

ივ. ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტი
ზუსტ დასაბუნებისმეტყველო მეცნიერებათა ფაკულტეტი

სადოქტორო პროგრამის დასახელება: „ფიზიკა“

არომატის შემცველი ნეიტრალური დენებით მიმდინარე ტოპ
კვარკის იშვიათი დაშლის $t \rightarrow qZ$ შესწავლა მასათა ცენტრის
სისტემაში 8 ტეე ენერგიაზე პროტონ-პროტონულ
ურთიერთქმედებებში ATLAS ექსპერიმენტზე

არჩილ დურგლიშვილი

I კოლოქვიუმი

სადოქტორო ნაშრომის ხელმძღვანელი:
ფიზ. მათ. მეცნიერებათა დოქტორი თამარ ჯობავა

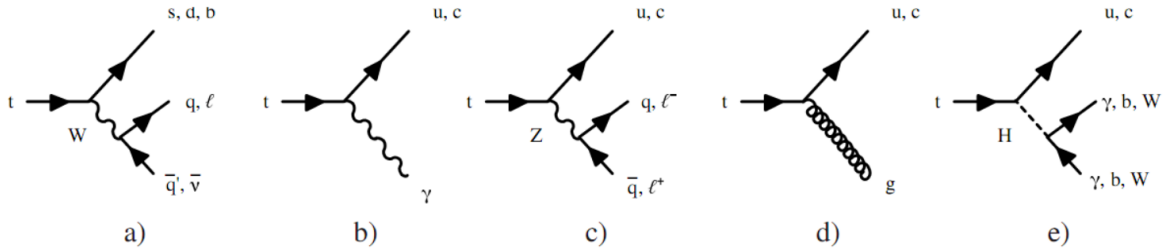
თბილისი 2017

სარჩევი

| | |
|--|----|
| 1. შესავალი | 3 |
| 2. ATLAS დეტექტორი | 5 |
| 3. ექსპერიმენტული და სიმულირებული მონაცემები | 6 |
| 3.1. ექსპერიმენტული მონაცემები | 6 |
| 3.2. სიგნალის შესაბამისი მონაცემთა ნაკრები | 7 |
| 3.3. ფონური პროცესების შესაბამისი მონაცემთა ნაკრებები | 8 |
| 4. აღდგენილი ფიზიკური ობიექტები | 10 |
| 4.1. ელექტრონები | 10 |
| 4.2. მიუონები | 11 |
| 4.3. ჭავლები | 11 |
| 4.4. b-ჭავლების მონიშვნა | 12 |
| 5. pp-ურთიერთქმედებების შემთხვევების შერჩევა | 12 |
| 5.1. შემთხვევების წინასწარი შერჩევა | 12 |
| 5.2. შემთხვევების საბოლოო შერჩევა და აღდგენა | 16 |
| 6. ფონური პროცესები | 24 |
| 6.1. ფონური პროცესების ექსპერიმენტული მონაცემებით შეფასება | 24 |
| 6.1.1. Z+jets ფონური პროცესი | 24 |
| 6.1.2. ცრუ ლეპტონების ფონური პროცესი | 26 |
| 7. სისტემატიკური განუზღვრელობები | 26 |
| 8. მრავალცვლადიანი დისკრიმინატული ანალიზი | 30 |
| 9. ზედა ზღვარის შეფასება | 40 |
| 10. დასკვნები | 42 |

1. შესავალი

ტოპ კვარკი განსხვავდება ყველა დანარჩენ ცნობილ ფუნდამენტური ნაწილაკებისაგან მისი მასის დიდი მნიშვნელობით. იგი ერთადერთი ნაწილაკია რომლის იუკავას ბმის კონსტანტას მნიშვნელობა დაახლოებით ერთის ტოლია და ამიტომ იბადება კითხვა ხომ არ თამაშობს იგი განსაკუთრებულ როლს ნაწილაკთა მასის გენერაციის პროცესში. ტოპ კვარკის მასა გაზომილია დიდი სიზუსტით და ტოლია 173.4 ± 0.27 (სტატ.) ± 0.7 (სისტ.) გევი [1] და ამრიგად არის დღესათვის ცნობილ ფუნდამენტურ ნაწილაკებს შორის ყველაზე მასიური (მძიმე) ნაწილაკი. სტანდარტულ მოდელში ტოპ კვარკის სიცოცხლის ხანგრძლივობა $\sim 5 \cdot 10^{-25}$ წმ არის უკიდურესად მცირე და იგი იშლება ადრონიზაციის პროცესის დაწყებამდე ძირითადად b კვარკად და W ბოზონად. ტოპ კვარკი ერთადერთია კვარკებს შორის რომელიც არ ქმნის ბმულ მდგომარეობებს და შესანიშნავი ობიექტია (იარაღია) ნაწილაკთა ფიზიკის სტანდარტული მოდელის შესამოწმებლად.



ნახაზი 1. ტოპ კვარკის დაშლები: a) სტანდარტული მოდელის დომინანტური დაშლის არხი $t \rightarrow Wb$ და სტანდარტული მოდელის გაფართოებული მოდელების აშნდ არხები b) $t \rightarrow q\gamma$, c) $t \rightarrow qZ$ d) $t \rightarrow qg$ და e) $t \rightarrow qH$, სადაც $q = u, c$. W, Z და H ბოზონების შემდგომი დაშლები ლეპტონებად ან კვარკებად არის გამოსახული აგრეთვე.

არომატის შემცველი ნეიტრალური დენებით (აშნდ) მიმდინარე ტოპ კვარკის ურთიერთქმედება მსუბუქ კვარკებთან $q = u, c$ ყალიბრული ბოზონების (Z, γ, g) ან ჰიგსის ბოზონის (H^0) მეშვეობით არ ჩნდება სტანდარტულ მოდელში (სმ) ხის დონეზე და ძლერად არის ჩახშობილი გლეშოუ-ილიოპულოს-მაიანის (GIM) მექანიზმის გამო [1] მარყუჟოვან დონეზე. ნახ.1-ზე წარმოდგენილია ტოპ კვარკის დაშლის დომინანტური მოდა და ყველა შესაძლო აშნდ დაშლები. მართალია აშნდ დაშლები არ მიმდინარეობს ხის დონეზე ფეინმანის დიაგრამებში, მაგრამ მათი მცირე წვლილი ჩნდება ერთ მარყუჟიან დონეზე CKM შერევის მატრიცის მეშვეობით. სტანდარტული მოდელის ტოპ კვარკის სექტორში ეს მცირე შესწორებები (წვლილი) ტოპ კვარკის ყალიბრულ ბოზონებად დაშლების ფარდობით ალბათობებს $\text{Br}(t \rightarrow qX, X = Z, \gamma, g)$ ადებს ზღვარს $\sim 10^{-10}$ -ის ქვემოთ, რაც დიდ ადრონულ ამანქარებელზე ამ დაშლის დამზერის შესაძლებლობის მიღმა მდებარეობს. ამრიგად ნებისმიერი აშნდ დაშლების დამზერა სტანდარტული მოდელის მიღმა ფიზიკის არსებობის მაჩვენებელი იქნება.

არსებობს სტანდარტული მოდელის გაფართოებული მოდელები, ისეთები როგორიცაა კვარკის სინგლეტური მოდელი (QS) [3-5], პიგსის ორი დუბლეტის მოდელი არმატის შენახვით (FC 2HDM) ან შენახვის გარეშე (2HDM)[6-11], მინიმალური სუპერსიმეტრიული მოდელი (MSSM) [12-18], სუპერსიმეტრიული მოდელი (R SUSY) R ლუწობის დარღვევით [19], ტექნიფერის მოდელი (TC2) [20] და მოდელები ჩახვეული დამატებითი განზომილებებით (RS) [21-22] რომლებიც წინასწარმეტყველებენ გაცილებით უფრო დიდ სიდიდეებს აშნდ დაშლების ფარდობითი ალბათობებისათვის (დაშლის ფარდობითი ალბათობა იზრდება რამდენიმე რიგით). მოდელების მიმოხილვა მოცემულია [23] –ში. სტანდარტული მოდელის და ზემოთ ჩამოთვლილი მისი გაფართოებული მოდელების წინასწარმეტყველებანი $t \rightarrow qZ$ დაშლის ფარდობითი ალბათობის მნიშვნელობისათვის თავმოყრილია ცხრილ 1-ში.

| Process | SM | QS | 2HDM | FC 2HDM | MSSM | R SUSY | TC2 | RS |
|--------------------|-----------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| $t \rightarrow qZ$ | $\sim 10^{-14}$ | $\sim 10^{-4}$ | $\sim 10^{-7}$ | $\sim 10^{-10}$ | $\sim 10^{-6}$ | $\sim 10^{-5}$ | $\sim 10^{-4}$ | $\sim 10^{-5}$ |

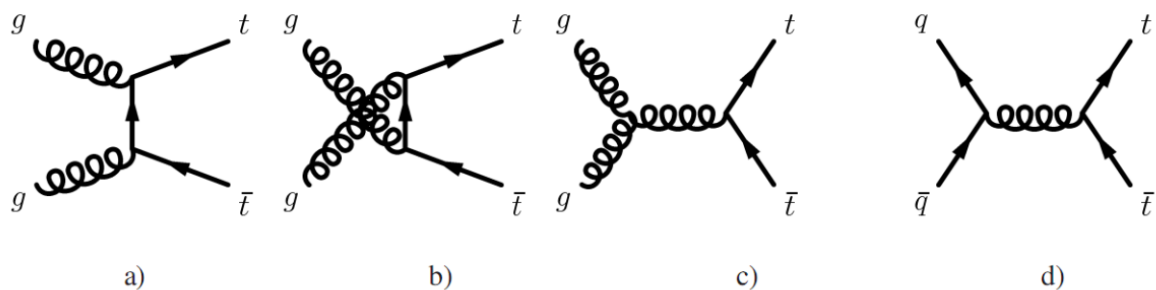
ცხრილი 1. ტოპ კვარკის აშნდ $t \rightarrow qZ$ დაშლის ფარდობითი ალბათობის თეორიული მნიშვნელობები რომლებსაც წინასწარმეტყველებენ სტანდარტული მოდელი [23] და სტანდარტული მოდელის მიღმა გაფართოების მოდელები.

ტოპ კვარკების წყვილურ და ეულ დაბადების პროცესებში (მოდებში) შესწავლილ იქნა აშნდ დაშლები ტევატრონის ექსპერიმენტებში (CDF, D0) და LEP და HERA ამაჩქარებლებზე.

| | LEP | HERA | Tevatron | LHC |
|------------------------|--------------|--------------------|-----------|------------|
| $BR(t \rightarrow qZ)$ | 7.8% [24–28] | 30% (tuZ) [29] | 3.2% [30] | 0.05% [31] |

ცხრილი 2. ტოპ კვარკის აშნდ $t \rightarrow qZ$ დაშლის ფარდობითი ალბათობის მნიშვნელობისთვის დღეისათვის არსებული ექსპერიმენტული ზედა საზღვრები (ზღვრები) 95% დამაჯერებლობის დონით.

არც ერთ ექსპერიმენტზე არ იქნა დამზერილი ეს იშვიათი დაშლები და დადებულ იქნა ამ დაშლებისათვის შესაბამისი ზღვრები. ტოპ კვარკის აშნდ $t \rightarrow qZ$ დაშლის ფარდობითი ალბათობის მნიშვნელობაზე LEP, HERA, Tevatron და LHC ამაჩქარებლების ექსპერიმენტებიდან მიღებული ექსპერიმენტული საზღვრები ნაჩვენებია ცხრილ 2-ში.



ნახაზი 2. წამყვანი რიგის დიაგრამები $t\bar{t}$ წყვილური დაბადებისათვის. გლუონების გაბნევის პროცესები a), b) და c) დიდი ადრონული ამაჩქარებლის ენერგიებზე წამყვანი (დომინანტური) პროცესებია, მაშინ როცა კვარკების გაბნევის პროცესი d) დომინანტური პროცესია ტევატრონის ენერგიებზე.

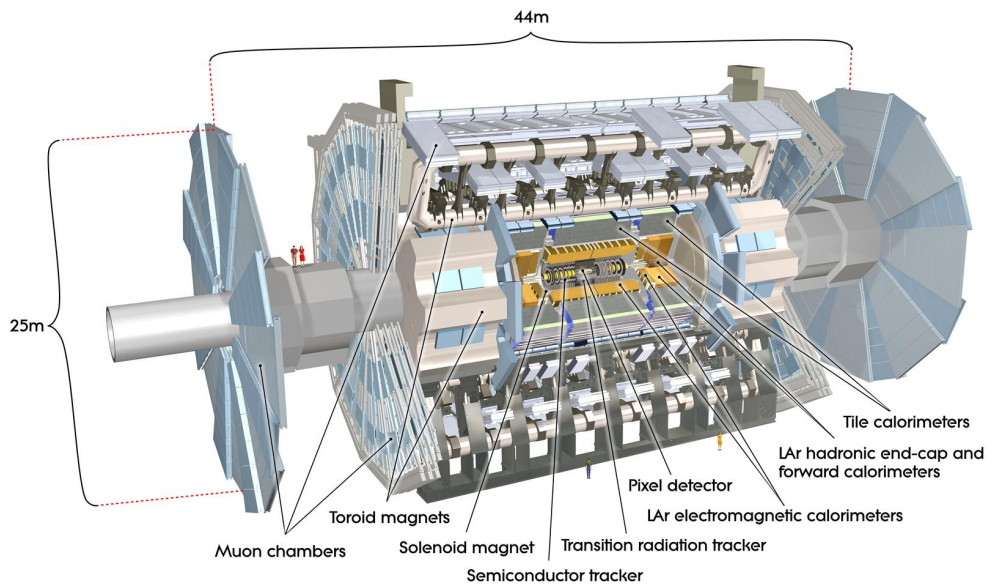
სტანდარტული მოდელის თანახმად, დიდ ადრონულ ამაჩქარებელზე ტოპ კვარკი შეიძლება წარმოიქმნას წყვილური დაბადების პროცესში წამყვან რიგში (ნახ. 2). მასათა ცენტრის სისტემაში $\sqrt{s} = 8$ ტეპ ენერგიაზე პროტონ-პროტონულ ურთიერთქმედებებში $t\bar{t}$ წყვილური დაბადების კვეთი ტოპ კვარკის მასის 172.5 გევი მნიშვნელობისათვის ტოლია $\sigma_{t\bar{t}} = 253^{+13}_{-15}$ pb [32]. იგი გამოთვლილი იქნა ქვანტური ქრომოდინამიკის წამყვანი რიგის შემდეგი რიგის შემდეგ რიგში [33-38]. პარტონის განაწილების ფუნქციის (PDF) და ბმის კონსტანტის α_s -ის განუზღვრელობები გამოთვლილ იქნა სხვადასხვა მეთოდებით [39-45]. ტოპ კვარკის აშნდ დაშლების შესწავლა შესაძლოა პირდაპირი გზით $t\bar{t}$ წყვილური დაბადების პროცესებში საბოლოო მდგომარეობებში სათანადო დაშლის პროდუქტების ძიებით.

მოცემულ ანალიზში ტოპ-კვარკის აშნდ-ით მიმდინარე იშვიათი დაშლის ძიება ჩატარდა $t\bar{t}$ წყვილური დაბადების პროცესებში, როდესაც ერთი ტოპ-კვარკი იშლება სტანდარტული მოდელის მიხედვით დომინანტური არხით ($t \rightarrow bW$) და მეორე ტოპ-კვარკი იშლება აშნდ-ით ($t \rightarrow qZ$). განხილული იქნა W -ბოზონის ადრონული დაშლის და Z -ბოზონის ლეპტონური დაშლის არხები.

2. ATLAS დეტექტორი

ATLAS დეტექტორი [46] შედგება 4 ძირითადი ქვესისტემისგან: შიდა წვეროს ტრეკული სისტემისგან, რომელიც გარემოცულია ზეგამტარი სოლენოიდით, ელექტრომაგნიტური და ადრონული კალორიმეტრებისგან და მიუონური სპექტრომეტრისგან. შიდა წვეროს დეტექტორი უზრუნველყოფს ინფორმაციას ნაწილაკების ტრეკების (კვალების) შესახებ პიქსელ და სილიკონის მიკროსტრიპული (მიკროზოლებიანი) დეტექტორებიდან ფსევდოსისწრაფის $|\eta| < 2.5$ არეში და გარდამავალი გამოსხივების დეტექტორიდან (ტრეკერიდან) $|\eta| < 2.0$ არეში და ეს ყველაფერი მოთავსებულია 2 ტესლა მაგნიტურ ველში რომელსაც ქმნის ზეგამტარი სოლენოიდი. ელექტრომაგნიტურ კალორიმეტრში გამოყენებულია ტყვია და

თხევადი არგონი (LAr) და დაყოფილია ცენტრალურ კასრად (ფსევდოსისწრაფის $|\eta| < 1.475$ არე) და გვერდით ხუფებად (ფსევდოსისწრაფის $1.375 < |\eta| < 3.2$ არე). აღრონული კალორიმეტრი დამყარებულია დეტექტორების ორ სხვადასხვა ტექნოლოგიაზე, როცა აქტიურ ნივთიერებად გამოიყენება ან სცინცილატიური ფილები, ან თხევადი არგონი (LAr), ხოლო შთანთქმელ ნივთიერებად გამოყენებულია ან ფოლადი, ან სპილენძი, ან ვოლფრამი. კალორიმეტრები გადაფარავენ ფსევდოსისწრაფის $|\eta| < 4.9$ არეს. მიუონური სპექტრომეტრი ზომავს მიუონური ტრეკების გადახრას $|\eta| < 2.7$ არეში მაღალი სიზუსტის ტრეკული კამერების მრავალჯერადი შრეების გამოყენებით, რომლებიც განთავსებულია ATLAS დეტექტორის თოროიდულ მაგნიტურ ველში, რომლის დაძაბულობა ცენტრალურ და გვერდითი ხუფების არეებში შეადგენს დაახლოებით 0.5 ტესლას და 1 ტესლას, სათანადოდ. მიუონური სპექტრომენტრი აღჭურვილია აგერთვე თავისი ტრიგერული კამერებით ფსევდოსისწრაფის $|\eta| < 2.4$ არეში.



ნახაზი 3. ATLAS დეტექტორის სქემატური ნახაზი

3. ექსპერიმენტული და სიმულირებული მონაცემები

3.1 ექსპერიმენტული მონაცემები

აღნიშნული პროცესის შესასწავლად გამოყენებულ იქნა ექსპერიმენტული მონაცემები, რომელიც მიღებულია 2012 წელს ATLAS ექსპერიმენტში მასათა ცენტრის სისტემაში $\sqrt{s} = 8$ ტეე ენერგიაზე პროტონ-პროტონული ურთიერთქმედებების შედეგად. დამუშავებული ექსპერიმენტული მონაცემების ინტეგრალური ნათება არის 20.3 ფბ^{-1} 2.8% განუზღვრელობით.

