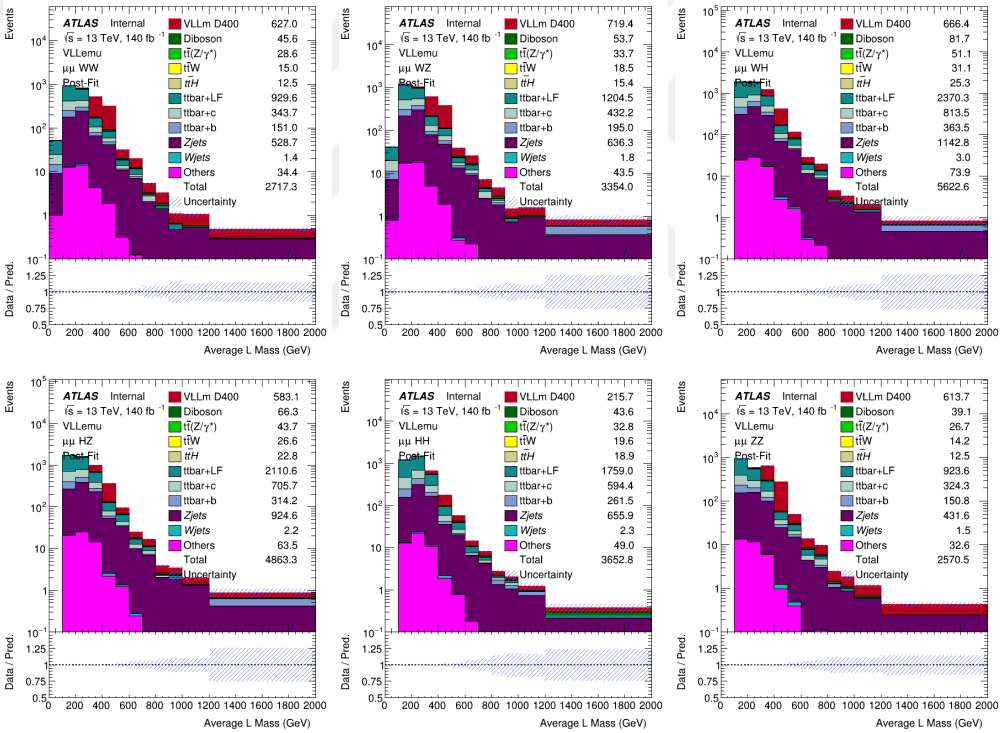
Şekil EK 2.7: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_μ 2ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_μ 300 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



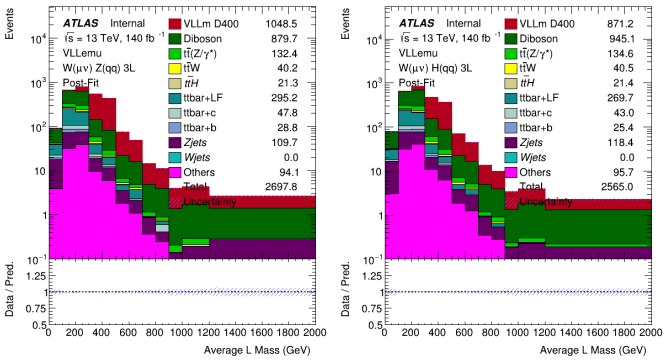
Şekil EK 2.8: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_μ 3ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_μ 300 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



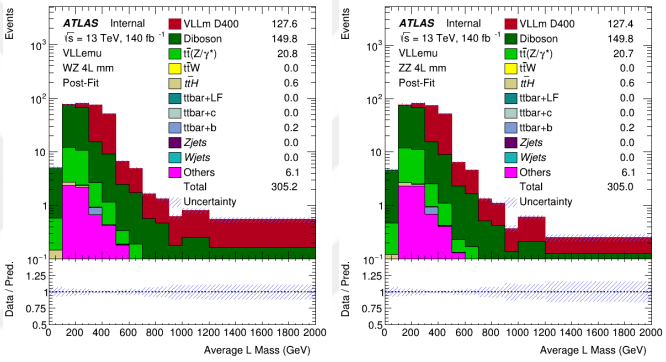
Şekil EK 2.9: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_μ 4ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_μ 300 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



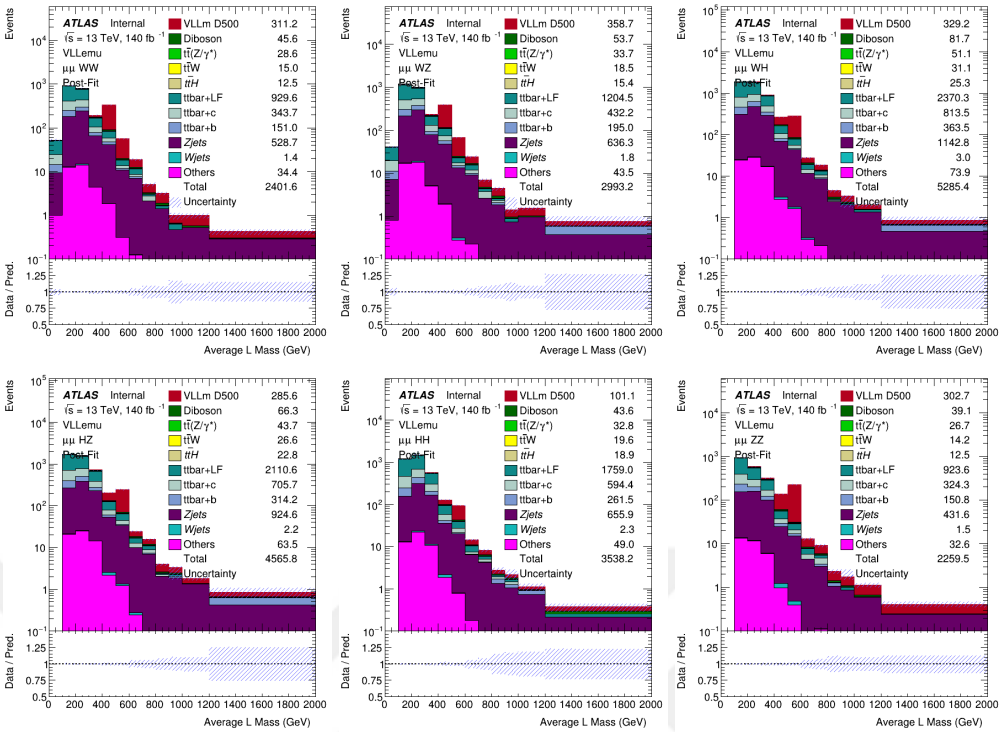
Şekil EK 2.10: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_μ 2ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_μ 400 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



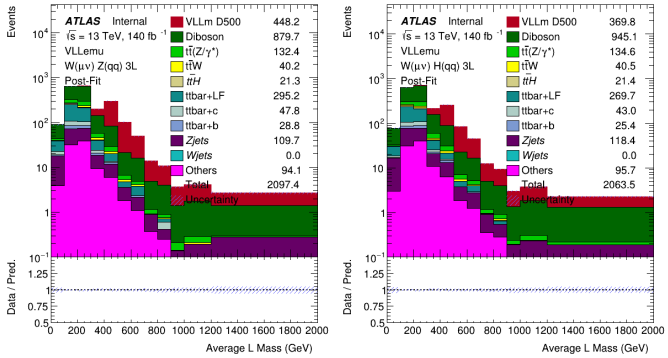
Şekil EK 2.11: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_μ 3ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_μ 400 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



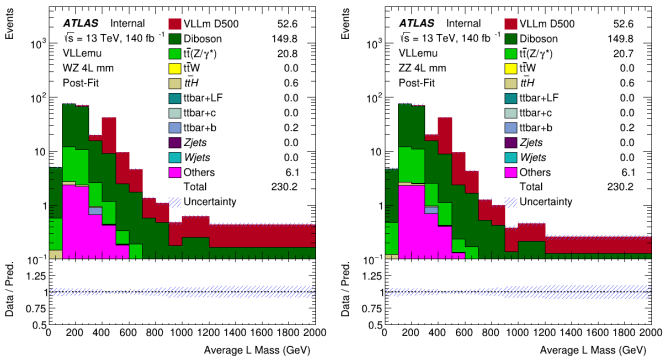
Şekil EK 2.12: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_μ 4ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_μ 400 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



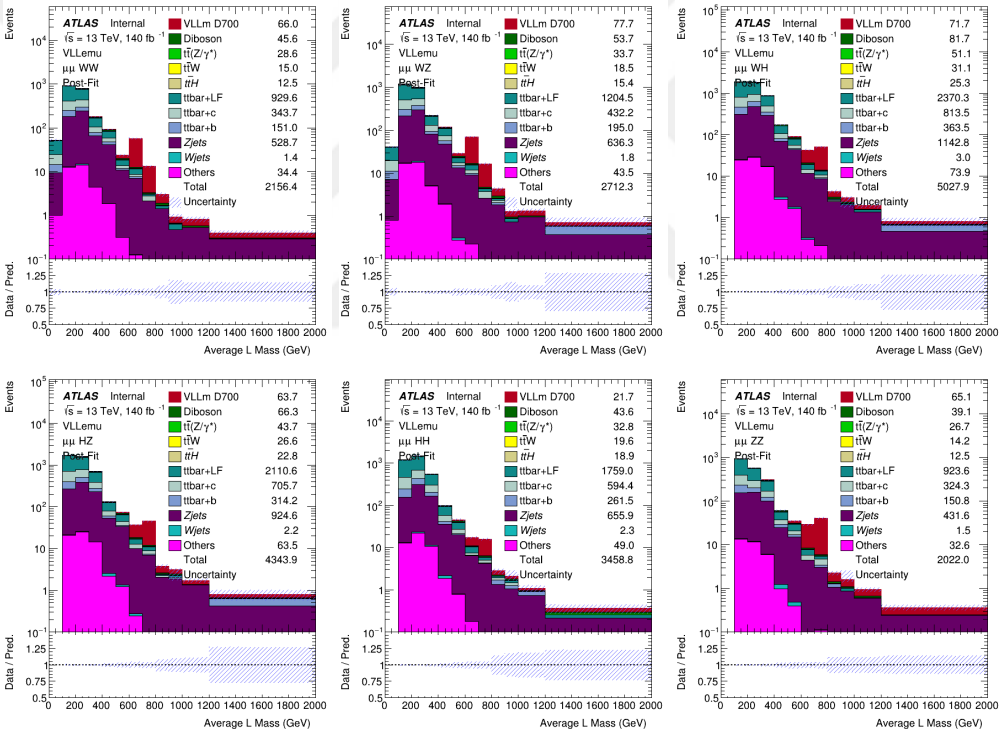
Şekil EK 2.13: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_μ 2ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_μ 500 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



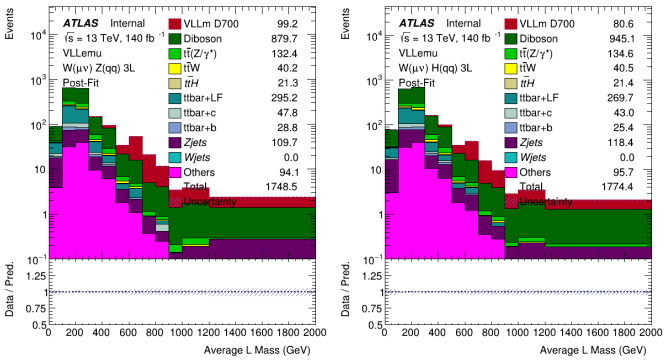
Şekil EK 2.14: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_μ 3ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_μ 500 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



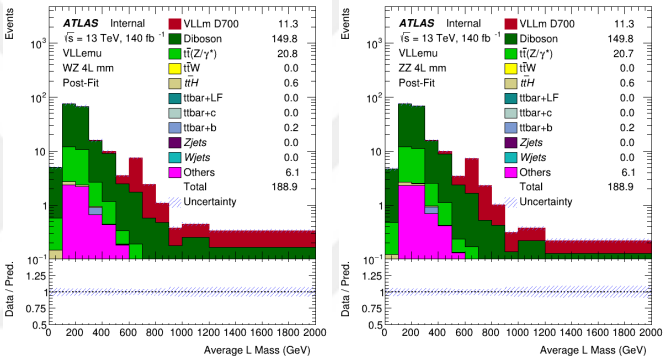
Şekil EK 2.15: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_{μ} 4ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_{μ} 500 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



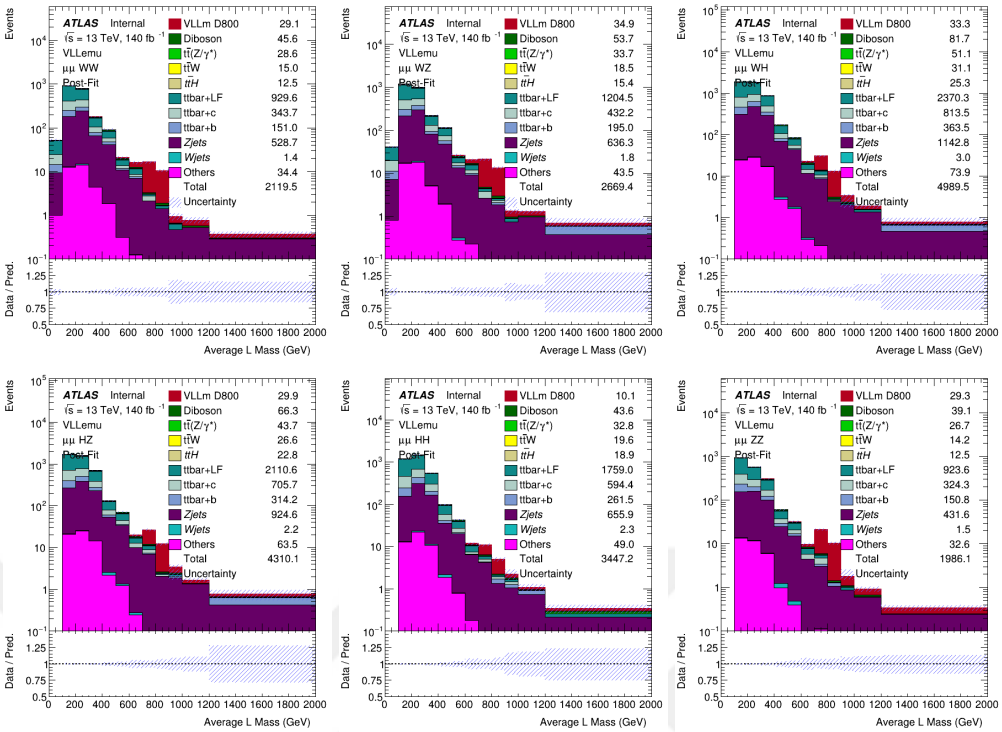
Şekil EK 2.16: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_{μ} 2ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_{μ} 700 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



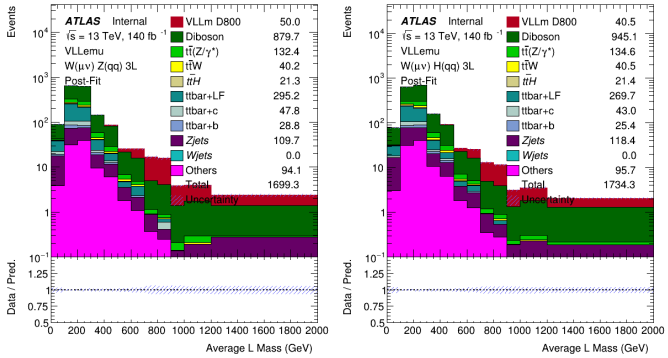
Şekil EK 2.17: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_μ 3ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_μ 700 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



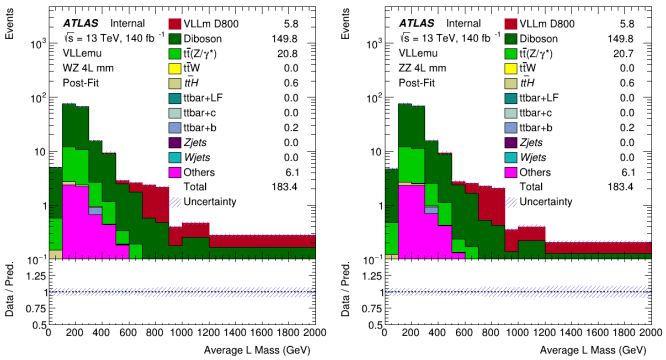
Şekil EK 2.18: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_μ 4ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_μ 700 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



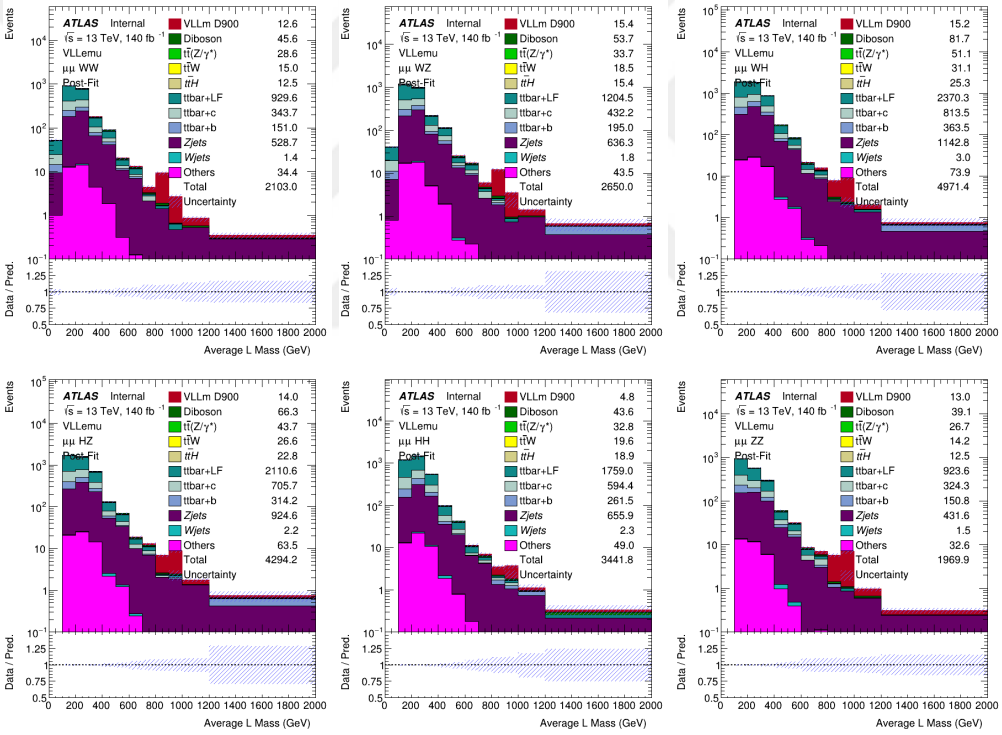
Şekil EK 2.19: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_μ 2ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_μ 800 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



