



فرماندهی کل قوا  
ستاد کل نیروهای مسلح  
دانشگاه و پژوهشگاه عالی دفاع ملی و تحقیقات راهبردی


برسمة تعالی  
جمهوری اسلامی ایران

مرکز نخبگان و استعداد های برتر نیرو های مسلح

## « گزارش پروژه تحقیقاتی نخبگان »

عنوان طرح پژوهشی	مدل جفت شدگی جدید در رویدادهای دو یا سه الکترونی کوارک بالا در شتابدهنده LHC
---------------------	---

### گزارش اول

کارگروه تخصصی: علوم پایه	
نام و امضای نماینده سازمان کاربر طرح: پژوهشگاه دانش های بنیادی	
نام و امضای مجری طرح: میثم قاسمی بستان آباد	
نام و امضای ناظر طرح: دکتر مجتبی محمدی نجف آبادی	
طبقه بندی طرح: ذرات بنیادی	
شماره و تاریخ نامه مصوبه طرح:	

1) عنوان طرح که به تایید مرکز نخبگان رسیده است :  
مدل جفت شدگی جدید در رویدادهای دو یا سه الکترونی کوآرک بالا در شتابدهنده LHC.

2) هدف طرح که به تایید مرکز نخبگان رسیده است :

2) شرح خدمات و مراحل انجام و گام های تحقیق و جدول زمان بندی که به تایید مرکز نخبگان رسیده است:

ردیف	مراحل و گام های اجرای پروژه (توضیح مختصر در مورد هر مرحله و گام)	درصد مرحله (گام)	زمان اجرا (ماه)											
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	مطالعه سیگنال و پس زمینه ها	۱۰٪	•											
2	تولید داده سیگنال و پس زمینه ها	۲۰٪			•									
3	محاسبه متغیرها با هوش مصنوعی	۳۰٪				•								
4	جداسازی سیگنال از پس زمینه ها	۲۰٪												
5	انجام تست های آماری	۲۰٪				•								
6	نگارش مقاله													•

4) مختصری از گزارش قبلی، اصلاحات درخواست شده مرکز نخبگان و اصلاحات انجام شده  
این گزارش اول میباشد.

5) خلاصه نتایج کسب شده در فاز جاری

سیگنال و پس زمینه ها بصورت دقیق مطالعه شده و تعداد مورد نیاز داده تولید شده است. در قدم بعد تمامی متغیرهای مربوط به ذرات نهایی محاسبه شده و تابع توزیع آنها ترسیم شده است. این متغیرها سپس بعنوان ورودی به مدل های هوش مصنوعی داده خواهند شد تا وزن های سیگنالی یا پس زمینه ای برای هر پدیده محاسبه گردد.

6) چنانچه از زمان بندی مصوب پروژه تاخیر دارد، علت تاخیر و چگونگی جبران تاخیر ذکر شود.

7) گزارش فاز جاری با فرمت و فصول ذکر شده در پیوست.

در صفحات بعدی ذکر شده است.

## فصولی که در گزارش طرح پژوهشی در موضوعات فنی و مهندسی باید درج شوند

**عنوان:** شامل عنوان طرح، نام محقق، نام ناظر یا استاد راهنما، تاریخ و نام سازمان کارفرمای طرح  
**چکیده:** شامل چکیده ای از اهمیت موضوع، کارهای دیگران، روش تحقیق، اهم نتایج بدست آمده و اهم تحلیلی نتایج. چکیده حداکثر در دو صفحه است.

**فهرست مطالب:** فهرست مطالب در سه سطح ذکر شود. با رعایت روش نگارش اعلام شده، در تهیه متن از heading در سه سطح 1، 2 و 3 استفاده شود تا در نهایت با انتخاب Table of content نرم افزار خود، فهرست را تهیه کند.

**مقدمه:** شرح اهمیت موضوع انتخاب شده در حداکثر سه صفحه

**مروری بر منابع:** اعم از کتب، مقالات، ثبت اختراعات، سایت های اینترنتی معتبر، استانداردهای نظامی و غیرنظامی، دستورالعمل ها و ...

**اهداف پروژه:** بیان اهداف پروژه و علت انتخاب پروژه با توجه به کارهای انجام شده ذکر شده در بخش مروری بر منابع

**روش تحقیق:** شامل فلوچارت و توضیح فرایند تحقیق، مواد اولیه، روش دقیق انجام آزمایشات، توضیح نوع و مدل دستگاه های مورد استفاده و محلی که دستگاه مورد استفاده واقع شده است،

**نتیجه آزمایشات:** توضیح نتایج همراه با اشکال و نمودارها

**تحلیل نتایج:** با استفاده از نتایج بدست آمده و کمک از کارهای دیگران که در بخش مروری بر منابع آمده است، نتایج تحلیل شوند.

**نتیجه گیری:** میزان مطابقت نتیجه آزمایشات با اهداف پروژه بخوبی بیان شود.

**منابع:** فهرست منابعی که در فصول قبل استفاده شده است.

**ضمانم و پیوست ها:** چنانچه در انجام تحقیق از نرم افزار استفاده شده، نحوه استفاده از نرم افزار گفته شود.

چنانچه از روش تحقیق خاصی استفاده شده، روش در پیوست توضیح داده می شود. ضمانم و پیوست ها

اجباری نیستند.

در تدوین گزارش های میانی و نهایی از فرمت زیر استفاده شود:

فونت ها	
B Lotus14	عنوان طرح
Times New Roman 12	
B Titr 14	تیتراهای اصلی متن
B Titr 13	زیرتیترها
B Lotus14	متن اصلی
B Titr 10	تیترا اشکال، جداول و نمودارهای داخل متن
B Lotus12	متن جداول
B Lotus10	ارجاعات فارسی پایین صفحه
Times New Roman 10	ارجاعات لاتین پایین صفحه
B Zar14	فهرست منابع و مآخذ فارسی و عربی
Times New Roman 14	فهرست منابع و مآخذ لاتین

مرکز نخبگان واستعدادهای برتر نیروهای مسلح



عنوان: مدل جفت شدگی جدید در رویدادهای دو یا سه الکترونی کوارک بالا در شتابدهنده LHC