3.2 სიგნალის შესაბამისი მონაცემთა ნაკრები

მონტე-კარლო სიმულაციით მიღებული ტოპ-კვარკების წყვილური დაბადების მონაცემები (როდესაც ერთი ტოპ კვარკი იშლება აშნდ-ით Z ბოზონად და u კვარკად, მაშინ როცა მეორე ტოპ კვარკი იშლება სტანდარტული მოდელის შესაბამისი დაშლის მოდით) დაგენერირებული იქნა ATLAS კოლაბორაციის მიერ ATLAS-ის პროგრამული სისტემის Athena-ს ფარგლებში. Protos 2.2 (PROgram for Top Simulations) პროგრამა-გენერატორის საშუალებით [47]. იგი შეიცავს ახალი ფიზიკის ეფექტებს ენერგიის Λ სკალაზე, სტანდარტული მოდელის ლაგრანჟიანში ეფექტური წვერის დამატებით:

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{SM} + \mathcal{L}^{eff} = \mathcal{L}_4 + \frac{1}{\Lambda^2} \mathcal{L}_6 + \dots$$

სადაც $\mathcal{L}_4 = \mathcal{L}_{SM}$ და \mathcal{L}_6 შეიცავს 6 განზომილებიან ოპერატორებს. დანარჩენი (დარჩენილი) წვერები შეიცავენ 6-ზე უფრო მეტი განზომილების ოპერატორებს და დახშული იქნება $1/\Lambda^4, \dots$ ფაქტორების გამო. \mathcal{L}_6 შესაძლოა წარმოდგენილ იქნას როგორც 6 განზომილებიანი ოპერატორების O_j წრფივი კომბინაცია:

$$\mathcal{L}_6 = \sum_j C_j O_j$$

სადაც C_j კომპლექსური მუდმივებია. O_j სტანდარტული მოდელის ყალიბრულად ინვარიანტული 6 განზომილებიანი ოპერატორებია რომლებიც შეიცავენ ფერმიონულ სინგლეტებსა და დუბლეტებს, ყალიბრული ველების ტენზორებს, ჰიგსის დუბლეტს და კოვარიანტულ წარმოებულებს. ყველაზე ზოგადი Ztu წვერის შესაბამისი წვერის, რომელიც წარმოიქმნება ამ 6 განზომილებიანი ოპერატორებიდან, პარამეტრიზაცია შესაძლებელია შემდეგნაირად [49]:

$$\mathcal{L}_{Ztu} = -\frac{g}{2c_W} u \gamma^\mu (X_{ut}^L P_L + X_{ut}^R P_R) t Z_\mu - \frac{g}{2c_W} u \frac{i \sigma^{\mu\nu} q_\nu}{M_Z} (\kappa_{ut}^L P_L + \kappa_{ut}^R P_R) t Z_\mu + h.c.$$

სადაც $q_\nu = p_t^\nu p_u^\nu$. ანალოგიურად არის შესაძლებელი Ztc წვერის პარამეტრიზაცია. ეს წვერო შეიცავს მინიმუმ 4 ანომალურ ბმის კონსტანტებს, რომელიც შეესაბამება PROTOS გენერატორის საწყის (შესავალ) პარამეტრებს, XL, XR, kL და kR –ს რომლებიც საჭიროა წვერის აღსაწერად და ყოველი მათგანისათვის სრულდებოდა პირობა: XL=0.01, XR=0.01, kL=0.01, kR=0.01 [48]. $bWZc$ და $bWZu$ პროცესების შედარებისას კინემატიკის თვალსაზრისით მნიშვნელოვანი განსხვავება არ იქნა დაფიქსირებული (ნანახი) [48]. PROTOS გენერატორის საშუალებით მატრიცული ელემენტის დონეზე დაგენერირებულ იქნა მხოლოდ Z ბოზონების ლეპტონური ($Z \rightarrow e^- e^+, \mu^- \mu^+, \tau^- \tau^+$) და W ბოზონების ადრონული დაშლები. PROTOS გენერატორში გამოყენებული იყო CTEQ6L1[50] პარტონის განაწილების ფუნქცია წამყვანი რიგის მიახლოებისათვის. გენერაციის შემდეგ შემთხვევების ადრონიზაციისათვის გამოყენებულ იქნა PYTHIA 6.426 [51,52] პროგრამა-გენერატორი. ტოპ კვარკის მასისათვის აღებული იყო $m_t = 172.5$ გევი მნიშვნელობა, მაშინ როცა W და Z ბოზონების

მასებისათვის აღებულ იქნა მათი ცხრილური (გაზომილი) მნიშვნელობები სათანადოდ: $m_w=80.399$ გევი, $m_z=91.1876$ გევი [53]. დეტექტორის და ტრიგერის სიმულაცია ჩატარებულ იქნა ATLAS ექსპერიმენტის სტანდარტული პროგრამული პაკეტის GEANT-ის გამოყენებით [54, 55]. ექსპერიმენტული და სიმულაციის შედეგად მიღებული მონაცემებისათვის გამოყენებული იყო შემთხვევათა რეკონსტრუქციის ერთი და იგივე ალგორითმები.

3.3 ფონური პროცესების შესაბამისი მონაცემთა ნაკრებები

სტანდარტული მოდელის რამდენიმე პროცესს გააჩნია ჩვენი სიგნალის მსგავსი საბოლოო მდგომარეობის ტოპოლოგია. ეს შეიცავს შემთხვევებს საბოლოო მდგომარეობაში ორი დამუხტული ლეპტონით (რეალური ლეპტონები), ასევე შემთხვევებს, რომლებშიც ერთი ჭავლი მაინც (მძიმე კვარკების დაშლის შედეგად წარმოქმნილი ჭავლების ჩათვლით) შეცდომით არის იდენტიფიცირებული როგორც იზოლირებული დამუხტული ლეპტონი (ე.წ. “ცრუ” ლეპტონები) და ასევე შემთხვევებს საბოლოო მდგომარეობაში სამი (ოთხი) ლეპტონით რომლებშიც ერთი (ორი) არ არის აღდგენილი.

მონტე-კარლო სიმულაციის შედეგად მიღებული სტანდარტული მოდელის პროცესების შემთხვევების ნაკრებები საბოლოო მდგომარეობის ტოპოლოგიაში სულ მცირე ორი ლეპტონით იყო გამოყენებული ჩვენ ანალიზში და მათი ჩამონათვალი მოყვანილია ცხრილ 3-ში.

Z+jets ფონური პროცესის შემთხვევები დაგენერირებულ იქნა Alpgen v2.14 [56] წამყვანი რიგის გენერატორის და პარტონის განაწილების CTEQ6LI ფუნქციების ნაკრების საშუალებით [57]. პარტონების ფრაგმენტაციის და ღვარების წარმოქმნის პროცესები დამოუკიდებლად იქნა Pythia 6.425 [58] გამოყენებით. ორმაგი თვლის თავიდან ასაცილებლად პარტონ-ჭავლის მონიშვნის სქემა იქნა შემოღებული [59]. Z+jets შემთხვევები დაგენერირებულია 5 დამატებით პარტონთან ერთად, ცალკე Z+ light jets (ჩვენ ანალიზში აღინიშნება როგორც Z+LF), ცალკე Zbb + jets და Zcc + jets (ჩვენ ანალიზში აღინიშნება როგორც Z+HF). ZQQ (Q=b,c) შემთხვევებს შორის გადაფარვა, რომლებიც დაგენერირებულია მატრიცული ელემენტის გამოთვლის და პარტონების ღვარების შეფასების შედეგად, თავიდან აცილებულია გარკვეული (HFOR) ალგორითმის საშუალებით, რომელიც ემყარება განსაკუთრებით მძიმე კვარკებს შორის კუთხური გარჩევის პირობას: თუ $\Delta R(Q, Q^-) > 0.4$, გამოიყენება მატრიცული ელემენტის წინასწარმეტყველა, სხვა შემთხვევაში გამოიყენება პარტონ-ღვარის წინასწარმეტყველება. Z+jets ფონური პროცესის შემთხვევები ნორმირებულია ინკლუზიურ თეორიულ კვეთაზე [60] რომელიც გამოთვლილია წამყვანი რიგის შემდეგი რიგის შემდეგი შესწორებით.

| Sample | Generator |
|--------------------------|-----------------|
| Z+jets | Alpgen+Pythia |
| $t\bar{t}$ SM (Dilepton) | MC@NLO+Herwig |
| Di-boson | Alpgen+Herwig |
| $Z\gamma$ | Sherpa |
| Single top (Wt channel) | MC@NLO+Herwig |
| tZ | MadGraph+Pythia |
| $t\bar{t}\gamma$ | MadGraph+Pythia |
| $t\bar{t}W(Z)$ | MadGraph+Pythia |
| $t\bar{t}WW$ | MadGraph+Pythia |
| $t\bar{t}H$ | Powheg+Pythia |
| Tri-boson | MadGraph+Pythia |

ცხრილი 3. ნახვევებია მონტე-კარლო სიმულაციის შედეგად მიღებული სტანდარტული მოდელის პროცესების შემთხვევების ნაკრებები საბოლოო მდგომარეობის ტოპოლოგიაში სულ მცირე ორი ლეპტონით რომლებიც გამოყენებული იყო ჩვენ ანალიზში შესაბამის პროგრამა-გენერატორებთან ერთად.

$t\bar{t}$ და ტოპ კვარკის ცალკეული (ეული, Wt არხი) დაბადების პროცესების გენერაციისათვის გამოყენებული იქნა გენერატორ MC@NLO v4.03 [61] პარტონების განაწილების CTEQ66 ფუნქციით. პარტონების ღვარისა და ძირითადი შემთხვევის გენერაციისათვის გამოყენებულ იქნა HERWIG v6.5 [62].

WW/WZ/ZZ+jets ფონური პროცესების შემთხვევები დაგენერირებულ იქნა ALPLGEN 2.14 [56] გენერატორის საშუალებით პარტონის განაწილების CTEQ6L1 ფუნქციების გამოყენებით და დაკავშირებული იყო დამატებით HERWIG პროგრამა-გენერატორთან პარტონების ღვარების დამატების მიზნით.

$Z\gamma$ ფონის შემთხვევები დაგენერირებული იქნა SHERPA v1.4.1 [63] პროგრამა-გენერატორის საშუალებით პარტონის განაწილების CT10 ფუნქციების გამოყენებით. $t\bar{t}+W$, $t\bar{t}+Z$ და $t\bar{t}+\gamma$ შემთხვევები, ასევე დამატებითი ჭავლების შემცველი შემთხვევები და საბოლოო მდგომარეობაში სამი ბოზონის შემცველი WWW, ZWW, ZZZ და tZ შემთხვევები ერთი დამატებითი პარტონით, დაგენერირებულ იქნა MADGRAPH [64] გენერატორის საშუალებით პარტონის განაწილების CTEQ6L1 ფუნქციების გამოყენებით. პარტონების ღვარები დამატებული იქნა PYTHIA გენერატორის საშუალებით. $t\bar{t}H$ მონაცემები დაგენერირებულ იქნა POWHEG [65-67] პროგრამა-გენერატორის საშუალებით პარტონის განაწილების CT10 ფუნქციების გამოყენებით, რომელიც დაკავშირებული იყო Pythia 8.1 [68]-სთან.

4. აღდგენილი ფიზიკური ობიექტები

$t\bar{t} \rightarrow bWqZ$ შემთხვევების განხილული საბოლოო მდგომარეობის სიგნატურა მოითხოვს ელექტრონების, მიუონების და ჭავლების (b-კვარკიდან წარმოქმნილი მონიშნული ჭავლების ჩათვლით) აღდგენას (რეკონსტრუქციას). τ (ტაუ) ლეპტონების პირდაპი (ცალსახად) აღდგენა არ ხდება. TopRootCoreRelease-14-00-20 პროგრამული პაკეტი იყო გამოყენებული მოცემულ ანალიზში, რომელიც შექმნილია ATLAS-ის ტოპ კვარკის ფიზიკის შემსწავლელი ჯგუფისათვის და გამოიყენება როგორც ექსპერიმენტული ისე დაგენერირებული მონაცემების ანალიზისათვის. ობიექტებისათვის მიყენებული იყო TopD3PDCorrections [69] პროგრამული პაკეტიდან მიღებული შესწორებები და მასშტაბური კოეფიციენტები. ტოპ კვარკის აღდგენის (რეკონსტრუქციის) ჯგუფის მიერ შემუშავებული ფიზიკური ანალიზისათვის ობიექტების შერჩევის მოთხოვნების დეტალური აღწერა მოცემულია [70]-ში.

4.1 ელექტრონები

ელექტრონების კანდიდატების არჩევა მოხდა ელექტრო-მაგნიტური კალორიმეტრიდან მიღებული ინფორმაციის და წვეროს დეტექტორიდან მოღებული კვანძების (“tracks”) ინფორმაციის კომბინირების საფუძველზე აღდგენილი ელექტრონებიდან. არჩეული ელექტრონებისათვის დამატებითი მოთხოვნა იყო, რომ $|\eta| < 2.47$ და $1.37 < |\eta| < 2.52$, η არის ელექტრონის შესაბამისი ფსევდოსისწრაფე, რომელიც განსაზღვრულია ელექტრო-მაგნიტური კალორიმეტრიდან წამოსული ინფორმაციით. იმ მიზნით რომ შემცირებულიყო ფონური პროცესების შერევა და ელექტრონების არევა ცუდად იდენტიფიცირებულ ჭავლებთან, არჩეული ელექტრონების კანდიდატებს მოეთხოვებოდათ ყოფილიყვნენ იზოლირებულნი ისე, რომ ელექტრონის გარშემო $\Delta R = \sqrt{(\Delta\eta)^2 + (\Delta\phi)^2} = 0.2$ ზომის კონაში გამოყოფილი ენერგია ყოფილიყო 3.5 გეე-ზე ნაკლები. ელექტრონების კანდიდატებსა და კარგად იდენტიფიცირებულ ჭავლებს შორის უნდა შესრულებულიყო პირობა $\Delta R < 0.4$. დამატებით მოითხოვებოდა, რომ $E_T > 25$ გეე, E_T არის ელექტრონის განივი ენერგია ($E_T = E / \cosh(\eta)$). ელექტრონების კანდიდატები ამ ანალიზში აკმაყოფილებენ ე.წ. “tight ++” ხარისხის მოთხოვნას ელექტრომაგნიტური კლასტერისა და წვეროს დეტექტორში მისი შესაბამისი ტრეკისათვის რაც უზრუნველყოფს იზოლირებული ელექტრონის და ჭავლის ერთმანეთისაგან კარგ გამოყოფას (გარჩევას). ქვანტური ქრომოდინამიკის მრავალჭავლიანი ფონური პროცესების ჩახშობის მიზნით მოთხოვნილ იქნა ელექტრონის გარემომცველ სივრცეში ტაილ კალორიმეტრში მცირე ენერგო გამოყოფა. იზოლაციის ორი ცვლადი იქნა გამოყენებული: კალორიმეტრში ელექტრონის გარშემო გამოყოფილი ენერგია $\Delta R = 0.2$ კონაში და ელექტრონის გარშემო $\Delta R = 0.3$ კონაში ტრეკების განივი იმპულსების p_T ჯამი. იზოლირებული ელექტრონების შესარჩევად გამოიყენება ჩამოჭრის კრიტერიუმები ამ ორ სიდიდეზე და ჩამოჭრის მნიშვნელობები ისეა შერჩეული, რომ სიმულაციის დროს ელექტრონების იზოლაციის ეფექტურობა 90%-ის ტოლი იყოს. დამატებით მოითხოვებოდა,

რომ ელექტრონის ტრეკის დაჯახების (დარტემის) პარამეტრის განივი მდგენელის მნიშვნელობა შემთხვევის პირველადი წვეროს მიმართ $z_0 < 2$ მმ-ზე. ყველა შემთხვევაში შერჩეული ელექტრონების გარშემო $\Delta R < 0.2$ კონაში არსებული ჭავლების გადაყრა ხორციელდება. თუ დამატებით ნაპოვნია ჭავლი $\Delta R < 0.2$ კონაში და მისი $p_T > 25$ გეგ-ზე და $|JVF| > 0.5$ -ზე, მაშინ ხდება ელექტრონის გადაგდება.

4.2 მიუონები

მიუონების კანდიდატების აღდგენა (რეკონსტრუქცია) ხორციელდება მიუონური კამერების შრეებში ტრეკების სეგმენტების ძიებით და ამ სეგმენტების კომბინირებით, დაწყებული ყველაზე გარე სეგმენტით. ტრეკის ფიტირების (აპროქსიმაციის) დროს გათვალისწინებულია ნივთიერების ეფექტები. შემდგომ ხდება შერჩეული ტრეკისთვის წვეროს დეტექტორში აღდგენილი ტრეკებიდან შესაბამისი ტრეკის შერჩევა (პოვნა). შემდეგ ხდება მიუონების შერჩეული კანდიდატებისთვის თავიდან ფიტირება ორივე დეტექტორიდან მიღებული ტრეკის სრული ინფორმაციის გამოყენებით. მოითხოვებოდა, რომ მიუონის ტრეკის დაჯახების (დარტემის) პარამეტრის განივი მდგენელის მნიშვნელობა შემთხვევის პირველადი წვეროს მიმართ $z_0 < 2$ მმ-ზე. ყველა მიუონისთვის მოთხოვნილ იქნა: ფსევდოსისწრაფე $|\eta| < 2.5$, $p_T > 25$ გევი და ამავე დროს მინი-იზოლაციის [71] პირობის შესრულება. თუ $\Delta R < 0.4$ კონაში ნებისმიერ მიუონთან ერთად იდენტიფიცირებული იყო ჭავლი განივი იმპულით $p_T > 25$ გეგ-ზე და $|JVF| > 0.5$ -ზე მაშინ ხდებოდა შემთხვევიდან ამ მიუონის გადაგდება.

4.3 ჭავლები

ჭავლების აღდგენა (რეკონსტრუქცია) ხდება *anti-k_t* ალგორითმის [72-74] საშუალებით. ჭავლის აღდგენამდე (პოვნამდე) გამოიყენება ლოკალური კლასტერის ყალიბრების სქემა ტოპოლოგიური კლასტერის ენერგიის შესასწორებლად ე.წ. “მკვდარი” მატერიის (ნივთიერების) და კლასტერის გარეთ ენერგიის გადინების ეფექტების გათვალისწინებით [75]. შესწორებები მიღებულია დამუხტული და ნეიტრალური ნაწილაკების სიმუდაციის გამოყენებით. ეს ჭავლები შემდეგ დაყალიბებული იქნა ადრონული ენერგიის სკალაზე (მასშტაბში) განივ იმპულს p_T -ზე და η -ზე დამოკიდებული შესწორების ფაქტორების [76] გამოყენებით. შემთხვევების მცირე წილში ჭავლები შესაძლოა არასწორად იქნას აღდგენილი რამოდენიმე “ხმაურიანი” უჯრედიდან ამიტომ შემთხვევების გაწმენდის კრიტერიუმები იქნა გამოყენებული “ცუდი” ჭავლები მქონე შემთხვევების გადაყრისათვის. არჩეული ჭავლებისათვის შემდეგი პირობების შესრულება მოითხოვებოდა: $p_T > 25$ გევი და ფსევდოსისწრაფე $|\eta| < 2.5$. არჩეულ ჭავლებს შორის მეორად პროტონ-პროტონულ ურთიერთქმედებებში წარმოქმნილი ჭავლების წვლილის შესამცირებლად დადებულ იქნა ჩამოჭრის პირობა ცვლადზე, რომელიც განისაზღვრება როგორც ჭავლის წვეროს წილი (ნაწილი) (JVF) და მოითხოვებოდა რომ $|JVF| > 0.5$. ეს პირობა უზრუნველყოფს იმას, რომ სულ მცირე 50% ტრეკებისა რომლებიც

ასოცირებული (დაკავშირებული) არიან ჭავლებთან განივი იმპულსით $p_T < 50$ გევი და ფსევდოსისწრაფით $|\eta| < 2.4$ გამოდიან პირველადი წვეროდან.

4.4 b-ჭავლების მონიშვნა

ჭავლები არიან იდენტიფიცირებულნი როგორც წარმოქმნილი b-კვარკის (b-ჭავლების მონიშვნა) და არა მსუბუქი კვარკის ადრონიზაციის შედეგად, ძირითადად მათი გაცილებით უფრო გრძელი განარბენის გამო, რაც განპირობებულია მათი შედარებით დიდი სიცოცხლის ხანგრძლივობით. ეს განხორციელებულია ალგორითმით (MV1 ტაგერი) მრავალცვლადიანი მეთოდის გამოყენებით რათა გაერთიანდეს ინფორმაცია მიღებული როგორც წანაცვლებული (გადაადგილებული) ტრეკების დაჯახების (დარტემის) პარამეტრებიდან, ასევე ჭავლის შიგნით აღდგენილი მეორადი და მასამუელი დაშლის წვეროების ტოპოლოგიური თვისებებიდან. ამ მეთოდში გამოყენებულია [77]-ში აღწერილი IP3D, SV1 და JetFitterCombnNN ტაგერების გამოშავალი წონები, რომლებიც აღწერილია [77]-ში.

ტაგირების წონები, რომლებიც გამოყენებულია ანალიზში როგორც ჩამოჭრის მნიშვნელობები b-ჭავლების იდენტიფიკაციისათვის პირველად გამოთვლილი იყო $t\bar{t}$ შემთხვევების ჭავლებისათვის განივი იმპულსით $p_T >$

20 გევი და ფსევდოსისწრაფით $|\eta| < 2.5$. მონტე-კარლო შემთხვევების საშუალებით განსაზღვრულ იქნა, რომ ამ ალგორითმის ეფექტურობა შეადგენს 70%-ს და გადაგდების (გადაყრის, უარყოფის) ფაქტორი მსუბუქი ჭავლებისათვის, ჩარმიანი ჭავლებისათვის და τ -სთვის შეადგენს 137,5 და 13-ს სათანადოდ.

5. pp-ურთიერთქმედებების შემთხვევების შერჩევა

$t\bar{t}$ საბოლოო მდგომარეობებს, რომლებიც შეესაბამება ტოპ კვარკის სხვადასხვა აშნდ დაშლის მოდებს, გააჩნია სხვადასხვა ტოპოლოგია შემთხვევაში არსებული ჭავლების და ლეპტონების რიცხვის (რაოდენობის) მიხედვით. ჩვენს ანალიზში აშნდ დაშლების ძიება მიმდინარეობს ტოპ კვარკების წყვილურ დაბადებაში როცა ერთი ტოპ კვარკი იშლება აშნდ დაშლით qZ -დ და მეორე კი იშლება სტანდარტული მოდეის დაშლის მოდით $t \rightarrow bW$. განხილულ იქნა Z ბოზონის ლეპტონური და W ბოზონის ადრონული დაშლები, ამრიგად საბოლოო მდგომარეობის ტოპოლოგია, რომელიც შეესაბამება $t\bar{t} \rightarrow bWqZ$, ხასიათდება ორი იზოლირებული ლეპტონის და სულ მცირე ოთხი ჭავლის არსებობით.

