

# ARTİFİKİ NEURAL ŞƏBƏKƏ TEKNİKASI VASİTƏSİLƏ TƏK TOP KVARK İLƏ BİRLİKDƏ HİQQS BOZONUN YARANMASININ TƏDQIQI

NAZİM A. HÜSEYNOV

Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının Fizika İnstitutu,

Azərbaycan, Bakı, H. Cavid pr.131, Az-1143

[nazim.huseynov@cern.ch](mailto:nazim.huseynov@cern.ch)

Böyük Adron Kollayderinin (BAK, Cenevrə) dörd fərqli kanalında Hiqqs bozonunun yaranması müşahidə olunmuşdur. Hiqqs bozonunun tək üst kvarkla birlikdə yaranması haqqında eksperimental məlumatlar mövcud deyil. Tək-üst kanalın tədqiqi ilk dəfə top kvarkın Hiqqs bozonu ilə qarşılıqlı təsir sabitinin kompleks fazasını təyin etməyə imkan yaradacaqdır. Tədqiqat işində “çox dəyişənli analiz metodu”ndan istifadə edərək, Hiqqs bozonunun tək top kvarkla birlikdə yaranma imkanları araşdırılmış və standart metodun üstünlükləri göstərilmişdir. Sinyal seçimi və fon hadisələrinin kənarlaşdırılması üçün əsas meyarlar göstərilməklə Böyük Adron Kollayderində toplanmış statistik məlumatlar Standart Modelin proqnozu ilə müqayisədə top kvarkın Hiqqs bozonu ilə qarşılıqlı təsir sabitinin əks işarəyə malik olduğu modeli aşkar və yaxud istisna etməyə imkan verir.

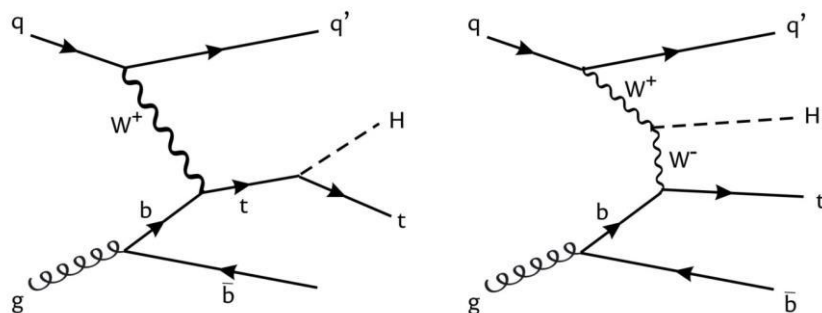
**Açar sözlər:** Hiqqs bozonunun yaranması, böyük adron sürətləndirici, Yukava qarşılıqlı sabiti, Monte-Karlo metodu, Neyron şəbəkələri.

**PACS:** 12.60.-i

## 1. GİRİŞ

2012-ci ildə ATLAS və CMS təcrübələrində Hiqqs bozonunun tapılması [1, 2] ilə Standart Modelin (SM) qurulması tamamlanmış hesab olunur. Son illər elementar zərrəciklər fizikasında aparılan təcrübələr əsasən iki problemin həllinə yönəlmişdir. Birinci problem SM-in parametrlərinin dəqiq ölçülməsi, ikincisi SM-in proqnozlarından kənarında olan hadisələrin izah edildiyi “yeni fizikanın” axtarışıdır. Xüsusi maraq doğuran məqam SM-in iki ən ağır hissəciyi olan Hiqqs bozonunun ( $H$ ) və top kvarkın ( $t$ ) xassələrinin bu zamana qədər yüksək dəqiqliklə öyrənilməməsidir.  $H$  və  $t$  [3] arasında qarşılıqlı təsirin gücü kompleks Yukava qarşılıqlı təsir sabiti  $y_t$  ilə müəyyən edilir. Yukava qarşılıqlı təsir sabiti SM-də (1) ifadəsi ilə təyin olunur.

$$y_t \propto m_t/v, \quad (1)$$



Şəkil 1.  $pp \rightarrow tH$  prosesi üçün Feynman diaqramları.

Eyni zamanda,  $y_t$  işarəsinin dəyişdirilməsi (faza dəyişikliyi  $180^\circ$ ) iki əlavənin konstruktiv interferensiyasına gətirib çıxarır və reaksiyanın en kəsiyini 74 fb-dan 848 fb qədər artırır [11].  $y_t$  fazasının tərsinə çevrildiyi model “Tərsinə çevrilmiş top birləşmə” (“Inverted Top Coupling”), ITC adlandırılır. Beləliklə,  $pp \rightarrow tH$  prosesinin reaksiya en kəsiyinin ölçülməsi Yukava birləşmə sabitinin işarəsinə həssasdır, SM və ITC modellərinin proqnozlarını yoxlamağa imkan yaradır.

Burada  $v$  Hiqqs sahəsinin vakuumdə ehtimal qiyməti-dir.  $y_t$ -nin mütləq qiyməti təcrübi olaraq baş verən  $pp \rightarrow tH$  yaranması [4, 5] üzrə müəyyən olunmuş, yaxud  $H \rightarrow \gamma\gamma$  parçalanma reaksiyasından ölçülmüşdür. Mürəkkəb fazada Yukava qarşılıqlı təsir sabiti hələ də məlum deyil, lakin tək top kvarkla uyğun Hiqqs bozonunun yaranma reaksiyasından  $pp \rightarrow tH$  ölçülməsi mümkündür. İlk dəfə F. Maltoni tərəfindən  $pp \rightarrow tH$  prosesinin öyrənilməsinin vacibliyi qeyd edilmiş və verilmiş proses ətrafında nəzəri təhlillər aparılmışdır [6-10]. Şəkil 1-də birinci tərtib həyəcanlanma nəzəriyyəsinə  $pp \rightarrow tH$  prosesinin diaqramları göstərilmişdir. Hiqqs bozonu  $tH$  və  $WWH$  prosesinin təpə nöqtələrində yaranır və göstərilən proseslərdən yalnız birincisi Yukava qarşılıqlı təsirinə uyğundur. SM-də iki diaqramın kompleks fazaları əks işarəlidirlər və həmin işarələr ümumi reaksiyanın en kəsiyini azaldan interferensiyaya gətirib çıxarır [7].

## 2. BÖYÜK HADRON KOLLAYDERİNDƏ $pp \rightarrow tH$ PROSESİNİN TƏDQIQI

Proton-proton toqquşmalarında Hiqqs bozonunun yaranması üçün əsas kanallar (en kəsiyinin azalmasına görə) gluon toqquşmaları  $gg \rightarrow H$ , vektor bozon birləşməsi  $VV \rightarrow H$  (burada  $V, W^-$  və ya  $Z$ -bozondur), vektor bozonu ilə birlikdə yaranma  $pp \rightarrow VH$  və top kvark cütü ilə birlikdə yaranmanı  $pp \rightarrow tH$  qeyd etmək olar.

Sadalanan yaranma kanallarının hamısı Böyük Adron Kollayderində (LHC) müşahidə edilmişdir. Tək top kvark  $pp \rightarrow tH$  ilə birlikdə beşinci ən böyük yaranma kanalı hələ ki, müşahidə edilməmişdir. BAK-nin ATLAS və CMS eksperimental təcrübələrində (hər bir təcrübə üçün)  $140 \text{ fb}^{-1}$  integrasiya olunmuş parlaqlığa uyğun statistik məlumatlar toplanmışdır. SM çərçivəsində statistik məlumatlar  $\approx 10.000$  siqnal hadisəsinə ( $pp \rightarrow tH$  reaksiyalarına) uyğundur. Bununla belə, BHK-də eksperimental təcrübənin şərtləri verilmiş siqnalın yalnız kiçik bir hissəsini qeyd etməyə imkan verir. Təsadüfi proseslərin tədqiqində əsas problem BHK-da son dərəcə yüksək fon səviyyəsinin olması ilə bağlıdır. 13 TeV enerjiddə qeyri-elastik qarşılıqlı təsirin ümumi en kəsiyi  $\sim 70 \text{ mb}$  [12, 13] təşkil edir ki, bu da  $pp \rightarrow tH$  siqnalının qiymətindən 12 tərtib böyükdür.