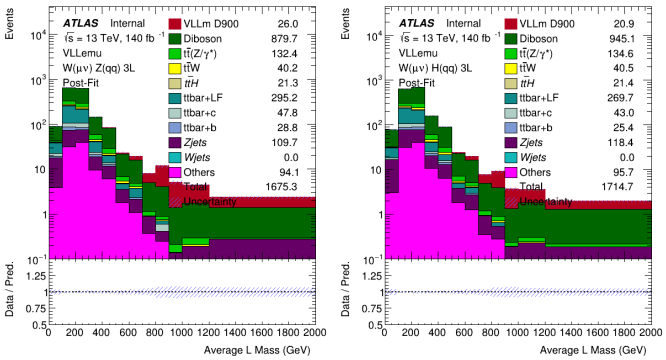
Şekil EK 2.20: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_μ 3ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_μ 800 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



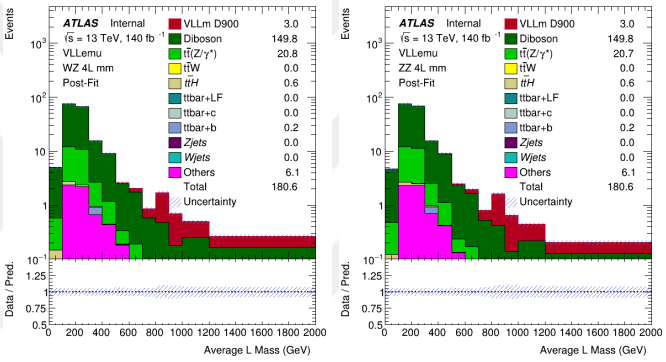
Şekil EK 2.21: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_{μ} 4ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_{μ} 800 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



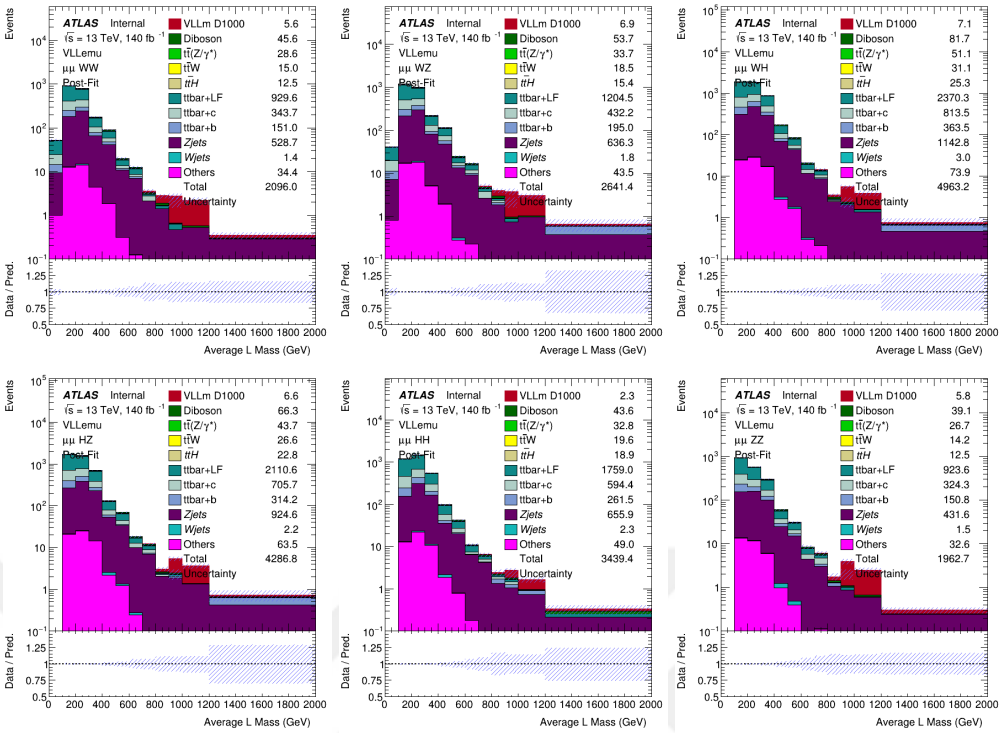
Şekil EK 2.22: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_{μ} 2ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_{μ} 900 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



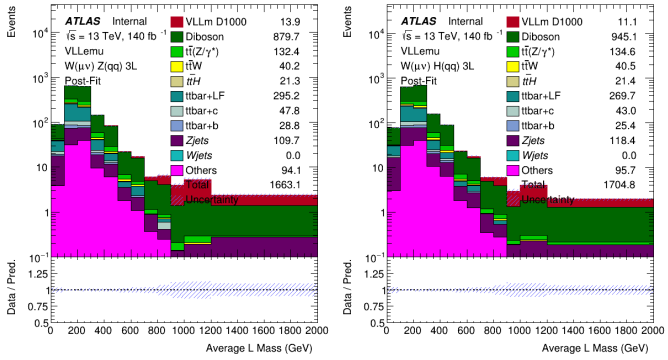
Şekil EK 2.23: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_{μ} 3ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_{μ} 900 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



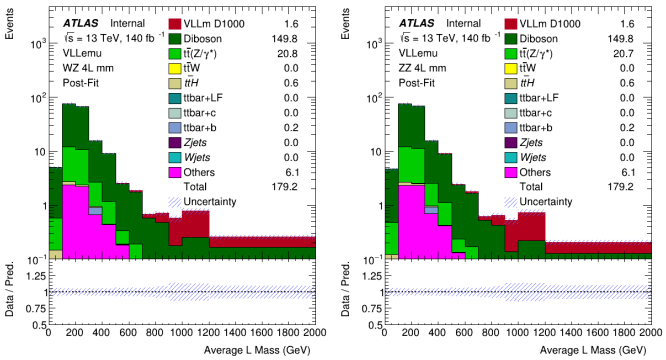
Şekil EK 2.24: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_{μ} 4ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_{μ} 900 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



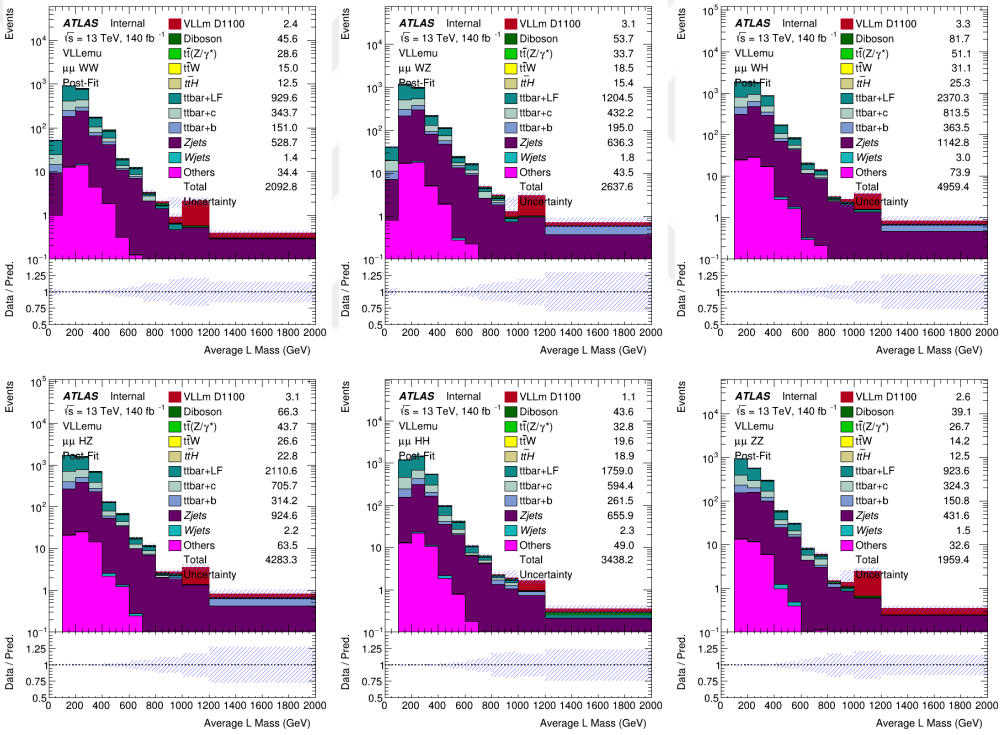
Şekil EK 2.25: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_μ 2ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_μ 1000 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



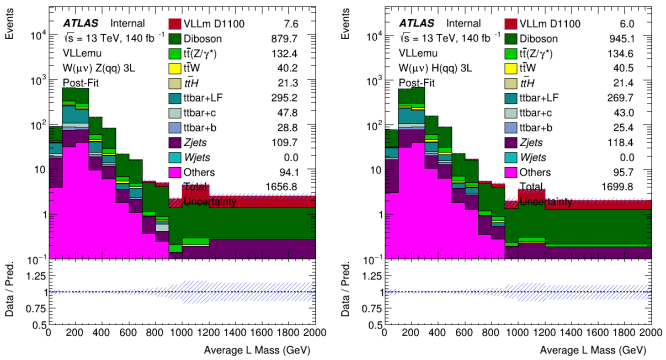
Şekil EK 2.26: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_μ 3ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_μ 1000 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



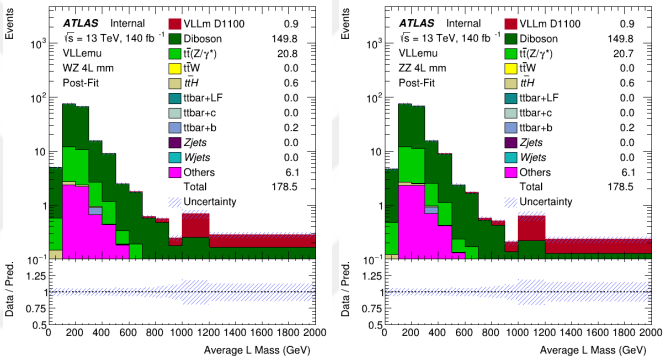
Şekil EK 2.27: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_{μ} 4ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_{μ} 1000 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



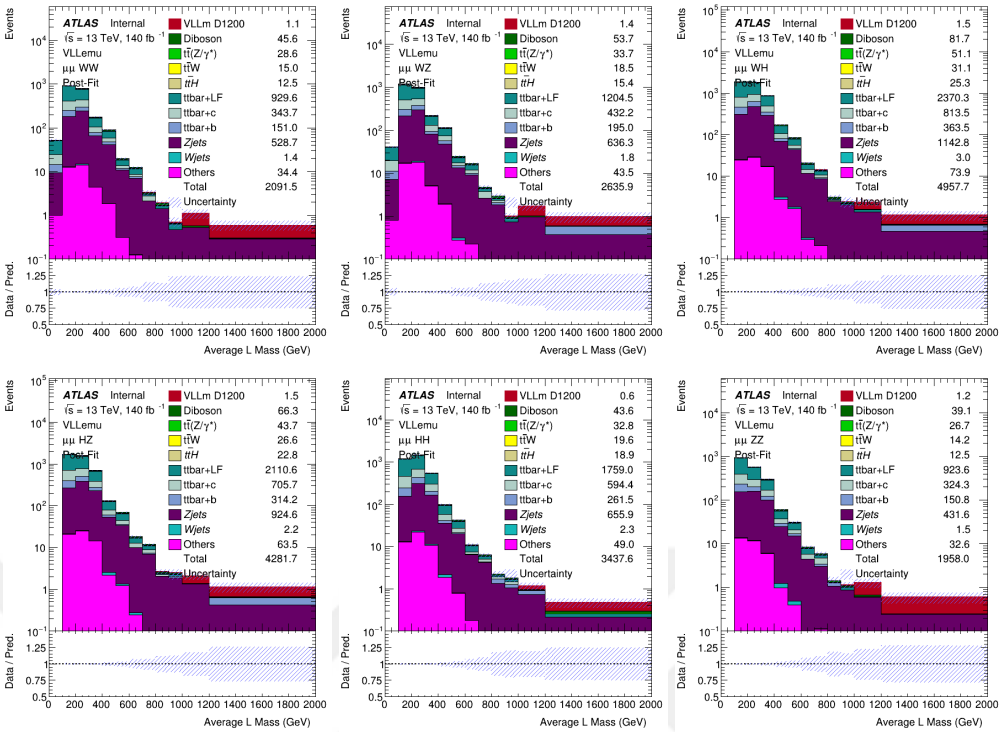
Şekil EK 2.28: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_{μ} 2ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_{μ} 1100 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



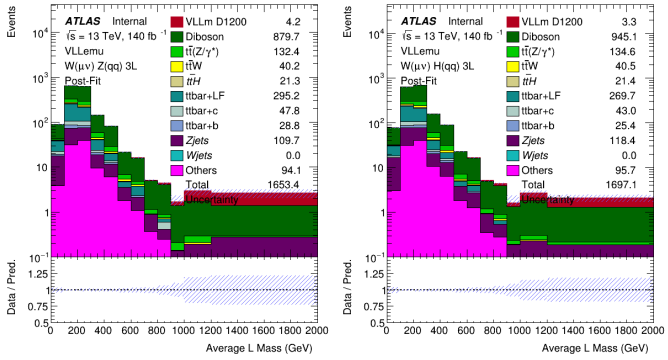
Şekil EK 2.29İstatistiksel oturtma sonrası VLL_μ 3ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_μ 1100 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



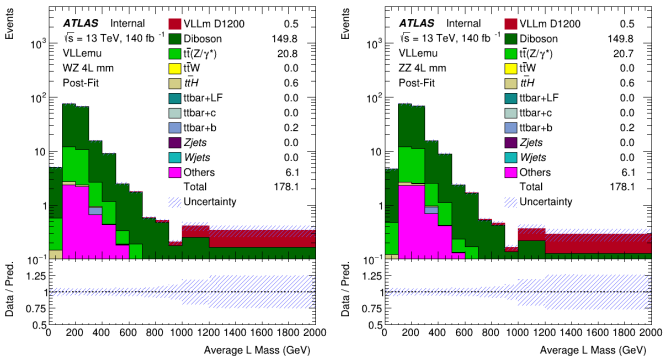
Şekil EK 2.30: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_μ 4ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_μ 1100 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



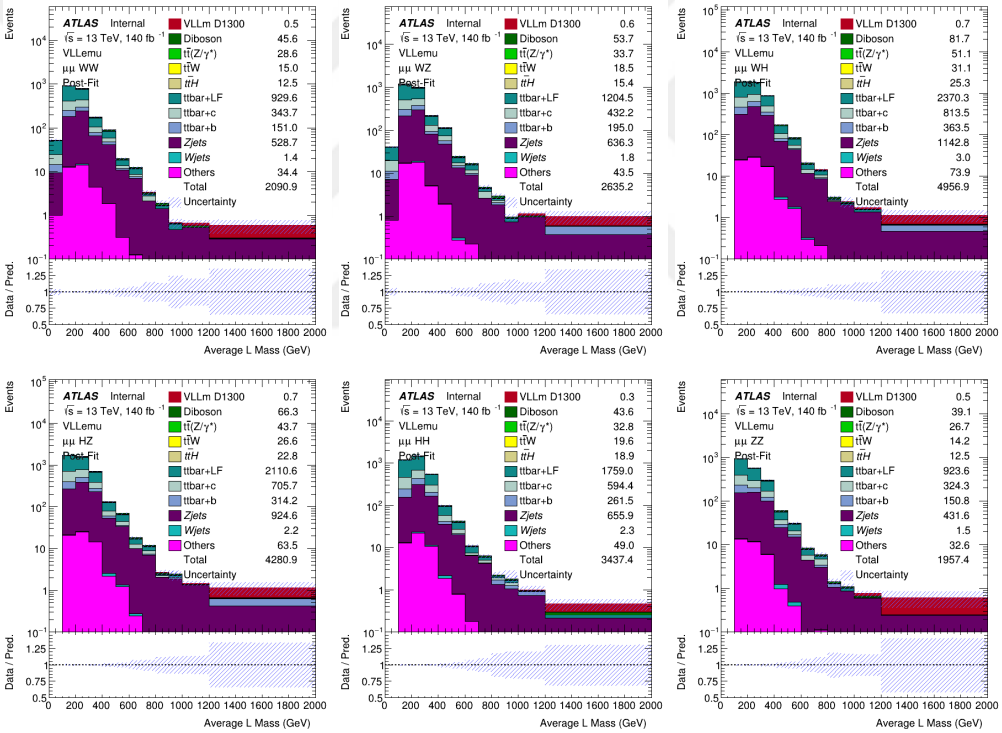
Şekil EK 2.31: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_μ 2ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_μ 1200 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



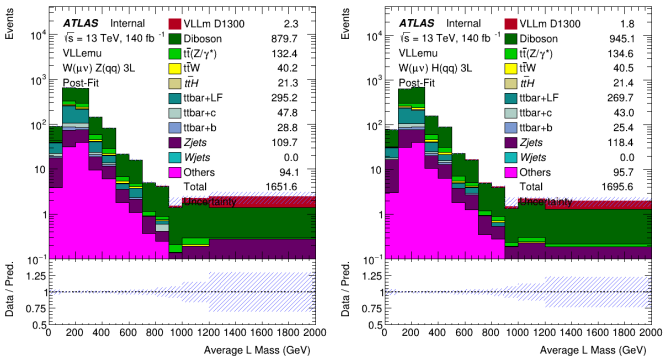
Şekil EK 2.32: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_μ 3ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_μ 1200 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



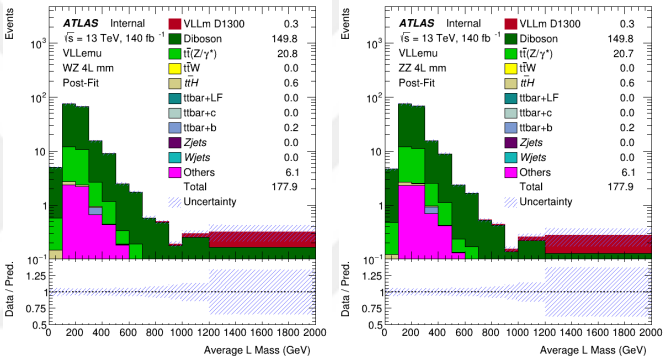
Şekil EK 2.33: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_μ 4ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_μ 1200 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



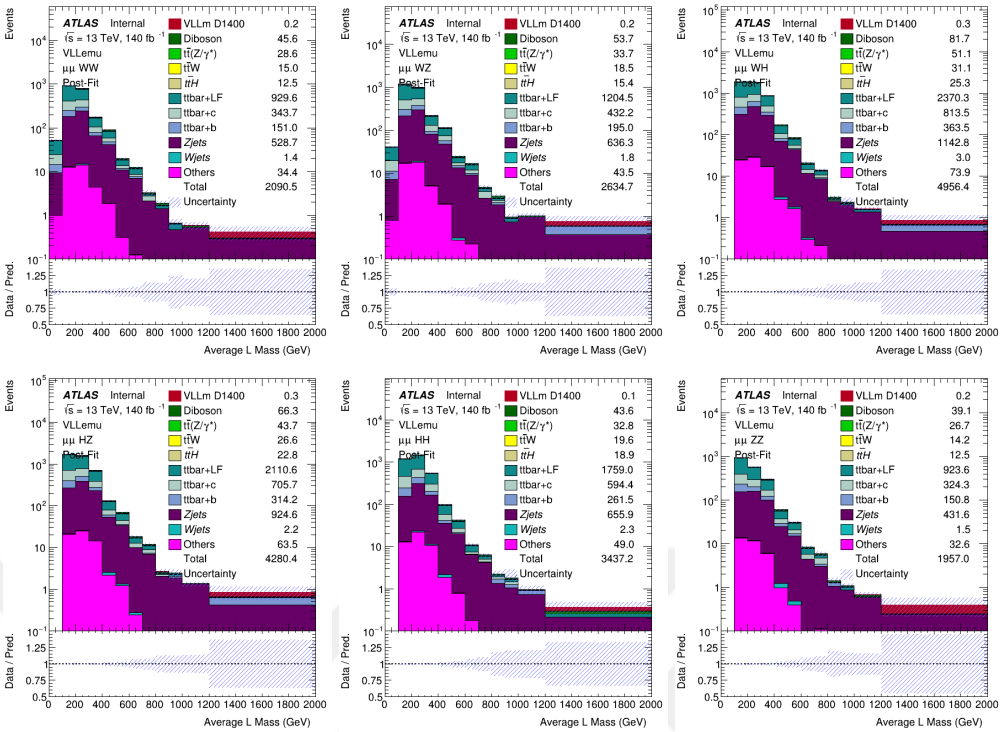
Şekil EK 2.34: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_μ 2ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_μ 1300 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



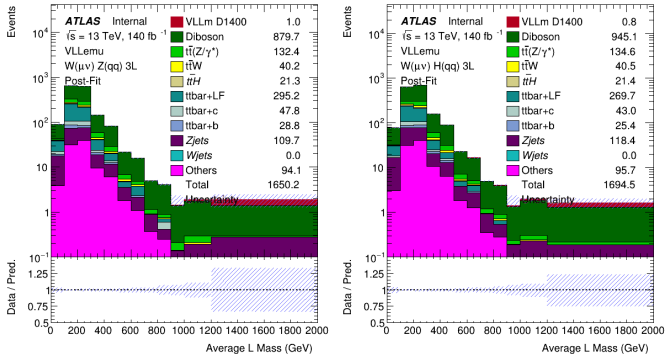
Şekil EK 2.35: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_μ 3ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_μ 1300 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



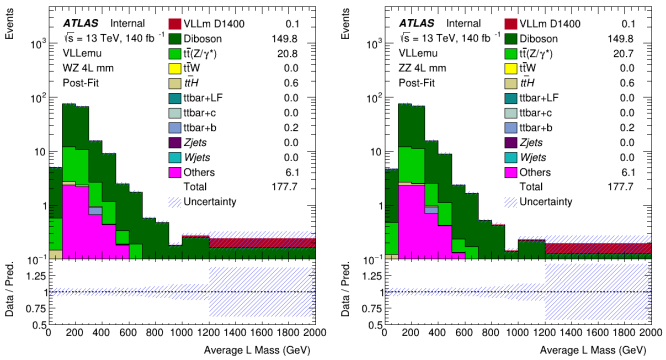
Şekil EK 2.36: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_μ 4ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_μ 1300 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



Şekil EK 2.37: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_μ 2ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_μ 1400 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.

