

Spis treści

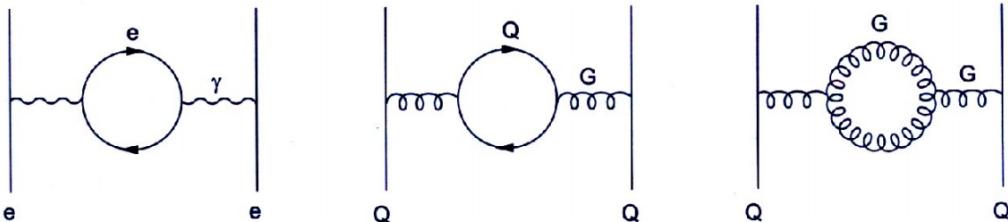
1	Fizyka dżetów cząstek	2
1.1	Chromodynamika kwantowa	2
1.2	Plazma kwarkowo-gluonowa	3
1.3	Dżety	4
1.4	Dżety b	4
1.5	Eksperyment ALICE	5
2	Uczenie maszynowe	9
2.1	Wzmacniane drzewa decyzyjne	9
2.2	Sieci neuronowe	10
2.3	Dyskusja użycia dwóch algorytmów	15
3	Dane	16
4	Analiza	19
4.1	Dobór metryki	19
4.2	Wyniki dla poszczególnych modeli	22
4.3	Korelacje predykcji modeli	26
4.4	Analiza istotności cech	27
Dodatki		36
Dodatek A Metryki		36
Dodatek B Skróty i oznaczenia		37

21 1 Fizyka dżetów cząstek

22 1.1 Chromodynamika kwantowa

23 Chromodynamika kwantowa (ang. *Quantum Chromodynamics – QCD*) to kwantowa teoria
24 pola opisująca oddziaływanie silne [1]. Wprowadza ona dla kwarków nową liczbę kwantową
25 nazywaną kolorem lub ładunkiem kolorowym, który jest odpowiednikiem ładunku elektrycznego
26 w elektrodynamice kwantowej (ang. *Quantum Electrodynamics – QED*), ale w przeciwnieństwie
27 do niego może przyjmować 3 różne wartości (i trzy antywartości dla antykwarków). Elementarne
28 oddziaływanie w obu teoriach przenoszone są przez bezmasowe bozony pośredniczące: w *QED*
29 jest to elektrycznie obojętny foton a w *QCD* gluony, które występują w 8 odmianach i są
30 kolorowo naładowane, przez co możliwe jest oddziaływanie zachodzące między dwoma gluonami.
31 Kwarki i gluony zbiorczo nazywane są partonami.

32 Próżnia, w rozumieniu klasycznym będąca zupełnie pusta, w teoriach kwantowych wypeł-
33 niona jest pojawiającymi i znikającymi wirtualnymi cząstkami. Cząstki te ekranują ładunek
34 próbny umieszczony w kwantowej próżni, wywołując zjawisko polaryzacji próżni (analogiczne
35 do polaryzacji dielektryków), które efektywnie zmniejsza pole wytwarzane przez ten ładunek.
36 Siła tego efektu zależy od liczby ekranujących cząstek, czyli pośrednio od skali odległości. Skala
37 ta wyznaczona jest przez długości fali próbującej cząstki, zatem także jej energię (im więk-
38 sza energia, tym mniejsza długość fali i mniejsza ilość ekranujących cząstek obserwowanych
39 w pobliżu rzeczywistego ładunku, zatem tym słabszy efekt ekranowania i większy efektywny
40 ładunek). Prowadzi to do zależnej od energii stałej sprzężenia α , którą nazywamy efektywną
41 lub biegącą stałą sprzężenia (ang. *running coupling constant*).



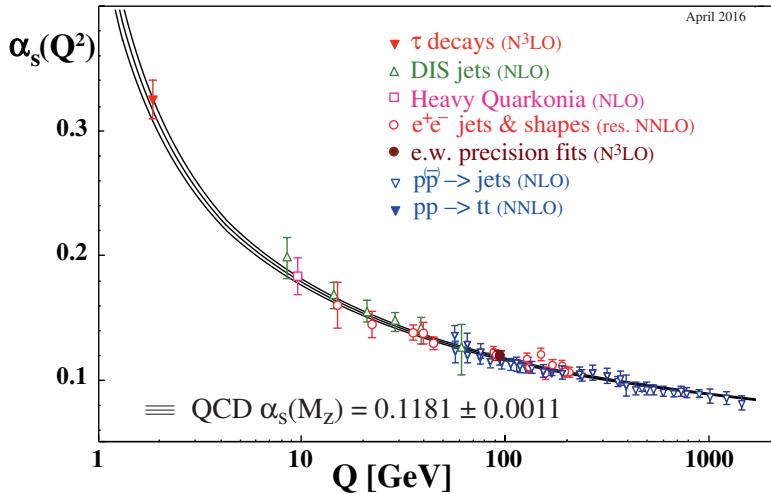
Rysunek 1: Diagramy Feynmana opisujące polaryzację próżni w *QED* (lewy) i *QCD* (środkowy i prawy). Rysunki lewy i środkowy są swoimi odpowiednikami w tych dwóch teoriach, natomiast prawy, w którym oddziałują jedynie bozony pośredniczące nie ma swojego odpowiednika w *QED*. Źródło: [1]

42 Zarówno pary elektron-pozyton jak i kwark-antykwark działają ekranującą kolejno ładu-
43 nek elektryczny i kolorowy. Jednak jak zostało to już wspomniane, w przypadku *QCD* możliwe
44 jest także samooddziałanie gluonów, przez co dopuszczalne są diagramy Feynmana jak ten
45 przedstawiony na Rys. 1 po prawej. Pętle gluonowe działają anty-ekranującą – zwiększą efek-
46 tywną wartość silnej stałej sprzężenia, ponadto jest to efekt dominujący nad przyczynkiem od
47 par kwark-antykwark, co sprawia że zależność biegącej stałej sprzężenia w *QCD* jest odwrotna
48 i dużo silniejsza niż w przypadku *QED*. Wartość α_{em} maleje od wartości $\frac{1}{128}$ przy energiach ok.
49 90 GeV do $\frac{1}{137}$ przy energii bliskiej zeru, co oznacza zmianę o kilka procent. Tymczasem α_S
50 rośnie w miarę zbliżania się do niskich energii od wartości $\alpha_S \lesssim 0.1$ dla $E \gtrsim 100$ GeV do $\alpha_S > 1$
51 dla energii poniżej 200 MeV (por. Rys. 2). Prowadzi to do dwóch zjawisk charakterystycznych
52 dla chromodynamiki kwantowej:

- 53 • asymptotyczna swoboda (ang. *asymptotic freedom*) [2], [3] – dla wysokich energii ($\gtrsim 100$
54 GeV) silna stała sprzężenia jest mała (w tym zakresie energii możliwe jest stosowanie

55 rachunku perturbacyjnego) i kwarki wewnątrz hadronów zachowują się jak cząstki quasi-
56 swobodne.

- 57 • uwięzienie koloru (ang. *colour confinement*) – przy zwiększaniu odległości między par-
58 tonami siła oddziaływanego rośnie do nieskończoności, dlatego nigdy nie obserwuje się
59 swobodnych cząstek obdarzonych ładunkiem kolorowym a jedynie związane w kolorowo
60 obojętne hadrony.



Rysunek 2: Zależność silnej stałej sprzężenia od przekazu czteropędu. Źródło: [4].

61 1.2 Plazma kwarkowo-gluonowa

62 Odkrycie asymptotycznej swobody pozwoliło na sprawdzenie przewidywań *QCD* w warun-
63 kach bardzo wysokich temperatur oraz gęstości. Dla wystarczająco dużych gęstości hadrony
64 zaczynają na siebie zatoczyć, prowadząc do stworzenia stanu, w którym poszczególne hadrony
65 przestają być odróżnialne [5]. Zasugerowane zostało także istnienie przejścia fazowego w tem-
66 peraturze porównywalnej z masą pionów oraz w temperaturze niższej, ale przy odpowiednio
67 dużych gęstościach [6]. Stan materii powstały po osiągnięciu, któregoś z tych warunków nazy-
68 wany jest plazmą kwarkowo-gluonową (ang. *quark-gluon plasma – QGP*). Obecnie przewiduje
69 się, że materia w takim stanie istniała w pierwszych ułamkach sekund po Wielkim Wybuchu
70 [7] oraz, że może się znajdować w jądrach gwiazd neutronowych [8].

71 Obecnie aby uzyskać dostęp do materii w stanie plazmy kwarkowo-gluonowej potrzebne są
72 wysokoenergetyczne zderzenia cząstek. Powszechnie mówi się o niej w kontekście zderzeń cięż-
73 kich jonów, chociaż istnieją także prace doszukujące się obecności *QGP* w mniejszych systemach
74 np. w zderzeniach proton-proton [9], [10].

75 Cechą charakterystyczną *QGP* jest obecność wolnych kwarków i gluonów. Ze względu na
76 uwięzienie koloru w każdym innym stanie materii są one zawsze związane i tworzą hadrony.
77 Wolne kwarki i gluony powstające w zderzeniach muszą zatem przejść przez proces hadroni-
78 zacji, w którym rekombinują one ze spontanicznie wytworzonymi nowymi partonami, tworząc
79 hadrony. W wyniku tego procesu, z każdego partonu obecnego w początkowym etapie zderzenia
80 może powstać wiele cząstek poruszających się podobnym kierunkiem, tworząc stożek z wierzchoł-
81 kiem blisko punktu interakcji wiązek. Taki stożek skolimowanych cząstek nazywany jest dżetem
82 cząstek.

83 1.3 Dżety

84 Przedstawiona powyżej definicja dżetu nie jest precyzyjna z punktu widzenia pracy ekspery-
85 mentalnej. W detektorze obserwuje się tylko cząstki w stanie końcowym, nie jest zatem możliwe
86 przyporządkowanie cząstki według jej pochodzenia. W związku z tym, konieczne jest użycie al-
87 gorytmu klasteryzującego, dostającego na wejściu tylko obserwowalne eksperymentalnie cząstki.
88 To jakie dżety zostaną zaobserwowane w danym zdarzeniu zależy od użytego algorytmu. Ozna-
89 cza to, że precyzyjną definicję dżetu stanowi algorytm klasteryzujący wraz z zestawem para-
90 metrów. Obecnie najpowszechniej stosowanym algorytmem jest algorytm *anti-kt* [11].

91 Eksperimentalne ograniczenia związane z obserwacją tylko końcowego stanu oddziaływań
92 nie występują w analizie danych z symulacji Monte Carlo (MC), gdzie ma się dostęp do peł-
93 nej informacji na temat historii każdej cząstki. Nie należy jednak używać jej do klasteryzacji
94 dżetów, gdyż utracona została cecha odpowiedniości między obiektami nazywanymi dżetami
95 w symulacji i w eksperymencie, która to cecha jest niewątpliwie jedną z podstawowych wyma-
96 gań stawianych przed dobrą symulacją. Właściwym podejściem jest rekonstrukcja dżetów przy
97 pomocy takiego samego algorytmu jak w przypadku danych eksperimentalnych.

98 Dżety wykorzystuje się w badaniach plazmy kwarkowo-gluonowej. Dają one pośredni wgląd
99 we właściwości *QGP* na podstawie wpływu jaki wywiera na oddziałujące z nią partony. Przy-
100 kładową obserwabłą mierzoną w zderzeniach ciężkich jonów jest czynnik modyfikacji jądrowej
101 R_{AA} (ang. *nuclear modification factor*), który jest miarą strat energii przez parton przecho-
102 dzający przez medium. Jest to stosunek pędowych rozkładów dżetów cząstek zmierzonych w
103 zderzeniach ciężkich jąder oraz w zderzeniach pp (przemnożonych przez liczbę binarnych zde-
104 rzeń nukleon-nukleon przewidywanych przez model teoretyczny). Odchylenia od wartości 1 dla
105 wysokich p_T są oznaką modyfikacji pędów dżetów przez gęste medium (w stosunku do zderzeń
106 pp gdzie *QGP* nie powstaje), jest to tzw. tłumienie dżetów (ang. *jet quenching*). Rezultaty
107 pomiarów R_{AA} w CMS: [12] i ALICE: [13].

108 Oprócz globalnego wpływu medium na dżety, analizuje się także różnice między dżetami
109 pochodząymi z gluonów oraz kwarków o różnych zapachach (ang. *flavours*). Modele teore-
110 tyczne przewidują między innymi większe straty energii w wyniku interakcji z *QGP* dla dżetów
111 gluonowych niż kwarkowych [14] oraz zależność strat energii od masy partonu [15] – w tym
112 przypadku precyzyjne pomiary rozróżniające typy dżetów pozwalają lepiej zrozumieć mecha-
113 nizm odpowiadający za straty energii przez partony. Zagadnienie rozpoznania z jakiego rodzaju
114 partonu powstał dany dżet, nazywane jest identyfikacją lub tagowaniem dżetu. Ważną rolę
115 w studiowaniu tego problemu odgrywają symulacje MC, które pozwalają określić wydajności
116 poszczególnych technik tagowania dżetów na podstawie znajomości kanału produkcji każdej
117 symulowanej cząstki.

118 1.4 Dżety *b*

119 1.4.1 Właściwości

120 Poza badaniami właściwości *QGP*, szczególne znaczenie ma identyfikacja dżetów pochodzących
121 z ciężkich kwarków: *b* i *c*. Są one ważnym elementem w poszukiwaniu łamania symetrii *CP* w
122 rozpadach hadronów B i D oraz innych sygnatur tzw. *Nowej Fizyki* wykraczającej poza ramy
123 Modelu Standardowego. Kwarki *piękne* pojawiają się także często w kanałach rozpadu cząstek
124 takich jak bozon Higgsa i kwark *t*.

125 Identyfikacja dżetów *b* jest sporym wyzwaniem ze względu na zdecydowanie częściej wy-
126 stępujące dżety lekkie, tj. powstałe z hadronizacji kwarków *u,d,s* lub gluonów. Rozpoznawanie
127 dżetów *b* bazuje na charakterystycznych właściwościach hadronów zawierających kwark piękny:
128 relatywnie długim czasie życia oraz (w mniejszym stopniu) na ich pół-leptonowym rozpadach

129 o względnej częstotliwości rozpadu w tym kanale (ang. *branching ratio*) na poziomie 10%.

130 1.4.2 Przegląd algorytmów używanych do identyfikacji dżetów b na LHC

131 Używane w eksperymentach na LHC: ATLAS, CMS i ALICE algorytmy można podzielić na
132 trzy kategorie: wykorzystujące wtórne wierzchołki, informację o odległości najbliższego zbliżenia
133 (parametrze zderzenia) częstek tworzących dżet (ang. *Distance of Closest Approach – DCA*,
134 *Impact Parameter – IP*) oraz identyfikujące produkty półleptonowych rozpadów pięknych lub
135 powabnych hadronów. Dokładne opisy omawianych algorytmów można znaleźć w: [16], [17]
136 (ATLAS), [18], [19] (CMS), [20], [21] (ALICE).