نام محقق: میثم قاسمی بستان آباد

نام ناظر یا استاد راهنما: دکتر مجتبی محمدی نجف آبادی

تاریخ: ۱۴۰۱/۱۲/۵

نام سازمان کارفرمای طرح: پژوهشگاه دانش های بنیادی

در این پروژه ما به دنبال یافتن اثرات تغییر طعم در کوارک بالا [۱] [۲] مانند تبدیل کوارک سر به کوارک بالا در برخوردهای پروتون پروتون در شتابدهنده های هادرونی بزرگ در آزمایشگاه سرن میباشیم. این پدیده ها تنها در تصحیحات بالا در نظریه مدل استاندارد [۳] امکان پذیر میباشند. هرگونه (کشف احتمالی) سیگنال از تغییر طعم در بخش کوارک سر میتواند نشان دهنده طعم جدید لپتونی در فیزیک ماوراء مدل استاندارد باشد. این موضوع باعث شده تا تحقیقات گسترده ای در دو قالب تئوری و آزمایشگاهی در زمینه کشف تغییر طعم در آزمایشگاه های بزرگ دنیا از جمله CMS, ATLAS [۴] در LHC در سرن انجام شود. ذرات تشکیل دهنده سیگنال در این پروژه، سه لپتون با طعم یکسان و بار الکتریکی متفاوت، کوارک پایین و یک کواک سبک میباشند. وجود دو یا سه لپتون با تکانه عرضی بالا و باردار و کوارک پایین امکان داشتن راندمان بالا (در بازسازی پدیده های سیگنالی) با استفاده از گیراندازی لپتون را فراهم مینماید. مهمترین پس زمینه های مدل استاندارد در این آنالیز عبارتند از: جفت کوارک سر (که از پدیده هایی مثل نابودی کوارک-ضدکوارک و همجوشی گلئون-گلئون میآیند. جفت کوارک سر سپس به سایر کانالها تبدیل میشوند: مانند دو لپتونی، تک لپتونی و تمام هادرونی)، رویداد های تک لپتون ناشی از واپاشی کوارک سر، و تک لپتون کوارک سر به همراه بوزون Z یا W. شبیه سازهای مونت کارلو در این پروژه برای تولید داده های سیگنال و پس زمینه استفاده شده اند. پدیده های آبشار پارتونی، رویدادهای زمینه ای و برهم کنش ذرات نهایی با ابعاد آشکارساز تماما با شبیه سازهای تخصصی شبیه سازی شده اند. برای جدا کردن سیگنال از پس زمینه های نظریه مدل استاندارد، میتوان از انتخابات سه لپتونی به همراه کوارک پایین و یا برش پنجره ای بر روی جرم کوارک سر استفاده کرد. روشهای متعددی برای کاهش دادن بیشتر پس زمینه های احتمالی و افزایش راندمان سیگنال وجود دارد که میتوان به بکارگیری وزن های هوش مصنوعی حاصله از الگوریتم درختی یا شبکه عصبی اشاره کرد. از دیگر موارد برای بهبود آنالیز، تعریف ناحیه های حساس به سیگنال برای سناریوهای اسکالر، برداری و تنسوری میباشد. در قدم نهایی نیاز میباشد تا مقادیر پی برای سیگنال و پس زمینه ها اندازه گیری و سپس با استفاده از روش های تست آماری مقادیر ممنوعه با احتمال ۹۵٪ برای مقیاس جرمی فیزیک جدید گزارش شود. هرگونه کشف احتمالی در این تحقیق به درک عمیقتر ما از تغییر طعم در کوارک بالا منجر میشود و نتایج این پروژه میتواند در دیگر آنالیزهای ماورای مدل استاندارد مورد استفاده قرار بگیرد.

مدل استاندارد (SM) فیزیک ذرات در توصیف ذرات بنیادی و برهمکنش های آنها بسیار موفق بوده است. با این حال، ناقص بودن آن شناخته شده است، و هنوز سوالات بی پاسخ زیادی مانند منشأ جرم ذرات بنیادی (مشکل سلسله مراتب ذره هیگز)، ماهیت ماده تاریک، و عدم تقارن ظاهری بین ماده و پادماده در جهان وجود دارد. یکی از راه های ممکن برای بررسی این سوالات، مطالعه فرآیندهای نادری است که به فیزیک جدید فراتر از مدل استاندارد (BSM) بسیار حساس هستند. یکی از این فرآیندها تغییر طعم کوارک بالا است که پتانسیل اثبات کردن فیزیک جدید فراتر از مدل استاندارد را دارد.

کوارک بالا سنگین ترین ذره بنیادی شناخته شده با جرم حدود 173 گیگا الکترون ولت است. کوارک بالا به دلیل جرم زیادش در مدل استاندارد نقش ویژه ای دارد. از طریق نیروهای قوی، ضعیف و الکترومغناطیسی با ذرات دیگر برهمکنش می کند و برهمکنش های آن با تبادل ذرات مجازی، مانند بوزون های  $W$  و  $Z$ ، که خود تابع محدودیت های مدل استاندارد هستند، واسطه می شوند. با این حال، در بسیاری از توسعه های مدل استاندارد، ذرات و برهمکنش های جدیدی می توانند ظاهر شوند و اینها می توانند نحوه تعامل کوارک های بالا با ذرات دیگر را تغییر دهند. یکی از اصلاحات ممکن تغییر طعم کوارک بالا است، که در آن یک کوارک بالا می تواند طعم خود را تغییر دهد با نوع کوارکی که با آن تعامل دارد، به گونه ای که در مدل استاندارد مجاز نیست.

تغییر طعم تاپ کوارک می تواند از طریق تبادل ذرات جدید مانند بوزون های هیگز، ذرات ابرمتقارن (Supersymmetry) یا گراویتون های ابعاد بالاتر اتفاق بیفتد، که می توانند با کوارک های بالا و دیگر کوارک ها به گونه ای جفت شوند که امکان برهمکنش های تغییر طعم را فراهم کنند. این فعل و انفعالات در مدل استاندارد به شدت محدود شده اند، اما می توانند در برخی سناریوهای جدید فیزیک، مانند ابرتقارن یا ابعاد اضافی، تقویت شوند. بنابراین مشاهده تغییر طعم کوارک بالا نشانه واضحی از فیزیک جدید فراتر از مدل استاندارد خواهد بود.

مطالعه تغییر طعم کوارک بالا به چند دلیل مهم است. اول، می تواند آزمایش مستقیمی از فیزیک جدید فراتر از مدل استاندارد ارائه دهد. بسیاری از توسعه های مدل استاندارد، مانند ابرتقارن، ابعاد اضافی، یا مدل های هیگز ترکیبی، وجود ذرات و برهمکنش های جدیدی را پیش بینی می کنند که می توانند نحوه تعامل کوارک های بالا با ذرات دیگر را تغییر دهند. با اندازه گیری نرخ تغییر طعم کوارک بالا، آزمایشگران می توانند ردپای این ذرات و برهمکنش های جدید را جستجو کنند و پارامترهای این مدل های فیزیک جدید را محدود کنند.

دوم، تغییر طعم کوارک بالا می تواند بینشی در مورد ماهیت بوزون هیگز [۵] ارائه دهد. بوزون هیگز مسئول جرم دادن به ذرات بنیادی است، اما خواص آن هنوز به خوبی شناخته نشده است. در برخی از مدل ها، بوزون هیگز می تواند واسطه تغییر طعم کوارک بالا باشد، و جفت شدن آن با کوارک بالا و کوارک های دیگر می تواند در حضور فیزیک جدید اصلاح شود. با اندازه گیری نرخ تغییر طعم کوارک بالا و مقایسه آن با پیش بینی های مدل استاندارد، آزمایشگران می توانند خواص بوزون هیگز را آزمایش کنند و ماهیت مکانیسمی را که به ذرات بنیادی جرم می دهد، بررسی کنند.