BAK-da  $b$ -kvarkın yaranması üçün daxili en kəsiyi qiyməti qeyri-elastik qarşılıqlı təsirin en kəsiyinin qiymətindən dörd tərtib kiçikdir [14, 15], buna baxmayaraq  $tH$  siqnalının qiymətindən səkkiz tərtib böyükdür. Ümumi şəkildə prosesin mexanizmi son halında  $b$ -kvarkların mövcudluğunu xarakterizə edir. Son dərəcə yüksək fon səviyyəsinə görə  $pp \rightarrow tH$  prosesini tədqiqi zamanı top kvarkın yarımlepton parçalanma rejimi  $t \rightarrow b\ell\nu_\ell$  optimaldır, burada  $\ell$  lepton kanalı boyunca parçalanan elektron, muon və ya tau leptonudur. Bu şəkildə baş verən parçalanma hadisələri neytrino tərəfindən daşınan və müəyyən dərəcədə çatışmayan eninə enerji və böyük eninə impulsu yüklü leptonun olması ilə xarakterizə olunur. Fon səviyyəsini azaltmaqla top kvarkın adron kanalı vasitəsilə parçalanmasını və Higgs bozonunun parçalanması ilə leptonlar və ya foton cütlərinin əmələ gəldiyi hadisələri seçməyə nail olmaq mümkündür. Bununla belə, Higgs bozonunun lepton və ya foton kanalı boyunca parçalanma ehtimallarının aşağı olması səbəbindən bu cür hadisələrin statistikasını kiçikdir.

Yarımlepton parçalanma rejimində siqnal seçərkən əsas fon prosesi top kvark və antikvark cütünün yaranmasıdır.  $pp \rightarrow tt$  prosesinin 13 TeV enerjiddə en kəsiyi 800 pb [16,17] təşkil edir. En kəsiyinin verilmiş qiyməti siqnal üçün dörd tərtib böyükdür. Növbəti ən mühüm fonlar  $pp \rightarrow tH$  və  $pp \rightarrow tZ$  [18, 19] prosesləridir ki, bu zaman hər bir prosesin en kəsiyi siqnalı böyüklük sırasına görə üstələyir. Top kvarkın yarımlepton parçalanmasından istifadə etməklə ümumi fon siqnalı bir neçə tərtib böyüyür. Əlavə seçim imkanları siqnal-fon nisbətini müəyyən qədər yüksəldir. Bununla belə, Standart Model tərəfindən proqnozlaşdırılan siqnalın yalnız fon səviyyəsini az miqdarda keçərək formalaşması mümkündür. Fonun statistik fluktuasiyaları  $\sqrt{B}$  ( $B$  fon hadisələrinin sayı) olduğunu nəzərə alsaq siqnal seçiminin keyfiyyət əhəmiyyətlik qiymətini  $Z = S/\sqrt{B}$  ifadəsi ilə xarakterizə etmək olar. Burada  $S$ -seçilmiş siqnal hadisələrinin sayıdır. Daha dəqiq siqnalın müəyyən olunması üçün  $Z > 5$  böyük qiymətlər qəbul edilir. CMS [20-22] və ATLAS təcrübələrində [23]  $pp \rightarrow tH$  reaksiyası geniş tədqiq edilmişdir. [20-21] ədəbiyyatlarında inteqral parlaqlığı  $36 \text{ fb}^{-1}$  olan və kiçik statistik məlumatlardan istifadə edilmişdir. [22-23] ədəbiyyatlarının nəticələri leptonlar və ya fotonlarla Higgs bozonunun parçalanması ilə məhdudlaşmış,

nəticədə yalnız çox az sayda  $pp \rightarrow tH$  hadisələri seçilmişdir. [20-23]-də istifadə edilən aşağı statistik göstəricilər Standart Model tərəfindən proqnozlaşdırılan siqnalı aşkarlamağa və ƏTQ modelinin siqnalını istisna etməyə imkan yaratmır.

Təqdim olunan işdə ATLAS və CMS təcrübələrində bu zamana qədər toplanmış tam statistik məlumatlardan ( $140 \text{ fb}^{-1}$ ) istifadə etməklə  $pp \rightarrow tH$  siqnalının aşkarlanması üçün riyazi modelləşdirmə üsullarından istifadə edilmişdir. Siqnal SM və ƏTQ proqnozlarına, əsas fon prosesləri də daxil olmaqla modelləşdirilmişdir. Eksperimental qurğuların tam şəkildə modelləşdirilməsi aparılmadan açıq mənbələrdə dərc olunan ATLAS və CMS-in xarakterik xüsusiyyətləri nəzərə alınmışdır.

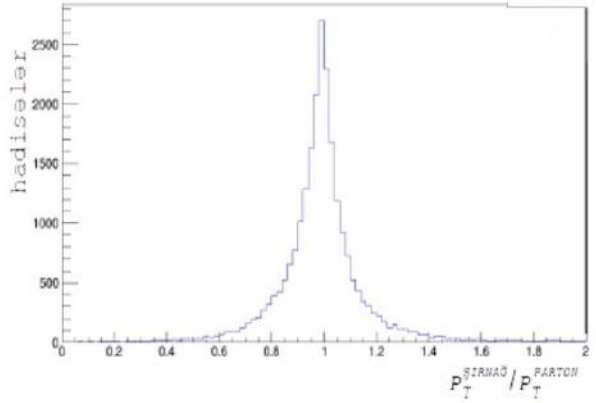
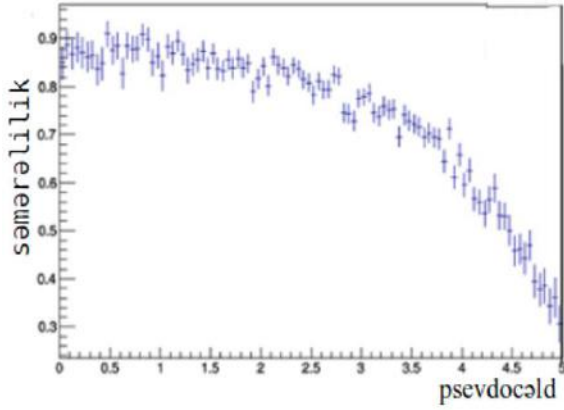
### 3. RİYAZİ MODEL