5.1 შემთხვევების წინასწარი შერჩევა

შემთხვევების არჩევის დროს შემდეგი წინასწარი შერჩევის კრიტერიუმები იყო გამოყენებული როგორც ექსპერიმენტული, ისე დაგენერირებული (სიმულირებული) მონაცემებისათვის:

- არჩეულ იქნა ისეთი შემთხვევები, რომლებიც არ შეიცავდნენ დამახინჯებებს, მათ შორის ელექტრო-მაგნიტური კალორიმეტრის აპარატურული დამახინჯებას, არასრულად ჩაწერილ შემთხვევებს დანადგარის ტრიგერის დიდ ადრონულ ამახჩარებელთან დროითი სინქრონიზაციის სისტემის გადატვირთვის გამო. ექსპერიმენტული მონაცემების ყველა შემთხვევა უნდა აკმაყოფილებდეს ანალიზისათვის არჩეული ე.წ. „კარგი“ შემთხვევების კრიტერიუმს. ასევე გადაყრილი იყო შემთხვევები რომლებიც შეიცავდნენ ჭავლებს განივი იმპულსით $p_T > 20$ გევი და $E > 0$ გევი და არ სრულდებოდა ე.წ. „ცუდი“ ჭავლების გადაყრის მოთხოვნა [78].

- არჩეულ იქნა ისეთი შემთხვევები, რომლისთვისაც ჩართული იყო ელექტრონის, ან მიონის ტრიგერი. ტრიგერულ ელექტრონებს უნდა გაეკლათ EF_e24vhi_medium ან EF_e60_medium1 ტრიგერული ჯაჭვი, ხოლო მიუონებს უნდა გაეკლათ EF_mu24i_tight ან EF_mu36_tight ტრიგერული ჯაჭვი. სულ მცირე ერთ-ერთი აღდგენილი ობიექტებიდან უნდა ემთხვეოდეს (შეესაბამებოდეს) სათანადო ტრიგერის ობიექტს. ელექტრონი ითვლება ტრიგერულის შესაბამისად თუ მისი ტრეკი მოთავსებულია EF ტრიგერული ელემენტის $\Delta R < 0.15$ კონაში. ანალოგიურად, მიუონებისათვის მოითხოვება რომ ტრიგერის შესაბამის ტრეკს და აღდგენილ მიუონს შორის $\Delta R < 0.15$ -ზე. მხოლოდ ლეპტონები განივი იმპულსით $p_T > 25$ გევი-ზე განიხილება ტრიგერთან შესაბამისობის პროცედურაში.

- არა – ურთიერთქმედი ფონის გამოსარიცხად, მოთხოვნილ იქნა, რომ შემთხვევაში ყოფილიყო პირველადი ურთიერთქმედების წვერო (წვეროს ტიპი უნდა ყოფილიყო ან PriVtc(1) ან PileUp(3)), რომლიდანაც გამოდის $p_T > 400$ მევი განივი იმპულსის მქონე არანაკლებ 5 კვალი.

- კოსმოსური მიუონების ჩახშობის მიზნით გადაყრილი იქნა შემთხვევები, რომლებიც შეიცავენ მიუონების წყვილს რომელთა დაჯახების (დარტყმის) პარამეტრის განივი მდგენელებს (d_0) აქვთ საპირისპირო ნიშანი, აკმაყოფილებენ პირობას $|d_0| > 0.5$ მმ და მათ შორის აზიმუტალური კუთხე $\Delta\phi > 3.10$.

- გადაყრილ იქნა ისეთი შემთხვევები სადაც არჩეულ ელექტრონს და მიუონს აქვთ საერთო ტრეკი წვეროს დეტექტორში.

- ერთი და იგივე არომატის და საპირისპირო ნიშნის მუხტის მქონე ლეპტონების ერთი წყვილი უნდა ყოფილიყვნენ ერთი და იგივე პირველადი ურთიერთქმედების წვეროდან.

- არჩეულ შემთხვევებში დადებულ იქნა Z ბოზონების აღდგენის პირობა: $|m_l - m_{\bar{l}}| < 10$ გევი-ზე ($l =$ ერთი და იგივე არომატის (e, μ) და საპირისპირო ნიშნის მუხტის მქონე ლეპტონებს).

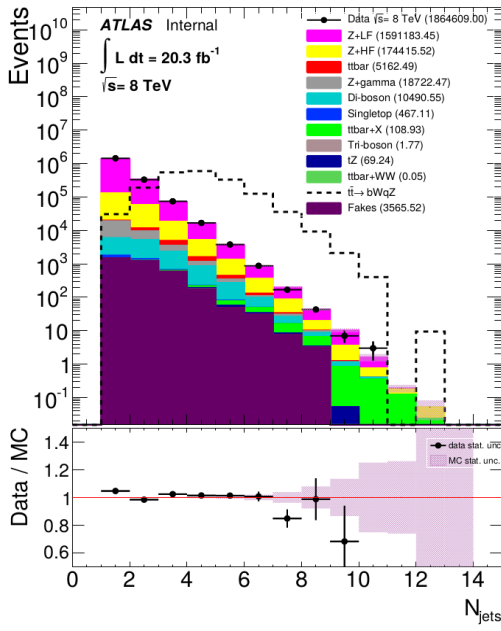
- არჩეულ შემთხვევებში უნდა ყოფილიყო სულ ცოტა ერთი ჭავლი მაინც.

წინასწარი შერჩევის კრიტერიუმების თანმიმდევრული დადების შედეგად მიღებული შედეგები მოყვანილია ცხრილ 4-ში სიგნალისა და ფონური პროცესებისათვის და ექსპერიმენტული მონაცემებისათვის.

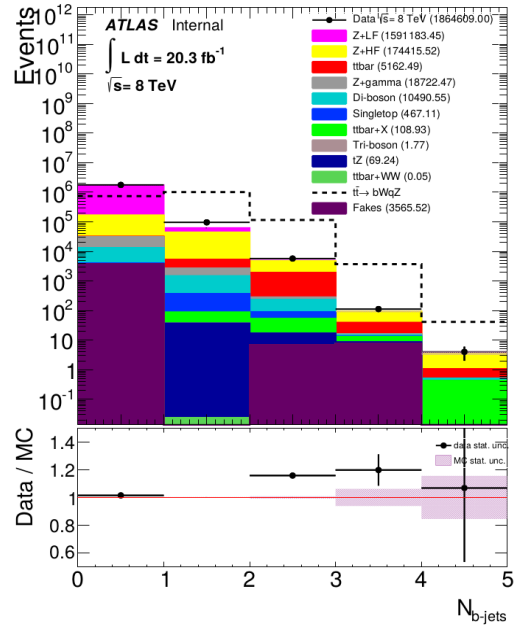
| Sample | Event yields after the Preselection |
|-------------------------|-------------------------------------|
| Z+LF | $1\,591\,200 \pm 1400$ |
| Z+HF | $174\,420 \pm 290$ |
| $t\bar{t}$ | 5162 ± 27 |
| $Z+\gamma$ | $18\,720 \pm 130$ |
| Di-boson | $10\,491 \pm 29$ |
| Single top | 467 ± 15 |
| $t\bar{t}V$ | 78.89 ± 0.79 |
| Tri-Boson | 1.773 ± 0.058 |
| $t\bar{t}\gamma$ | 27.6 ± 1.9 |
| $t\bar{t}H$ | 2.443 ± 0.031 |
| tZ | 69.24 ± 0.68 |
| $t\bar{t}WW$ | 0.050 ± 0.020 |
| Fakes | 3570 ± 220 |
| Background | $1\,804\,200 \pm 1400$ |
| Data | $1\,864\,609$ |
| Sig. eff. ε | 0.182 ± 0.001 |

ცხრილი 4. ფონური პროცესების მოსალოდნელი შემთხვევების რაოდენობა, არჩეული ექსპერიმენტული შემთხვევების რაოდენობა და სიგნალის ეფექტურობა მიღებული e^-e^+ და $\mu^-\mu^+$ შემთხვევების შერჩევით როცა დილეპტონის ინვარიანტული მასა $|m_{ll} - m_Z^{PDG}| < 10$ გევი და მოითხოვებოდა სულ ცოტა ერთი ჭავლის არსებობა. მხოლოდ სტატისტიკური ცდომილებებია მოყვანილი. სიგნალის ეფექტურობა შეესაბამება სიგნალის განხილულ ტოპოლოგიას ($W \rightarrow \text{hadrons}$, $Z \rightarrow ll$ ($l=e, \mu, \tau$))

ნახ. 4-ზე წარმოდგენილია წინასწარი შერჩევის კრიტერიუმების თანმიმდევრული დადების შედეგად მიღებული განაწილებები ჭავლების მრავლობითობით და b –ტაგირებული ჭავლების მრავლობითობით; ნახ.5-ზე მოყვანილია ლეპტონების ფსევდოსისწრაფით (η), აზიმუტალური კუთხით (ϕ), და განივი იმპულსით (p_T) განაწილებები; ხოლო ნახ. 6-ზე წარმოდგენილია აღდგენილი Z ბოზონების ინვარიანტული მასებით და განივი იმპულსით განაწილებები ექსპერიმენტული, სიგნალის და ფონების მონტე-კარლო შემთხვევებისათვის სათანადოდ.

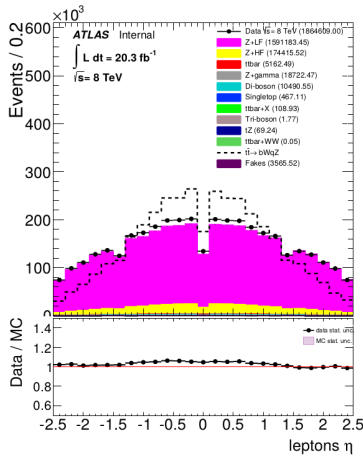


(a)

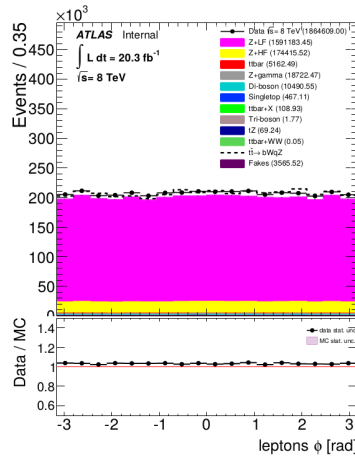


(b)

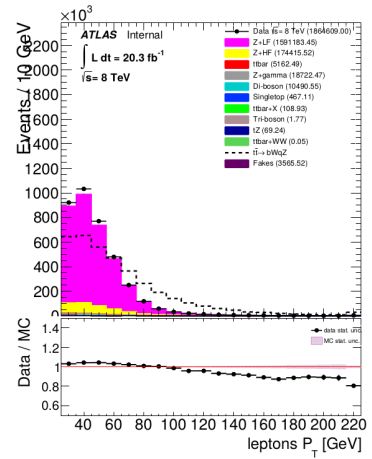
ნახაზი 4. სიგნალის არისათვის წინასწარი შერჩევის კრიტერიუმების თანმიმდევრული დადების შედეგად მიღებული მოსალოდნელი და დაკვირვებული განაწილებები a) ჭავლების მრავლობითობით და b) b-ტაგირებული ჭავლების მრავლობითობით $tt \rightarrow WbZq$ შემთხვევების რაოდენობა ნორმირებულია ექსპერიმენტული შემთხვევების რაოდენობაზე.



(a)

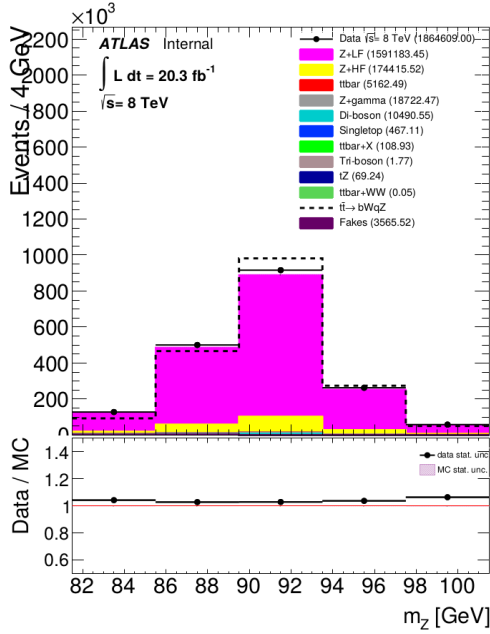


(b)

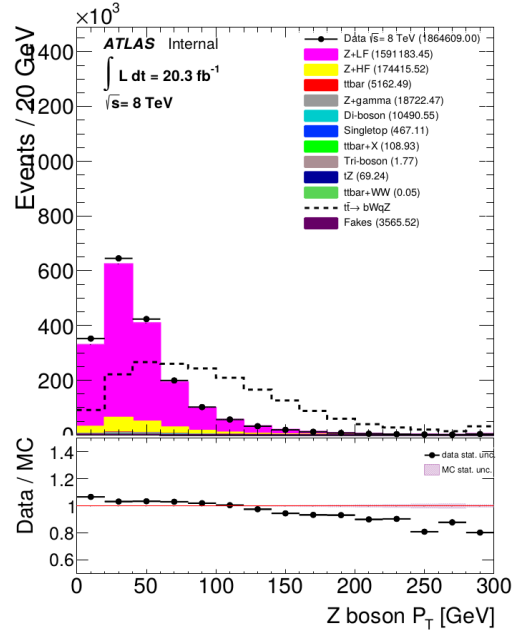


(c)

ნახაზი 5. სიგნალის არისათვის წინასწარი შერჩევის კრიტერიუმების თანმიმდევრული დადების შედეგად მიღებული მოსალოდნელი და დაკვირვებული განაწილებები a) ლეპტონების ფსევდოსისწრაფით (η), b) აზიმუტალური კუთხით (ϕ) და c) განივი იმპულსით (p_T). $tt \rightarrow WbZq$ შემთხვევების რაოდენობა ნორმირებულია ექსპერიმენტული შემთხვევების რაოდენობაზე.



(a)



(b)

ნახაზი 6. სიგნალის არისათვის წინასწარი შერჩევის კრიტერიუმების თანმიმდევრული დადების შედეგად მიღებული მოსალოდნელი და დაკვირვებული განაწილებები a) აღდგენილი Z ბოზონების ინვარიანტული მასებით და b) განივი იმპულსით. $tt \rightarrow WbZq$ შემთხვევების რაოდენობა ნორმირებულია ექსპერიმენტული შემთხვევების რაოდენობაზე.

ცხრილ 4-ში მოყვანილია ექსპერიმენტული და თითოეული ფონური პროცესისათვის შემთხვევების რაოდენობა (გამოსავალი). წინასწარი შერჩევის კრიტერიუმების დადების შემდეგ ძირითადი ფონია Z+jets დაბადება. ცხრილიდან ჩანს, რომ ექსპერიმენტულ მონაცემთა რაოდენობა მეტია ვიდრე ფონური პროცესების მონტე-კარლო სიმულირებული შემთხვევების რაოდენობა. ეს შესაძლოა გამოწვეულია მონტე-კარლო გენერატორების წამყვანი რიგის მიახლოებაში ვექტორული ბოზონების ჭავლებთან ერთად დაბადების პროცესების გენერაციისას მძიმე არომატის მქონე ჭავლების შედგენილობის წინასწარმეტყველების შეზღუდულ (სუსტ) შესაძლებლობასთან. წარმოდგენილ ანალიზში Z+jets შემთხვევები დაგენერირებულია როცა Z ბოზონთან ერთად წარმოიქმნება დამატებით 5-მდე სხვადასხვა არომატის მქონე პარტონები (მსუბუქი პარტონები, cc^- და bb^-). ამის შემდეგ Z+jets შემთხვევების ნორმირება იქნა ჩატარებული.

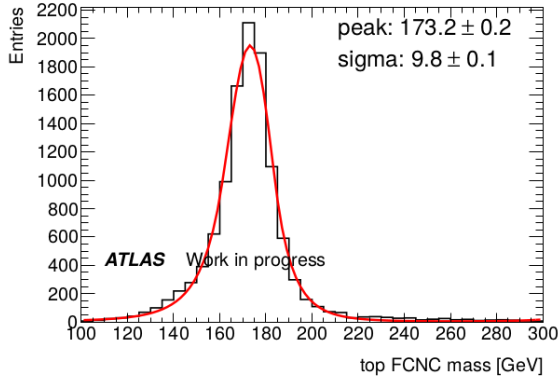
5.2 შემთხვევების საბოლოო შერჩევა და აღდგენა (რეკონსტრუქცია)

$tt \rightarrow bWqZ$ შემთხვევების სიგნატურა შეიცავს ზუსტად ერთ b - ჭავლს, შესაბამისად შერჩეულ იქნა ზუსტად ერთ b - ჭავლიანი შემთხვევები.

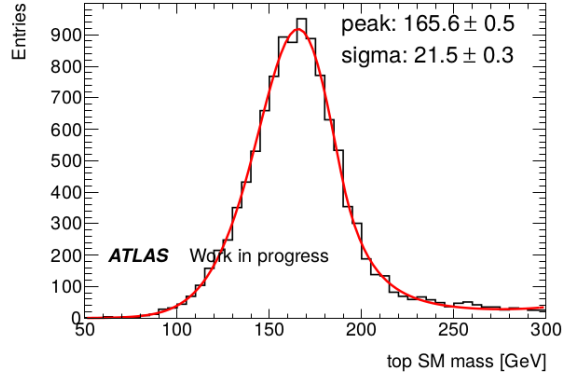
შემთხვევებში ზუსტად ერთი ტაგირებული b -ჭავლის არსებობის შერჩევის კრიტერიუმის მოთხოვნის შემდეგ არჩეულ იქნა ისეთი შემთხვევები სადაც უნდა ყოფილიყო სულ მცირე 4 ჭავლი (b -ჭავლის ჩათვლით). W ბოზონის მსუბუქი კვარკის (აღინიშნება როგორც q) და b -კვარკის აღსადგენად ხდებოდა შემდეგი გამოსახულების მინიმიზაცია W ბოზონის, მსუბუქი q კვარკის (აღინიშნება და b -კვარკის დაწყვილებით ჭავლების სხვადასხვა კომბინაციებთან:

$$\chi^2 = \frac{(m_{jabjc}^{reco} - m_t)^2}{\sigma_{tSM}^2} + \frac{(m_{jdlalb}^{reco} - m_t)^2}{\sigma_{tFCNC}^2} + \frac{(m_{jbjc}^{reco} - m_W)^2}{\sigma_W^2} \quad (1)$$

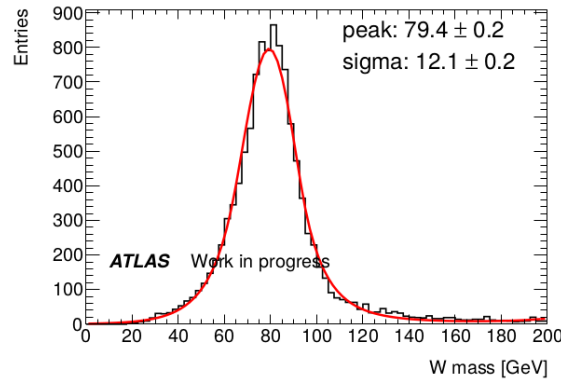
სადაც m_{jabjc}^{reco} და m_{jdlalb}^{reco} არის ტოპ კვარკის აღდგენილი (რეკონსტრუირებული) მასა, როცა იგი იშლება სტანდარტული მოდელის მიხედვით და აშნდ დაშლის მოდით, შესაბამისად. m_{jbjc}^{reco} არის W ბოზონის მასა. χ^2 მინიმიზაციის პროცედურის დროს b -კვარკი დაწყვილებული იყო მხოლოდ b -ჭავლთან. შემდეგი მნიშვნელობები იყო გამოყენებული (1) ფორმულაში ტოპ კვარკების და W ბოზონის მასებისათვის: $m_t = 172.5 \text{ GeV}$, $m_W = 80.4 \text{ GeV}$. სიგანეები (σ_{tSM} , σ_{tFCNC} , σ_W) მიღებული იქნა განაწილებების ბუკინის ფუნქციით [79] ფიტირების შედეგად (ნახ. 7). განაწილებების მისაღებად არჩეული იქნა PROTONS გენერატორის მიერ გენერაციის დონეზე (დანადგარში გატარებისა და მისი მახასიათებლების გაცთვალისწინების გარეშე) მიღებულ ლეპტონებთან და კვარკებთან ყველაზე ახლოს მყოფი (მინიმალური $\Delta R = \sqrt{(\Delta\eta)^2 + (\Delta\phi)^2}$ მქონე) ლეპტონები და ჭავლები. ეს წარმოადგენს აღდგენილი ტოპ კვარკების და W ბოზონების ოპტიმალურ დეტექტორის მასურ გარჩევისუნარიანობას. ნახ.7 -ზე ნაჩვენებია აპროქსიმაციის მრუდები და მოყვანილია მასების საშუალო მნიშვნელობები და სტანდარტული გადახრები. განაწილებები მიღებულ იქნა წინასწარი შერჩევის კრიტერიუმების თანმიმდევრული დადების დონეზე ზუსტად ორი ლეპტონის არსებობის მოთხოვნამდე. ჭავლების ყველა კომბინაციებიდან არჩეული იყო მინიმალური χ^2 მქონე ჭავლები. მის შემდეგ შესაძლებელი იყო შემთხვევების აღდგენა (რეკონსტრუქცია) და შემთხვევების საბოლოო არჩევა დასრულდა იმის მოთხოვნით, რომ აღდგენილი ტოპ კვარკების და W ბოზონის ინვარიანტული მასები უნდა ყოფილიყო შემდეგ მასურ ფანჯრებში: $|m_{tFCNC, SM}^{reco} - m_t| < 40$ გევი და $|m_W^{reco} - m_W| < 30$ გევი. ინვარიანტულ მასაზე ჩამოჭრის კრიტერიუმის დადების შემდეგ აღდგენილ (რეკონსტრუირებულ) კვარკებსა და სიმულაციის შედეგად მიღებულ ნაწილაკებს შორის სწორი შესაბამისობის წილი შეადგენს $\epsilon_{tops} = 69.8\%$. სიგნალის ფონურ პროცესებთან უკეთესი ფარდობისათვის მნიშვნელოვანია რომ ϵ_{tops} -ს მნიშვნელობა იყო რაც შეიძლება მეტი. ϵ_{tops} -ის ოპტიმიზაციისათვის მოთხოვნილ იქნა დიდი განივი იმპულსების მქონე ჭავლების არსებობა: χ^2 მინიმიზაციამდე შემთხვევებში მოთხოვნილ იქნა სულ ცოტა 4 ჭავლის არსებობა განივი იმპულსით $p_t > 30$ გევი (b -ჭავლის ჩათვლით) და შემდეგ არჩეულ (განხილულ) იქნა ასეთი შემთხვევები. ამის შემდეგ მიღებულ იქნა $\epsilon_{tops} = 71.6\%$.