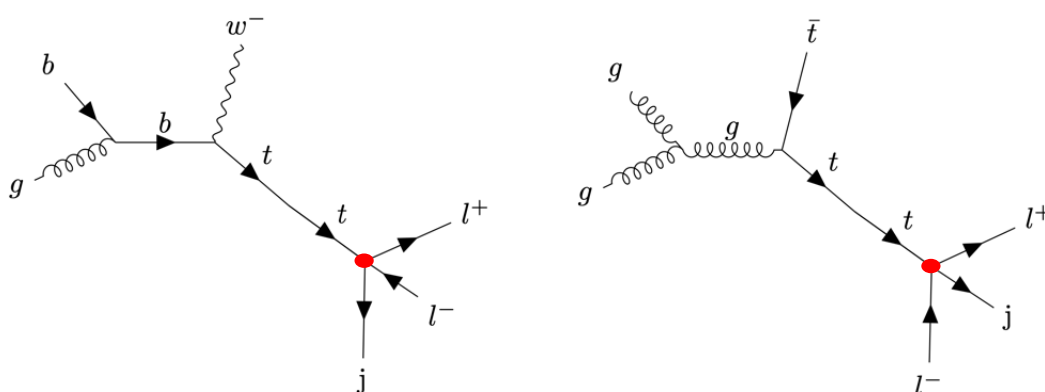
سوم، تغییر طعم کوارک بالا می تواند اطلاعاتی در مورد ماهیت ماده تاریک ارائه دهد. ماده تاریک ماده ای مرموز است که حدود 85 درصد از ماده جهان را تشکیل می دهد، اما خواص آن هنوز ناشناخته است. بسیاری از مدل های ماده تاریک وجود ذرات و فعل و انفعالات جدیدی را پیش بینی می کنند که می توانند واسطه تغییر طعم کوارک بالا باشند. با اندازه گیری نرخ تغییر طعم کوارک بالا و مقایسه آن با پیش بینی های مدل های ماده تاریک، آزمایشگران می توانند ردپای ماده تاریک را جستجو کرده و خواص آن را بررسی کنند.

در نتیجه، مطالعه تغییر طعم کوارک بالا یک راه مهم برای کاوش در فیزیک جدید فراتر از مدل استاندارد است که با اندازه گیری نرخ تغییر طعم کوارک بالا و مقایسه آن با پیش بینی ها (predictions) قابل بررسی می باشد.



یکی از مدل‌های موفق در فیزیک ذرات با انرژی بالا، مدل استاندارد ذرات است. شتاب‌دهنده بزرگ پروتون - پروتون LHC واقع در CERN که در محدوده انرژی ترا الکترون ولت TeV کار می‌کند آزمون‌های تجربی بسیاری را بر روی مدل استاندارد ذرات انجام داده است. ساختار کلی برخورد دهنده بزرگ هادرونی (LHC) بصورت برخورد دهنده‌ای دایروی است که دو باریکه پروتون را با انرژی  $7+7$  TeV به هم می‌کوبد. تونل LHC به طول ۲۷ کیلومتر است که در ۴ نقطه از آن دسته‌های پروتون با انرژی مرکز جرم  $14$  TeV به هم برخورد می‌کنند و امکان تولید ذرات سنگین‌تر را فراهم می‌آورند. این شتاب‌دهنده امکان مطالعه موضوعات زیادی از جمله؛ فیزیک ذره بوزون هیگز، سایر مدل‌های فرا استاندارد از جمله ابر تقارن، فیزیک ذره B و فیزیک یون‌های سنگین (پلاسمای کوارک - گلئون) را فراهم می‌آورد. همان‌طور که از نظر تئوری می‌دانیم، مدل استاندارد در پاسخگویی به تعدادی سؤال بنیادین ناتوان است. این ناتوانی مدل استاندارد، فیزیکدانان تئوری را بر آن داشت تا مدل‌هایی فراتر از مدل استاندارد فیزیک ذرات بنیان کنند که از آن جمله می‌توان به تئوری ابر تقارن و تئوری ریسمان اشاره کرد. در این پروژه ما به دنبال تغییر طعم در کوارک بالا مانند تبدیل کوارک سر به کوارک بالا می‌باشیم. این پدیده‌ها تنها در تصحیحات بالا در نظریه استاندارد مدل امکان پذیر می‌باشند. هرگونه (کشف احتمالی) سیگنال از تغییر طعم در بخش کوارک سر می‌تواند نشان دهنده طعم جدید لپتون‌ی در فیزیک ماوراء استاندارد مدل باشد.

ذرات تشکیل دهنده سیگنال در این پروژه سه لپتون با بار الکتریکی متفاوت، یک کوارک پایین و یک کوارک سبک می‌باشند. شکل ۱ نمودار فاینمن سیگنال مورد مطالعه را نشان می‌دهد که  $l$  نشانگر الکترون در ذرات نهایی است.

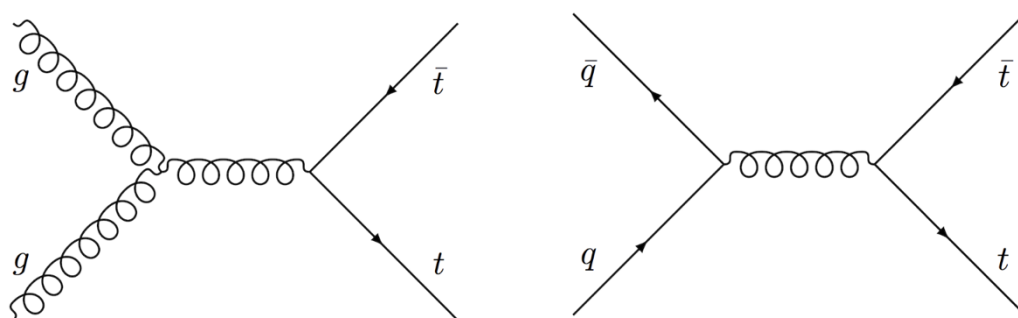


شکل ۱. نمودار فاینمن سیگنال با تغییر طعم کوارک سر. شکل سمت راست سیگنال  $tt$  و شکل سمت چپ سیگنال  $tW$  می‌باشند. تنها الکترون‌ها بعنوان لپتون در این آنالیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند. راس قرمز رنگ نشان دهنده راس مدل غیر استاندارد برای واپاشی کوارک سر می‌باشد.

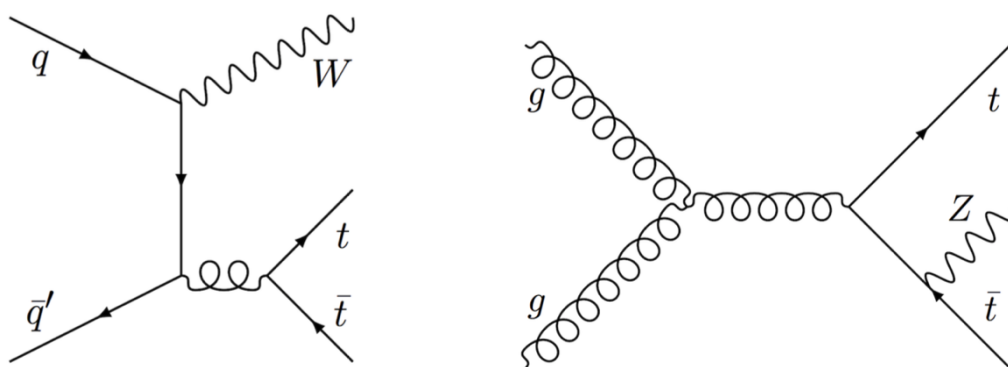
وجود دو یا سه لپتون با تکرانه عرض بالا ( $P_T$ ) و باردار و کوارک پایین امکان داشتن راندمان بالا با استفاده از گیراندازی لپتون (di-lepton trigger) فراهم مینماید. مهمترین پس زمینه های مدل استاندارد در این آنالیز عبارتند از:

- جفت کوارک top که از پدیده هایی مثل نابودی کوارک - ضدکوارک و همجوشی گلوئون - گلوئون تولید میشوند. جفت کوارک سر سپس به سایر کانالها تبدیل میشود: مانند دو لپتونی، تک لپتونی و تمام هادرونی. یکی از لپتون ها در این پس زمینه بصورت جعلی میباشد مانند لپتون جعلی از تابش و یا جتی که بصورت الکترون بازسازی شده است. شکل ۲ نمودار فاینمن تولید جفت کوارک سر را نشان میدهد.
- جفت کوارک سر به همراه بوزون W یا Z. در این مدل پس زمینه، بوزون ها به صورت لپتونی واپاشی میکنند تا تعداد ۳ الکترون در فضای نهایی داشته باشیم. شکل ۳ نمودار فاینمن تولید جفت کوارک سر به همراه بوزون W یا Z را نشان میدهد.
- تک کوارک سر به همراه بوزون Z که بوزون به صورت لپتونی واپاشی میکند.