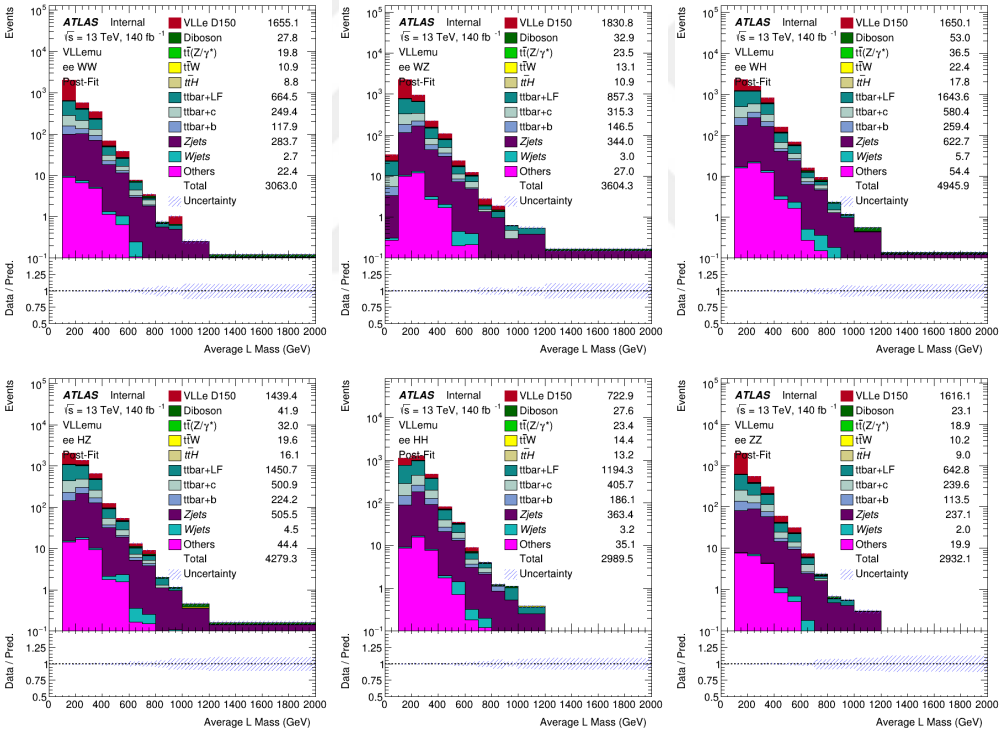


Şekil EK 2.38: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_μ 3ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_μ 1400 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.

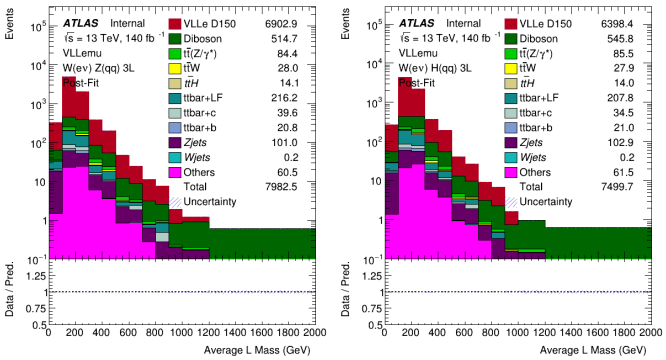


Şekil EK 2.39: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_μ 4ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_μ 1400 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.

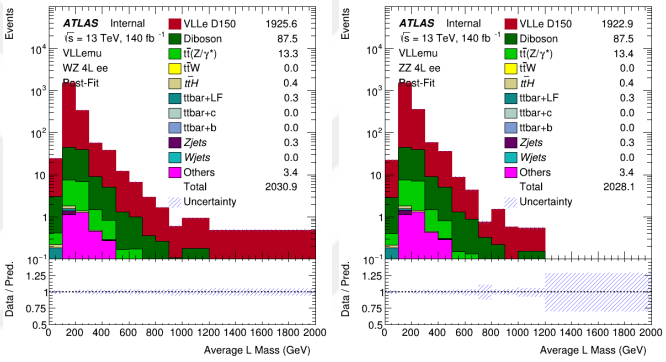
EK 2.2. VLL_e dublet



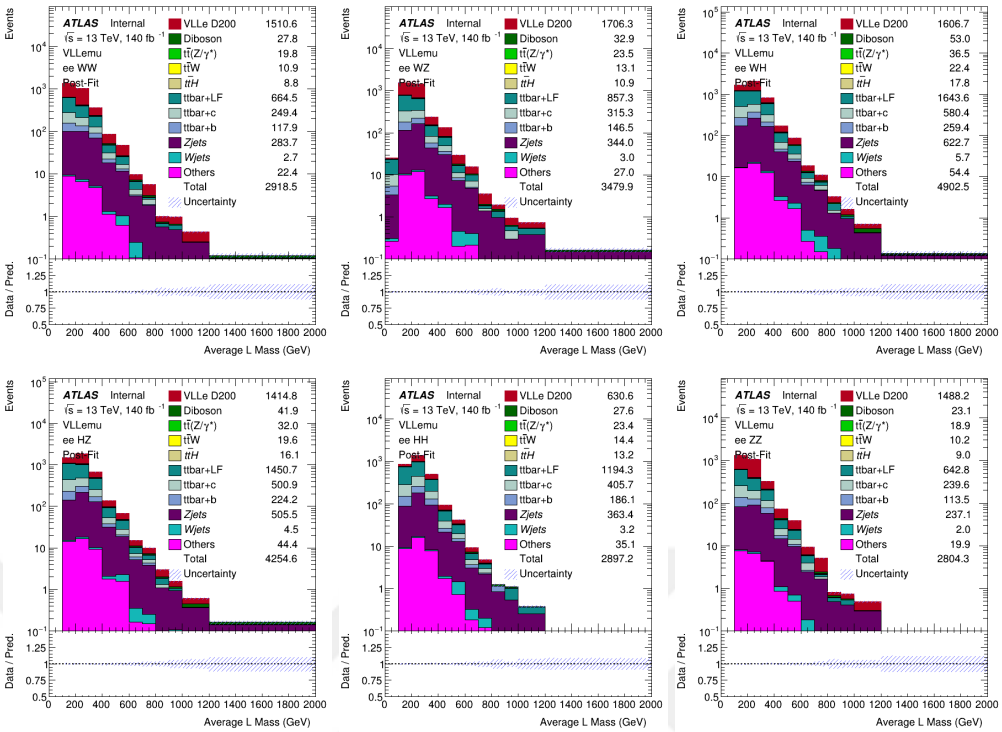
Şekil EK 2.40: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_e 2ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_e 150 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



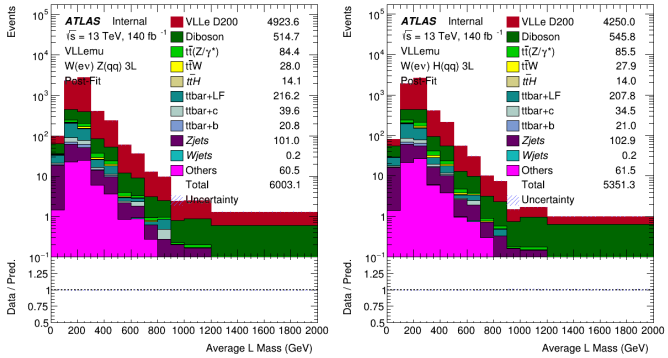
Şekil EK 2.41: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_e 3ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_e 150 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



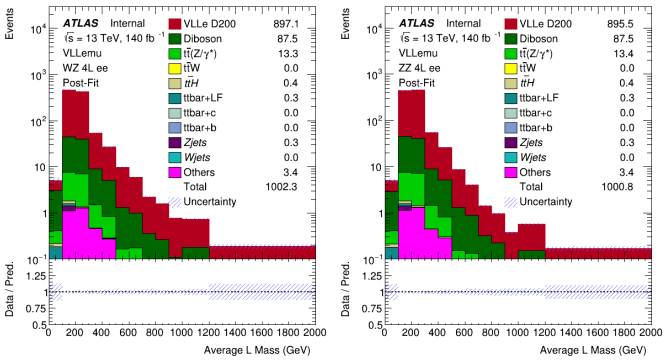
Şekil EK 2.42: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_e 4ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_e 150 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



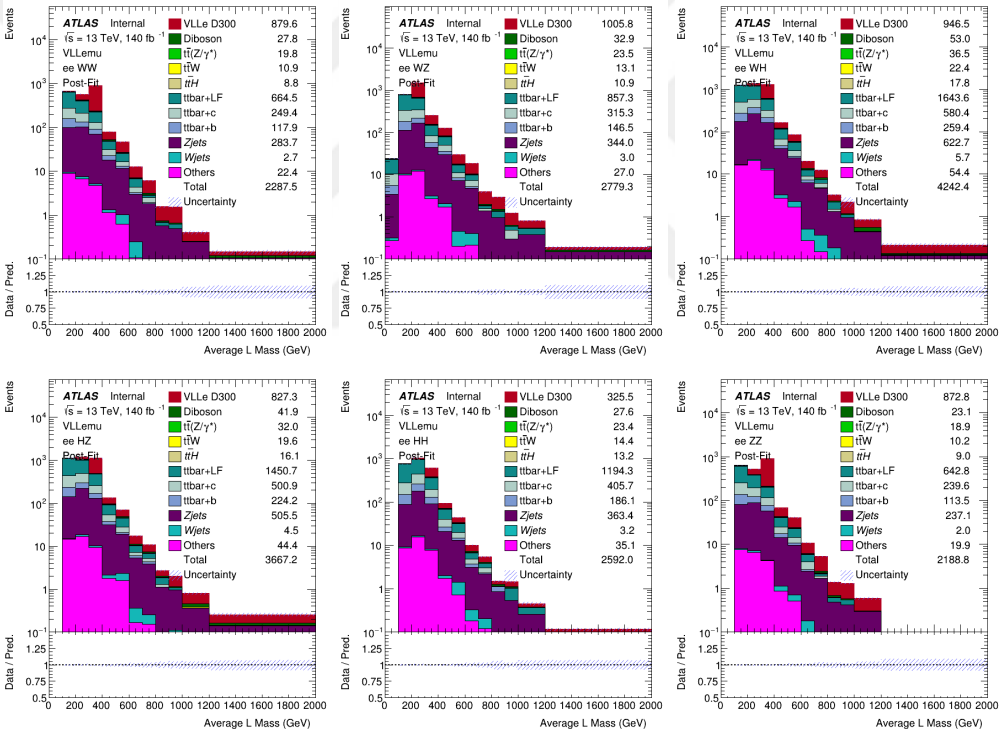
Şekil EK 2.43: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_e 2ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_e 200 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



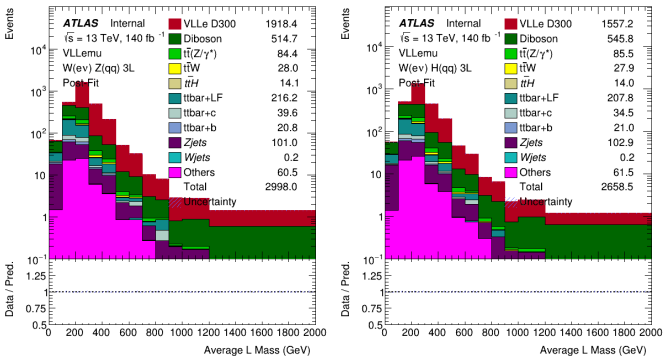
Şekil EK 2.44: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_e 3ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_e 200 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



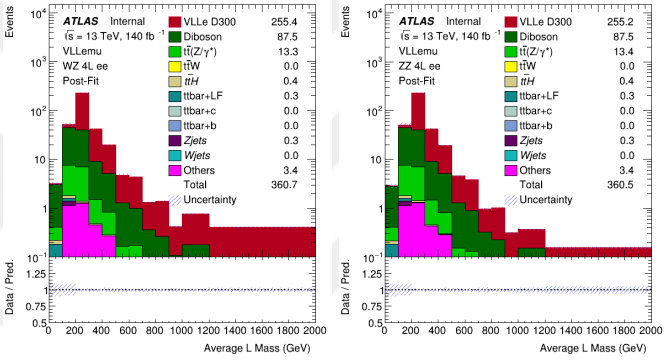
Şekil EK 2.45: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_e 4ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_e$ 200 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



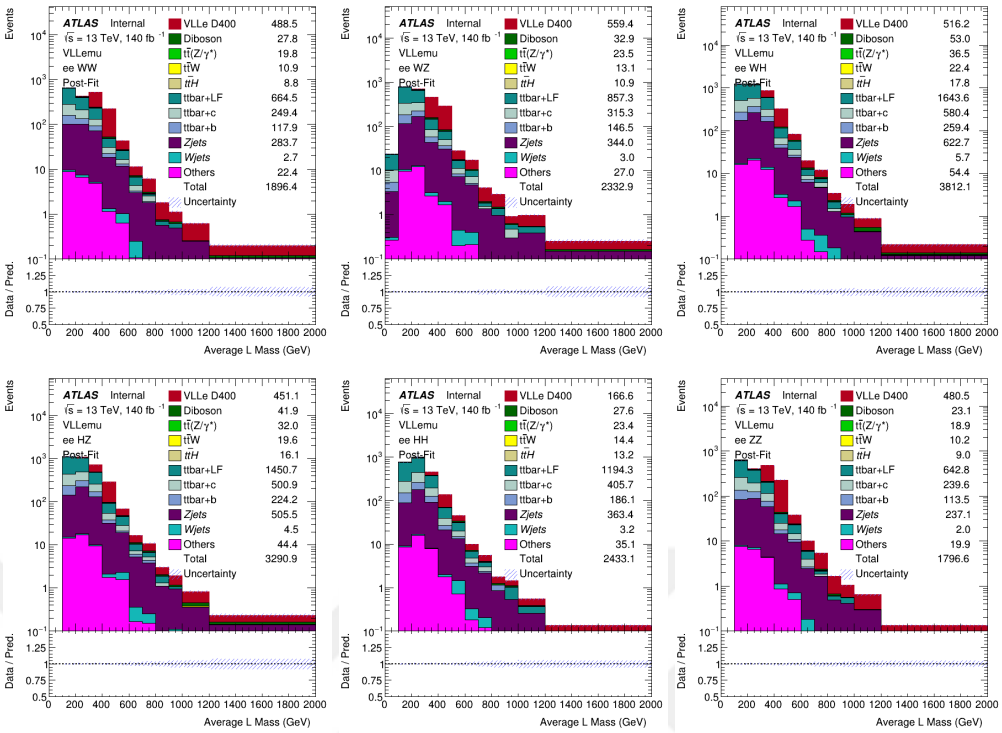
Şekil EK 2.46: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_e 2ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_e$ 300 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



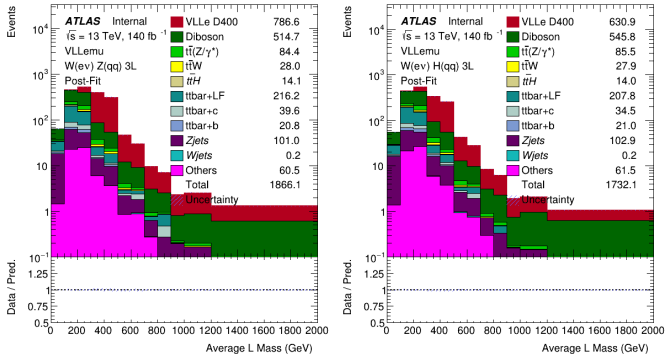
Şekil EK 2.47: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_e 3ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_e$ 300 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



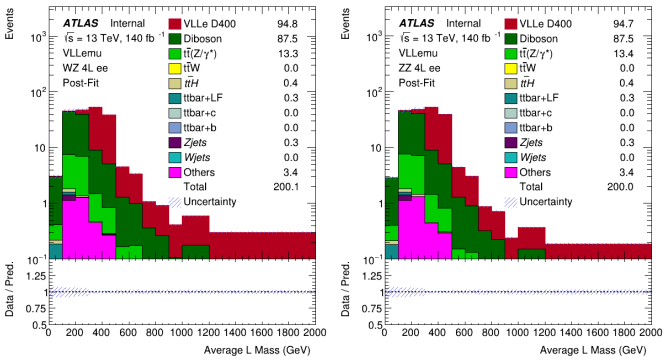
Şekil EK 2.48: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_e 4ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_e$ 300 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



