

Vilniaus universitetas
Fizikos fakultetas
Teorinės fizikos ir astronomijos institutas

Kristijonas Mikas Silius

**TTH PROCESO KINEMATIKOS TYRIMAS CERN DIDŽIOJO HADRONŲ
GREITINTUVO CMS EKSPERIMENTE**

MOKSLO TIRIAMOSIOS PRAKTIKOS ATASKAITA

Teorinės fizikos ir astrofizikos studijų programa

Studentas	Kristijonas Mikas Silius
Darbo vadovas	dr. Aurelijus Rinkevičius
Konsultantas	dr. Darius Jurčiukonis
Instituto direktorius	prof. Egidijus Anisimovas

Vilnius 2024

Turinys

Įvadas	3
1 ttH procesas	4
1.1 CMS eksperimentas Didžiajame hadronų greitintuve	4
1.2 ttH procesas	6
1.3 Top ir anti-top kvarkų skilimas	7
1.4 Higgs'o bozono skilimas	8
1.5 Kombinuotas skilimas	8
1.6 ttH dviejų vienodo ženklo leptonų procesas	9
1.7 On-shell ir off-shell procesai	10
2 ttH proceso tyrimo metodika	11
2.1 MadGraph programinė įranga	11
2.2 MadAnalysis sistema	11
2.3 ROOT	11
2.4 Duomenų formatas ir parametrai	11
2.5 TensorFlow	13
2.6 Keras	13
2.7 Sequential modelis	13
2.8 Adam optimizatorius	13
2.9 Aktyvacijos funkcijos	14
2.10 Mašininio mokymo modelių struktūra	15
3 Kinematikos tyrimas	24
3.1 ttH bandinio parametrai	24
3.2 ttH ir tt bandinių palyginimas	31
3.3 ttH dalinio off-shell ir pilno off-shell skilimų kinematikos palyginimas	33
4 Higgs skersinio impulso regresijos rezultatai	39
4.1 Higgs p_T regresija naudojant minimalų modelį	39
4.2 Higgs p_T regresija naudojant standartinį modelį	42
Išvados	48
Literatūra	49

Įvadas

Higss'o (H) bozono atradimas 2012 metais ATLAS ir CMS eksperimentuose CERN Didžiojoje priešpriešinių srautų hadronų greitintuve (angl. Large Hadron Collider – LHC) [1,2] atvėrė naujas galimybes giliau tirti šią dalelių fizikos sritį. Išsamūs šio naujojo bozono savybių matavimai yra svarbūs, siekiant nustatyti, ar atrastas rezonansas iš tikrųjų yra Higss'o bozonas, numatytas standartiniame modelyje (angl. standard model - SM) [3–6]. Remiantis standartiniu modeliu, Higss'o bozono Yukawa sąryšio konstanta y_f su fermionais yra proporcinga fermiono masei m_f , t.y. $y_f = m_f/v$, kur $v = 246$ GeV žymi Higss'o lauko vakuumo tikėtiną vertę. Tuo tarpu, top kvarkas yra iki šiol žinomas sunkiausias fermionas, jo masė $m_t = 172.76 \pm 0.30$ GeV [7]. Tokia didelė top kvarko masė gali indikuoti, kad jis yra svarbi dalis elektrosilpnosios simetrijos pažeidimo procese (angl. electroweak symmetry breaking) [8–10]. O Yukawa sąryšio konstantos nukrypimai nuo standartinio modelio prognozių gali parodyti, kad egzistuoja nauji fizikos dėsniai už standartinio modelio ribų, dėl šios priežasties y_f vertės nustatymas ypatingai įdomus Higss'o bozono tyrimuose.

Higss'o bozono sukūrimo procese kartu su top ir anti-top kvarko porų susidarymu ($t\bar{t}H$ procesas) leidžia nepriklausomai nustatyti Yukawa sąryšio dydį. Dėl šios priežasties $t\bar{t}H$ kinematikos tyrimas yra svarbus ir įdomus procesas.

CMS $t\bar{t}H$ analizės grupė atlieka multi-leptoninių finalinių būsenų tyrimus ir siekė gauti gerai veikiantį Higg'so bozono skersinio impulso regresoriaus modelį įvairioms $t\bar{t}H$ finalinėms būsenoms [11]. Tačiau rezultai nepasiekė labai gerų regresijos tikslumų.

Šiame darbe išsamiau aptariami $t\bar{t}H$ ir $t\bar{t}$ susidarymo procesai, tolesni $t\bar{t}H$ proceso skilimai į dviejų to paties krūvio leptonų būseną. Pristatoma kaip buvo generuojami susidūrimų duomenys, pagrindiniai duomenų analizės įrankiai ir jų panaudojimas, aprašomi svarbiausi dalelių susidūrimo procesų parametrai, kaip jie gaunami, esminė analizės nauda. Ir tirama kaip galima optimizuoti ir pagerinti Higgs'o bozono skersinio impulso regresijos modelius.

Šio darbo tikslas susimuliuoti $t\bar{t}$, $t\bar{t}H$ įvykius ir $t\bar{t}H$ skilimą į dviejų vienodo ženklo leptonų finalinę būseną (vieną iš $t\bar{t}H$ analizės grupės tiriamų būsenų) naudojantis MadGraph programine įranga, tinkamai apdoroti gautus rezultatus, apskaičiuoti esminius parametrus ir atlikti procesų kinematikos analizę. Tuomet, apdorotus duomenis naudoti apmokant Higgs'o skersinio impulso regresijos neuroninius tinklus. Rasti geriausią mokymo būdą ir optimizuoti neuroninius tinklus siekiant gauti geresnį tikslumą nei anksčiau atliktuose tyrimuose.

1 $t\bar{t}H$ procesas

1.1 CMS eksperimentas Didžiajame hadronų greitintuve

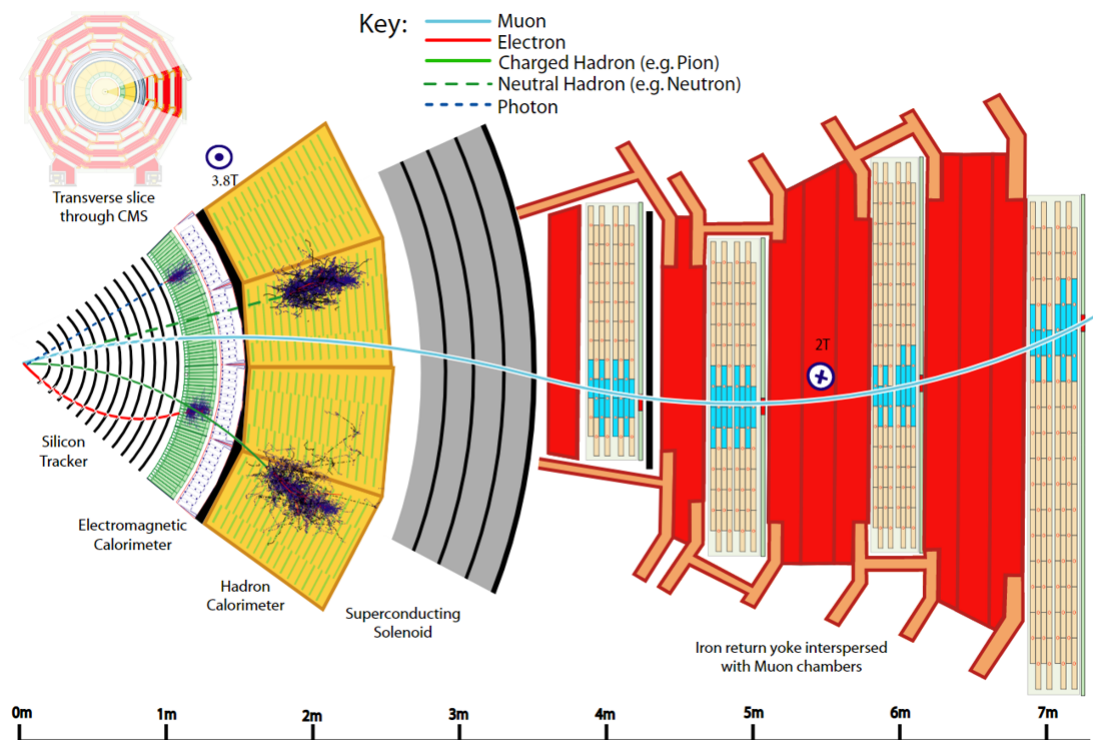
Didysis hadronų priešpriešinių srautų greitintuvas (angl. Large Hadron Collider – LHC) priklauso Europos branduolinių mokslinių tyrimų organizacijai CERN [12]. Tai yra galingiausias ir didžiausias dalelių greitintuvas pasaulyje. Tai 27 km perimetro žiedo formos greitintuvas, esantis maždaug 100 m gylyje po žeme prie Šveicarijos-Prancūzijos sienos. Greitintuvo pagrindinė paskirtis – vykdyti protonų susidūrimus, bet galimi ir kitų elektringų hadroninių dalelių tyrimai. Naujas 2022 metais didžiausias pasiektas energijos lygmuo LHC protonų susidūrimų metu buvo 13,6 TeV [13]. Greitintuve tuo pačiu momentu gali skrieti iki 2808 protonų pluoštelių, kurių kiekvieną sudaro apie 1011 protonų. Didžiajame hadronų greitintuve vykstančių susidūrimų dažnis 25 ns, jie vyksta keturiuose žiedo taškuose. Aplink greitintuvą yra išdėstyti dalelių detektoriai, kurie priklauso skirtingų eksperimentų grupėms. Keturi didžiausi iš minėtų eksperimentų yra CMS, ATLAS, LHCb ir ALICE.

Kompaktiškas miuonų solenoidas (angl. Compact Muon Solenoid – CMS) [14] yra detektorius, galintis aptikti įvairių rūšių daleles, kurios sukuriamos LHC protonų susidūrimo metu. CMS detektorius naudojamas ir standartinio modelio tikslinimo eksperimentams, ir naujų fizikos dėsnių paieškom [15]. Detektorius yra cilindro formos, jo aukštis ir plotis yra po maždaug 15 m, o ilgis lygus apie 21 m. Jo masė siekia apie 14000 tonų. Detektorius sudarytas iš įvairių segmentų ir sluoksnių, kurie naudojami detektuoti skirtingų rūšių daleles.

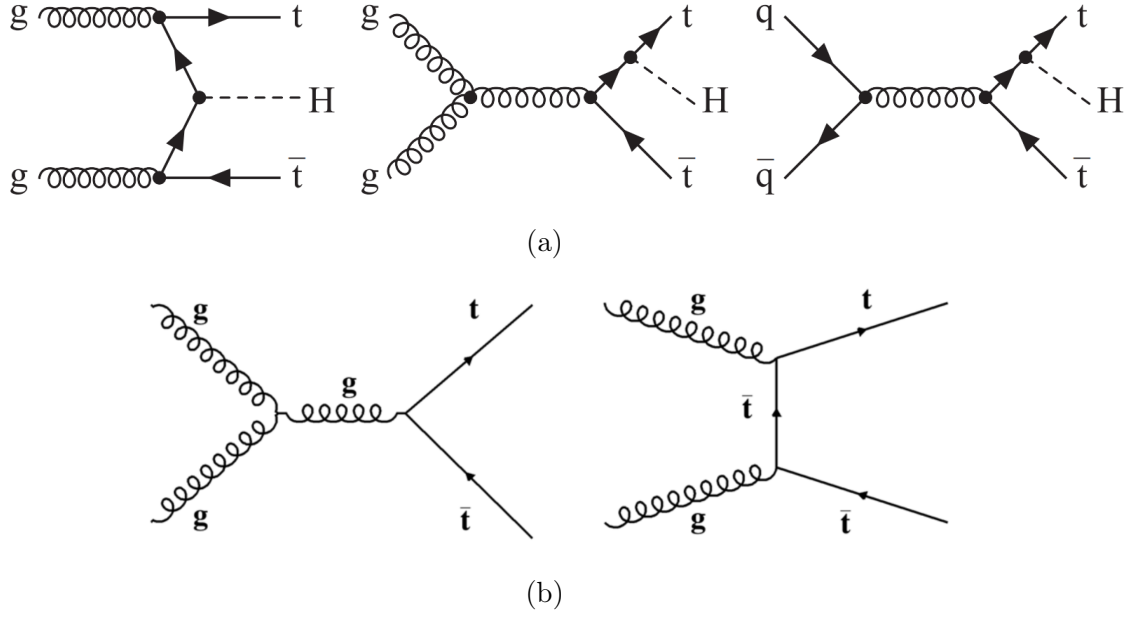
Minėtus sluoksnius galima pamatyti 1 pav. Kiekvienas iš CMS subdetektorių turi cilindrinę (angl. barrel) ir dvi antgalių dalis (angl. endcaps) [16]. Šie sluoksniai yra išdėstyti taip, kad atitiktų į detektuojamų dalelių skvarbumą. Visi sluoksniai yra skirtingi ir kiekvienas atlieka savo specifinę paskirtį.

Spalvotos linijos žymi įvairių dalelių trajektorijas. Punktyrinė linija žymi elektriškai neutralios dalelės sklaidimo trajektoriją, kuri nėra užfiksuojama silicio trekų detektoriuje. Gretimai protonų susidūrimo taško yra išdėstytas silicio trekų detektorius (angl. silicon tracker). Jis susideda iš pikselinio ir juostinio silicio trekerių. Jame į nuskurdintą puslaidininkio sritį pataiko skriejančios elektringosios dalelės, jos išlaisvina krūvininkus ir sugeneruoja elektrinį signalą. Silicio detektorius susideda iš daug puslaidininkinių sluoksnių ir išanalizavus skirtinguose sluoksniuose aptiktą informaciją nustatoma, kokia trajektorija nuskrido elektringosios dalelės, sukurtos LHC susidūrimų metu. Silicio trekų detektorių supa elektromagnetinis kalorimetras (angl. electromagnetic calorimeter – ECAL) [18]. Čia detektuojami elektronai ir fotonai bei išmatuojama jų energiją. Jis yra pagamintas iš švino volframo ($PbWO_4$), tai scintiliuojanti medžiaga. Į ją pataikiusios dalelės, sužadina medžiagos elektronus, kurie relaksuodami išskleidžia šviesą. Sukelto švytėjimo intensyvumas yra proporcingas elektrono prarastai energijai medžiagoje, taip išmatuojama pataikiusios dalelės energija. Pasinaudojant informacija iš signalų užregistruotų trekų detektoriuje, galima nustatyti ar gautas signalas ECAL sukeltas elektrono ar fotono. Hadronų kalorimetras (angl. hadroncalorimeter – HCAL) orientuotas už elektromagnetinio kalorimetro. Jo paskirtis išmatuoti hadronų

(dalelių, sudarytų iš kvarkų) energiją. Hadronų kalorimetre naudojamas plastiko scintiliatorius. Kadangi hadronai yra palyginamai sunkesni už elektronus, yra įterpiamos žalvario plokštės tarp scintiliatoriaus sluoksnių, siekiant lengviau juos sustabdyti. Todėl ši dalis yra palyginamai storesnė už elektromagnetinį kalorimetrą. Superlaidus solenoidinis elektromagnetas yra randamas už hadronų kalorimetro, jo paskirtis yra iškreivinti krūvį turinčių dalelių trajektorijas. Pagal dalelės trajektorijos krypties polinkį, galima nustatyti jos elektrinį krūvį. Pasinaudojant trajektorijos kreivumo spinduliu randamas dalelės skersinis impulsas. Tuo pat principu galime atskirti miuonus nuo didelės energijos hadronų. Užtikrinant, kad hadronai tikrai neprasisverkbtų toliau, už solenoidinio elektromagneto statomas dar vienas, plonesnis, hadronų kalorimetro sluoksnis – išorinis hadronų kalorimetras (angl. HCAL outer). Dujiniai miuonų detektoriai sudėti už išorinio hadronų kalorimetro. Kadangi miuonai apie 200 kartų sunkesni už elektronus ir nesąveikauja stipriąja sąveika, jie nėra sustabdomi ankstesnių sluoksnių ir nukeliauja didžiausią kelią detektoriuje. Jų detektavimas veikia dujų išlydžio principu, bet kokia dalelė pasiekusi šį sluoksnį jonizuoja dujas. Pratekėjusi elektros srovė fiksuojama kaip pataikymas. Visos kitos dalelės sustabdomos ankstesniuose sluoksniuose. Patys miuonai detektoriuje visai nėra sustabdomi, o tik užfiksuojamas jų trekas. Impulsas nustatomas iš trajektorijos kreivumo. Taip pat, tarp miuonų detektorių yra sukonstruotos didelės geležies plokštės, kurios leidžia apsukti magnetinį lauką: sustiprina magnetinį lauką miuonų detektoriuose, tuo pačiu neleidamos jam tęstis toli už detektoriaus ribų. Jos taip pat padeda išfiltruoti daleles, užblokuodamos kelią paskutinėms iki jų prasiskverbusioms, kurios



1 pav. Skersinis CMS detektoriaus pjūvis [17]. Spalvotos linijos žymi įvairių dalelių trajektorijas. Punktyrinė linija žymi elektriškai neutralios dalelės sklaidimo trajektoriją, kuri nėra užfiksuojama silicio trekų detektoriuje.



2 pav. Pavyzdinės Feynman'o diagramos, čia g - gliuonas, t - top kvarkas, \bar{t} - anti-top kvarkas, q - kvarkas, H - Higgs'o bozonas. (a) - $pp \rightarrow t\bar{t}H$ sukūrimo proceso Feynman'o diagramos [20], (b) - $pp \rightarrow t\bar{t}$ sukūrimo proceso Feynman'o diagramos. [21]

nėra miuonai [19]. Vienintelės ilgai gyvuojančios dalelės, kurios tiesiogiai CMS detektoriuje nėra aptinkamos yra neutrinai. Tačiau juos rasti galima apskaičiavus visų registruotų dalelių skersinių impulsų vektorinę sumą ir pamačius didelį skersinio impulso trūkumą tam tikra kryptimi (visų susidariusių dalelių skersinių impulsų vektorinė suma turėtų būti lygi nuliui). Toks neatitikimas dažniausiai indikuoja detektoriaus neaptiktą neutriną.

1.2 $t\bar{t}H$ procesas

Dalelių fizikoje, kvarkai yra elementariosios dalelės, kurios sudaro protonus ir neutronus. Top kvarkas t yra didžiausią masę turintis kvarkas.

$pp \rightarrow t\bar{t}$ procesas apibūdina top kvarko t ir jo anti-kvarko \bar{t} susidarymą. Tokio proceso Feynman'o diagramos matomos 2b pav.

Higgs'o bozonas H yra kita elementarioji dalelė, kuri siejasi su Higgs'o lauku. Šis laukas svarbus tuo, kad dalelių sąveika su juo kai kurioms elementariosioms dalelėms suteikia jų masę.

$pp \rightarrow t\bar{t}H$ procesas apjungia $t\bar{t}$ ir H dalelių susidarymą, jo metu Higgs'o bozonas sukuriamas kartu su top kvarkų pora (žr. 2a pav.). $t\bar{t}H$ proceso stebėjimas ir jo savybių tyrimas leidžia tirti Yukawa sąryšio konstantą (y_f), kuri apibūdina fermionų (šiuo atveju top kvarkų) sąveikos stiprumą su Higgs'o lauku. Šios vertės nuokrypiams nuo standartinio modelio prognozių $t\bar{t}H$ procese gali indikuoti naujus fizikos dėsnius neapibrėžtus standartinio modelio.

1.3 Top ir anti-top kvarkų skilimas

1.3.1 Top kvarko (t) skilimas

Top kvarkas yra sunkiausia žinoma elementarioji dalelė, kurios masė siekia $173 \text{ GeV}/c^2$. Dėl jo masyvumo top kvarko gyvavimo trukmė yra labai trumpa - 5×10^{-25} seconds. Top kvarkas beveik visada skyla silpnosios sąveikos būdu, pagrinde į W bozoną ir apatinį (bottom) kvarką (b) [22] Taip atrodo dažniausias skilimo kanalas:

$$t \rightarrow W^+ + b$$

W^+ bozonas toliau skyla arba leptoniškai arba hadroniškai:

Leptoniškas W^+ skilimas:

- $W^+ \rightarrow e^+ + \nu_e$
- $W^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$
- $W^+ \rightarrow \tau^+ + \nu_\tau$

Hadroniškas W^+ skilimas:

- $W^+ \rightarrow u + \bar{d}$
- $W^+ \rightarrow c + \bar{s}$

1.3.2 Anti-Top kvarko (\bar{t}) skilimas

Anti-top kvarkas (\bar{t}) yra top kvarkų antidalelė, tai reiškia, kad jie turi tą pačią masę, bet neša priešingą krūvį. Jo skilimai irgi yra priešingi top kvarko skilimams, pagrinde skyla į W^- bozoną ir anti-bottom kvarką (\bar{b}) [22]:

$$\bar{t} \rightarrow W^- + \bar{b}$$

Panašiai kaip ir top kvarko atveju, W^- bozonas toliau skyla arba leptoniškai, arba hadroniškai:

Leptoniškas W^- skilimas:

- $W^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e$
- $W^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$
- $W^- \rightarrow \tau^- + \bar{\nu}_\tau$

Hadroniškas W^- skilimas:

- $W^- \rightarrow \bar{u} + d$
- $W^- \rightarrow \bar{c} + s$

1.4 Higgs'o bozono skilimas

Higgs'o bozonas, kurio masė siekia apie $125 \text{ GeV}/c^2$, turi keletą galimų skilimo kanalų, kurie priklauso nuo jo masės ir galimos fazinės erdvės skilimo produktams [22]. Pagrindiniai skilimo kanalai yra [23]:

1.4.1 Skilimas į fermionus

- $H \rightarrow b + \bar{b}$ (dominuojantis kanalas, $\sim 58\%$ atvejų [23])
- $H \rightarrow \tau^+ + \tau^-$ ($\sim 6\%$ atvejų)
- $H \rightarrow c + \bar{c}$
- $H \rightarrow \mu^+ + \mu^-$

1.4.2 Skilimas į bozonus

- $H \rightarrow W^+ + W^-$ ($\sim 21\%$ atvejų)
- $H \rightarrow Z + Z$ ($\sim 2.6\%$ atvejų)
- $H \rightarrow \gamma + \gamma$ ($\sim 0.23\%$ atvejų)
- $H \rightarrow Z + \gamma$

1.5 Kombinuotas skilimas

Aptariant top kvarkų poros ir Higgs'o bozono sukūrimą ($t\bar{t}H$ procesą), įvairios prieš tai aptartų skilimo kanalų kombinacijos yra galimos. Vienas jų dviejų vienodo ženklo leptonų (angl. two same sign leptons - 2lss) skilimas. 2lss skilimo finalinė būsenos tyrimas yra pagrindinis šio darbo interesas, tai atrodo pavyzdinis šio proceso susidarymas:

- Top kvarkas skyla į W^+ ir b .
- Anti-top kvarkas skyla į W^- ir \bar{b} .
- Higgs'o bozonas gali skilti įvairiais būdais, kaip $b\bar{b}$, WW^* , ZZ^* , or $\tau^+\tau^-$.