از دیگر پس زمینه ها میتوان به چهار کوارک سر و دو بوزونی مانند  $WZ$  که بصورت لپتونی واپاشی میکنند اشاره کرد. هدف اصلی این پروژه تولید سیگنال و پس زمینه ها و جداسازی آنها به شکل مطلوب با استفاده از روش های هوش مصنوعی برای انجام تست های آماری میباشد.



شکل ۲. نمودار فاینمن پس زمینه جفت کوارک سر. شکل سمت راست نابودی کوارک - ضدکوارک و شکل سمت چپ همجوشی گلوئون - گلوئون را نشان میدهند.



شکل ۳. نمودار فاینمن پس زمینه جفت کوارک سر به همراه بوزون W یا Z.

شتابدهنده LHC دارای دو آشکارساز چند منظوره است که یکی CMS (سیم لوله فشرده میون) و دیگری ATLAS می‌باشند. همچنین دو آزمایشگاه LHCb برای مطالعه‌ی فیزیک کوارک b و ALICE (آزمایش برخورد یون‌های بزرگ) برای مطالعه‌ی پلاسمای کوارک - گلئون در اطراف LHC ساخته شده‌اند و از داده‌های برخورد پروتون - پروتون (pp) استفاده می‌کنند. این آشکارسازها موضوعات زیر را بررسی می‌کنند:

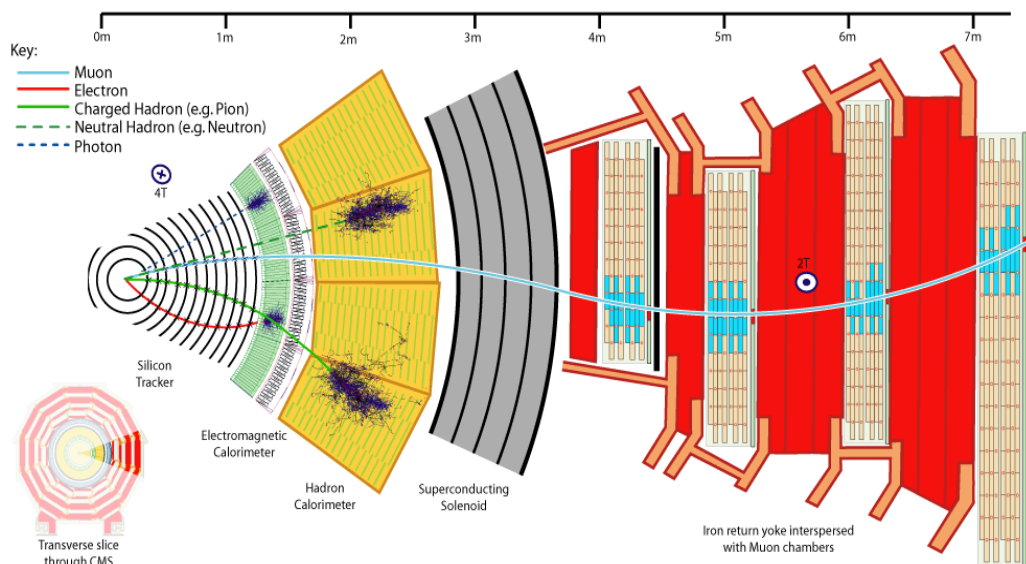
مدل استاندارد SM: آزمایش دقت پارامترهای مدل استاندارد بخصوص در مورد کوارک سر (top) شکست خود به خودی تقارن EWSB: مطالعه‌ی شکست تقارن الکترو ضعیف در نظریه استاندارد با جستجو کردن برای یافتن يك یا چند بوزون هیگز

BSM: مطالعه تئوری‌های مختلف پیرامون توسعه مدل استاندارد ذرات مانند ابعاد اضافی، ابر تقارن (SUSY)، ترکیب شدگی<sup>۱</sup> و ...

پلاسمای هادرونی: مطالعه ویژگی‌های پلاسمای کوارک - گلئون در برخورد یون‌های سنگین. در برخوردهای سنگین از پرتوهای یون سرب استفاده می‌شود. انرژی مرکز جرم هسته - هسته در این برخوردها ۵.۵ TeV می‌باشد.

CMS آشکارسازی سیم‌لوله‌ای است که امکان پوشش  $4\pi$  رادیان را فراهم می‌کند. بدلیل اینکه میون‌ها می‌توانند به داخل آشکارساز نفوذ کنند و نشانگر خوبی برای بسیاری از رویدادهای مهم در CMS هستند. يك سیستم میونی دقیق و کارآمد در نظر گرفته شده است. بطور کلی برای آشکارسازی ذرات باردار به يك میدان مغناطیسی قوي نیازمندیم. میدان مغناطیسی در CMS معادل ۴ تسلا و برای ATLAS معادل ۴ تسلا می‌باشد. برای آشکارسازی ذرات خنثی و تشخیص طعم برخی از ذرات باردار، CMS از انرژی سنج‌های الکترومغناطیسی و هادرونی استفاده کرده است. انرژی سنج الکترومغناطیسی می‌تواند الکترون و فوتون و مؤلفه‌های الکترومغناطیسی جت‌ها را آشکارسازی کند. از سویی دیگر انرژی سنج هادرونی انرژی عرضی از دست رفته  $E_T^{miss}$  را گزارش می‌کند. دقت اندازه‌گیری انرژی در انرژی سنج هادرونی نکته بسیار مهمی می‌باشد زیرا برای آشکارسازی بوزون هیگز از کانال کوارک bb، ابر تقارن و اندازه‌گیری جرم کوارک سر این دقت فاکتور بسیار مهمی می‌باشد. شکل ۴ نمای عرضی آشکارساز CMS را نشان می‌دهد. هر دو آشکارساز بصورت پیوسته در حال به روزرسانی برای بالا بردن راندمان بازسازی ذرات و پایین آوردن نرخ کانال‌های نویزی می‌باشند.

<sup>۱</sup> - Compositeness



شکل ۴. نمای عرضی از CMS. میون از تمام قسمت ها عبور کرده و مسیرش بدلیل وجود میدان مغناطیسی در داخل و خارج از سلونوئید منحرف شده است.