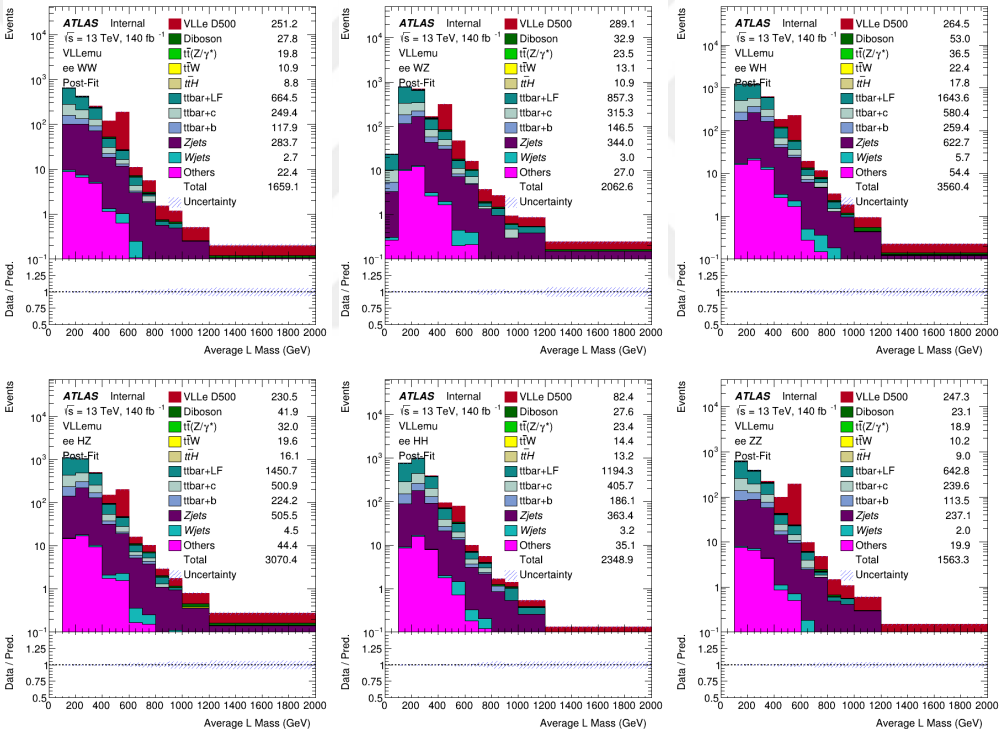
Şekil EK 2.49: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_e 2ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_e 400 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



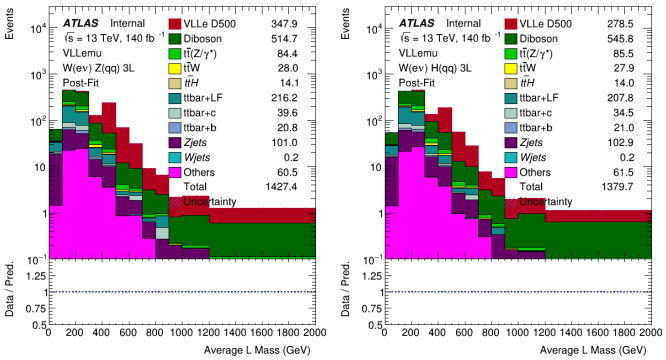
Şekil EK 2.50: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_e 3ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_e 400 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



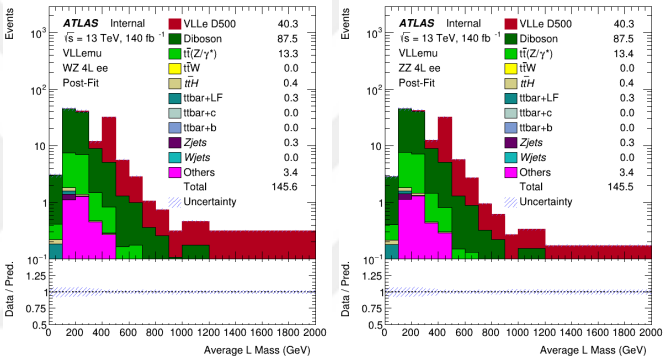
Şekil EK 2.51: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_e 4ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_e$ 400 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



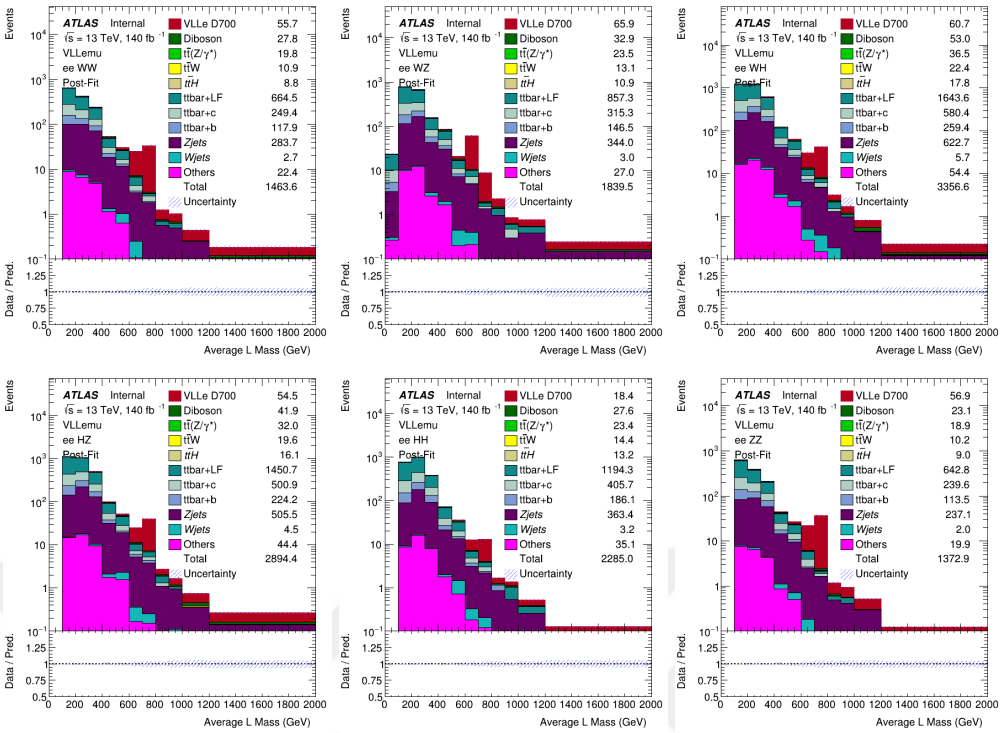
Şekil EK 2.52: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_e 2ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_e$ 500 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



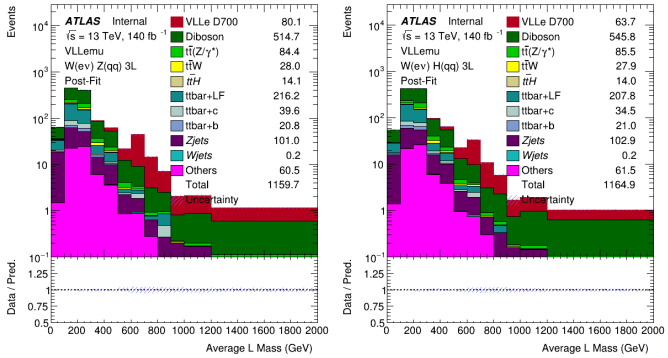
Şekil EK 2.53: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_e 3ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_e$ 500 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



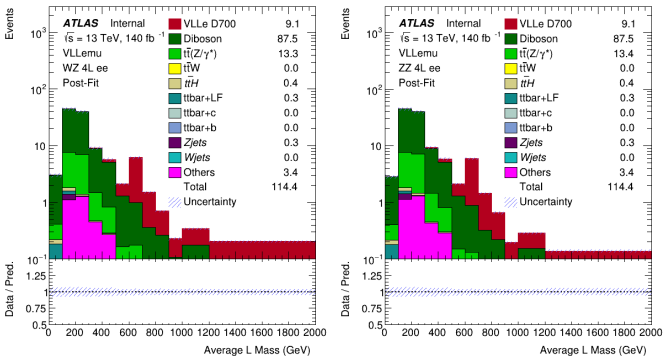
Şekil EK 2.54: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_e 4ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_e$ 500 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



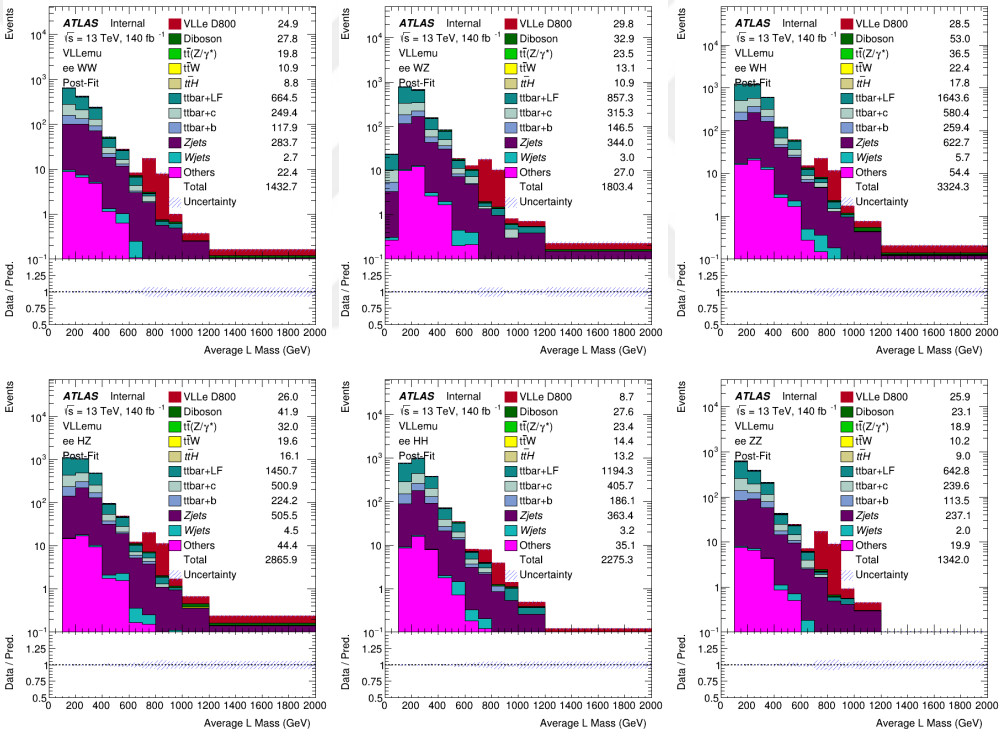
Şekil EK 2.55: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_e 2ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_e$ 700 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



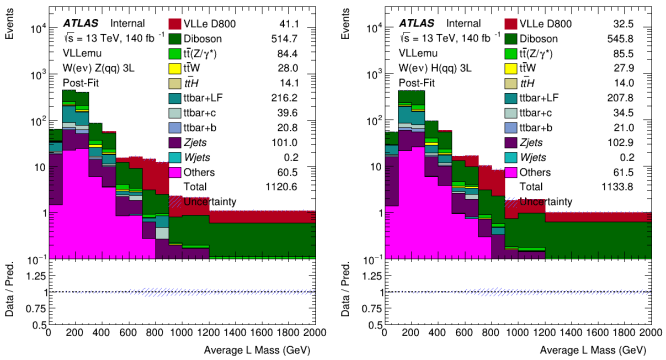
Şekil EK 2.56: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_e 3ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_e$ 700 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



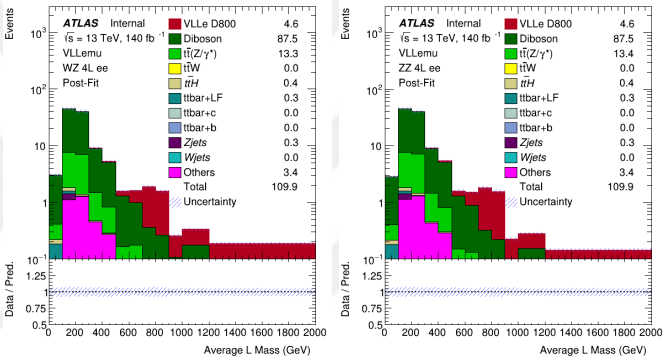
Şekil EK 2.57: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_e 4ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_e 700 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



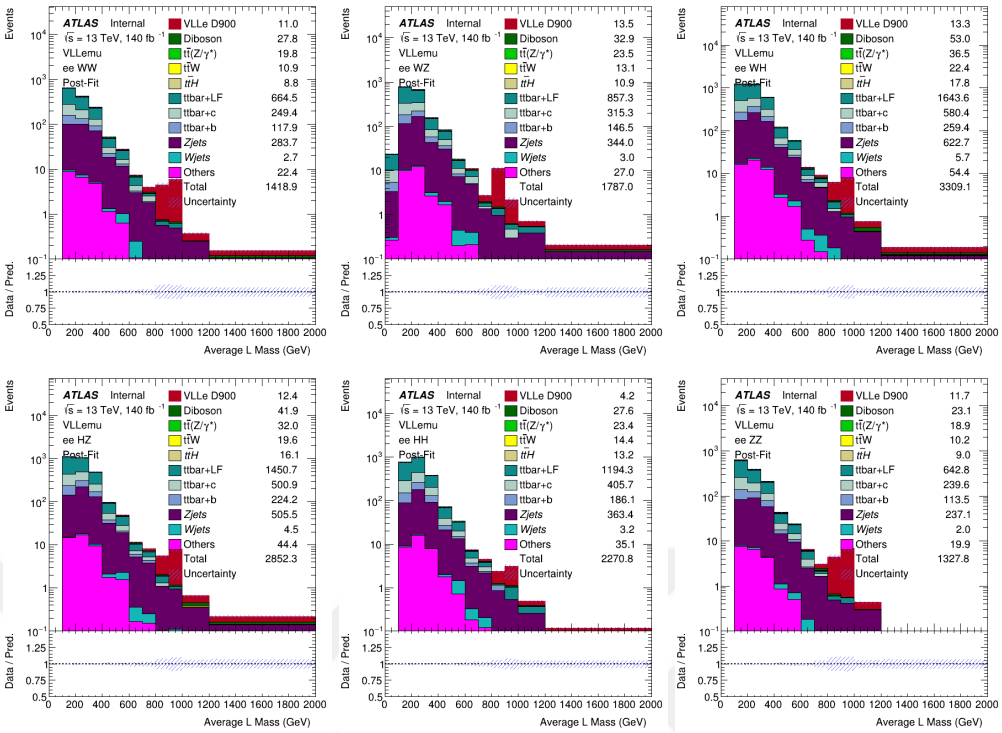
Şekil EK 2.58: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_e 2ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_e 800 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



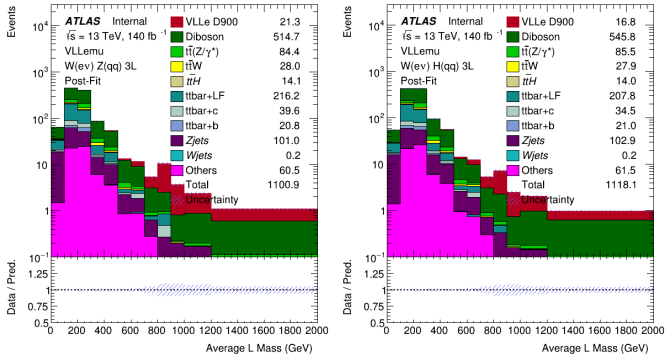
Şekil EK 2.59: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_e 3ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_e$ 800 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



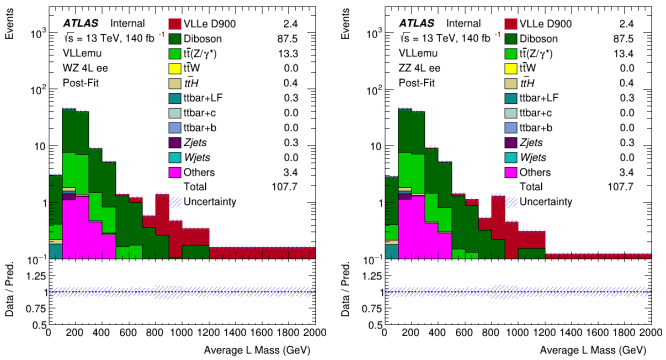
Şekil EK 2.60: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_e 4ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_e$ 800 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



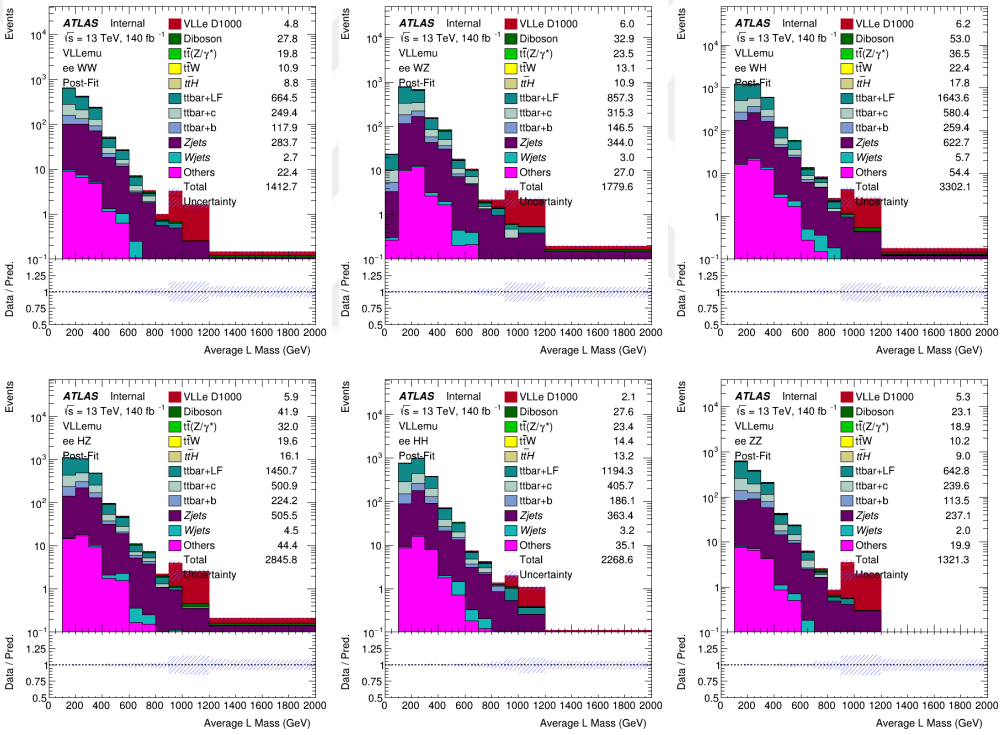
Şekil EK 2.61: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_e 2ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_e 900 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