137 Najprostszym algorytmem jest dyskryminacja na podstawie istotności statystycznej (wynik
138 pomiaru podzielony przez jego niepewność) odległości wtórnego wierzchołka od wierzchołka
139 pierwotnego L . Jest to metoda wykorzystywana w każdym z trzech wymienionych eksperymentów (por. ATLAS: algorytm SV0, CMS: algorytm SSV, ALICE). Może być ona rozszerzona
140 poprzez użycie dodatkowych zmiennych opisujących wtórny wierzchołek jak na przykład jego
141 masa, ułamek niesionej przez niego całkowitej energii dżetu (por. ATLAS: SV1) lub użycie
142 "pseudowierzchołków" (kombinacji dwóch częstek o dużych *DCA*) w celu poprawienia wydaj-
143 ności detekcji o przypadki, w których wtórny wierzchołek nie został zrekonstruowany (por.
144 CMS: CSV).

145 Algorytmy wykorzystujące informację o poszczególnych częstках mogą zasadniczo bazować
146 albo na sumie logarytmów prawdopodobieństw pochodzenia każdej części z pierwotnego wierz-
147 chołka (por. ATLAS: IP3D, CMS: JP) lub tym samym prawdopodobieństwie ale dla wybranej,
148 np. drugiej lub trzeciej części na liście posortowanej według malejącego *IP* (por. ALICE i
149 CMS: TC). Bardziej złożonym podejściem, w którym części nie są traktowane jako niezależne,
150 jest użycie rekurencyjnych sieci neuronowych (por. ATLAS: RNNIP).

151 Do wykorzystania półleptonowego kanału rozpadu ciężkich hadronów do identyfikacji dżetów
152 b w eksperymentach ATLAS (SMT) i CMS (SE, SM) użyto wzmacnianych drzew decyzyjnych
153 trenowanych na kilku ręcznie zdefiniowanych w tym celu zmiennych takich jak pęd leptonu
154 transwersalny względem osi dżetu.

155 Znaczącą poprawę zdolności predykcyjnej można uzyskać łącząc kilka różnych modeli. Al-
156 gorytm łączący może pobierać na wejściu albo tylko predykcje klasyfikatorów niższego poziomu
157 (CMS: cMVAv2) lub dodatkowo także ich zmienne wejściowe (ATLAS: MV2, DL1). Do scalania
158 używane są zwykle wzmacniane drzewa decyzyjne lub sieci neuronowe.

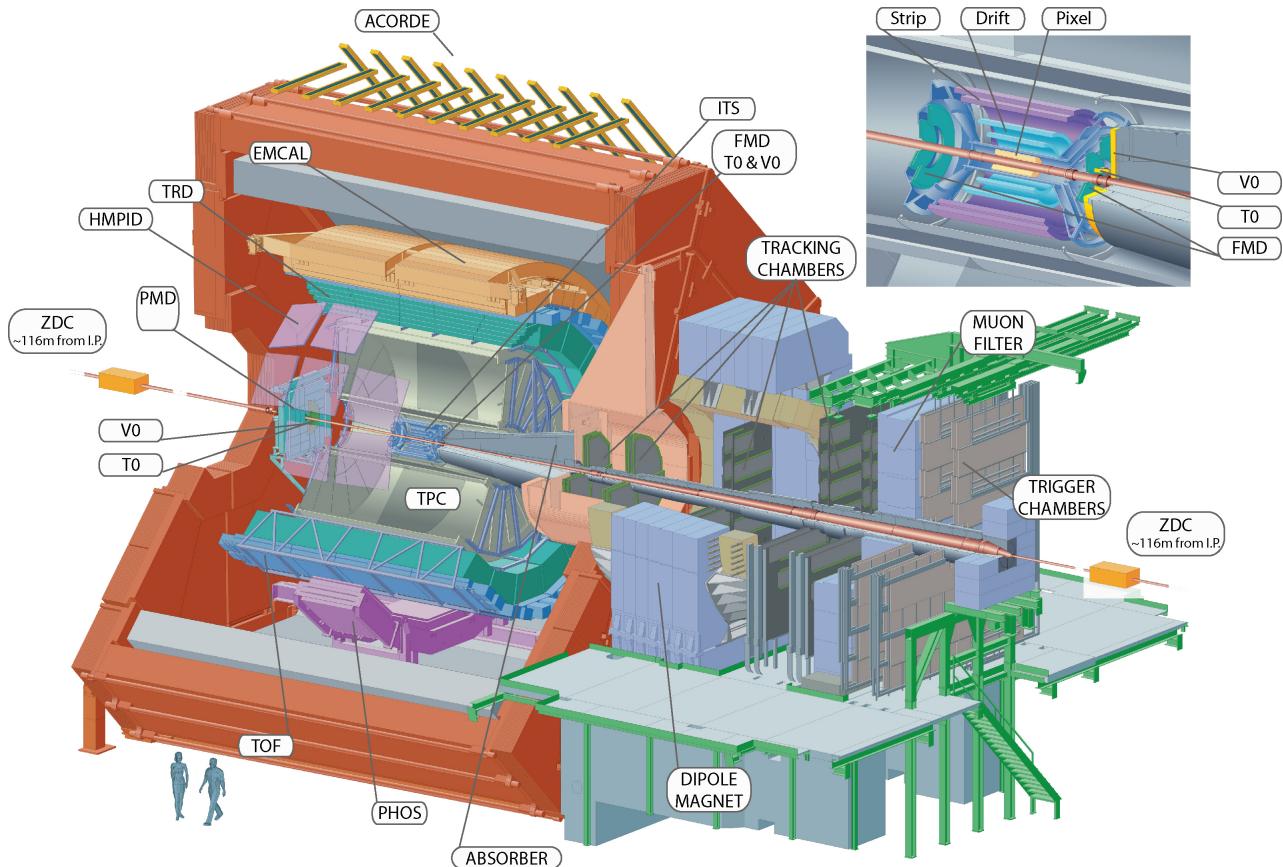
159 Przykład innego podejścia zaprezentowała współpraca przy eksperymencie LHCb, gdzie
160 wykorzystano dwa zestawy wzmacnianych drzew decyzyjnych operujących na zmiennych zwią-
161 zanych z wtórnymi wierzchołkami. Pierwszy zapewnia separację dżetów lekkich od ciężkich a
162 drugi odróżnia dżety b od c . Do wyboru punktu pracy, zamiast jednowymiarowego rozkładu
163 predykcji używany jest dwuwymiarowy rozkład wag przypisany przez oba klasyfikatory [22].

165 1.5 Eksperyment ALICE

166 Eksperyment ALICE [23], [24] jest jednym z czterech największych eksperymentów na LHC.
167 Jest on dedykowany zderzeniom ciężkich jonów (w LHC są to jony ołowiu PbPb), ale mierzone
168 są także mniejsze systemy, tj. proton-proton pp (głównie jako referencję dla pomiarów PbPb)
169 oraz proton-ołów p+Pb, które dostarczają także okazji do badania asymetrycznych zderzeń.
170 Cechą charakterystyczną pomiarów ciężkojonowych jest ich znacznie większa niż w przypadku
171 zderzeń pp krotność, tj. liczba częstek wyprodukowana w pojedynczym zderzeniu. W przypadku
172 zderzeń PbPb może powstawać nawet do 8000 naładowanych częstek na jednostkę pseudorapi-
173 dy η (ang. *pseudorapidity*)¹. Detektor ALICE został zoptymalizowany do mierzeniach takich

¹ $\eta = -\ln[\tan(\frac{\theta}{2})]$, gdzie θ jest kątem między wektorem pędu częstki a osią wiązki

174 przypadków, jak również pod kątem rekonstrukcji i identyfikacji cząstek o szerokim zakresie
 175 pędów (100 MeV – 100 GeV).



Rysunek 3: Schemat detektora ALICE. Źródło: [25]

176 Detektor ALICE jest urządzeniem złożonym z wielu subdetektorów, schematycznie przed-
 177stawionych na Rys. 3. Można je podzielić według pełnionej w pomiarach roli. ITS, TPC, TRD
 178 oraz TOF pokrywają pełen kąt azymutalny oraz zakres pseudopospieszności $|\eta| < 0.9$.

- 179 • Detektory śladowe – mierzące trajektorie cząstek zakrzywiane w polu magnetycznym o
 180 wartości $B = 0.5$ T.
 - 181 – Inner Tracking System (ITS) – zespół krzemowych detektorów śladowych znajdujący
 182 się najbliżej miejsca interakcji wiązek. Składa się on z 6 cylindrycznych warstw o pro-
 183 mieniach od 4 do 43 cm, wykonanych w trzech różnych technologiach. Jego główną
 184 rolą jest rekonstrukcja pierwotnego oraz wtórnego wierzchołków. Bierze także udział
 185 w rekonstrukcji trajektorii i strat energetycznych cząstek, szczególnie tych niskope-
 186 dowych, które nie docierają do dalej położonych detektorów.
 - 187 – Time Projection Chamber (TPC) – dłuża na 5m i o takiej średnicy komora projekcji
 188 czasowej. Jest to główny detektor śladowy ALICE, wraz z ITS służy do wyznaczania
 189 trajektorii cząstek i na ich podstawie również wierzchołków zderzenia. Elektrony
 190 uwolnione ze zjonizowanego przez poruszające się w nim naładowane cząstki gazu
 191 dryfują wzdłuż kierunku wiązki w stronę końcowych elektrod. Następnie są tam
 192 zbierane dostarczając informacji o dwóch współrzędnych toru cząstki: odległości od
 193 wiązki i kącie azymutalnym. Trzecia składowa trajektorii jest otrzymywana na pod-
 194 stawie czasu dotarcia elektronów do elektrod. TPC jest najwolniejszym detektorem
 195 ALICE (ze względu na ograniczający czas dryfu elektronów wynoszący $\sim 90 \mu\text{s}$),

196 użycie detektora tego typu podyktowane jest jego zdolnością do rozwikłania śladów
197 tysięcy cząstek spodziewanych w centralnych zderzeniach PbPb.

198 Znajomość toru ruchu cząstki pozwala na wyznaczenie jej pędu. Oprócz dokładnej
199 trajektorii każdej cząstki próbkowanej do 159 razy, TPC mierzy straty energii czą-
200 stek dE/dx . Pozwala to na ich identyfikację na podstawie wzoru Bethego-Blocha,
201 najwyższą zdolność rozdzielczą TPC osiąga dla cząstek o $p_T < 1$ GeV.

202 • detektory służące identyfikacji cząstek (ang. *particle identification – PID*)

- 203 – Transition Radiation Detector (TRD) – detektor wykrywający promieniowanie przej-
204 scia, służy głównie do odróżniania wysokopędowych ($p_T > 1$ GeV) elektronów od
205 pionów. Promieniowanie przejścia emitowane jest podczas przechodzenia relatywi-
206 stycznych cząstek przez granicę ośrodków, jego intensywność jest proporcjonalna do
207 czynnika Lorentza γ , co pozwala na odróżnienie cząstek o tym samym pędzie na pod-
208 stawie różnicy mas (elektrony są ponad 250 razy lżejsze od pionów). TRD oprócz
209 identyfikacji elektronów uczestniczy także w rekonstrukcji śladów wysokopędowych
210 cząstek i może być użyty w systemach wyzwalania (ang. *trigger*).
211 – Time-Of-Flight (TOF) – detektor czasu przelotu o zdolności rozdzielczej ~ 80 ps.
212 Pozwala na separację pionów i kaonów o pędach do ok. 2.5 GeV i protonów do 4
213 GeV.
214 – High-Momentum Particle Identification Detector (HMPID) – detektor typu RICH
215 (ang. *ring-imaging Cherenkov*), wykrywający fotony emitowane podczas przejścia
216 przez ośrodek naładowanej cząstki o prędkości większej od prędkości fazowej światła
217 w tym ośrodku (promieniowanie Cherenkowa). Na podstawie kąta pod jakim emitowano
218 są fotony określana jest prędkość cząstki. HMPID pozwala na identyfikację pio-
219 nów, kaonów i protonów o $p_T > 1$ GeV. Pokrywa przestrzeń kątów: $1.2^\circ < \phi < 58.8^\circ$
220 oraz $|\eta| < 0.6$ (5% akceptancji TPC).

221 • kalorymetry

- 222 – Photon Spectrometer (PHOS) – elektromagnetyczny kalorymetr o wysokiej rozdziel-
223 czości energetycznej i przestrzennej (podzielony na kryształy o rozmiarze poprzecznym
224 2.2×2.2 cm, co odpowiada rozmiarowi w dziedzinie η , ϕ 0.004×0.004). Pokrywa
225 zakres pseudopospieszności $|\eta| < 0.12$ i kąta azymutalnego równy 100° . PHOS ma
226 za zadanie identyfikację i pomiar czteropędów fotonów, w szczególności tych niepo-
227 chodzących z rozpadu innych cząstek (ang. *direct photons*) oraz lekkich mezonów
228 neutralnych (np. π^0) przez dwufotonowy kanał rozpadu.
229 – Electromagnetic Calorimeter (EMCal) – drugi elektromagnetyczny kalorytmeter ALICE
230 o mniejszej ziarnistości ($\Delta\eta, \Delta\phi = 0.014 \times 0.014$), ale dużo większej akceptancji
231 ($|\eta| < 0.7$, $\Delta\phi = 107^\circ$). EMCal poprawia możliwości ALICE w zakresie pomiarów
232 tłumienia dżetów, pozwalając na wyznaczanie neutralnej składowej energii dżetów
233 (energii niesionej przez neutralne cząstki). Dzięki innej charakterystyce dla elektro-
234 nów i hadronów (elektrony typowo deponują niemal całą energię a hadrony tylko
235 niewielką część) pozwala je odróżnić na podstawie stosunku zmierzonej w nim ener-
236 gii do wyznaczonego wcześniej pędu E/p . EMCal może być użyty także w szybkim
237 systemie wyzwalania, do selekcji przypadków z dżetami oraz wysokoenergetycznymi
238 fotonami i elektronami.
239 • Muon spectrometer – spektrometr mionowy, złożony z dwóch pasywnych absorberów,
240 znajdujących się między nimi 10 warstw detektora śladowego oraz komór systemu wy-
241 zwalającego na końcu. Przedni absorber, gruby na 4 metry ($\sim 60X_0$) wykonany z betonu

i grafitu, zatrzymuje hadrony oraz miony o niższych energiach (np. z rozpadów pionów i kaonów). Jest on zoptymalizowany aby minimalizować rozpraszanie mionów i zapewnić ochronę pozostałych detektorów ALICE przed wtórnymi cząstkami powstały w jego materiale. Komory pozycjoczułe mają zdolność rozdzielczą ok. $100 \mu\text{m}$, co pozwala osiągnąć wysoką rozdzielczość przy wyznaczaniu masy niezmienniczej rzędu $100 \text{ MeV}/c^2$. Spektrometr mionowy służy głównie do mierzenia mezonów wektorowych (ω , ϕ , J/Ψ , Υ) rozpadających się w kanale $\mu^+ \mu^-$.

