

Top FC Analysis

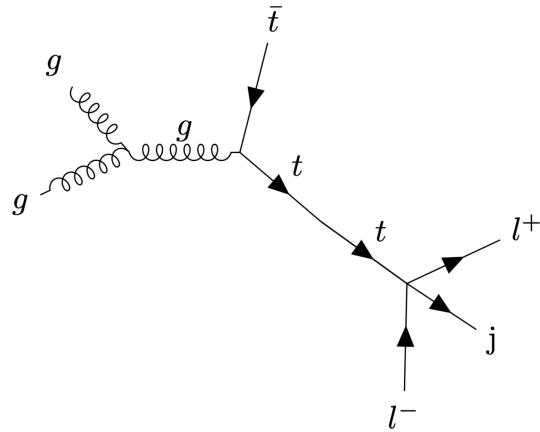
Meisam Ghasemi Bostanabad

Analysis meeting
2023-12-10



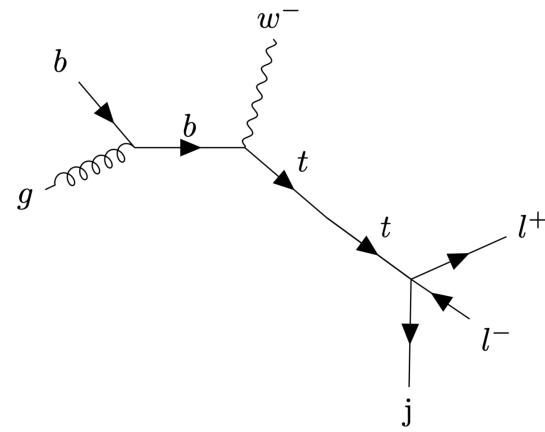
Flavor Changing in Top sector

In this analysis we looking for FC ($t \rightarrow u$ or $t \rightarrow c$) in top sector as the heaviest quark which may be an indicator of new flavor physics.



ttbar

- Starting with **ttbar**, targeting **final states** with three leptons (a pair of OP) and at least two jets with one b-tagged
- The leading potential backgrounds are $t\bar{t}, tZ, WZ, ZZ$
- 0.0137 pb cross section



tW

- Next channel **tW**, targeting **final states** with three leptons (a pair of OP) and at least two jets
- The leading potential backgrounds are tZ, WZ, ZZ
- 0.0007 pb cross section

Roadmap for Top-FC Analysis

- 3M events for ttbar and tW signals with separate couplings (S, V, T, and all) are generated (using MG5+PYTHIA for event sim and Delphes for detector sim).
- Data engineering to understand the analysis variables and make better signal-background discrimination using non-SM top mass.
- Several classifiers are trained and still Neural net shows the best performance in terms of accuracy (F1 score) and ROC curve.
- Signal regions are defined based on the NN weights (using AMS method).
- Roostat and Pyhf statistical packages are used to compute z-score, p-values and upper limits.

Signal-background yields in ttbar-charm

وزن < %۸۵	وزن < %۸۰	وزن < %۷۵	شبکه عصبی ساده
۲۹۰.۷	۴۰۹.۲	۵۱۲.۵	تعداد سیگنال
۲۲۴.۳	۳۴۸.۱	۴۴۴.۵	تعداد پس زمینه
۱.۳	۱.۲	۱.۲	سیگنال به پس زمینه

وزن < %۸۵	وزن < %۸۰	وزن < %۷۵	شبکه عصبی بهینه
۳۸۷.۷	۴۸۷.۰	۵۶۷.۲	تعداد سیگنال
۱۶۰.۱	۲۴۶.۶	۳۳۷.۹	تعداد پس زمینه
۳.۵	۲.۳	۱.۷	سیگنال به پس زمینه

وزن < %۸۵	وزن < %۸۰	وزن < %۷۵	شبکه عصبی بهینه با لایه های حذفی
۳۹۷.۱	۴۹۲.۸	۵۷۰.۸	تعداد سیگنال
۱۱۶.۷	۱۷۳.۹	۲۴۰.۷	تعداد پس زمینه
۴.۹	۳.۳	۲.۴	سیگنال به پس زمینه

جدول ۲. تعداد سیگنال و پس زمینه ها برای کاتال $t\bar{t} - charm$ بر اساس درخشندگی $3000 fb^{-1}$ برای تمامی مدل های شبکه عصبی. ستون ها شامل برش های مختلف بر روی وزن مدل میباشند.

Signal-background yields in ttbar-up

وزن < %۸۵	وزن < %۸۰	وزن < %۷۵	شبکه عصبی ساده
۳۰۵.۰	۴۵۱.۲	۵۶۴.۶	تعداد سیگنال
۱۶۶.۲	۳۰۳.۴	۳۹۵.۲	تعداد پس زمینه
۳.۴	۱.۹	۱.۴	سیگنال به پس زمینه

وزن < %۸۵	وزن < %۸۰	وزن < %۷۵	شبکه عصبی بهینه
۳۱۹.۰	۴۲۹.۷	۵۲۴.۰	تعداد سیگنال
۱۴۴.۰	۲۲۵.۲	۲۹۹.۱	تعداد پس زمینه
۳.۶	۲.۳	۱.۸	سیگنال به پس زمینه

وزن < %۸۵	وزن < %۸۰	وزن < %۷۵	شبکه عصبی بهینه با لایه های حذفی
۲۷۰.۲	۴۲۱۰	۵۳۸.۱	تعداد سیگنال
۱۳۰.۳	۲۴۵.۱	۳۴۵.۶	تعداد پس زمینه
۴.۱	۲.۲	۱.۶	سیگنال به پس زمینه

جدول ۳. تعداد سیگنال و پس زمینه ها برای کاتال $t\bar{t}$ - up - $\bar{t}t$ بر اساس درخشنده fb^{-1} ۳۰۰۰ برای تمامی مدل های شبکه عصبی. ستون ها شامل برش های مختلف بر روی وزن مدل میباشند.

Signal-background yields in tW-charm

شبکه عصبی ساده	وزن < ۶۰	وزن > ۶۵	وزن < ۷۰
تعداد سیگنال	۴۴.۶	۳۷.۳	۲۹.۴
تعداد پس زمینه	۵۰۴۱.۳	۳۷۹۴.۲	۲۶۳۷.۴
سیگنال به پس زمینه	۰.۰۰۹	۰.۰۱۲	۰.۰۱۷

شبکه عصبی بهینه	وزن < ۶۰	وزن > ۶۵	وزن < ۷۰
تعداد سیگنال	۴۶.۷	۴۰.۵	۳۳.۶
تعداد پس زمینه	۴۹۵۰.۲	۳۸۵۵.۶	۲۸۳۵.۱
سیگنال به پس زمینه	۰.۰۰۹	۰.۰۱۲	۰.۰۱۶

شبکه عصبی بهینه با لایه های حذفی	وزن < ۶۰	وزن > ۶۵	وزن < ۷۰
تعداد سیگنال	۴۵.۶	۳۸.۱	۳۰.۱
تعداد پس زمینه	۴۵۷۶.۱	۳۳۵۳.۷	۲۲۶۱.۹
سیگنال به پس زمینه	۰.۰۱۰	۰.۰۱۴	۰.۰۲۰

جدول ۴. تعداد سیگنال و پس زمینه ها برای کانال $tW - charm$ بر اساس درخندگی $3000 fb^{-1}$ برای تمامی مدل های شبکه عصبی. ستون ها شامل برش های مختلف بر روی وزن مدل میباشد.