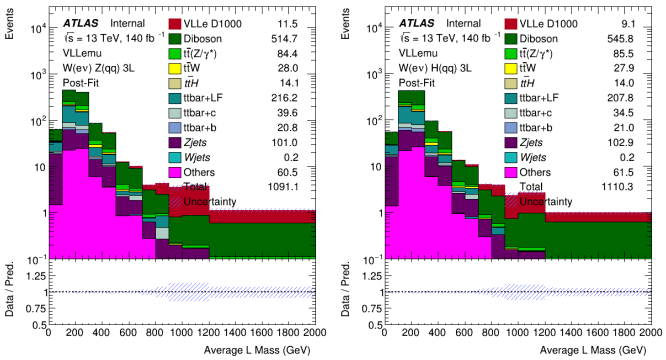
Şekil EK 2.62: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_e 3ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_e 900 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



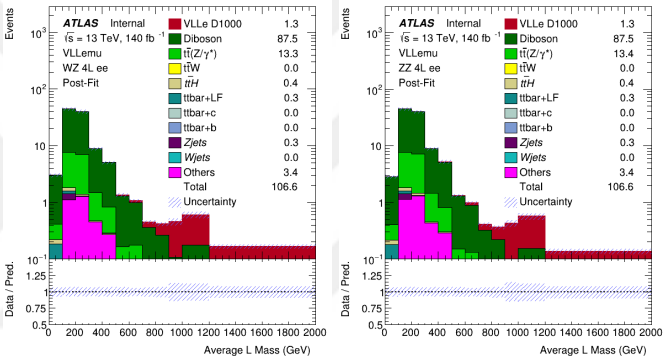
Şekil EK 2.63: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_e 4ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_e 900 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



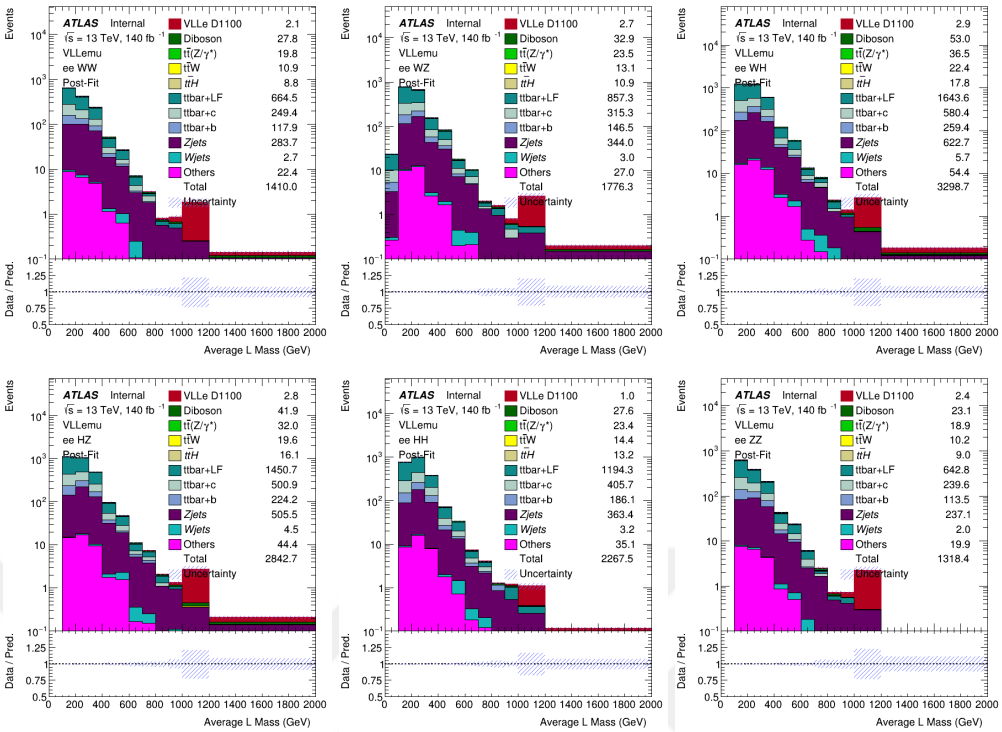
Şekil EK 2.64: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_e 2ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_e 1000 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



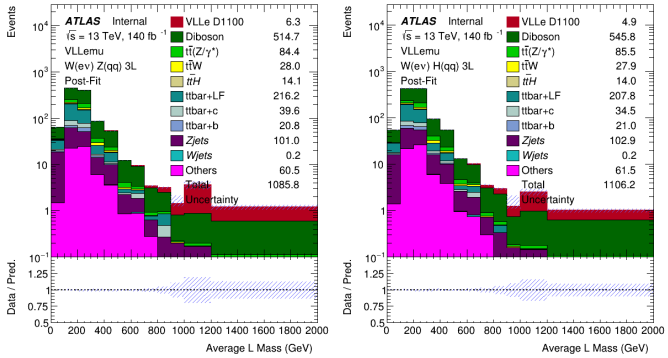
Şekil EK 2.65: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_e 3ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_e$ 1000 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



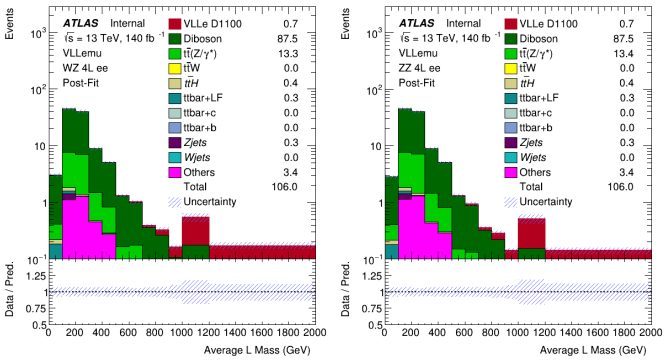
Şekil EK 2.66: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_e 4ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_e$ 1000 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



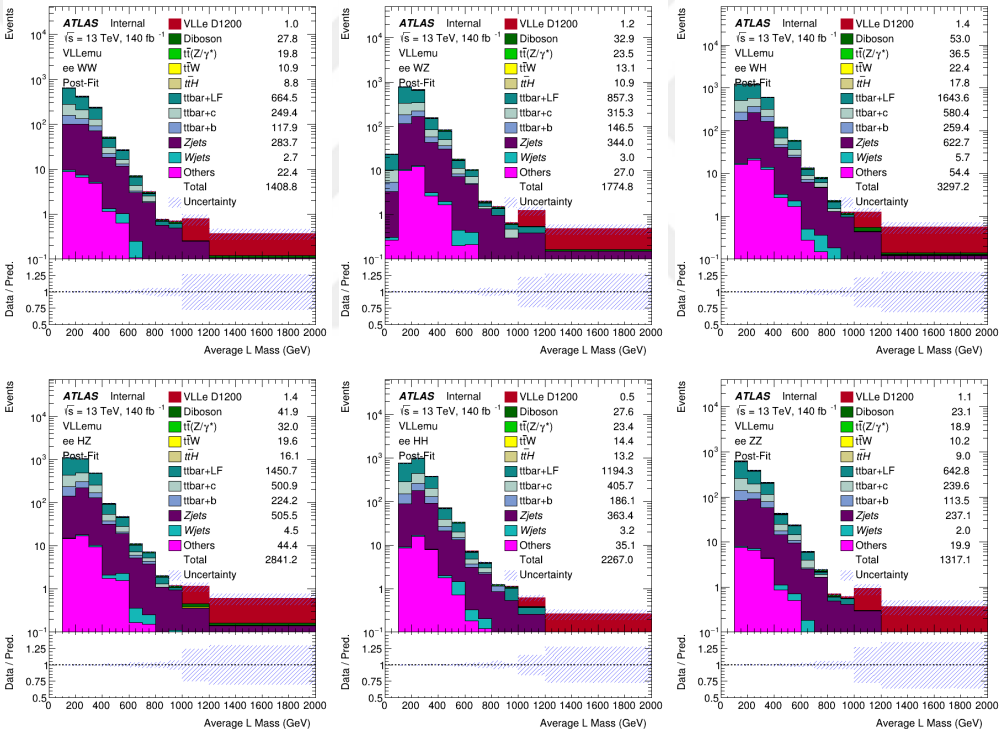
Şekil EK 2.67: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_e 2ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_e 1100 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



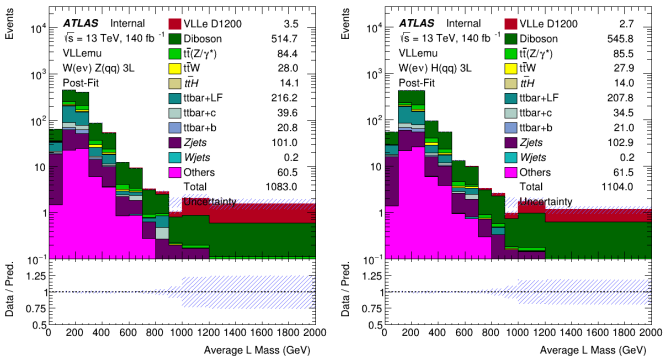
Şekil EK 2.68: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_e 3ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_e 1100 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



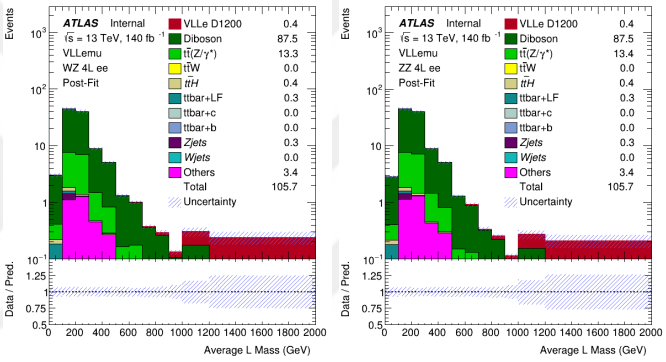
Şekil EK 2.69: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_e 4ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_e$ 1100 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



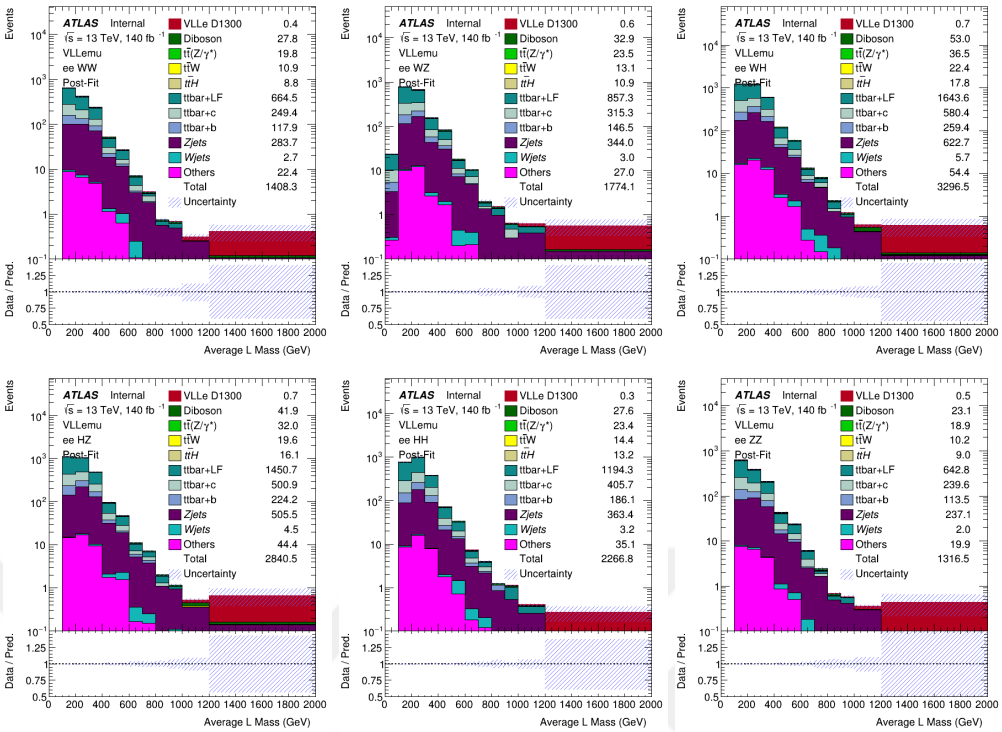
Şekil EK 2.70: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_e 2ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_e$ 1200 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



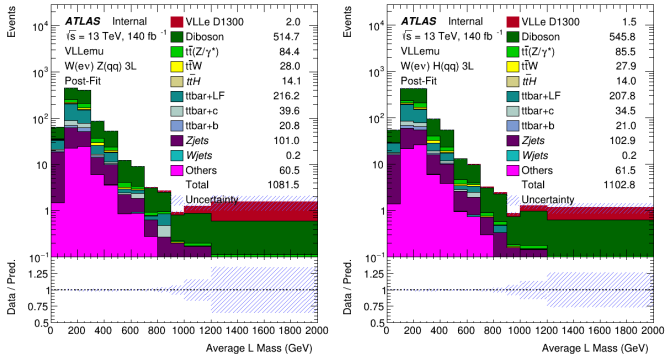
Şekil EK 2.71: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_e 3ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_e 1200 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



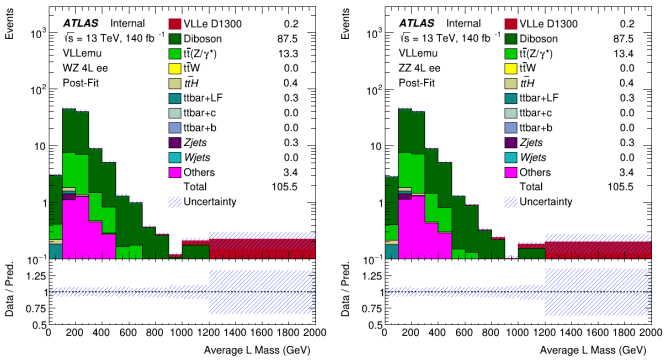
Şekil EK 2.72: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_e 4ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_e 1200 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



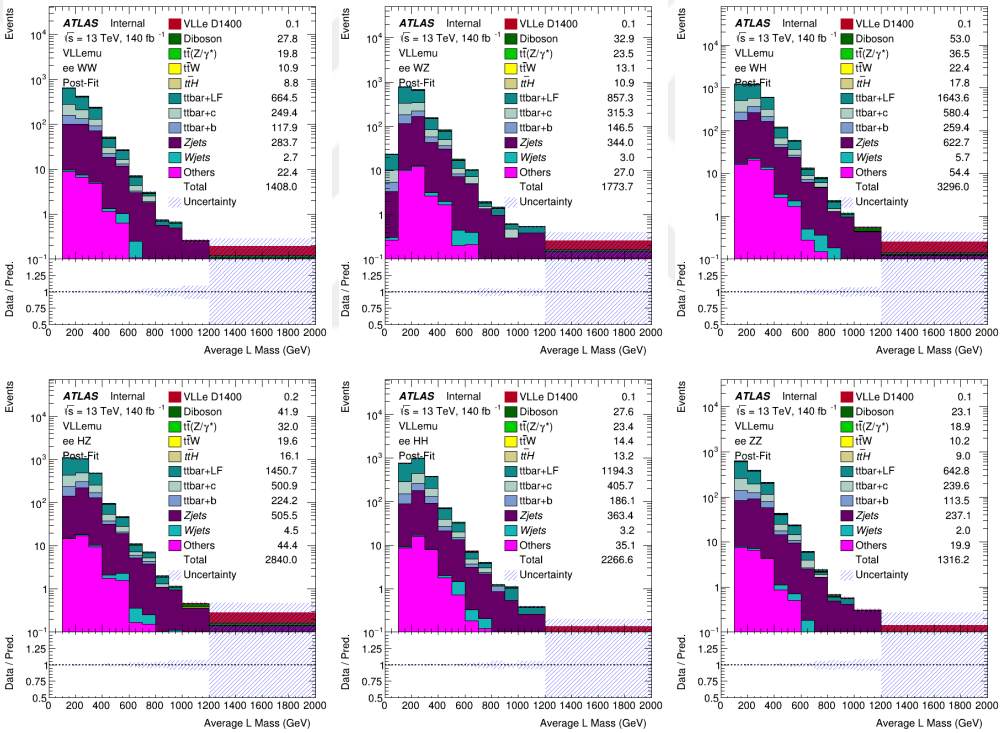
Şekil EK 2.73: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_e 2ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_e 1300 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



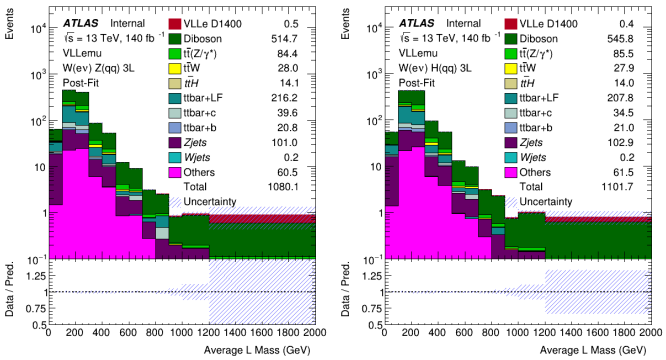
Şekil EK 2.74: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_e 3ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_e 1300 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



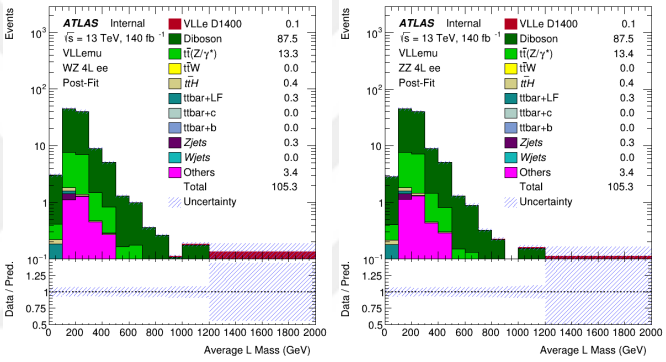
Şekil EK 2.75: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_e 4ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_e 1300 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



Şekil EK 2.76: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_e 2ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL_e 1400 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.

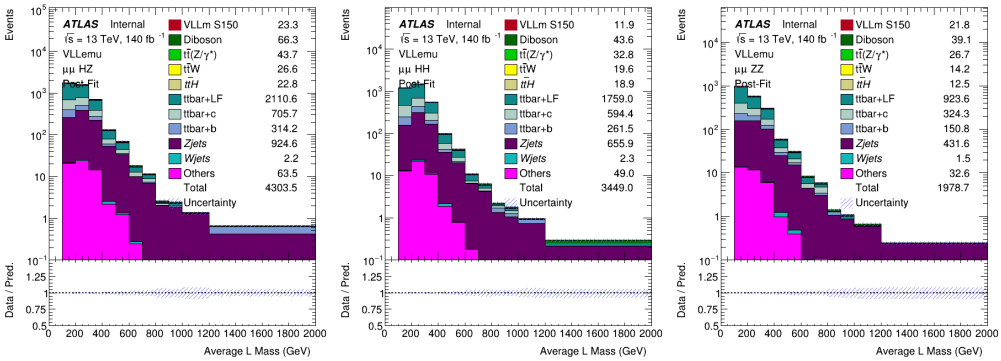


Şekil EK 2.77: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_e 3ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_e$ 1400 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.