(a)



(b)



(c)

ნახაზი 7. ინვარიანტული მასების ბუკინის ფუნქციით აპროქსიმაცია:

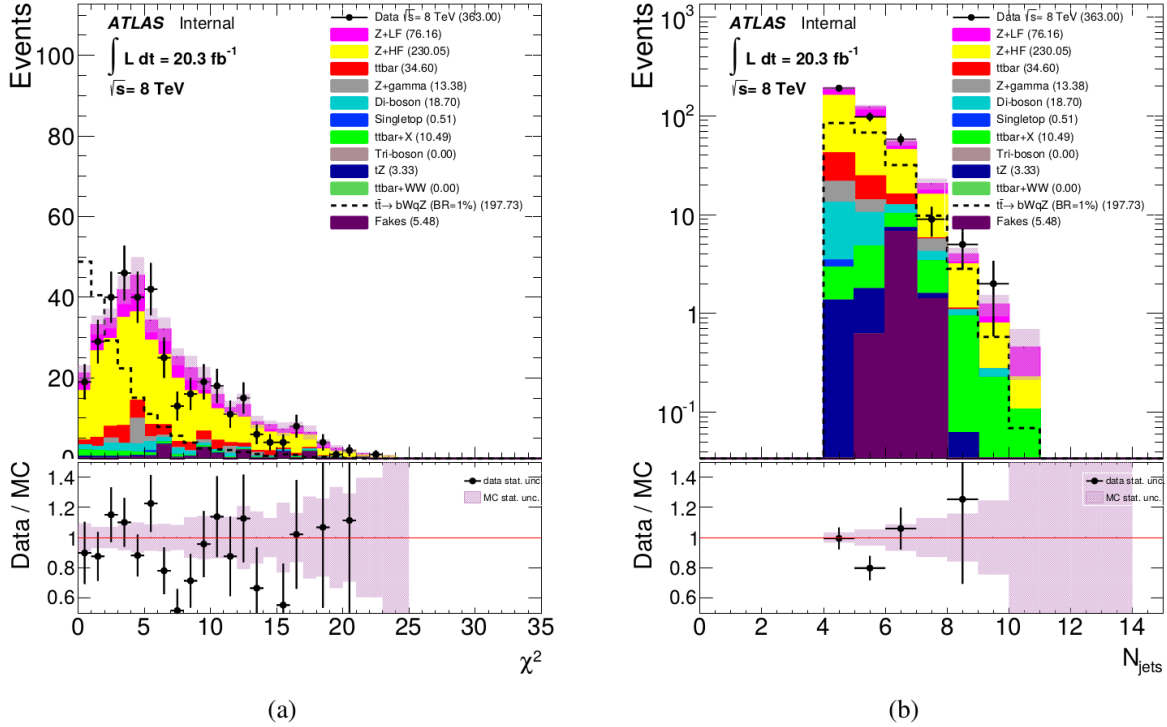
a) ტოპ კვარკი იშლება FCNC დაშლის მოდით $t \rightarrow qZ$, b) ტოპ კვარკი იშლება სტანდარტული მოდელის დომინანტური მოდით $t \rightarrow bW$ c) W ბოზონი, რომელიც აღდგენილია ობიექტებისგან რომლებსაც აქვთ მინიმალური ΔR გენერატორ PROTOS-ის მიერ დაგენერირებული ნაწილაკების მიმართ. ნახაზზე მოყვანილია განაწილებების საშუალო მნიშვნელობები და სტანდარტული გადახრები.

სიგანლის არეს შერჩევისათვის შემდეგი საბოლოო შერჩევის კრიტერიუმები იქნა დადგენილი:

- შემთხვევებში უნდა ყოფილიყო ზუსტად ერთი ტაგირებული b – ჭავლი.
- შემთხვევებში უნდა ყოფილიყო სულ მცირე 4 ჭავლი განივი იმპულსით $p_T > 30$ გევი (ტაგირებული b – ჭავლის ჩათვლით).
- $|m_{top}^{reco} - m_t| < 40$ გევი და $|m_W^{reco} - m_W| < 30$ გევი.

საბოლოო შერჩევის კრიტერიუმების დადების შედეგად მიღებული შემთხვევების რაოდენობა მოყვანილია ცხრილ 5-ში. ღოგორც მოსალოდნელი იყო ძირითადი ფონური პროცესია $Z + \text{jets}$. 363 შემთხვევა არის დამზერილი ექსპერიმენტულ მონაცემებში საბოლოო შერჩევის კრიტერიუმების დადების შემდეგ და თანხვედრაშია მოსალოდნელ ფონური პროცესების რიცხვთან.

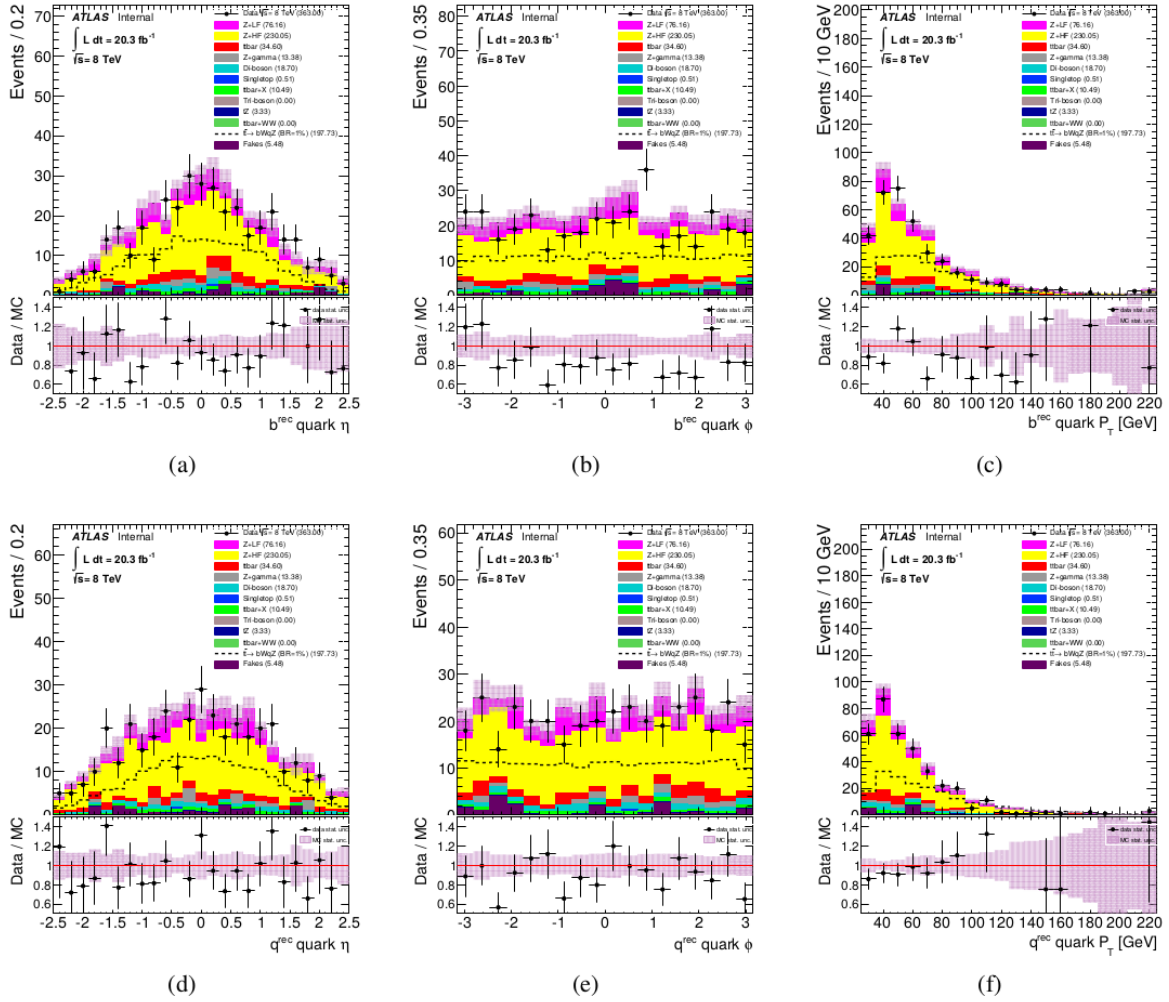
ნახ. 8-ზე წარმოდგენილია χ^2 განაწილება და ჭავლების მრავლობითობის განაწილება. ნახ. 9 ÷ 10-ზე ნაჩვენებია აღდგენილი b, q კვარკების და ლეპტონების ფსევდოსისწრაფით (η), აზიმუტალური კუთხით (ϕ), განივი იმპულსით (p_T) განაწილებები. ნახ. 11-ზე წარმოდგენილია Z და W ბოზონების განივი იმპულსით (p_T) განაწილებები, ხოლო ნახ. 12-ზე ნაჩვენებია Z, W ბოზონების და ტოპ კვარკის ინვარიანტული მასებით განაწილებები არომატის შემცველი ნეიტრალური დენებით მიმდინარე დაშლის (FCNC) ჰიპოთეზისათვის და სტანდარტული მოდელის (SM) ჰიპოთეზისათვის ექსპერიმენტული, სიგნალის და ფონების მონტე-კარლო შემთხვევებისათვის.



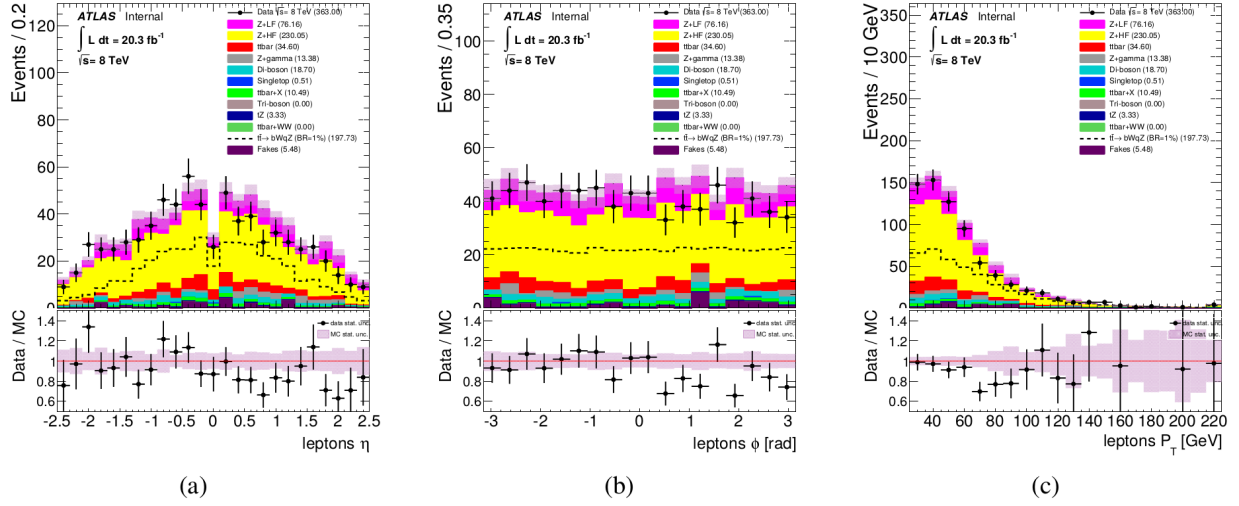
ნახაზი 8. საბოლოო შერჩევის კრიტერიუმების თანმიმდევრული დადების შედეგად მიღებული და მოსალოდნელი განაწილებები სიგნალის არისათვის a) χ^2 b) ჭავლების მრავლობითობის განაწილება. სიგნალი ნორმირებულია $t \rightarrow qZ$ დაშლის 1% ფარდობით ალბათობაზე.

| Sample | Event yields after the Final Selection |
|-------------------------------------|---|
| Z+LF | 76.2 ± 5.1 |
| Z+HF | 230.1 ± 5.6 |
| $t\bar{t}$ | 34.6 ± 2.4 |
| Z+ γ | 13.4 ± 3.8 |
| Di-boson | 18.7 ± 1.1 |
| Single top | 0.51 ± 0.51 |
| $t\bar{t}V$ | 9.99 ± 0.29 |
| Tri-Boson | 0 |
| $t\bar{t}\gamma$ | 0.39 ± 0.22 |
| $t\bar{t}H$ | 0.1127 ± 0.0065 |
| tZ | 3.3 ± 0.14 |
| $t\bar{t}WW$ | 0 |
| Fakes | 5.5 ± 7.5 |
| Background | $393 \pm 12^{+69}_{-65}$ |
| Data | 363 |
| $t\bar{t} \rightarrow bWqZ$ (BR=1%) | $198 \pm 3^{+22}_{-24}$ |
| Sig. eff. ε | $0.0285 \pm 0.0004^{+0.0027}_{-0.0029}$ |

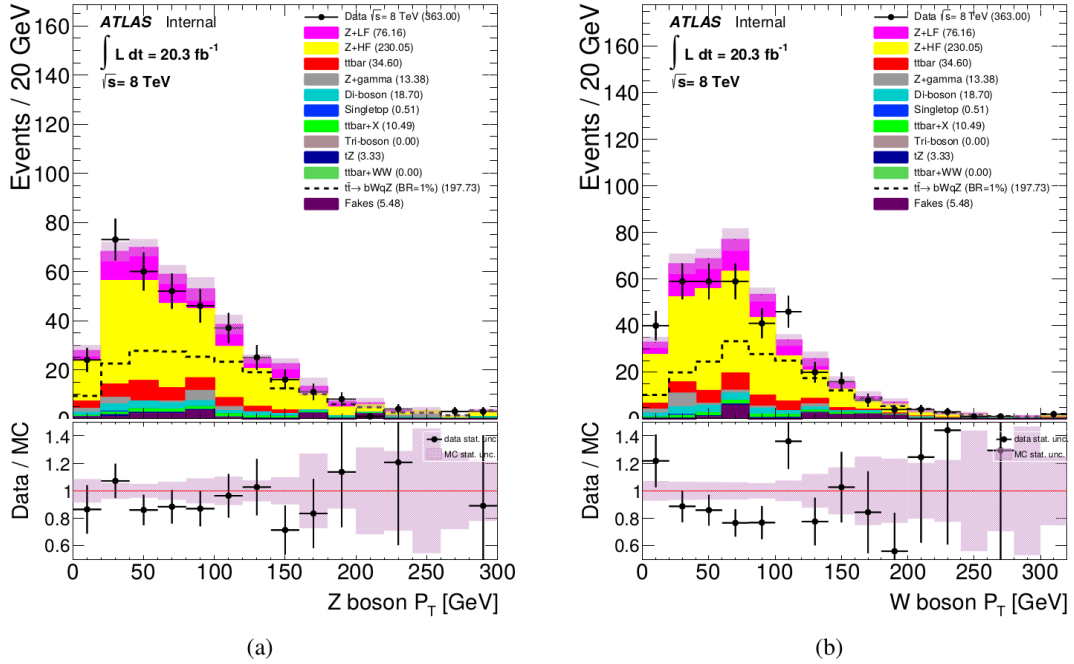
ცხრილი 5. ფონური პროცესების მოსალოდნელი შემთხვევების რაოდენობა, არჩეული ექსპერიმენტული შემთხვევების რაოდენობა და სიგნალის ეფექტურობა მიღებული საბოლოო შერჩევის კრიტერიუმების გამოყენებით. სიგნალის შემთხვევების რიცხვი ნორმირებულია $t \rightarrow qZ$ დაშლის 1% ფარდობით ალბათობაზე. სიგნალის ეფექტურობა შეესაბამება სიგნალის განხილულ ტოპოლოგიას ($W \rightarrow hadrons$, $Z \rightarrow ll$ ($l=e, \mu, \tau$)). თვითეული ფონური პროცესისათვის მოყვანილია მხოლოდ სტატისტიკური ცდომილებები. ფონების ჯამური რიცხვისათვის, სიგნალის რიცხვისა და ეფექტურობისათვის ცდომილებები ნაჩვენებია როგორც მნიშვნელობა $\pm \Delta_{stat.}^{+\Delta_{syst.}}_{-\Delta_{syst.}}$.



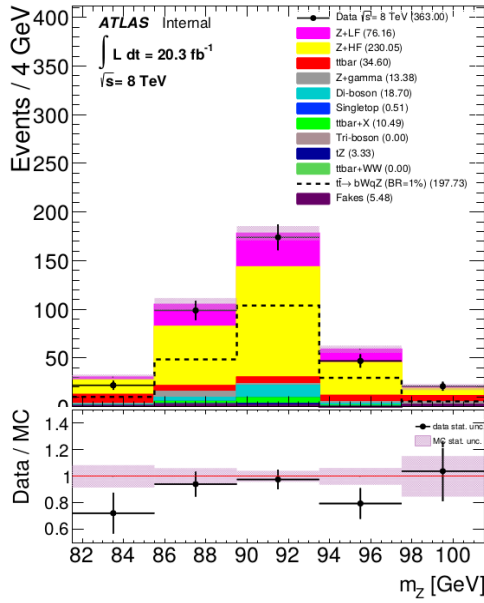
ნახაზი 9. საბოლოო შერჩევის კრიტერიუმების თანმიმდევრული დადების შედეგად მიღებული და მოსალოდნელი განაწილებები სიგნალის არისათვის აღდგენილი a) b კვარკის ფსევდოსისწრაფით (η) b) b კვარკის აზიმუტალური კუთხით (φ) c) b კვარკის განივი იმპულსით (p_T) d) q კვარკის ფსევდოსისწრაფით (η) e) q კვარკის აზიმუტალური კუთხით (φ) f) q კვარკის განივი იმპულსით (p_T). სიგნალი ნორმირებულია $t \rightarrow qZ$ დაშლის 1% ფარდობით ალბათობაზე.



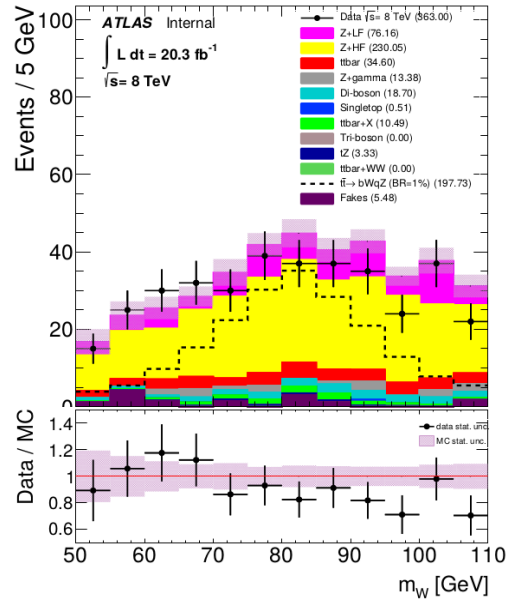
ნახაზი 10. საბოლოო შერჩევის კრიტერიუმების თანმიმდევრული დადების შედეგად მიღებული და მოსალოდნელი განაწილებები სიგნალის არისათვის a) ლეპტონების ფსევდოსისწრაფით (η) b) ლეპტონების აზიმუტალური კუთხით (ϕ) c) ლეპტონების განივი იმპულსით (p_T). სიგნალი ნორმირებულია $t \rightarrow qZ$ დაშლის 1% ფარდობით ალბათობაზე.



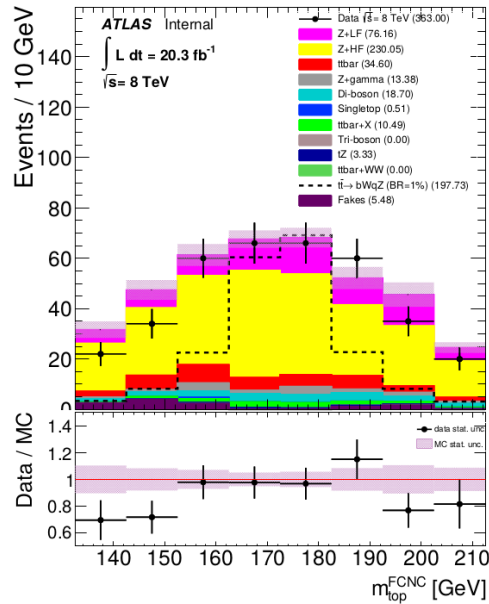
ნახაზი 11. საბოლოო შერჩევის კრიტერიუმების თანმიმდევრული დადების შედეგად მიღებული და მოსალოდნელი განაწილებები სიგნალის არისათვის a) Z b) W ბოზონების განივი იმპულსით (p_T). სიგნალი ნორმირებულია $t \rightarrow qZ$ დაშლის 1% ფარდობით ალბათობაზე.