Fon və siqnal hadisələri “MadGraph” generatorunun MG5\_aMC\_v2.6.3.2 versiyasından istifadə etməklə Monte Karlo (MC) metodu ilə simulyasiya edilmişdir [24]. Hadisələr həyəcənlanma nəzəriyyəsinin birinci tərtibində modelləşdirilmişdir, lakin hər bir prosesin ümumi en kəsiyi növbəti tərtibdə hesablanmış dəyərə qədər normallaşdırılmışdır. Zərrəciklər dəstəsində parton paylanması CT10 məlumat bazasından istifadə etməklə təsvir edilmişdir [25]. Parton “selinin” artması və adronlaşma prosesləri PYTHIA 8 paketindən istifadə etməklə modelləşdirilmişdir [26]. Higgs bozonlarının parçalanması bütün parçalanmanın 58%-ni təşkil edən fundamental  $H \rightarrow bb$  rejimində, digər bütün zərrəciklər üçün SM-də mümkün olan bütün parçalanma modaları modelləşdirilmişdir. Hadisələrin təhlili zamanı yüklü leptonlar, neytrinolar və adron izləri nəzərə alınmışdır. Hadisə generatoru tərəfindən simulyasiya edilmiş qiymətlərdən yüklü leptonların impuls vektorlarının qiymətləri kimi istifadə olunmuşdur. Anti-kt alqoritmindən istifadə etməklə simulyasiya edilmiş fotonlar və uzunömürlü adronlar yenidən qurulmuşdur [27]. Alqoritm minimum eninə şırnaq impulsu  $p_T^{min} = 20 \text{ GeV}/c$ , şırnağın xarakterik eni  $R = 0.5$  parametrləri ilə tətbiq edilmişdir. Neytrinolar psevdocəldliyi  $|\eta| < 4,5$  şərtini ödəyən bütün şırnaqlardan istifadə edilməklə itən eninə impulslardan və psevdocəldliyi  $|\eta| < 2,7$  şərtini ödəyən şırnaqlara daxil olmayan bütün yüklü leptonlardan istifadə etməklə yenidən qurulmuşdur. Şırnağın bərpa effektivliyi şəkil 2-də verilmişdir.

Effektivlik adron şırnaqlarının yenidən qurulmasının mümkün olduğu, yaranan partonların nisbəti kimi müəyyən edilmişdir. Şırnaqla parton arasındakı bucaq məsafəsi  $\Delta R = \sqrt{\Delta\eta^2 + \Delta\phi^2}$ , 0,2-dən böyük olmamalıdır.  $pp \rightarrow tt$  hadisələrindəki effektivliyi müəyyən etmək üçün  $\leq 20 \text{ GeV}/c$  eninə impulsu  $b$ -kvarklardan istifadə edilmişdir. ATLAS və CMS qurğularının kalorimetrik sistemlərində şırnağın bərpa olunma ehtimalı  $\eta = 4,5$  psevdocəldlikdən yarıya qədər azalır. Şəkil 2-də yaranan partonun enerjisinin müvafiq şırnağın formalaşma enerjisi ilə müqayisəsi göstərilmişdir. ATLAS [28] və CMS [29] təcrübələrində 50-100 GeV/c eninə impulsu şırnaqlar üçün pikin eni 10% enerji ayırdetmə qabiliyyəti ilə müqayisədə uyğunluq təşkil edir. CMS təcrübəsində ayırdetmə qabiliyyəti yenidən qurulmuş şırnaqların və “həqiqi” zərrəciklərdən ibarət şırnaqların

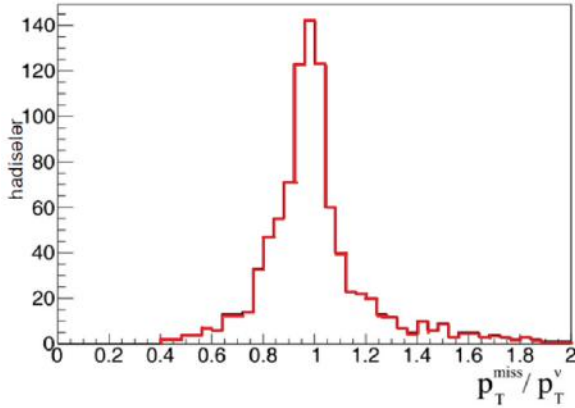
eninə impulslarının nisbətindən təyin olunmuşdur. Neytrinin eninə impulsu bütün şırnaqların və yüklü

leptonların ümumi eninə impulsuna əks vektor kimi yənidən qurulmuşdur.



Şəkil 2. a – Partonun psevdocəldiyinin funksiyası kimi adron şırnaqlarının bərpasının effektivliyi, b – m və onu yaradan partonun enerjilərinin nisbəti.

Şəkil 3-də neytrinin eninə impulsu yənidən qurulmuş və həqiqi qiymətlərinin müqayisəsi göstərilmişdir.



Şəkil 3. İtən eninə impuls  $p_T^{miss}$  və neytrinin həqiqi (yaranan) eninə impulsunun nisbəti.

Axın boyunca yönəldilmiş neytrino impulsunun komponentini ( $|p_z^v|$ ) müəyyən etmək üçün neytrino və aparıcı (ən yüksək enerjili) yüklü leptonun invariant kütləsi  $W$ -bozonunun nominal kütləsinə bərabərləşdirilmişdir [30]. Göstərilmiş şərt  $|p_z^v|$ -in iki fərqli qiymətinə uyğun gəlir. Bu qeyri-müəyyənlik, neytrino, aparıcı lepton və  $b$ -kvark şırnaqlarından birinin invariant

kütləsi ( $M_{b\ell\nu}$ ) top kvarkın kütləsinin orta qiymətinə  $m_t$  ən yaxın olduğu hal həll yolu kimi seçilərək aradan qaldırılmışdır [30]. Modelləşdirmə mexanizmi göstərir ki, bu halda mövcud alqoritm 75% halda  $|p_z^v|$  üçün düzgün həll yolu seçməyə imkan yaradır. Ədəbiyyatda, bir qayda olaraq, başqa alqoritmdən istifadə olunur və  $p_z^v$   $V$ -nun minimum qiyməti ilə həll olunur [31]. Seçilmiş alqoritm yalnız 63% halda düzgün həll imkanları yaradır. Standart Modeldə və  $\Theta TQ$  modelində  $pp \rightarrow tH$  prosesləri yalnız ümumi en kəsiyi ilə deyil, həm də kinematik paylanmalarda fərqləndiyindən, hər iki model üçün ayrı-ayrı hadisələr çoxluqları yaradılmışdır. Bundan əlavə,  $pp \rightarrow tt$ ,  $pp \rightarrow tbb$ ,  $pp \rightarrow ttH$ ,  $pp \rightarrow tZ$ ,  $pp \rightarrow ttZ$  fon prosesləri yaradılmışdır.  $pp \rightarrow tbb$  prosesi  $pp \rightarrow tt$  əsas fon prosesi ilə bağlı həyəcanlanma nəzəriyyəsinin növbəti tərtib düzəlişidir.  $tt \rightarrow bb$  hadisələrinin sayının vacibliyi növbəti bölmədə müzakirə olunacaqdır.  $pp \rightarrow tt$  prosesinin en kəsiyi həyəcanlanma nəzəriyyəsinin ikinci tərtibində hesablanmış və yüngül kvarkları ilə top kvarkların yaranmasını əhatə etmişdir. Əlavə olaraq, birinci tərtibdə hesablanmış en kəsiyini iki dəfə artırmışdır. PYTHIA generatoru tərəfindən parton selinin simulyasiyasında cüt  $b$ -kvarkların yaranması  $pp \rightarrow tbb$ , hadisələrinin ümumi sayına nəzərə çarpmaz dərəcədə təsir etmişdir. Simulyasiya edilmiş proseslərin en kəsikləri və yaradılan hadisələrin sayı cədvəl 1-də verilmişdir.

Cədvəl 1.

Simulyasiya edilmiş proseslərin en kəsikləri və yaradılan hadisələrin sayı. En kəsiklər parçalanma kanallarının şaxələnməsi nəzərə alınmaqla verilmişdir.

Proses	$tH$ (SM)	$tH$ ( $\Theta TQ$ )	$tt$	$tbb$	$ttH$	$ttZ$	$tZ$
En kəsik, $fb^{-1}$	10.8	97	306000	3600	72	23	18
Hadisələrin sayı	20000	20000	410000	40000	37000	37000	20000

$H \rightarrow bb$ ,  $Z \rightarrow bb$ ,  $t \rightarrow b\ell\nu$  parçalanmalarının ehtimalları nəzərə alınmaqla en kəsikləri müəyyən edilmişdir. İki top kvarklı hadisələrdə, kvarklardan yalnız biri yarımlepton kanal boyunca parçalana bilər, digərinin isə bütün modallar üzrə parçalanması qadağan olunmuşdur.