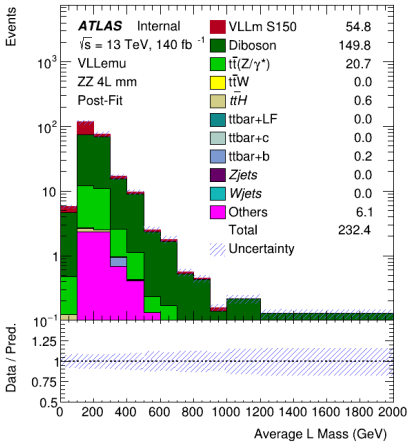


Şekil EK 2.78: İstatistiksel oturtma sonrası VLL_e 4ℓ kategorisindeki sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_e$ 1400 GeV dublet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.

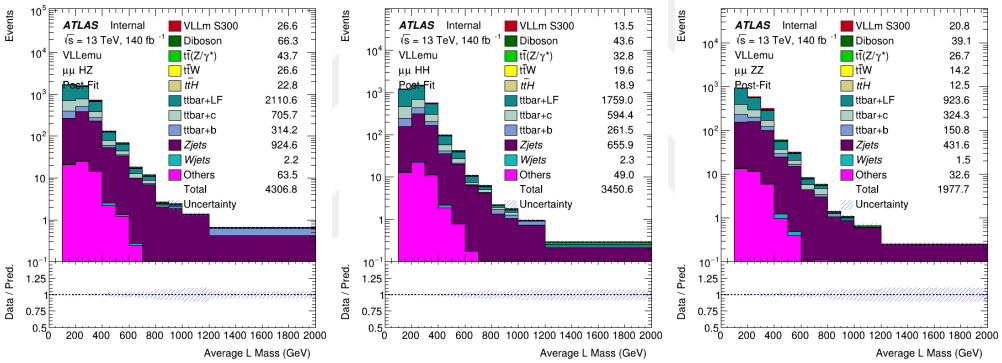
EK 2.3. VLL$_\mu$ singlet



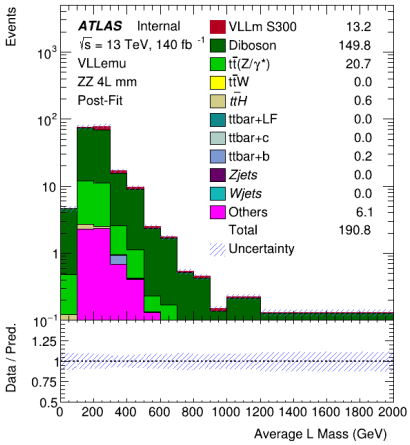
Şekil EK 2.79: İstatistiksel oturtma sonrası 2ℓ HZ, HH ve ZZ sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_\mu$ 150 GeV singlet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



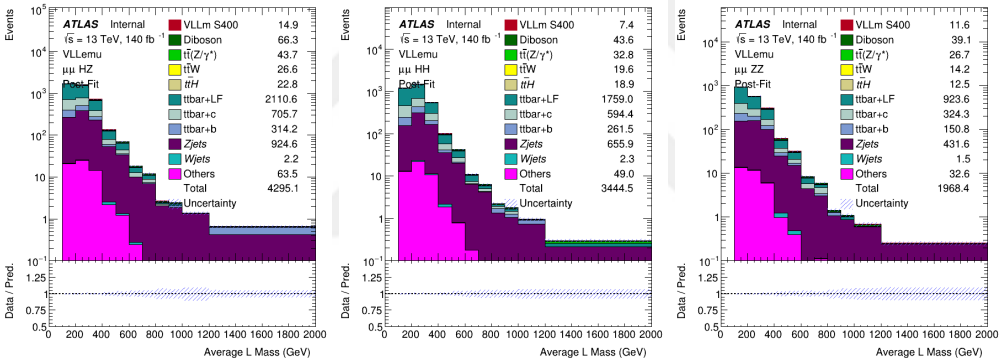
Şekil EK 2.80: İstatistiksel oturtma sonrası 4ℓ ZZ sinyal bölgelesinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_\mu$ 150 GeV singlet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



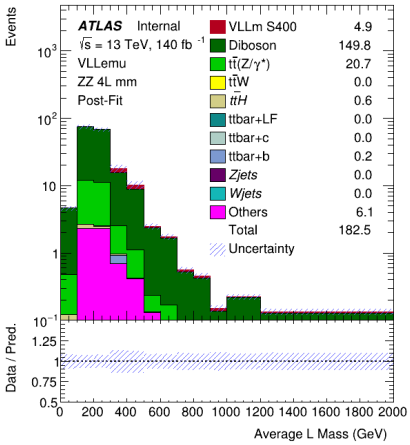
Şekil EK 2.81: İstatistiksel oturtma sonrası 2ℓ HZ, HH ve ZZ sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_\mu$ 300 GeV singlet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



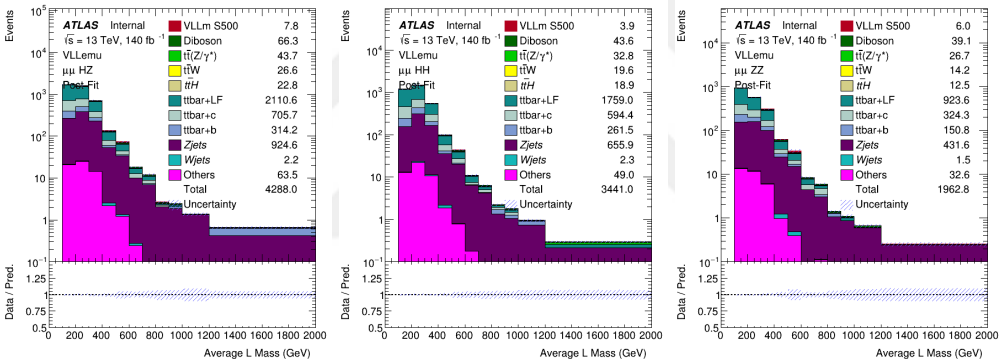
Şekil EK 2.82: İstatistiksel oturtma sonrası 4ℓ ZZ sinyal bölgelesinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_\mu$ 300 GeV singlet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



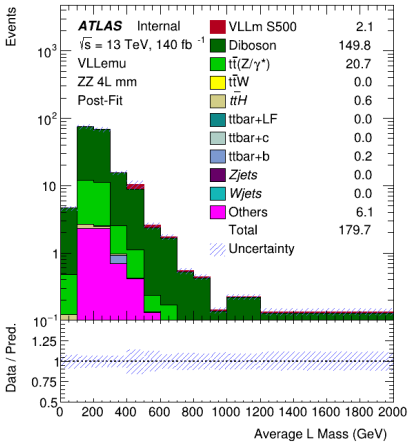
Şekil EK 2.83: İstatistiksel oturtma sonrası 2ℓ HZ, HH ve ZZ sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_\mu$ 400 GeV singlet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



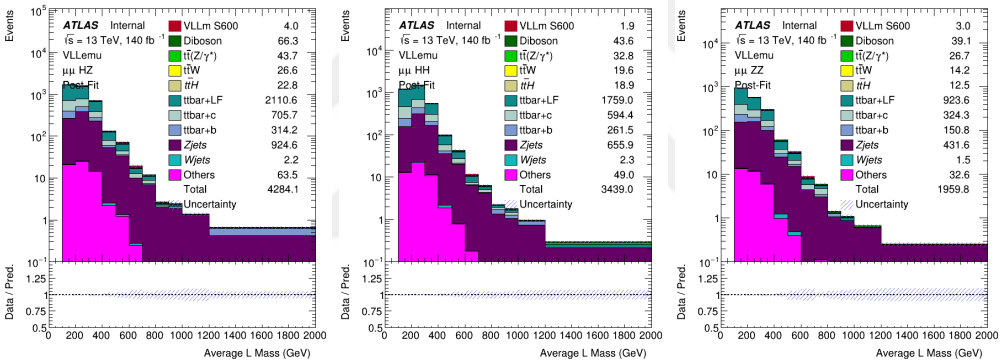
Şekil EK 2.84: İstatistiksel oturtma sonrası 4ℓ ZZ sinyal bölgelesinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_\mu$ 400 GeV singlet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



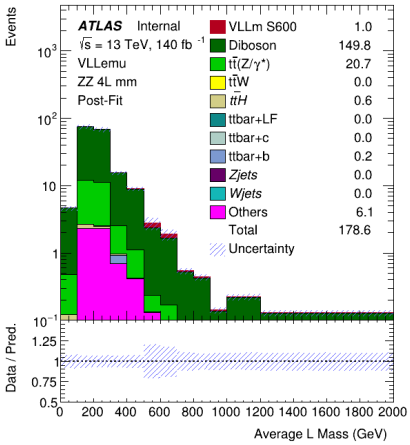
Şekil EK 2.85: İstatistiksel oturtma sonrası 2ℓ HZ, HH ve ZZ sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_\mu$ 500 GeV singlet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



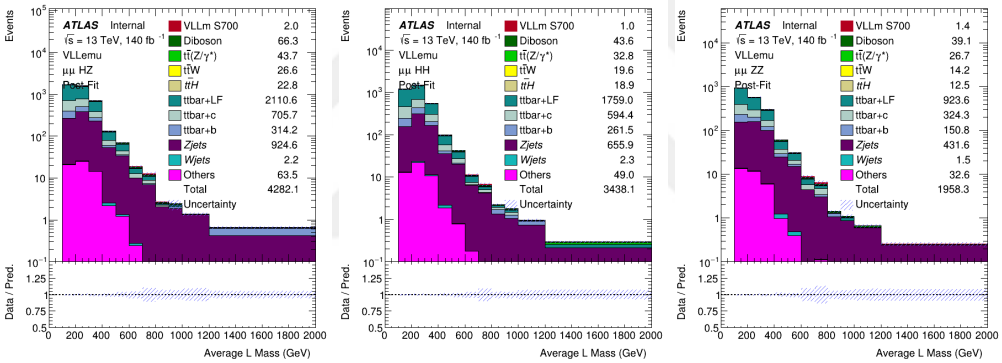
Şekil EK 2.86: İstatistiksel oturtma sonrası 4ℓ ZZ sinyal bölgelesinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_\mu$ 500 GeV singlet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



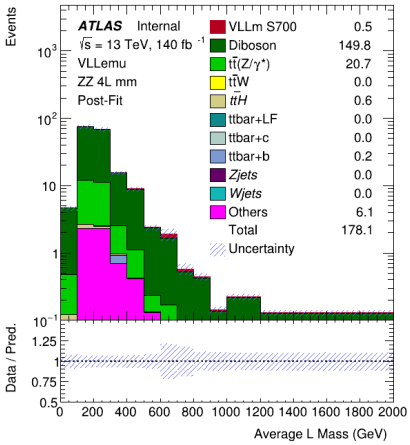
Şekil EK 2.87: İstatistiksel oturtma sonrası 2ℓ HZ, HH ve ZZ sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_\mu$ 600 GeV singlet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



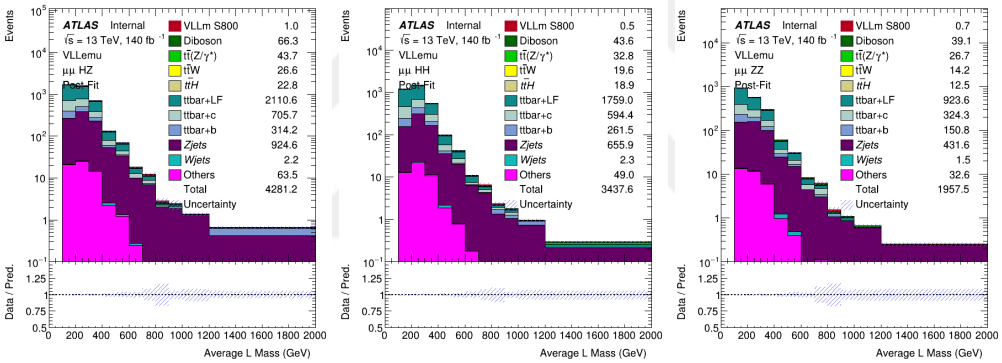
Şekil EK 2.88: İstatistiksel oturtma sonrası 4ℓ ZZ sinyal bölgelesinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_\mu$ 600 GeV singlet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



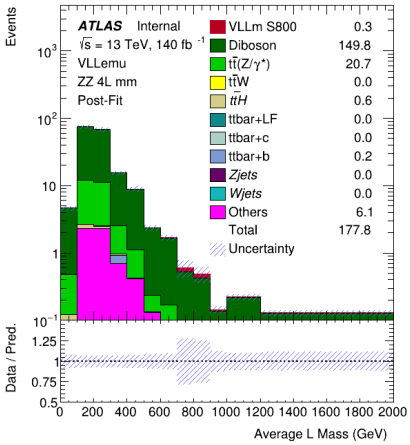
Şekil EK 2.89: İstatistiksel oturtma sonrası 2ℓ HZ, HH ve ZZ sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_\mu$ 700 GeV singlet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



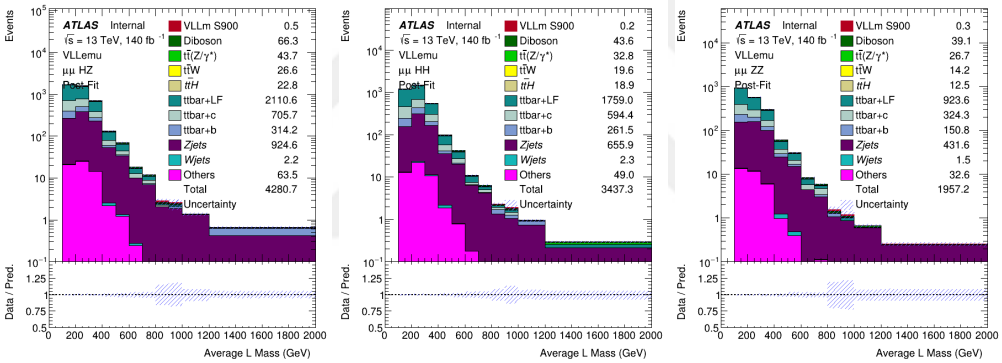
Şekil EK 2.90: İstatistiksel oturtma sonrası 4ℓ ZZ sinyal bölgelesinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_\mu$ 700 GeV singlet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



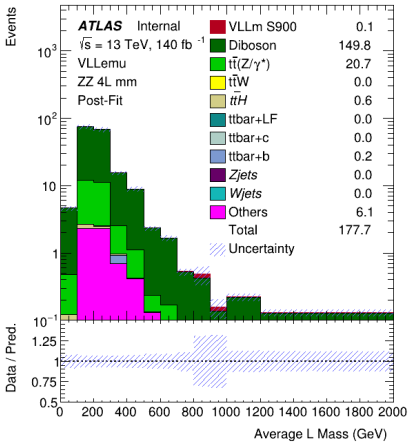
Şekil EK 2.91: İstatistiksel oturtma sonrası 2ℓ HZ, HH ve ZZ sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_\mu$ 800 GeV singlet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



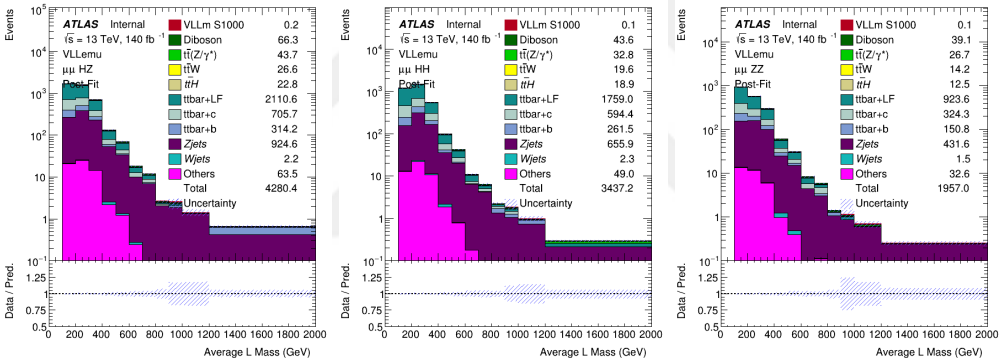
Şekil EK 2.92: İstatistiksel oturtma sonrası 4ℓ ZZ sinyal bölgelesinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_\mu$ 800 GeV singlet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



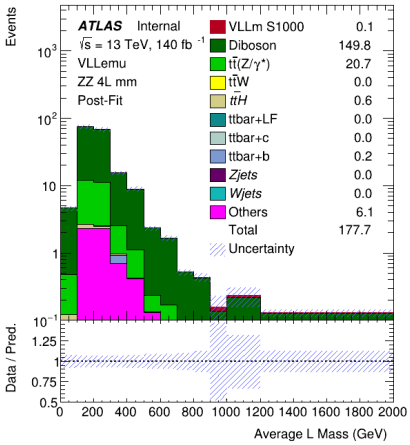
Şekil EK 2.93: İstatistiksel oturtma sonrası 2ℓ HZ, HH ve ZZ sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_\mu$ 900 GeV singlet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



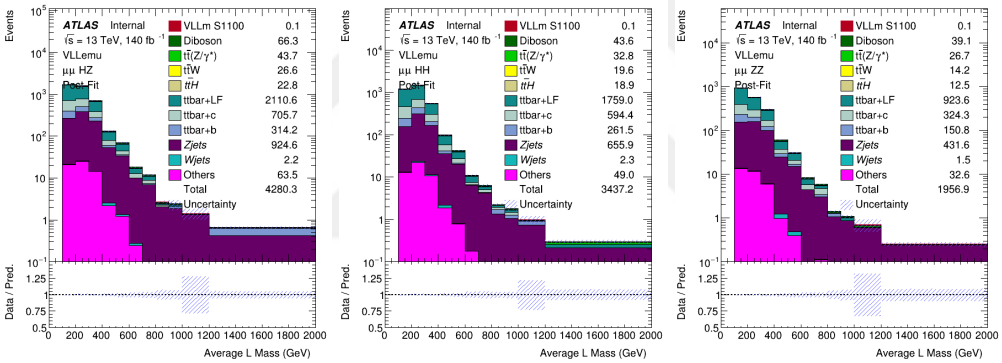
Şekil EK 2.94: İstatistiksel oturtma sonrası 4ℓ ZZ sinyal bölgelesinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_\mu$ 900 GeV singlet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



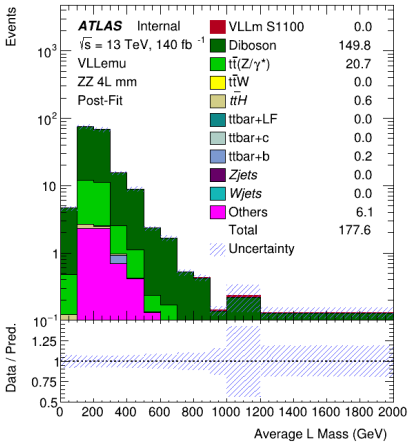
Şekil EK 2.95: İstatistiksel oturtma sonrası 2ℓ HZ, HH ve ZZ sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_\mu$ 1000 GeV singlet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