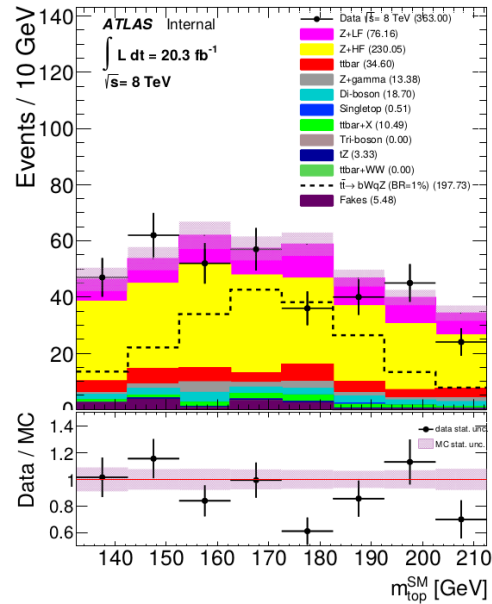
(a)



(b)



(c)



(d)

ნახაზი 12. საბოლოო შერჩევის კრიტერიუმების თანმიმდევრული დადების შედეგად მიღებული და მოსალოდნელი განაწილებები სიგნალის არისათვის a) აღდგენილი Z ბოზონების ინვარიანტული მასებით b) აღდგენილი W ბოზონების ინვარიანტული მასებით c) აღდგენილი ტოპ კვარკის ინვარიანტული მასებით არომატის შემცვლელი ნეიტრალური დენებით მიმდინარე დაშლის (FCNC) ჰიპოთეზისათვის d) აღდგენილი ტოპ კვარკის ინვარიანტული მასებით სტანდარტული მოდელით (SM) მიმდინარე დაშლის ჰიპოთეზისათვის. სიგნალი ნორმირებულია $t \rightarrow qZ$ დაშლის 1% ფარდობით ალბათობაზე.

6. ფონური პროცესები

შემთხვევების საბოლოო შერჩევის შემდეგ ძირითადი (დომინანტური) ფონური პროცესებია tt^- და $Z+jets$ დაბადება. მცირე წვლილი შეაქვთ ლიბოზონების (WW , WZ , ZZ) დაბადების პროცესს, ასევე ვექტორული ბოზონების (W, Z) და tt^- წყვილების ასოციატიური დაბადების, γ და Z ბოზონის ასოციატიური დაბადების, ჰიგსის ბოზონის და tt^- წყვილების ასოციატიური დაბადების, ისევე როგორც γ და tt^- წყვილების ასოციატიური დაბადების, ეული ტოპ კვარკის და Z ბოზონის ასოციატიური დაბადების და ეული კვარკის დაბადების პროცესებს. სევე მცირე წვლილია მოსალოდნელი ე.წ. “ცრუ” ლეპტონების შემცველი შემთხვევებიდან. ველა ეს ფონური პროცესები “ცრუ” ლეპტონების შემცველი შემთხვევების გარდა, შეფასებულია მონტე-კარლო სიმულაციის მეშვეობით და ნორმირებულია შესაბამის თეორიულ კვთებზე. $Z+jets$ ფონური პროცესის მძიმე არმატის შემცველი კომპონენტი განსაზღვრულია ექსპერიმენტული მონაცემებიდან.

6.1 ფონური პროცესების ექსპერიმენტული მონაცემებით შეფასება

6.1.1 $Z+jets$ ფონური პროცესი

წამყვანი რიგის მიახლოების მონტე-კარლო პროგრამა გენერატორების ერთ-ერთ ცნობილ პრობლემას (სუსტ ადგილს, სუსტ წერტილს) წარმოადგენს ვექტორულ ბოზონებთან ერთად ასოციატიურად დაბადებული ჭავლების პროცესებში მძიმე არმატის კვარკებიდან წამოსული ჭავლების ქვეპროცესების წილის სწორად წინასწარმეტყველების შესაძლებლობა. რადგან $Z+LF$ (Z +მსუბუქი არმატის (u, d, s , კვარკები) მქონე კვარკებიდან წამოსული ჭავლები) და $Z+LF$ (Z +მძიმე არმატის (b, c კვარკები) მქონე კვარკებიდან წამოსული ჭავლები) პროცესები დაგენერირებულია ცალ-ცალკე, შესაძლებელია $Z+jets$ მონაცემების ნორმირება ორი საკონტროლო რეგიონის (არეს) შერჩევით, სადაც $Z+LF$ და $Z+HF$ პროცესების წილი მნიშვნელოვნად განსხვავდება, და ამ საკონტროლო რეგიონებში თანადროული ფიტირების ჩატარებით. მონტე-კარლო გენერატორის სისუსტე შეიძლება განსხვავდებოდეს სხვადასხვა კინემატიკურ რეგიონებში, ამიტომაც უმჯობესია, რომ $Z+jets$ მონაცემების ნორმირების საკონტროლო რეგიონები (არეები) კინემატიკურად ახლოს უნდა იყოს სიგნალის არესთან. ამ იდეის გათვალისწინებით $Z+LF$ ფონური პროცესის საკონტროლო რეგიონი (CR^{Z+LF}) განისაზღვრება როგორც რეგიონი, რომელშიც $tt^- \rightarrow WbZq$ შემთხვევები აღდგენილ იქნა შემდეგი პირობების მოთხოვნით:

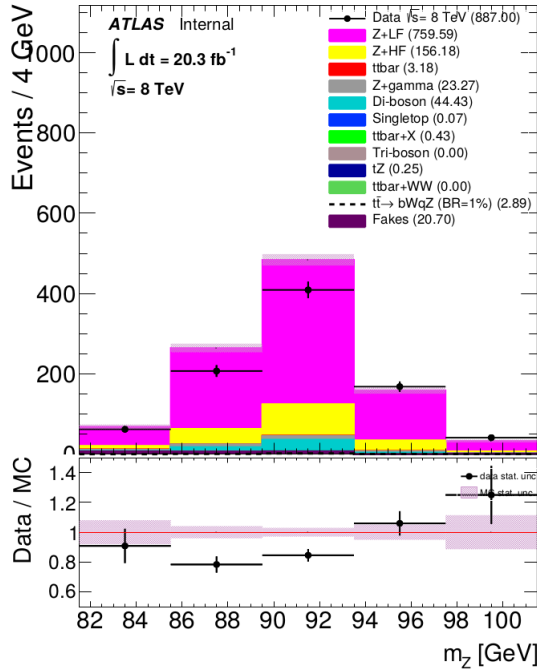
- ამ არეში უნდა მოხვედრილიყო შემთხვევები, რომლებშიც გვაქვს მხოლოდ ჭავლები b -ტაგირების (მონიშვნის) გარეშე
- სულ მცირე 4 ჭავლი განივი იმპულსით $p_T > 30$ გევი
- $|m_{t_{FCNC, SM}^{reco}} - m_{top}| > 40$ გეე-ზე და $|m_W^{reco} - m_W| > 30$ გეე-ზე

ხოლო Z+HF ფონური პროცესის საკონტროლო არისათვის შემდეგი პირობები იქნა გამოყენებული:

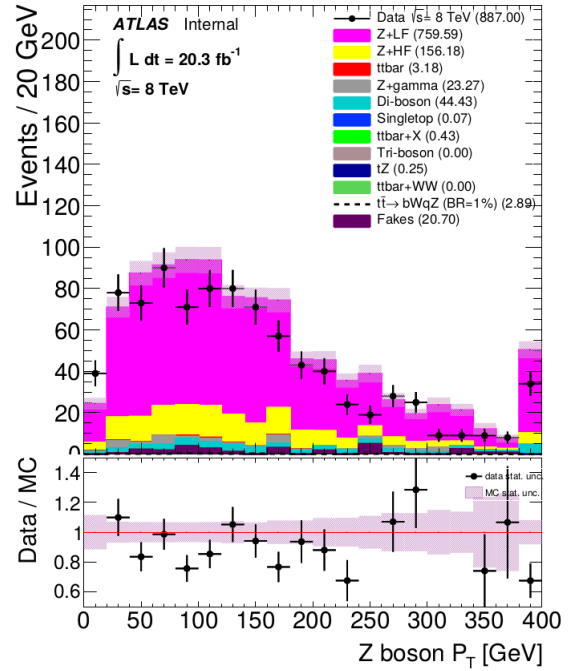
- სულ მცირე ერთი b –ტაგირებული (მონიშნული) ჭავლის არსებობა შემთცვევაში
- სულ მცირე 4 ჭავლი (b –ტაგირებულ ჭავლების ჩათვლით) განივი იმპულსით $p_T > 30$ გევი
- $|m_{t\text{FCNC}}^{\text{reco}} - m_{\text{top}}| > 40$ გეე-ზე

Z+HF და Z+LF საკონტროლო რეგიონებში აღდგენილი Z ბოზონების ინვარიანტული მასებით და განივი იმპულსით p_T შესწორებების გარეშე მოყვანილია ნახ. 13-ზე და 14-ზე შესაბამისად.

შესწორების კოეფიციენტები (ფაქტორები) 0.78 ± 0.11 Z+LF ფონისთვის და 1.32 ± 0.21 Z+HF ფონისთვის მიღებულია მათი შესაბამისი საკონტროლო რეგიონებიდან ფიტირების შედეგად და გამოყენებულია Z+jets ფონური პროცესის მონტე-კარლო მონაცემებისათვის. ამ შესწორების კოეფიციენტების ცდომილებები მიღებულია ფიტირებიდან.

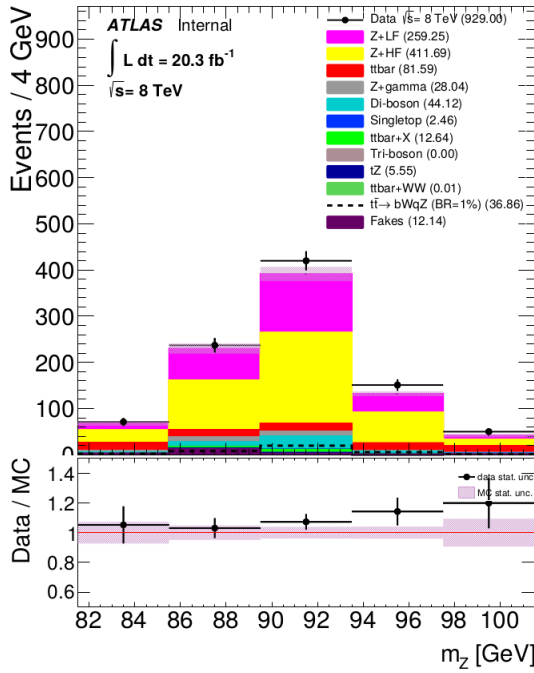


(a)

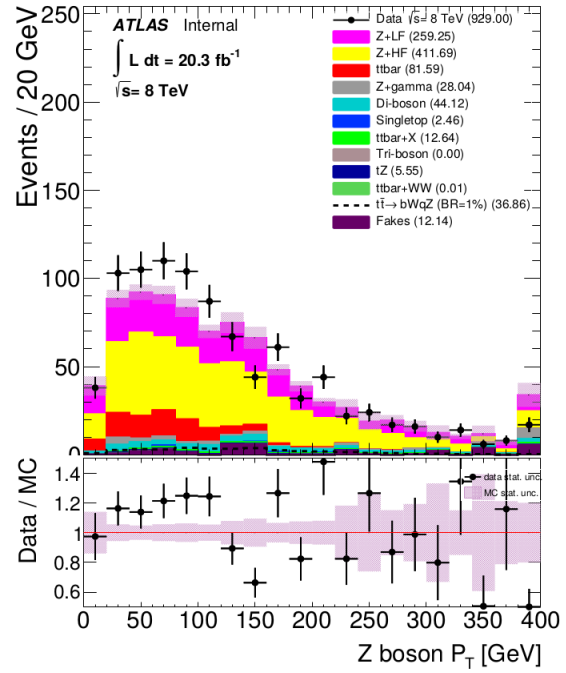


(b)

ნახაზი 13. Z+LF საკონტროლო რეგიონი: განაწილებები a) აღდგენილი Z ბოზონის ინვარიანტული მასით b) აღდგენილი Z ბოზონის განივი იმპულსით p_T .



(a)



(b)

ნახაზი 14. Z+HF საკონტროლო რეგიონი: განაწილებები a) აღდგენილი Z ბოზონის ინვარიანტული მასით b) აღდგენილი Z ბოზონის განივი იმპულსით p_T .

6.1.2 ცრუ ლეპტონების ფონური პროცესი

ყველა პროცესი რომლის საბოლოო მდგომარეობაში ორი იზოლირებული ლეპტონია შეიძლება განხილულ იქნას როგორც $t\bar{t} \rightarrow ZqWb$ ($W \rightarrow jj$, $Z \rightarrow ll$) შემთხვევების ფონური პროცესი. ისეთი ფონური პროცესების წვლილი, რომლებიც შეიცავენ შემთხვევებს ე.წ. “ცრუ” ლეპტონებით, მცირეა, რადგან არჩეულ იქნა e^-e^+ და $\mu^-\mu^+$ შემთხვევები, როცა დილეპტონის ინვარიანტული მასა $|m_{ll} - m_Z^{\text{PDG}}| < 10$ გევი. ასეთი ფონური პროცესების წვლილი შეფასებულ იქნა ე.წ. მატრიცული მეთოდის გამოყენებით [87-88]. როგორც მოსალოდნელი იყო, გაზომილი “ცრუ” ლეპტონებით ფონების წვლილი უმნიშვნელოა.

7. სისტემატიკური განუზღვრელობები

სხვადასხვა სისტემატიკურმა განუზღვრელობებმა შესაძლოა გავლენა მოახდინონ სიგნალის და/ან ფონური პროცესების შეფასებულ მოსალოდნელ რიცხვებზე. შესწავლილ იქნა ყველა ძირითადი შესაძლო სისტემატიკური განუზღვრელობის წარმოშობის წყარო და მისი გავლენა საბოლოო შედეგებზე [80-86,89-93]. ყოველი სისტემატიკური განუზღვრელობისათვის გამოყენებული აღნიშვნის განმარტება მოცემულია

ცხრილ 6-ში, ხოლო თითოეული მათგანის გავლენა სიგნალსა და ფონურ პროცესებზე ასახულია ცხრილ 7-ში.

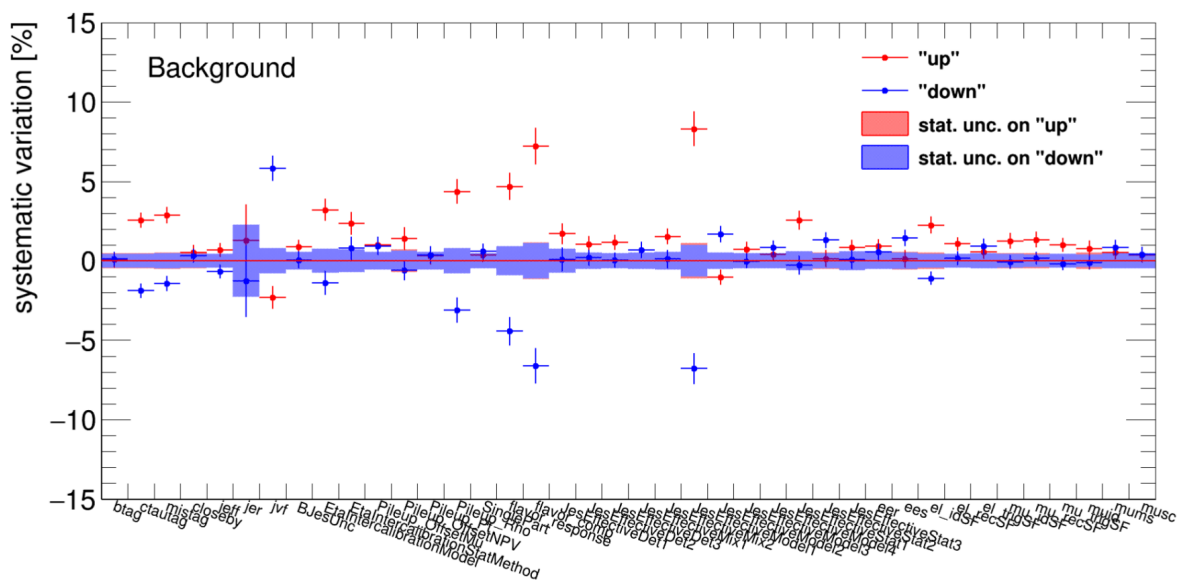
| | |
|-------------------------|--|
| btag | <i>b</i> -tagging scale factors |
| mistag | <i>b</i> -tagging mis-tag rate |
| ctautag | <i>b</i> -tagging c/τ tag rates |
| jvf | Jet vertex fraction |
| jer | Jet energy resolution |
| jeff | jet reconstruction efficiency |
| BJesUnc | Jet energy scale B-JES |
| JesEffectiveModel | Jet energy scale effective model |
| JesEffectiveDetN | N-th component of Jet energy scale effective detector |
| JesEffectiveStatN | N-th component of Jet energy scale effective statistical |
| JesEffectiveMixN | N-th component of Jet energy scale effective mix |
| EtaIntercalibration | Jet energy scale η inter-calibration |
| flavor_comp | Jet energy scale flavor composition |
| flavor_response | Jet energy scale flavour response |
| closeby | Jet energy scale topology |
| Pileup_Rho | Jet energy scale pileup ρ |
| Pileup_OffsetNPV | Jet energy scale pileup offset (NPV) |
| Pileup_OffsetMu | Jet energy scale pileup offset (μ) |
| Pileup_Pt | Jet energy scale pileup (p_T) |
| SinglePart | Jet energy scale single-particle |
| elIdSF | electron ID efficiency scale factor |
| el_recSF | electron reconstruction efficiency scale factor |
| el_trigSF | electron trigger efficiency scale factor |
| eer | electron energy resolution |
| ees | electron energy scale |
| mu_idSF | muon ID efficiency |
| mu_recSF | muon reconstruction efficiency |
| mu_trigSF | muon trigger efficiency |
| mums | muon momentum resolution (MS) |
| muid | muon momentum resolution (ID) |
| musc | muon momentum scale |
| Zlight_norm | Z+light flavour jets background Data-Driven normalization |
| Zheavy_norm | Z+heavy flavour jets background Data-Driven normalization |
| $\sigma_{t\bar{t}}$ | $t\bar{t}$ cross section |
| $\sigma_{t\bar{t}+V}$ | $t\bar{t} + V$ cross section |
| $\sigma_{diboson}$ | diboson cross section |
| diboson_additional_jets | extrapolation to higher jet multiplicity in diboson events |

ცხრილი 6. ანალიზში გათვალისწინებული ყველა სისტემატიკური განუზღვრელობების განმარტება.

| source | background [%] | $t\bar{t} \rightarrow bWqZ$ [%] |
|-------------------------------|----------------|---------------------------------|
| Lumi | 2.8/-2.8 | 2.8/-2.8 |
| btag | - | 6.5/-6.6 |
| ctautag | 2.5/-1.9 | -0.7/0.3 |
| mistag | 2.8/-1.4 | -0.3/0.3 |
| jeff | 0.7/-0.7 | - |
| jer | - | 2.1/-2.1 |
| jvf | -2.3/5.7 | 0.4/1.5 |
| BJesUnc | - | 0.3/-0.5 |
| EtaIntercalibrationModel | 3.2/-1.4 | 1.7/-1.6 |
| EtaIntercalibrationStatMethod | 2.3/0.8 | 0.4/-0.5 |
| Pileup_OffsetMu | 1.0/0.9 | - |
| Pileup_OffsetNPV | - | 0.7/-1.2 |
| Pileup_Rho | 4.3/-3.1 | 1.8/-2.0 |
| flavor_response | 4.6/-4.4 | 2.2/-2.3 |
| flavor_comp | 7.1/-6.5 | 3.4/-4.1 |
| JesEffectiveDet1 | - | 0.7/-0.6 |
| JesEffectiveMix1 | 0.6/0.7 | - |
| JesEffectiveModel1 | 8.2/-6.7 | 3.5/-4.1 |
| JesEffectiveModel2 | -1.0/1.6 | -0.4/0.2 |
| JesEffectiveStat1 | - | 0.6/-0.7 |
| eer | 0.9/0.5 | - |
| ees | - | -0.6/0.3 |
| el_idSF | 2.2/-1.1 | 1.3/-1.6 |
| el_trigSF | 0.5/0.9 | - |
| mu_idSF | - | 0.6/-0.6 |
| mu_recSF | - | 0.3/-0.6 |
| mu_trigSF | - | 0.4/-0.5 |
| mums | 0.5/0.8 | - |
| Zlight_norm | 2.8/-2.8 | × |
| Zheavy_norm | 9.4/-9.4 | × |
| $\sigma_{t\bar{t}}$ | 0.4/-0.5 | 5.1/-5.9 |
| $\sigma_{t\bar{t}+V}$ | 0.8/-0.8 | × |
| $\sigma_{diboson}$ | 0.2/-0.2 | × |
| diboson_additional_jets | 2.3/-2.3 | × |
| total | 18/-17 | 11/-12 |

ცხრილი 7. თითოეული სისტემატიკური განუზღვრელობის ეფექტი (ფარდობითი განსხვავება) სიგნალის და ყველა ფონური პროცესის შემთხვევების რაოდენობაზე (რიცხვზე) (მოყვანილია პროცენტებში). დეტექტორის მოდელირების სისტემატიკა შეფასებულია ე.წ. ”ბუთსტრაფ” მეთოდით. ტირე ნიშნავს, რომ განუზღვრელობა (ცდომილება) მონტე-კარლო სიმულაციის სტატისტიკური განუზღვრელობის რიგისაა (თავსებადია მასთან), აიმტომ ასეთი სისტემატიკა აღარ განიხილება. ჯვარი ნიშნავს, რომ განუზღვრელობის წყარო არ მოქმედებს მოცემულ პროცესზე. სისტემატიკური განუზღვრელობები ერთი ვარიაციით არის სიმეტრიზებული. ციტირებული ჯამური განუზღვრელობა წარმოადგენს “ზედა” და “ქვედა” ვარიაციების (ცვალებადობების) კვადრატების ჯამიდან ამოღებულ კვადრატულ ფესვს.