- Detektory przednie, wyznaczające min. centralność zderzeń oraz płaszczyznę reakcji.

- ZDC – zespół czterech kalorymetrów (po dwa do pomiaru protonów i neutronów, gdyż ich tory są rozdzielane przez pole magnetyczne) mierzących energię nukleonów nieuczestniczących w zderzeniu tzw. obserwatorów, co pozwala na określenie liczby nukleonów oddziałujących, tzw. uczestników. Znajdują się one 116 m od miejsca interakcji.
- PMD – detektor mierzący krotności oraz rozkład przestrzenny fotonów
- FMD – krzemowy detektor paskowy mierzący precyjnie liczbę naładowanych cząstek w zakresie pseudopospieszności wykraczającym poza akceptancję detektora ITS.
- V0 – liczniki scyntylacyjne położone po obu stronach detektora, używane w systemie wyzwalania o minimalnym obciążeniu (ang. *minimum bias trigger*) – wymóg obecności sygnału w obu detektorach pozwala na odrzucenie przypadków tła z oddziaływania wiązki protonów z reszkami gazu obecnymi w rurach próżniowych.
- T0 – dostarcza dokładny czas interakcji potrzebny dla detektora TOF, pozwala także na śledzenie świetlności w czasie rzeczywistym.

2 Uczenie maszynowe

Uczenie maszynowe jest bardzo szerokim i obecnie dynamicznie się rozwijającym obszarem nauki. Występuje w wielu odmianach łącząc w sobie w zależności od wariantu wiele dziedzin takich jak matematyka (statystyka, algebra) informatyka (algorytmika, teoria informacji) a także elementy robotyki i sterowania. Dziedzinami, w których jest najczęściej wykorzystywane są min. widzenie maszynowe, przetwarzanie języka naturalnego, autonomiczne roboty i pojazdy, systemy decyzyjno - eksperckie, optymalizacyjne oraz rekomendacyjne.

W tej pracy wykorzystywana jest gałąź uczenia maszynowego nazywana uczeniem nadzorowanym lub "uczeniem z nauczycielem" (ang. *supervised learning*), gdzie uczenie występuje na podstawie poprawnie oznaczonych przykładów. Terminami bliskoznacznymi dla tak rozumianego uczenia maszynowego są uczenie statystyczne (ang. *statistical learning*) i rozpoznawanie wzorców (ang. *pattern recognition*).

Problem identyfikacji dżetów jest klasycznym przykładem zagadnienia klasyfikacji, gdzie poprawna odpowiedź jest jedną ze skończonej ilości opcji (klas) w przeciwieństwie do regresji, gdzie szukana odpowiedź algorytmu ma charakter ciągły.

Występuje wiele algorytmów uczenia maszynowego takich jak regresja liniowa i logistyczna, drzewa decyzyjne i ich wariacje, maszyny wektorów wspierających, sztuczne sieci neuronowe oraz wiele innych [26], [27]. Uczenie polega na znalezieniu pewnej funkcji dopasowującej do przyjmowanego na wejściu zestawu (wektora) cech (zmiennych, kolumn) pewną odpowiedź (predykcję), która minimalizuje zadaną funkcję straty. Jej rolę w przypadku regresji często pełni błąd średniokwadratowy a w przypadku klasyfikacji np. entropia krzyżowa (ang. *cross entropy*)². Różne algorytmy szukają przy tym funkcji dopasowującej należącej do różnych klas funkcji: przykładowo klasyczne drzewa decyzyjne przeszukują tylko przestrzeń funkcji dających się opisać skończonym zbiorem reguł "jeśli – to" (ang. *if – else*).

W pracy wykorzystane zostały dwa rodzaje algorytmów: wzmacniane drzewa decyzyjne oraz sieci neuronowe.

2.1 Wzmacniane drzewa decyzyjne

Wzmacniane drzewa decyzyjne są jednym z rozwinięć klasycznego algorytmu drzewa decyzyjnego. Pojedyncze drzewo decyzyjne dzieli przestrzeń cech uczących przy pomocy prostopadłych cięć, na mniejsze/większe niż zadana wartość w przypadku zmiennej ciągłej lub na należące/nie należące do danej klasy w przypadku zmiennej kategorycznej. Każdy podział, nazywany węzłem, daje dwie gałęzie, które można dalej niezależnie dzielić aż do ostatniego poziomu (liści). Kolejne podziały wybierane są tak, aby zbiory przykładów wpadające do poszczególnych gałęzi były jak najbardziej jednorodne. Stosuje się różne miary nieporządku takie tak: indeks Gini G_L lub entropia S_L ³.

Drzewa decyzyjne są często łączone w komitety klasyfikatorów (ang. *ensemble methods*). Wiele "słabych" klasyfikatorów jest łączonych w jeden silny dwa sposoby: workowanie (ang. *bagging*) [28] oraz wzmacnianie (ang. *boosting*) [29], które są często ze sobą porównywane.

Bagging – w zastosowaniu dla drzew decyzyjnych nazywany algorytmem lasów losowych (ang. *random forest*) - polega na wytrenowaniu wielu drzew, każdego na podstawie N przykładów losowo wylosowanych z powtórzeniami spośród N -licznego zbioru treningowego. Dodat-

² $J = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [y_i \log \hat{y}_i + (1 - y_i) \log(1 - \hat{y}_i)]$, gdzie y_i to prawidłowa klasa i -tego przykładu a \hat{y}_i to predykcja algorytmu

³ $G_L = 1 - \sum_k p_k^2$ oraz $S_L = \sum_k -p_k \log p_k$, gdzie p_k to stosunek liczby przypadków klasy k do liczby wszystkich przypadków w liściu L

305 kowo, do uczenia każdego drzewa używa się tylko podzbioru wszystkich cech uczących. Końcową
306 predykcję algorytmu otrzymuje się poprzez "głosowanie" wszystkich drzew z odpowiednimi wa-
307 gami.

308 *Boosting* – wzmacniane drzewa decyzyjne (ang. *boosted decision trees*) – jest metodą po-
309 dobną do *baggingu*. Główną różnicą jest zwiększanie wag przykładom uczącym, które przez po-
310 przednie drzewo zostały źle zaklasyfikowane – każde kolejne drzewo koncentruje się bardziej na
311 poprawie błędów poprzednich drzew. Widać tu kolejną ważną cechę odróżniającą obie metody:
312 *boosting* jest algorytmem sekwencyjnym podczas gdy *bagging* daje się trywialnie zrównoleglić
313 (każde drzewo trenowane jest w osobnym wątku).

314 **Parametry i sposób trenowania drzew decyzyjnych na analizowanych danych**

315 W niniejszej pracy wykorzystano wzmacniane drzewa decyzyjne zaimplementowane w wydaj-
316 nej bibliotece **XGBoost** [30]. Szybkość obliczeń jest bardzo ważna, gdyż oprócz komfortu pracy
317 z algorytmem, przekłada się na jakość otrzymanych wyników – krótszy czas obliczeń oznacza
318 możliwość przeprowadzenia większej ilości eksperymentów i lepsze dobranie parametrów oraz
319 danych. Implementacja wzmacnianych drzew decyzyjnych w **XGBoost** wykorzystuje wszystkie
320 rdzenie procesora, pomimo że sam algorytm ma charakter sekwencyjny – jest to możliwe dzięki
321 paralelizacji procesu tworzenia każdego drzewa (przed każdym podziałem konieczne jest spraw-
322 dzenie pewnej ilości możliwych zmiennych i wartości progowych i ten proces jest wykonywany
323 równolegle).

324 Dzięki szybkiemu uczeniu się algorytmu, możliwe było użycie kosztownego obliczeniowo au-
325 tomatycznego przeszukiwania przestrzeni parametrów przy pomocy przeszukiwania losowego
326 (ang. *random search*), które jest zwykle preferowane nad przeszukiwanie sieciowe [31]. W tym
327 celu cały zbiór danych dzielony był na dwie części: trenującą oraz testową (80/20%). Następ-
328 nie algorytm był trenowany i oceniany z użyciem trzy- lub pięciokrotnej walidacji krzyżowej
329 (ang. *cross-validation*) na zbiorze trenującym dla różnych zestawów parametrów. Model z naj-
330 lepszym wynikiem uzyskanym w walidacji krzyżowej był sprawdzany na zbiorze testowym.

331 Parametry optymalizowane w opisanym procesie to:

- 332 • *max_depth* – maksymalna głębokość każdego drzewa (niekoniecznie osiągana)
- 333 • *n_estimators* – liczba drzew
- 334 • *learning_rate* – parametr szybkości uczenia, komplementarny do *n_estimators*, w praktyce
335 można ustalić liczbę drzew i szukać optymalnej szybkości uczenia
- 336 • *subsample*, *colsample_bytree*, *colsample_bylevel* – parametry regularyzacyjne określające
337 ułamek kolejno: wierszy użytych do trenowania każdego drzewa, kolumn użytych w ka-
338 dem drzewie (cechy losowane raz dla danego drzewa), kolumn użytych przy każdym po-
339 dziale (cechy losowane przy każdym podziale)
- 340 • γ – minimalny zysk w postaci zmniejszenia wartości funkcji straty konieczny do wykonania
341 podziału

342 **2.2 Sieci neuronowe**

343 Sieci neuronowe (ang. *neural networks* – *NN*) są szczególnym algorytmem uczenia maszyno-
344 wego. Występują w bardzo wielu odmianach i są wykorzystywane w rozwiązywaniu szerokiej
345 gamy problemów. Nawet bardzo pobiczny opis sieci neuronowych wymaga dużo więcej miejsca
346 niż może być temu poświęcone w tej pracy. Wprowadzenia do sieci neuronowych od podstaw
347 można znaleźć m.in. w [32] lub [33]. Tu przedstawione zostaną wyłącznie wybrane zagadnienia

348 mające ścisłejšzy związek z pracą. Używane mogą być terminy, których znaczenie wyjaśniane
349 jest w podanych źródłach.

350 W niniejszej pracy, wykorzystane zostały dwa rodzaje sieci neuronowych: sieci w pełni połącz-
351 czone (ang. *fully connected NN – FC NN*), nazywane także wielowarstwowymi perceptronami
352 (ang. *multi-layer perceptron – MLP*) oraz sieci konwolucyjne (ang. *convolutional NN – Co-*
353 *nvNets, CNN*).

354 Sieci w pełni połączone

355 W nierekurencyjnych sieciach neuronowych (tylko takie są używane w tej pracy), informacja jest
356 przekazywana kolejno od warstw wejściowych, poprzez warstwy ukryte aż do wyjściowej. W sie-
357 ciach typu *FC* wszystkie warstwy składają się z identycznych neuronów – każdy neuron dostaje
358 na wejściu wektor, natomiast zwraca skalar – wartość pewnej zadanej, nielinowej funkcji, jako
359 argument podając średnią ważoną z elementów wektora wejściowego. Wartości zwracane przez
360 neurony w danej warstwie składają się na wektor wejściowy dla neuronów kolejnej warstwy.
361 Wejściem dla pierwszej warstwy są natomiast kolejne przykłady ze zbioru uczącego. Trenowa-
362 nie sieci neuronowych polega na zmienianiu wag (parametrów) w liczonej w każdym neuronie
363 średniej, każdy neuron posiada własny, niezależny zestaw wag.

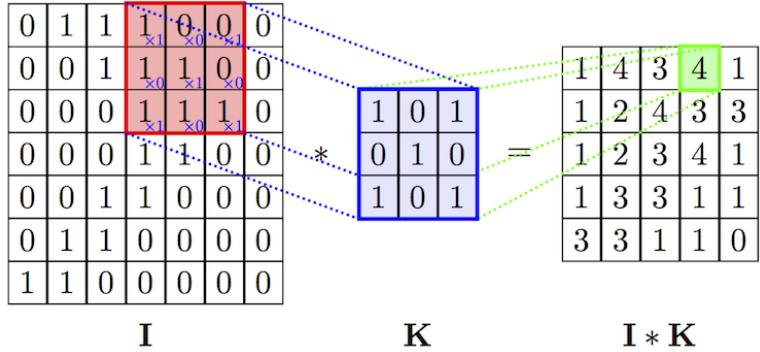
364 Istnieje twierdzenie o sieciach neuronowych jako uniwersalnych aproksymatorach funkcji
365 (ang. *universal approximation theorem*) [34], mówiące, że już sieć neuronowa o jednej warstwie
366 ukrytej jest zdolna do przybliżenia dowolnej funkcji z dowolną dokładnością. Twierdzenie to
367 nie podaje niestety liczby potrzebnych neuronów a przede wszystkim – sposobu ich trenowania.
368 Trenowanie jest prostsze w przypadku zastosowania wielu warstw, które odpowiadają kolejnym
369 poziomu abstrakcji jednak nadal jest dużym wyzwaniem ze względu na fakt, że nawet stosun-
370 kowo niewielka sieć może posiadać bardzo dużą liczbę parametrów, przykładowo sieć o czterech
371 warstwach, w każdej po 128 neuronów ma ich ponad 65 tysięcy.

372 Sieci konwolucyjne

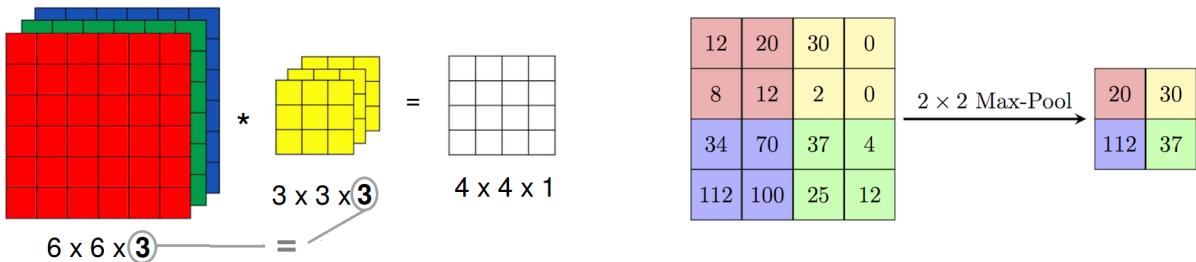
373 Jednym ze sposobów na ograniczenie liczby trenowanych parametrów jest użycie konwolucyj-
374 nych sieci neuronowych [35] (bardziej poprawną choć rzadko używaną nazwą w języku polskim
375 jest sieć splotowa). Są one inspirowane połączeniami w korze wzrokowej zwierząt i wywodzą
376 się z badań w obszarze widzenia komputerowego, gdzie liczby parametrów są szczególnie duże
377 (wektor wejściowy ma wymiar równy liczbie pikseli w obrazie), na takim przykładzie również
378 najłatwiej zrozumieć ich działanie.