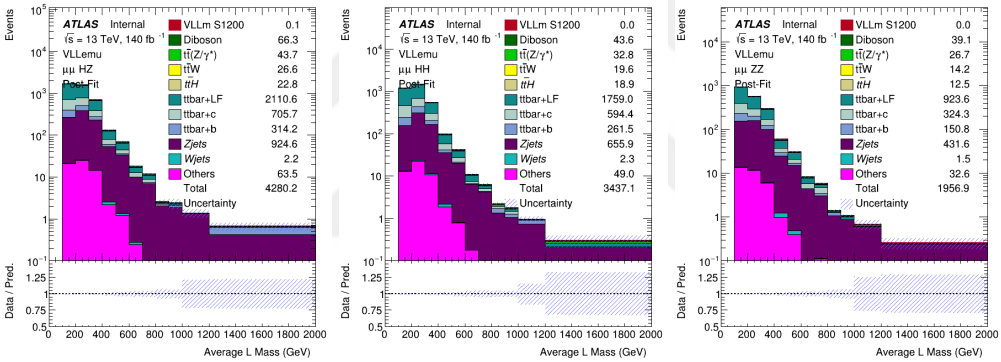
Şekil EK 2.96: İstatistiksel oturtma sonrası 4ℓ ZZ sinyal bölgelesinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_\mu$ 1000 GeV singlet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



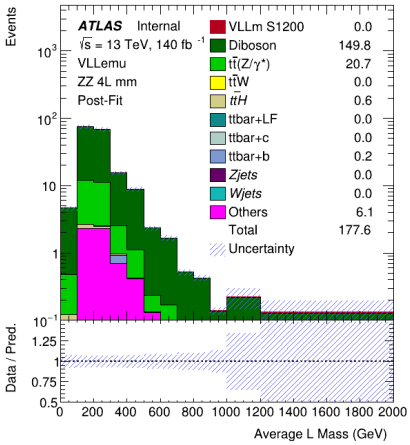
Şekil EK 2.97: İstatistiksel oturtma sonrası 2ℓ HZ, HH ve ZZ sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_\mu$ 1100 GeV singlet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



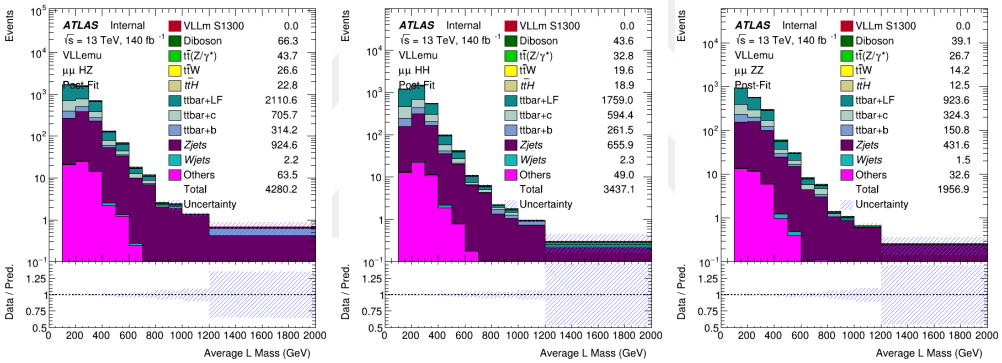
Şekil EK 2.98: İstatistiksel oturtma sonrası 4ℓ ZZ sinyal bölgelesinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_\mu$ 1100 GeV singlet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



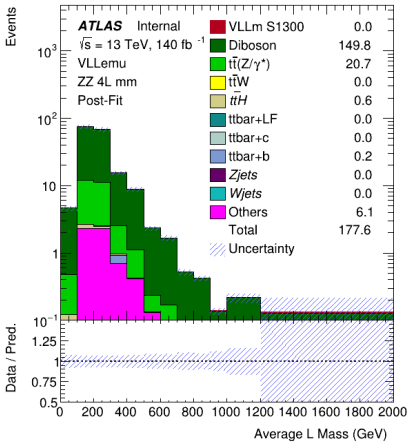
Şekil EK 2.99: İstatistiksel oturtma sonrası 2ℓ HZ, HH ve ZZ sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_\mu$ 1200 GeV singlet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



Şekil EK 2.100: İstatistiksel oturtma sonrası 4ℓ ZZ sinyal bölgelesinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_\mu$ 1200 GeV singlet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.

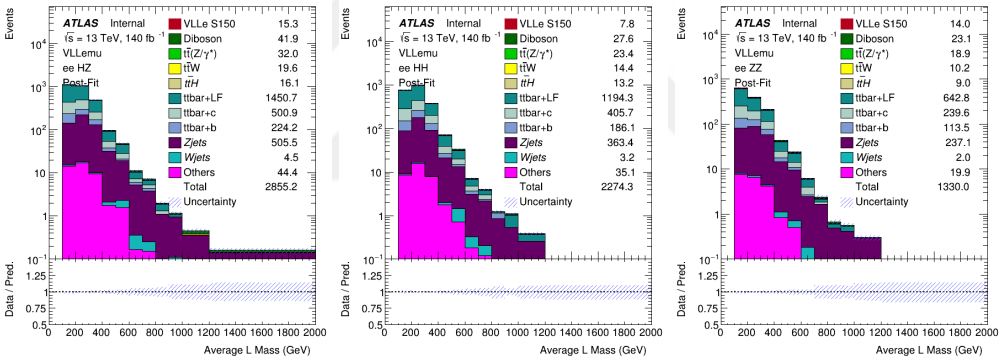


Şekil EK 2.101: İstatistiksel oturtma sonrası 2ℓ HZ, HH ve ZZ sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_\mu$ 1300 GeV singlet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.

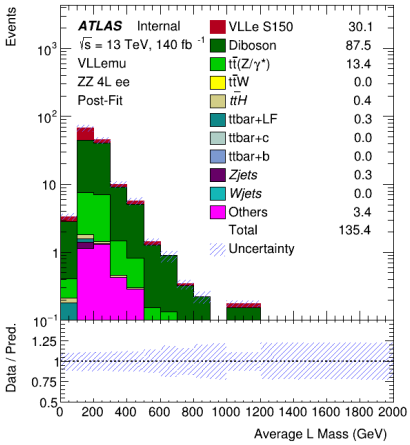


Şekil EK 2.102: İstatistiksel oturtma sonrası 4ℓ ZZ sinyal bölgelesinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_\mu$ 1300 GeV singlet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.

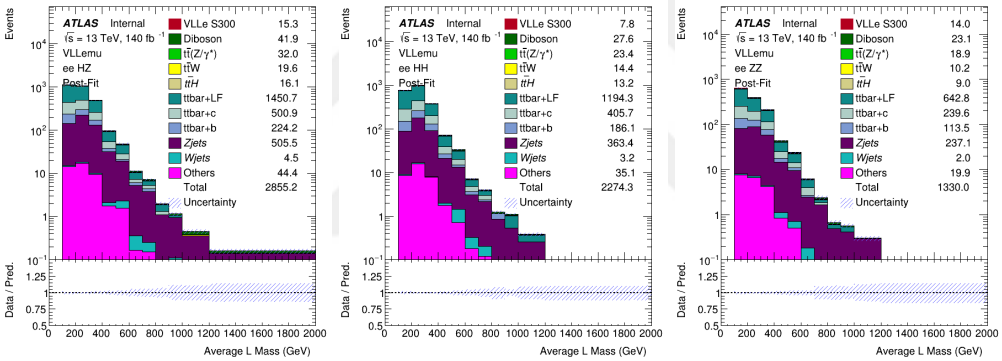
EK 2.4. VLL$_e$ Singlet



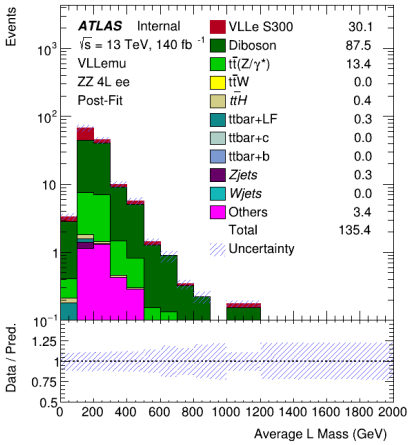
Şekil EK 2.103: İstatistiksel oturtma sonrası 2ℓ HZ, HH ve ZZ sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_e$ 150 GeV singlet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



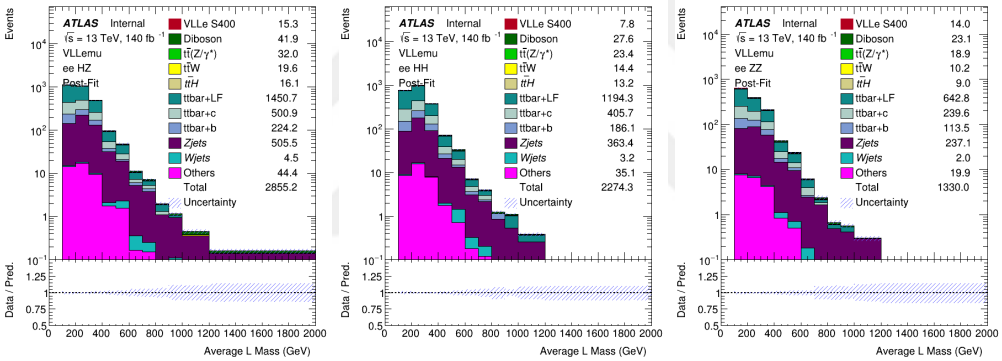
Şekil EK 2.104: İstatistiksel oturtma sonrası 4ℓ ZZ sinyal bölgelesinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_e$ 150 GeV singlet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



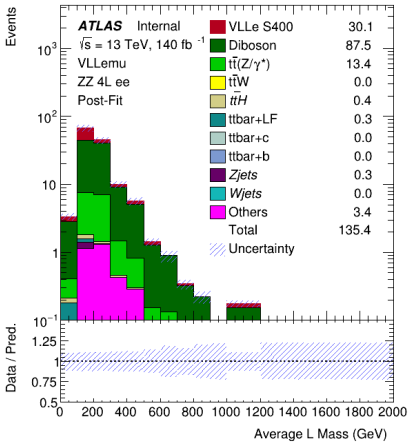
Şekil EK 2.105: İstatistiksel oturtma sonrası 2ℓ HZ, HH ve ZZ sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_e$ 300 GeV singlet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



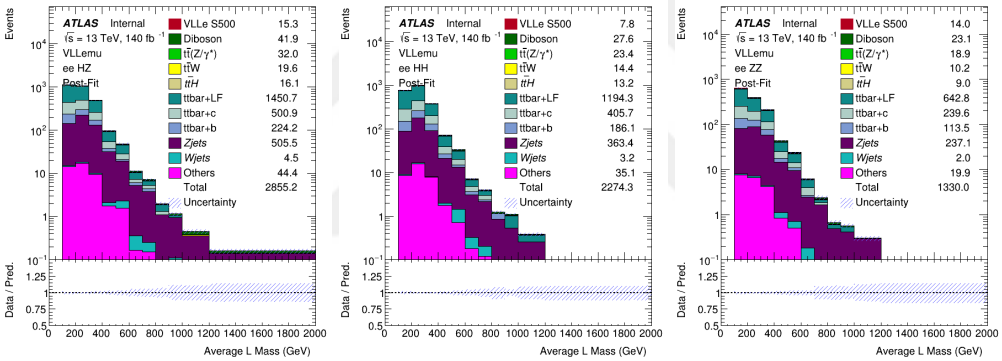
Şekil EK 2.106: İstatistiksel oturtma sonrası 4ℓ ZZ sinyal bölgelesinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_e$ 300 GeV singlet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



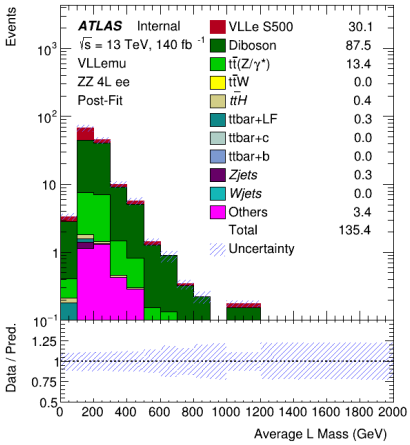
Şekil EK 2.107: İstatistiksel oturtma sonrası 2ℓ HZ, HH ve ZZ sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_e$ 400 GeV singlet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



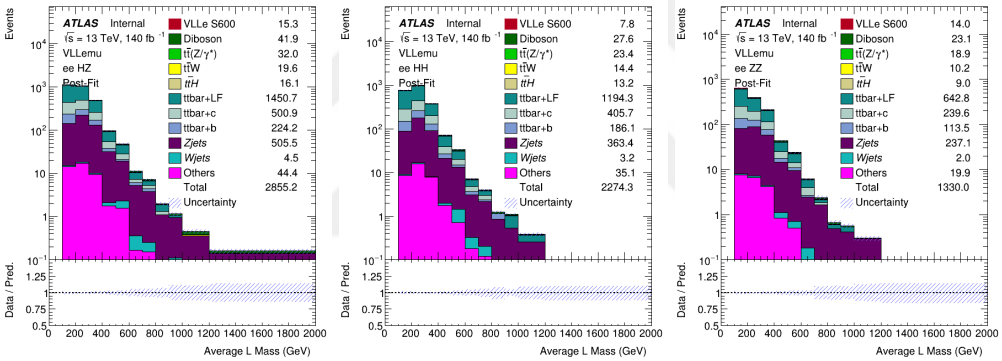
Şekil EK 2.108: İstatistiksel oturtma sonrası 4ℓ ZZ sinyal bölgelesinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_e$ 400 GeV singlet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



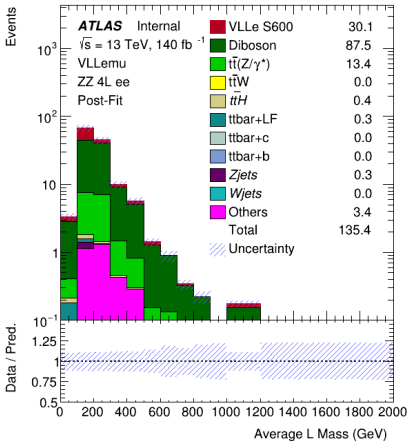
Şekil EK 2.109: İstatistiksel oturtma sonrası 2ℓ HZ, HH ve ZZ sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_e$ 500 GeV singlet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



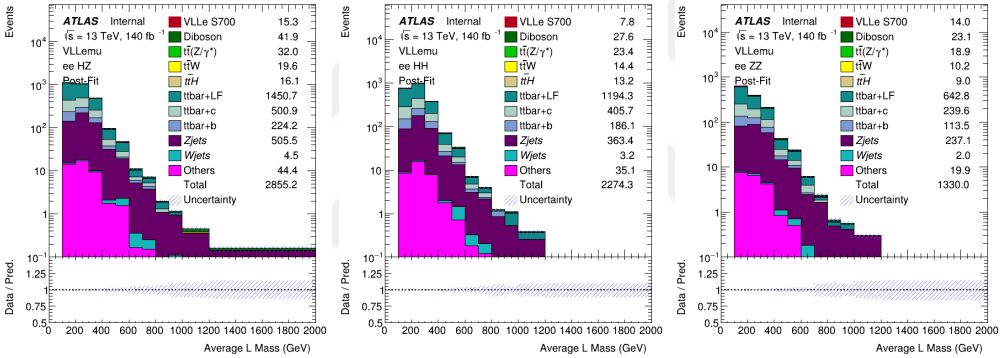
Şekil EK 2.110: İstatistiksel oturtma sonrası 4ℓ ZZ sinyal bölgelesinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_e$ 500 GeV singlet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



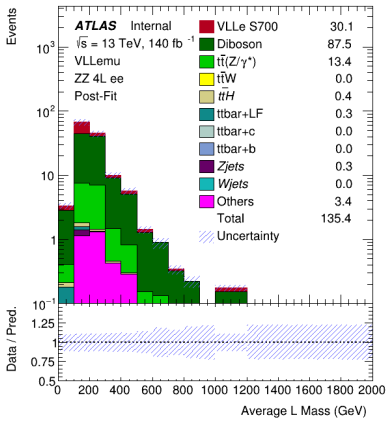
Şekil EK 2.111: İstatistiksel oturtma sonrası 2ℓ HZ, HH ve ZZ sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_e$ 600 GeV singlet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



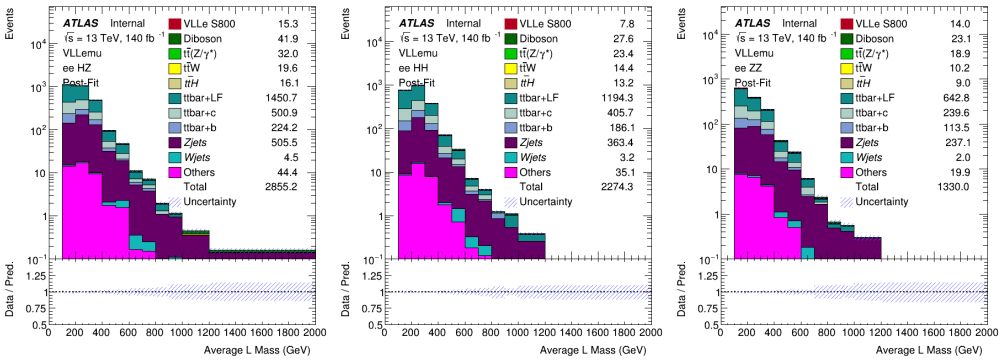
Şekil EK 2.112: İstatistiksel oturtma sonrası 4ℓ ZZ sinyal bölgelesinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_e$ 600 GeV singlet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



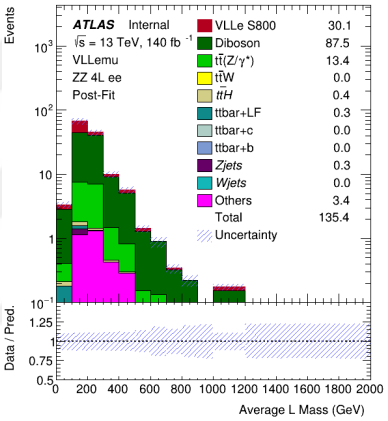
Şekil EK 2.113: İstatistiksel oturtma sonrası 2ℓ HZ, HH ve ZZ sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_e$ 700 GeV singlet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



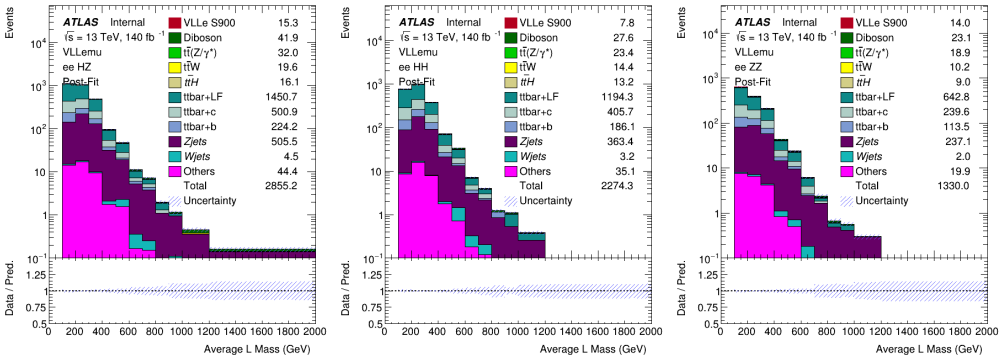
Şekil EK 2.114: İstatistiksel oturtma sonrası 4ℓ ZZ sinyal bölgelesinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_e$ 700 GeV singlet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