Signal-background yields in tW-up

شبکه عصبی ساده	وزن < %۶۰	وزن > %۶۵	وزن > %۷۰
تعداد سیگنال	۳۱.۳	۴۰.۲	۴۸.۷
تعداد پس زمینه	۲۳۳۱.۲	۳۴۱۸.۴	۴۶۲۲.۷
سیگنال به پس زمینه	۰.۰۲۱	۰.۰۱۴	۰.۰۱۱

شبکه عصبی بهینه	وزن < %۶۰	وزن > %۶۵	وزن > %۷۰
تعداد سیگنال	۴۰.۳	۴۷.۵	۵۴.۳
تعداد پس زمینه	۳۱۰۶.۵	۴۱۰۱.۲	۵۱۶۲.۵
سیگنال به پس زمینه	۰.۰۱۷	۰.۰۱۳	۰.۰۱۱

شبکه عصبی بهینه با لایه های حذفی	وزن < %۶۰	وزن > %۶۵	وزن > %۷۰
تعداد سیگنال	۳۸.۷	۴۷.۳	۵۴.۸
تعداد پس زمینه	۲۹۵۵.۱	۴۰۷۸.۴	۵۲۲۶.۴
سیگنال به پس زمینه	۰.۰۱۹	۰.۰۱۳	۰.۰۱۰

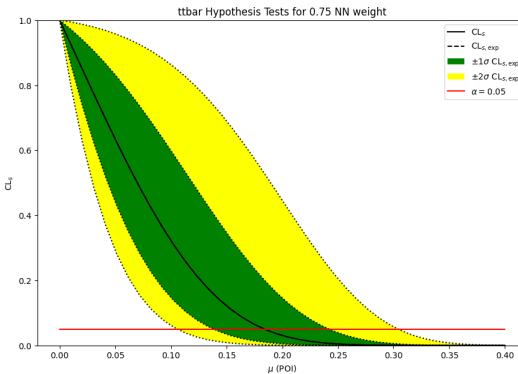
جدول ۵. تعداد سیگنال و پس زمینه ها برای کاتال $tW - up$ بر اساس درخشنده fb^{-1} ۳۰۰۰ برای تمامی مدل های شبکه عصبی. ستون ها شامل برش های مختلف بر روی وزن مدل میباشند.

ttbar-charm upper limits on μ_{sig}

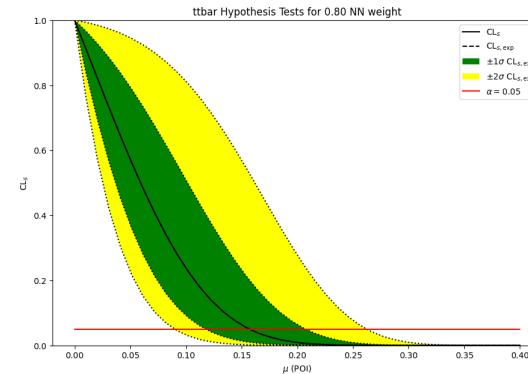
- To get upper limits, we just need to run multiple hypothesis tests for a lot of different null hypotheses of BSM with $\mu_{sig} \in [0, \dots, 5.0]$ and then find the value of μ_{sig} for which the null hypothesis is rejected (a 95% CLs).
- We can plot the standard “Brazil band” of the observed and expected CLs. The horizontal red line indicates the test size ($\alpha = 0.05$), whose intersection with the CLs lines visually represents the $(1 - \alpha)\%$ CL limit on the μ_{sig} .
- Going to higher AMS threshold, signal background ratio gets bigger and then the 95% CL limit for μ_{sig} becomes smaller.

Upper limits for ttbar-charm using NN optimized with drop out layers

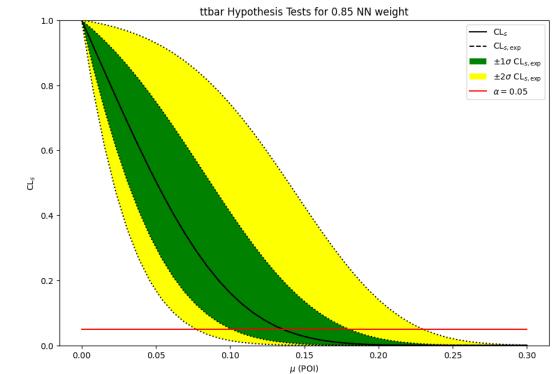
Upper limit (exp): $\mu = 0.184$



Upper limit (exp): $\mu = 0.157$

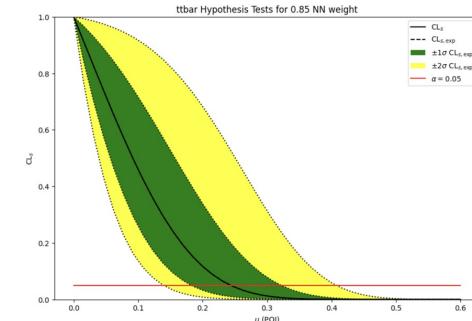
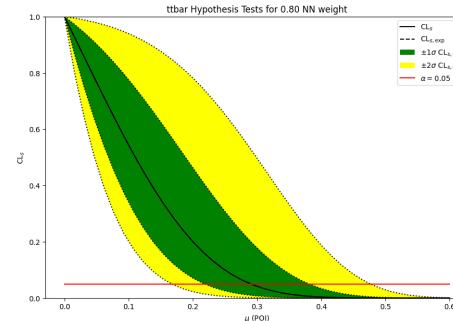
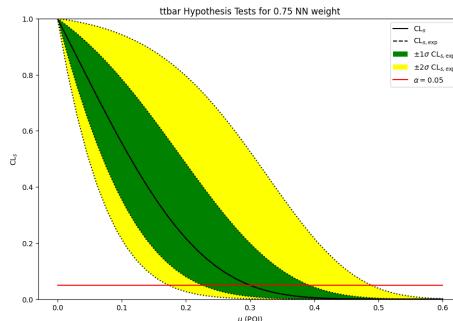