#### 4. HADİSƏLƏRİN SEÇİLMƏSİ

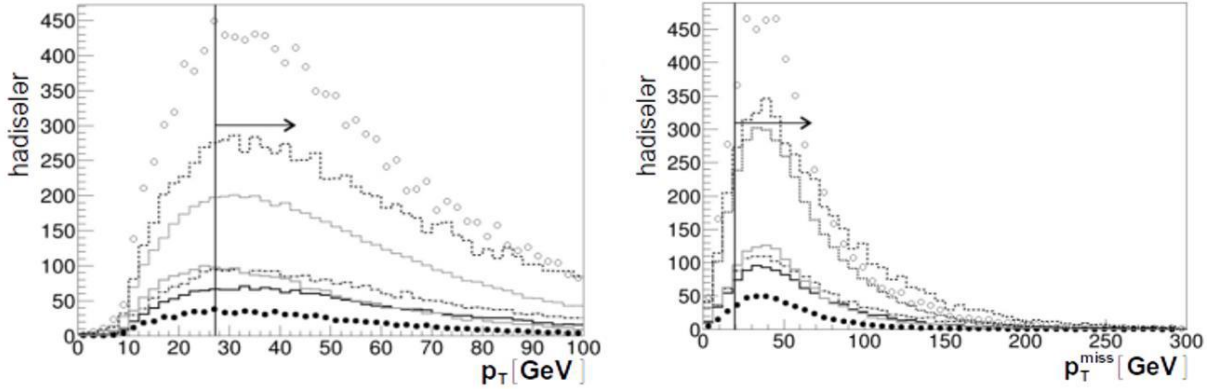
Yaradılan hadisələr, ilk növbədə, ATLAS və CMS təcrübələrinin eksperimental tələblərini təkrarlamaq, siqnal/fon nisbətini yaxşılaşdırmaq və siqnalın əhəmiyyətinin optimallaşdırılması məqsədi ilə həyata

keçirilmişdir. Eksperimental qurğuların xüsusiyyətlərinə uyğun gələn seçim şərtləri tətbiq edilmişdir. Digər halda, seçim meyarları  $S/\sqrt{B}$  maksimum siqnal effektivliyinə çatana qədər dəyişdirilmişdir.

#### 4.1. Yüklü leptonlar və neytrinolar

LHC-nin böyük parlaqlığı təcrübələrdə bütün hadisələrin yalnız kiçik bir hissəsini əlavə tədqiq üçün saxlamağa imkan verir. ATLAS və CMS təcrübələrində hadisənin qeydə alınması üçün əsas şərtlərdən biri eninə impulsu 25-27  $GeV/c$ -dən çox olan leptonun olmasıdır [32, 33]. Yaranan hadisələrdə verilmiş şərti nəzərə almaq üçün aparıcı leptonun 27  $GeV/c$ -dən az olmayan  $p_T^{lead}$  eninə impulsa malik olması lazımdır. Leptonlar ATLAS və CMS detektorlarının muon sistemlərinə uyğun olan  $|\eta| < 2.7$  psevdocəldlik aralığında

seçilmişdir. Çoxlu leptonun yaranması ilə fonun azaldılması üçün 15  $GeV/c$ -dən çox eninə impulsu ikinci leptonu özündə ehtiva edən hadisə ləğv olunmuşdur. Bu meyar “yumşaq” leptonlar ilə hadisələri ağır adronların parçalanmasından və Dalitz parçalanmasından qorumağa imkan yaradır.  $W$  bozonunun lepton parçalanma hadisələrində nəzərə alınmamış eninə impulsun xarakterik qiyməti  $p_T^{miss} M_{W/2} \approx 40 GeV$  bərabərdir. Eninə impuls ATLAS və CMS təcrübələrində 15-20  $GeV$  enerjilərdəki ayrılma ilə yenidən qurulmuşdur [34, 35]. Bütün bunları nəzərə alaraq  $p_T^{miss} > 20 GeV/c$  şərtini ödəyən hadisələr seçilmişdir. Bu halda nəzərə alınmamış eninə impuls  $p_T^{miss}$  aparıcı leptonun və eninə impulsu 20  $GeV/c$ -dən çox olan bütün şırnaqların impulslarının vektorial cəmindən ibarət olmaqla yenidən qurulmuşdur. Siqnal və fonun  $p_T^{lead}$  və  $p_T^{miss}$  dəyişənləri üzərində paylanması şəkil 4-də göstərilmişdir.

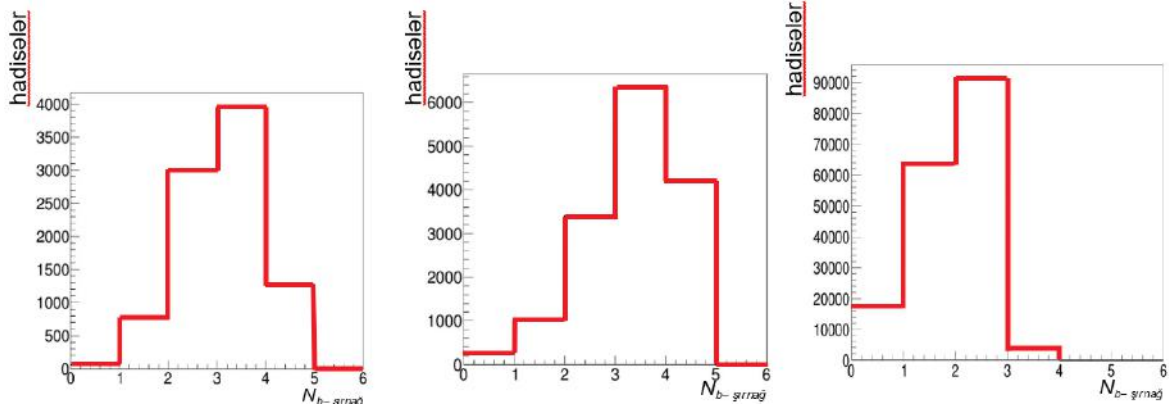


Şəkil 4. Hadisələrin aparıcı leptonun eninə impuls (a) və itən eninə impuls (b) üzrə paylanması. Oxşar hadisələrin seçilməsi üçün meyarlar: Standart Model siqnalı qara dairələrlə, ƏTQ siqnalı açıq dairələrlə,  $tt$  fonu nöqtəli əyri,  $tbb$  bütöv qara əyri,  $tZ$  bütöv boz əyri,  $tH$  kəsik əyri,  $ttZ$  qırıq-qırıq əyri ilə göstərilmişdir.

Verilənlər  $140 fb^{-1}$  inteqral parlaqlıqda gözlənilən siqnal hadisələrinin sayını göstərir. Siqnal və fonu eyni miqyasda göstərmək üçün fon hadisələrinin sayı ölçülmüşdür. Fon  $tt$  və  $tbb$  proseslərində uyğun olaraq 2000 və 200 dəfə azaldılmışdır.