مولد های مونت کارلو Monte Carlo generators در این آنالیز برای تولید داده های سیگنال و پس زمینه استفاده شده اند. این شبیه سازها به دو صورت تمام (تمام فرآیندهای تولید داخل شبیه ساز انجام میشود و نیازی به مولد دیگر نیست) یا تخصصی قابل استفاده میباشند. در بسیاری از آنالیزهای ماوراء استاندارد مدل، شبیه ساز MADGRAPH [۶] برای تولید سیگنال استفاده میشود. سپس خروجی این شبیه ساز به سایر شبیه سازهای تخصصی مانند PYTHIA ارسال شده تا بتوان پدیده هایی مثل آبشار پارتونی Parton Shower یا رویدادهای زمینه ای Underlying Events را شبیه سازی کرد. در قدم آخر، خروجی به کتابخانه DELPHES [۷] فرستاده شده تا برهمکنش ذرات نهایی با ابعاد آشکار ساز CMS شبیه سازی شود. سایر اقدامات نظیر بازسازی الکترونها، میونها و جت ها در این مرحله اتفاق میافتد. به طور دقیق میزان ۳ میلیون داده برای جفت سیگنال کوارک بالا  $u$  و کوارک افسون  $c$  تولید شده است. داده های تولید شده برای پس زمینه ها به اندازه است که وزن تک تک فرآیندها نزدیک به عدد ۱ میباشد. بازسازی ذرات نهایی نیز با استفاده از پیکربندی CMS high luminosity در آشکار ساز DELPHES انجام شده است. این پیکربندی کاملاً ایده آل برای بازسازی ذرات در فاز نهایی به روزرسانی آشکار سازها که درخشندگی بسیار بالایی پیشبینی شده میباشد. تمامی داده های تولید شده در قالب فایل های root قابلیت ارسال به سایر زبان های برنامه نویسی از جمله python برای انجام تست های آماری و یا محاسبه وزن های هوش مصنوعی را دارا میباشند. این فایل ها در حال حاضر در سرورینگ مؤسسه حفظ و در صورت نیاز در اختیار سایر فیزیکدان های مشتاق به بررسی تغییر طعم کوارک سر قرار میگیرد.

برای جدا کردن سیگنال از پس زمینه های نظریه استاندارد، میتوان از انتخابات دو لپتونی یا سه لپتونی به همراه کوارک پایین استفاده کرد. لازم به ذکر است که در حالت نهایی ۳ الکترون وجود دارد که یک جفت از آنها از راس ۴ گانه  $tuee$  یا  $tcee$  گسیل میشوند (این جفت الکترون باید بار الکتریکی متضاد داشته باشند). نحوه گزینش ذرات نهایی با در نظر گرفتن شروط گیراندازی دو لپتونی  $di-lepton\ trigger$  در ذیل خلاصه شده است:

#### الکترون ها

- $2|\eta| < 3, p_T > 20\ GeV$  این برش ها در انرژی سنج الکترومغناطیسی اعمال می شوند.
- الکترون می بایست از گزینش های اصلی که متناسب با VBTF95 است، عبور کنند. از جمله این گزینش ها می توان به  $|d_0| < 0.04\ cm$  و  $|dz| < 0.2\ cm$  اشاره کرد که هر دوی این گزینش ها نسبت به رأس اولیه محاسبه می شوند.<sup>3</sup>
- تعداد دقیقاً سه الکترون در هر پدیده بصورتی که یک جفت از آنها دارای بار متضاد باشند.

#### جت پایین

- $|\eta| < 3, p_T > 30\ GeV$  این برش ها در انرژی سنج الکترومغناطیسی اعمال می شوند.
- تعداد دقیقاً یک جت پایین در هر پدیده

#### جت ها

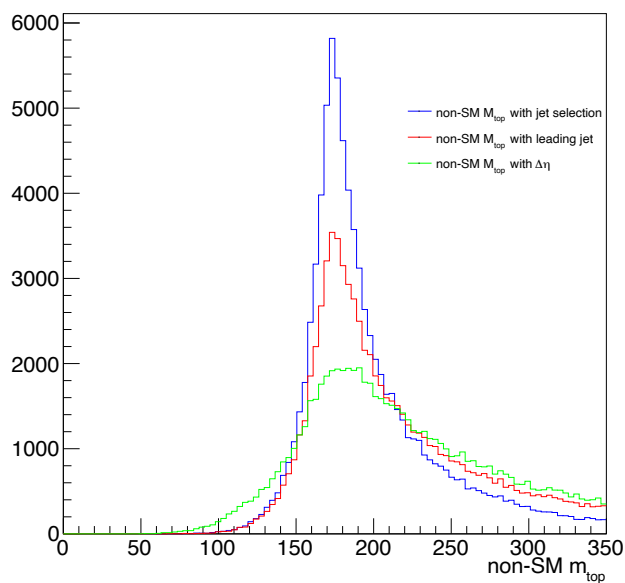
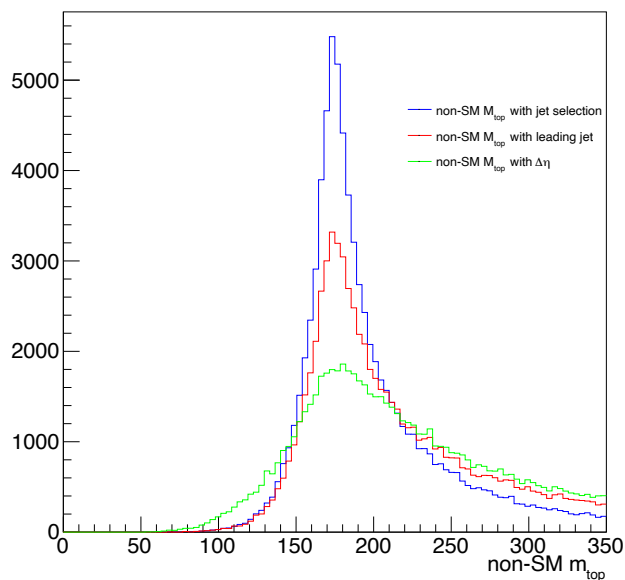
- $|\eta| < 5, p_T > 30\ GeV$

برای مطالعه هر چه بهتر سیگنال و پس زمینه ها، متغیرهای متعددی محاسبه و در قالب داده های درختی  $trees$  قابل دسترسی میباشند. بعنوان مثال تعداد جت ها، تکانه عرضی جت پیشران، زوایای سمتی یا فاصله مکانی بین جفت الکترون با بار متفاوت، انرژی گمشده عرضی و جرم بازسازی شده کوارک سر از راس غیر استاندارد و ... از مهمترین متغیرها برای جداسازی سیگنال از پس زمینه های نظریه استاندارد میباشند. بصورت مشخص ۳ مدل الگوریتم برای بازسازی جرم کوارک سر ( $top$ ) از راس غیر استاندارد مورد مطالعه قرار گرفته است. در مدل اول جفت الکترونی که مینیمم مقدار تفاوت زاویه ای  $\Delta\eta$  را دارند، به همراه بردار لورنتز کوارک سبک استفاده شده تا جرم کوارک سر از راس غیر استاندارد محاسبه گردد. در مدل دوم کوارک پیشران که برچسب پایین خورده نشده  $leading\ non\ b-tagged$  به همراه تمامی الکترون ها بعنوان ورودی استفاده شده تا مقدار  $\min(|m_{ql} - m_{top}|)$  محاسبه شود. سپس جرم کوارک سر از راس غیر استاندارد با استفاده از جفت الکترونی که این مقدار را مینیمم کردند به همراه کوارک پیشران محاسبه میگردد. در مدل سوم تمامی جت هایی برچسب پایین خورده نشده و تمامی الکترون ها بعنوان ورودی استفاده شده تا مقدار  $\min(|m_{ql} - m_{top}|)$  محاسبه شود. در انتها جفت الکترون و جتی که این مقدار را مینیمم کردند استفاده شده تا جرم کوارک سر محاسبه شود. نحوه توزیع جرم کوارک سر از راس غیر استاندارد برای هر سه مدل

<sup>2</sup> تکانه عرضی  $p_T$  نکانه (تندی) ذره در راستای عمود پرتوهای برخوردی میباشد.  $\eta$  نیز کمیتی بدون واحد برای توصیف راستای خروجی ذره نسبت به محور پرتو میباشد.