379 Sieci konwolucyjne różnią się od sieci typu *FC* tym, że część wag połączeń między warstwami
380 jest dzielona. Występuje w nich nowy rodzaj warstwy, nazywany warstwą konwolucyjną. Każda
381 jednostka w warstwie konwolucyjnej (filtr) ma pewną stałą (niewielką) liczbę wag. Połączenie z
382 dużym wejściem realizowane jest przez powielanie tych samych wag w połączeniach z kolejnymi
383 fragmentami wektora wejściowego (por. Rys. 4). Rezultatem działania filtra na macierz jest wy-
384 nik operacji splotu. Liczba parametrów przypadająca na każdy filtr jest równa jego rozmiarowi
385 i nie zależy od wielkości wektora wejściowego.

386 W przypadku gdy zamiast wejścia dwuwymiarowego (jak np. obraz czarno-biały), mamy do
387 czynienia z wejściem trójwymiarowym (np. trzeci wymiar to kolejne kolory w kodowaniu RGB),
388 filtry również muszą mieć trzy wymiary, przy czym rozmiar w ostatnim wymiarze musi być
389 równy rozmiarowi w tym kierunku wektora wejściowego. Wynik operacji splotu jest ponownie
390 dwuwymiarowy, gdyż filtr przesuwany jest tylko w dwóch pierwszych wymiarach. Trzeci wymiar
391 powstaje przez składanie kolejnych filtrów. Widać zatem, że również w przypadku gdy na
392 wejścia podawany jest obraz czarno-biały, filtry w kolejnych warstwach konwolucyjnych (oprócz
393 pierwszej) mają po trzy wymiary.



Rysunek 4: Schemat działania pojedynczego filtra z warstwy konwolucyjnej (operacja splotu).
Źródło: [36].



Rysunek 5: Działanie pojedynczego filtra (3D) na wejście o trzech wymiarach.
Źródło: [37].

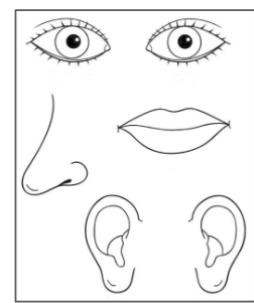
Rysunek 6: Działanie warstwy typu *max-pool*. Źródło: [36].

oprócz warstw konwolucyjnych, w sieciach tego typu stosowane są także tzw. warstwy typu *max-pooling*. Zasada jej działania jest bardzo prosta: wykonuje funkcję *maksimum* na zadanym fragmencie obrazu (por. Rys. 6). Ich rolą jest zmniejszanie rozmiaru przekazywanej w sieci informacji.

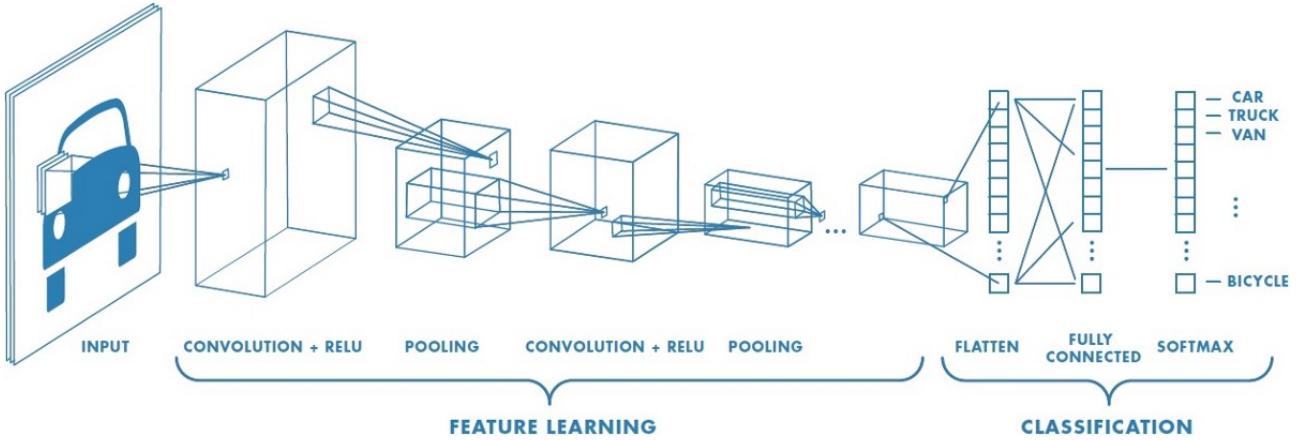
Typowa architektura stosowana w przypadku sieci konwolucyjnych jest następująca: najpierw warstwy konwolucyjne (pomiędzy nimi czasem warstwy typu *max-pool*), następnie wszystkie filtry są rozwijane i składane w długi jednowymiarowy wektor, który przekazywany jest do warstw typu *FC*. W przypadku problemu klasyfikacji, na końcu znajduje się jeszcze warstwa typu *softmax* normalizująca wyjście z sieci do jedynki (por. Rys. 7).

Sieci konwolucyjne posiadają dwie właściwości odróżniające je od *MLP*:

- niezmienniczość względem przesunięcia (ang. *translation invariance*) – głównie za sprawą dzielenia wag oraz obecności warstw typu *max-pool*, położenie danej cechy na obrazie jest niemal bez znaczenia (obraz po prawej stronie byłby rozpoznany jako twarz)
- lokalność połączeń – filtry obejmują tylko kilka sąsiednich pikseli (tam zwykle występują najsilniejsze zależności) nie są w stanie dostrzec cechy rozciągniętej na obszar większy od rozmiaru filtra



Rysunek 8: Źródło: [39].

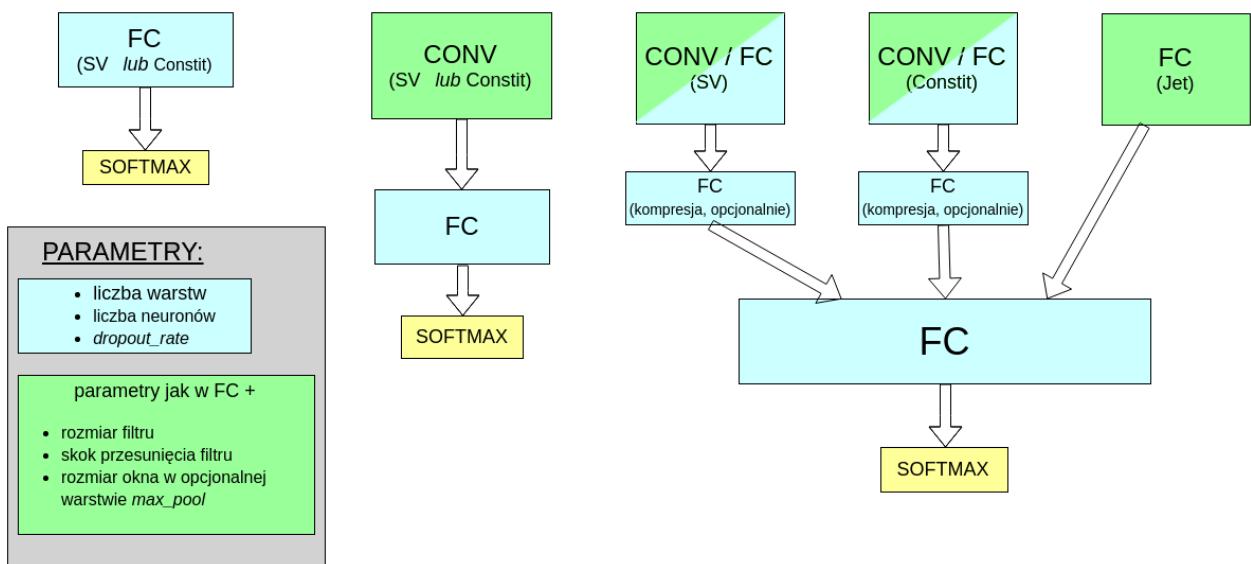


Rysunek 7: Typowa struktura stosowana w sieciach konwolucyjnych. Warstwy konwolucyjne mają za zadanie wydobywać cechy, na podstawie których późniejsze warstwy dokonują klasyfikacji. Widoczna jest charakterystyczna stopniowa zmiana rozmiaru przekazywanej macierzy: rozmiar poprzeczny maleje kosztem głębokości, co odpowiada rosnącej liczbie filtrów i malejącym rozmiarowi obszaru po jakim są one przesuwane. Źródło: [38].

414 Hiperparametry i trenowanie sieci neuronowych na analizowanych danych

415 Parametry sieci, których wartości są określane przez projektanta sieci, takie jak liczba warstw
416 ukrytych są nazywane hiperparametrami (dla odróżnienia od parametrów - wag połączeń).

417 Testowane były trzy architektury: sieci w pełni połączone, sieci konwolucyjne oraz sieć
418 złożona z dwóch gałęzi, osobnych dla wtórnego wierzchołków i częstek tworzących dżet (por.
419 Rozdz. 3) przedstawione schematycznie na Rys. 9. Do trenowania sieci wykorzystano wysoko-
420 poziomową bibliotekę Keras [40] korzystającą z silnika obliczeniowego zaimplementowanego w
421 TensorFlow [41].



Rysunek 9: Schematyczne przedstawienie trzech testowanych rodzin architektur sieci. Każdy blok odpowiada kilku warstwom danego typu. Bloki warstw typu FC i opisane jako ”kompre-
sja składają się z kilku neuronów i miały za zadanie zredukować całą informację z danej gałęzi
do wektora kilku liczb.

422 Zestaw hiperparametrów definiujący działanie sieci w pełni połączonej:

- 423 • liczba warstw ukrytych

- 424 • liczba neuronów w każdej warstwie

425 • funkcja aktywacji – nielinowa funkcja aplikowana przed zwróceniem wartości w każdym
426 neuronie, najpopularniejsze to *tanh*, *ReLU* ($f(x) = \max(0, x)$) oraz funkcja sigmoidalna
427 ($f(x) = \frac{1}{1+\exp(-x)}$)

- 428 • algorytm optymalizacyjny – spadek gradientowy lub jego wariacje

- 429 • parametr szybkości uczenia i jego modyfikacje w trakcie uczenia

430 • liczba przykładów trenujących przetwarzanych w jednym kroku uczenia (ang. *batch_size*)
431 – im większy tym szybsze jest trenowanie sieci (dzięki wydajnym operacjom macierzo-
432 wym), natomiast może się to odbywać kosztem precyzji

- 433 • liczba epok uczenia – ile razy będzie pokazywany sieci każdy przykład

434 • opcjonalnie: warunki stopu (ang. *early stopping*) w razie osiągnięcia *plateau* (wysycenia
435 procesu uczenia)

- 436 • opcjonalnie: regularyzacja przy pomocy różnych technik (zwykle konieczna)

437 Ponadto dla sieci konwolucyjnych:

- 438 • liczba warstw konwolucyjnych i liczba filtrów w każdej warstwie

- 439 • obecność lub brak warstw *max-pool* i rozmiar ich okna

- 440 • rozmiar filtrów i długość skoku przy ich przesuwaniu

441 Same dwie pierwsze wielkości dają nieograniczoną liczbę konfiguracji. Czas trenowania sieci
442 neuronowych jest rzędu wielkości większej niż drzew decyzyjnych, dlatego przyjęto szereg kro-
443ków mających na celu zmniejszenie przeszukiwanej przestrzeni hiperparametrów. Na podstawie
444 wstępnych testów oraz różnych wskazówek dostępnych w literaturze przyjęto:

- 445 • *batch_size* zawsze równy 64 (inne testowane wartości: 16, 32, 128)

446 • za algorytm optymalizacyjny przyjęto algorytm o nazwie *Nadam* [42], tj. rozwinięcie al-
447 gorytmu *Adam* [43] o parametr Nesterova (inne testowane to zwykły spadek gradientowy
448 oraz *Adam*)

- 449 • funkcję aktywacji: *ReLU*

- 450 • liczba epok równa 50, 100 lub 200, zrezygnowano z *early stopping*

- 451 • stałe w trakcie treningu wartości parametru szybkości uczenia

452 • spośród technik regularizacyjnych testowano wyłącznie *dropout* [44] z prawdopodobień-
453 stwem odrzucenia równym 0.1, 0.2 lub 0.5

- 454 • kilka wybranych kombinacji dla zestawu parametrów: rozmiar filtra, długość skoku i roz-
455 miar okna w warstwach *max-pool* – takie same w kolejnych warstwach

- 456 ● liczby neuronów/filtrów w warstwach będące zawsze potęgami dwójki oraz stałą liczbę w
457 kolejnych warstwach lub zmieniającą się o stały czynnik, np. 256-128-64, 128-128-128 lub
458 16-32-64
- 459 ● liczba warstw *FC*: 2-8, konwolucyjnych 2-6

460 Nawet po przyjęciu powyższych uproszczeń nie sposób sprawdzić wszystkich możliwych
461 zestawów hiperparametrów, dlatego sposób ich dobierania w kolejnych testach był mocno em-
462 piryczny. Dostępne dane dzielone były na trzy zbiory: trenujący, walidacyjny i testowy. Wobec
463 braku warunków stopu, zbiór walidacyjny użyty był wyłącznie do porównywania różnych ze-
464 stawów parametrów, tak aby wynik testowy pozostał nieobciążony.

465 Zgodnie z zasadą ortogonalizacji działań, proces doboru hiperparametrów dzielono na dwie
466 części: najpierw starano się uzyskać jak najlepsze wyniki na zbiorze uczącym, a dopiero później
467 zmusić algorytm do lepszej generalizacji na zbiorze testowym przez zwiększoną regularyzację i
468 modyfikację parametru szybkości uczenia.

469 **2.3 Dyskusja użycia dwóch algorytmów**

470 Użycie więcej niż jednego algorytmu ma wiele zalet. Po pierwsze daje możliwość porównania
471 wyników. Pozwala to na oszacowanie błędu *Bayesowskiego* (najniższego możliwego do osiągnię-
472 cia przez jakikolwiek algorytm błędu). Jest to bardzo ważne w sytuacji, gdy nie dysponuje
473 się innym oszacowaniem tego błędu (w wielu problemach naturalnych dla człowieka jak roz-
474 poznawanie obiektów na obrazkach jest nim błąd ludzki lub też błąd popełniany przez zespół
475 ekspertów w bardziej zaawansowanych zastosowaniach).