#### 4.2. b-kvarklardan şırnaqlar

$pp \rightarrow tH$  prosesi  $H \rightarrow bb$  və  $t \rightarrow b\ell\nu\ell$  parçalanma modalarında təhlil olunmuşdur. Siqnal hadisələri son halda böyük eninə impulsu üç  $b$ -kvarkın olması ilə xarakterizə olunur. Əlavə olaraq, qlüon parçalanmasından dördüncü  $b$ -kvarkı mövcuddur (bax şəkil 1). Buna baxmayaraq,  $b$ -kvark bir qayda olaraq kiçik bir eninə impulsa malikdir və onun yaratdığı şırnaq əksər hadisələrdə yenidən qurulmur. Əsas fon prosesi top kvarkların cütlərinin yaranmasıdır. Bir yüklü leptonun seçilməsini nəzərə alsaq reaksiya  $pp \rightarrow tt \rightarrow (b\ell\nu\ell)(bqq')$  formasına malikdir. Burada  $qq'$   $ud$  və ya  $cs$  kvark-antikvark cütüdür. Beləliklə,  $tt$  fonu son halda iki  $b$  kvarkı ehtiva edir və  $b$  kvarklarından ( $b$  şırnaqlarından) ən azı üç şırnaq tələb etməklə nəzərə almaq olar.



Şəkil 5. Hadisələrin  $b$ -şırnaqlarının sayı üzrə paylanma spektrləri.

Buna baxmayaraq, müəyyən sayda  $tt$  hadisələri  $b$ -şırnaqları üçün sayı tələbini ödəyir. Birincisi,  $pp \rightarrow ttbb$  prosesində (bu, əsas  $pp \rightarrow tt$  prosesinə kvant düzəlişidir) son halda dörd  $b$  kvarkı mövcuddur. İkincisi,  $pp \rightarrow tt \rightarrow (b\ell\nu\ell)(bcs)$  hadisələrində  $c$ -kvark şırnağı təcrübi quraşdırmanın məhdud dəqiqliyinə görə səhv olaraq  $b$ -şırnaq kimi müəyyən edilə bilər. ATLAS [36] və CMS [37] təcrübələrində belə yanlış eyniləşdirmənin ehtimalı təxminən 12% təşkil edir. Bu effekti nəzərə almaq üçün  $c$ -kvarklardan olan şırnaqlar 12% ehtimalla  $b$ -şırnaq kimi qəbul edildi və daha sonra belə şırnaqlar  $b$ -kvarklardan olan həqiqi şırnaqlarla birlikdə analizdə istifadə edildi. Özündə üç və ya dörd  $b$ -kvark şırnaqları saxlayan hadisələr əlavə təhlil üçün seçilmişdir. Şırnaqlar ATLAS və CMS detektorlarının izləmə sistemlərinin qəbuluna təxminən uyğun gələn  $|\eta| < 2.5$  psevdocəldlik intervalında seçilmişdir. Şırnaqların ümumi sayı üçün (bütün növ kvarklar üçün) şərt qoyulmadı, çünki belə bir seçim signalın effektivliyinə təsir göstərmədi.

Hadisələrin  $b$ -şırnaqların sayı üzrə paylanması şəkil 5-də göstərilmişdir. Göründüyü kimi,  $tt$  hadisələrinin yalnız kiçik bir hissəsi seçim şərtini ödəyir. Buna baxmayaraq,  $pp \rightarrow tt$  prosesinin ən kəsiyi o qədər böyükdür ki, hətta bu şərt qoyulduqdan sonra da fon səviyyəsi signalın dəfələrlə yüksək olur.

$pp \rightarrow tH \rightarrow (b\ell\nu\ell)(bb)$  hadisələrini yenidən qurmaq üçün  $b$ -kvark şırnaqlarının hər biri ya top kvarkın, ya da Hiqqs bozonunun parçalanmasına aid edilməlidir. Üç  $b$ -kvarklı hadisələr üçün üç mümkün kombinasiya mövcuddur. Dörd belə şırnağın olduğu hadisələrdə ən yüksək eninə impulsu olan üç şırnaqdan istifadə edilmiş, dördüncüsü isə nəzərə alınmamışdır. Üç mümkün

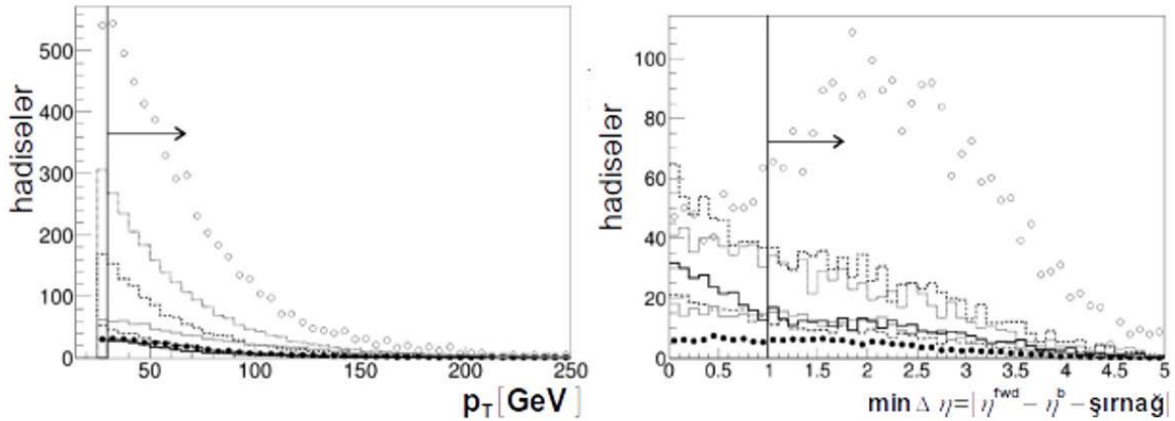
kombinasiyanın hər biri üçün  $\chi^2$  dəyəri aşağıdakı düsturdan istifadə etməklə hesablanmışdır.

$$\chi^2 = \left( \frac{M_{bb} - M_H}{\sigma_H} \right)^2 + \left( \frac{M_{b\ell\nu} - m_t}{\sigma_t} \right)^2$$

Burada  $M_H$  və  $m_t$  Hiqqs bozonunun və top kvarkın kütlələrinin orta qiymətləridir [30],  $M_{bb}$  Hiqqs bozonunun parçalanmasına təyin edilmiş iki şırnağın invariant kütləsi,  $M_{b\ell\nu}$  aparıcı lepton, neytrino və top kvarkın parçalanmasına uyğun gələn şırnağın kütləsi və  $\sigma_H$  və  $\sigma_t$  bu invariant kütlələrin yenidən qurulması zamanı simulyasiyada müəyyən edilən xətalardır. Əlavə analizdə  $\chi^2$  dəyərinin ən kiçik olduğu şırnaqların kombinasiyası istifadə edilmişdir. Şırnaqların düzgün kombinasiyası hadisələrin 82%-də tapılmışdır.

### 4.3. Ön şırnaq

Şəkil 1-dəki diaqramdan göründüyü kimi,  $pp \rightarrow tH$  hadisəsində impuls bir qayda olaraq psevdocəldliyin mütləq qiymətlərinin böyük oblastına doğru yönələn  $q'$  "müşahidəçi kvarkı" yaranır. Bu kvarkın yaratdığı şırnaq  $tH$  signalının xarakterik xüsusiyyəti kimi istifadə oluna bilər.  $|\eta| > 2.0$  ön psevdocəldlik aralığında  $p_T^{fwd} > 30 \text{ MeV}/c$  eninə impulsun ən azı bir şırnağı tapılan hadisə seçilmişdir. Psevdocəldlik və eninə impuls üçün meyar qiymətlər nümunə olaraq seçilmiş signalın qiyməti optimallaşdırılmaqla müəyyən edilmişdir. Ön şırnağın eninə impulsu üzrə hadisələrin paylanması Şəkil 6a-da göstərilmişdir.  $tt$  və  $ttbb$  proseslərinin fonu uyğun olaraq 1000 və 100 dəfə azaldılmışdır.