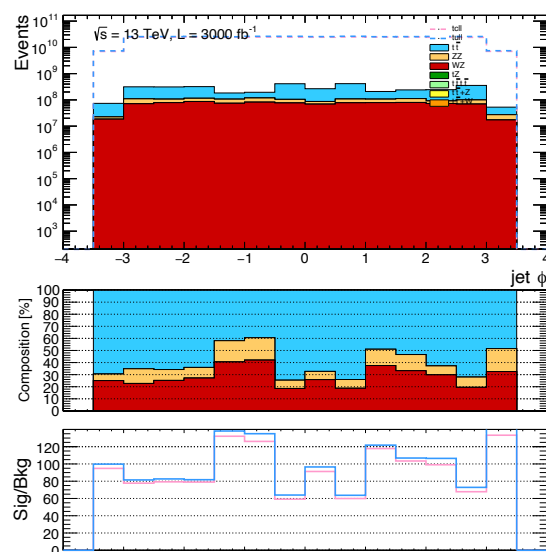
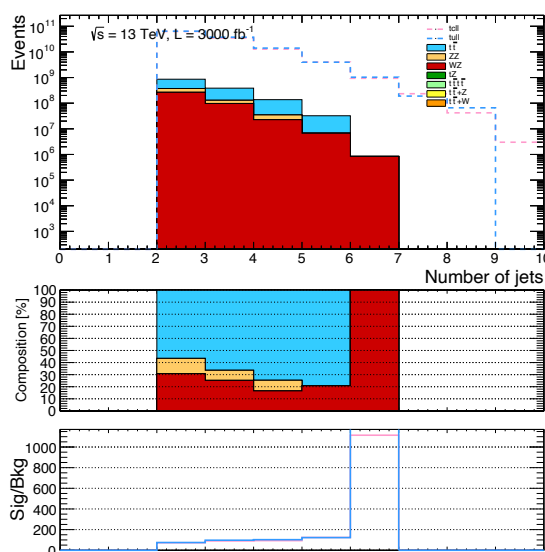
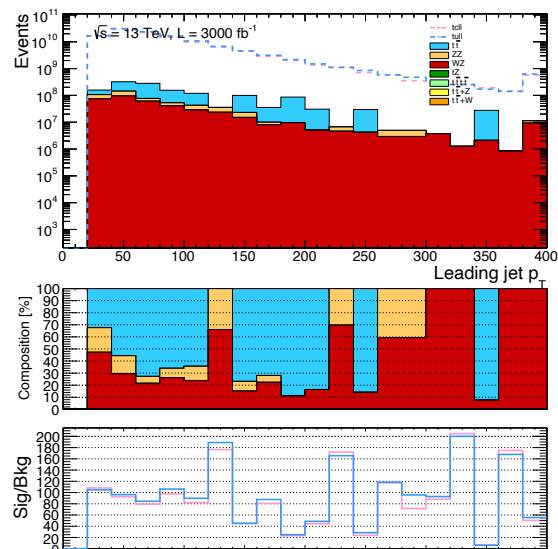
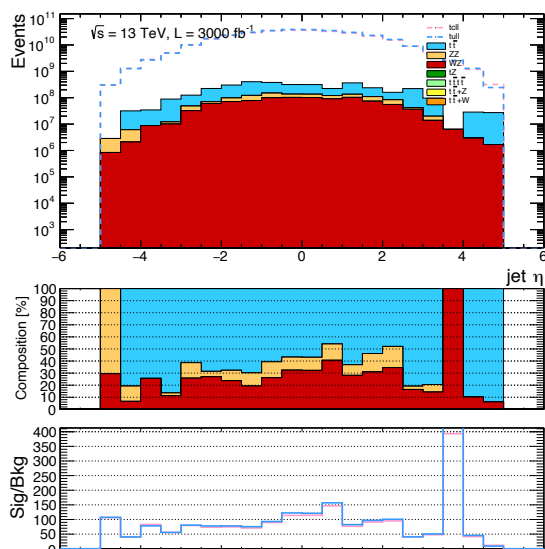
<sup>3</sup> متغیر  $d_0$  فاصله عمودی راستای اولیه ذره با راس اصلی محل برخورد و  $dz$  فاصله طولی بین نزدیکترین نقطه به خط پرتو و راس اولیه در امتداد محور خط پرتو میباشد.

در شکل ۵ نشان داده شده است. میزان بالای راندمان (داده های بیشتر نزدیک به جرم واقعی کوارک سر) در مدل سوم به وضوح قابل مشاهده است.



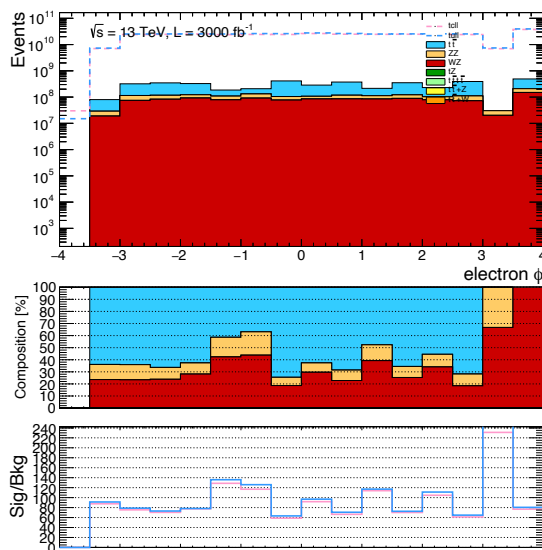
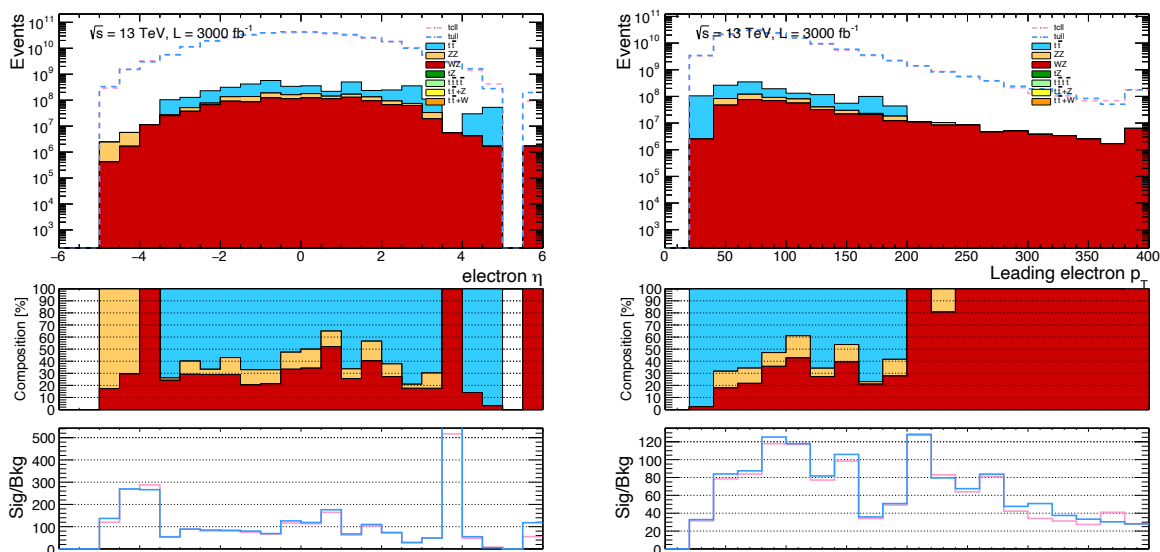
شکل ۵. توزیع جرم کوارک سر از راس غیر استاندارد برای سه مدل با الگوریتم متفاوت. نمودار سبز نشانگر مدل اول، نمودار قرمز نشانگر مدل دوم، نمودار آبی نشانگر مدل سوم میباشد. نمودار بالا تابع توزیع برای سیگنال کوارک بالا و نمودار پایین تابع توزیع برای سیگنال کوارک افسون میباشد. مشاهدات بیانگر تعداد زیاد داده ها نزدیک به جرم واقعی کوارک بالا یعنی ۱۷۳ گیگا الکترون ولت میباشد.