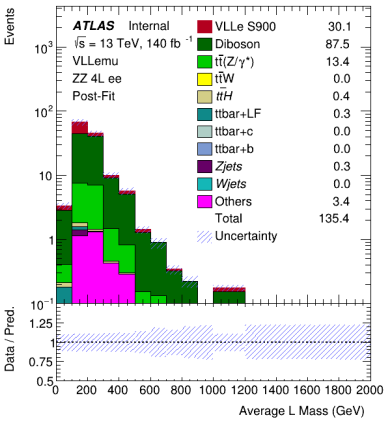
Şekil EK 2.115: İstatistiksel oturtma sonrası 2ℓ HZ, HH ve ZZ sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_e$ 800 GeV singlet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



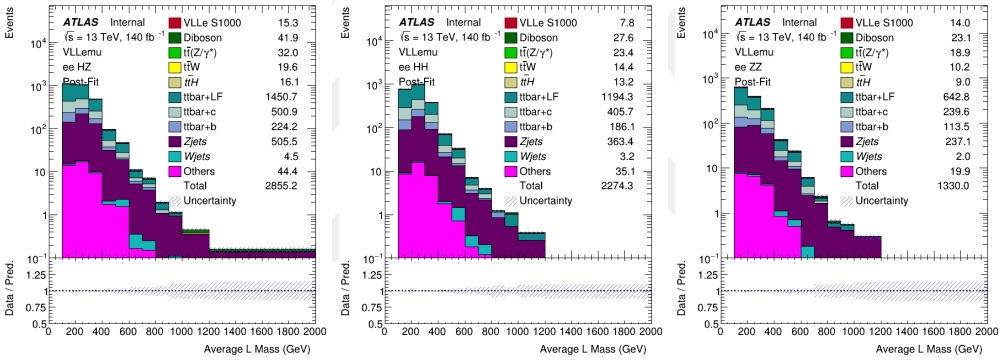
Şekil EK 2.116: İstatistiksel oturtma sonrası 4ℓ ZZ sinyal bölgelesinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_e$ 800 GeV singlet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



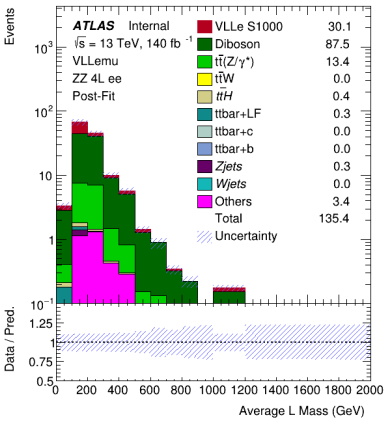
Şekil EK 2.117: İstatistiksel oturtma sonrası 2ℓ HZ, HH ve ZZ sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_e$ 900 GeV singlet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



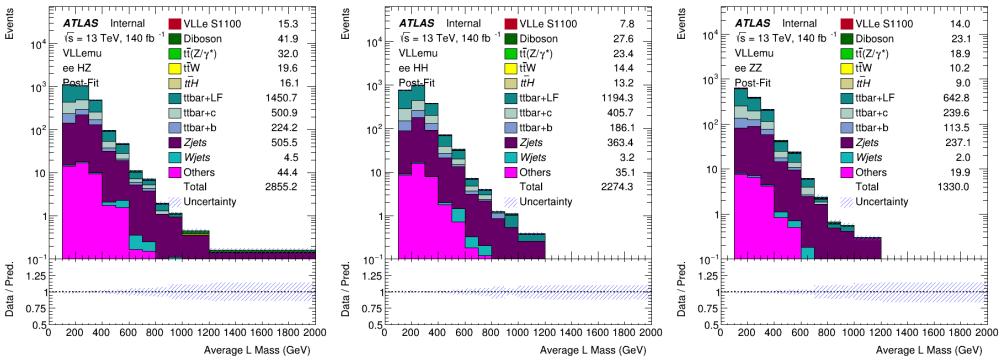
Şekil EK 2.118: İstatistiksel oturtma sonrası 4ℓ ZZ sinyal bölgelesinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_e$ 900 GeV singlet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



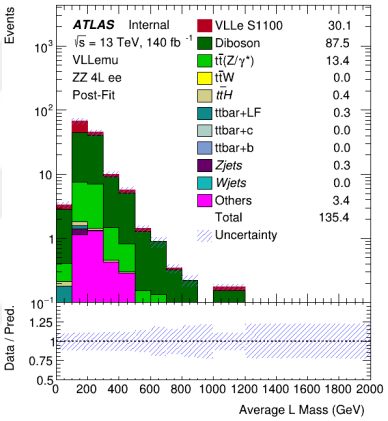
Şekil EK 2.119: İstatistiksel oturtma sonrası 2ℓ HZ, HH ve ZZ sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_e$ 1000 GeV singlet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



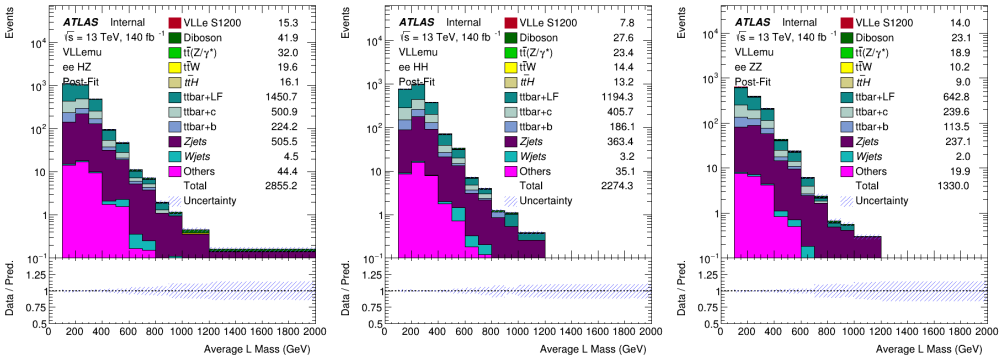
Şekil EK 2.120: İstatistiksel oturtma sonrası 4ℓ ZZ sinyal bölgelesinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_e$ 1000 GeV singlet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



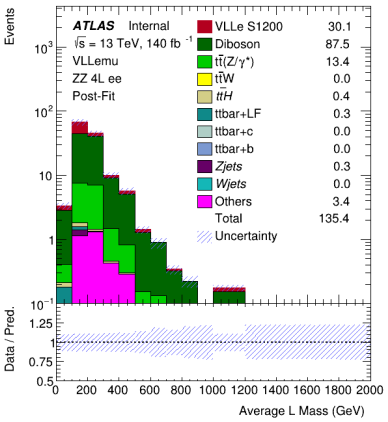
Şekil EK 2.121: İstatistiksel oturtma sonrası 2ℓ HZ, HH ve ZZ sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_e$ 1100 GeV singlet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



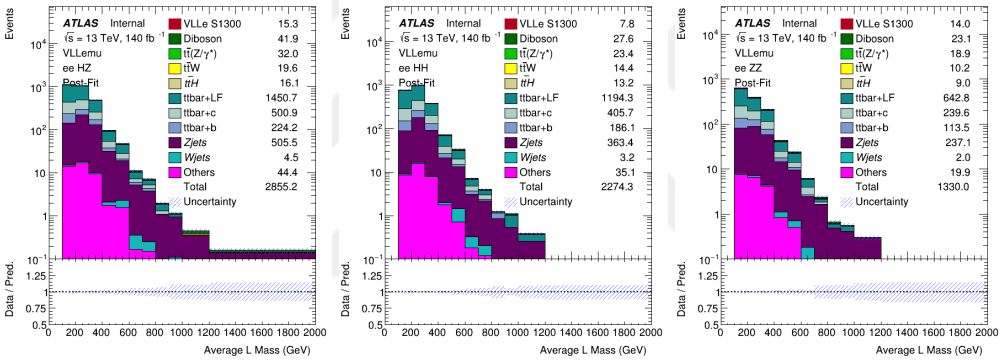
Şekil EK 2.122: İstatistiksel oturtma sonrası 4ℓ ZZ sinyal bölgelesinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_e$ 1100 GeV singlet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



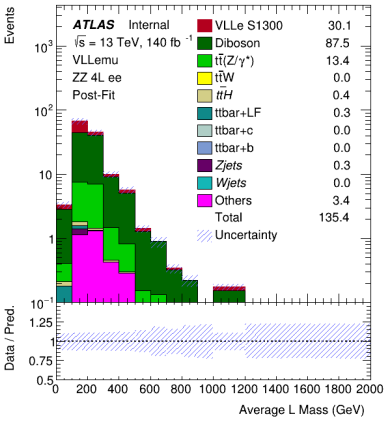
Şekil EK 2.123: İstatistiksel oturtma sonrası 2ℓ HZ, HH ve ZZ sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_e$ 1200 GeV singlet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



Şekil EK 2.124: İstatistiksel oturtma sonrası 4ℓ ZZ sinyal bölgelesinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_e$ 1200 GeV singlet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



Şekil EK 2.125: İstatistiksel oturtma sonrası 2ℓ HZ, HH ve ZZ sinyal bölgelerinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_e$ 1300 GeV singlet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.



Şekil EK 2.126: İstatistiksel oturtma sonrası 4ℓ ZZ sinyal bölgelesinde elde edilen mL_{ort} dağılımları. VLL$_e$ 1300 GeV singlet sinyal örneği kullanılmıştır. Mavi taralı alan istatistik belirsizlikleri temsil etmektedir.

EK 3. ADL formatında χ^2 algoritması

```
#EVENT VARIABLE DEFINITIONS
define jetA : goodJet[-1]
define jetB : goodJet[-2]
define jetC : goodJet[-3]
define jetD : goodJet[-4]

define bjetA : btjet[-1]
define bjetB : btjet[-2]
define bjetC : btjet[-3]
define bjetD : btjet[-4]

define lepA : goodLep[-1]
define lepB : goodLep[-2]
define lepC : goodLep[-3]
define lepD : goodLep[-4]

#### 2L ####
define Whad1A : jetA jetB
define Whad2A : jetC jetD
define Zhad1A : jetA jetB
define Zhad2A : jetC jetD
define Hhad1A : jetA jetB
define Hhad2A : jetC jetD

define Lw1A : Whad1A lepA
define Lw2A : Whad2A lepB
define Lz1A : Zhad1A lepA
define Lz2A : Zhad2A lepB
define Lh1A : Hhad1A lepA
define Lh2A : Hhad2A lepB
```

```
#### 3L ####
define Zlep1B : lepA lepB
define Whad1B : jetA jetB
define Zhad1B : jetA jetB
define Wlep1B : lepA METLV[0]
define Hhad1B : jetA jetB
define Zlep2B : lepC lepD
define Whad2B : jetC jetD
define Zhad2B : jetC jetD
define Hhad2B : jetC jetD

define Lzlep1B : Zlep1B lepC
define Lwhad1B : Whad1B METLV[0]
define Lzhad1B : Zhad1B lepB
define Lwlep1B : Wlep1B lepC
define Lhhad1B : Hhad1B lepB

#### 4L ####
define Zlep1C : lepA lepB
define Zhad1C : jetA jetB
define Whad1C : jetA jetB
define Lzlep1C : Zlep1C lepC
define Lzhad1C : Zhad1C lepD
define Lwhad1C : Whad1C lepD

#### chi2 sigmas 2L regions ####
## HZ ##
define wLhHZA : 15.51 + 0.001245*m(Lh1A) + (2.71*10^-5)*m(Lh1A)^2
define wLzHZA : 14.07 + 0.00111*m(Lz2A) + (2.926*10^-5)*m(Lz2A)^2
define wLhLzHZA : wLhHZA^2 + wLzHZA^2
## WZ ##
define wLwWZA : 13.24 + 0.0179*m(Lw1A) + (2.212*10^-5)*m(Lw1A)^2
```

```
define wLzWZA : 14.52 + 0.01779*m(Lz2A) + (2.177*10^-5)*m(Lz2A)^2
define wLwLzWZA : wLwWZA^2 + wLzWZA^2
## WH ##
define wLwWHA : 15.71 + 0.01674*m(Lw1A) + (1.919*10^-5)*m(Lw1A)^2
define wLhWHA : 14.66 + 0.03165*m(Lh2A) + (5.125*10^-6)*m(Lh2A)^2
define wLwLhWHA : wLwWHA^2 + wLhWHA^2
## WW ##
define wLw1WWA : 14.17 + 0.02378*m(Lw1A) + (2.316*10^-5)*m(Lw1A)^2
define wLw2WWA : 15.26 + 0.03165*m(Lw2A) + (2.155*10^-6)*m(Lw2A)^2
define wLwLwWWA : wLw1WWA^2 + wLw2WWA^2
## HH ##
define wLh1HHA : 16.31 + 0.001365*m(Lh1A) + (2.67*10^-5)*m(Lh1A)^2
define wLh2HHA : 15.20 + 0.00121*m(Lh2A) + (2.293*10^-5)*m(Lh2A)^2
define wLhLhHHA : wLh1HHA^2 + wLh2HHA^2
## ZZ ##
define wLz1ZZA : 14.76 + 0.001245*m(Lz1A) + (2.872*10^-5)*m(Lz1A)^2
define wLz2ZZA : 14.42 + 0.00111*m(Lz2A) + (2.322*10^-5)*m(Lz2A)^2
define wLzLzZZA : wLz1ZZA^2 + wLz2ZZA^2

define WWchiA : (m(Whad1A) - 80.4)^2 /10^2  + (m(Whad2A) - 80.4)^2
/10^2 +999*HSTEP(Pt(jetA) < 110) + 999*HSTEP(Pt(jetC) < 110)
define WZchiA : (m(Whad1A) - 80.4)^2 /10^2  + (m(Zhad2A) - 91)^2
/10^2+999*HSTEP(Pt(jetA) < 110) + 999*HSTEP(Pt(jetC) < 110)
define WHchiA : (m(Whad1A) - 80.4)^2 /10^2  + (m(Hhad2A) - 125)^2
/10^2+999*HSTEP(Pt(jetA) < 110) + 999*HSTEP(Pt(jetC) < 110)
define ZZchiA : (m(Zhad1A) - 91)^2 /10^2  + (m(Zhad2A) - 91)^2
/10^2+999*HSTEP(Pt(jetA) < 110) + 999*HSTEP(Pt(jetC) < 110)
define HZchiA : (m(Hhad1A) - 125)^2 /10^2 + (m(Zhad2A) - 91)^2
/10^2 +999*HSTEP(Pt(jetA) < 110) + 999*HSTEP(Pt(jetC) < 110)
define HHchiA : (m(Hhad1A) - 125)^2 /10^2 + (m(Hhad2A) - 125)^2
/10^2+999*HSTEP(Pt(jetA) < 110) + 999*HSTEP(Pt(jetC) < 110)

define totchiWWA : (m(Lw1A) - m(Lw2A))^2 /(wLwLwWWA) + WWchiA
```

```
define totchiWZA : (m(Lw1A) – m(Lz2A))^2 /(wLwLzWZA) + WZchiA
define totchiWHA : (m(Lw1A) – m(Lh2A))^2 /(wLwLhWHA) + WHchiA
define totchiZZA : (m(Lz1A) – m(Lz2A))^2 /(wLzLzZZA) + ZZchiA
define totchiHZA : (m(Lh1A) – m(Lz2A))^2 /(wLhLzHZA) + HZchiA
define totchiHHA : (m(Lh1A) – m(Lh2A))^2 /(wLhLhHHA) + HHchiA

#### chi2 sigmas 3L regions ####
define WZchiB : (m(Zlep1B) – 91.2)^2 /4^2 + (m(Whad1B) – 80)^2 /10^2
define totchiWZB : (m(Lzlep1B) – m(Lwhad1B))^2
/(34.9^2+50^2) + WZchiB

define WZ2chiB : (m(Zhad1B) – 91.2)^2 /10^2 + (m(Wlep1B) – 80)^2
/10^2
define totchiWZ2B : (m(Lzhad1B) – m(Lwlep1B))^2 /(52.2^2+75.7^2)
+ WZ2chiB

define WHchiB : (m(Wlep1B) – 80)^2 /10^2 + (m(Hhad1B) – 125)^2 /10^2
define totchiWHB : (m(Lwlep1B) – m(Lhhad1B))^2 /50^2 + WHchiB
#### chi2 sigmas 4L regions ####
define wLzWZC : 4.471*0.00001*(m(Lzlep1C))^2 +
0.007902*m(Lzlep1C) + 4.073
define wLwWZC : 6.491*0.00001*(m(Lwhad1C))^2 –
0.004421*m(Lwhad1C) + 20.63
define wwLzLwWZC : wLzWZC^2 + wLwWZC^2

define WZchiC : (m(Zlep1C) – 91)^2 /2.5^2 + (m(Whad1C) – 80)^2 /10^2
define totchiWZC : (m(Lzlep1C) – m(Lwhad1C))^2 /wwLzLwWZC + WZchiC
define ZZchiC : (m(Zlep1C) – 91.2)^2 /2.5^2 + (m(Zhad1C) – 91.2)^2/10^
define totchiZZC : (m(Lzlep1C) – m(Lzhad1C))^2 / 60^2 + ZZchiC

#### Average L Mass ####
define WWaverageA : (m(Lw1A) + m(Lw2A))/2
define WZaverageA : (m(Lw1A) + m(Lz2A))/2
```

```
define WHaverageA : (m(Lw1A) + m(Lh2A))/2
define ZZaverageA : (m(Lz1A) + m(Lz2A))/2
define HZaverageA : (m(Lh1A) + m(Lz2A))/2
define HHaverageA : (m(Lh1A) + m(Lh2A))/2
define WZaverageB : (m(Lzlep1B) + m(Lwhad1B))/2
define WZ2averageB : (m(Lzhad1B) + m(Lwlep1B))/2
define WHaverageB : (m(Lwlep1B) + m(Lhhad1B))/2
define WZaverageC : (m(Lzlep1C) + m(Lwhad1C))/2
define ZZaverageC : (m(Lzlep1C) + m(Lzhad1C))/2
```

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Ahmetcan SANSAR
Doğum Yeri	
Doğum Tarihi	
Uyruğu	[X] T.C. [ ] Diğer:
E-Posta Adresi	
Web Adresi	http://

Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Fakülte	Fen Fakültesi
Bölümü	Fizik Bölümü
Mezuniyet Yılı	2022

Yüksek Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimleri
Anabilim Dalı	Fizik Anabilim Dalı
Programı	Yüksek Enerji ve Plazma Fiziği
Mezuniyet Tarihi	2024

Makale ve Bildiriler

Makaleler

Bildiriler

Sansar A, ve diğ., 2023, ADL/CutLang ile Fizik Odaklı YEF Analizi, İstanbul Yüksek Enerji Fiziği Çalıştayı, 14-15 Ekim 2023 İstanbul, Türkiye

Sansar A. ve diğ., 2022, Vector-Like Lepton Searches with Innovative ADL/CutLang Method", Türk Fizik Derneği 38. Uluslararası Fizik Kongresi, 31 Ağustos – 4 Eylül 2022, Bodrum, Türkiye