მოდელირების სისტემატიკა, რომელიც შეიცავს ლეპტონების, ჭავლების, ხ, c და მსუბუქი არომატის შემცველი კვარკების ადგენის განუზღვრელობებს, შეფასებულ იქნა ე.წ. ”ბუთსტრაფ” მეთოდით. ამ მეთოდის გამოყენებისას განისაზღვრება n ფსევდო-ექსპერიმენტი. ყოველ ფსევდო-ექსპერიმენტში ნომინალურ და სისტემატიკური განუზღვრელობის წყაროს ვარიაციით მიღებულ მონაცემებში თითოეულ შემთხვევას მიეწერება პუასონის განაწილებიდან დაგენერირებული შემთხვევითი წონა $P(\lambda=1)$. შემდეგ ყოველ ფსევდო-ექსპერიმენტში გამოითვლება მიღებული შემთხვევათა რიცხვის სისტემატიკური ვარიაცია (“ზედა”/”ქვედა”) და ამ ვარიაციების საშუალო ჩათვლილია მოცემულ სისტემატიკური განუზღვრელობის მნიშვნელობად, მაშინ როცა მათი საშუალო კვადრატული გადახრა განიხილება, როგორც მოცემული სისტემატიკური განუზღვრელობის სტატისტიკური ცდომილება. სისტემატიკური განუზღვრელობის წყარო ითვლება მნიშვნელოვნად მონტე-კარლო მონაცემების სტატისტიკიასთან მიმართებაში თუ მისი “ზედა” და “ქვედა” ვარიაციები აღემატება მათსავე სტატისტიკურ ცდომილებას (განუზღვრელობას).



აღდგენილი W ბოზონის ინვარიანტული მასა m_W , აღდგენილი Z და W ბოზონების განივი იმპულსების ჯამი $P_T^W + P_T^Z$ და აღდგენილი Z და W ბოზონებს შორის კუთხის კოსინუსი. ნახაზიდან ჩანს, რომ ზემოთჩამოთვლილ ცვლადებით განაწილებების ფორმა განსხვავდება ექსპერიმენტული, მონტე-კარლო სიგნალის და ფონების შემთხვევებისათვის. ნახ. 18-ზე წარმოდგენილია ორგანოზომილებიანი კორელაციური განაწილება (მატრიცა) $m_{\text{top}}^{\text{FCNC}}$, $P_T^q + P_T^b$, m_W , $P_T^W + P_T^Z$ და $\cos(\theta_W - \theta_Z)$ ცვლადებისათვის, საიდანაც ჩანს რომ ისინი მართლაც არაკორელირებული არიან. დაუშვებთ რა რომ არჩეული ცვლადებია არაკორელირებული არიან, ყოველი შემთხვევისათვის სიგნალის და ფონის ალბათობებისათვის მივიღებთ:

$$P_s = \prod_{i=1}^n p_i^s(x_i), P_b = \prod_{i=1}^n p_i^b(x_i)$$

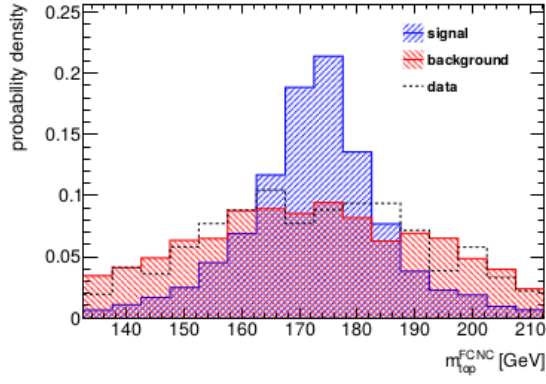
სადაც $n = 5$ არის გამოყენებული ალბათობის სიმკვრივის ფუნქციები p_i^s (p_i^b) არის ალბათობა იმისა რომ შემთხვევაში ფიზიკურ ცვლადის i -ის მნიშვნელობა ტოლია x_i -ის რომელიც შეესაბამება სიგნალის (ფონის) ალბათობის სიმკვრივის ფუნქციას. თუ $P_s > P_b$, მაშინ შემთხვევა სიგნალის მსგავსია, თუ $P_s < P_b$, მაშინ შემთხვევა ფონის მსგავსია. ამრიგად დისკრიმინანტული ცვლადი შეიძლება იყო შემდეგი:

$$L_R = \log\left(\frac{P_s}{P_b}\right)$$

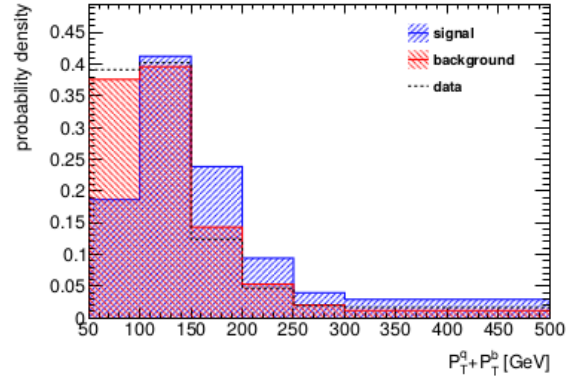
სიგნალის მსგავსი შემთხვევებისათვის L_R მეტია ვიდრე ფონის მსგავსი შემთხვევებისათვის, მრავალფაქტორიანი დისკრიმინანტული ცვლადის განაწილება მოყვანილია ნახ. 19-ზე. სიგნალის მნიშვნელოვნების ოპტიმიზაცია განხორციელდა დისკრიმინანტულ L_R ცვლადზე ჩამოჭრის კრიტერიუმის დადებით. ნახ. 20 მოყვანილია სიგნალის მნიშვნელოვნების დამოკიდებულება დისკრიმინანტულ ცვლადზე (L_R^{cut}) ჩამოჭრის მნიშვნელობაზე. ამ ნახაზიდან ჩანს, რომ სიგნალის მნიშვნელობის მაქსიმუმი $s/\sqrt{b}=13.66$ (სიგნალის რაოდენობა ნორმირებულია დაშლის ფარდობითი ალბათობისათვის $\text{BR}(t \rightarrow qZ) = 1\%$) შეესაბამება $L_R^{\text{cut}} = 0.75$ მნიშვნელობას. ნახ. 21 –ზე მოყვანილია ფონების ინტენსიურობა α_b და სიგნალის ინტენსიურობა α_s . დისკრიმინანტული ცვლადის ხარისხის

(ვარგისიანობის) რაოდენობრივი შეფასება შესაძლებელია $(1 - \alpha_b)$ vs. α_s მრუდის შიგნით მდებარე არეს საშუალებით, რომელიც მოყვანილია ნახ.

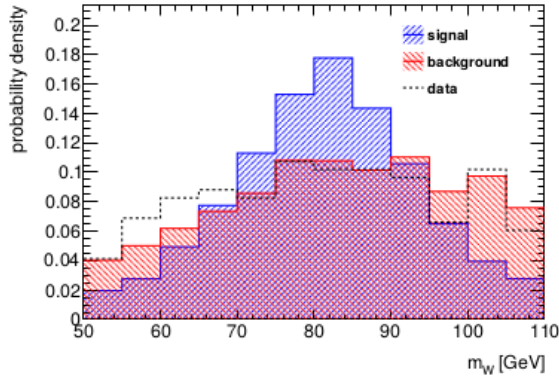
22-ზე. ამ ნახაზზე ნაჩვენებია $(1 - \alpha_b)$ vs. α_s მრუდი ორი სხვადასხვა შემთხვევისათვის: როდესაც დისკრიმინანტული ცვლადი აგებულია (შედგენილია) 5 ფიზიკური ცვლადის საშუალებით და როცა შედგენილია ორი ცვლადის მეშვეობით: FCNC აღდგენილი ტოპ კვარკის და აღდგენილი W ბოზონის ინვარიანტული მასების გამოყენებით.



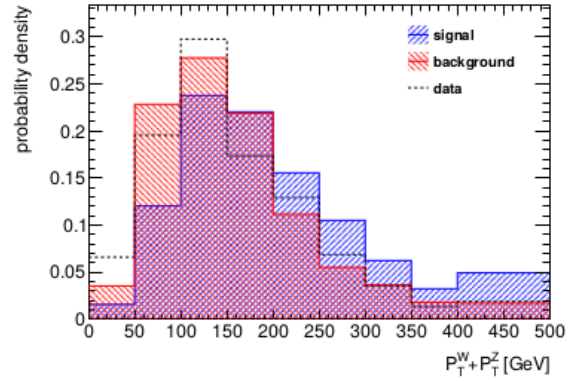
(a)



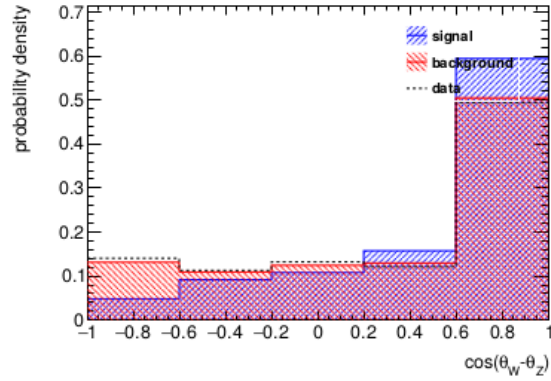
(b)



(c)

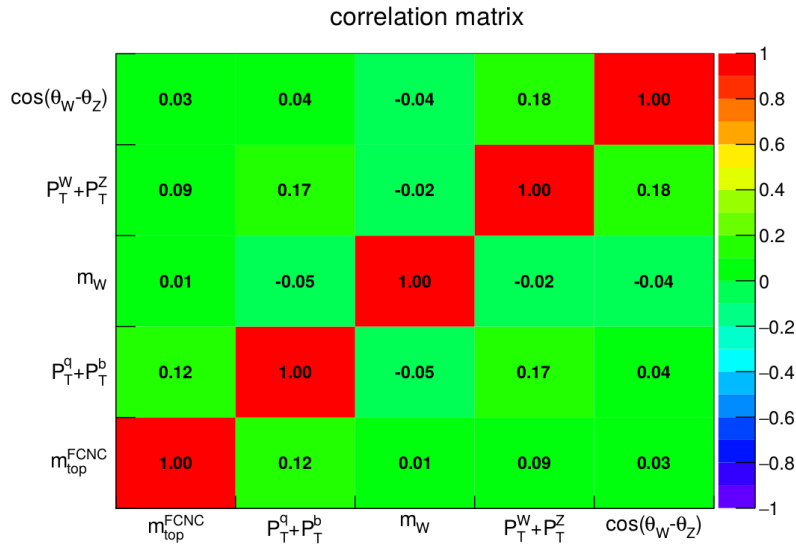


(d)

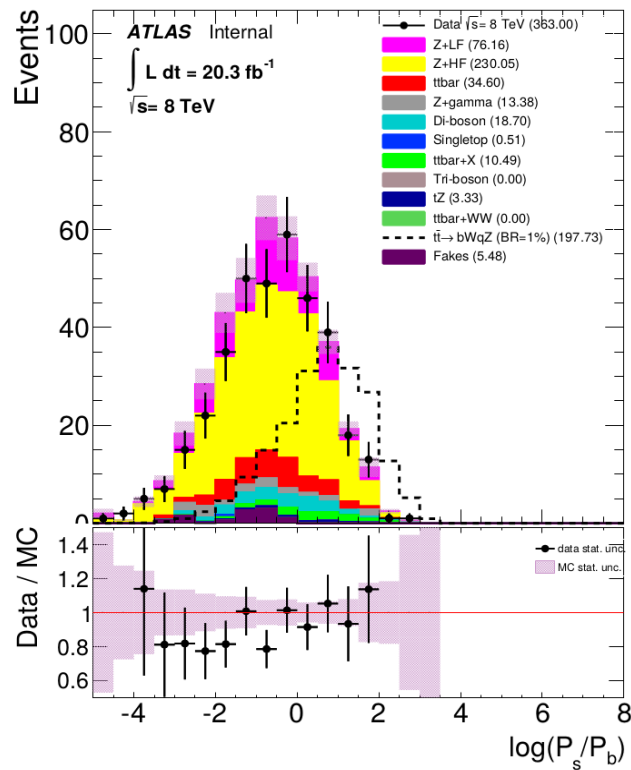


(e)

ნახაზი 17. ალბათობის სიმკვრივის ფუნქციები ფიზიკური ცვლადებისათვის a) FCNC აღდგენილი ტოპ კვარკის ინვარიანტული მასა m_{top}^{FCNC} b) აღდგენილი b და q კვარკების განივი იმპულსების ჯამი $P_T^a + P_T^b$ c) აღდგენილი W ბოზონის ინვარიანტული მასა m_W d) აღდგენილი Z და W ბოზონების განივი იმპულსების ჯამი $P_T^W + P_T^Z$ e) აღდგენილი Z და W ბოზონებს შორის კუთხის კოსინუსი $\cos(\theta_W - \theta_Z)$, რომელთაგან შედგენილ იქნა დისკრიმინანტული ცვლადი.

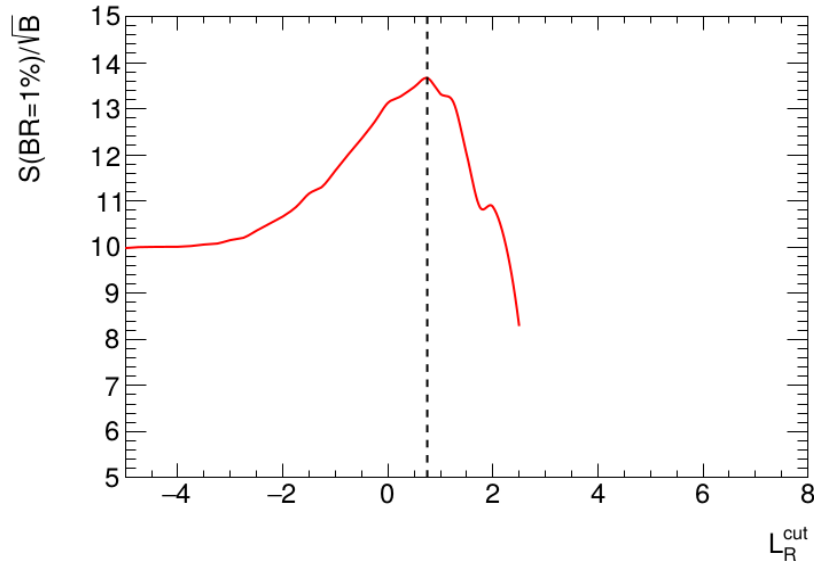


ნახაზი 18. არჩეული ფიზიკური ცვლადებისათვის ორგანოზომილებიანი კორელაციური მატრიცა.

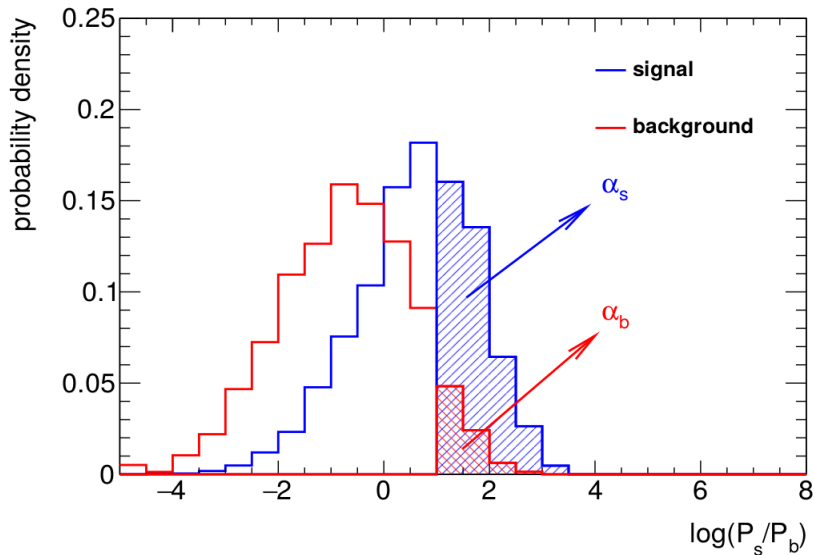


ნახაზი 19. დისკრინატული ცვლადის ექსპერიმენტული, მონტე-კარლო სიგნალის და ფონების შემთხვევებისათვის განაწილება

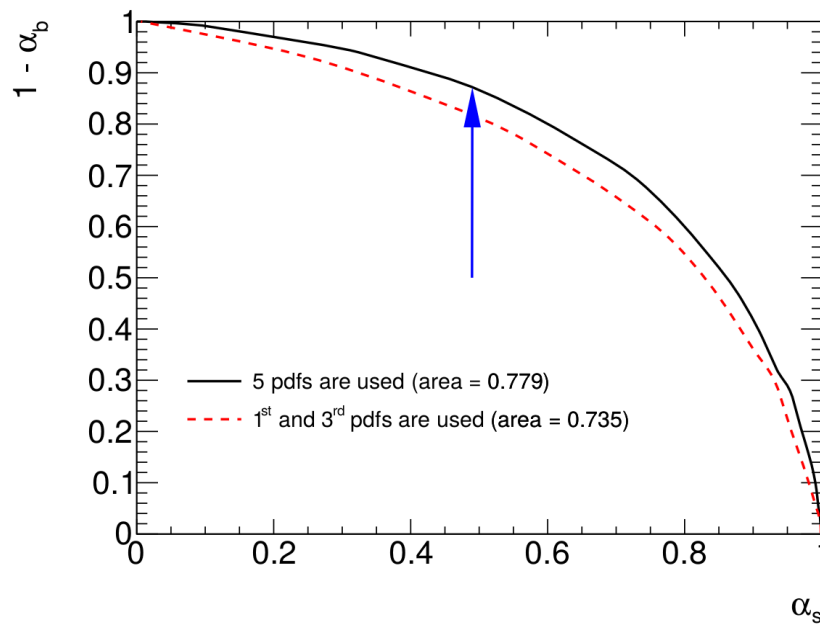
ნახ. 22-დან ჩანს, რომ დისკრიმინანტული ცვლადი შედგენილი 5 ფიზიკური ცვლადის საშუალებით არის მისაღები და უკეთესი ვიდრე დისკრიმინანტული ცვლადი შედგენილი 2 ფიზიკური ცვლადის საშუალებით.



ნახაზი 20. სიგნალის შემთხვევების რაოდენობის ფონების შემთხვევების რაოდენობიდან კვადრატულ ფესვზე ფარდობის s/\sqrt{b} (სიგნალის რაოდენობა ნორმირებულია ფარდობითი დაშლის ალბათობისათვის $BR(t \rightarrow qZ)=1\%$) დამოკიდებულება დისკრიმინანტული ცვლადის ჩამოჭრის სიდიდეზე. ვერტიკალური ხაზი შეესაბამება დისკრიმინანტის ჩამოჭრის სიდიდეს ($L_R^{cut}=0.75$ or $L_R > 0.75$).



ნახაზი 21. დისკრიმინანტული ცვლადის ალბათობის სიმკვრივის ფუნქცია. ეს მრუდი გამოსახავს სიგნალის ინტენსიურობას α_s და ფონების ინტენსიურობას α_b .



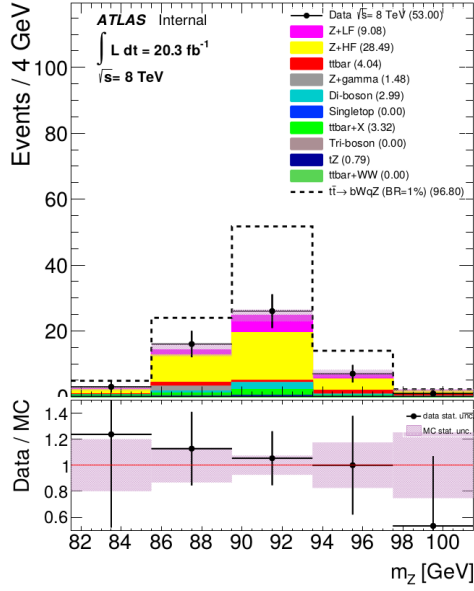
ნახაზი 22. ფონების ჩამოჭრის (გადაგდების) $(1 - \alpha_b)$ დამოკიდებულება სიგნალის ინტენსიურობაზე α_s . ლურჯი ისარი მიუთითებს სამუშაო წერტილს, რომელიც შეესაბამება $\alpha_s=0.49$, $\alpha_b=0.13$, $s/\sqrt{b}=13.66$ მნიშვნელობებს.