Upper limit (exp): $\mu = 0.135$

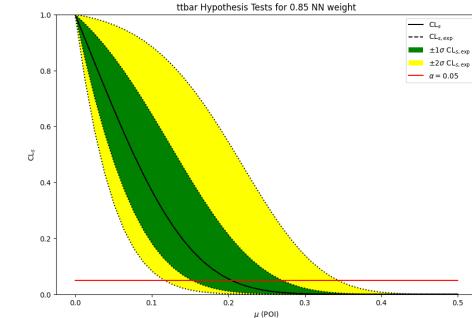
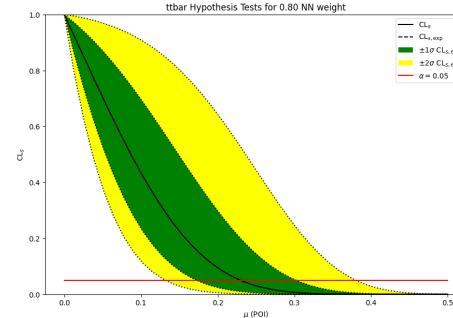
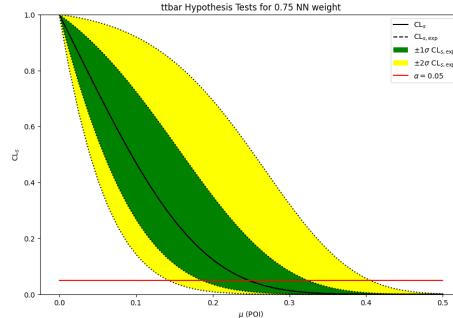


ttbar-up couplings upper limits

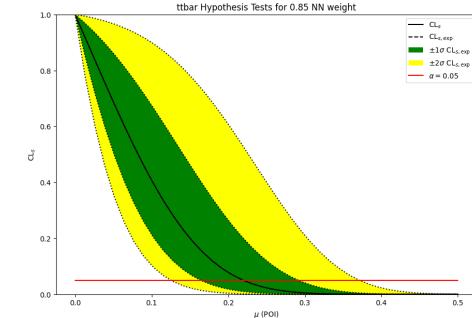
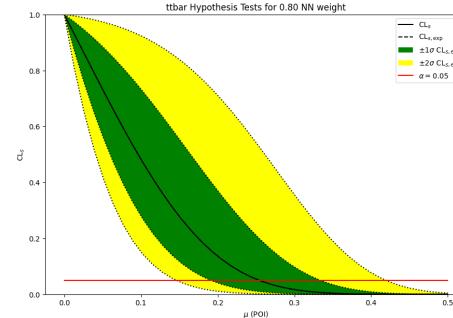
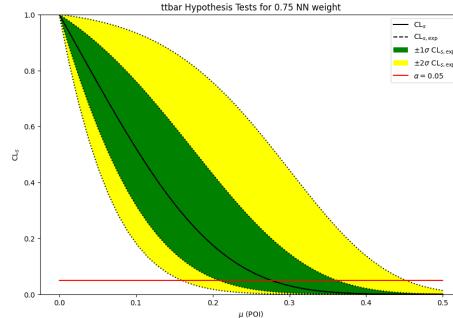
Simple NN



Optimized NN1



Optimized NN2



Signal strength vs NP scale

$$\mathcal{L}_{tull} = \frac{1}{\Lambda^2} \sum_{i,j=L,R} \left[V_{ij}^\ell (\bar{\ell} \gamma_\mu P_i \ell) (\bar{t} \gamma^\mu P_j u) + S_{ij}^\ell (\bar{\ell} P_i \ell) (\bar{t} P_j u) + T_{ij}^\ell (\bar{\ell} \sigma_{\mu\nu} P_i \ell) (\bar{t} \sigma_{\mu\nu} P_j u) \right]$$

We know from QED: $\sigma = \mathcal{L}^2$, So the functionality is like: $\sigma \approx \frac{1}{\Lambda^4}$

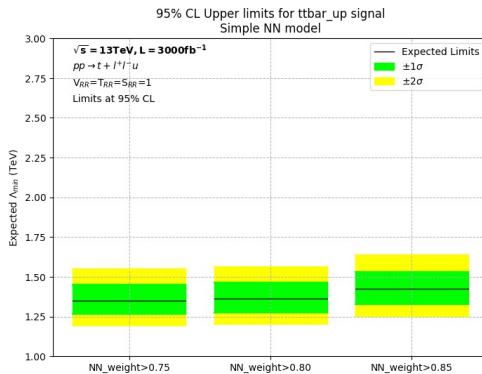
- Signal strength (μ_{sig}) is like cross section modifier and by default we assumed $\Lambda = 1$ TeV, so we can define a new modifier for NP scale ($a\Lambda$) to derive the limit. As an example if upper limit is 0.2 ($\mu_{sig} = 0.2$), we have the limit for Λ like:

$$0.2\sigma \approx \frac{1}{(a\Lambda^4)} \implies a = (0.2)^{(-\frac{1}{4})}$$

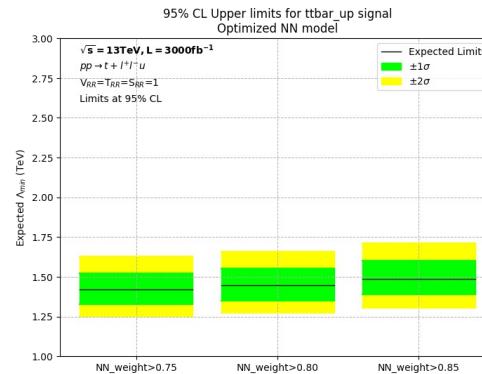
- This means we can compute all the limits for NP scale by $x^{-\frac{1}{4}}$ function, applying to all signal strength limits.

ttbar-up limits on Λ_{exp}

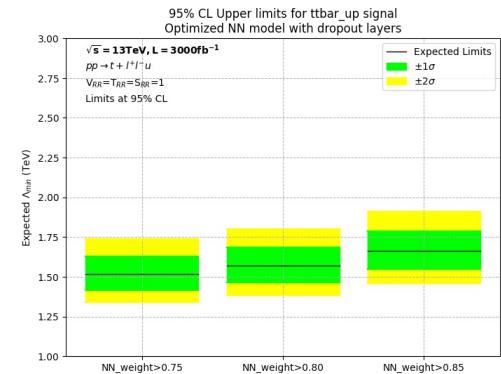
Simple NN



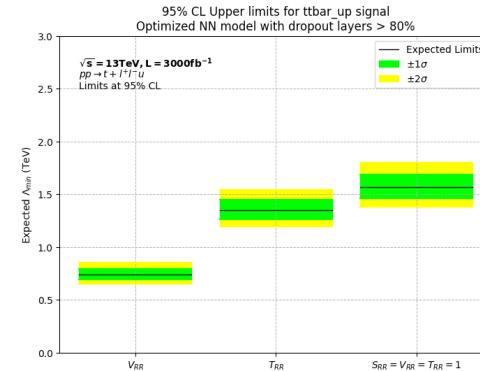
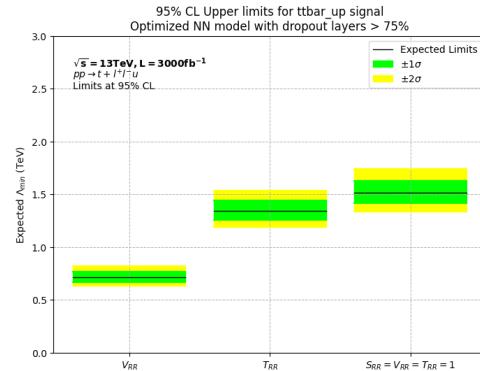
Optimized NN