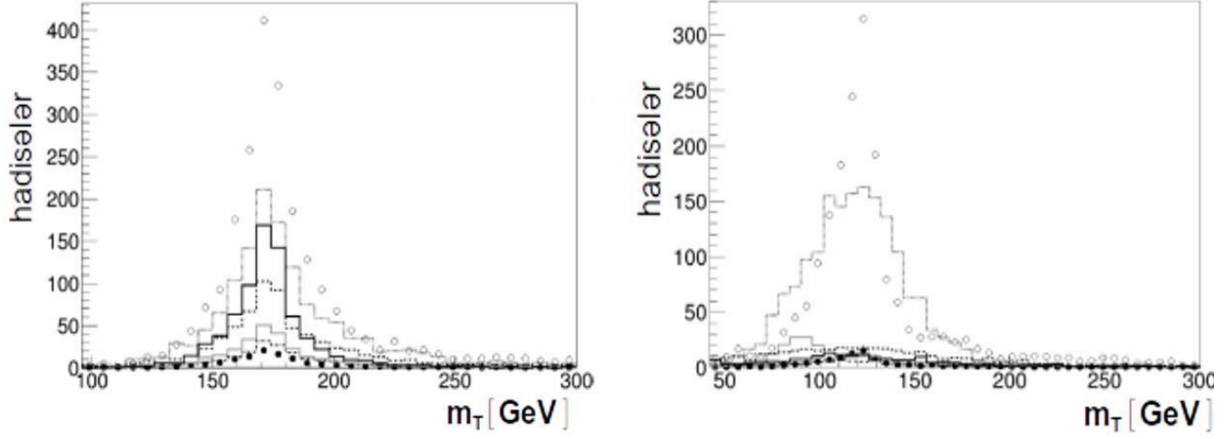
Şəkil 6. Ön şırnağın eninə impulsu üzrə hadisələrin paylanması.

ƏTQ modelinin xarakterik kinematik xüsusiyyəti hadisənin başqa zərrəciklərindən öndəki şırnağı ayıran "cəldlik fərqi"dir. Cəldlik fərqi  $\Delta\eta$  ön şırnaq və ona ən yaxın  $b$ -kvarkın psevdocəldliklərinin fərqi kimi hesablanmışdır.  $|\eta| > 2.0$  aralığında müxtəlif şırnaqların olduğu halda ən böyük eninə impulsu şırnaq istifadə edilmişdir. Hadisələrin  $|\Delta\eta|$  görə paylanması şəkil 6b-də göstərilmişdir.  $tt$  və  $ttbb$  proseslərinin fonu uyğun olaraq 250 və 25 dəfə azaldılmışdır. Göründüyü kimi, ƏTQ signalı paylanma formasına görə həm SM signalından, həm də fon proseslərindən fərqlənir. Hadisələr  $|\Delta\eta| > 1.0$  şərti daxilində seçilmişdir (meyar ƏTQ

modelindəki signal üçün optimallaşdırılmışdır).

### 4.4. Top kvarkın və Hiqqs bozonunun kütlələri

$b$ -kvark şırnaqlarının hər biri üst kvarkın və ya Hiqqs bozonunun parçalanması ilə əlaqəli olduğundan verilən məlumatlar parçalanmış zərrəciklərin invariant kütlələrini yenidən qurmaq üçün istifadə oluna bilər. Hadisələrin kütlələr üzrə paylanması şəkil 7-də göstərilmişdir.  $tt$  və  $ttbb$  proseslərinin fonu uyğun olaraq 100 və 10 dəfə azaldılmışdır.



Şəkil 7. Hadisələrin kütlələr üzrə paylanma diaqramları.

Cədvəl 2.

Hadisələrin seçim meyarlarının siyahısı

Meyarlar	Qiymət
Aparıcı leptonun eninə impulsu	$p_T^{lead} > 27 \text{ GeV}/c$
Digər leptonların eninə impulsu	$p_T^{sublead} < 15 \text{ GeV}/c$
İtən eninə impuls	$p_T^{miss} > 20 \text{ GeV}/c$
b-kvarkın şırnaqlarının sayı	$3 \leq N_b \leq 4$
Aparıcı şırnağın eninə impulsu	$p_T^{fwd} > 30 \text{ GeV}/c$
Sürət aralığı	$ \Delta\eta  < 1.0$
Hiqqz bozonun invariant kütləsi	$75 < M_H < 155 \text{ GeV}/c^2$
Top kvarkın invariant kütləsi	$140 < m_t < 210 \text{ GeV}/c^2$

Siqnalın və fonun top kvarkın invariant kütləsi üzrə paylanmaları praktiki olaraq üst-üstə düşür, çünki hər iki proses ( $tH$  və  $tt$ ) top kvarkın semileptonik parçalanmasını əhatə edir. Hiqqz bozonunun invariant kütləsi üçün siqnal və fon paylamaları fərqlidir, lakin bu fərq olduqca kiçikdir. Bu  $pp \rightarrow tt$  hadisələrində  $t \rightarrow bcs$  adron parçalanması zamanı Hiqqz bozonunun səhvən  $b$ -və  $c$ -kvarklardan yenidən yaranması ilə izah oluna bilər. Bu halda,  $W$  bozonunun enerjisinin təxminən yarısı  $s$  kvarka verilir və  $bc$  sistemini top kvark kütləsinin

$m_t - M_W \approx 130 \text{ GeV}$ -lik hissəsi təşkil edir. Daha çox analiz üçün Hiqqz bozonunun invariant kütləsinin  $75 < M_H < 155 \text{ GeV}/c^2$  aralığında olduğu hadisələr seçilmişdir. Bundan başqa,  $140 < m_t < 210 \text{ GeV}/c^2$  yumşaq kriteriyasından top kvarkın yarımlepton parçalanması daxil olmayan fon hadisələrini zəiflətmək üçün istifadə edilmişdir. Təsvir edilən seçim meyarları cədvəl 2-də ümumiləşdirilmişdir.

Hadisələrin seçilməsinin tətbiqi nəticələri cədvəl 3-də verilmişdir. Hər bir seçim meyarı üçün “kumulyativ səmərəlilik” yəni, bu meyarla və bundan əvvəlki bütün meyarlara cavab verən hadisələrin mütənasibliyi göstərilmişdir. Bütün seçim meyarlarına cavab verən hadisələrin sayı da  $140 \text{ fb}^{-1}$  inteqral parlaqlığı ilə göstərilmişdir.

Cədvəl 3-dən görüldüyü kimi, əsas fon  $pp \rightarrow tt$  əhəmiyyətli dərəcədə sıxışdırıla bilər (siqnal/fon nisbəti kəmiyyətin bir tərtibindən daha çox yaxşılaşır). Buna baxmayaraq,  $tt$  dominant fon prosesi olaraq qalır (fonun təxminən 90%-i). Fon Standart Modelin siqnalından üç tərtib böyükdür, halbuki ƏTQ modelinin siqnalı isə ümumi fondan təxminən 40 dəfə azdır.

Cədvəl 3.