Dviejų vienodo ženklo leptonų arba 2lss atveju:

- $t \rightarrow W^+ + b$, toliau $W^+ \rightarrow l^+ + \nu_l$
- $\bar{t} \rightarrow W^- + \bar{b}$, toliau $W^- \rightarrow q + \bar{q}$
- $H \rightarrow W^- + W^+$, toliau $W^- \rightarrow q + \bar{q}$ ir $W^+ \rightarrow l^+ + \nu_l$

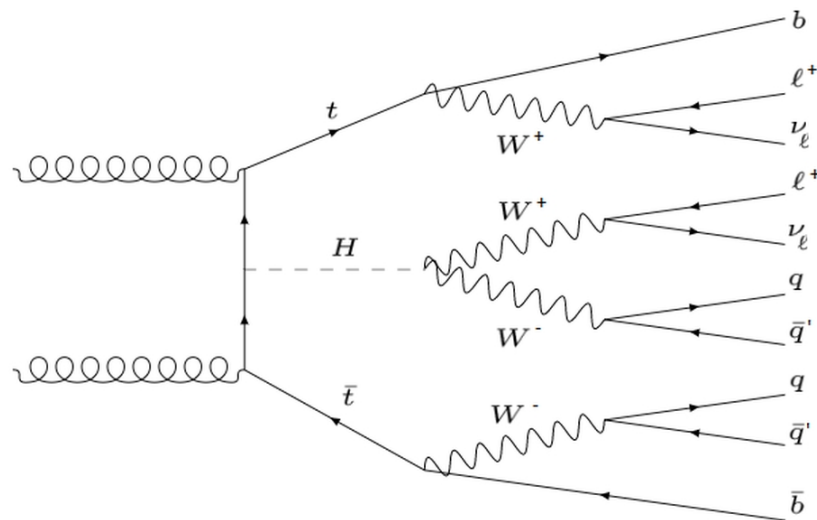
Tai mums duoda finalinę būseną su įvairiais kvarkais (q, \bar{q}, b, \bar{b}), dviem neutrinais (ν_l) ir dviem to paties krūvio leptonais (l^+).

1.6 $t\bar{t}H$ dviejų vienodo ženklų leptonų procesas

$t\bar{t}H$ procese susidaro top kvarkų pora kartu su Higgs'o bozonu, kurie kaip aptarta anksčiau gali skilti toliau iki kol pasiekia finalinę būseną. Kombinuoto skilimo skiltyje aptartas variantas kaip $t\bar{t}H$ procesas skyla iki dviejų vienodo ženklų leptonų (angl. two same sign lepton - 2lss) būsenos.

Vienodo ženklų dileptonų stebėjimas yra esminis, nes leidžia matuoti top kvarko sąveiką su Higgs'o bozonu (Yukawa sąryšis). Šis matavimas yra svarbus norint suprasti masės generavimo mechanizmą fermionams Standartiniame modelyje. Taip pat, kadangi vienodo ženklų dileptonų būseną yra retesnė, ji suteikia unikalią galimybę potencialiai rasti naują fiziką, kuri neatitinka Standartinio modelio prognozių.

Eksperimentiniai vienodo ženklų dileptonų tyrimai reikalauja sudėtingos įvykių rekonstrukcijos ir pažangių foninio triukšmo slopinimo metodų, siekiant atskirti signalą nuo įvairių foninių procesų. 3 pav. pavaizduota Feynmann'o diagrama, kur $t\bar{t}H$ skyla į aptartą to paties ženklų dileptonų būseną. Ši konkreči finalinė būseną naudojama šiame darbe atliktuose tyrimuose.



3 pav. $t\bar{t}H$ sukūrimo procesas su skilimo iki dviejų vienodo ženklų leptonų finalinės būsenos [24].

1.7 On-shell ir off-shell procesai

Dalelių fizikoje terminai "on-shell" ir "off-shell" paaiškina tarpinių virtualių dalelių dalyjaučių skilimo procese, bet nesančių finalinėje būsenoje masę.

On-Shell: Dalelė laikoma on-shell, kai jos masė atitinka tikrą dalelės masę, kurią nusako energijos-impulso išraiška $E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$. On-shell skilimuose tarpinės dalelės yra tikros ir gali būti matomos tiesiogiai, jei jų gyvavimo trukmė pakankamai ilga. Pavyzdžiui, jei Higgs'o bozonas skyla į dviejų W bozonų porą ir Higgs'o masė yra didesnė nei dviguba W bozono masė, tai reiškia, kad W bozonai yra on-shell ir gali toliau skilti iki finalinės būsenos nepažeidžiant energijos tvermės dėsnų.

Off-Shell: Tuo tarpu, dalelė yra laikoma off-shell, kai jos masė neatitinka jo abibrėžtos poilsio (angl. rest) masės (kai dalelės masė nepriklauso nuo kitų sistemos parametrų), kitaip tariant tai yra virtuali dalelė. Off-shell dalelės turi labai trumpą gyvavimo trukmę ir egzistuoja tik kaip laikinos tarpinės kvantinio proceso būsenos. Pavyzdžiui, jei Higgs'o bozonas skyla į du W bozonus, bet Higgs'o masė yra mažesnė abiejų W bozonų masė, tokiu atveju W bozonai privalo būti off-shell. Jie egzistuos labai trumpai ir greitai skils į lengvesnes daleles.

Supratimas ir atskyrimas on-shell ir off-shell skilimų yra svarbi dalis norint supranti dalelių tarpusavio sąveikos dinamiką.

2 ttH proceso tyrimo metodika

2.1 MadGraph programinė įranga

MadGraph pilnas pavadinimas - MadGraph5aMC@NLO, tai naujausia kompiuterinio kodo versija, kuri, kaip ir nurodo pavadinimas, apjungia MadGraph5 ir aMC@NLO programas, pridėdama naujų galimybių. Šios programos sukūrimo paskirtis ir naudojimo tikslas yra palengvinti kvantinės chromodinamikos (angl. Quantum Chromo Dynamics) (QCD) [25] skaičiavimus.

Labai supaprastinta pagrindė skaičiavimų idėja yra sukonstruoti teorinį modelį naudojan-
tis Feynmann'o taisyklėmis. Tuomet naudojantis Monte Carlo integravimo metodu išspręsti
fazinės erdvės integralus, taip gaunant norimą simuliacijos rezultatą [26,27]. Bendrai tai ga-
lima pavadinti Monte Carlo simuliacija [28] arba Monte Carlo įvykių generatoriumi (angl.
event generator).

2.2 MadAnalysis sistema

MadAnalysis yra sistema skirta atlikti tyrimus dalelių greitintuvuose. Parašyta C++
programinio kodo pagrindu, ši programa leidžia efektyviai atlikti sudėtingus fizikos tyrimus
iš dalelių susidūrimų įvykius apibūdinančių failų. [29–37].

Sistema dažnai naudojama kartu su Monte Carlo įvykių generatoriais, tokiais kaip Mad-
Graph, Pythia ar HERWIG. Šie generatoriai simuliuoja dalelių susidūrimus ir skilimus, ge-
neruodami įvykius, kuriuos galima analizuoti naudojant MadAnalysis 5.

2.3 ROOT

ROOT [38] yra C++ objektinio programavimo sistema sukurta didelių energijų fizikos
bendruomenės. Ji gali efektyviai ir patogiai talpinti ir analizuoti petabaitų kiekio informa-
ciją. Bet kokia C++ klasė gali būti talpinama ROOT failuose dvejetainiu formatu. ROOT
naudoja TTree objektus, kurie yra optimizuoti didelio kiekio informacijos statistinei ana-
lizei naudojant vertikalaus informacijos talpinimo metodus. Sistema turi daug integruotų
matematinų, statistinių funkcijų, skaitinių algoritmų ir įvairių regresijos analizės metodų.
Viena svarbiausių yra specialios ROOT histogramų klasės, kurios leidžia labai patogiai dirbti
su didelio kiekio vienos ar kelių dimensijų informacija.

Gauti rezultatai gali būti saugomi grafiškai norimu patogiausiu aukštos kokybės formatu,
arba išsaugomi į ROOT makrokomandinius failus, kurie leidžia atkurti duomenis.

2.4 Duomenų formatas ir parametrai

2.4.1 Pseudosparta η

Pseudosparta η (angl. pseudorapidity) yra erdvinė koordinatė, apibūdinanti kampą tarp
dalelės ir protonų spindulio pluošto ašies. Ji apibrėžiama kaip:

$$\eta = -\ln \left[\tan \frac{\theta}{2} \right], \quad (1)$$

čia θ – kampas tarp dalelės trys-impulso (angl. three-momentum) \mathbf{p} ir protonų spindulio pluošto ašies:

$$\theta = 2 \arctan (e^{-\eta}), \quad (2)$$

η galima išreikšti per \mathbf{p} :

$$\eta = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{|\mathbf{p}| + p_L}{|\mathbf{p}| - p_L} \right) = \tanh^{-1} \left(\frac{p_L}{|\mathbf{p}|} \right), \quad (3)$$

čia p_L yra impulso komponentė išilgai protonų spindulio pluošto ašies (t. y. išilginis impulsas (angl. longitudinal momentum)). Paprastai greitintuvų koordinatinių sistemoje p_L užrašomas kaip p_z .

θ kampui artėjant prie nulio, pseudosparta linksta į begalybę.

2.4.2 Skersinis impulsas

Skersinis impulsas p_T (angl. transverse momentum) dalelių fizikos kontekste - apibūdina dalelės impulso komponentę statmeną protonų spindulio pluošto ašiai. Iš kinematinės pusės tai vienas svarbiausių kintamųjų, kuris apibūdina dalelių pasiskirstymas galutinėje būsenoje po susidūrimo. Skersinis impulsas apskaičiuojamas:

$$p_T = \sqrt{p_x^2 + p_y^2}. \quad (4)$$

2.4.3 Invariantinė masė

Invariantė masė M (angl. invariant mass) apibūdina sistemos arba dalelių skilimo produktų masę. Ji vadinama "invariantine", nes išlieka tokia pat, nepaisant atskaitos sistemos pasikeitimų. Dėl šios priežasties tai labai naudingas parametras atliekas duomenų analizę. Invariantinę masę galima rasti:

$$M^2 = 2p_{T1}p_{T2}(\cosh(\eta_1 - \eta_2) - \cos(\phi_1 - \phi_2)), \quad (5)$$

, čia ϕ - azimutinis kampas, η - pseudosparta ir p_T - skersinis impulsas. Invariantinę masę taip pat galima išreikšti tik per energijas ir impulsus:

$$M^2 = (E_1 + E_2)^2 - \|\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2\|^2. \quad (6)$$

2.4.4 MET - trūkstamas skersinis impulsas

Dalelių fizikoje trūkstamas skersinis impulsas arba trūkstama energija (MET) reiškia neatitikimą procese. Tai yra būdas aptikti procese susidariusius neutrinus, nes detektorius neturi galimybės jų užfiksuoti kitaip.

MET skaičiuojama vektoriškai sudedant visų detektuotų dalelių skersinius impulsus. Teoriškai, visų aptiktų dalelių skersinių impulsų, vektorinė suma turi būti lygi nuliui, dėl impulso tvermės. Bet koks neatitikimas indikuoja neaptiktas daleles.

$$\text{MET} = \left| \sum_{\text{detected particles}} \vec{p}_T \right| \quad (7)$$

čia \vec{p}_T yra detektuotų dalelių skersinio impulso vektorius.

2.5 TensorFlow

TensorFlow yra atviro kodo (angl. open-source) mašininio mokymo sistema sukurta Google [39]. Ji plačiai naudojama neurininių tinklų kūrimui ir mokymui ir pritaikyta įvairioms mašininio mokymo užduotims. TensorFlow suteikia įvairių daugiafunkcinių įrankių ir galimybių naujų modelių įrengimui ir išplėtimui.

2.6 Keras

Keras [40] yra atviro kodo neuroninių tinklų biblioteka parašyta Python, kuri veikia per TensorFlow sistemą. Keras sukurta su tikslu būti lengvai naudojama ir išplečiama, kad būtų paprasta kurti prototipus, lengvai juos keisti ir atnaujinti, bei nesudėtingai mokyti gilius neuroninius tinklus.

2.7 Sequential modelis

Nuoseklus (angl. sequential) modelis yra iš Keras bibliotekos. Šis modelis leidžia tiesiškai išdėstyti visus modelio sluoksnius. Pavadintas "nuosekliu" nes kiekvienas sluoksnis turi po lygiai vieną tenzorių įvestyje ir išvestyje. Tokio tipo modelis yra gana paprastos struktūros, bet yra tinkamas didelei daliai neuroninių tinklų architektūrų, kurioms nereikia kelių įvesties ar išvesties kanalų individualiems sluoksniams.

2.8 Adam optimizatorius

Adam (Adaptive Moment Estimation) yra optimizavimo algoritmas plačiai naudojamas neuroninių tinklų mokymui. Adam apjungia dviejų (AdaGrad and RMSProp) stochastinio gradientinio nusileidimo funkcijų privalumus. Adam koreguoja mokymosi spartą kiekvienam parametrui.

2.8.1 AMSGrad

AMSGrad yra Adam optimizatoriaus versija, kuri pakeičia optimizavimo taisykles siekiant pagerinti konvergavimą. AMSGrad užtikrina, kad mokymosi sparta nedidėtų bėgant laikui, naudojant buvusių kvadratinį gradientų maksimumą, vietoj eksponentinio judančio vidurkio (angl. exponential moving average).

2.9 Aktyvacijos funkcijos

Aktyvacijos funkcijos suteikia modeliui netiesiškumo ir taip leidžia atpažinti sudėtingas struktūras ir tendencijas. Darbe naudojamos funkcijos:

2.9.1 SELU

SELU (Scaled Exponential Linear Unit) [41] yra aktyvacijos funkcija, kuri padaugina įvesties parametą iš konstantos ir pritaiko eksponentinį tiesinį vienetą (angl. exponential linear unit). Tai padeda palaikyti įvesties vidurkį ir dispersiją arti 0 ir 1, atitinkamai.

$$\text{SELU}(x) = \lambda \begin{cases} x & \text{if } x > 0 \\ \alpha e^x - \alpha & \text{if } x \leq 0 \end{cases} \quad (8)$$

2.9.2 ReLU

ReLU (Rectified Linear Unit) yra viena populiariausių aktyvacijos funkcijų giliam tinklų mokymui [41]. Ji tiesiogiai išveda gautą įvestą nieko nepakeitus, jei įvestis teigiama, kitu atveju išvedamas 0. ReLU padeda sumažinti dingstančių gradientų problemos efektą.

$$\text{ReLU}(x) = \max(0, x) \quad (9)$$

2.9.3 ELU

ELU (Exponential Linear Unit) [41, 42] funkcija panaši į ReLU, bet kai kuriais atvejais veikia efektyviau, kai priartina vidutinės aktyvacijas arčiau 0 ir taip pagreitina mokymą.

$$\text{ELU}(x) = \begin{cases} x & \text{if } x > 0 \\ \alpha(e^x - 1) & \text{if } x \leq 0 \end{cases} \quad (10)$$

2.9.4 Tiesinė aktyvacija

Tai paprasčiausia aktyvacija, kuri tiesiog duoda įvesties vertę. Dažniausiai naudojama išvesties sluoksnyje regresijos uždaviniams, kai išvestis gali būti bet kokia reali vertė.

$$\text{Linear}(x) = x \quad (11)$$

2.10 Mašininio mokymo modelių struktūra

2.10.1 Nuostolių funkcija (angl. *loss function*)

Vidutinė kvadratinė paklaida (MSE) (angl. Mean Squared Error) [43] yra viena iš dažniausiai naudojamų nuostolių funkcijų regresijos uždaviniams. Ji apibūdinama taip:

$$\text{MSE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (12)$$

čia y_i yra tikros vertės, \hat{y}_i yra spėjamos vertės ir n iteracijų skaičius. MSE matuoja vidutinį kvadratinį skirtumą tarp spėjamos ir tikros verčių.

Tačiau tyrime naudojamiems modeliams buvo naudojama specialiai pritaikyta MSE variacija `loss_MSEDeltaVar` [11]. Ji atsižvelgia ne tik į kvadratinį skirtumą tarp spėjamų ir tikrų verčių, bet taip pat įtraukia papildomą nuobaudą nustatomą pagal dispersijos skirtumą tarp tikrų ir spėjamų verčių. Funkcija apibūdinama taip:

```
def loss_MSEDeltaVar(y_true, y_pred):  
    y_true = tf.cast(y_true, tf.float32)  
    y_pred = tf.cast(y_pred, tf.float32)  
    y_true_mean = tf.reduce_mean(y_true)  
    y_pred_mean = tf.reduce_mean(y_pred)  
    base = tf.reduce_mean((y_true - y_pred) ** 2)  
    var_true = tf.reduce_mean((y_true - y_true_mean) ** 2)  
    var_pred = tf.reduce_mean((y_pred - y_pred_mean) ** 2)  
    var_diff = abs(var_true - var_pred)  
    val = base * var_diff  
    return val
```

Visos `loss_MSEDeltaVar` funkcijos dalys:

1. Vidurkio skaičiavimas:

$$\mu_y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (13)$$

$$\mu_{\hat{y}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{y}_i \quad (14)$$

2. Bazinis MSE:

$$\text{base} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (15)$$

3. Dispersijos skaičiavimas:

$$\text{var}_y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \mu_y)^2 \quad (16)$$

$$\text{var}_{\hat{y}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \mu_{\hat{y}})^2 \quad (17)$$

4. Dispersijos skirtumas:

$$\text{var_diff} = |\text{var}_y - \text{var}_{\hat{y}}| \quad (18)$$

5. Pritaikyta nuostolių vertė:

$$\text{val} = \text{base} \times \text{var_diff} \quad (19)$$

Paprasta MSE funkcija atsižvelgia tik į vidutinę kvadratų paklaidą tarp tikrų ir spėjamų verčių.

Pagrindinis skirtumas, tarp paprastos MSE ir specialios `loss_MSEDeltaVar` funkcijų yra, kad `loss_MSEDeltaVar` papildomai įtraukia narį, kuris "baudžia" modelį jei spėjamų verčių dispersija smarkiai pakinta nuo tikrų verčių dispersijos. Tai leidžia modeliui optimizuoti net tik paties spėjimų paklaidas, bet užtikrinti, kad spėjamų verčių statistinis pasiskirstymas būtų panašus į tikrų.

2.10.2 Minimalus neuroninis tinklas

Šis neuroninis tinklas neturi neuronų, bet naudoja sudėtingesnę struktūrą su autoencoder funkcija [11].

Autoencoder

Autoencoder šiame modelyje skirtas užkoduoti įvesties duomenis į kompaktišką formatą ir tada juos atkurti. Jo mokymas atliekamas inkrementiškai kiekviename sluoksnyje.

Autoencoder architektūra

Autoencoder struktūra yra aprašoma python dictionary - `layers_dictionary`. Tuomet sluoksniai yra sukuriama naudojantis pateiktais parametrais: aktyvacijos funkcijomis ir neuronų skaičiumi.

1. Pirmi paslėpti sluoksniai (angl. hidden layer):

- Tipas: Dense
- Aktyvacija: SELU, SELU
- Neuronų skaičius: 36
- Inkrementuojami nuo 33 iki 36 neuronų

2. Antri paslėpti sluoksniai:

- Tipas: Dense
- Aktyvacija: ReLU, SELU, ReLU, Linear
- Neuronų skaičius: 8
- Inkrementuojami nuo 5 iki 8 neuronų

Mokymo procesas

Autoencoder yra apmokomas `train_and_save_parameters_incremental_concatenated` funkcija, kuri iteratyviai prideda naujus sluoksnius ir moko modelį. Reiškia kiekvienas naujas sluoksnis gauna praeito sluoksnio išmoktą informaciją.