Optimized NN with drop out



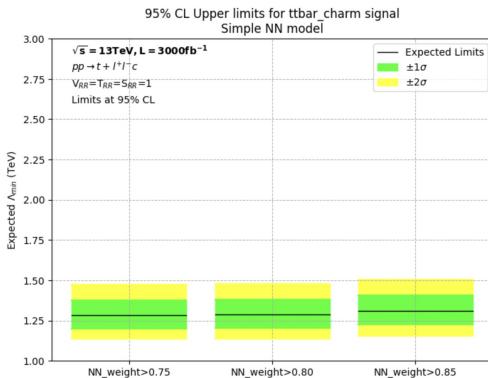
Optimized NN with drop out for different coupling with 75% weight cut



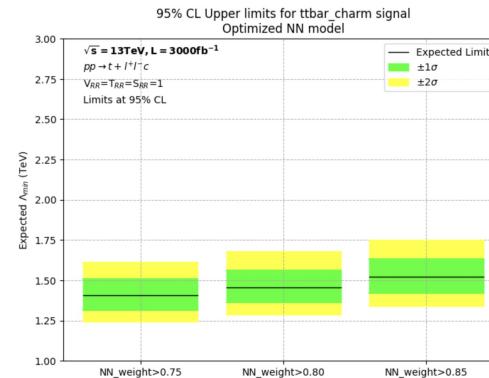
Optimized NN with drop out for different coupling with 80% weight cut

ttbar-charm limits on Λ_{exp}

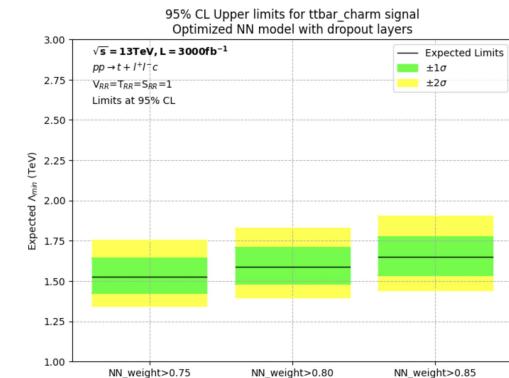
Simple NN



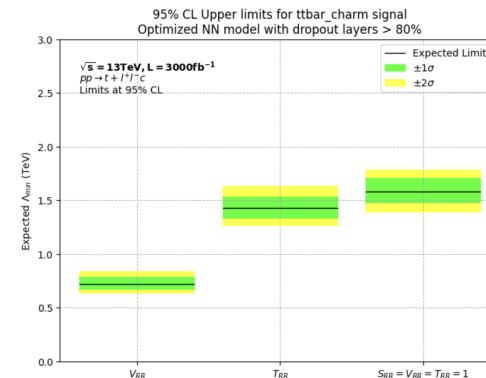
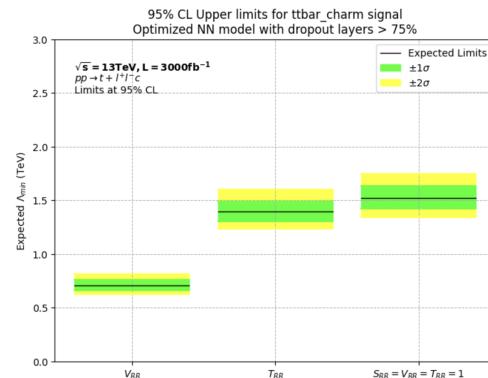
Optimized NN



Optimized NN with drop out

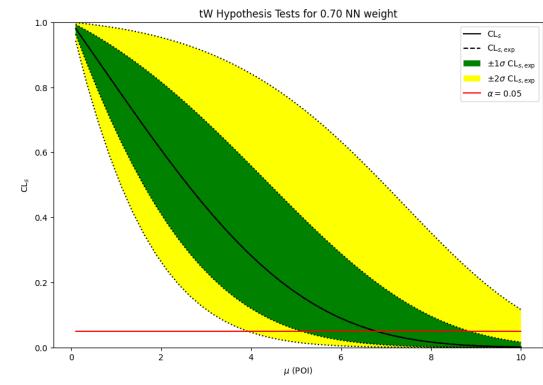
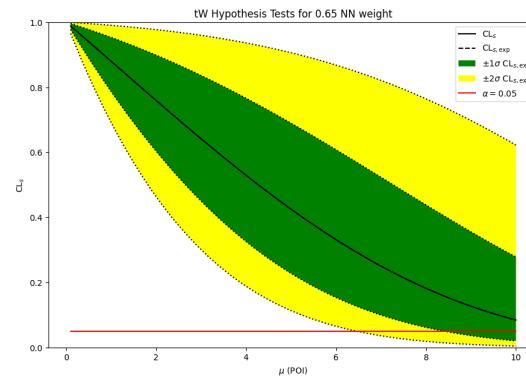
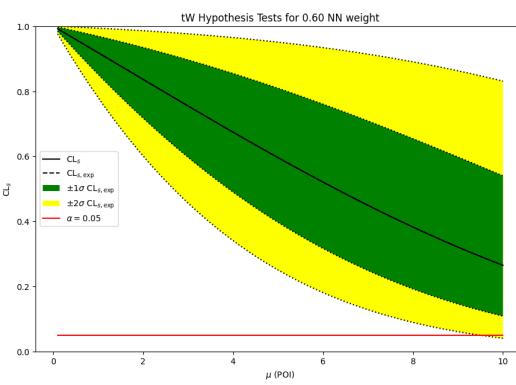