Standart Modeldə və ƏTQ modellərində, həmçinin fon prosesləri üçün  $tH$  siqnalı üçün hadisə seçiminin effektivliyi. Son sətir  $140 \text{ fb}^{-1}$  inteqral parlaqlığına uyğun gələn hadisələrin sayını göstərir

Meyarlar	$tH$ (CM)	$tH$ (ƏTQ)	tt	ttbb	ttH	ttZ	tZbq
$p_T^{lead}, p_T^{sublead}$	55.8%	53.1%	49.8%	46.2%	45.0%	44.7%	53.5%
$p_T^{miss}$	49.4%	47.1%	44.4%	41.3%	40.6%	40.5%	47.9%
$N_b$	29.9%	28.9%	2.7%	10.9%	28.1%	27.5%	25.6%
$p_T^{fwd}$	19.9%	19.1%	0.9%	4.7%	11.4%	11.6%	17.3%
$ \Delta\eta $	16.3%	12.6%	0.5%	2.9%	6.8%	6.4%	11.2%
$M_H, m_t$	10.9%	8.0%	0.4%	0.9%	2.0%	1.8%	7.2%
Hadisələrin sayı	77	1519	59000	4400	206	58	182

#### 4.5. Siqnal və fon hadisələrinin təsnifatı üçün neyron şəbəkələrinin tətbiqi

Neyron şəbəkələri (NŞ) çoxvariantlı analiz məsələlərinin həllində müasir yanaşmalardan biri hesab olunmaqdadır. Neyron şəbəkəsi siqnal prosesinin təsnifatını təmin etmək üçün tətbiq edilir. Bütün fonların, eləcə də əsas fonların cəmi, giriş hadisələrinin “çox

təsnifatı” və digər proseslər nəzərə alınmalıdır. Çox təsnifatlı proses bir neçə ikili klassifikator vasitəsilə əldə edilir və onların hər biri dərin neyron şəbəkəsindən ibarətdir. Xüsusilə, ( $tH$ ),  $ttb$ ,  $ttc$ , və  $tt$ -zəyif siqnal prosesləri və digər fon proseslərinin cəmi şəklində ayrılır. Neyron şəbəkəyə daxil olmaların emalı (məlumatların oxunması, MC nuples və kinematik dəyişənlərin paylanması transformasiyası) üçün vasitə kimi TMVA

(ROOT çərçivəsinin bir hissəsi) və dərin öyrənmə API kimi Keras istifadə edilməklə həyata keçirilir. Siqnal dəyişənlərinin paylanma mərkəzi 0.0, eni 1.0 olan qaussuna gətirməklə Qauss çevrilməsi üzrə giriş dəyişənləri üçün tətbiq edilir. Tam ədədlərlə daxil olan dəyişənləri tətbiq etməklə normallaşmanın transformasiya paylanması  $[-1,1]$  diapazonuna gətirən xətti transformasiyadır. Sabit və operativ şəbəkənin tətbiq proseduruna imkan verən maksimum 30 giriş dəyişəni daxil edilmişdir. Neyron şəbəkəsi üçün müəyyən giriş dəyişənlərinin seçilməsi son neyron şəbəkəsinin performansına əsaslanmışdır və bütün təsnifat kateqoriyaları üçün müstəqil olaraq müəyyən olunmuşdur. 0.85-dən böyük korrelyasiya ilə paylanması olan dəyişənləri eyni giriş dəstində istifadə olunmur. Optimal şəbəkə strukturunun tədqiqi göstərir ki, ən yaxşı şəbəkə performansı (layların strukturu 30-90-90-90-30-2) bərabər sayda dayaz (layların quruluşu 30-300-2) olduqda əldə edilir. İkinci halda, neyronların qarşılıqlı əlaqəsinin sayının az olması və parametrlərinin daha az olması səbəbindən təlim daha sürətli və sabitdir.

#### 4.6. Neyron şəbəkə strukturunun optimallaşdırılması.

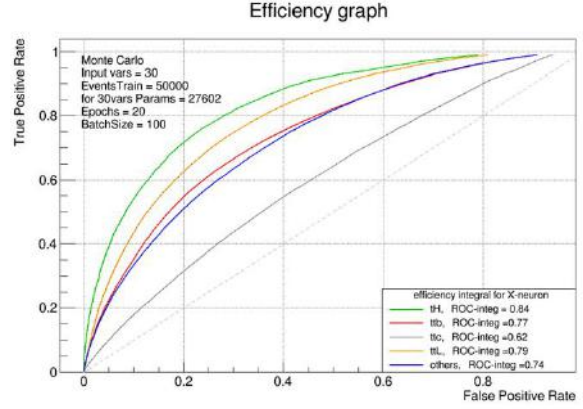
Bu yarım bölmədə ikili klassifikatorun müxtəlif parametrlərinin performansı araşdırılmışdır. Bu tədqiqatda əsas diqqət neyron təbəqələrinin quruluşu və müxtəlif aktivləşdirmə funksiyaları üzərində qurulmasıdır. Müxtəlif neyron şəbəkə strukturlarının təsirlərini öyrənmək üçün istinad parametrləri ilə müqayisədə aşağıdakı dəyişikliklər araşdırılır.

- Neyron təbəqələrinin sayı;
- Hər bir təbəqə üçün neyronların sayı;
- Adaptiv gradient və Stokastik Gradient Layıqlı (SGD) metodunun optimallaşdırılması;
- Tanh, Sigmoid və ReLU aktivləşdirmə funksiyası.

#### 4.7. Şəbəkə cavab paylamaları

Bu alt bölmədə şəbəkə cavablarının məlumatları və müxtəlif fon prosesləri ümumiləşdirilir. Məlumat və MC arasında  $ttb$ ,  $ttc$ ,  $tt$ -ışığı neyron reaksiyalarındakı

uyğunsuzluqlarının nisbi  $ttb$ ,  $ttc$ ,  $tt$ -zəif siqnallarındakı qeyri-müəyyənliklə əlaqədardır. Siqnal neyronunun cavabı 0.7-dən yüksək olduqda pozulur. Neyron reaksiyalarındakı kəsiklərdən istifadə edərək, siqnal və fon hadisələrinin bölgələri, hər bir bölgədəki hər bir proses maksimum həssaslıqla təyin ediləcək.

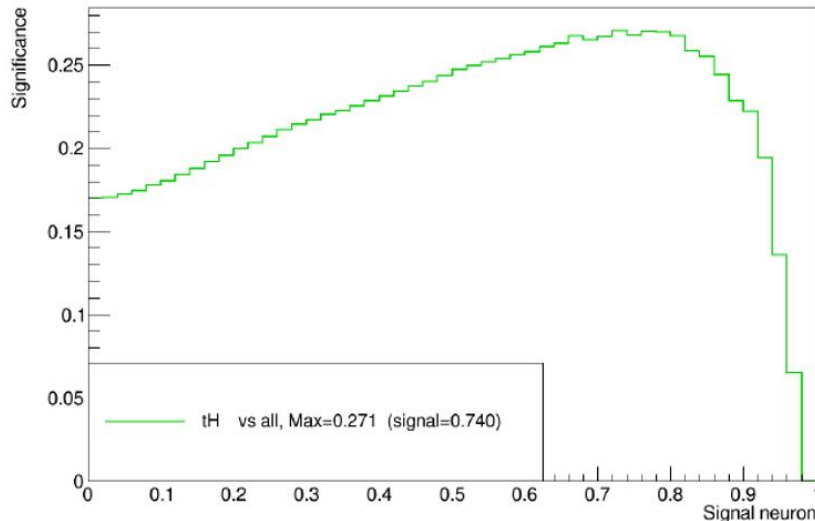


Şəkil 8. Müxtəlif proseslərin məhsulu olan neyronlar şəbəkəsinin cavablarına kəsiklər tətbiq etməklə əldə edilən ROC əyriyələri.

Şəkil 8-də müxtəlif proseslərin seçilməsinin effektivliyi göstərilmişdir. Digər proseslərin cəminin effektivliyi ROC-inteqrallarının müvafiq dəyərləri əsasında göstərilir.

#### Siqnalın əhəmiyyəti, təyini və fon regionları.

Siqnalın maksimum əhəmiyyəti  $tH$  neyronunun  $>0.74$  qiymətini seçmək üçün əldə edilir (şəkil 9). İnteqrasiya edilmiş parlaqlığı  $139 fb^{-1}$  olan 13 TeV-də  $pp$  toqquşmaları üçün şəbəkə tətbiq edilmədən siqnalın çıxarılması  $0.17\sigma$  və tətbiq edildikdən sonra isə  $0.27\sigma$  alınır. Beləliklə, eksperimental məlumatların həcmindən asılı olmayaraq, neyron şəbəkəsi siqnalın əhəmiyyətini 1.6 dəfə artırmağa imkan verir. Eyni məlumatlar SM-in potensial həssaslığına aiddir. Şəbəkənin reaksiyasına şərtlər qoyulduqdan sonra, eksperimental məlumatlar da simulyasiya edilmiş məlumatları yaxşı təsvir edir.