476 Po drugie, wykorzystane zostały dwa algorytmy mocno różniące się w swojej naturze, co
477 pozwala wykorzystać cechy każdego z nich w analizie: przykładowo sieci neuronowe dobrze
478 radzą sobie z nieustrukturyzowanymi danymi – potrafią tworzyć wysoko poziomowe cechy na
479 podstawie niskopoziomowego wejścia (np. położenia oka na zdjęciu twarzy na podstawie pixeli).
480 Są natomiast trudne w interpretacji i często traktowane są jako tzw. „czarne skrzynki” (ang. *black*
481 *box*). Oprócz tego, liczba możliwych konfiguracji sieci jest ogromna i przez to niemożliwe jest
482 stwierdzenie czy wykorzystane zostały pełne ich możliwości.

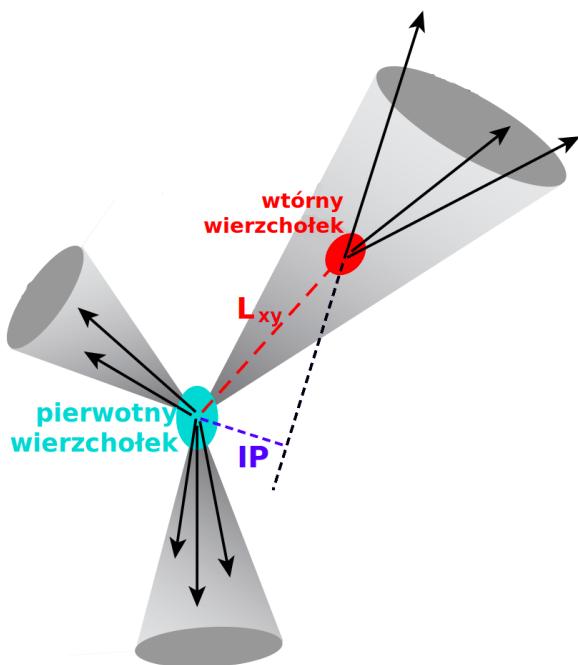
483 Z kolei drzewa decyzyjne posiadają stosunkowo niewielką liczbę parametrów, a ich trenowa-
484 nie jest bardzo szybkie co pozwala na ich ekstensywne przeszukiwanie i otrzymanie wyników,
485 które można uznać za optymalne dla tego algorytmu. Ponadto, w przypadku drzew istnieją
486 niewymagające dodatkowych obliczeń miary użyteczności poszczególnych zmiennych, co daje
487 wgłębne w działanie algorytmu i poprawia intuicyjne zrozumienie jego predykcji.

488 3 Dane

489 Dane użyte w analizie pochodzą z symulacji Monte Carlo zderzeń proton-proton przy energii
 490 w układzie środka masy równej $\sqrt{s} = 13$ TeV dostępnych na serwerach eksperymentu ALICE.
 491 Są to pełne symulacje detektora ALICE, wykorzystujące generator zderzeń *Pythia8* [45] (*tune:*
 492 *Pythia8Jets_Monash2013* [46]) oraz pakiet *Geant3* [47] do transportu cząstek przez materiał
 493 detektora.

494 Do rekonstrukcji dżetów wykorzystany został algorytm *anti-kt* z parametrem $R = 0.4$ zaim-
 495 plementowany w pakiecie *FASTJET* [48]. Dżetów poszukiwano wyłącznie wśród cząstek naładowa-
 496 nych (ang. *charged jets*) ze względu na słabe pokrycie przestrzeni fazowej przez kalorymetry
 497 w eksperymencie ALICE.

498 Do analizy wybrano dżety o p_T większym niż 15 GeV i mieszczące się w całości w akcep-
 499 tancji detektora *TPC*, tj. $|\eta| < 0.9$, co przy użytym parametrze rozmiaru dżetu $R = 0.4$, daje
 500 ograniczenie na pseudopospieszność $|\eta| < 0.5$ dla osi dżetu.



Rysunek 10: Rysunek ilustrujący znaczenie używanych wielkości: L_{xy} oraz parametru zderzenia IP . Źródło: [49].

501 Dla każdego dżetu obliczony został szereg wielkości, które można podzielić na zmienne
 502 na poziomie dżetu, związane z wtórnymi wierzchołkami oraz cząstkami tworzącymi dżet. Za
 503 potencjalne wtórne wierzchołki uznaje się wszystkie kombinacje trzech cząstek spełniających
 504 pewne dosyć luźne kryteria jak $p_T > 0.15$ GeV (rozważane są wyłącznie trzy-cząstkowe wtórne
 505 wierzchołki), stąd ich liczba może być dużo większa od liczby cząstek tworzących dżet.

506 Lista używanych zmiennych:

- 507 • Zmienne na poziomie dżetu:
 - 508 – η_{jet}, ϕ_{jet} – pseudopospieszność i kąt azymalny osi dżetu
 - 509 – $p_{T,jet}$ – pęd poprzeczny dżetu
 - 510 – M_{jet} – masa dżetu [#REF]

- 511 – A_{jet} – powierzchnia dżetu – liczona w płaszczyźnie (η, ϕ), do powierzchni dżetu zaliczany jest element w powierzchni w którym dodanie części o nieskończenie małym pędzie poprzecznym sprawi, że zostanie ona zaliczona do tego dżetu [50]
- 512 – ρ_{bckg} – gęstość tła w danym zdarzeniu

- 515 • Zmienne opisujące cząstki tworzące dżet:

- 516 – η, ϕ – pseudopospieszność i kąt azymutalny cząstki względem osi dżetu
- 517 – p_T – pęd poprzeczny cząstki
- 518 – IP_D – rzut na kierunek poprzeczny wektora parametru zderzenia
- 519 – IP_Z – rzut na oś z wektora parametru zderzenia
- 520 – $N_{Constit}$ – liczba cząstek tworzących dżet

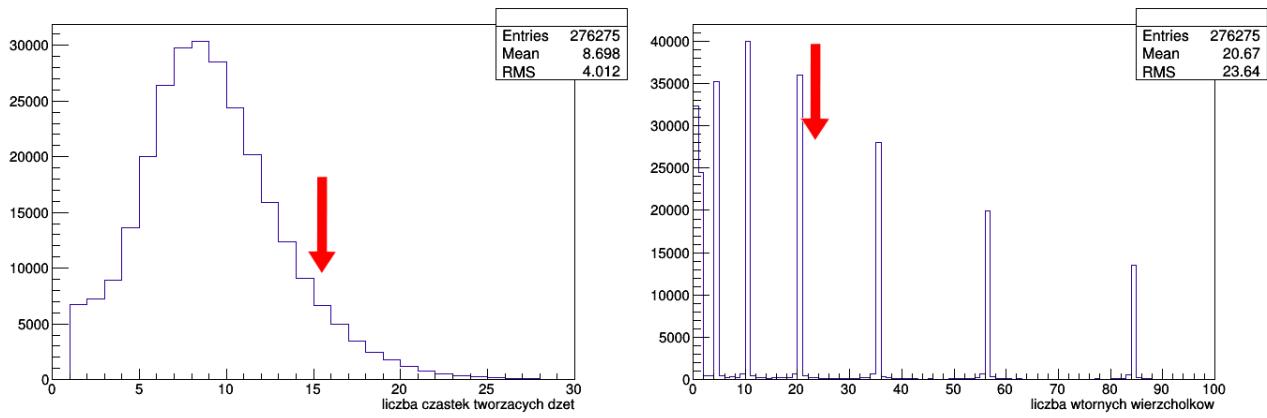
- 521 • Zmienne opisujące wtórne wierzchołki:

- 522 – L_{xy} – odległość między pierwotnym a wtórnym wierzchołkiem (ang. *decay length*)
- 523 – $\sigma_{L_{xy}}$ – niepewność wyznaczenia L_{xy}
- 524 – $\sigma_{vertex} = \sqrt{d_1^2 + d_2^2 + d_3^2}$ – rozrzut śladów (ang. *tracks*) wokół wtórnego wierzchołka, gdzie d_i to odległość najbliższego zbliżenia śladu do wtórnego wierzchołka (DCA)
- 526 – $M_{inv} = \sqrt{(E_1 + E_2 + E_3)^2 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \vec{p}_3)^2}$ – masa niezmieniczna wierzchołka, gdzie E_i, p_i to energia i pęd i -tej cząstki tworzącej wierzchołek
- 528 – χ^2/Ndf dopasowania wtórnego wierzchołka
- 529 – N_{SV} – liczba wtórych wierzchołków

530 Dżety różnią się liczbą cząstek je tworzących oraz liczbą wtórnych wierzchołków. Większość algorytmów uczenia maszynowego wymaga natomiast dostarczenia danych w postaci tabelarycznej (macierzowej), ze stałą liczbą kolumn (wiersze stanowią kolejne dżety). Aby spełnić to wymaganie konieczne jest przyjęcie pewnej ustalonej liczby wtórnych wierzchołków oraz cząstek tworzących dżet – w przypadku gdy dżet ma więcej elementów tego typu są one odrzucane, natomiast puste pola są wypełniane zerami w przypadku gdy ma ich mniej. Po przeanalizowaniu rozkładów liczby wtórnych wierzchołków i cząstek tworzących dżet (Rys. 11) oraz wstępny sprawdzeniu jak dodawanie kolejnych elementów wpływa na otrzymywane wyniki (na podstawie wzmacnianych drzew decyzyjnych ze względu na wspomnianą w 2.3 szybkość i stabilność) ustalono liczbę cząstek tworzących dżet równą 15 a wtórnych wierzchołków równą 20.

540 Istotnym zagadnieniem jest także kolejność w jakiej ułożone będą zmienne. Dla sieci konwolucyjnych szukających lokalnych zależności rozsądne jest ułożenie obok siebie tych samych zmiennych, np. $L_{xy,1}, L_{xy,2}, L_{xy,3} \dots \sigma_{vertex,1}, \sigma_{vertex,2}, \sigma_{vertex,3} \dots$. Dla sieci w pełni połączonych oraz drzew decyzyjnych kolejność zmiennych nie ma znaczenia, ale ważne jest aby ich położenie było stałe, np. aby L_{xy} i $\sigma_{L_{xy}}$ danego wtórnego wierzchołka były w tych samych miejscach, tak aby możliwe było szukanie zależności między nimi.

546 Nastecną kwestią jest wybór wielkości decydującej o kolejności ułożenia elementów, tj. która cząstka będzie cząstką nr 1 a która nr 5. Losowe ułożenie elementów sprawiłoby, że bezpośrednie porównywanie wielkości w danych kolumnach (co ma miejsce bezpośrednio w drzewach decyzyjnych a pośrednio w sieciach neuronowych) straciłoby sens. Z kolei dobry dobór tej kolejności pozwala na łatwe odtworzenie przez algorytm uczenia maszynowego motywów fizycznie algorytmów omówionych w sekcji 1.4.2. Przykładowo cięcie na wartość IP drugiej lub trzeciej cząstki (gdy są one posortowane wg malejących wartości IP) jest istotą algorytmu nazywanego *Track Counting – TC* stosowanego w CMS i ALICE. Kolejność w jakiej ułożone będą elementy,



Rysunek 11: Rozkłady liczby cząstek tworzących dżet i liczby wtórnych wierzchołków (część) wraz wartościami cięć.

554 wpływa także na to, które z nich będą odrzucone w przypadku gdy dżet zawiera więcej niż 15
 555 cząstek i 20 wierzchołków. Ponownie posiłkowano się testami z użyciem drzew decyzyjnych.
 556 Ostatecznie wtórne wierzchołki ułożono według malejącego L_{xy} a cząstki – malejącego p_T .

557 4 Analiza

558 4.1 Dobór metryki

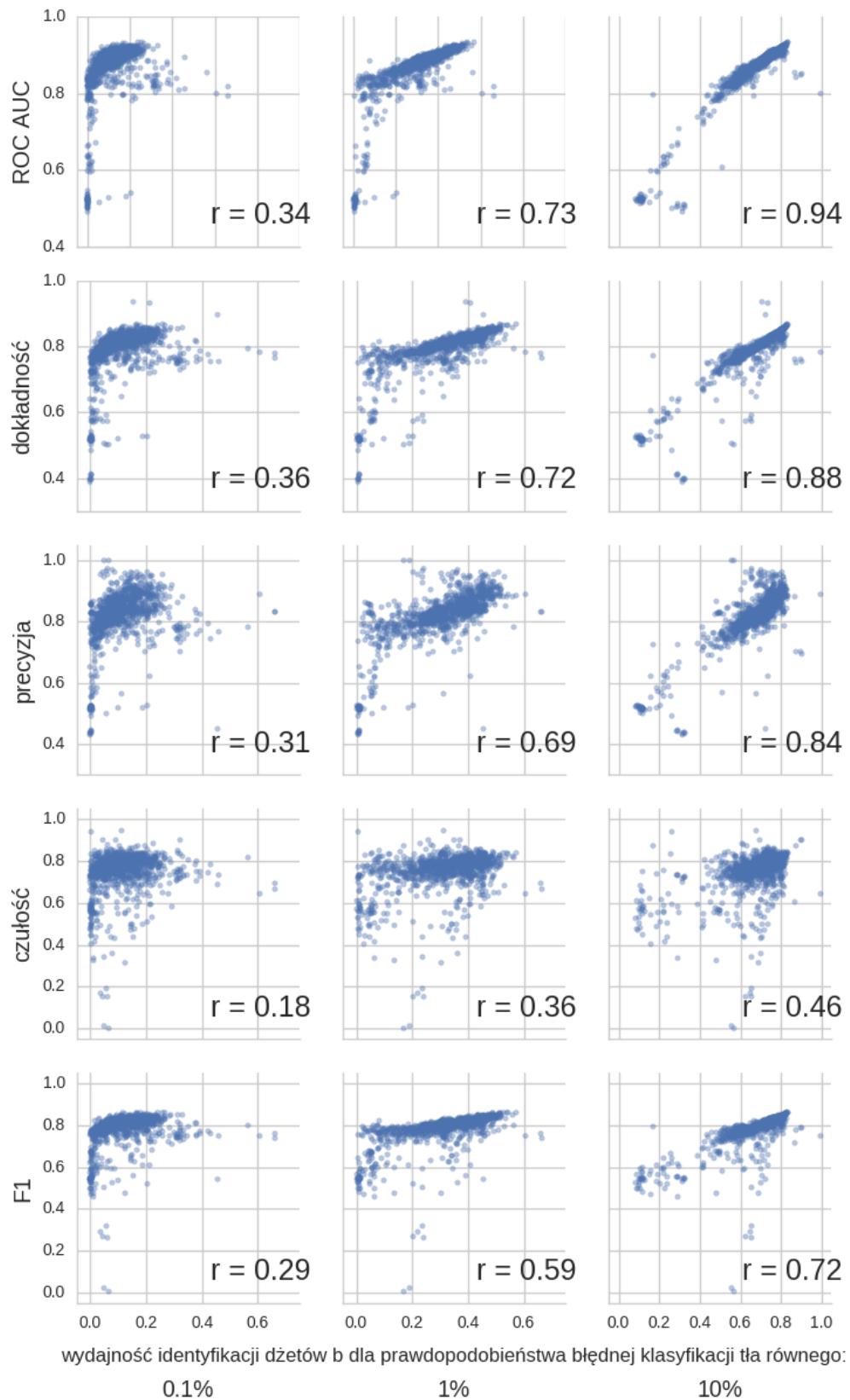
559 Bardzo ważnym elementem w trenowaniu algorytmów uczenia maszynowego jest dobór odpo-
560 wiedniej metryki – klasycznym złym przykładem jest używanie dokładności (ang. *accuracy*) do
561 oceniania klasyfikacji binarnej w przypadku dużego niezrównoważenia klas – algorytm przewi-
562 dujący zawsze klasę większościową może osiągnąć dużą wartość dokładności będąc jednocześnie
563 bardzo słabym modelem.