ცხრილ 8-ში მოყვანილია დისკრიმინანტულ ცვლადზე ჩამოჭრის კრიტერიუმის მოთხოვნის შემდეგ დარჩენილი შემთხვევების რაოდენობა, ხოლო ნახ. 23-ზე მოყვანილია აღდგენილი ტოპ კვარკების, Z და W ბოზონების ინვარიანტული მასების განაწილებები.

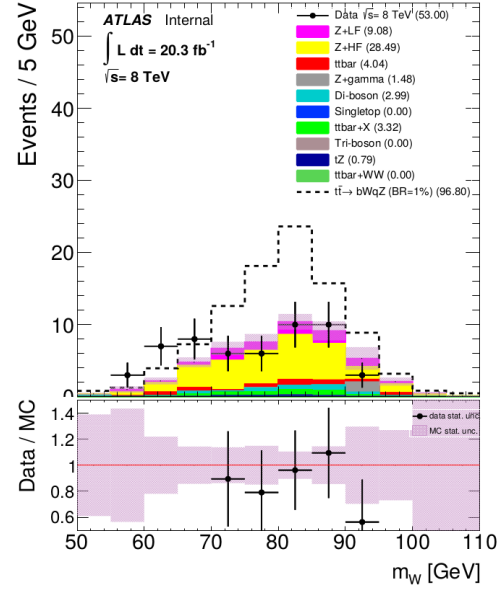
ნახ. 24 და 25-ზე მოცემულია ყოველი სისტემატიკური განუზღვრელობის ფარდობითი გავლენა სიგნალის და ფონური პროცესების ჯამურ შემთხვევების რაოდენობაზე (რიცხვზე) დისკრიმინანტულ ცვლადზე ჩამოჭრის კრიტერიუმის მოთხოვნის შემდეგ, გამოთვლილი “ბუტსტრაფ” მეთოდის გამოყენებით. ცხრილ 9-ში თავმოყრილია ყველა სისტემატიკური განუზღვრელობების (ცდომილებების) წყაროები და მათი ფარდობითი გავლენა სიგნალის და ფონურ შემთხვევებზე.

| Sample | Event yields after the cut on $\log(P_s/P_b)$ |
|-------------------------------------|---|
| Z+LF | 9.1 ± 1.6 |
| Z+HF | 28.5 ± 1.8 |
| $t\bar{t}$ | 4.04 ± 0.81 |
| Z+ γ | 1.5 ± 1.4 |
| Di-boson | 2.99 ± 0.48 |
| Single top | 0 |
| $t\bar{t}V$ | 3.13 ± 0.16 |
| Tri-Boson | 0 |
| $t\bar{t}\gamma$ | 0.16 ± 0.16 |
| $t\bar{t}H$ | 0.0300 ± 0.0031 |
| tZ | 0.79 ± 0.060 |
| $t\bar{t}WW$ | 0 |
| Fakes | - |
| Background | $50 \pm 3^{+10}_{-10}$ |
| Data | 53 |
| $t\bar{t} \rightarrow bWqZ$ (BR=1%) | $97 \pm 2^{+12}_{-13}$ |
| Sig. eff. ε | $0.0140 \pm 0.0003^{+0.0015}_{-0.0017}$ |

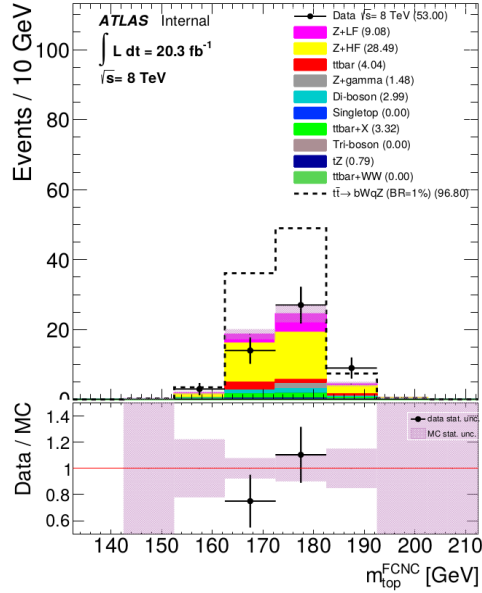
ცხრილი 8. ფონური პროცესების მოსალოდნელი შემთხვევების რაოდენობა, არჩეული ექსპერიმენტული შემთხვევების რაოდენობა და სიგნალის ეფექტურობა მიღებული დისკრიმინანტულ ცვლადზე L_R -ზე ჩამოჭრის კრიტერიუმის მოთხოვნის შედეგად. სიგნალის შემთხვევების რიცხვი ნორმირებულია $t \rightarrow qZ$ დაშლის 1% ფარდობით აღბათობაზე. სიგნალის ეფექტურობა შეესაბამება სიგნალის განხილულ ტოპოლოგიას ($W \rightarrow hadrons$, $Z \rightarrow ll$ ($l=e, \mu, \tau$)). თვითმული ფონური პროცესისათვის მოყვანილია მხოლოდ სტატისტიკური ცდომილებები. ფონების ჯამური რიცხვისათვის, სიგნალის რიცხვისა და ეფექტურობისათვის ცდომილებები ნაჩვენებია როგორც მნიშვნელობა $\pm \Delta_{stat.}^{+\Delta_{syst.}}_{-\Delta_{syst.}}$.



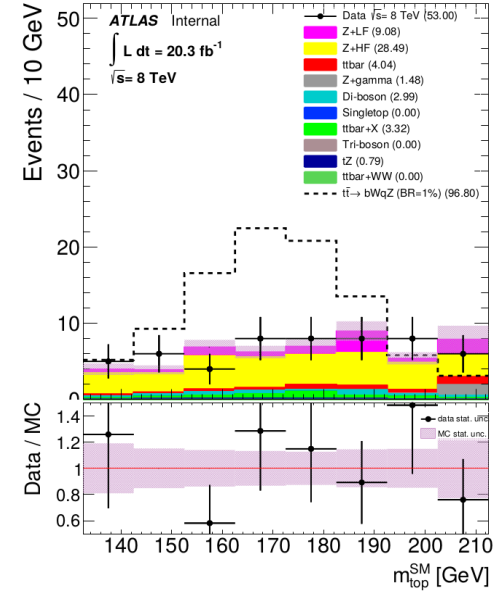
(a)



(b)

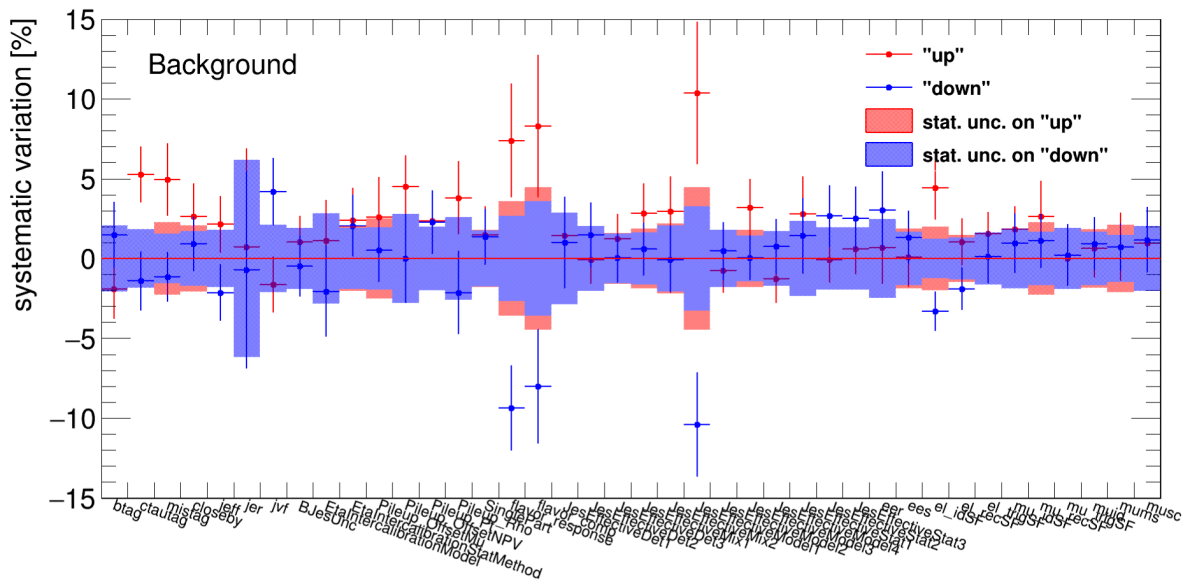


(c)

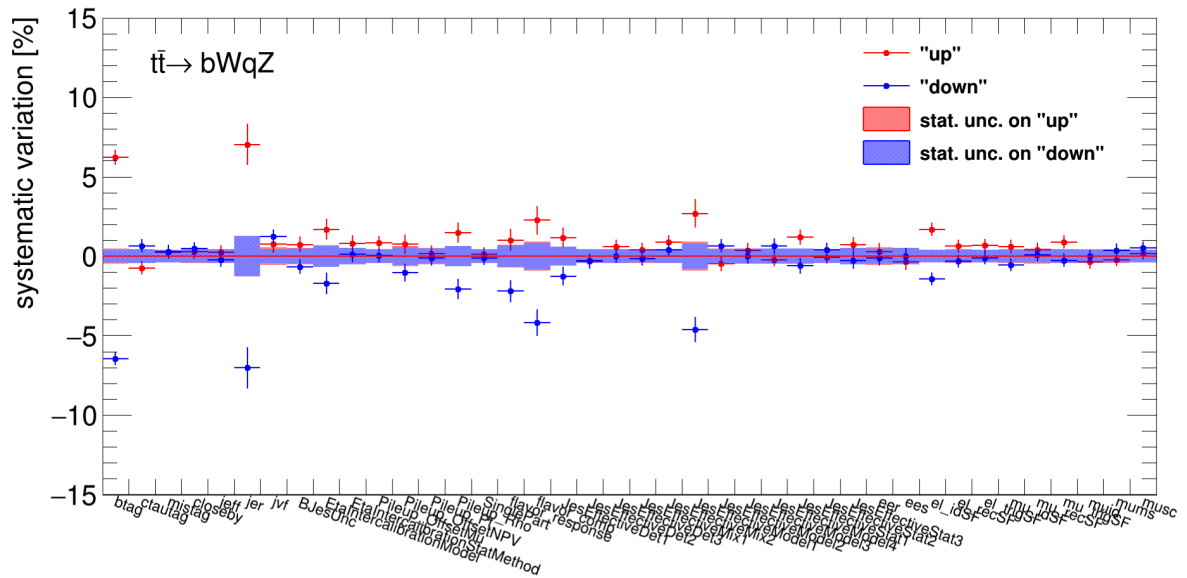


(d)

ნახაზი 23. დისკრიმინანტულ ცვლადზე ჩამოჭრის კრიტერიუმის მოთხოვნის შედეგად დმზერილი და მოსალოდნელი განაწილებები სიგნალის არესათვის: a) აღდგენილი Z ბოზონების ინვარიანტული მასა, b) აღდგენილი W ბოზონების ინვარიანტული მასა, c) აღდგენილი ტოპ კვარკის ინვარიანტული მასა არომატის შემცველი ნეიტრალური დენებით მიმდინარე დაშლის (FCNC) ჰიპოთეზისათვის, d) აღდგენილი ტოპ კვარკის ინვარიანტული მასებით სტანდარტული მოდელით (SM) მიმდინარე დაშლის ჰიპოთეზისათვის. სიგნალი ნორმირებულია $t \rightarrow qZ$ დაშლის 1% ფარდობით ალბათობაზე.



ნახაზი 24. ყოველი სისტემატიკური განუზღვრელობის ფარდობითი გავლენა ფონური პროცესების ჯამურ შემთხვევების რაოდენობაზე (რიცხვზე) დისკრიმინანტულ ცვლადზე ჩამოჭრის კრიტერიუმის მოთხოვნის შემდეგ, გამოთვლილი “ბუტსტრაფ” მეთოდის გამოყენებით. რიცხვები გამოსახულია პროცენტებში.



ნახაზი 25. ყოველი სისტემატიკური განუზღვრელობის ფარდობითი გავლენა სიგნალის შემთხვევების რაოდენობაზე (რიცხვზე) დისკრიმინანტულ ცვლადზე ჩამოჭრის კრიტერიუმის მოთხოვნის შემდეგ, გამოთვლილი “ბუტსტრაფის” მეთოდის გამოყენებით. რიცხვები გამოსახულია პროცენტებში.

| source | background [%] | $t\bar{t} \rightarrow bWqZ$ [%] |
|-------------------------------|----------------|---------------------------------|
| Lumi | 2.8/-2.8 | 2.8/-2.8 |
| btag | - | 6.2/-6.4 |
| ctautag | - | -0.7/0.7 |
| jeff | 2.1/-2.1 | - |
| jer | - | 7.0/-7.0 |
| jvf | - | 0.8/1.2 |
| BJesUnc | - | 0.7/-0.7 |
| EtaIntercalibrationModel | - | 1.7/-1.7 |
| EtaIntercalibrationStatMethod | 2.4/2.0 | - |
| Pileup_OffsetNPV | - | 0.8/-1.1 |
| Pileup_Pt | 2.4/2.3 | - |
| Pileup_Rho | - | 1.5/-2.1 |
| flavor_response | 7.4/-9.4 | 1.0/-2.2 |
| flavor_comp | 8.3/-8.0 | 2.3/-4.2 |
| JesEffectiveDet1 | - | 1.2/-1.3 |
| JesEffectiveModel1 | 10.4/-10.4 | 2.7/-4.6 |
| JesEffectiveStat1 | - | 1.2/-0.6 |
| el_idSF | 4.4/-3.3 | 1.7/-1.4 |
| mu_idSF | - | 0.6/-0.6 |
| Zlight_norm | 2.6/-2.6 | × |
| Zheavy_norm | 9.1/-9.1 | × |
| $\sigma_{t\bar{t}}$ | 0.4/-0.5 | 5.1/-5.9 |
| $\sigma_{t\bar{t}+V}$ | 1.9/-1.9 | × |
| $\sigma_{diboson}$ | 0.3/-0.3 | × |
| diboson_additional_jets | 2.9/-2.9 | × |
| total | 19/-20 | 12/-14 |

ცხრილი 9. ყოველი სისტემატიკური განუზღვრელობის სიგნალის და ფონური პროცესების ჯამურ შემთხვევების რაოდენობაზე (რიცხვზე) ფარდობითი გაგვლენის შედეგი (მოყვანილია პროცენტებში) დისკრიმინანტულ ცვლადზე ჩამოჭრის კრიტერიუმის მოთხოვნის შემდეგ. დეტექტორის მოდელირების სისტემატიკა შეფასებულია ე.წ. ”ბუთსტრაფ” მეთოდით. ტირე ნიშნავს, რომ განუზღვრელობა მონტე-კარლო სიმულაციის სტატისტიკური განუზღვრელობის რიგისაა (თავსებადია მასთან). აიმტომ ასეთი სისტემატიკა აღარ განიხილება. ჯვარი ნიშნავს, რომ განუზღვრელობის წყარო არ მოქმედებს მოცემულ პროცესზე. სისტემატიკური განუზღვრელობები ერთი ვარიაციით არის სიმეტრიზებული. ციტირებული ჯამური განუზღვრელობა წარმოადგენს “ზედა” და “ქვედა” ვარიაციების (ცვალებადობების) კვადრატების ჯამიდან ამოღებულ კვადრატულ ფესვს.

9. ზედა ზღვარის შეფასება

სიგნალის მოსალოდნელ შემთხვევათა რიცხვზე 95% საიმედოობის დონით ზედა ზღვარი მიღებული იქნა მოდიფიცირებული სიხშირული მეთოდით (CL_s) [95-97], რომელიც განხორციელებულია RooStats პროგრამულ პაკეტში [94] და დაფუძნებულია მორგებული მართლმსგავსების ფუნქციის მეთოდზე, რომელიც ითვალისწინებს სისტემატიკურ და სტატისტიკურ განუზღვრელობებს შესაბამისი შეშფოთების პარამეტრების გამოყენებით, რომელთა ფიტირება ხდება ექსპერიმენტული მონაცემებიდან.

სტატისტიკური ანალიზი დაფუძნებულია მართლმსგავსების $L(\mu, \theta)$ ფუნქციაზე, რომელიც არის შედგენილი (აგებული) შემდეგნაირად: იგი არის დამზერილი შემთხვევების რიცხვის შესაბამისი პუასონის განაწილების წევრის ნამრავლი θ პარამეტრებისათვის რამდენიმე გაუსის წევრებზე (შეზღუდვის პირობებით), სადაც θ არის შეშფოთების პარამეტრების კრებული, რომელიც ითვალისწინებს სტატისტიკური და სისტემატიკური განუზღვრელობების ეფექტებს სიგნალის და მოსალოდნელი ფონური პროცესებისათვის. ეს ფუნქცია დამოკიდებულია μ -ზე, რომელზეც მრავლდება n_s -ი (სიგნალის შემთხვევების რიცხვი, ნორმირებული ფარდობითი დაშლის ალბათობაზე $Br(t \rightarrow qZ)=1\%$), ამრიგად მოსალოდნელ სიგნალის შემთხვევათა რიცხვზე ზედა ზღვარი მოიცემა, როგორც $n_s^{upper} = \mu^{upper} \cdot n_s$.

სატესტო სტატისტიკა q_μ განისაზღვრება მორგებული მართლმსგავსების სუნქციების ფარდობის გამოყენებით შემდეგნაირად:

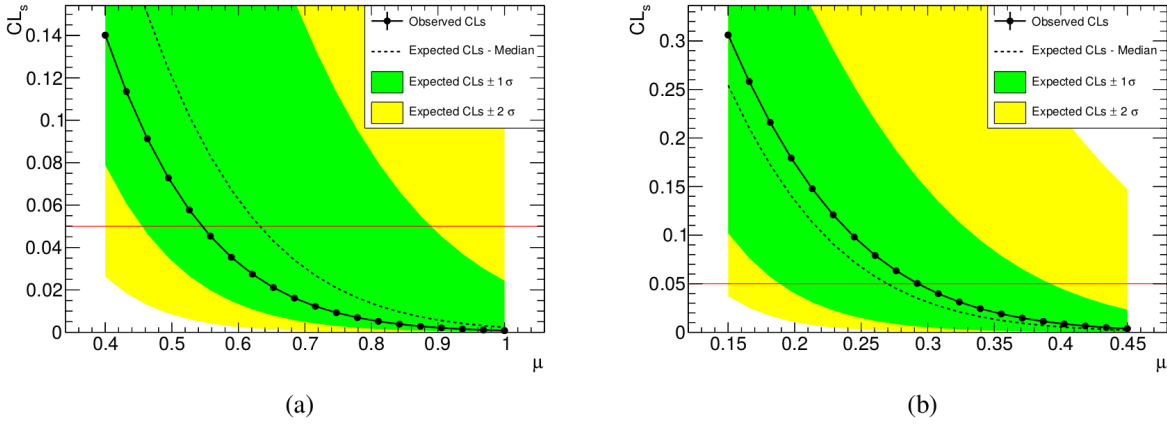
$$\lambda(\mu) = \frac{L(\mu, \hat{\theta})}{L(\hat{\mu}, \hat{\theta})}$$
$$q_\mu = \begin{cases} -2 \ln \lambda(\mu) & \hat{\mu} \leq \mu \\ 0 & \hat{\mu} > \mu \end{cases}$$

სადაც $\hat{\mu}$ და $\hat{\theta}$ არის პარამეტრების ის მნიშვნელობები როცა მართლმსგავსების ფუნქცია იღებს მაქსიმალურ მნიშვნელობას (შემდეგი შეზღუდვით $0 \leq \hat{\mu} \leq \mu$) და $\hat{\theta}$ არის შეშფოთების პარამეტრების ის მნიშვნელობები, როცა მართლმსგავსების ფუნქცია იღებს მაქსიმალურ მნიშვნელობას μ -ს მოცემული მნიშვნელობისათვის. ეს სატესტო სტატისტიკა გამოიყენება დამზერილი მონაცემების (შემთხვევების) მხოლოდ ფონური პროცესების არსებობის (ანუ $\mu = 0$ -სთვის) ჰიპოთეზასთან თავსებადობის გასაზომად და μ -ს შესახებ გარკვეული სტატისტიკური დასკვნების გასაკეთებლად, ისეთი როგორიცაა ზედა ზღვრები (საზღვრები) CL_s მეთოდის [95-97] გამოყენებით, რომელიც განხორციელებულია RootStats / RootFit პროგრამულ პაკეტში [94, 98]. დადგენილი ზედა ზღვარის საიმედოობის ხარისხი განისაზღვრება შემდეგნაირად:

$$CL_s = \frac{1 - \int_0^{q_\mu^{obs}} f(q_\mu|\mu) dq_\mu}{1 - \int_0^{q_\mu^{obs}} f(q_\mu|0) dq_\mu}$$

$$CL = 1 - CL_s$$

სადაც $f(q_\mu|\mu)$ არის q_μ -ის ალბათობის სიმკვრივის ფუნქცია და q_μ^{obs} არის ექსპერიმენტული მონაცემებიდან დამზერილი სატესტო სტატისტიკის მნიშვნელობა μ -ს მოცემული მნიშვნელობისათვის. μ -სთვის მოსალოდნელი ზედა ზღვარი არის ის, რომელიც მიიღება მაშინ, როცა ექსპერიმენტული მონაცემების შემთხვევები ძალიან კარგად აღიწერება მოსალოდნელი ფონებით, ამრიგად იგი შეიძლება გამოთვლილ იქნას q_μ^{obs} -ის შეცვლით q_μ -ის შესაბამისი მედიანის მნიშვნელობით $\mu=0$ დაშვებით. საიმედოობის ხარისხი გამოთვლილ იქნა $\lambda(\mu)$ -ის [99] ასიმპტოტური თვისებების გამოყენებით რომელიც განხორციელებულია RootStats-ში [94]. ნახ. 26-ზე ნაჩვენებია CL_s -ის დამოკიდებულება μ -ზე მიღებული როგორც საბოლოო შერჩევის კრიტერიუმების დადების შედეგად მიღებული მონაცემების საშუალებით, ისე დისკრიმინანტულ ცვლადზე ჩამოჭრის კრიტერიუმის დადების შედეგად მიღებული მონაცემებით. მიღებული დამზერილი ზღვარი თანხვედრაშია მოსალოდნელ ზღვართან $\pm 1\sigma$ ფარგლებში.