Regresorius

Baigus autoencoder apmokymo procesą, sukuriamas regresorius paimant paskutinį encoder sluoksnį ir prie jo pridedant papildomą išvesties sluoksnį, skirtą gauti regresijos rezultatą. Papildomas sluoksnį turi vieną neuroną, kuris išvesda regresoriaus spėjimą. Jis atrodo taip:

Išvesties sluoksnis:

- Tipas: Dense
- Neuronų skaičius: 1
- Regularizatorius: L2 (0.0001)

Mokymo procesas

Regresorius kompiliuojas su Adam optimizatoriumi ir apmokomas su nestandartine nuostolių funkcija.

Visi modelio parametrai

1. Batch dydis: 264

2. Epochos:

- Encoder: 100 kiekvienam sluoksniui
- Regresorius: 200

3. Mokymosi sparta:

- Pirmo tipo paslėptas sluoksnis: 10^{-3}
- Antro tipo paslėptas sluoksnis: 10^{-5}
- Regresorius: 10^{-4}

2.10.3 Standartinis neuroninis tinklas

Paprastesnės struktūros - neturintis autoencoder dalies, bet gilesnis modelis su daugiau mazgų (angl. nodes) arba neuronų. Šiame modelyje taip pat naudojama specialiai pritaikyta nuostolių funkcija (angl. loss function) [11].

Modelio architektūra

Šis modelis apibrėžiamas taip:

```
def my_model(lr):
    model = Sequential()

    model.add(Dense(512, input_dim=len(thevars),
                    kernel_initializer='he_normal',
                    kernel_regularizer='l2',
                    activation='relu'))
    model.add(Dense(256, input_dim=len(thevars),
                    kernel_initializer='random_uniform',
                    kernel_regularizer='l2',
                    activation='selu'))
    model.add(Dense(128, input_dim=len(thevars),
                    kernel_initializer='random_uniform',
                    kernel_regularizer='l2',
                    activation='selu'))
    model.add(Dense(64, input_dim=len(thevars),
                    kernel_initializer='random_uniform',
                    kernel_regularizer='l2',
                    activation='selu'))
    model.add(Dropout(0.10))
    model.add(Dense(1, kernel_initializer='he_normal'))
    model.add(Activation('elu'))

    adam = optimizers.Adam(lr=lr, amsgrad=True)
    model.compile(loss=loss_MSEDeltaVar, optimizer=adam)
    return model
```

Modelio sluoksniai

1. Įvesties sluoksnis:

- Įvesties sluoksnis priima skaičių savybių atitinkantį kintamojo `thevars` ilgį.

2. Pirmas tankus sluoksnis:

- Neuronų skaičius: 512
- Aktyvacija: ReLU (Rectified Linear Unit)
- Branduolio inicializatorius: He normal initialization
- Regularizatorius: L2 regularization

3. Antras tankus sluoksnis:

- Neuronų skaičius: 256
- Aktyvacija: SELU (Scaled Exponential Linear Unit)
- Branduolio inicializatorius: Random uniform initialization
- Regularizatorius: L2 regularization

4. Trečias tankus sluoksnis:

- Neuronų skaičius: 128
- Aktyvacija: SELU
- Branduolio inicializatorius: Random uniform initialization
- Regularizatorius: L2 regularization

5. Ketvirtas tankus sluoksnis:

- Neuronų skaičius: 64
- Aktyvacija: SELU
- Branduolio inicializatorius: Random uniform initialization
- Regularizatorius: L2 regularization

6. Praleidimo (angl. dropout) sluoksnis:

- Pralaidumas: 10%
- Šis sluoksnis padeda modeliui nepersimokyti (angl. prevent overfitting) kiekvienoje mokymo iteracijoje atsitiktinai prilygindamas 10% įvesties kintamųjų 0.

7. Išvesties sluoksnis:

- Neuronų skaičius: 1
- Aktyvacija: ELU (Exponential Linear Unit)
- Branduolio inicializatorius: He normal initialization

Optimizatorius

Šis modelis naudodoja anksčiau aptartą Adam optimizatorių su AMSGrad variacija:

```
adam = optimizers.Adam(lr=lr, amsgrad=True)
```

Modelio mokymas

Modelis mokosi naudodamas `fit` metodą:

```
history = model.fit(x_train, y_train,  
                    sample_weight=weights,  
                    validation_data=(x_test, y_test, weights_val),  
                    epochs=100, batch_size=128)
```

Mokymo parametrai

- Mokymo duomenys: `x_train, y_train`
- Bandinių svoriai (angl. Training Weights): `weights`
- Validation duomenys: `(x_test, y_test, weights_val)`
- Epochos: 100
- Batch dydis: 128

2.10.4 Neuroninių tinklų mokymo kintamieji

Abiejų tipų modeliams tyrimui buvo naudoti tie patys Monte Carlo metodu sugeneruoti duomenys ir iš jų apskaičiuoti parametrai, kurie buvo naudojami kaip įvesties kintamieji apmokyti modeliams regresuoti Higgs'o skersinio impulso vertes.

Mokymai buvo atlikti su skirtingais kintamaisiais, tikrinant, kurie yra svarbiausi ir geriausiai padeda modeliui išmokyti kuo tiksliau numatyti Higgs p_T .

Todėl buvo išskirti keli skirtingi mokymo duomenų paketai su skirtingais įvesties kintamaisiais:

1. Leptonų, hadroninio top ir MET duomenų paketas

Pats paprasčiausias naudotas įvesties kintamųjų rinkinys su 11 kintamųjų. Lep0, Lep1 kintamieji atitinkamai reiškia pirmo ir antro leptonų duomenis, HadTop atitinka hadroniniškai skylančio top duomenis, o met - prarastos skersinės energijos arba neutrinų duomenis:

- 'Lep0_pt', 'Lep0_eta', 'Lep0_phi'
- 'Lep1_pt', 'Lep1_eta', 'Lep1_phi'
- 'HadTop_pt', 'HadTop_eta', 'HadTop_phi'
- 'met', 'met_phi'

2. Čiurkšlių (angl. jets), leptonų, hadroninio top ir MET duomenų paketas

Nuo paprasčiausio duomenų paketo skiriasi tuo, kad yra pridedami visų čiurkšlių (jets) parametrai. Iš viso turi 29 įvesties kintamuosius. Jet0, Jet1 ir tt. atitinkamai reiškia tos čiurkšlės duomenis, visi kiti parametrai išlieka tie patys:

- 'Lep0_pt', 'Lep0_eta', 'Lep0_phi'
- 'Lep1_pt', 'Lep1_eta', 'Lep1_phi'
- 'Jet0_pt', 'Jet0_eta', 'Jet0_phi', 'Jet1_pt', 'Jet1_eta', 'Jet1_phi',
'Jet2_pt', 'Jet2_eta', 'Jet2_phi', 'Jet3_pt', 'Jet3_eta', 'Jet3_phi',
'Jet4_pt', 'Jet4_eta', 'Jet4_phi', 'Jet4_pt', 'Jet5_eta', 'Jet5_phi'
- 'HadTop_pt', 'HadTop_eta', 'HadTop_phi'

- 'met', 'met_phi'

3. Čiurkšlių (angl. jets), atskirai sudėtų neutrinių, leptonų ir hadroninio top duomenų paketas

Šio duomenų paketo pagrindinimas skirtumas, kad jame galima rasti individualių neutrinių duomenis (kitais atvejais *met* buvo visi sudėti prarastos skersinės energijos duomenys), kas yra įmanoma tik simuliacijos atveju, nes realūs detektoriai negali aptikti neutrinių. Iš viso turi 34 įvesties kintamuosius. *met1* ir *met2* atitinkamai reiškia to neutrino duomenis, visi kiti parametrai išlieka tie patys. Svarbu pabrėžti, kad *met* kintamasis pašalintas, bet *met_φ* paliktas, nes be jo nuostolių funkcija pradėjo neveikti:

- 'Lep0_pt', 'Lep0_eta', 'Lep0_phi'
- 'Lep1_pt', 'Lep1_eta', 'Lep1_phi'
- 'Jet0_pt', 'Jet0_eta', 'Jet0_phi', 'Jet1_pt', 'Jet1_eta', 'Jet1_phi',
'Jet2_pt', 'Jet2_eta', 'Jet2_phi', 'Jet3_pt', 'Jet3_eta', 'Jet3_phi',
'Jet4_pt', 'Jet4_eta', 'Jet4_phi', 'Jet4_pt', 'Jet5_eta', 'Jet5_phi'
- 'HadTop_pt', 'HadTop_eta', 'HadTop_phi'
- 'met1_pt', 'met1_eta', 'met1_phi',
'met2_pt', 'met2_eta', 'met2_phi', 'met_phi'

4. Atskirai sudėtų neutrinių, leptonų ir hadroninio top duomenų paketas

Šiame duomenų pakete vėl rasime atskirtus individualių neutrinių duomenis, bet pašalinti visi čiurkšlių parametrai. Iš viso turi 16 įvesties kintamųjų:

- 'Lep0_pt', 'Lep0_eta', 'Lep0_phi'
- 'Lep1_pt', 'Lep1_eta', 'Lep1_phi'
- 'HadTop_pt', 'HadTop_eta', 'HadTop_phi'
- 'met1_pt', 'met1_eta', 'met1_phi',
'met2_pt', 'met2_eta', 'met2_phi', 'met_phi'

5. Sugrupuotų čiuurkšlių, leptonų, hadroninio top ir MET duomenų paketas

Šis mokymo paketas buvo sukurtas pilnai atitikti anksčiau tyrimuose naudotų parametrų paketą, siekiant palyginti, kurie įvesties kintamieji naudingiausi ir ar skirtumas nebuvo tik naudojami naujai simuliuoti duomenys. Turi 20 įvesties kintamųjų, čiuurkšlių duomenys sugrupuoti pagal jų p_T į pirmų 5 čiuurkšlių sudėtus kintamuosius ir 6+ čiuurklių sudėtus kintamuosius. Taip pat atskirai naudojami sudėtų leptonų ir čiuurkšlių kintamieji:

- 'Lep0_pt', 'Lep0_eta', 'Lep0_phi'
- 'Lep1_pt', 'Lep1_eta', 'Lep1_phi'
- 'HadTop_pt', 'HadTop_eta', 'HadTop_phi'
- 'Jets_plus_Lep_pt', 'Jets_plus_Lep_eta', 'Jets_plus_Lep_phi'
- 'More5_Jets_pt', 'More5_Jets_eta', 'More5_Jets_phi'
- 'All5_Jets_pt', 'All5_Jets_eta', 'All5_Jets_phi'
- 'met', 'met_phi'

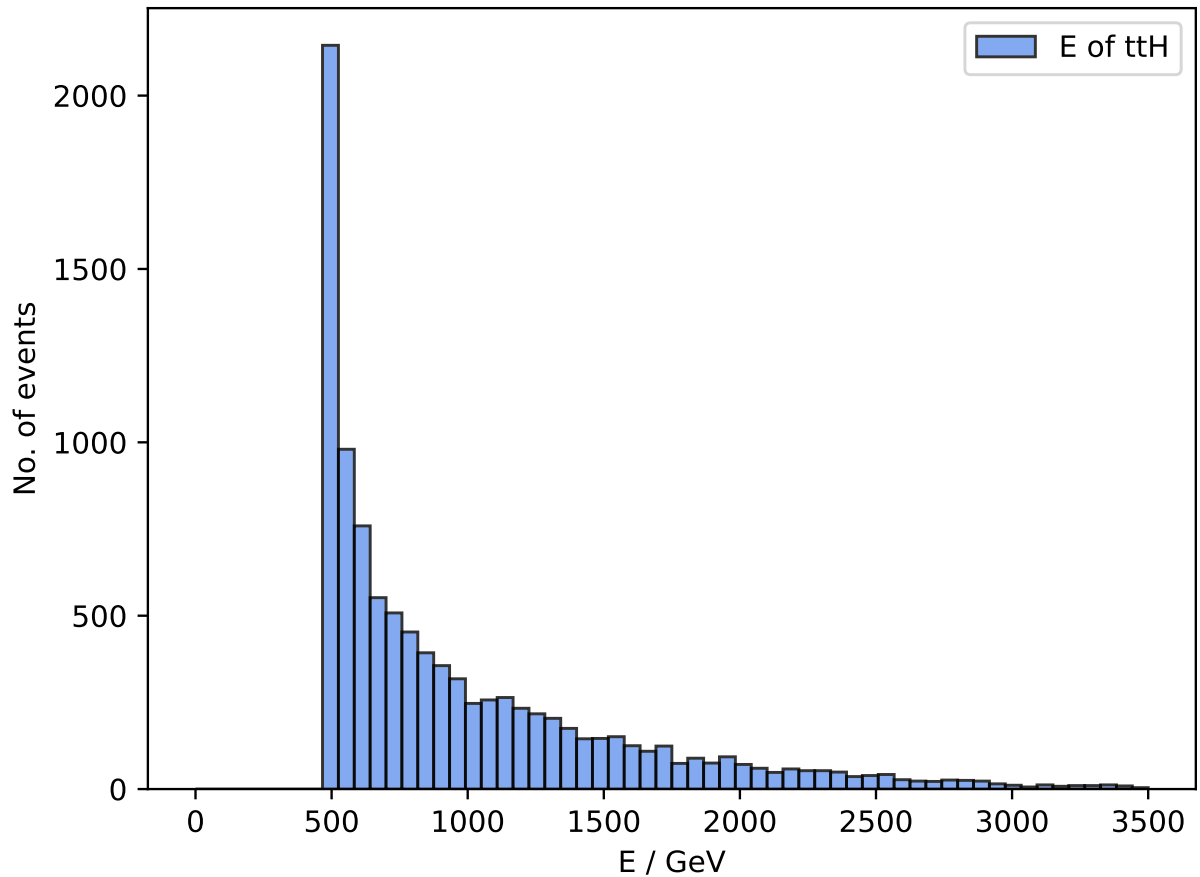
3 Kinematikos tyrimas

Kaip aptarta metodikos skyriuje naudojantis MadGraph5 ir MadAnalysis programine įranga buvo atlikta $t\bar{t}H$ proceso simuliacija. Sprendžiant fazinės erdvės integralus sudarytus remiantis Feynman'o taisyklėmis. Šiame skyriuje aptariami gauti rezultatai ir atliekama duomenų analizė. Visos simuliacijos atliktos su $\sqrt{s} = 13.6$ TeV, \sqrt{s} - masės centro energija.

3.1 $t\bar{t}H$ bandinio parametrai

Sugeneruotas $pp \rightarrow t\bar{t}H$ proceso bandinys su 10 000 įvykių ir atlikti skaičiavimai. 4 pav. pateiktas pilnos $t\bar{t}H$ sistemos energijos pasiskirstymas. Matoma, kad dažniausia $t\bar{t}H$ sistema turi mažiausią galima pilnutinę energiją, kuri yra apie 500 GeV.

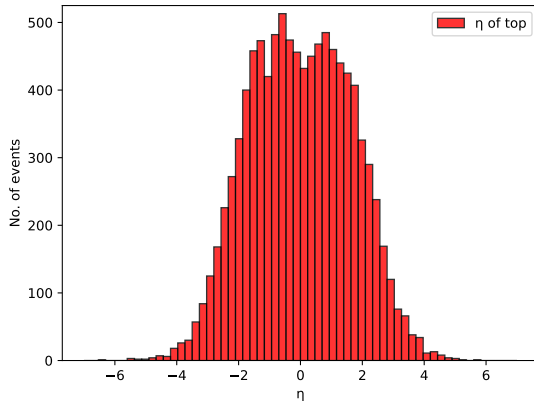
Iš 10 000 įvykių beveik 25% visų energijos verčių patenka į pirmą histogramos stulpelį ir daugiau nei 50% verčių patenka į pirmuosius dešimt stulpelių. Ši tendencija tęsiasi ir toliau: didesnės energijos vertės tampa vis retesnės.



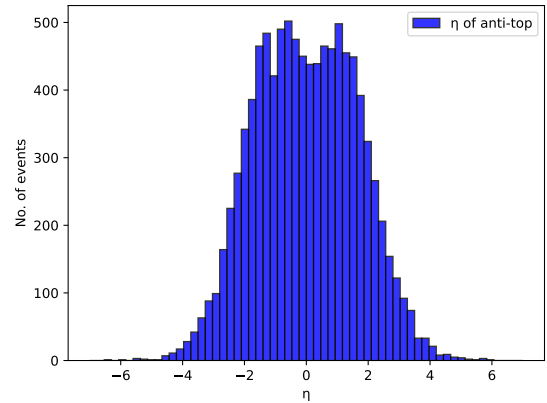
4 pav. $t\bar{t}H$ pilnos sistemos energija.

Iš $pp \rightarrow t\bar{t}H$ proceso apdorotų duomenų atlikti skaičiavimai kiekvienos sukurtos dalelės pseudospartai apskaičiuoti. Skaičiavimai atlikti pagal 1 ir 3 formules. Gauti duomenys pateikti histogramose (žr. 5 pav.).

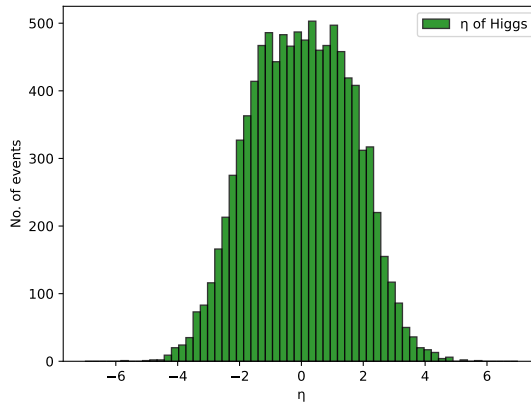
Histogramose pateikti rezultatai top, anti-top kvarkams ir Higgs'o bozonui. Visų histogramų formos panašios ir visų histogramų formos simetriškos η ašyje. Daugiau ar mažiau primena suspaustą normalų skirstinį. Matoma, kad vis didesnio nuokrypio nuo stataus kampo trajektorijos į vieną ar kitą pusę dalelėms mažiau tikėtinos nei mažo nuokrypio trajektorijos. Labiausia tikėtinos trajektorijos tarp $\eta = -2$ ir $\eta = 2$, kai θ - poliarinis kampas arti 90° . t ir \bar{t} - grafikai praktiškai identiški, o Higgs η verčių pasiskirstymas nesiskiria reikšmingai. Galima atkreipti dėmesį į top kvarkų pasiskirstimuose matomą V formos įdubimą ties $\eta = 0$, kurio neturi Higgs grafikas.



(a)



(b)

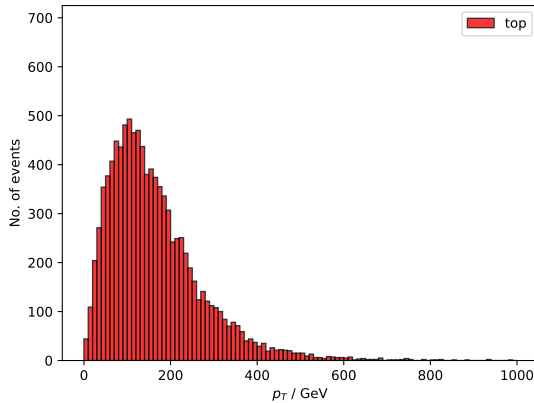


(c)

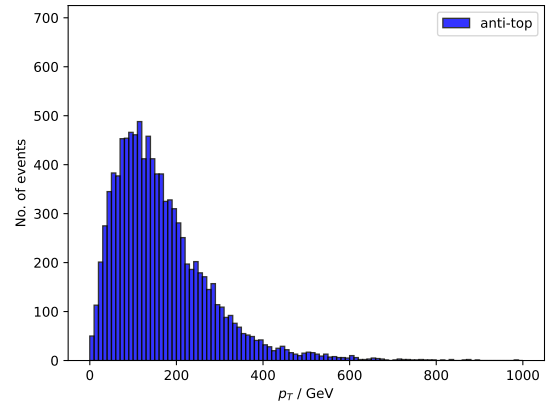
5 pav. $t\bar{t}H$ bandinio pseudosparta pasiskirstymai kiekvienai dalelei: (a) η_t - top kvarko, (b) $\eta_{\bar{t}}$ - anti-top kvarko, (c) η_H - Higgs'o bozono.

Iš $pp \rightarrow t\bar{t}H$ proceso apdorotų duomenų atlikti skaičiavimai kiekvienos sukurtos dalelės skersiniam impulsui p_T apskaičiuoti. Skaičiavimai atlikti naudojantis 4 formulę. Gauti duomenys vėl pateikti histogramų forma (žr. 6 pav.).