564 Kilka najczęściej używanych metryk wymieniono w Tab. A1. Używanie i porównywanie
565 kilku miar efektywności jest często niepraktyczne dlatego dobrze jest wybrać jedną metrykę.
566 Przy jej wyborze należy kierować się potencjalnymi zastosowaniami modelu. W tym przypadku
567 są to analizy fizyczne, które mogą mieć różne wymagania dotyczące czystości i liczebności
568 otrzymywanych próbek a co za tym idzie, preferować inne punkty pracy zdefiniowane jako pary
569 liczb: wydajność poprawnej klasyfikacji dżetów b (ang. *tagging efficiency = true positive rate*
570 = *recall*), i ułamek niepoprawnie zaklasyfikowanych przypadków tła (ang. *mistagging rate =*
571 *false positive rate*).

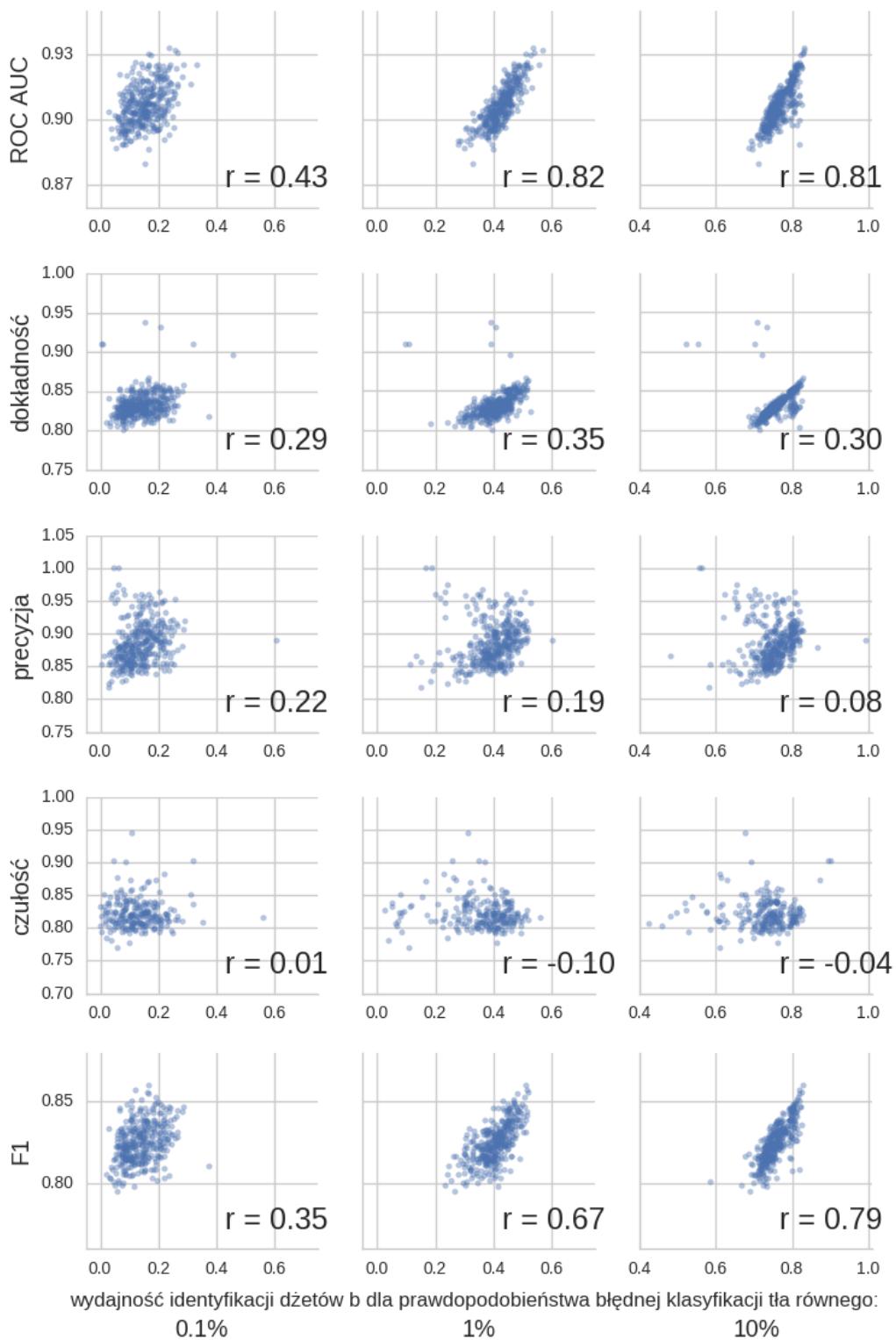
572 Naturalnym wyborem wydaje się pole pod powierzchnią krzywej ROC (ang. *ROC Area*
573 *Under Curve – ROC AUC*) [51]. Potencjalną przeszkodą może być zakres rozsądnych wartości
574 prawdopodobieństwa błędnej klasyfikacji przypadków tła: dżety b stanowią tylko kilka procent
575 liczby wszystkich dżetów, zatem z punktu widzenia analizy dopuszczalne będą punkty pracy
576 zapewniające wydajność identyfikacji dżetów b ok. 10 – 100 razy większą niż częstość niepo-
577 prawnego zaklasyfikowania przypadków tła. Oznacza to, że zdecydowana większość punktów
578 pracy znajdujących się na krzywej ROC jest nie do zaakceptowania – interesujące są tylko te o
579 najniższych częstościach błędnej klasyfikacji.

580 Aby ilościowo porównywać różne algorytmy wprowadzone zostaną trzy punkty pracy: o
581 prawdopodobieństwie błędnej klasyfikacji tła równej 0.1%, 1% oraz 10%. Na Rys. 12 przedsta-
582 wione zostały zależności poszczególnych metryk od wydajności identyfikacji dżetów b w tych
583 trzech punktach pracy. Każdy punkt odpowiada jednemu eksperymentowi (dla dowolnego al-
584 gorytmu) przeprowadzonemu w trakcie przygotowywania analizy. Daje to pogląd, na to która
585 metryka zapewni jednocześnie wysokie wartości wydajności na identyfikację dżetów b w wybra-
586 nych punktach pracy. Najwyższe koreacje występują dla punktu pracy o najwyższym prawdo-
587 podobieństwie błędnej klasyfikacji tła – jak będzie to pokazane później wyniki dla tego punktu
588 pracy są najbardziej stabilne. Spośród analizowanych metryk najwyższe wartości współczyn-
589nika Pearsona otrzymano dla pola pod powierzchnią krzywej ROC, dosyć wysokie również dla
590 dokładności i precyzji. Widać, że wartości czułości są najsłabiej skorelowane z wydajnością
591 identyfikacji dżetów b – jest zrozumiałe, że są one dużo niższe niż dla precyzji: wartości czułości
592 maleją gdy błędnie klasyfikowane są dżety b stanowiące sygnał, podczas gdy wartości precyzji
593 maleją, gdy błędnie klasyfikowane są przypadki tła. Z tych dwóch błędów, drugi jest bardziej
594 kosztowny, gdyż błędna klasyfikacja nawet niewielkiej części tła znacznie pogarsza czystość
595 otrzymywanej próbki.

596 Na Rys. 13 przedstawiono te same wykresy, ale tym razem wybrano tylko 25% najleps-
597 szych wartości dla każdej metryki – te punkty są bardziej znaczące, gdyż ostatecznie modele z
598 eksperymentów dających najlepsze wyniki będą używane. Dla tych wykresów otrzymano zde-
599 cydowaną dominację *ROC AUC* – wybór modeli dających najwyższe pole pod powierzchnią
600 krzywej ROC zapewnia jednocześnie otrzymanie wysokich wartości wydajności identyfikacji
601 dżetów b dla wybranych punktów pracy.



Rysunek 12: Zależność podstawowych metryk od wydajności identyfikacji dżetów b dla punktów pracy o prawdopodobieństwie błędnej klasyfikacji tła równej 0.1%, 1% oraz 10%. Dla każdego wykresu przedstawiono współczynnik korelacji r Pearsona.



Rysunek 13: Rysunek podobny do Rys. 12, ale przedstawione zostały tylko punkty odpowiadające eksperymentom o wartościach metryki będących w górnym kwartylu wartości danej metryki dla wszystkich eksperymentów.

602 4.2 Wyniki dla poszczególnych modeli

603 W następnych podrozdziałach przedstawione zostały wyniki uzyskane dla poszczególnych mo-
604 deli. Jako model rozumiana jest para: algorytm (wraz z jego hiperparametrami) oraz zestaw
605 danych użyty do jego trenowania. Oznaczenia używane w prezentacji wyników zebrane zostały
606 w Dodatku B.

607 Każdy przedstawiony wynik jest rezultatem uśrednienia pięciu powtórzeń wykonania tre-
608 ningu – randomizacji podział zbioru danych na dane treningowe, walidacyjne i testowe,
609 losowa jest także inicjalizacja wag połączeń w przypadku sieci neuronowych.

610 Na Rys. 14, 15, 16 przedstawiono odmianę krzywej ROC – wykresy przedstawiające zależ-
611 ności wydajności identyfikacji dżetów b z niepewnościami (na osi poziomej) dla danego praw-
612 dopodobieństwa błędnej klasyfikacji dżetów tła (na osi pionowej).

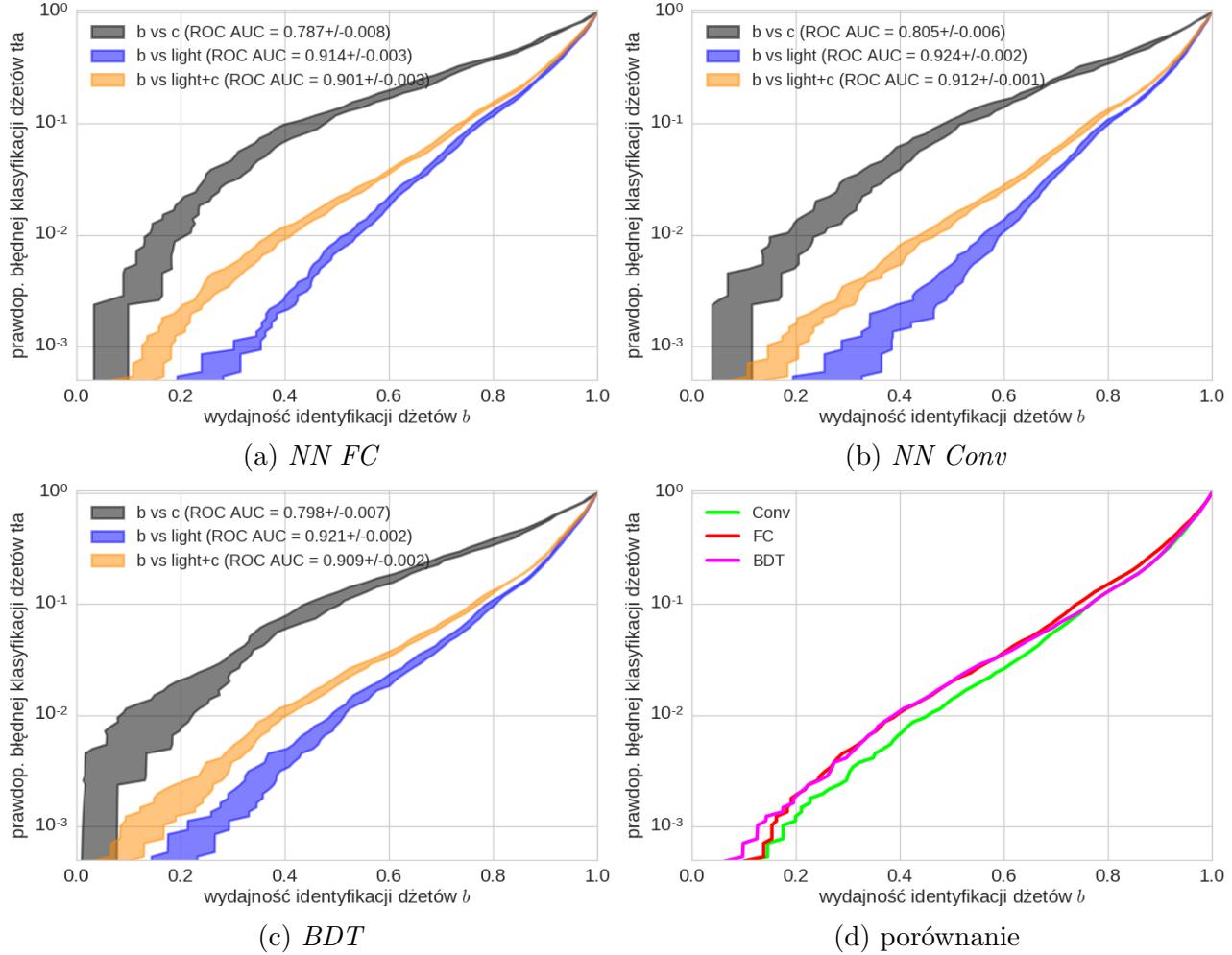
613 Trzy krzywe na każdym wykresie odpowiadają separacji dżetów b od dżetów: lekkich, c
614 oraz mieszanej próbki złożonej w 90% z dżetów lekkich i w 10% z dżetów powabnych. Cztery
615 wykresy na każdym rysunku odpowiadają trzem użytym algorytmom (sieci neuronowe typu FC
616 (na górze po lewej), konwolucyjne sieci neuronowe (na górze po prawej), wzmacniane drzewa
617 decyzyjne (na dole po lewej) oraz porównanie wszystkich trzech (na dole po prawej) – tylko
618 średnie wartości.