ნახაზი 26. CL_s -ის დამოკიდებულება μ -ზე, რომელზეც უნდა გამრავლდეს n_s (სიგნალის შემთხვევების რიცხვი ნორმირებული ფარდობითი დაშლის ალბათობაზე $Br(t \rightarrow qZ)=1\%$), მიღებული შემდეგი შედეგების გამოყენებით a) საბოლოო შერჩევის კრიტერიუმების გამოყენებით და b) დისკრიმინანტულ ცვლადზე ჩამოჭრის კრიტერიუმის გამოყენებით.

სიგნალის მოსალოდნელ შემთხვევათა რიცხვზე ზღვრები გარდაქმნილი იყო შესაბამისი ფარდობითი დაშლის ალბათობების ზედა ზღვრებად μ კვეთისათვის წამყვანი რიგის შემდეგი რიგის შესწორებებით გამოთვლილი

მნიშვნელობის $\sigma_{t\bar{t}} = 253^{+13}_{-15}$ pb [32] გამოყენებით და შეზღუდვის შემდეგი პირობის დაღებით: $BR(t \rightarrow bW) = 1 - BR(t \rightarrow qZ)$:

$$n_s = 2 \times \int L \cdot dt \times \sigma_{t\bar{t}} \times BR(t \rightarrow qZ) \times (1 - BR(t \rightarrow qZ)) \times \varepsilon \times BR(Z \rightarrow ll) \times BR(W \rightarrow jj)$$

ცხრილ 10-ში წარმოდგენილია დამზერილი (დაკვირვებული) და მოსალოდნელი საზღვრები $\pm 1\sigma$ ფარგლებში.

| | observed | -1σ | expected | $+1\sigma$ |
|--|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| $BR(t \rightarrow qZ)$ after the final selection | 5.4×10^{-3} | 4.5×10^{-3} | 6.3×10^{-3} | 8.9×10^{-3} |
| $BR(t \rightarrow qZ)$ after the cut on L_R | 2.9×10^{-3} | 1.9×10^{-3} | 2.7×10^{-3} | 3.9×10^{-3} |

ცხრილი 10. საბოლოო შერჩევის და მრავალცვლადიანი დისკრიმინანტული ანალიზის შედეგად არომატის ცვლილებით ნეიტრალური დენებით მიმდინარე ტოპ კვარკის $t \rightarrow qZ$ დაშლის ფარდობითი ალბათობის მოსალოდნელი და დაკვირვებული ზედა ზღვრები 95% საიმედოობის ხარისხით. გრეთვე მოყვანილია მოსალოდნელი ზედა ზღვარის მნიშვნელობა $\pm 1\sigma$ ფარგლებში. მოსალოდნელი და დაკვირვებული ზედა ზღვრები შეიცავს სტატისტიკური და სისტემატიური განუზღვრელობების (ცდომილებების) წვლილს.

10. დასკვნები

არომატის შემცვლელი ნეიტრალური დენებით მიმდინარე ტოპ კვარკის იშვიათი დაშლა $t \rightarrow qZ$ შევისწავლეთ ექსპერიმენტული მონაცემების ანალიზის შედეგად, რომელიც დაგროვილი იქნა ATLAS ექსპერიმენტში 2012 წლის განმავლობაში მასათა ცენტრის სისტემაში 8 ტევენერგიაზე პროტონ-პროტონული ურთიერთქმედებების შედეგად და რომელიც შეესაბამება 20.3 ფბ^{-1} ინტეგრალურ ნათებას. $t \rightarrow qZ$ დაშლის ძიება ჩვენ განვიხილეთ ტოპ-ანტიტოპ კვარკების ($t\bar{t}$) წყვილური დაბადების ტოპოლოგიაში, როდესაც ერთი ტოპ კვარკი იშლება არომატის შემცვლელი ნეიტრალური დენებით მიმდინარე პროცესის შესაბამისად, ხოლო მეორე ტოპ კვარკი იშლება სტანდარტული მოდელის პროცესის შესაბამისად. $t\bar{t} \rightarrow bWqZ$ შემთხვევები შესწავლილ იქნა დილეპტონურ არხში: ყალიბრული Z ბოზონი იშლება ლეპტონებად, ხოლო W ბოზონი იშლება კვარკებად. განხილული ტოპ კვარკის აშნდ პროცესით მიმდინარე იშვიათი დაშლის არანაირი ცხადი ნიშანი არ იქნა დამზერილი. 95% დამაჯერებლობის ხარისხით გამოთვლილი ინქა დამზერილი (მოსალოდნელი) ზედა ზღვარი $t \rightarrow qZ$ დაშლის ფარდობითი ალბათობისათვის $Br(t \rightarrow qZ) < 2.9 \times 10^{-3}$ (2.7×10^{-3}).

ლიტერატურა

- [1] ATLAS Collaboration, CDF Collaboration, CMS Collaboration, D0 Collaboration Collaboration, arXiv:1403.4427 [hep-ex].
- [2] S. Glashow, J. Iliopoulos, and L. Maiani, Phys.Rev. D2 (1970) 1285-1292.
- [3] J. A. Aguilar-Saavedra and B. M. Nobre, Phys. Lett. B553 (2003) 251-260.
- [4] F. del Aguila, J. A. Aguilar-Saavedra, and R. Miquel, Phys. Rev. Lett. 82 (1999) 1628-1631.
- [5] J. A. Aguilar-Saavedra, Phys. Rev. D67 (2003) 035003. Erratum-ibid. D 69 (2004) 099901.
- [6] T. P. Cheng and M. Sher, Phys. Rev. D35 (1987) 3484.
- [7] B. Grzadkowski, J. F. Gunion, and P. Krawczyk, Phys. Lett. B268 (1991) 106-111.
- [8] M. E. Luke and M. J. Savage, Phys. Lett. B307 (1993) 387-393.
- [9] D. Atwood, L. Reina, and A. Soni, Phys. Rev. D53 (1996) 1199-1201.
- [10] D. Atwood, L. Reina, and A. Soni, Phys. Rev. D55 (1997) 3156-3176.
- [11] S. Bejar, J. Guasch, and J. Sola, Nucl. Phys. B600 (2001) 21-38.
- [12] C. S. Li, R. J. Oakes, and J. M. Yang, Phys. Rev. D49 (1994) 293-298. Erratum-ibid.D56:3156,1997.
- [13] G. M. de Divitiis, R. Petronzio, and L. Silvestrini, Nucl. Phys. B504 (1997) 45-60.
- [14] J. L. Lopez, D. V. Nanopoulos, and R. Rangarajan, Phys. Rev. D56 (1997) 3100-3106.
- [15] J. Guasch and J. Sola, Nucl. Phys. B562 (1999) 3-28.
- [16] D. Delepine and S. Khalil, Phys. Lett. B599 (2004) 62-74.
- [17] J. J. Liu, C. S. Li, L. L. Yang, and L. G. Jin, Phys. Lett. B599 (2004) 92-101.
- [18] J. J. Cao et al., Phys. Rev. D75 (2007) 075021.
- [19] J. M. Yang, B.-L. Young, and X. Zhang, Phys. Rev. D58 (1998) 055001.
- [20] G. Lu, F. Yin, X. Wang, and L. Wan, Phys. Rev. D68 (2003) 015002.
- [21] G. P. K. Agashe and A. Soni, Phys. Rev. D 71 (2005) 016002, arXiv:hep-ph/0408134.
- [22] G. P. K. Agashe and A. Soni, Phys. Rev. D 75 (2007) 015002, arXiv:hep-ph/0606293.
- [23] J. A. Aguilar-Saavedra, Acta Phys. Polon. B35 (2004) 2695-2710.
- [24] ALEPH Collaboration, A. Heister et al., Phys. Lett. B543 (2002) 173-182.
- [25] DELPHI Collaboration, J. Abdallah et al., Phys. Lett. B590 (2004) 21-34.
- [26] OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al., Phys. Lett. B521 (2001) 181-194.

- [27] L3 Collaboration, P. Achard et al., Phys. Lett. B549 (2002) 290-300.
- [28] The LEP Exotica WG, LEP Exotica WG 2001-01.
- [29] ZEUS Collaboration, H. Abramowicz et al., Phys.Lett. B708 (2012) 27-36, arXiv:1111.3901 [hep-ex].
- [30] D0 Collaboration, A. V. M. et al., Phys. Lett. B 701 (2011) 313 - 320.
- [31] CMS Collaboration Collaboration, S. Chatrchyan et al., Phys.Rev.Lett. 112 (2014) 171802, arXiv:1312.4194 [hep-ex].
- [32] ATLAS Collaboration, Search for charged Higgs bosons decaying via $H^\pm \rightarrow \tau^\pm \nu$ in fully hadronic final states using pp collision data at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector, arXiv:1412.6663v2 [hep-ex] 23 Dec 2014, CERN-PH-EP-2014-274
- [33] M. Cacciari, M. Czakon, M. Mangano, A. Mitov, and P. Nason, Phys.Lett. B710 (2012) 612-622, arXiv:1111.5869 [hep-ph].
- [34] P. Baernreuther, M. Czakon, and A. Mitov, Phys.Rev.Lett. 109 (2012) 132001, arXiv:1204.5201 [hep-ph].
- [35] M. Czakon and A. Mitov, JHEP 1212 (2012) 054, arXiv:1207.0236 [hep-ph].
- [36] M. Czakon and A. Mitov, JHEP 1301 (2013) 080, arXiv:1210.6832 [hep-ph].
- [37] M. Czakon, P. Fiedler, and A. Mitov, arXiv:1303.6254 [hep-ph].
- [38] M. Czakon and A. Mitov, arXiv:1112.5675 [hep-ph].
- [39] M. Botje, J. Butterworth, A. Cooper-Sarkar, A. de Roeck, J. Feltesse, et al., arXiv:1101.0538 [hep-ph].
- [40] A. Martin, W. Stirling, R. Thorne, and G. Watt, Eur.Phys.J. C63 (2009) 189-285, arXiv:0901.0002 [hep-ph]. [
- [41] A. Martin, W. Stirling, R. Thorne, and G. Watt, Eur.Phys.J. C64 (2009) 653-680, arXiv:0905.3531 [hep-ph].
- [42] H.-L. Lai, M. Guzzi, J. Huston, Z. Li, P. M. Nadolsky, et al., Phys.Rev. D82 (2010) 074024, arXiv:1007.2241 [hep-ph].
- [43] J. Gao, M. Guzzi, J. Huston, H.-L. Lai, Z. Li, et al., arXiv:1302.6246 [hep-ph].
- [44] R. D. Ball, V. Bertone, S. Carrazza, C. S. Deans, L. Del Debbio, et al., Nucl.Phys. B867 (2013) 244-289, arXiv:1207.1303 [hep-ph].
- [45] M. Aliev, H. Lacker, U. Langenfeld, S. Moch, P. Uwer, et al., Comput.Phys.Commun. 182 (2011) 1034-1046, arXiv:1007.1327 [hep-ph].
- [46] ATLAS Collaboration, The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider, JINST 3 (2008) S08003.
- [47] J. A. Aguilar-Saavedra, "Protos - PROgram for TOp Simulations."
<https://jaguilar.web.cern.ch/jaguilar/protos/> .

- [48] Tech. Rep. ATL-COM-PHYS-2013-1024, CERN, Geneva, Jul, 2013.
- [49] J. Aguilar-Saavedra, Nucl.Phys. B812 (2009) 181-204, arXiv:0811.3842 [hep-ph].
- [50] J. Pumplin, D. Stump, J. Huston, H. Lai, P. M. Nadolsky, et al., JHEP 0207 (2002) 012, arXiv:hep-ph/0201195 [hep-ph].
- [51] T. Sjostrand, S. Mrenna, and P. Z. Skands, JHEP 0605 (2006) 026, arXiv:hep-ph/0603175 [hep-ph].
- [52] P. Z. Skands, Phys.Rev. D82 (2010) 074018, arXiv:1005.3457 [hep-ph].
- [53] K. Nakamura et al., J. Phys. G 37 no. 7A, (2010) 075021.
- [54] GEANT4 Collaboration, S. Agostinelli et al., Nucl.Instrum.Meth. A506 (2003) 250-303.
- [55] ATLAS Collaboration, Eur. Phys. J. C 70 (2010) 823.
- [56] M. L. Mangano et al., ALPGEN, a generator for hard multiparton processes in hadronic collisions, JHEP 07 (2003) 001, arXiv:0206293 [hep-ph].
- [57] P. M. Nadolsky et al., Implications of CTEQ global analysis for collider observables, Phys. Rev. D 78 (2008) 013004, arXiv:0802.0007 [hep-ph].
- [58] T. Sjostrand, S. Mrenna, and P. Skands, Pythia 6.4 Physics and Manual, JHEP 05 (2006) 026, arXiv:0603175v2 [hep-ph].
- [59] M. L. Mangano et al., Multijet matrix elements and shower evolution in hadronic collisions: $Wb\bar{b} + n\text{jets}$ as a case study, Nucl. Phys. B 632 (2002) 343, arXiv:0108069 [hep-ph].
- [60] K. Melnikov and F. Petriello, Electroweak gauge boson production at hadron colliders through $O(\alpha_s^2)$, Phys. Rev. D 74 (2006) 114017, arXiv:0609070 [hep-ph].
- [61] S. Frixione and B. R. Webber, JHEP 0206 (2002) 029, arXiv:hep-ph/0204244 [hep-ph].
- [62] G. Corcella, I. G. Knowles, G. Marchesini, S. Moretti, K. Odagiri, P. Richardson, M. H. Seymour, and B. R. Webber, Tech. Rep. hep-ph/0210213. CAVENDISH-HEP-2002-17. CERN-TH-2002-270. DAMTP-2002-124. IPPP-2002-58, CERN, Geneva, Oct, 2002.
- [63] T. Gleisberg, S. Hoeche, F. Krauss, M. Schonherr, S. Schumann, et al., JHEP 0902 (2009) 007, arXiv:0811.4622 [hep-ph].
- [64] J. Alwall, M. Herquet, F. Maltoni, O. Mattelaer, and T. Stelzer, Tech. Rep. arXiv:1106.0522, Jun, 2011.
- [65] P. Nason, A new method for combining NLO QCD with shower Monte Carlo algorithms, JHEP 11 (2004) 040.
- [66] S. Frixione, P. Nason, and C. Oleari JHEP 11 (2007) 070, arXiv:0709.2092 [hep-ph].
- [67] S. Alioli, P. Nason, C. Oleari, and E. Re JHEP 06 (2010) 040, arXiv:1002.2581 [hep-ph].
- [68] Sjostrand, Torbjorn et al., A Brief Introduction to PYTHIA 8.1, Comput.Phys.Commun. 178 (2008) 852-867 arXiv:0710.3820 [hep-ph]
- [69] <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasProtected/TopD3PDCorrections>
We are using tag TopD3PDCorrections-12-01-16

- [70] B. Acharya et al., Tech. Rep. ATL-COM-PHYS-2013-1016, CERN, Geneva, Jul, 2013.
- [71] B. Acharya et al., Tech. Rep. ATL-COM-PHYS-2013-088, CERN, Geneva, Jan, 2013.
- [72] M. Cacciari, G. P. Salam, and G. Soyez, JHEP 0804 (2008) 063, arXiv:0802.1189 [hep-ph].
- [73] M. Cacciari and G. P. Salam, Phys.Lett. B641 (2006) 57-61, arXiv:hep-ph/0512210 [hep-ph].
- [74] M. Cacciari, G. P. Salam, and G. Soyez, Eur.Phys.J. C72 (2012) 1896, arXiv:1111.6097 [hep-ph].
- [75] T. Barillari et al., Tech. Rep. ATL-LARG-PUB-2009-001-2. ATL-COM-LARG-2008-006. ATL-LARG-PUB-2009-001, CERN, Geneva, Jun, 2008.
- [76] ATLAS Collaboration Collaboration, G. Aad et al., Eur.Phys.J. C73 (2013) 2304, arXiv:1112.6426 [hep-ex].
- [77] ATLAS Collaboration, Tech. Rep. ATLAS-CONF-2011-102, CERN, Geneva, Jul, 2011.
- [78] ATLAS Collaboration, Tech. Rep. ATLAS-CONF-2010-038, CERN, Geneva, Jul, 2010.
- [79] G. Aad et al., Tech. Rep. ATL-COM-PHYS-2013-449, CERN, Geneva, Apr, 2013.
- [80] ATLAS Collaboration, Luminosity determination in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV using the ATLAS detector at the LHC, Eur. Phys. J. C 71 (2011) 1630, arXiv:1101.2185 [hep-ex].
- [81] Tech. Rep. ATLAS-CONF-2013-004, CERN, Geneva, Jan, 2013.
- [82] ATLAS Collaboration, Estimation of the W+Jets Background for Top Quark Re-Discovery in the Single Lepton+Jets Channel, ATL-COM-PHYS-2010-834 (2010).
- [83] J. Campbell and R. Ellis, An update on vector boson pair production at hadron colliders, Phys. Rev. D 60 (1999) 113006, arXiv:9905386 [hep-ph].
- [84] J. M. Campbell and R. K. Ellis, JHEP 1207 (2012) 052, arXiv:1204.5678 [hep-ph].
- [85] M. Garzelli, A. Kardos, C. Papadopoulos, and Z. Trocsanyi, JHEP 1211 (2012) 056, arXiv:1208.2665 [hep-ph].
- [86] <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/viewauth/AtlasProtected/TTplusV>
- [87] Tech. Rep. ATL-COM-PHYS-2014-764, CERN, Geneva, Jul, 2014.
- [88] <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/viewauth/AtlasProtected/TopFakesPreliminaryFull8TeVFromDileptons>
- [89] <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/viewauth/AtlasProtected/JVFUncertaintyTool>
We are using tag JVFUncertaintyTool-00-00-04
- [90] <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/viewauth/AtlasProtected/JetUncertainties>
We are using tag JetUncertainties-00-08-07
- [91] Tech. Rep. ATL-COM-PHYS-2011-240, CERN, Geneva, Mar, 2011.
- [92] <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasProtected/JetEnergyResolutionProvider>
We are using tag JetResolution-02-00-02
- [93] <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasProtected/BTaggingCalibrationDataInterface>
We are using tag CalibrationDataInterface-00-03-06

- [94] W. Verkerke and D. Kirkby, RooFit Users Manual v2.91,
<http://rootfit.sourceforge.net> .
- [95] T. Junk, Confidence level computation for combining searches with small statistics, Nucl. Instr. Meth. A 434 (1999) 435, arXiv:9902006 [hep-ex].
- [96] A. L. Read, Presentation of search results: the CL_s technique, J. Phys. G 28 (2002) 2693.
- [97] G. Cowan, K. Cranmer, E. Gross, and O. Vitells, Asymptotic formulae for likelihood-based tests of new physics, Eur. Phys. J. C 71 (2011) 1554, arXiv:1007.1727 [physics.data-an].
- [98] W. Verkerke and D. Kirkby, The RooFit toolkit for data modeling, arXiv:0306116 [physics].
- [99] Cowan, Glen et al., Asymptotic formulae for likelihood-based tests of new physics, Eur.Phys.J. C71 (2011) 1554, Erratum-ibid. C73 (2013) 2501 arXiv:1007.1727
- [100] A. Denner, S. Dittmaier, T. Kasprzik and A. Muck, Electroweak corrections to dilepton + jet production at hadron colliders, JHEP 06 (2011) 069 [arXiv:1103.0914]