بطو کلی در آنالیزهای فیزیک انرژی های بالا مانند [۸]، دو مدل مختلف برای تعریف ناحیه های حساس به سیگنال به کار میرود. در مدل اول که به مدل برشی مشهور است cut-based Analysis با در نظر گرفتن توزیع داده ها برای متغیرهای مختلف، ناحیه های حساس به سیگنال تبیین میشوند. بعنوان مثال در آنالیزهای ابرتقارن به دلیل وجود مقدار زیاد انرژی گمشده  $E_T^{miss}$  در سیگنال نسبت به پس زمینه ها، ناحیه های سیگنالی با اعمال برش در مقادیر زیاد انرژی گمشده تعریف میشوند. در مدل دوم ناحیه های سیگنالی با استفاده از وزن های هوش مصنوعی که اصولاً مقادیر بالاتری برای سیگنال دارند تعریف میشوند. در این پروژه از مدل های مختلف هوش مصنوعی نظیر شبکه عصبی، شبکه درختی و رگرسیون لاجیستیک برای محاسبه مقادیر وزن برای سیگنال و پس زمینه ها استفاده شده است. آنچه که مشهود است، در هر دو مدل نحوه توزیع داده برای متغیرهای مختلف از اهمیت بالایی برخوردار است. شکل های ۶-۹ توزیع داده برای مهمترین متغیرهای آنالیز را نشان میدهند. در تمامی اشکال قسمت بالایی نحوه توزیع متغیر، قسمت میانی میزان مشارکت پس زمینه ها بر حسب درصد و قسمت پایینی حاصل تقسیم تعداد داده های سیگنال بر پس زمینه میباشد. سیگنال ها با خطوط به رنگ مختلف و پس زمینه ها با منحنی های پر شده Histogram نشان داده شده اند. دو نکته مهم پیرامون اشکال توزیع: به وضوح قابل مشاهده است که تعداد داده های سیگنالی بسیار بیشتر از پس زمینه ها در تمامی توزیع ها میباشد (این موضوع قابل پیش بینی میباشد چون برش بر روی تعداد الکترون ها و کوارک پایین پدیده های پس زمینه ای زیادی را از بین میبرد). نکته آخر تمرکز زیاد داده های سیگنالی پیرامون جرم کوارک سر در شکل ۹ میباشد. دلیل این موضوع وجود کوارک سر در راس غیر مدل استاندارد است که به دو الکترون و یک کوارک سیک واپاشی میکند. همین امر بیانگر اهمیت متغیر جرم کوارک سر از راس غیر استاندارد در جداسازی داده های سیگنالی از پس زمینه ها میباشد.

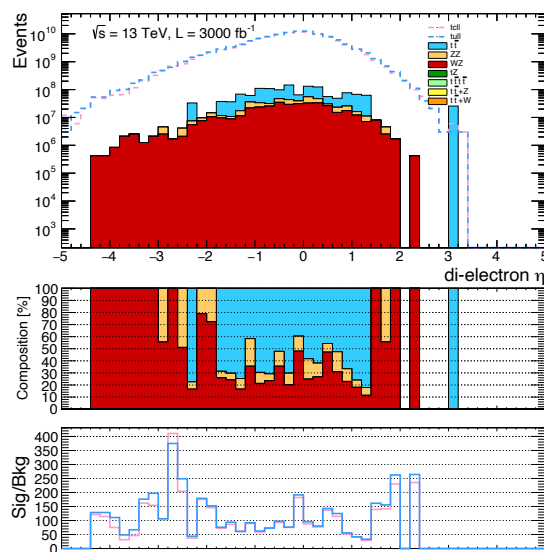
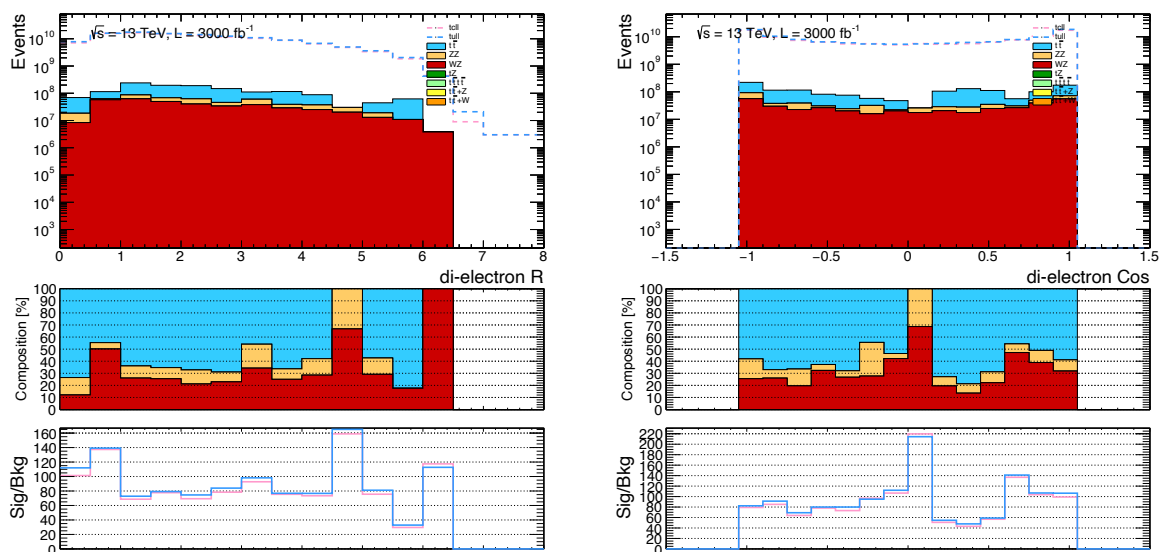


شکل ۶. توزیع پدیده های سیگنال و پس زمینه ها برای متغیرهای مختلف جتی. نمودارها به ترتیب نشانگر بالا راست توزیع تکانه عرضی جت پیشران، بالا چپ توزیع زاویه ای جت ها، پایین راست توزیع زاویه سمتی جت ها و پایین چپ توزیع تعداد جت در هر پدیده میباشند.