619 Jeśli nie zaznaczono inaczej, prezentowane wyniki dotyczą separacji dżetów b od mieszanego
620 tła (90% dżetów lekkich + 10% c)

621 W Tab. 1 przedstawiono podsumowanie wyników.

622 4.2.1 Wyniki dla zmiennych związanych z wtórnymi wierzchołkami

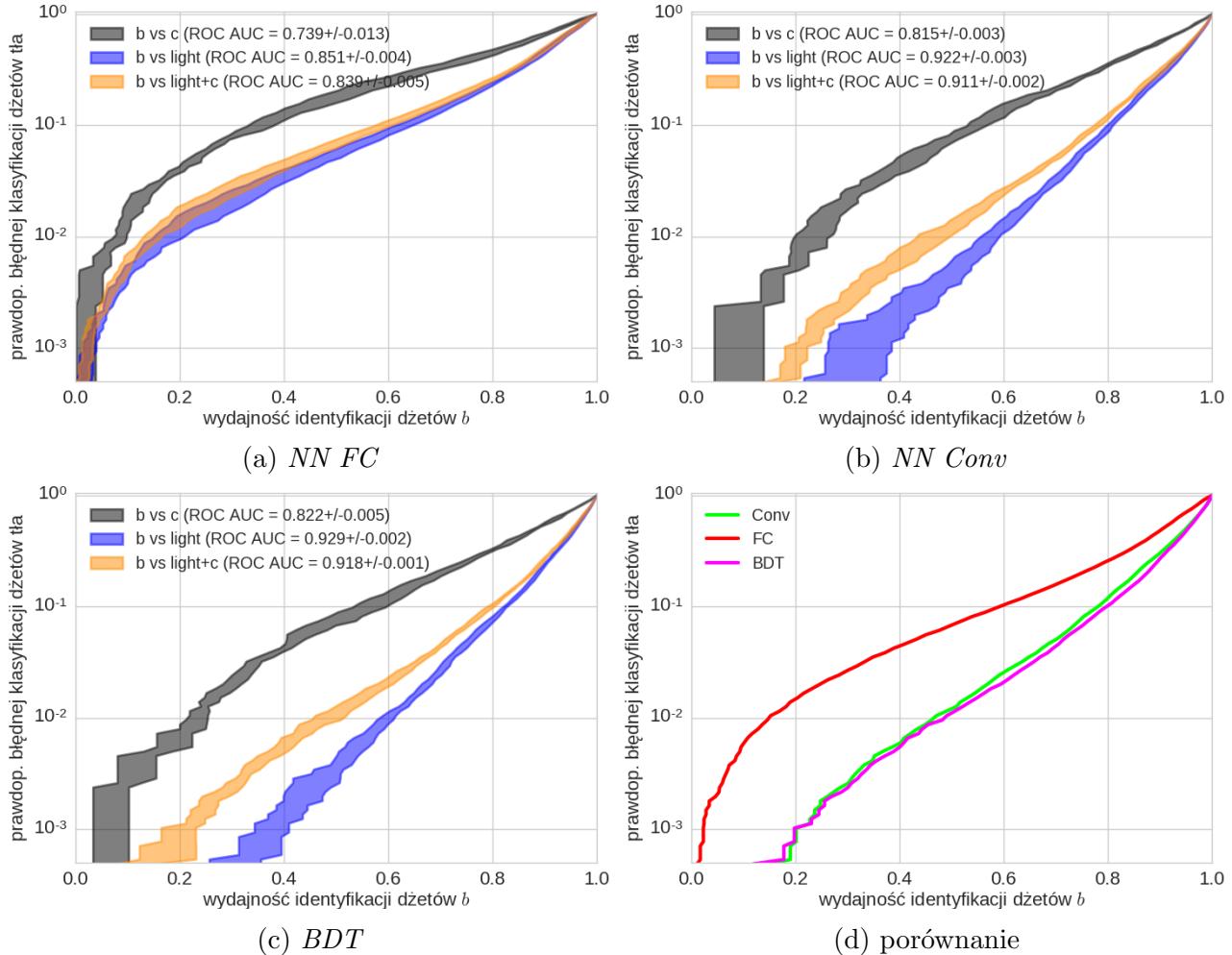
623 Na Rys. 14 przedstawiono rezultaty uzyskane przy trenowaniu na zbiorze danych *SV*. Uzyskano
 624 bardzo zbliżone wyniki dla wszystkich trzech algorytmów, sieci konwolucyjne były nieznacznie
 625 skuteczniejsze przy wydajnościach na identyfikację dżetów b poniżej 70% – dla tych samych
 626 prawdopodobieństw błędnej klasyfikacji tła uzyskiwały wydajności identyfikacji lepsze o ok.
 627 5%.



Rysunek 14: Zależności wydajności identyfikacji dżetów b od prawdopodobieństwa błędnej klasyfikacji dżetów tła dla poszczególnych algorytmów oraz ich porównanie. Algorytmy wytrenowane na zmiennych *SV*.

628 4.2.2 Wyniki dla zmiennych związanych z częstками tworzącymi dżet

629 Na Rys. 15 przedstawiono rezultaty uzyskane przy trenowaniu na zbiorze danych *constit*. Wyniki
 630 dla *BDT* oraz *Conv* są niemal identyczne, dla *BDT* trochę lepsze niż w przypadku zestawu da-
 631 nych *SV*, natomiast te uzyskane dla sieci neuronowych typu *FC* są znacznie gorsze. Stosunkowo
 632 najmniejsze różnice pomiędzy zestawami danych *SV* i *constit* dla algorytmu *FC* otrzymano w
 633 przypadku separacji dżetów *b* od *c*.

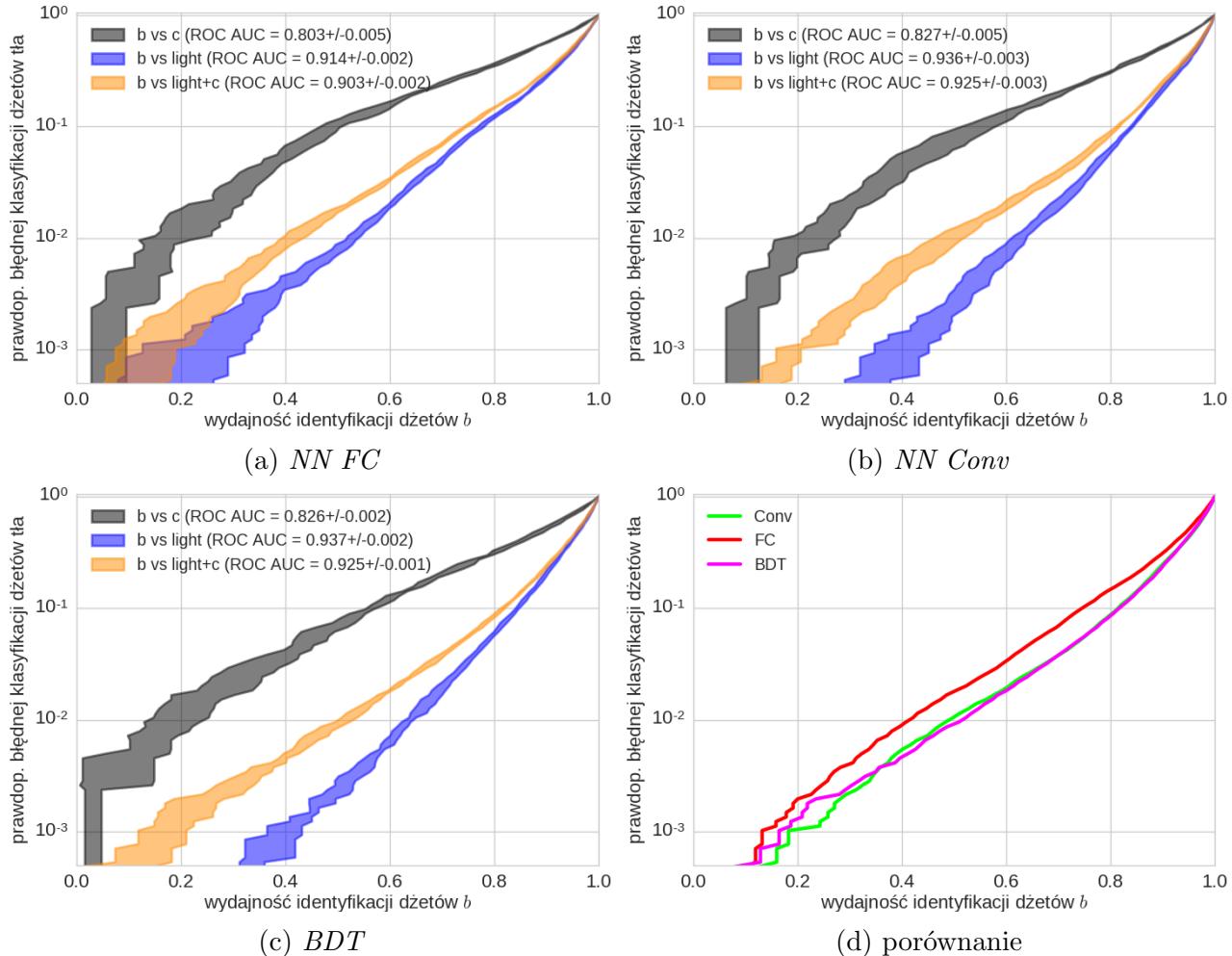


Rysunek 15: Zależności wydajności identyfikacji dżetów *b* od prawdopodobieństwa błędnej klasyfikacji dżetów tła dla poszczególnych algorytmów oraz ich porównanie. Algorytmy wytreno-
 wane na zmiennych *constit*.

634 4.2.3 Wyniki dla wszystkich zmiennych

635 Na Rys. 16 przedstawiono rezultaty uzyskane przy trenowaniu na zbiorze danych *merged*. Po-
 636 nownie krzywe ROC wzmacnianych drzew decyzyjnych i sieci konwolucyjnych prawie się nie
 637 różnią, natomiast dla sieci w pełni połączonych krzywa jest przesunięta o ok. 0.1 #### w stronę
 638 niższych wydajności.

639 W porównaniu do poprzednich zbiorów danych wszystkie algorytmy poprawiły swoje pre-
 640 dykcie, najmniej *FC*, którego zdolności separacyjne są prawie takie same jak w przypadku *SV*
 641 (trochę lepsza separacja *b* od *c*).



642 Rysunek 16: Zależności wydajności identyfikacji dżetów *b* od prawdopodobieństwa błędnej klas-
 643 yfikacji dżetów tła dla poszczególnych algorytmów oraz ich porównanie. Algorytmy wytreno-
 644 wane na zmiennych *merged*.

642 4.2.4 Podsumowanie

643 Uzyskane wartości *ROC AUC* oraz wydajności identyfikacji dżetów *b* dla trzech punktów pracy
 644 zebrane w Tab. 1.

645 Tak jak było to widać na Rys. 13, z *ROC AUC* najbardziej skorelowane są wydajności dla
 646 punktu pracy o najwyższych wydajnościach. Wynika to z faktu, że pierwsze dwa punkty pracy
 647 leżą na samym początku krzywej ROC (dają niewielki wkład do pola pod krzywą).

648 Algorytm wytrenowany na połączonym zbiorze danych daje trochę lepsze wyniki niż treно-
 649 wany na zbiorach *SV* i *constit*, co jest oczywiście oczekiwane. Można było natomiast spodziewać

650 się większej poprawy, co pokazuje, że predykcje algorytmów trenowanych na *SV* oraz *constit*
 651 muszą być skorelowane (przy założeniu, że model trenowany na dwóch połączonych zbiorach
 652 danych daje wyniki niegorsze niż trywialne połączenie dwóch modeli trenowanych na osobnych
 653 zbiorach danych).

654 W każdym przypadku najgorsze wyniki uzyskano dla sieci w pełni połączonych. Z tabeli
 655 wynika, że duże znaczenie mają zarówno użyty algorytm jak i zestaw danych. Wysokie po-
 656 dobieństwo wyników uzyskiwanych dla *BDT* oraz *Conv* pozwala przypuszczać, że uzyskiwane
 657 przez nie poziom błędu jest zbliżony do minimum osiągalnego przy tych zestawach danych
 658 (błędu *Bayesowskiego*).

model	<i>ROC AUC</i>	wydajność identyfikacji dżetów <i>b</i> [%]		
		dla prawd. błędnej klas. tła równej	0.1%	1%
<i>SV-FC</i>	0.901 ± 0.003	15 ± 3	39 ± 2	73.7 ± 0.6
<i>SV-Conv</i>	0.912 ± 0.001	18 ± 3	45 ± 2	76.4 ± 0.8
<i>SV-BDT</i>	0.909 ± 0.002	13 ± 4	38 ± 1	76.3 ± 0.6
<i>constit-FC</i>	0.839 ± 0.005	2 ± 1	15 ± 2	58.6 ± 1.5
<i>constit-Conv</i>	0.911 ± 0.002	20 ± 2	46 ± 3	77.8 ± 0.6
<i>constit-BDT</i>	0.918 ± 0.001	20 ± 3	48 ± 3	79.4 ± 0.7
<i>merged-FC</i>	0.903 ± 0.002	13 ± 6	41 ± 2	74.2 ± 0.3
<i>merged-Conv</i>	0.925 ± 0.003	18 ± 2	48 ± 3	81.3 ± 0.4
<i>merged-BDT</i>	0.925 ± 0.001	16 ± 5	51 ± 1	81.4 ± 0.4

Tablica 1: Tabela podsumowująca wyniki uzyskane przez poszczególne modele.