Optimized NN with drop out for different coupling with 75% weight cut



Optimized NN with drop out for different coupling with 80% weight cut

tW upper limits on μ_{sig}

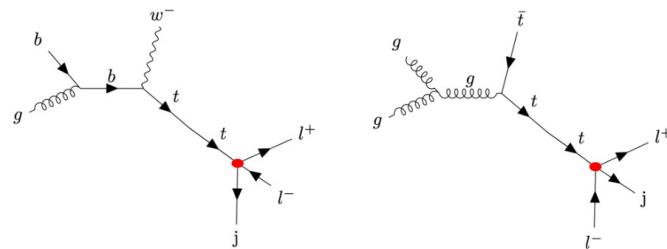


Plots for paper

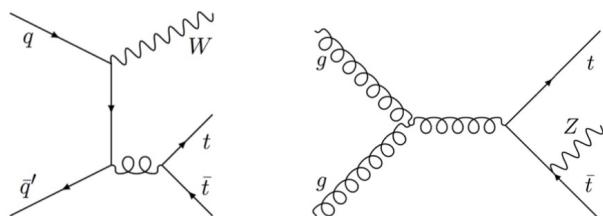
Signal and background generation

Explain the signal and backgrounds:

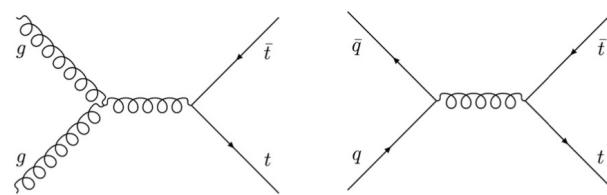
1. generation with MG5+PYTHIA
2. detector simulation with Delphes (CMS HL)
3. compute important variables for further use



شکل ۱. نمودار فاینمن سیگنال با تغییر طعم کوارک سر. شکل سمت راست سیگنال $t\bar{t}$ و شکل سمت چپ سیگنال tW میباشد.
تنها الکترون ها بعنوان لپتون در این آنالیز مورد بررسی قرار گرفته اند. راس قرمز رنگ نشان دهنده راس مدل غیر استاندارد برای واپاشی کوارک سر میباشد.



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

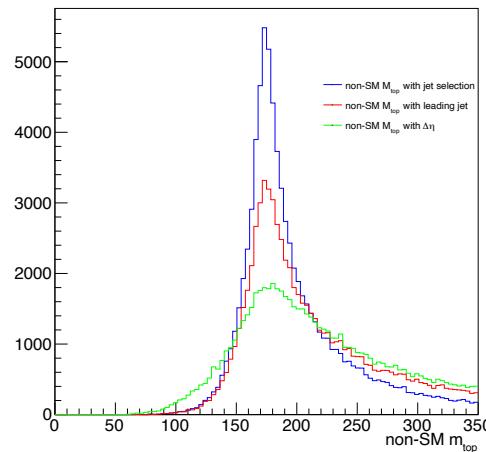


شکل ۲. نمودار فاینمن پس زمینه جفت کوارک سر. شکل سمت راست تابوی کوارک - ضدکوارک و شکل سمت چپ همجوشی گلنون - گلنون را نشان میدهدن.

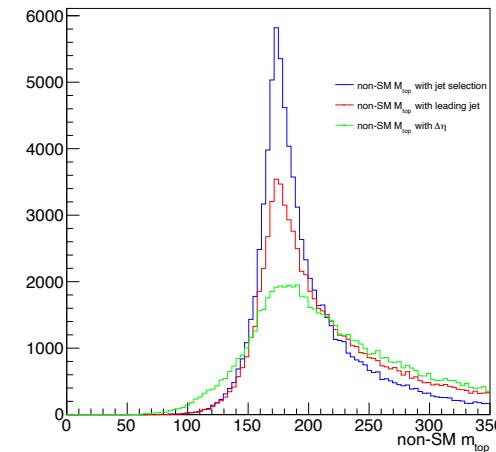
ttbar signal non-SM top mass reconstruction

- Three algorithms used to reconstruct non-SM top mass:
 1. the min $\Delta\eta$ between electrons is used to select OP electrons and subsequently non-SM top mass reconstruction (**green**)
 2. the leading non-btagged jet and the 3 electrons are the inputs for $\min(|m_{llq} - m_{top}|)$ to choose the best selection for OS electrons (**red**)
 3. Loop over all the electrons and jets to get $\min(|m_{llq} - m_{top}|)$. The combination will be used to indicate OS leptons (**blue**)

ttbar charm

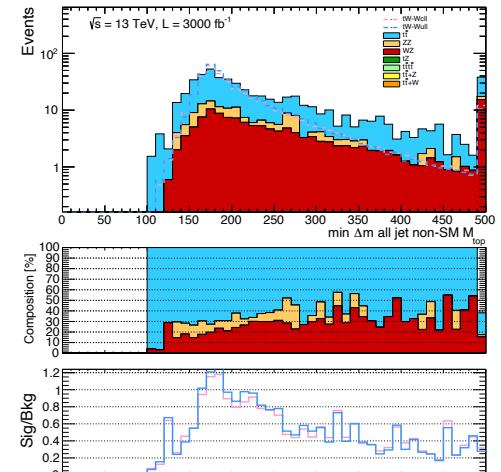
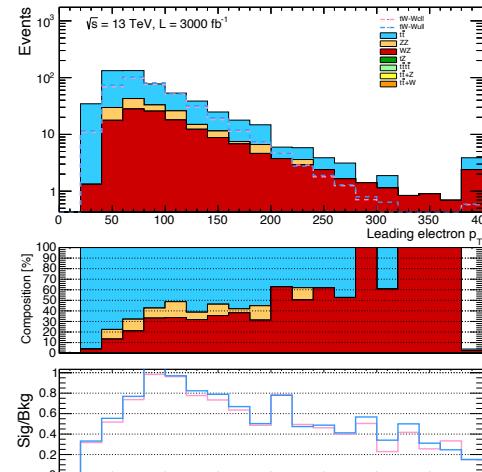
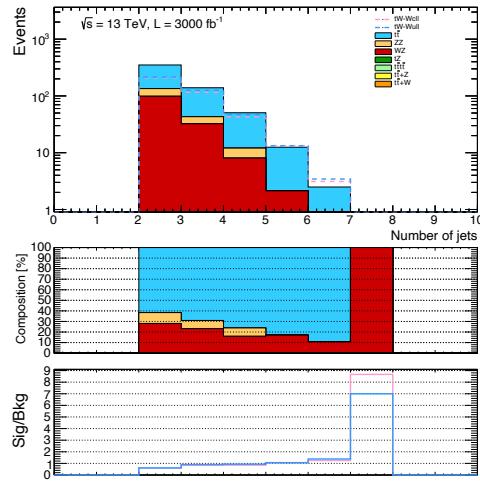