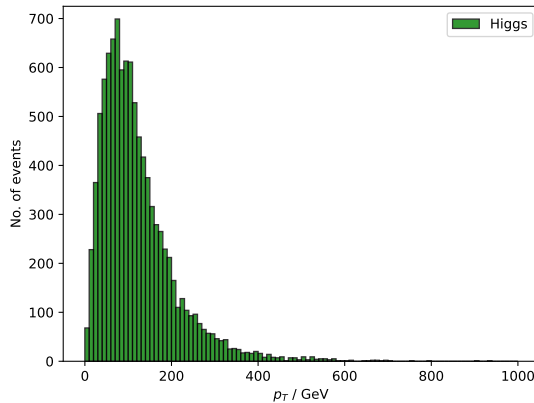
Histogramos labai nesiskiria kiekvienai dalelei, visais atvejais labiausiai tikėtina skersinio impulso vertė yra $p_T \approx 100$ GeV. Tačiau galima pastebėti, jog Higgs'o bozono p_T vertės labiau koncentruotos į tikimiausią vertę ir beveik niekad nebus didesnės nei 400 GeV. Tuo tarpu tiek t , tiek \bar{t} kvarkų p_T vertės labiau tikėtinos būti didesnės lyginant su Higgs vertėmis ir yra mažiau koncentruotos į tikimiausią vertę. Bendrai - t ir \bar{t} kvarkų p_T pasiskirstymai reikšmingai nesiskiria, o Higgs p_T vertės labiau koncentruotos prie tikimiausios, bet pasiskirstymo forma ganėtinai panaši į top kvarkų.



(a)



(b)



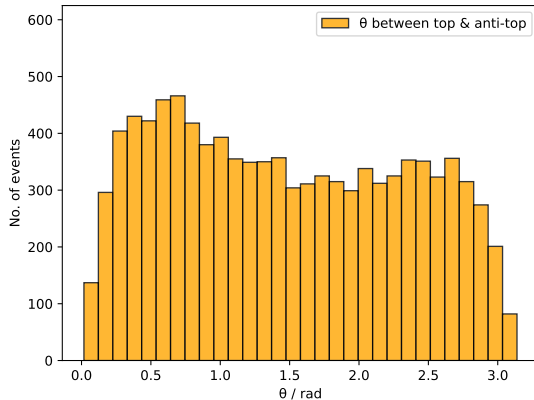
(c)

6 pav. $t\bar{t}H$ bandinio p_T skersinio impulso pasiskirstymai kiekvienai dalelei: (a) p_T - top kvarko, (b) $p_{\bar{t}}$ - anti-top kvarko, (c) p_H - Higgs'o bozono.

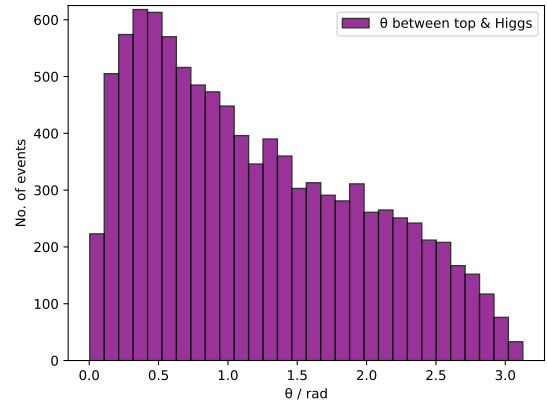
Vėl naudojantis $pp \rightarrow t\bar{t}H$ proceso duomenis atlikti skaičiavimai rasti kampui θ tarp dalelių porų. Rezultatų pasiskirstymai pateikti histogramose (žr. 7 pav.).

Iš grafiko akivaizdu, kad kampų θ tarp top kvarkų ir Higgs'o bozonų porų pasiskirstymai (žr. 7b pav.) bei kampų tarp anti-top kvarkų ir Higgs'o bozonų porų pasiskirstymai (žr. 7c pav.) labai panašūs: labiausiai tikėtina vertė pasiekama, kai $\theta \approx 0.4$ rad ir prie didesnių θ verčių atsikartojimo dažnis tendencingai mažėja.

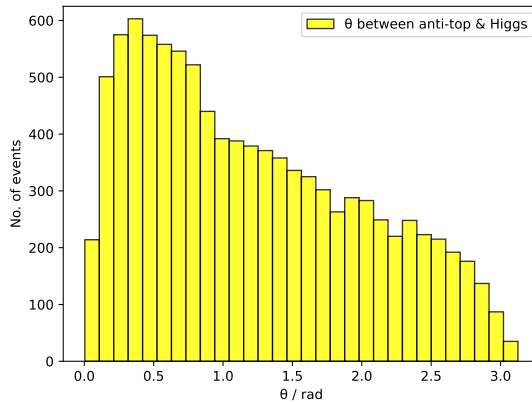
Tačiau kampų θ tarp top kvarkų ir anti-top kvarkų porų pasiskirstymas (žr. 7a pav.) atrodo kitaip: pirmas histogramos pikas matomas panašioje vietoje ties $\theta \approx 0.6$ rad, bet grafike atsiranda ir antras, kiek mažesnis, pikas prie $\theta \approx 2.5$ rad.



(a)

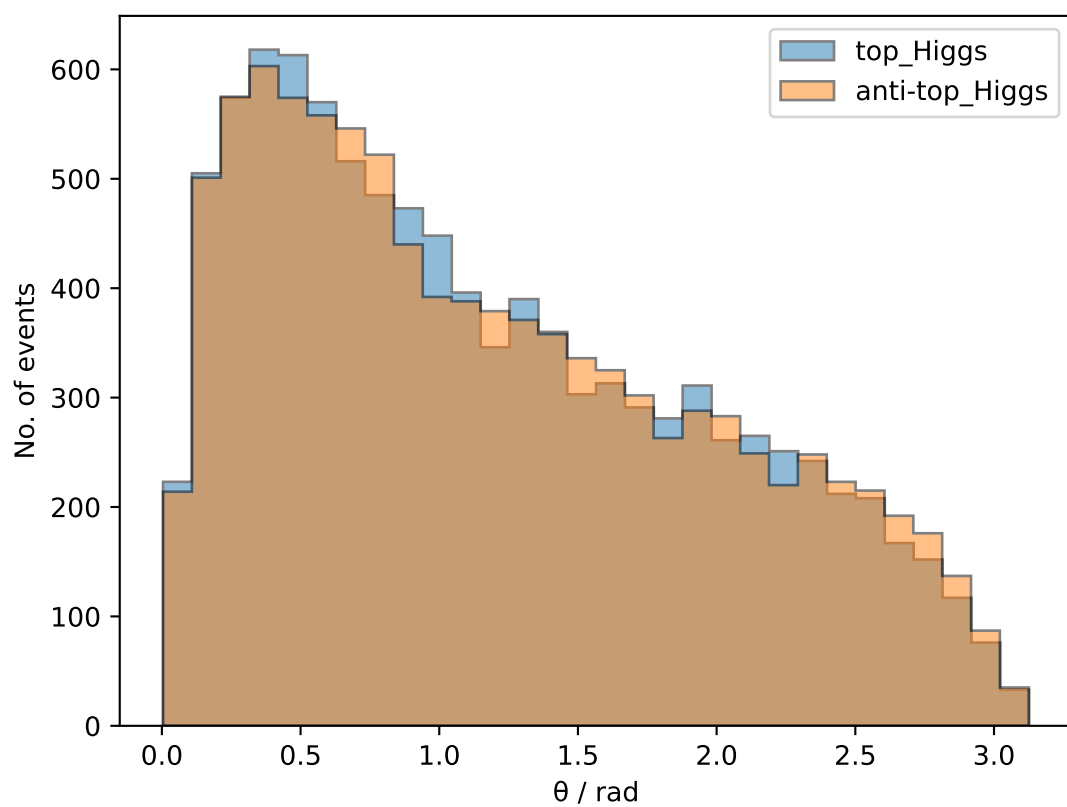


(b)



(c)

7 pav. $t\bar{t}H$ bandinio θ kampai tarp visų dalelių: (a) tarp t ir \bar{t} , (b) tarp t ir H , (c) tarp \bar{t} ir H .



8 pav. Kampų tarp t ir H bei \bar{t} ir H palyginimas.

Artimesniam palyginimui pateiktos abi 7b pav. ir 7c pav. histogramos, sudėtos viena ant kitos (žr. 8 pav.).

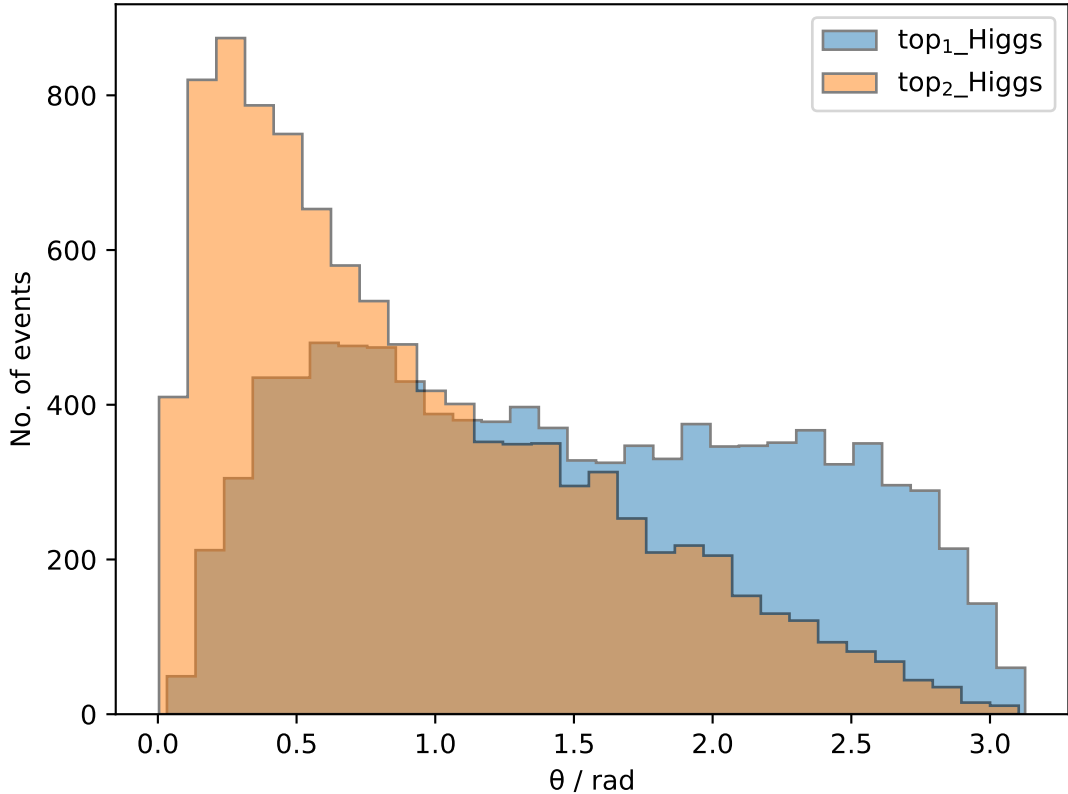
Kitas svarbus metodas: top ir anti-top kvarkų suskirstymas eiliškumu, pagal jų skersinį impulsą p_T . Pagal paskaičiuotas p_T vertes kiekvienam top ir anti-top kvarkui, galime suskirstyti juos pagal, kurio skersinio impulso vertė didesnė, t_1 bus didesnio p_T kvarkas:

$$t_1 = \begin{cases} t & \text{jei } p_T(t) > p_T(\bar{t}), \\ \bar{t} & \text{jei } p_T(\bar{t}) > p_T(t). \end{cases}, \quad (20)$$

o t_2 atvirščiai, mažesnės p_T vertės kvarkas.

Minėta tvarka sugrupavus top ir anti-top kvarkus pateikta kampų tarp jų ir Higgs'o bozonų porų pasiskirstymų palyginimas (žr. 9 pav.).

Matoma, kad top kvarkų su didesniu p_T pasiskirstymas ganėtinai tolydus ir išsilaiko panašaus atsikartojimo dažnio prie visų θ kampų verčių, o top kvarkų su mažesniu p_T pikas matomas panašioje vietoje, kaip ir 7 pav. $\theta \approx 0.4$ rad, tik jis yra aukštesnis ir sumažėja daug sparčiau. Taigi galime teigti, kad mažesnę skersinį impulsą p_T turintys top kvarkai linę sudaryti savo trajektorijoje mažą kampą su Higgs'o bozonu.

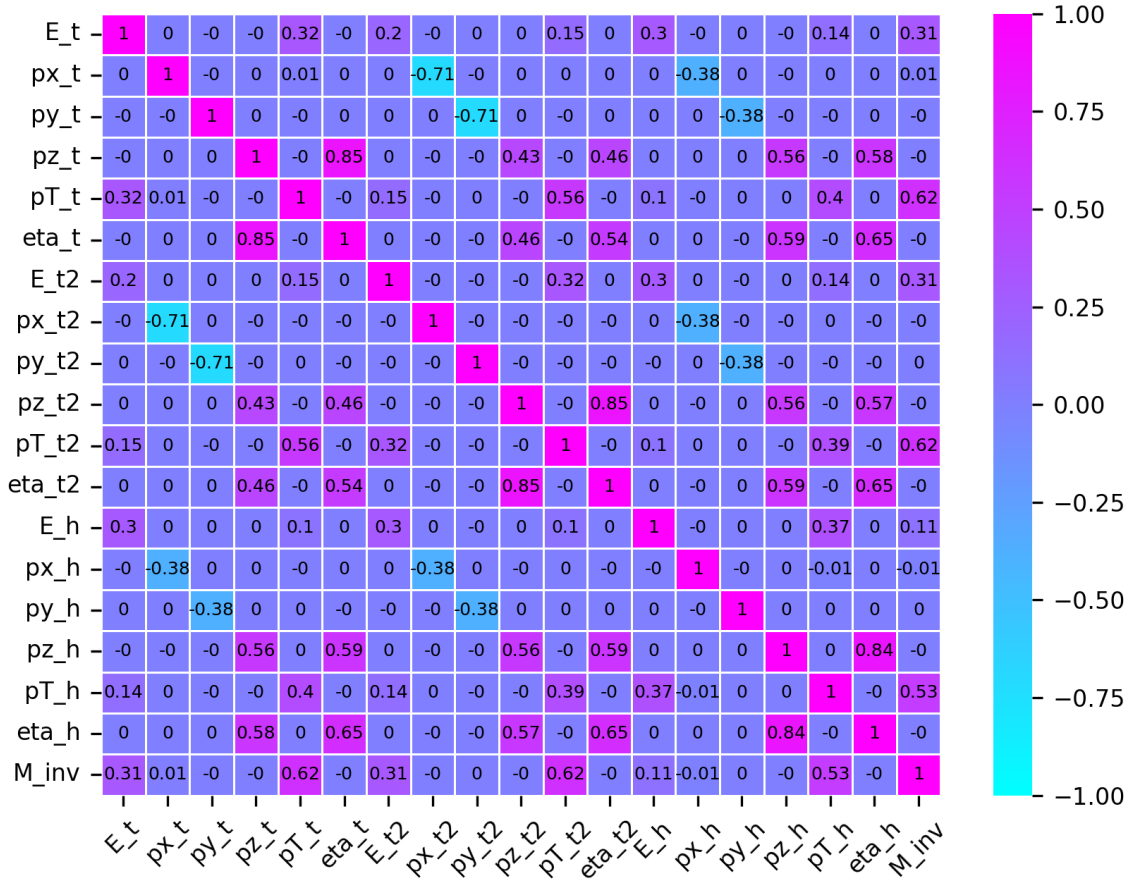


9 pav. Kampų tarp surikiuotų top kvarkų ir H bozono palyginimas.

Galiausiai buvo apskaičiuoti koreliacijos koeficientai visiems $pp \rightarrow t\bar{t}H$ proceso parametrams, siekiant pamatyti bendras tendencijas kaip koreliuoja parametrai. Tai informacija naudinga, ruošiantis mašininio mokymo modelių treniravimui tęsiant šį mokslinį tyrimą ateityje.

Koreliacijos koeficientai pateikti koreliacijos matricos pavidalu (žr. 10 pav.). Iš čia galima išskirti:

1. pz_h & η_t ir pz_h & $\eta_{\bar{t}}$ (Higgs impulsas z kryptimi su top ir anti-top pseudosparta), kurių $\rho = 0.59$;
2. px_t & py_t ir $px_{\bar{t}}$ & $py_{\bar{t}}$ (top ir anti-top kvarkų impulsai x ir y kryptimis) parametrus, kurių $\rho = -0.71$;
3. pz_t & η_t (top kvarko impulsas z kryptimi ir pseudosparta), kurių $\rho = 0.85$.



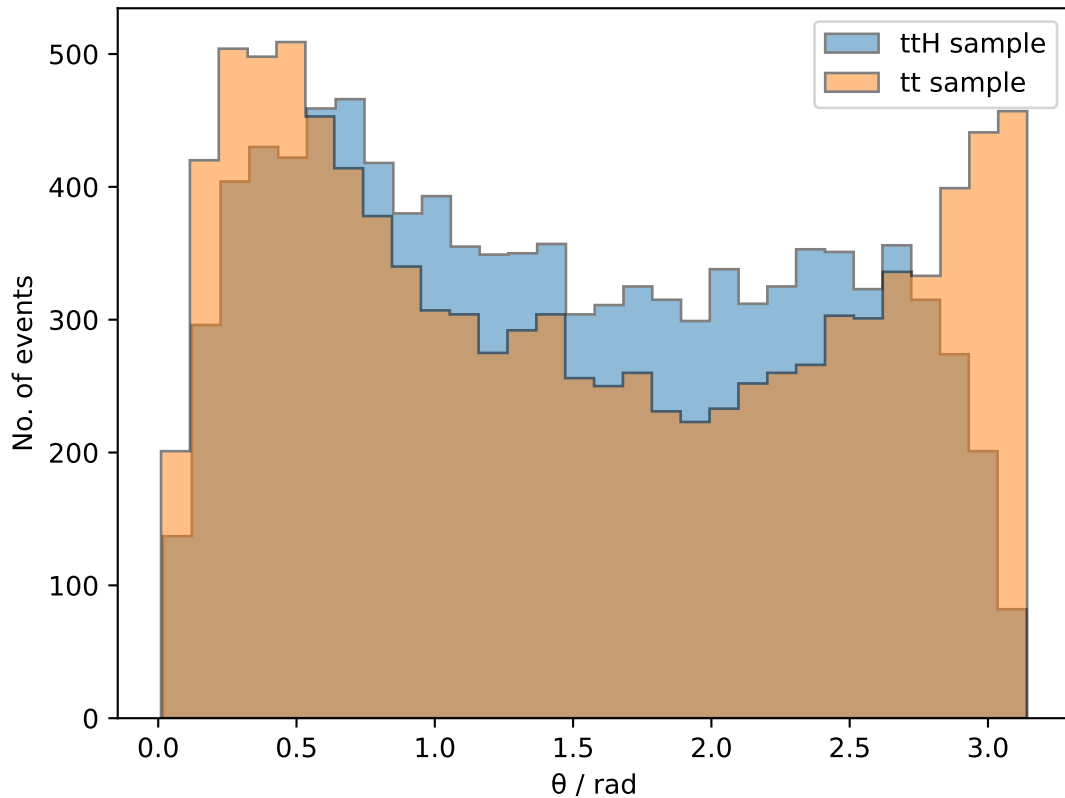
10 pav. Koreliacijos matrica tarp visų sistemos parametrų.

3.2 $t\bar{t}H$ ir $t\bar{t}$ bandinių palyginimas

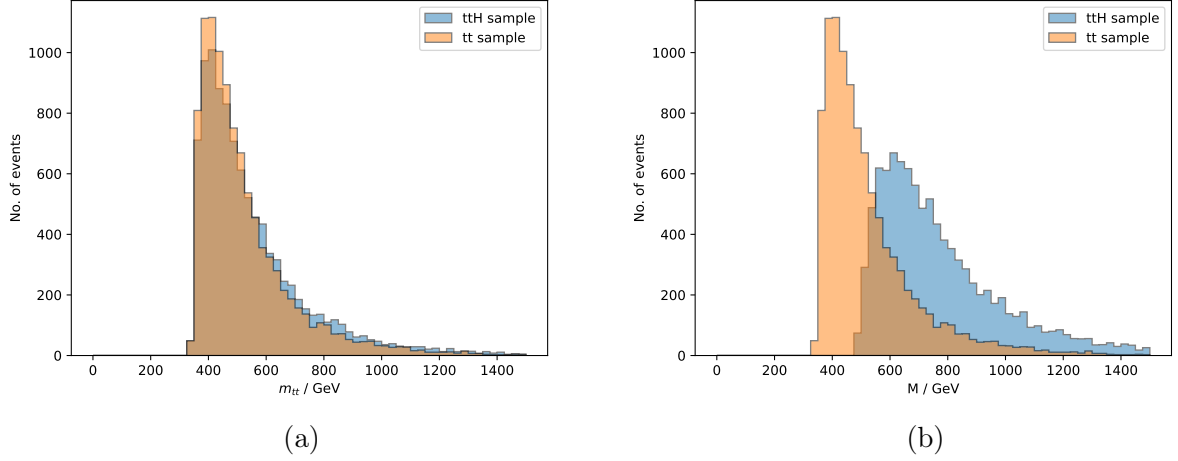
Siekiant palyginti ir patikrinti, kaip gali skirtis duomenys tarp $t\bar{t}$ ir $t\bar{t}H$, naudojantis MadGraph5 ir MadAnalysis, buvo sugeneruotas papildomas bandinys, procesui $pp \rightarrow t\bar{t}$. Su tikslu pamatyti ar skiriasi parametrai išėmus Higgs'o bozono sukūrimą iš proceso, palikus tik top kvarkų porą.

Naudojantis $t\bar{t}$ ir $t\bar{t}H$ duomenų bandiniais paskaičiuotas kampas tarp t ir \bar{t} kvarkų, vienu atveju, kai jų sukūrimo procesas atsiranda ir Higgs'o bozonas kitu, kai Higgs'o bozono nėra. Grafiką su kampų pasiskirstymu galima matyti (žr. 11 pav.).