Şəkil 9. Siqnalın maksimum əhəmiyyətlik diaqramı.

## 5. NƏTİCƏLƏR

$pp \rightarrow tH$  siqnalının qiyməti Standart Model və ƏTQ model siqnalları üçün uyğun olaraq 0.30 və 6.0 müəyyən edilmişdir. Beləliklə, LHC-də bu günə qədər toplanmış məlumatların statistikasına SM siqnalını aşkar etmək üçün kifayət deyil. Bu siqnal yalnız statistikanı ən azı bir tərtib artırmaqla aşkar etmək mümkündür. Eyni zamanda, ƏTQ siqnalı mövcud məlumatlardan istifadə edərək etibarlı şəkildə aşkar

edilə və ya istisna edilə bilər. Top kvarkın Yukava qarşılıqlı təsir sabitinin kompleks fazası üçün iki mümkün həll variantından biri ( $0^\circ$  və ya  $180^\circ$ ) istisna ediləcək. Çox dəyişənli analiz metodundan istifadəsini edərək, standart metodun üstünlükləri göstərilmiş və siqnalın həqiqiliyinin 60% artmasına imkan yaranmışdır. Bundan əlavə, neyron şəbəkənin daha da optimallaşdırılması siqnalın həqiqiliyini daha da artıracaqdır.

- 
- [1] ATLAS Collab., Phys. Lett. B, 2012, 716.  
 [2] CMS Collab., Phys. Lett. 2012, B 716, 30.  
 [3] S. Weinberg. Phys. Rev. Lett. 1967, 19, 1264.  
 [4] A.M. Sirunyan et al. (CMS Collab.), Phys. Rev. Lett. 2018, 120, 231801.  
 [5] ATLAS Collab., Phys. Lett. 2019, B 784, 173.  
 [6] F.Maltoni, K.Paul, T.Stelzer and S.Willenbrock. Phys. Rev. D. 2001. 64, 094023.  
 [7] S. Biswas, E. Gabrielli, and B.Mele. JHEP, 2013, 1301, 088.  
 [8] M. Farina, C. Grojean, F. Maltoni, E. Salvioni and A. Thamm. JHEP, 2013, 1305, 022.  
 [9] P. Agrawal, S. Mitra and A. Shivaji. JHEP, 2013, 1312, 077.  
 [10] S. Biswas, E. Gabrielli, F. Margaroli and B. Mele. JHEP, 2013, 1307, 073.  
 [11] LHC Higgs Cross Section Working Group, Handbook of LHC Higgs Cross Sections: 4. Deciphering the Nature of the Higgs Sector (CERN, Geneva, Switzerland, 2016).  
 [12] M. Aaboud et al. (ATLAS Collab.), Phys. Rev. Lett. 2016, 117, 182002.  
 [13] CMS Collab., JHEP, 2018, 1807, 161.  
 [14] CMS Collab., JHEP, 2011, 1103, 90.  
 [15] ATLAS Collab., Eur. Phys. J. C, 2011, 71, 1846.  
 [16] ATLAS Collab., JHEP, 2019, 1904, 046.  
 [17] A.M. Sirunyan et al. (CMS Collab.), Eur. Phys. J. C. 2019, 79, 368.  
 [18] ATLAS Collab., Phys. Lett. B, 2018, 780, 557.  
 [19] A.M. Sirunyan et al. (CMS Collab.), Phys. Rev. Lett. 2019, 122, 132003.  
 [20] CMS Collab., JHEP, 2016, 1606, 177.  
 [21] A.M. Sirunyan et al. (CMS Collab.), Phys. Rev. D 99, 2019, 092005.  
 [22] A.D.A.M. Spallicci, J.A. Helayël-Neto, M. López-Corredoira and S. Capozziello. Eur. Phys. J. C, 2021, 81, 4.  
 [23] G. Aad et al. (ATLAS Collab.), Phys. Rev. Lett. 2020, 125, 061802.  
 [24] J. Alwall, R. Frederix, S. Frixione, V.Hirschi, F. Maltoni, O. Mattelaer, H.-S. Shao, T. Stelzer, P. Torrielli and M. Zaro. arXiv: 1405.0301.  
 [25] M. Guzzi, P. Nadolsky, E. Berger, H.L. Lai, F. Olness and C.-P. Yuan. arXiv: 1101.0561v1.  
 [26] T. Sjöstrand, S. Mrenna, and P. Skands. JHEP 0605, 026, 2006; Comput. Phys. Commun. 178, 852, 2008.  
 [27] M. Cacciari, G. P. Salam, and G. Soyez. arXiv: 0802.1189v2.  
 [28] ATLAS Collab., Eur. Phys. J. C, 2020, 80, 1104.  
 [29] V. Khachatryan et al. (CMS Collab.), JINST 12, 2017, P02014.  
 [30] P.A. Zyla et al. (Particle Data Group), Prog. Theor. Exp. Phys. 2020, 083C01.  
 [31] CMS Collab., Eur. Phys. J. 2017, C 77, 354.  
 [32] ATLAS Collab., Eur. Phys. J. 2020, C 80, 47.  
 [33] CMS Collab., JINST, 2017, 12, P01020.  
 [34] ATLAS Collab., Eur. Phys. J., 2018, C 78, 903.  
 [35] CMS Collab., JINST 10, P02006, 2015.  
 [36] ATLAS Collab., JINST 11, 2016, P04008.  
 [37] A.M. Sirunyan et al. (CMS Collab.), JINST 13, 2018, P05011.

**Nazim A. Huseynov**

### STUDY OF THE HIGGS BOSON PRODUCTION WITH A SINGLE TOP QUARK USING THE ARTIFICIAL NEURAL NETWORK TECHNOLOGY

The Large Hadron Collider has so far observed the production of the Higgs boson in four different channels. However, the production of the Higgs boson together with a single top quark has not yet been discovered. The study of this channel will make it possible for the first time to determine the complex phase of the interaction constant of the top quark with the Higgs boson. Using the “multivariate analysis method”, this paper shows the possibility of studying the production of the Higgs boson together with a single top quark and shows the advantages over the standard method. It has been established that the accumulated statistics of the Large Hadron Collider makes it possible to detect or exclude a model in which the constant of interaction of the top quark with the Higgs boson has the opposite sign compared to the prediction of the Standard Model.



**Назим А. Гусейнов**

**ИССЛЕДОВАНИЕ РОЖДЕНИЯ БОЗОНА ХИГГСА С ОДНИМ ТОП-КВАРКОМ  
С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОСЕТЕВОЙ ТЕХНИКИ**

На Большом адронном коллайдере на данный момент наблюдалось рождение бозона Хиггса в четырех различных каналах. Однако рождение бозона Хиггса совместно с одиночным топ-кварком до сих пор не обнаружено. Изучение этого канала позволит впервые определить комплексную фазу константы взаимодействия топ-кварка с бозоном Хиггса. С помощью «метода многомерного анализа» в данной работе показана возможность исследование рождения бозона Хиггса вместе с одиночным топ-кварком и показаны преимущества по сравнению со стандартным методом. Установлено, что накопленная статистика Большого адронного коллайдера позволяет обнаружить или исключить модель, в которой константа взаимодействия топ-кварка с бозоном Хиггса имеет противоположный знак по сравнению с предсказанием Стандартной модели.

*Qəbul olunma tarixi: 18.07.2022*