ttbar up

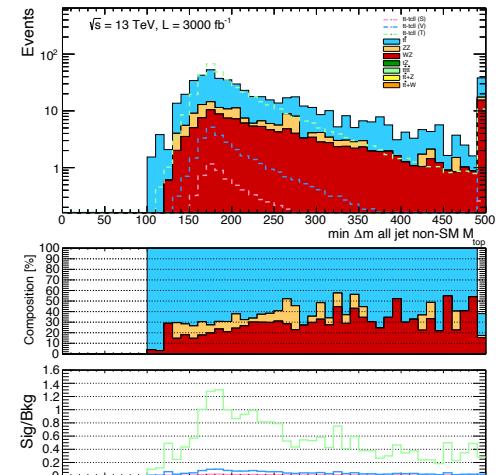
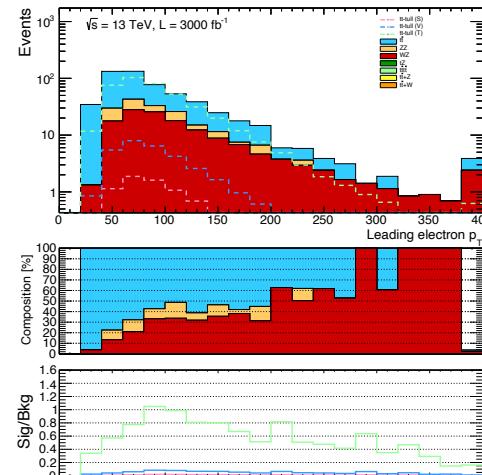
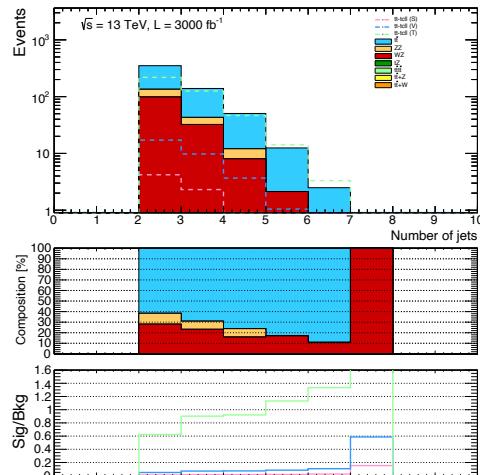


Signal and background distributions

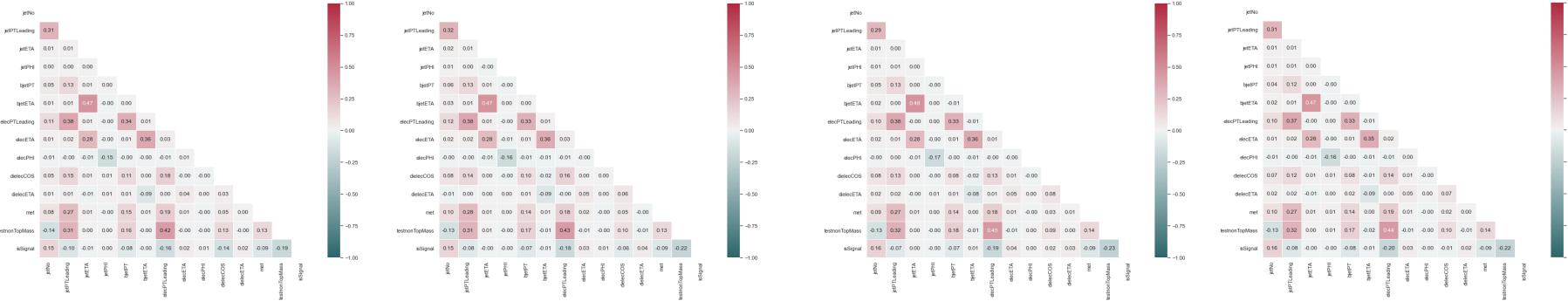
all couplings



separate couplings



ttbar-charm correlations



Scalar coupling

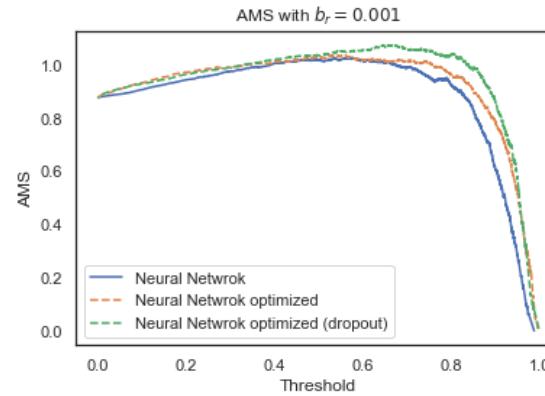
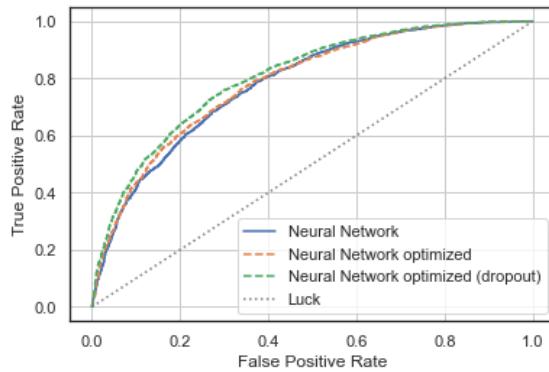
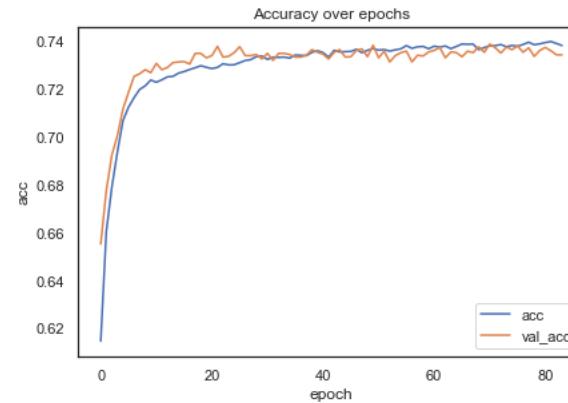
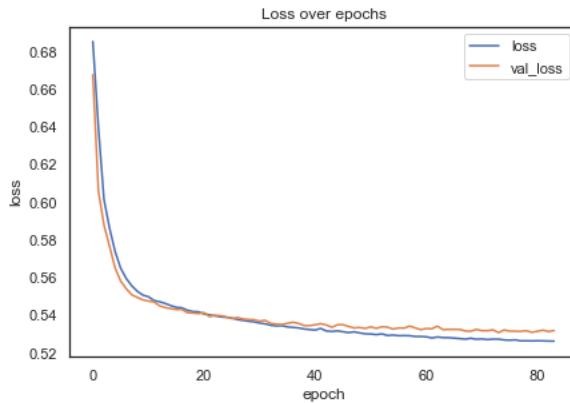
Vector coupling

Tensor coupling

all couplings

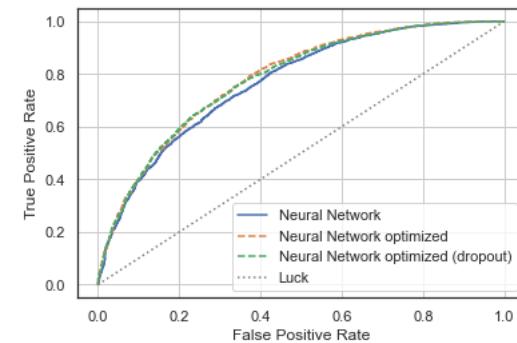
IsSignal is mostly (negatively) correlated to non-SM top mass
 JetNo is (positively) correlated – means signal prone to more jets