Pasiskirstymai tarp t ir \bar{t} kampų ganėtinai panašios formos: galima matyti du pikus prie skirtingų bandinių. Tačiau galima atkreipti dėmesį, kad rezultai iš $t\bar{t}H$ bandinio yra tendencingai labiau tolydūs. Tuo tarpu $t\bar{t}$ bandinio rezultatuose galima matyti, kad abu pikai yra labiau išryškinti, jie yra aukštesni, bet ir verčių įdubimas ties grafiko viduriu gilesnis nei $t\bar{t}H$ atveju.



11 pav. Kampų tarp t ir \bar{t} kvarkų iš skirtingų bandinių palyginimas.



12 pav. Invariantiųjų masių iš dviejų skirtingų bandinių palyginimas: (a) $t\bar{t}$ masės, (b) pilnos sistemos masės skirtingiems bandiniams.

Šiuo atveju atliekami panaši analizė: naudojantis $t\bar{t}$ ir $t\bar{t}H$ duomenų bandiniais suskaičiuotos tik t ir \bar{t} kvarkų invariantinės masės, bei pilnos sistemos, t.y. $t\bar{t}$ ir $t\bar{t}H$ invariantinės masės. Rezultatai pateikti vizualiai palyginimui, galima matyti (žr. 12 pav.).

Iš 12a pav. atvaizduoto grafiko matome, kad $t\bar{t}$ invariantė masė skirtingiems bandiniams reikšmingai nesiskiria, nors rezultatai iš $t\bar{t}H$ bandinio turi truputį mažesnę piką ir yra šiek tiek mažiau koncentruotos prie tikimiausios vertės.

O 12b pav. atvaizduotame grafike, lyginant abiejų bandinių pilnos sistemos invariantinę masę, kad $t\bar{t}H$ bandinio atveju masės vertės yra ryškiai didesnės nei $t\bar{t}$ bandinio. Toks rezultatas yra tikėtinas nes Higgs'o bozono masė ($m_H = 125.17 \pm 0.11$ GeV) [44] yra reikšmingo dydžio lyginant su top mase ($m_t = 172.76 \pm 0.30$ GeV) [7].

3.3 $t\bar{t}H$ dalinio off-shell ir pilno off-shell skilimų kinematikos palyginimas

Atliekant $t\bar{t}H$ kinematikos analizę su tolesniais skilimais iki dviejų vienodo ženklo finalinės būsenos, MadGraph generuoti du skirtingi skilimo būdai: dalinai nurodant tarpinę skilimų būseną (dalinai off-shell) ir tiesiogiai nurodant tik finalinę būseną (pilnai off-shell).

Dalinai off-shell procesas šiuo atveju atrodo taip:

$$pp \rightarrow t\bar{t}H, (t \rightarrow b, l^+, \nu_l), (\bar{t} \rightarrow \bar{b}, \bar{q}, q), (H \rightarrow l^+, \nu_l, \bar{q}, q)$$

Kaip tarpinės dalelės nurodomos top t , anti-top \bar{t} kvarkai ir Higgs'o bozonas H . Praleidžiamos visos tarpinės W^+, W^- bozonų būsenos.

Tuo tarpu pilnai off-shell atveju procesas atrodo taip:

$$pp \rightarrow t\bar{t}H \rightarrow b, l^+, \nu_l, \bar{b}, \bar{q}, q, l^+, \nu_l, \bar{q}, q \quad \text{QCD} = 2 \quad \text{QED} = 8$$

Čia nenurodomi jokie tarpiniai skilimai, tiesiogiai einama prie 2lss finalinės būsenos. Tačiau pridedami du parametrai QCD=2 ir QED=8. Jie pasako MadGraph programai, kiek ir kokio tipo viršūnių (angl. vertices) turi būti įvykyje. QCD=2 atspindi dvi kvantinės chromodinamikos viršūnes, o QED=8 - aštuonias kvantinės elektrodinamikos viršūnes. Jėgos, tokios kaip kvantinė chromodinamika (QCD) ir kvantinė elektrodinamika (QED), valdo, kaip skirtingos dalelės sąveikauja per šias viršūnes, nustatydamos, kurie procesai yra leidžiami ir kokius rezultatus jie generuoja.

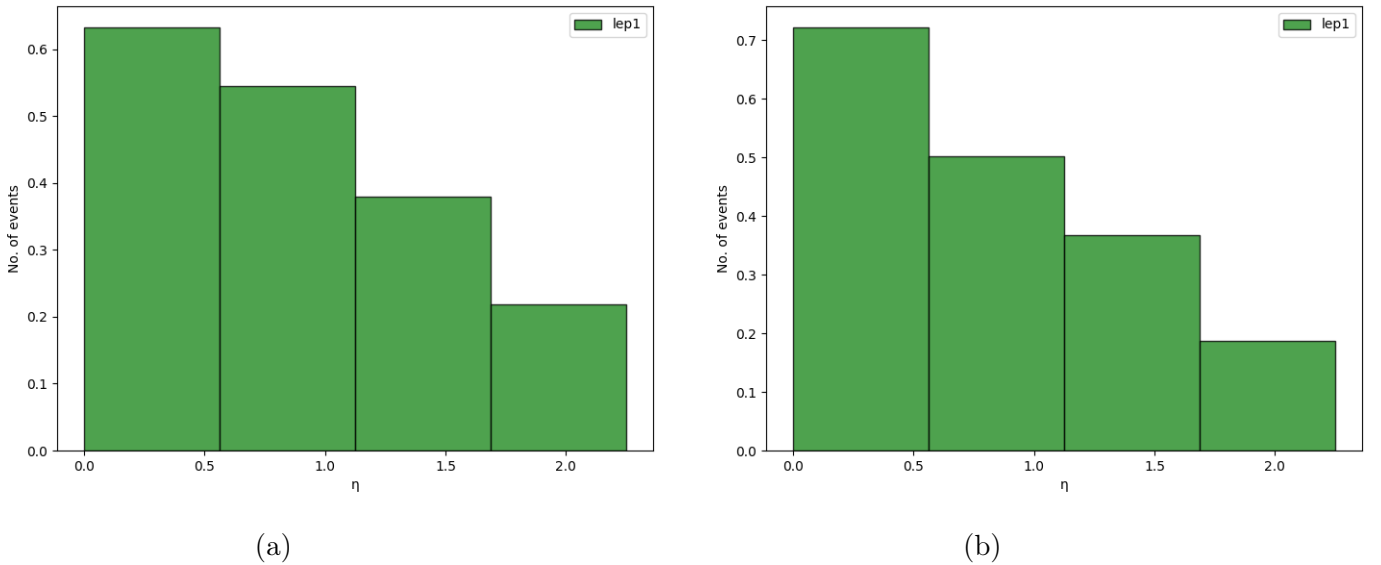
Grafikai 13 pav. atvaizduoja pirmo leptono (leptono su didesniu p_T) normalizuotus pseudospartos pasiskirstymus dalinai off-shell ir pilnai off-shell bandiniams.

Dalinai off-shell atveju 13a pav. pirmo leptono pseudospartos pasiskirstymas pasiekia maksimumą prie žemesnių η verčių ir palengva pradeda mažėti. Tendencija rodo, kad leptonai labiau linkę būti sudaryti su maža pseudoparta, tai indikuoja, kad leptonai pagrinde susidaro arčiau spindulio pluošto ašies.

Pilnai off-shell atveju 13b, pirmo leptono pseudospartos pasiskirstymas seka panašia tvarka. Leptonai labiau linkę būti sudaromi prie mažesnių η verčių, tačiau šiuo atveju kritimas yra spartesnis.

1. Pikai: Pilnai off-shell pasiskirstymas turi aukštesnį piką prie $\eta = 0$ (~ 0.7) palyginus su daliniu pasiskirstymu (~ 0.62).
2. Pasiskirstymų išsidėstymas: Abu pasiskirstymai turi tą pačią tendenciją mažėti augant η vertėms, bet pilnai off-shell krenta sparčiau. Tai gali indikuoti, kad pilnai off-shell leptonai labiau koncentruoti arčiau protonų spindulio pluošto ašies.

Bendrai, abu atvejai rodo panašias pirmo leptono pseudospartos pasiskirstymo tendencijas su minimaliais skirtumais, ko ir turėtume tikėtis.



13 pav. Pirmo leptono pseudospartos pasiskirstymo palyginimas dalinai off-shell ir pilnai off-shell bandiniams: (a) dalinai off-shell $t\bar{t}H$ pseudosparta, (b) pilnai off-shell $t\bar{t}H$ pseudosparta.

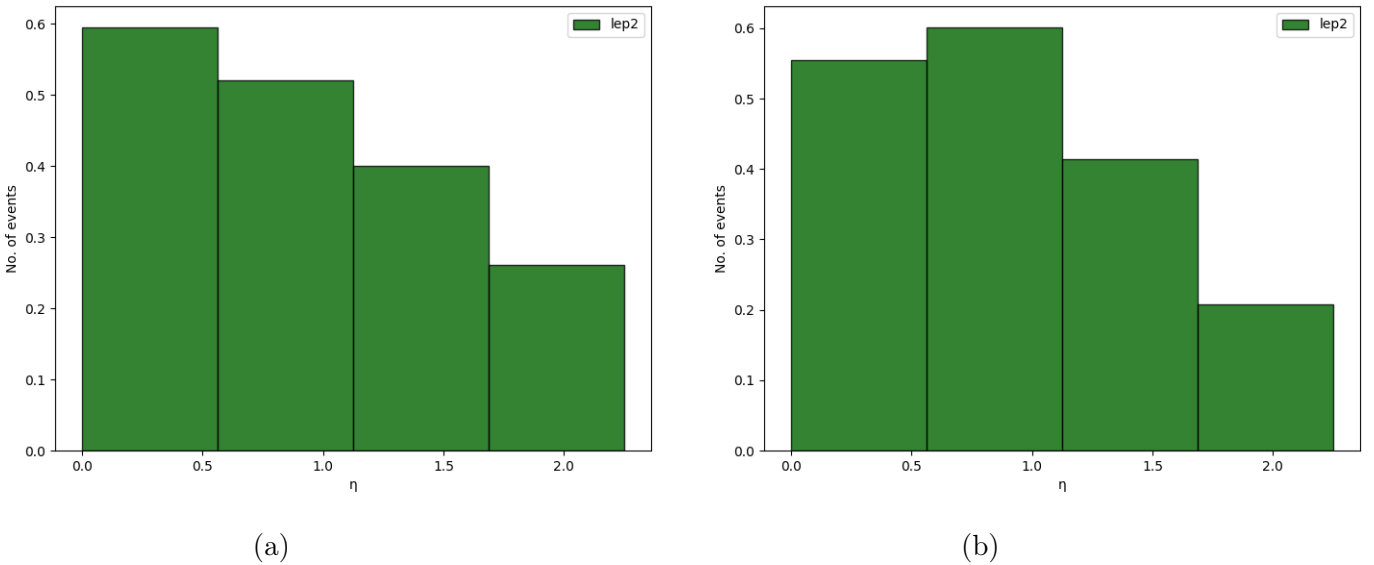
Grafikai 14 pav. atvaizduoja antro leptono (leptono su mažesniu p_T) normalizuotus pseudospartos pasiskirstymus dalinai off-shell ir pilnai off-shell bandiniams.

Dalinai off-shell atveju 14a pav. antro leptono pseudospartos pasiskirstymas pasiekia maksimumą prie žemesnių η verčių ir palaipsniui pradeda mažėti. Tendencija rodo, kad leptonai labiau linkę būti sudaryti su maža pseudoparta, tai indikuoja, kad leptonai pagrinde susidaro arčiau spindulio pluošto ašies.

Pilnai off-shell atveju 14b pav., antro leptono pseudospartos pasiskirstymas pasiekia piką ne prie mažiausių η verčių, bet maždaug ties $\eta = 0.75$. Kritimas yra šiuo atveju yra ne toks ryškus.

1. Pikai: Pilnai off-shell pasiskirstymas turi šiek tiek aukštesnį piką ties $\eta \approx 0.75$ (~ 0.6) palyginus su dalinai off-shell pasiskirstymu ties $\eta = 0$, tačiau jie yra panašūs.
2. Pasiskirstymų išsidėstymas: Abu pasiskirstymai turi tendenciją mažėti augant η vertėms, tačiau pilnai off-shell atveju tendencija akivaizdžiai nėra tolygi, dėl piko pasiekimo prie šiek tiek aukštesnių pseudospartos verčių.

Vėlgi, abu atvejai rodo panašias antro leptono pseudospartos pasiskirstymo tendencijas su minimaliais skirtumais, pagrindinis dalykas, kad šiuo atveju pilnai off-shell antras leptonas yra mažiau linkęs susidaryti prie labai mažų η verčių.



14 pav. Antro leptono pseudospartos pasiskirstymo palyginimas dalinai off-shell ir pilnai off-shell bandiniams: (a) dalinai off-shell $t\bar{t}H$ pseudosparta, (b) pilnai off-shell $t\bar{t}H$ pseudosparta.

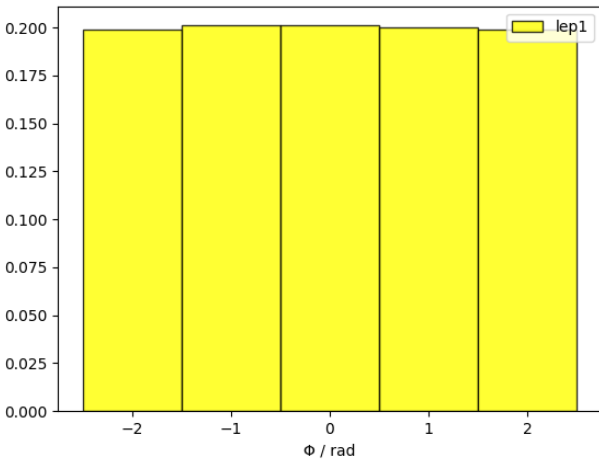
Grafikai 15 pav. atvaizduoja pirmo leptono normalizuotus ϕ kampo pasiskirstymus dalinai off-shell ir pilnai off-shell bandiniams.

Dalinai off-shell atveju 15a pav. pirmo leptono ϕ kampo pasiskirstymas yra tolygus ir vienodas visame intervale. Šis vienodumas rodo, kad dalinai off-shell modeliavimo atveju leptono ϕ kampas yra pasiskirstęs tolygiai visomis kryptimis, kas gali reikšti, kad nėra jokios preferencijos tam tikrai kryptčiai.

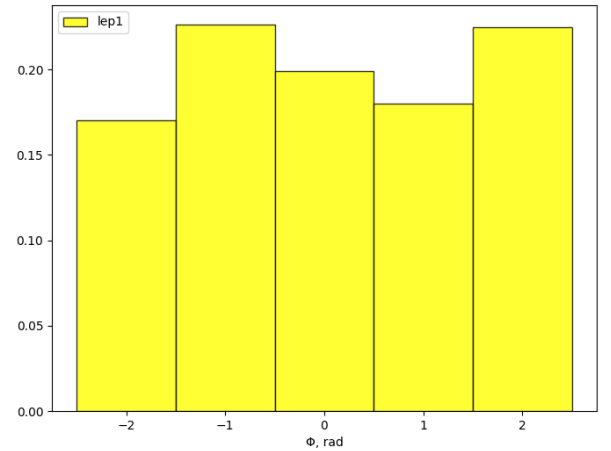
Pilnai off-shell atveju 15b pav., pirmo leptono ϕ kampo pasiskirstymas rodo akivaizdžias nevienodumo tendencijas. Skirtingose ϕ kampo intervalų dalyse matomi ryškūs svyravimai, ypač ties $\phi \approx -1$ ir $\phi \approx 2$ rad. Tai gali indikuoti tam tikrą kryptingumą arba asimetriją pilnai off-shell simuliacijos duomenims.

1. ϕ kampo pasiskirstymas: Dalinai off-shell pasiskirstymas yra tolygus ir vienodas, o pilnai off-shell pasiskirstymas rodo nevienodumus ir svyravimus.
2. Preferencijos kryptys: Pilnai off-shell atveju pastebimi specifiniai pasiskirstymo nelygumai intervale, nurodantys preferenciją tam tikroms kryptims, ko neturi dalinai off-shell bandinio duomenys.

Palyginus ϕ kampo pasiskirstymus tarp dalinai ir pilnai off-shell bandinių, galima pastebėti, kad pilnai off-shell duomenys rodo tam tikrus kryptingumo požymius, o dalinai off-shell pasiskirstymas išlieka vienodas ir tolygus visame intervale.



(a)



(b)

15 pav. Pirmo leptono ϕ kampo pasiskirstymo palyginimas dalinai off-shell ir pilnai off-shell bandiniams: (a) dalinai off-shell $t\bar{t}H$ ϕ kampas, (b) pilnai off-shell $t\bar{t}H$ ϕ kampas.

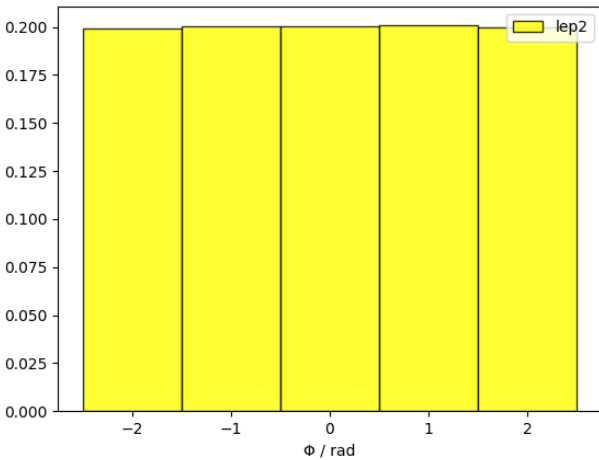
Tuo tarpu, grafikuose 16 pav. atvaizduoti antro leptono normalizuoti ϕ kampo pasiskirstymai dalinai off-shell ir pilnai off-shell $t\bar{t}H$ bandiniams. Čia tendencijos labai panašios lyginant su pirmo leptono pasiskirstymais.

Dalinai off-shell atveju 16a pav. antro leptono ϕ kampo pasiskirstymas taip pat yra tolygus ir vienodas visame intervale. Tai vėl indikuoja, kad šiuo atveju similiuotų leptonų ϕ kampai yra pasiskirstę tolygiai visomis kryptimis, ir neturi didesnio polinkio tam tikra kryptimi.

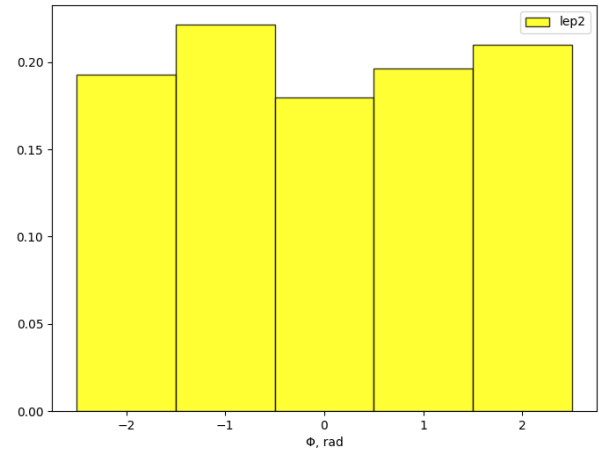
Pilnai off-shell atveju 16a pav., antro leptono ϕ kampo pasiskirstymas, taip pat, kaip ir pirmo leptono atveju, rodo akivaizdžias nevienodumo tendencijas. Skirtingose ϕ kampo intervalų dalyse atsiranda reikšmingi svyravimai. Tai gali indikuoti tam tendenciją leptonmo kryptingumui arba asimetriją pilnai off-shell simuliacijos duomenims.

1. ϕ kampo pasiskirstymas: Dalinai off-shell pasiskirstymas yra tolygus ir vienodas, o pilnai off-shell pasiskirstymas rodo nevienodumus ir svyravimus.
2. Preferencijos kryptys: Pilnai off-shell atveju pastebimi specifiniai piko intervalai, nurodantys preferenciją tam tikroms kryptims, ko nėra dalinai off-shell atveju.

Lyginant ϕ kampo pasiskirstymus tarp dalinai ir pilnai off-shell bandinių, galima pastebėti, kad pilnai off-shell duomenys rodo tam tikrus kryptingumo požymius, o dalinai off-shell pasiskirstymas išlieka vienodas ir tolygus visame intervale. Pažiūrėjus į 15 grafikus matome labai panašią tendenciją, dalinai off-shell bandiniai pasižymi tolydumo visame intervale, o pilnai off-shell bandinių pasiskirstymai linę turėti akivaizdžius nevienodumus, nors antro leptono atveju jie šiek tiek mažiau ryškūs.



(a)



(b)

16 pav. Antro leptono ϕ kampo pasiskirstymo palyginimas dalinai off-shell ir pilnai off-shell bandiniams: (a) dalinai off-shell $t\bar{t}H$ ϕ kampas, (b) pilnai off-shell $t\bar{t}H$ ϕ kampas.