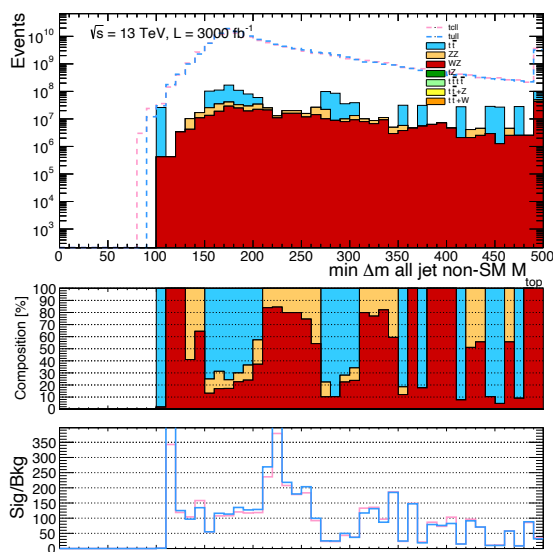
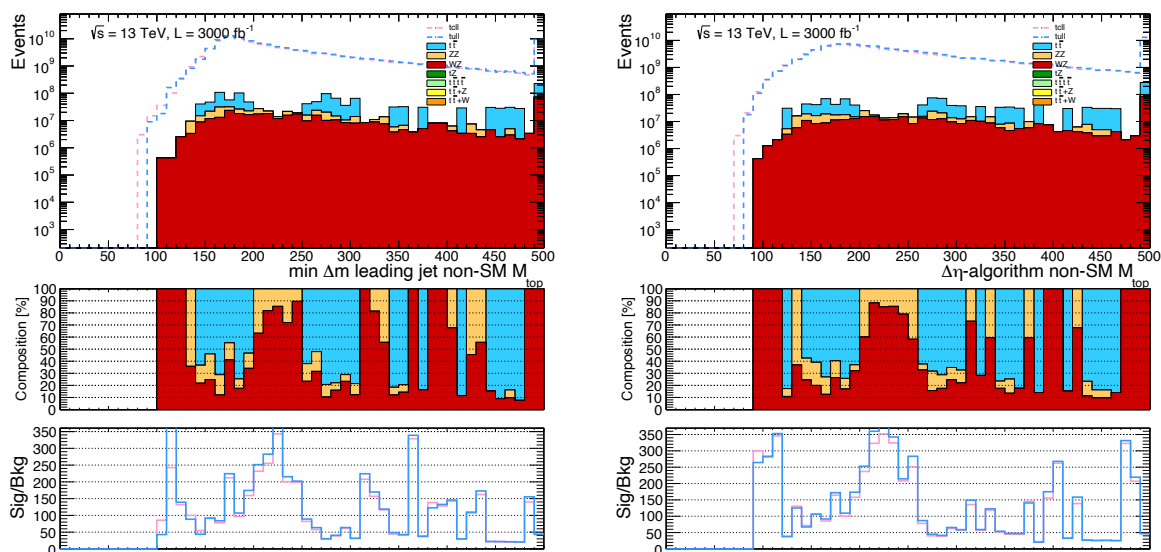




شکل ۷. توزیع پدیده های سیگنال و پس زمینه ها برای متغیرهای مختلف الکترونی. نمودارها به ترتیب نشانگر بالا راست توزیع تکانه عرضی الکترون پیشران، بالا چپ توزیع زاویه ای الکترون ها، پایین توزیع زاویه سمتی الکترون ها در هر پدیده میباشند.



شکل ۸. توزیع پدیده های سیگنال و پس زمینه ها برای متغیرهای مختلف دو الکترونی. نمودارها به ترتیب نشانگر بالا راست توزیع کسینوس زاویه سمتی بین جفت الکترون، بالا چپ توزیع فاصله فضایی، پایین توزیع فاصله زاویه ای بین جفت الکترون در هر پدیده میباشند.



شکل ۹. توزیع جرم کوارک سر از راس غیر استاندارد. نمودارها به ترتیب نشانگر بالا راست توزیع برحسب مدل اول (مینیمم اختلاف زاویه بین جفت الکترون)، بالا چپ توزیع بر حسب مدل دوم، و پایین توزیع بر حسب مدل سوم در هر پدیده میباشند.

در قدم بعدی این آنالیز، تمامی متغیرهای مستقل محاسبه شده برای پدیده های سیگنالی و پس زمینه ای بصورت ورودی به مدل های هوش مصنوعی داده شده تا خروجی (وزن یا به معنای دیگر احتمال سیگنال یا پس زمینه بودن) مورد نظر بعنوان متغیر مستقل دیگر محاسبه شود. مدل های هوش مصنوعی زیادی برای موضوع طبقه بندی classification بین پدیده های سیگنالی یا پس زمینه ای قابل استفاده است، لذا سه عدد از آنها مورد مطالعه قرار میگرد. مورد اول مدل تصمیم درختی Decision tree که یک مدل درخت مانند است که مجموعه ای از تصمیمات یا قوانین مورد استفاده برای طبقه بندی یا پیش بینی یک متغیر هدف را نشان می دهد. فرآیند انتخاب مهم ترین متغیر و تقسیم داده ها به صورت بازگشتی ادامه می یابد تا زمانی که زیرمجموعه های حاصل خالص باشند (یعنی فقط یک کلاس داشته باشند: سیگنال یا پس زمینه) یا تقسیم بیشتر دقت مدل را بهبود نمی بخشد. گره های نهایی درخت که برگ نامیده می شوند، کلاس یا مقدار پیش بینی شده را برای هر زیر مجموعه نشان می دهند. مورد دوم مدل شبکه عصبی Neural network شامل لایه هایی از گره های به هم پیوسته به نام نورون است که اطلاعات را پردازش و انتقال می دهد. داده های ورودی به لایه ورودی وارد می شوند و قبل از تولید خروجی، از طریق یک سری لایه های پنهان پردازش می شوند. هر نورون در شبکه ورودی از نورون های لایه قبلی دریافت می کند، تابع فعال سازی را روی مجموع وزنی ورودی ها اعمال می کند و نتیجه را به نورون های لایه بعدی ارسال می کند. شبکه های عصبی قادر به یادگیری روابط غیرخطی پیچیده بین ورودی ها و خروجی ها هستند و در طیف گسترده ای از کاربردها مانند بازسازی جت ها و لپتون ها، گیر اندازی ذرات در آشکارسازها و پردازش زبان طبیعی موفق بوده اند. در قدم بعدی وزن های محاسبه شده با مدل های هوش مصنوعی به همراه دیگر متغیرها ترکیب شده تا نواحی حساس به سیگنال signal regions مشخص شوند. در انتها میتوان از کتابخانه های تست آماری نظیر pyhf [۹] اهمیت significance پدیده های سیگنالی نسبت به پس زمینه ای را در نواحی حساس محاسبه کرد و با ضریب ۹۵٪ سطح اطمینان حد بالایی برای مقیاس فیزیک جدید  $\Delta$  مشخص نمود.

1. Alan Axelrod, Flavor Changing Z0 Decay and the Top Quark, Volume 209, Issue 2, 27 December (1982).
2. Xue-Qian Li, et.al, The Production of t anti-c or anti-t c quark pair by  $e^+ e^-$  collision based on the standard model and its extensions, Physics Letters B Volume 313, Issues 3–4, 2 September (1993).
3. S. Weinberg, A Model of Leptons, Phys. Rev. Lettr. 19, 1264 November (1967).
4. The CMS Collaboration, CMS Physics Analysis Summary, 7 November (2017)
5. Castro, N.F, Skovpen, K. Flavour-Changing Neutral Scalar Interactions of the Top Quark, Universe 21 November (2022)
6. J. Alwall, et.al, The automated computation of tree-level and next-to-leading order differential cross sections, and their matching to parton shower simulations, arXiv:1405.0301 [hep-ph] (2014).
7. J. de Favereau, et.al, A modular framework for fast simulation of a generic collider experiment, arXiv:1307.6346 [hep-ex] (2013).
8. Amarjit Soni, et.al, New flavor physics in di- and tri-lepton events from single-top at the LHC and beyond, arXiv:2101.05286 [hep-ph] (2021).
9. Giordon Stark, et.al, pure-Python implementation of HistFactory with tensors and automatic differentiation, arXiv:2211.15838v1 [hep-ex] (2022).