ML training and ROC curve

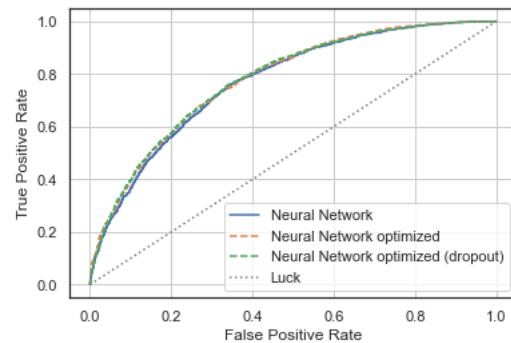


ROC and AMS curves for couplings

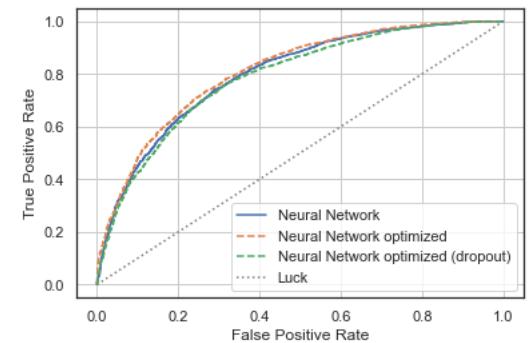
Scalar coupling



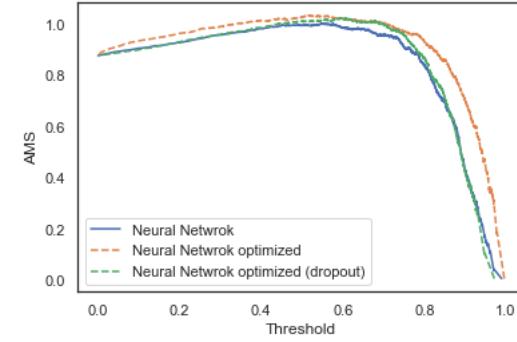
Vector coupling



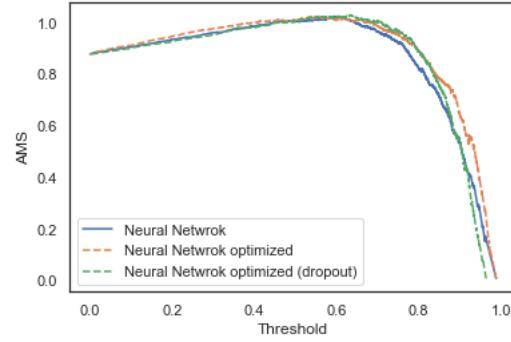
Tensor coupling



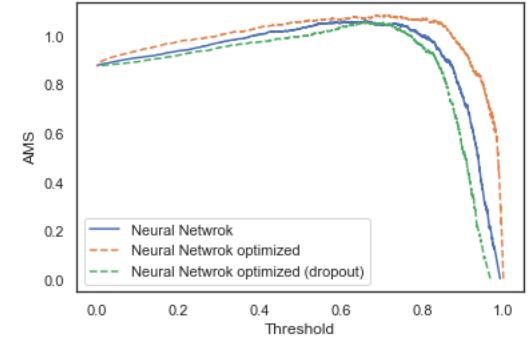
AMS with $b_r = 0.001$



AMS with $b_r = 0.001$

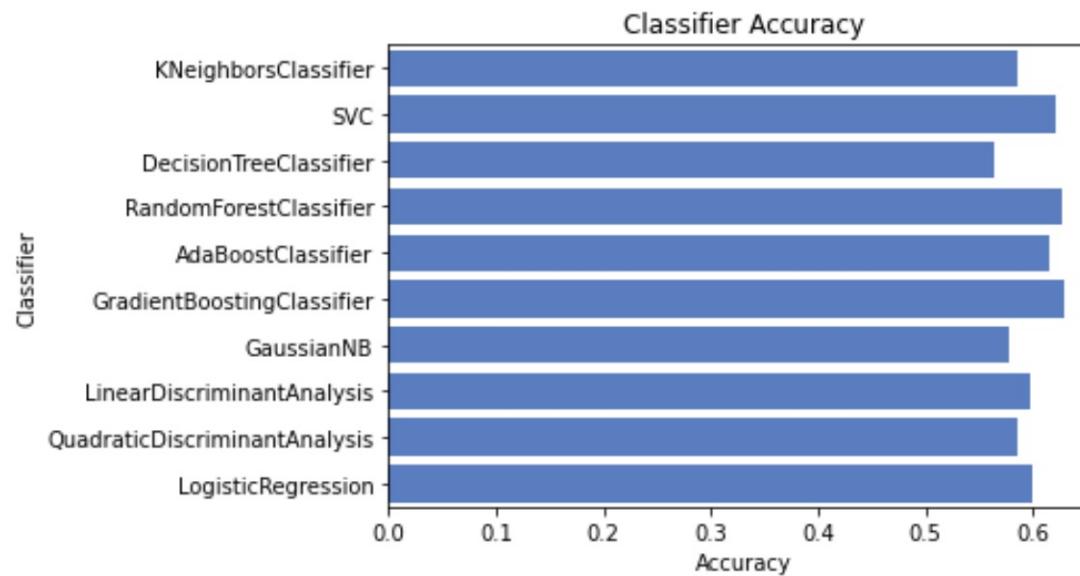


AMS with $b_r = 0.001$



Other ML models

We can shortly point out to other ML models and say that NN outperform in this analysis because of better classification metrics.

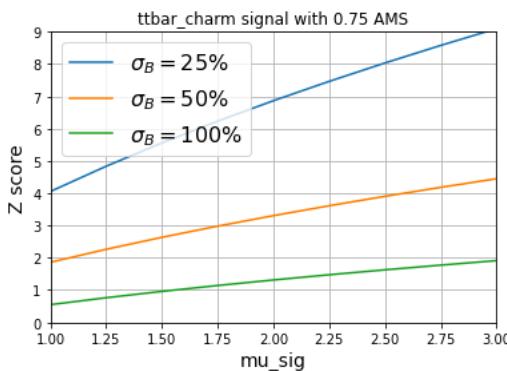


شکل ۳۶. دقیق بر حسب درصد برای مدل های طبقه بندی شده نظیر لاجیستیک خطی، بردار پشتیبان و گرادیان تقویت شده.