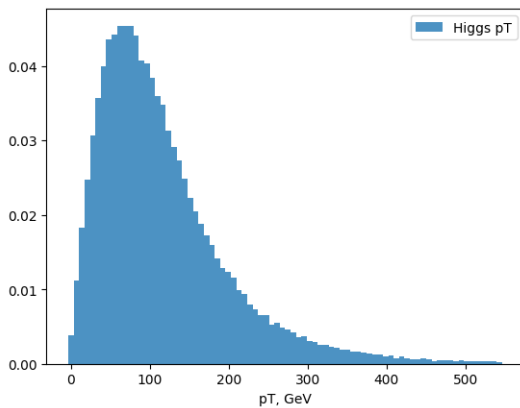
Grafikuose 17 pav. atvaizduojama Higgs'o bozono skersinio impulso normalizuoti p_T pasiskirstymai dalinai off-shell ir pilnai off-shell $t\bar{t}H$ bandiniams.

Dalinai off-shell atveju 17a pav. Higgs'o bozono p_T pasiskirstymas pasiekia maksimumą ties maždaug $p_T \approx 100$ GeV ir tolygiai mažėja didėjant p_T reikšmei. Šis pasiskirstymas rodo, kad dalinai off-shell atveju Higgs'o bozonai dažniausiai turi mažesnius p_T , kas gali reikšti, kad jie yra mažiau energetiški.

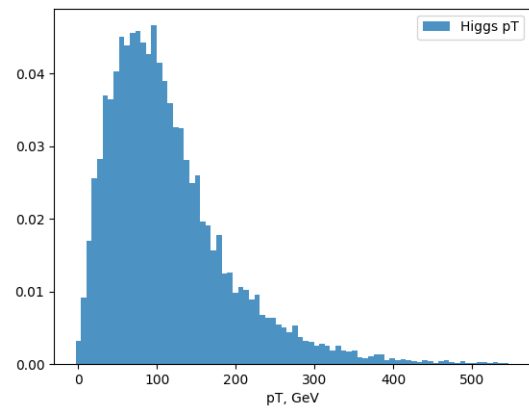
Pilnai off-shell atveju 17b, Higgs'o bozono p_T pasiskirstymas taip pat pasiekia maksimumą ties maždaug $p_T \approx 100$ GeV, tačiau šis pasiskirstymas rodo šiek tiek spartesnį mažėjimą didėjant p_T vertei. Tai rodo, kad pilnai off-shell atveju Higgs'o bozonai yra mažiau energetiški, palyginus su dalinai off-shell atveju.

1. Maksimumai: Abiejų pasiskirstymų maksimumai yra ties $p_T \approx 100$ GeV, tačiau pilnai off-shell pasiskirstymas rodo didesnę dažnį prie mažesnių p_T reikšmių.
2. Mažėjimas: Pilnai off-shell pasiskirstymas mažėja greičiau didėjant p_T , kas rodo, kad šio atvejo Higgs'o bozonai turi mažesnius p_T palyginus su dalinai off-shell atveju.

Bendrai, palyginant Higgs'o bozono p_T pasiskirstymus tarp dalinai ir pilnai off-shell bandinių, matyti, kad abiem atvejais Higgs'o bozonai turi panašius p_T pasiskirstymo maksimumus, tačiau pilnai off-shell atveju pastebimas spartesnis mažėjimas didėjant p_T reikšmei.



(a)



(b)

17 pav. Higgs'o bozono skersinio impulso pasiskirstymo palyginimas dalinai off-shell ir pilnai off-shell bandiniams: (a) dalinai off-shell Higgs p_T , (b) pilnai off-shell Higgs p_T pseudosparta.

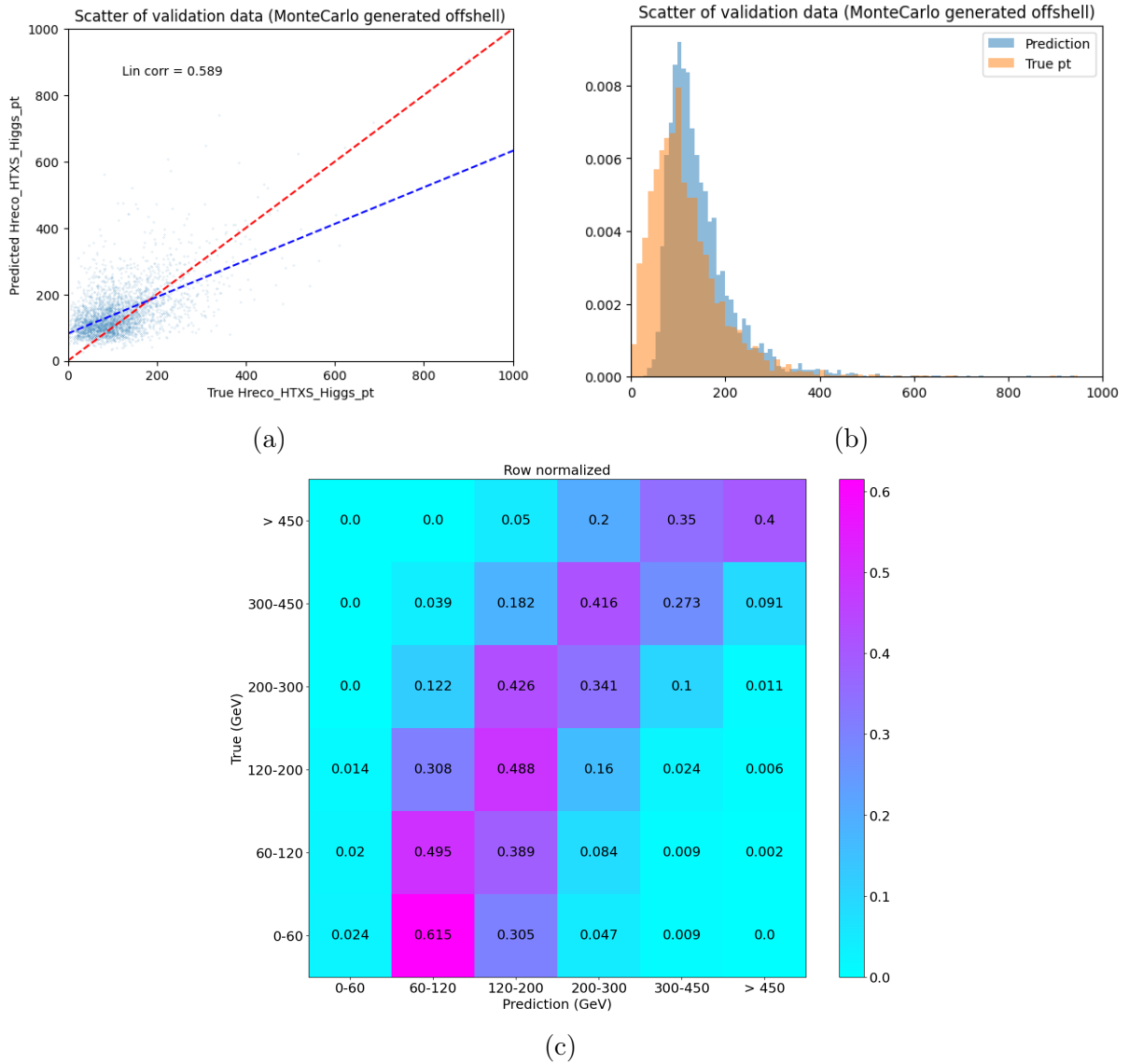
4 Higgs skersinio impulso regresijos rezultatai

4.1 Higgs p_T regresija naudojant minimalų modelį

Šiame skyriuje pateikiama dalis rezultatų gautų aliekant Higgs'o p_T regresiją su minimaliu modeliu, kuris yra aprašytas 2.10.2 skyriuje.

Grafikuose 18 pav. pateikti pirminiai modelio rezultatai naudojant paprasčius mokymo leptonų, hadroninio top ir MET kintamųjų paketą (11 kintamųjų) su 10 000 įvykių.

Apmokytas tinklas visiškai nepataiko spėjimų su mažomis p_T vertėmis, kaip galima pamatyti 18b pav. ir 18c pav. Kituose intervaluose modelis spėjimus atlieka tiksliau, bet rezultatas yra ganėtinai prastas. Tiesinės koreliacijos koeficientas 18a pav. irgi ganėtinai prastas ($= 0.589$).

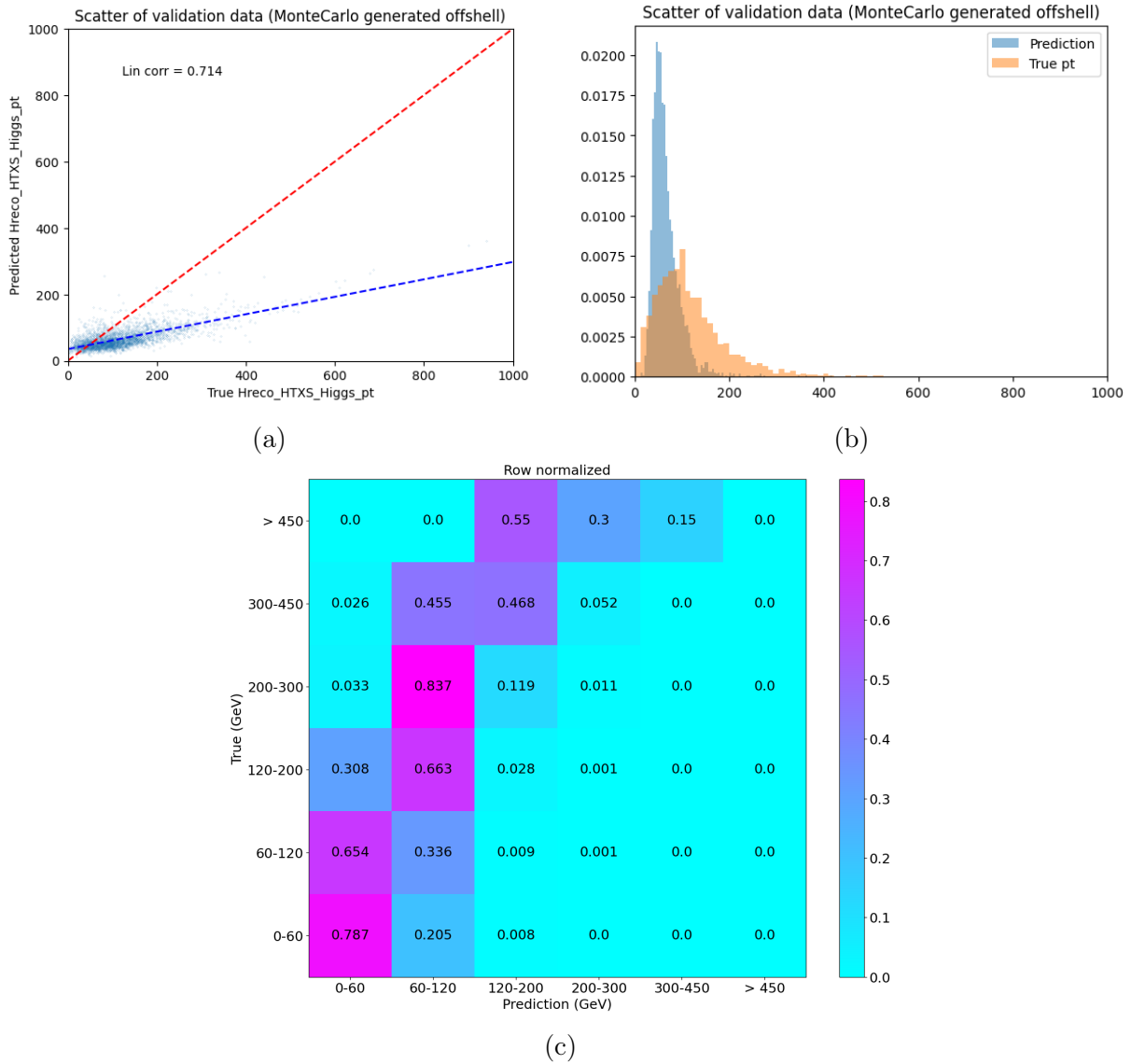


18 pav. Higgs p_T minimalios regresijos rezultatai su leptonų, hadroninio top ir MET duomenų paketu: (a) tiesinė koreliacija tarp tikrų ir spėtų Higgs p_T verčių, (b) tikrų ir spėtų Higgs p_T verčių pasiskirstymai, (c) tikrų ir spėtų verčių painiavos matrica.

Grafikuose 19 pav. pateikiami minimalaus neuorininio tinklo regresijos rezultatai jį apmokius čiurkšlių, leptonų, hadroninio top ir MET duomenų paketu (29 įvesties kintamieji) su 10 000 įvykių.

Čia atsiranda priešinga problema, kai modelis per daug dažnai spėja intervalus su mažomis p_T vertėmis. Tai indikuoja, kad autoencoder modelis persimokė pradiniuose sluoksniuose.

Toliau keičiant mokymosi įvesties kintamuosius modelis pradėjo visiškai kolapsuoti ir neduoti jokio naudingo rezultato (pavyzdžius galima rasti 1 Priede (žr. 26 pav.)), derinant modelio hiperparametrus buvo galima šiek tiek pagerinti jo veikimą, tačiau didelio kokybės šolio ir efektyvaus modelio veikimo pasiekti nepavyko (žr. 27 pav.).

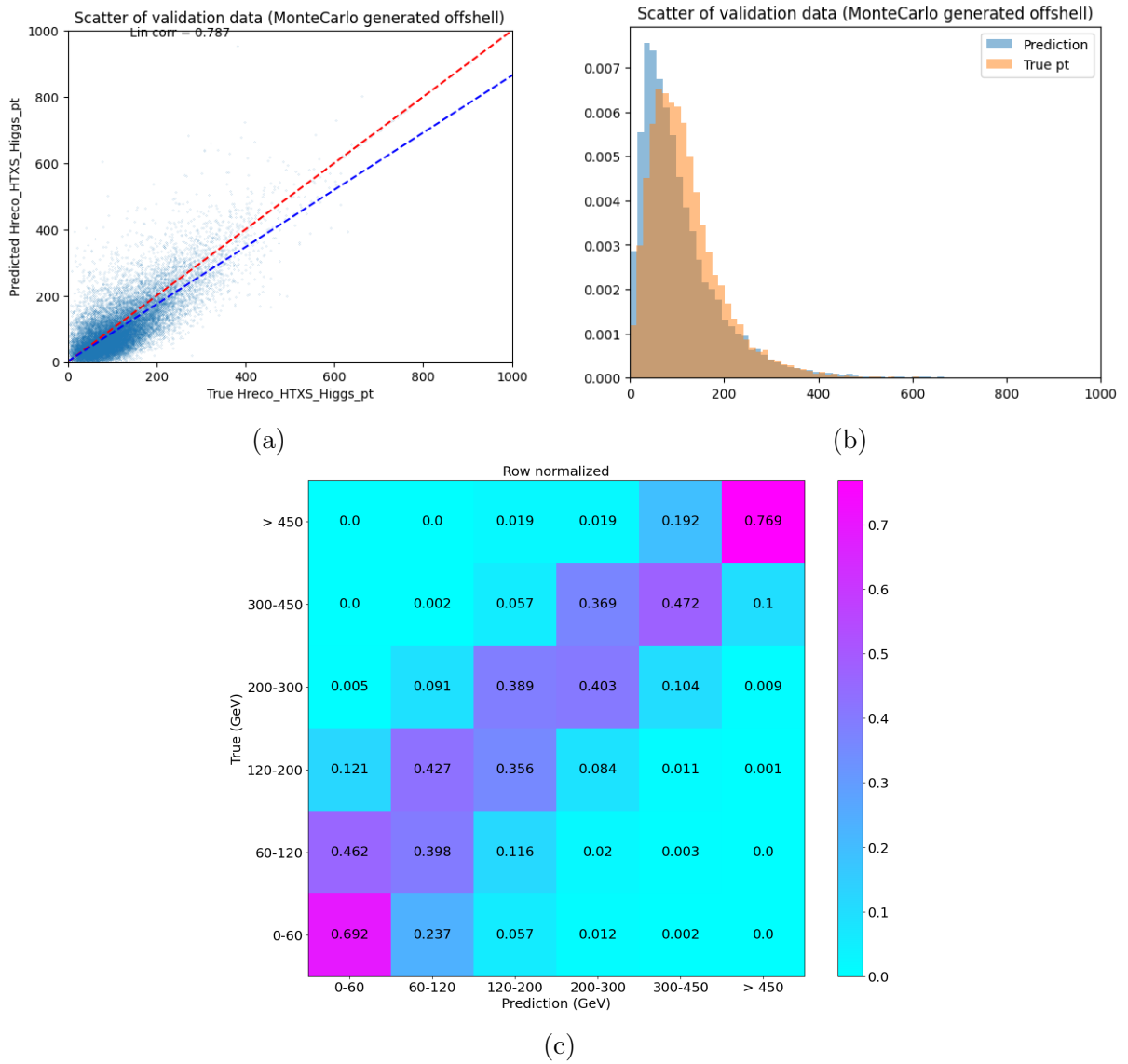


19 pav. Higgs p_T minimalios regresijos rezultatai su čiurkšlių, leptonų, hadroninio top ir MET duomenų paketu: (a) tiesinė koreliacija tarp tikrų ir spėtų Higgs p_T verčių, (b) tikrų ir spėtų Higgs p_T verčių pasiskirstymai, (c) tikrų ir spėtų verčių painiavos matrica.

Vienintelis variantas, kuris davė neblogą rezultatą buvo minimalių modelį apmokyti su sudėtingiausiu įvesties kintamųjų paketu, sudarytų čiurkšlių, atskirai sudėtų neutrinių, leptonų ir hadroninio top duomenų su $\sim 65\,000$ įvykių. Šie rezultatai pateikti 20 pav.

Nors gauti rezultatai daug geresnis, nei visi ankstesni jie nėra pakankamai tikslūs ir rasti būdų, kaip toliau optimizuoti šio modelio veiklą buvo sudėtinga.

Tokio rezultato buvo galima tikėtis, nes šis minimalus neuroninis tinklas sukurtas dirbti daug didesniu duomenų kiekiu. Todėl, dėl techninių apribojimų šis modelis nebuvo optimizuojamas ir tiriamas toliau.



20 pav. Higgs p_T minimalaus modelio regresijos rezultatai su čiurkšlių, atskirai sudėtų neutrinių, leptonų ir hadroninio top duomenų paketu: (a) tiesinė koreliacija tarp tikrų ir spėtų Higgs p_T verčių, (b) tikrų ir spėtų Higgs p_T verčių pasiskirstymai, (c) tikrų ir spėtų verčių painiavos matrica.

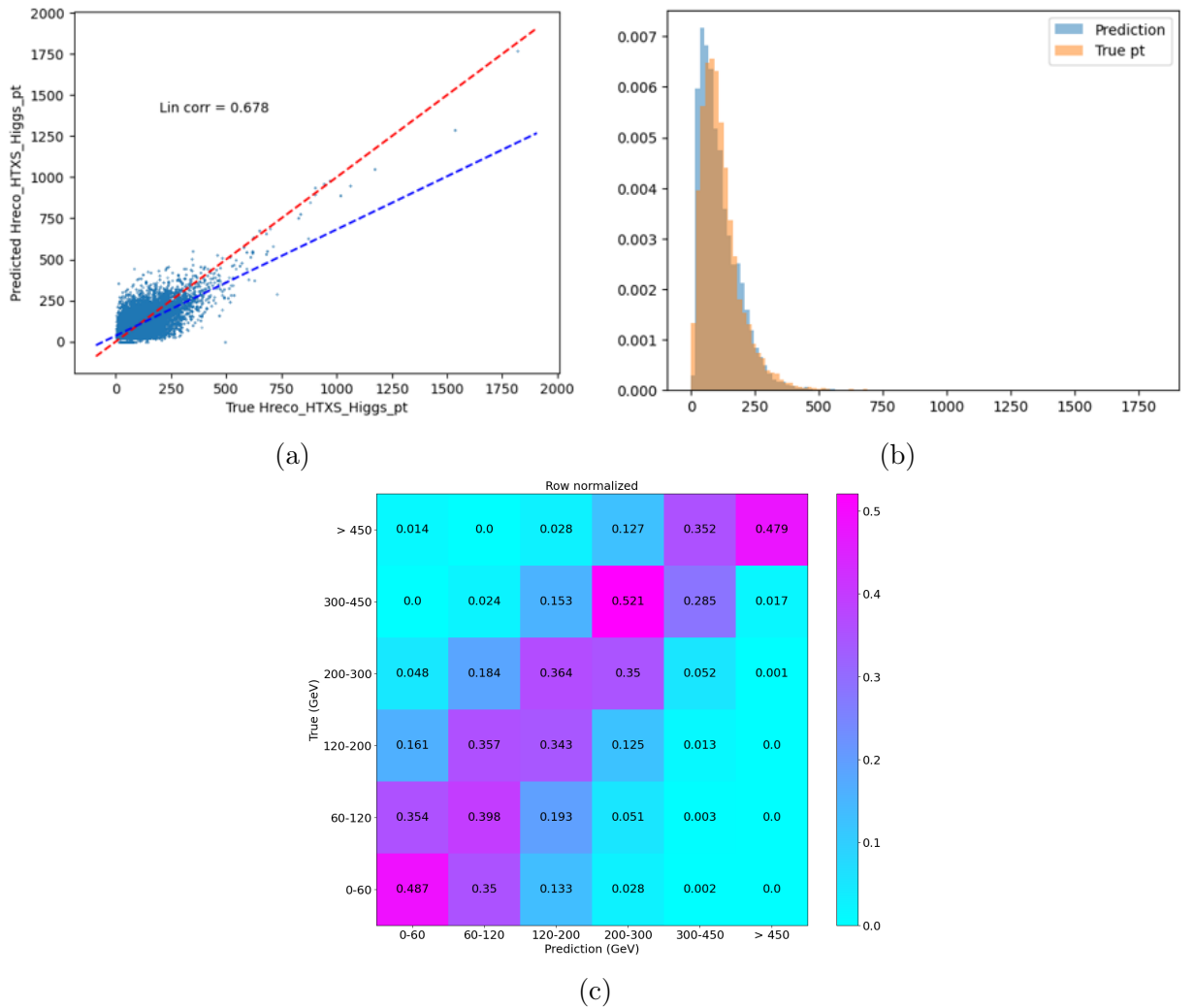
4.2 Higgs p_T regresija naudojant standartinį modelį

Šiame skyriuje pristatomi Higgs'o skersinio impulso regresijos rezultatai apmokius standartinį neuroninį tinklą aprašytą 2.10.3 skyriuje naudojant skirtingų mokymo parametrų paketus.