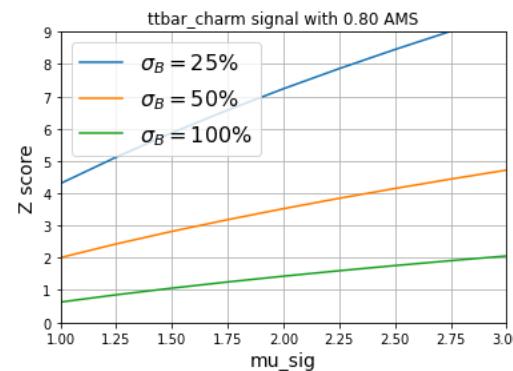
Other ML models

- In the result section, can show the signal and background yields, upper limits for signal strength and limits for NP scale (slides 4-13).
- Might add Z-score and p-value in the attachment.

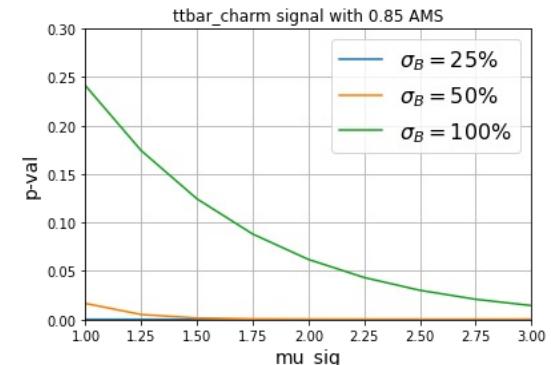
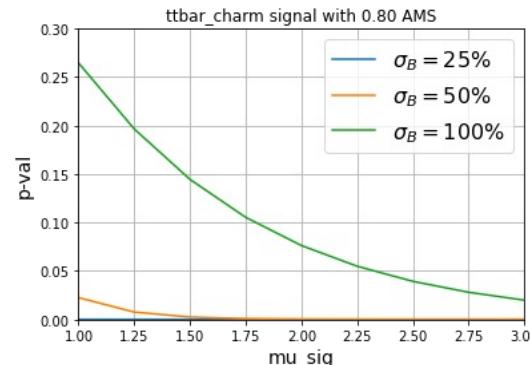
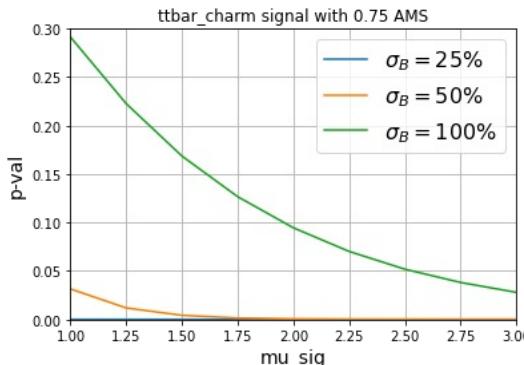
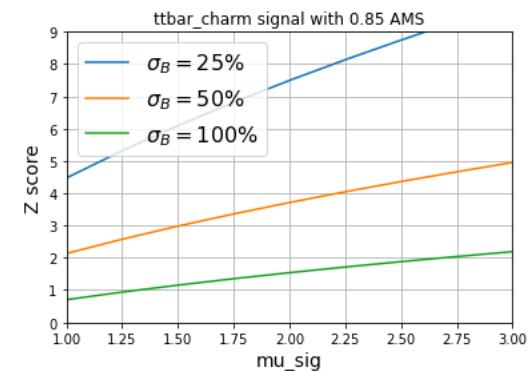
Simple NN



Optimized NN



Optimized NN
with drop out
layers



Conclusion

- ttbar and tW signals with separate couplings has been studied and all variable distributions are made. For both channels, the non-SM top mass is the best discriminator.
- NN model does a great job in ttbar channels and the UL for signal strength is almost less than 1. Because of low xsec for tW channels, NN shows weak performance in terms of UL. This mean analysis is not so sensitive to tW channels!
- Analysis tree production with important variables and plotting framework are done ([tree production framework](#), [plotter framework](#), [ML weights](#), [Statistical fits](#)).
- UL plots are finalized so the final report will be sent ASAP. Paper writing has already started.
- Could we start a short ML project (detector optimization, particle reconstruction using CNN, AI inference applications with FPGA) as post-doc. Financial support opportunity from ISTI is also possible.
- Your feedback is welcome and appreciated.

Backup

Cross sections in pb

ttbar channels

```
# ttbar coupling channel info
sig_couplings = ['signal_charm_SRR', 'signal_charm_VRR', 'signal_charm_TRR', 'signal_up_SRR', 'signal_up_VRR', 'signal_up_TRR']
# cross-sections (pb)
xsec_sig_couplings = [0.0002, 0.0008, 0.0101, 0.0002, 0.0008, 0.0101]
# number of events generated
sig_event_couplings = [3*10**6, 3*10**6, 3*10**6, 3*10**6, 3*10**6, 3*10**6]

sig = ['signal_charm', 'signal_up']
# cross-sections (pb)
xsec_sig = [0.01376, 0.01376]
# number of events generated
sig_event = [3*10**6, 3*10**6]
```

tW channels

```
# tW coupling channel info
sig_tW_couplings = ['signal_tW_charm_SRR', 'signal_tW_charm_VRR', 'signal_tW_charm_TRR', 'signal_tW_up_SRR', 'signal_tW_up_VRR', 'signal_tW_up_TRR']
# cross-sections (pb)
xsec_sig_tW_couplings = [0.000012, 0.000048, 0.0005, 0.000012, 0.000048, 0.00051]
# number of events generated
sig_event_tW_couplings = [3*10**6, 3*10**6, 3*10**6, 2*10**6, 2*10**6, 2*10**6]

sig_tW = ['signal_tW_charm', 'signal_tW_up']
# cross-sections (pb)
xsec_sig_tW = [0.0007, 0.0007]
# number of events generated
sig_event_tW = [3*10**6, 3*10**6]
```

Signal and background generation

- Signal and background events are generated with MG5 (for ME) + PYTHIA (for PS and HAD) + Delphes (for HLLHC CMS card detection). almost 3M events for both charm and up signals and 2M events for each background.
- Weights look fine (<1) for all signal and background events. Extra 15M $t\bar{t}$ events are being generated to have better ML training (the third lepton in $t\bar{t}$ should be fake btw).
- Here is the weight summary for all analysis processes:

```
weights = {'ttbarZ': 0.00431, 'tZ': 0.00375, 'ttt': 2.79520e-05, 'ZZ': 0.67125,
'ttbar': 0.9485, 'ttbarW': 0.00015, 'WZ': 0.13575,'signal_charm': 0.01376,
'signal_up': 0.01376}
```

- The preselections applied:
 1. exactly 3 leptons (for now just electrons) with one pair of OS
 2. at least 2-jets with one b-tagged jet
 3. minimum P_T cut and η cut to pass di-lepton trigger