Grafikuose 21 pav. atvaizduoti pirmi modelio rezultatai. Čia modelis buvo apmokytas naudojant paprasčiausią apmokymo duomenų paketą su 11 įvesties kintamųjų, susidedantį iš leptonų, hadroninio top ir MET duomenų su 10 000 įvykių.

21a pav. matome tiesinės koreliacijos grafiką, kaip spėtos Higgs'o skersinio impulso vertės priklauso nuo tikrų. Raudona brūkšnine linija pavaizduotas tobulas atvejas, jei visi spėjimai tobulai atitiktų realius rezultatus. Šiuo atveju rezultato tiesinės koreliacijos koeficientas yra 0.678, reiškia modeliui pavyko išmokti kažkokias tendencijas, bet rezultatai tikrai nėra labai geras.

21b pav. pavaizduoti šio modelio spėtų ir tikrų verčių pasiskirstymai. Galime pastebėti, kad modelis visai neblogai atitinka tikrų verčių pasiskirstymo formą, bet yra linkęs šiek tiek nukrypti.



21 pav. Higgs p_T regresijos rezultatai su leptonų, hadroninio top ir MET duomenų paketu: (a) tiesinė koreliacija tarp tikrų ir spėtų Higgs p_T verčių, (b) tikrų ir spėtų Higgs p_T verčių pasiskirstymai, (c) tikrų ir spėtų verčių painiavos matrica (angl. confusion matrix).

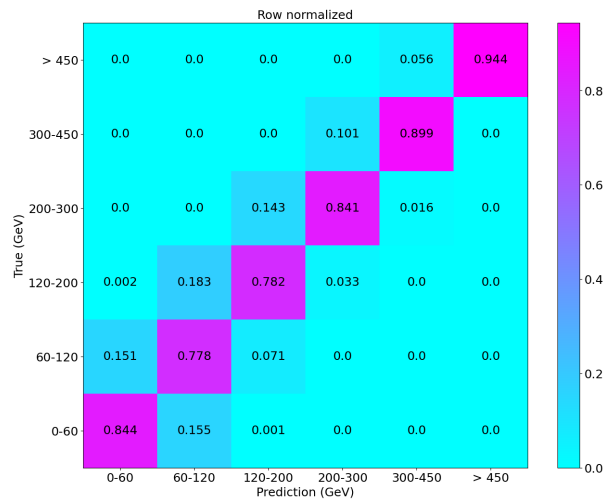
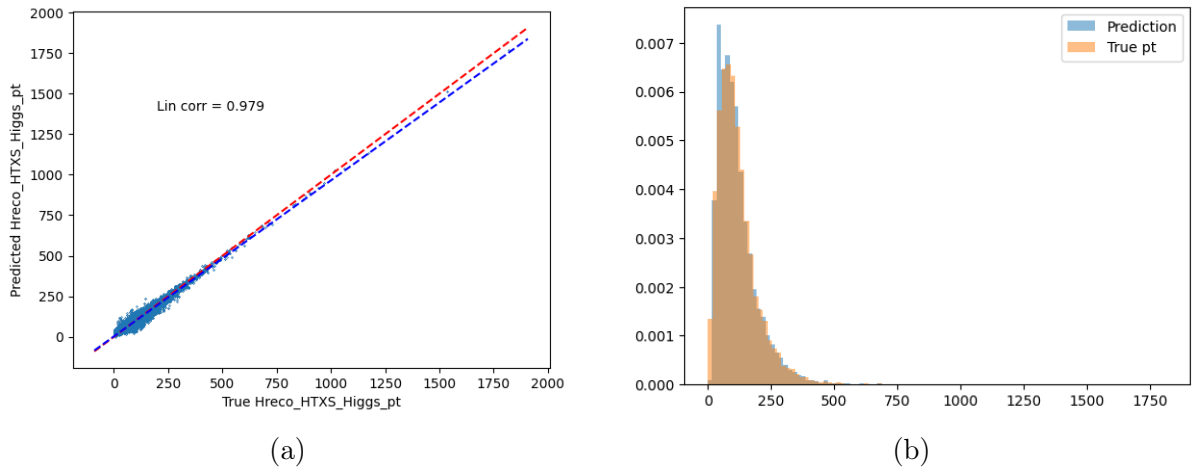
21c pav. labai gerai apibendrina modelio rezultatus. Čia matome matrica išskirstytą į 6x6 dalis, p_T vertės paskirstytos į 6 intervalus: 0-60 GeV, 60-120 GeV, 120-200 GeV, 200-300 GeV, 300-450 GeV, > 450 GeV. Tobulu atveju norime matyti užpildytą tik matricos diagonale, šiuo atveju visos diagonalės vertės yra užpildytos, tačiau spėjimai dažnai nepataiko ir išeina už teisingo intervalo ribų. Čia tai ryškiai matosi prie žemesnių p_T verčių, bet pasitaiko visoje matricioje.

Grafikuose 22 pav. atvaizduoti rezultatai apmokius modelį su gerokai platesniu duomenų paketu - čiurkšlių (angl. jets), leptonų, hadroninio top ir MET paketas (iš viso 29 įvesties kintamieji) su 10 000 įvykių.

22a pav. tiesinė koreliacija beveik atitinka vienetą ($= 0.979$), tai reiškia, kad spėjimai beveik tobulai atitiko realius rezultatus.

22b pav. taip pat matomas beveik tobulas spėjimų ir tikrų rezultatų atitikmuo, su mažais netikslumais prie pasiskirstymo piko.

22c pav. irgi matoma matrica su užpildyta tik diagonale. Gautas labai geras rezultatas.



22 pav. Higgs p_T regresijos rezultatai su čiurkšlių, leptonų, hadroninio top ir MET paketu: (a) tiesinė koreliacija tarp tikrų ir spėtų Higgs p_T verčių, (b) tikrų ir spėtų Higgs p_T verčių pasiskirstymai, (c) tikrų ir spėtų verčių painiavos matrica.

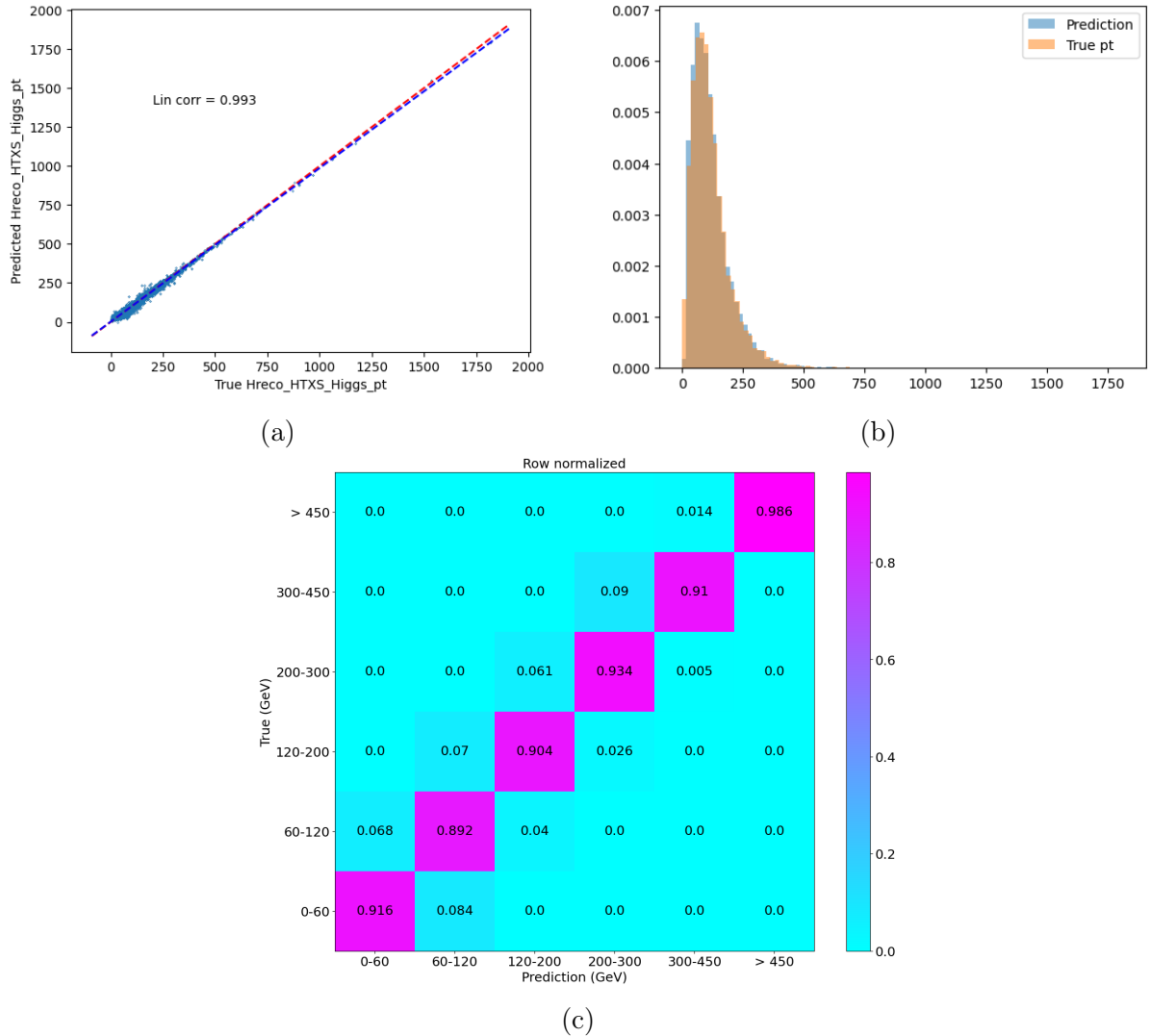
Grafikuose 23 pav. atvaizduojami rezultatai apmokius modelį naudojant čiuurkšlių, atskirai sudėtų neutrinių, leptonų ir hadroninio top duomenų paketą (34 įvesties parametrai). Atskirų individualių neutrinių duomenų realiu atveju gauti nėra įmanoma, nes jie nėra aptinkami detektoriuose. Todėl įdomu patikrinti, kokią įtaką modelio mokymui turi atsikiri neutriniai.

23a pav. gautas koreliacijos koeficientas buvo dar geresnis ($= 0.993$), nei 22a atveju ($= 0.979$).

23b pav. atvaizduota beveik tobula Higgs p_T pasiskirstymų atitikimai, vėl šiek tiek geresnis nei ankstesniu atveju.

23c pav. turime panašią situaciją - rezultatas praktiškai tobula ir vėl šiek tiek geresnis, nei atveju neturint atskirų neutrinių duomenų.

Taigi, atskirų neutrinių duomenys pagerino turimą rezultatą, tik kyla klausimas ar atskirų neutrinių duomenys ir čiuurkšlių duomenys turi panašų efektą apmokant modelį?



23 pav. Higgs p_T regresijos rezultatai su atskirai sudėtų neutrinių, čiuurkšlių, leptonų ir hadroninio top paketu: (a) tiesinė koreliacija tarp tikrų ir spėtų Higgs p_T verčių, (b) tikrų ir spėtų Higgs p_T verčių pasiskirstymai, (c) tikrų ir spėtų verčių painiavos matrica.

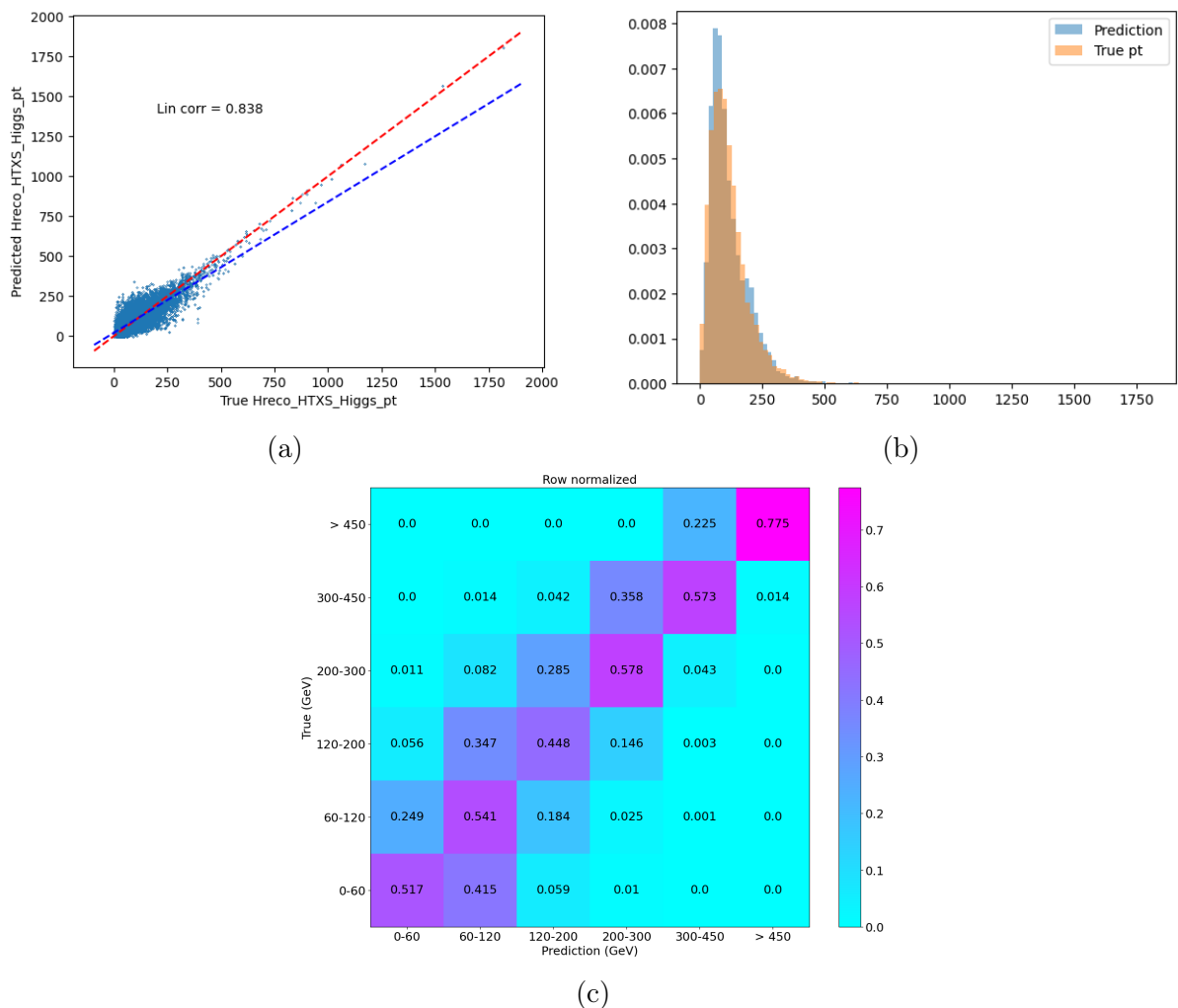
Į tai galime atsakyti apmokydami modelį, naudodami atskirų individualių neutrinių duomenis be čiurkšlių duomenų. Tai ir buvo atlikta, grafikuose 24 pav. atvaizduoti modelio apmokyto su atskirai sudėtų neutrinių, leptonų ir hadroninio top duomenų paketu (16 įvesties kintamųjų).

24a pav. gauta tiesinė koreliacija ($= 0.838$) yra geresnė nei paprasčiausio modelio 21a pav. atveju, bet neprilygsta čiurkšlių duomenų modeliui 22a.

Tą patį vaizdą matome ir 24b pav. - rezultatas nėra blogas, bet ne toks geras, kaip naudojant čiurkšlių duomenis apmokymui.

Ir galiausiai 24c pav. irgi galime matyti neblogą matricą, tačiau joje atsiranda akivaizdūs nukrypimai ir netikslumai, kurių neturėjo anksčiau apmokytas modelis.

Bendrai, atskirų neutrinių duomenys pagerina modelio regresiją, tačiau jie nėra tokie svarbūs kaip atskiri čiurkšlių duomenys.

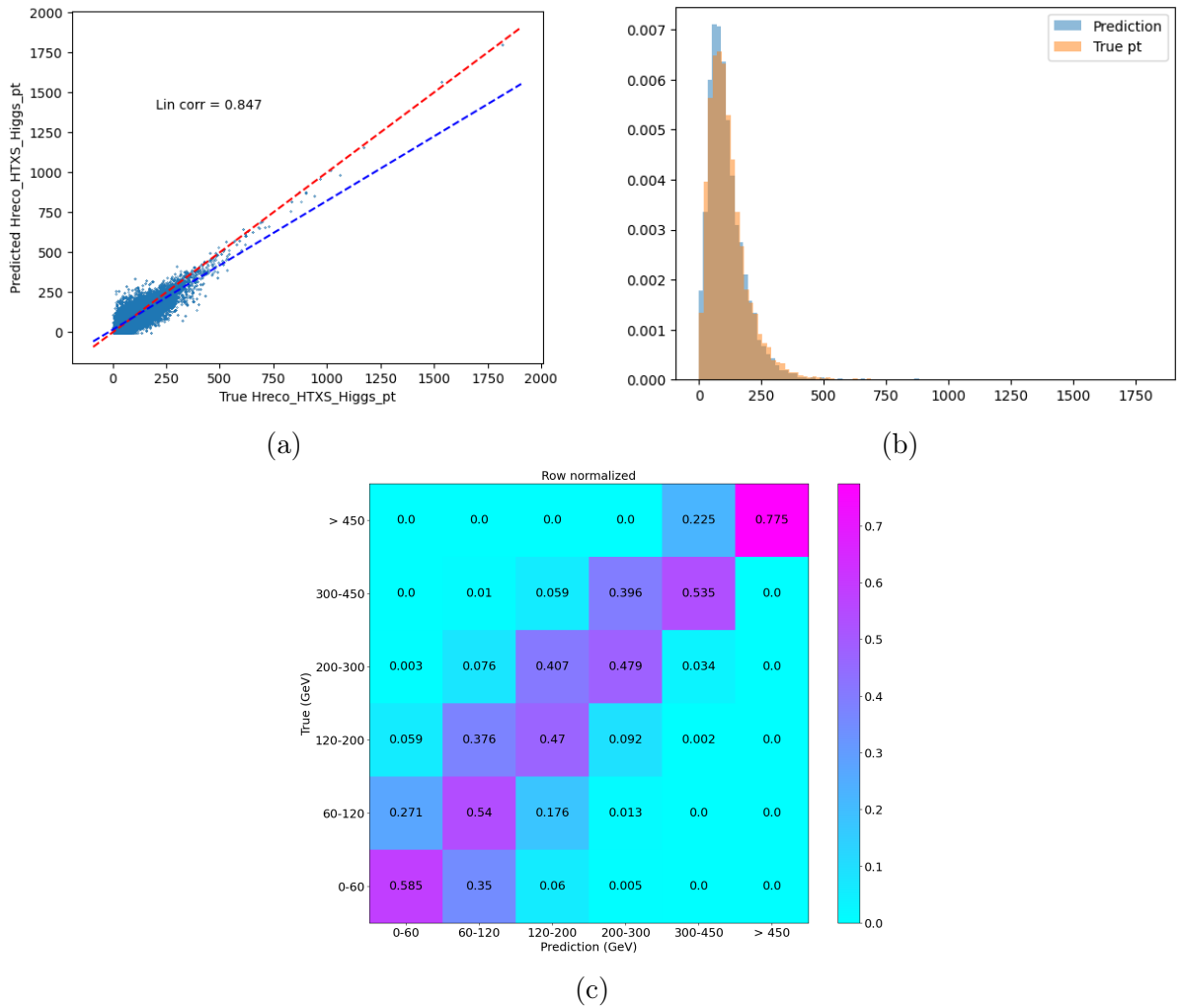


24 pav. Higgs p_T regresijos rezultatai su atskirai sudėtų neutrinių, leptonų ir hadroninio top paketu: (a) tiesinė koreliacija tarp tikrų ir spėtų Higgs p_T verčių, (b) tikrų ir spėtų Higgs p_T verčių pasiskirstymai, (c) tikrų ir spėtų verčių painiavos matrica.

Paskutinis ir svarbiausias rezultatų palyginimas su ankstesniais tyrimų [11] rezultatais, kur mokymui buvo naudojami kitokie parametrai aprašyti 2.10.4 skyriaus 5 skiltyje "Sugrupuotų čirukšlių, leptonų, hadroninio top ir MET duomenų paketas". Šiam palyginimui buvo iš naujo parengtas šis mokymo paketas su šio tyrimo simulacijos duomenimis. Rezultatai su šiuo mokymo paketu pateikti grafikuose 25 pav.

Gautas rezultatas nėra prastas, tačiau palyginus su 22 pav. (čirukšlių, leptonų, hadroninio top ir MET) modelio arba 23 pav. (čirukšlių, atskirai sudėtų, neutrinių, leptonų ir hadroninio top) modelio rezultatais, neatitinka jų tikslumo.

Šiuo atveju gauti rezultatai labiau palyginami su 24 pav. (atskirai sudėtų neutrinių, leptonų ir hadroninio top) modelio rezultatu. Panašios tiesinio koreliacijos koeficiento vertės, panašus tikrų ir spėtų verčių pasiskirstymas ir panašus painiavos matricos išsidėstymas abiem atvejams.



25 pav. Higgs p_T regresijos rezultatai su sugrupuotų čirukšlių, leptonų, hadroninio top ir MET duomenų paketu: (a) tiesinė koreliacija tarp tikrų ir spėtų Higgs p_T verčių, (b) tikrų ir spėtų Higgs p_T verčių pasiskirstymai, (c) tikrų ir spėtų verčių painiavos matrica.

Dar svarbu pabrėžti, kad visais atvejais standartinis modelis regresavo geriau su mažiau įvykių turinčiais mokymo duomenų paketais. Visi pavyzdžiai parodyti šiame skyriuje turėjo 10 000 įvykių, bet ekvivalentūs mokymo rezultatai su 20 000 ir 65 000, pastoviai rodydavo labai panašios struktūros, bet šiek tiek prastesnį rezultatą. Tai gali rodyti, kad modelio struktūra nėra tinkamai optimizuota didesnio kiekio duomenims, nes pradeda rodyti lengvus persimokymo (angl. overfitting) bruožus lyginant su mažesnio įvykių kiekio ekvivalentais.

Išvados

1. $t\bar{t}$ ir $t\bar{t}H$ bandinių simuliacija ir pradinė duomenų analizė įvykdyta sėkmingai.
2. Rezultatai leido toliau tirti ir sėkmingai simuliuoti $t\bar{t}H$ proceso skilimą į dviejų to paties krūvio leptonų finalinę būseną (2lss). Sėkmingai atliktas šių duomenų apdorojimas ir kinematikos tyrimas.
3. Off-shell $t\bar{t}H$ 2lss proceso duomenys panaudoti mokant dviejų tipų neuroninius tinklus Higgs'o p_T regresijai. Standartinis neuroninis tinklas davė geresnius rezultatus nei minimalus modelis.
4. Minimalus neuroninis tinklas tinkamai mokėsi tik su daug didesniais kiekiais informacijos (žr. 20 pav.), kiti atvejai nedavė norimo rezultato.
5. Standartinio neuroninio tinklo mokymas buvo sėkmingas. Iš gautų rezultatų galime daryti tokias pagrindines išvadas:
 - Individualių neutrinų duomenys įvestyje pagerina modelio veikimą, tačiau yra mažiau svarbūs nei individualių čiršklių parametrai (palyginimui žr. 22 pav. ir 24 pav.)
 - Standartinio modelio struktūra, priešingai nei minimalaus, nėra optimizuota didelio kiekio įvesties duomenims. Visais atvejais geresnį rezultatą davė mokymas su mažiau įvykių turinčiais bandiniais.
 - Palyginus modelio rezultatą naudojant ekvivalenčius įvesties parametrus, kaip ankstesniame CMS $t\bar{t}H$ analizės grupės tyrime (žr. 25 pav.) su rezultatais naudodajant individualių čiršklių duomenis (žr. 22 pav.). Pastarasis rodo daug tikslesnį, beveik tobulą rezultatą.
6. Taigi keičiant parametrus ir įvesties kintamuosius pavyko reikšmingai pagerinti standartinio modelio veikimą lyginant su anksčiau atliktais tyrimais.

Literatūra

- [1] S. Chatrchyan, V. Khachatryan, A. Sirunyan, *et al.*, Observation of a new boson at a mass of 125 gev with the cms experiment at the lhc, *Physics Letters B*, Sept. 2012, **716**, 30–61.
- [2] G. Aad, T. Abajyan, B. Abbott, *et al.*, Observation of a new particle in the search for the standard model higgs boson with the atlas detector at the lhc, *Physics Letters B*, Sept. 2012, **716**, 1–29.
- [3] V. Khachatryan, A. M. Sirunyan, A. Tumasyan, *et al.*, Precise determination of the mass of the higgs boson and tests of compatibility of its couplings with the standard model predictions using proton collisions at 7 and 8 TeV, *The European Physical Journal C*, May 2015, **75**.
- [4] A. M. Sirunyan, A. Tumasyan, W. Adam, *et al.*, Combined measurements of higgs boson couplings in proton–proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV, *The European Physical Journal C*, May 2019, **79**.
- [5] A. Tumasyan *et al.*, A portrait of the Higgs boson by the CMS experiment ten years after the discovery., *Nature*, 2022, **607**, 60–68.
- [6] G. Aad *et al.*, A detailed map of Higgs boson interactions by the ATLAS experiment ten years after the discovery, *Nature*, 2022, **607**, 52–59. [Erratum: *Nature* 612, E24 (2022)].
- [7] V. Khachatryan, A. Sirunyan, A. Tumasyan, *et al.*, Measurement of the top quark mass using proton-proton data at 8tev, *Physical Review D*, Apr. 2016, **93**.
- [8] B. A. Dobrescu and C. T. Hill, Electroweak symmetry breaking via a top condensation seesaw mechanism, *Physical Review Letters*, Sept. 1998, **81**, 2634–2637.
- [9] R. S. Chivukula, B. A. Dobrescu, H. Georgi, and C. T. Hill, Top quark seesaw theory of electroweak symmetry breaking, *Physical Review D*, Mar. 1999, **59**.
- [10] D. Delepine, J.-M. Gérard, and R. Gonzalez Felipe, Is the standard higgs scalar elementary?, *Physics Letters B*, Apr. 1996, **372**, 271–274.
- [11] A. M. Sirunyan, A. Tumasyan, W. Adam, T. Bergauer, and M. Dragicevic, Measurement of the higgs boson production rate in association with top quarks in final states with electrons, muons, and hadronically decaying tau leptons at $\sqrt{s} = 13$ TeV, *The European Physical Journal C*, 2021.
- [12] L. Evans and P. Bryant, Lhc machine, *Journal of Instrumentation*, 2008, S08001.
- [13] W. Elmetenawee, CMS tracking performance in Run 2 and early Run 3, tech. rep., CERN, Geneva, 2023.

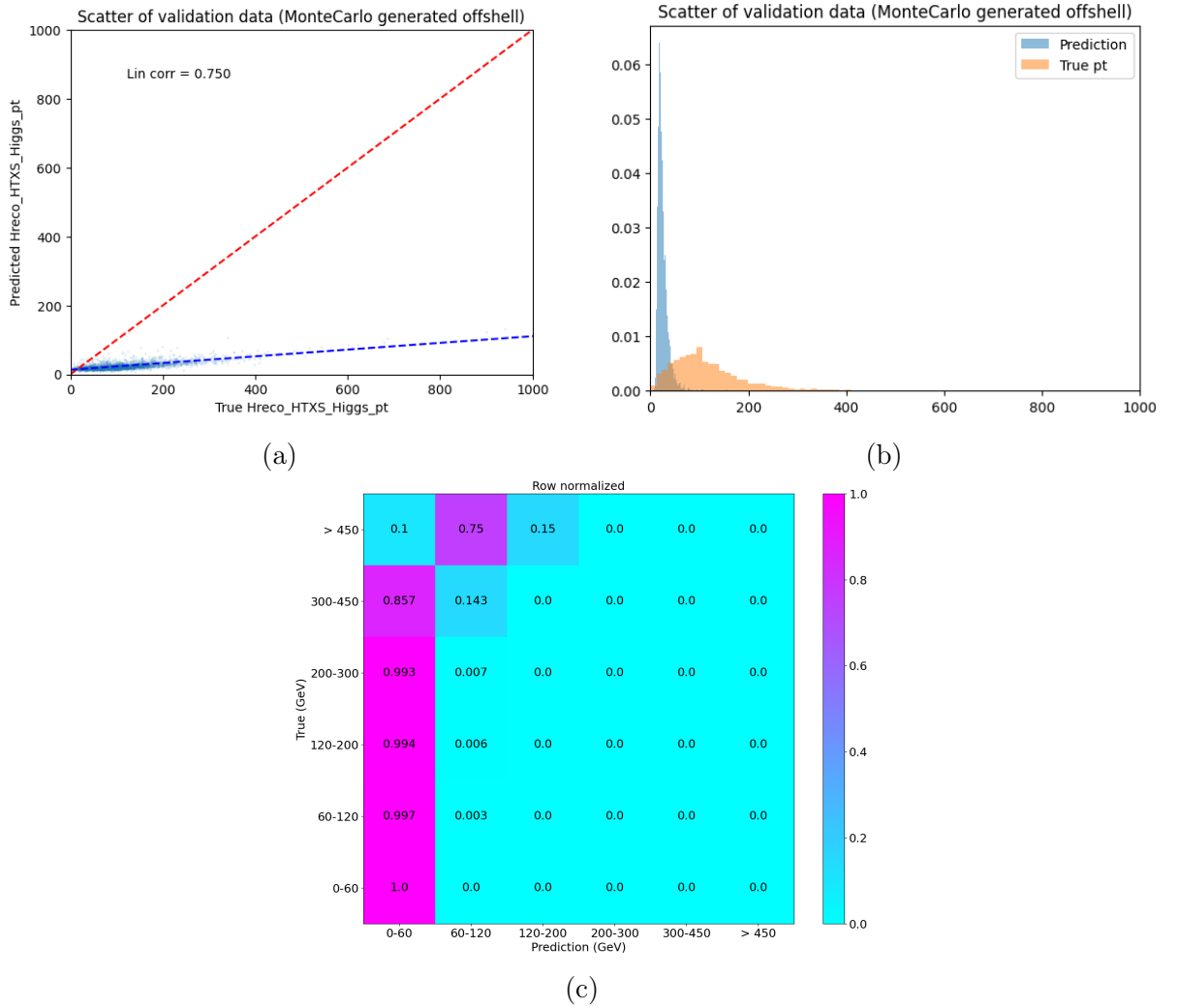
- [14] S. Chatrchyan, G. Hmayakyan, V. Khachatryan, *et al.*, The CMS experiment at the CERN LHC. The Compact Muon Solenoid experiment, *JINST*, 2008, **3**, S08004. Also published by CERN Geneva in 2010.
- [15] CMS-Collaboration, The Phase-2 Upgrade of the CMS Beam Radiation Instrumentation and Luminosity Detectors, tech. rep., CERN, Geneva, 2021. This is the final version, approved by the LHCC.
- [16] P. Azzurri, The cms silicon strip tracker, *Journal of Physics: Conference Series*, may 2006, **41**, 127.
- [17] D. Barney, CMS Slice, 2015.
- [18] CMS-Collaboration, Technical proposal for the upgrade of the CMS detector through 2020, tech. rep., 2011.
- [19] F. Kircher, P. Bredy, P. Fazilleau, *et al.*, Magnetic tests of the cms superconducting magnet, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2008, **18**, 356–361.
- [20] A. M. Sirunyan, A. Tumasyan, W. Adam, F. Ambroggi, E. Asilar, T. Bergauer, and Brandstetter, Observation of $t\bar{t}h$ production, *Phys. Rev. Lett.*, Jun 2018, **120**, 231801.
- [21] A. M. Sirunyan, A. Tumasyan, W. Adam, *et al.*, Search for new physics in top quark production in dilepton final states in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV, *The European Physical Journal C*, Nov. 2019, **79**.
- [22] A. J. Buras, *Gauge Theory of Weak Decays: The Standard Model and the Expedition to New Physics Summits*. Cambridge University Press, 2020.
- [23] Observation of Higgs boson decay to bottom quarks, tech. rep., CERN, Geneva, 2018.
- [24] G. Aad, B. Abbott, J. Abdallah, O. Abdinov, and Aben, Search for the associated production of the higgs boson with a top quark pair in multilepton final states with the atlas detector, *Physics Letters B*, Oct. 2015, **749**, 519–541.
- [25] D. J. Gross and F. Wilczek, Ultraviolet behavior of non-abelian gauge theories, *Phys. Rev. Lett.*, Jun 1973, **30**, 1343–1346.
- [26] J. Alwall, R. Frederix, S. Frixione, *et al.*, 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*, July 2014, **2014**.
- [27] R. Frederix, S. Frixione, F. Maltoni, and T. Stelzer, Automation of next-to-leading order computations in qcd: the fks subtraction, *Journal of High Energy Physics*, Oct. 2009, **2009**, 003–003.
- [28] C. Z. Mooney, *Monte carlo simulation*. No. 116, Sage, 1997.

- [29] J. Y. Araz, A. Buckley, and B. Fuks, Searches for new physics with boosted top quarks in the MadAnalysis 5 and Rivet frameworks, *Eur. Phys. J. C*, 2023, **83**, 664.
- [30] G. Alguero, J. Y. Araz, B. Fuks, and S. Kraml, Signal region combination with full and simplified likelihoods in MadAnalysis 5, *SciPost Phys.*, 2023, **14**, 009.
- [31] J. Y. Araz, B. Fuks, M. D. Goodsell, and M. Utsch, Recasting LHC searches for long-lived particles with MadAnalysis 5, *Eur. Phys. J. C*, 2022, **82**, 597.
- [32] J. Y. Araz, B. Fuks, and G. Polykratis, Simplified fast detector simulation in MADANALYSIS 5, *Eur. Phys. J. C*, 2021, **81**, 329.
- [33] J. Y. Araz, M. Frank, and B. Fuks, Reinterpreting the results of the LHC with MadAnalysis 5: uncertainties and higher-luminosity estimates, *Eur. Phys. J. C*, 2020, **80**, 531.
- [34] E. Conte and B. Fuks, Confronting new physics theories to LHC data with MADANALYSIS 5, *Int. J. Mod. Phys. A*, 2018, **33**, 1830027.
- [35] B. Dumont, B. Fuks, S. Kraml, *et al.*, Toward a public analysis database for LHC new physics searches using MADANALYSIS 5, *Eur. Phys. J. C*, 2015, **75**, 56.
- [36] E. Conte, B. Dumont, B. Fuks, and C. Wymant, Designing and recasting LHC analyses with MadAnalysis 5, *Eur. Phys. J. C*, 2014, **74**, 3103.
- [37] E. Conte, B. Fuks, and G. Serret, MadAnalysis 5, A User-Friendly Framework for Collider Phenomenology, *Comput. Phys. Commun.*, 2013, **184**, 222–256.
- [38] I. Antcheva, M. Ballintijn, B. Bellenot, *et al.*, Root — a c++ framework for petabyte data storage, statistical analysis and visualization, *Computer Physics Communications*, 2011, **182**, 1384–1385.
- [39] M. Abadi, A. Agarwal, P. Barham, E. Brevdo, and Z. Chen, TensorFlow: Large-scale machine learning on heterogeneous systems, 2015. Software available from tensorflow.org.
- [40] F. Chollet *et al.*, Keras, 2015.
- [41] S. R. Dubey, S. K. Singh, and B. B. Chaudhuri, Activation functions in deep learning: A comprehensive survey and benchmark, 2022.
- [42] D.-A. Clevert, T. Unterthiner, and S. Hochreiter, Fast and accurate deep network learning by exponential linear units (elus), 2016.
- [43] S. Bermejo and J. Cabestany, Oriented principal component analysis for large margin classifiers, *Neural Networks*, 2001, **14**, 1447–1461.
- [44] G. Aad, B. Abbott, K. Abeling, *et al.*, Measurement of the higgs boson mass with $h \rightarrow$ decays in 140 fb⁻¹ of $s=13$ tev pp collisions with the atlas detector, *Physics Letters B*, 2023, **847**, 138315.

1 Priedas

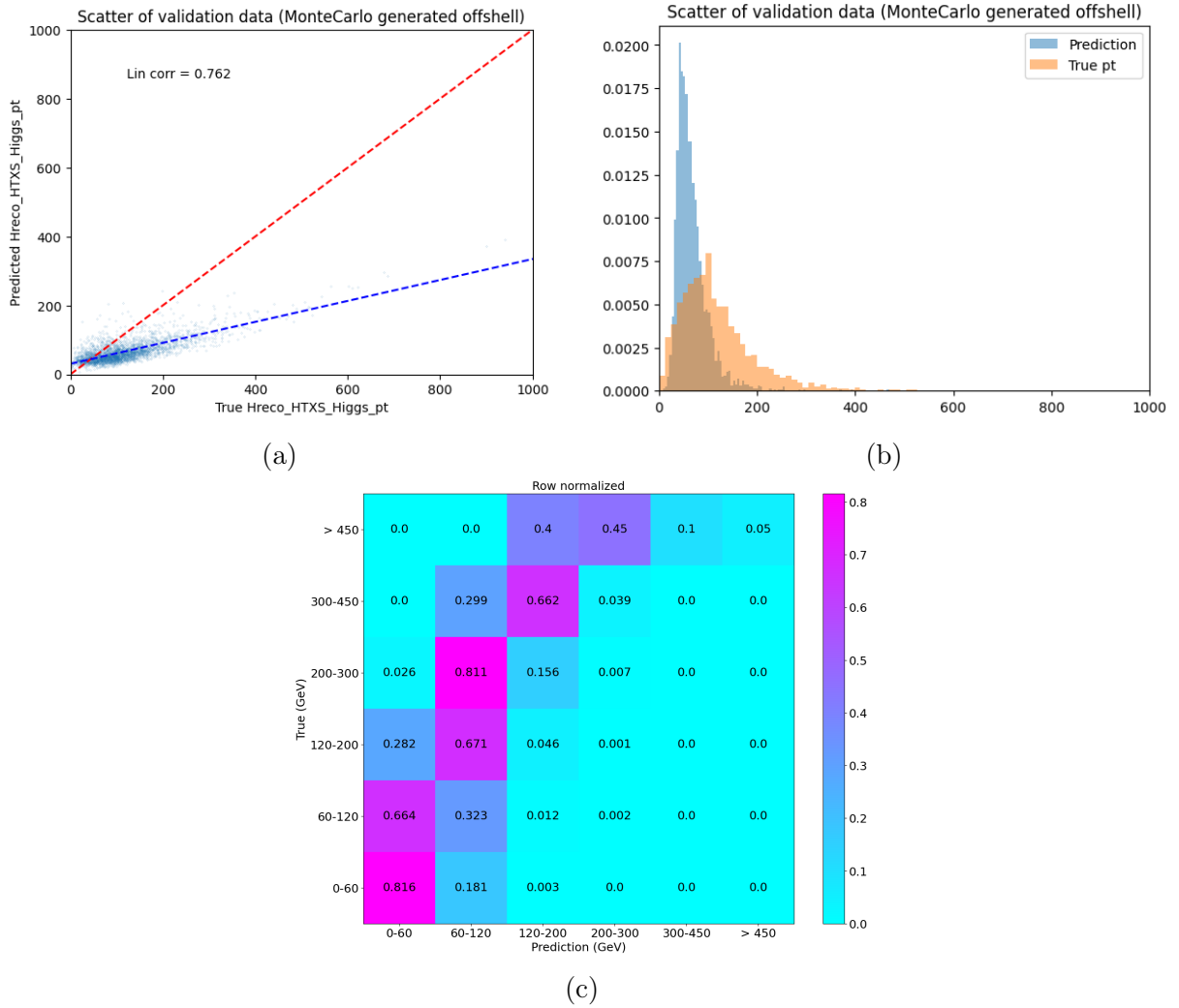
Šiame skyriuje pateikti nepavykusios regresijos minimaliu neuroniniu tinklu grafikų pavyzdžiai ir bandymas juos sutvarkyti.

Grafikuose 26 pav. pateikti minimalaus neuroninio tinklo regresijos rezultatai. Šiuo atveju modelis spėja tik žemas p_T vertes ir yra visiškai neveikiantis.



26 pav. Kolapsavusios higgs p_T regresijos rezultatai su čiurkšlių, individualių neutrinių, leptonų ir hadroninio top duomenų paketu: (a) tiesinė koreliacija tarp tikrų ir spėtų Higgs p_T verčių, (b) tikrų ir spėtų Higgs p_T verčių pasiskirstymai, (c) tikrų ir spėtų verčių painiavos matrica.

Grafikuose 27 pav. pateikti rezultatai su tuo pačiu mokymo kintamųjų paketu, tačiau sumažinta pirminių autoencoder sluoksnių mokymosi sparta iš 10^{-3} iki 10^{-4} , sumažinta pirminių sluoksnių epochų skaičius nuo 100 iki 30. Tai padaryta siekiant sumažinti persimokymo galimybes, tačiau gauti rezultatai, net su žymiu modelio hiperparametrų keitimu, nedavė gero rezultato.



27 pav. Kolapsavusios higgs p_T regresijos rezultatai su čiurkšlių, individualių neutrinų, leptonų ir hadroninio top duomenų paketu pakeitus modeliu hiperparametrus: (a) tiesinė koreliacija tarp tikrų ir spėtų Higgs p_T verčių, (b) tikrų ir spėtų Higgs p_T verčių pasiskirstymai, (c) tikrų ir spėtų verčių painiavos matrica.