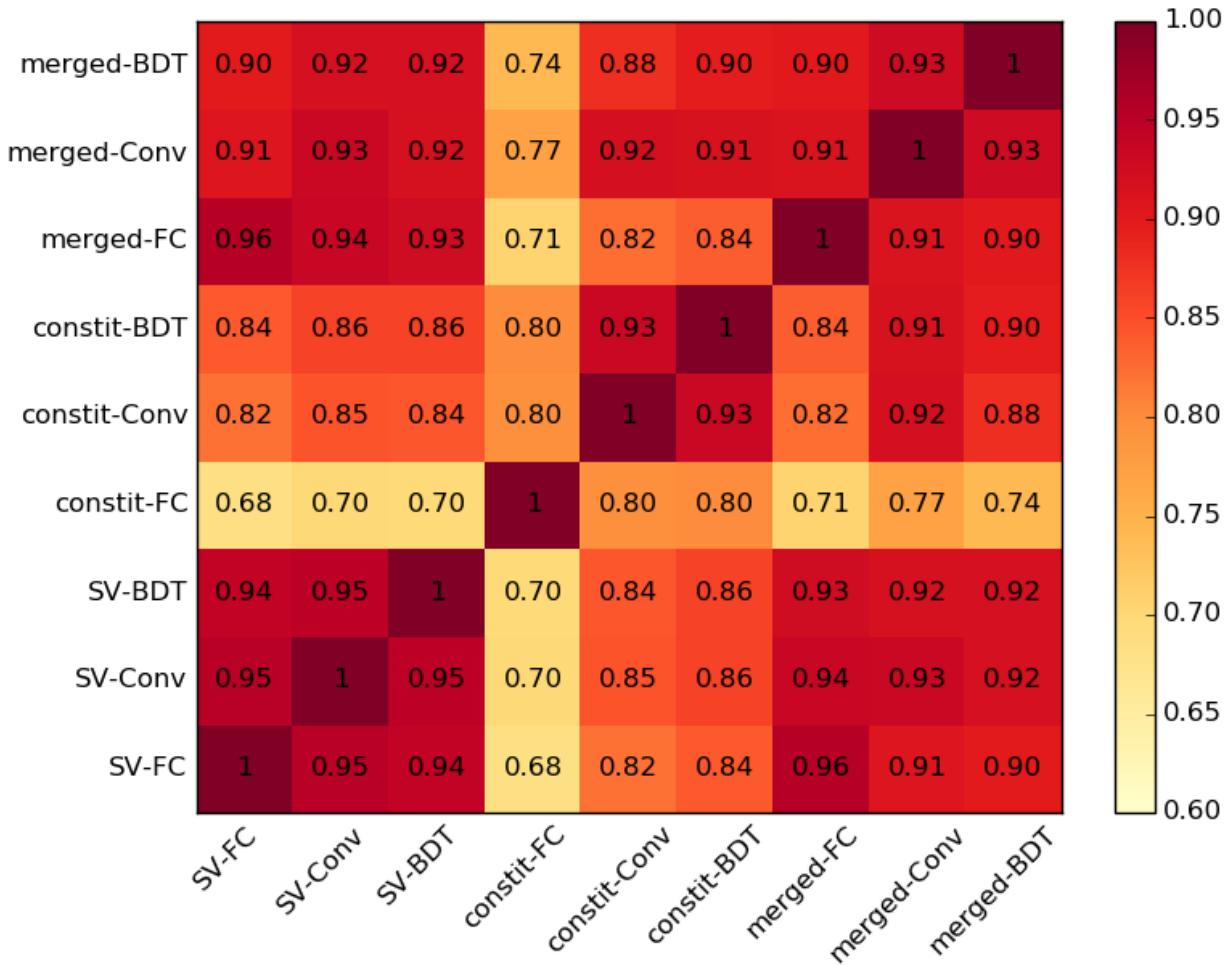
659 4.3 Korelacje predykcji modeli

660 Na Rys. 17 przedstawiono korelacje pomiędzy poszczególnymi modelami. Korelacje obliczano
 661 pomiędzy wynikami zwracanym bezpośrednio przez algorytmy (liczba rzeczywista $\in [0, 1]$), nie
 662 na podstawie odpowiadających im klas ($\{0, 1\}$).

663 Pierwszy wniosek płynący z wykresu korelacji to fakt, że wszystkie modele są ze sobą silnie
 664 skorelowane. Tłumaczy to niewielki zysk płynący z połączenia zestawów danych *SV* i *constit*
 665 co wspomniano w podrozdziale 4.2.4.

666 Najmniejszymi korelacjami z innymi wyróżnia się model *constit-FC*, który dawał zdecydo-
 667wanie najsłabsze wyniki.

668 Widać wyraźny wzrost korelacji w przypadku modeli trenowanych na tych samych zbiorach
 669 danych (szczególnie dla modeli trenowanych na zmiennych związanych z wtórnymi wierzchoł-
 670 kami). Modele trenowane na połączonym zbiorze danych są nieco silniej skorelowane z modelami
 671 *SV-X* niż *constit-X*. Nie obserwuje się natomiast istotnie większych korelacji między modelami
 672 wykorzystującymi ten sam algorytm.



Rysunek 17: Średnie współczynniki korelacji Pearsona pomiędzy predykcjami poszczególnych modeli. Odchylenia standarodowe wynosiły 0.001 – 0.009.

673 4.4 Analiza istotności cech

674 Jedną z zalet drzew decyzyjnych jest możliwość dokładnego prześledzenia procesu decyzyjnego
 675 poprzedzającego klasyfikację danego przypadku, co pozwala na lepsze zrozumienie działania
 676 modelu. Cecha ta zanika w przypadku stosowania klasyfikatora złożonego z dużej ilości drzew,
 677 jak *BDT* jednak nadal istnieją dosyć proste sposoby na zrozumienie, które cechy miały naj-
 678 większy wpływ na predykcję.

679 Wykorzystano trzy miary istotności zmiennych zaimplementowane w bibliotece **XGBoost**:⁴
 680 *weight* informuje ile razy dana zmienna została wykorzystana w podziałach drzew. *total_gain*
 681 jest sumą po spadkach funkcji straty uzyskiwanych dzięki podziałom wykorzystującym daną
 682 zmienną, natomiast *total_cover* to suma liczb przykładów trenujących, na które miały wpływ
 683 podziały wykorzystujące daną zmienną.

684 Zasadniczo najważniejszą miarą jest *total_gain*, gdyż uwzględnia ona zarówno częstość wyko-
 685 rzystania danej zmiennej (*weight*) jak i średni zysk w postaci spadku funkcji straty uzyskiwany
 686 w poszczególnych podziałach. Zmienna binarna wykorzystana już w jednym podziale drzewa,
 687 nie może zostać użyta ponownie w żadnej gałęzi będącej kontynuacją danego podziału, stąd
 688 zmienne binarne zwykle osiągają mniejsze wartości miary *weight*. *total_cover* jest z kolei zwią-
 689 zane z głębokościami drzewa na jakiej wykorzystywana była zmienna – pierwszy podział w
 690 danym drzewie wpływa zawsze na wszystkie przykłady trenujące, natomiast kolejne – na stop-

⁴nazwy miar pochodzą z wersji biblioteki dla języka Python, w wersji dla innych języków, np. R nazwy miar oraz ich znaczenie są różne

691 niowo coraz mniejszy ułamek. Zatem niskie wartości *total_cover* sugerują, że dana zmienna
692 wykorzystywana była raczej na dużych głębokościach (na już mocno podzielonym drzewie).

693 W Tab. 2 przedstawiono wartości miar istotności zmiennych dla 15 najważniejszych cech (wg
694 *total_gain*) dla modeli *SV-BDT* oraz *constit-BDT*. Z kolei w Tab. 3 przedstawiono wartości tych
695 miar pogrupowane wg wielkości fizycznych. Wartości każdej miary zostały znormalizowane do
696 100 (dla wszystkich elementów, nie tylko tych przedstawionych w tabelach). System oznaczeń
697 opisany jest w Dodatku B.

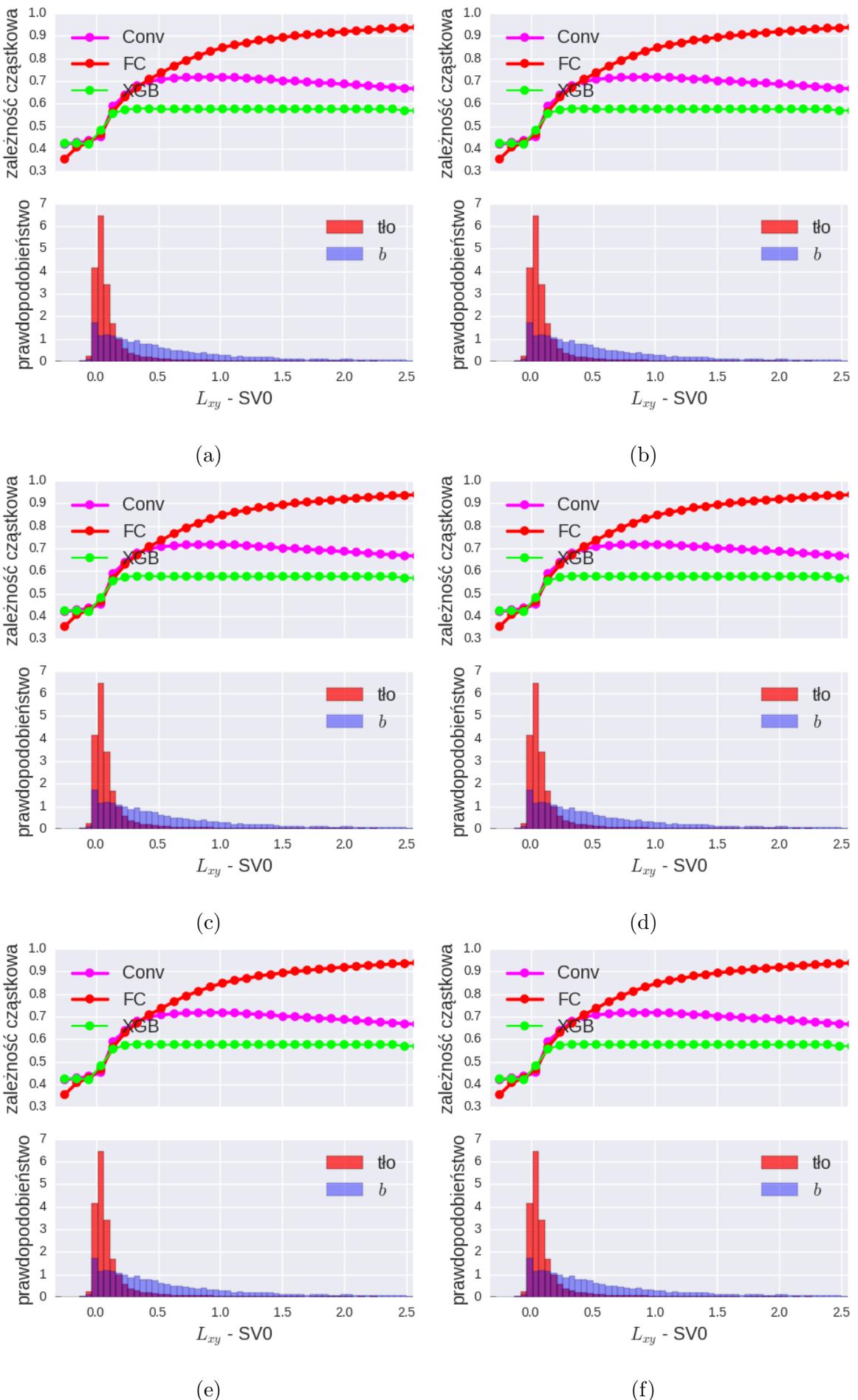
698 Zdecydowanie najważniejszymi zmiennymi okazały się: L_{xy} w przypadku wtórnego wierz-
699 chołków oraz IP_D w przypadku części składowych dżetu, czyli zmienne związane z długim
700 czasem życia pięknego hadronów. Wyraźna jest także tendencja, że im wyższa pozycja elementu
701 na liście, tym istotniejsze są jego właściwości (najistotniejsze są elementy nr 0), co potwierdza

	<i>weight</i>	trening osobno <i>total_gain</i>	<i>total_cover</i>
L_{xy} - SV0	2.76	13.37	4.68
L_{xy} - SV2	1.88	9.83	3.80
L_{xy} - SV3	1.66	7.68	3.51
L_{xy} - SV1	1.34	6.79	2.84
L_{xy} - SV5	0.77	3.79	1.78
L_{xy} - SV4	1.03	2.79	2.06
χ^2/Ndf - SV0	3.30	2.30	2.56
L_{xy} - SV6	0.96	2.21	1.75
L_{xy} - SV8	0.96	2.14	1.81
L_{xy} - SV7	0.89	1.99	1.59
N_{SV}	0.73	1.73	1.33
σ_{vertex} - SV0	2.70	1.40	2.08
σ_{Lxy} - SV9	0.91	1.36	1.38
χ^2/Ndf - SV3	1.91	1.33	2.14
M_{inv} - SV9	0.77	1.31	1.24
IP_D - C0	2.73	19.29	9.68
IP_D - C1	2.76	15.06	8.74
IP_D - C2	3.39	11.37	8.69
IP_D - C3	2.84	6.56	6.16
IP_Z - C0	3.01	5.26	5.86
IP_D - C4	3.02	3.90	5.37
IP_Z - C1	2.50	3.44	4.63
IP_Z - C2	2.29	2.28	3.55
IP_D - C5	1.95	1.67	3.15
IP_Z - C3	2.14	1.50	2.65
IP_D - C6	2.07	1.33	2.96
IP_Z - C4	1.95	1.10	2.16
p_T - C0	2.22	1.00	1.79
p_T - C2	2.14	0.98	2.04
ϕ - C0	2.31	0.98	1.27

Tablica 2: Tabela zawierająca wartości miar istotności 15 najważniejszych (wg *total_gain*) cech, osobno dla zmiennych związanych z wtórnymi wierzchołkami (górsza połowa) oraz z częstotliwościami składowymi (dolna połowa).

	trening osobno			trening razem		
	weight	total_gain	total_cover	weight	total_gain	total_cover
L_{xy}	17.2	54.5	28.9	6.9	21.1	12.9
σ_{Lxy}	19.4	13.1	18.1	7.2	8.5	7.9
M_{inv}	18.3	8.0	14.1	7.6	6.8	6.8
σ_{vertex}	17.0	8.2	14.2	6.6	6.0	6.9
χ^2/Ndf	19.3	12.8	19.5	7.1	6.6	7.9
IP_D	22.4	60.6	47.5	11.3	12.3	16.1
IP_Z	18.3	16.1	23.3	9.9	7.7	9.3
p_T	14.0	7.1	14.1	7.0	5.7	6.2
ϕ	23.2	8.7	8.2	12.4	8.4	8.2
η	21.7	7.3	6.4	13.0	8.8	8.9

Tablica 3: Tabela zawierająca wartości miar istotności cech, posumowane według rodzaju zmiennej (sumy po wszystkich wtórnego wierzchołkach / wszystkich cząstkach). Wartości w lewej części odpowiadają modelom *SV-BDT* i *constit-BDT* natomiast z prawej – *merged-BDT*. Kolumny nie sumują się do 100, ze względu na pominięcie zmiennych występujących jeden raz dla każdego dżetu, tj. N_{SV} i $N_{Constit}$ oraz zmiennych na poziomie dżetu.



Rysunek 18: Zależności

702 Bibliografia

- 703 [1] Donald H. Perkins. "Oddziaływanie międzykarkowe i chromodynamika kwantowa". W:
704 *Wstęp do Fizyki Wysokich Energii*. 2 wydr. PWN, 2005, 171–193.
- 705 [2] David J. Gross i Frank Wilczek. "Ultraviolet Behavior of Nonabelian Gauge Theories".
706 W: *Phys. Rev. Lett.* 30 (1973). [,271(1973)], s. 1343–1346. DOI: 10.1103/PhysRevLett.
707 30.1343.
- 708 [3] H. David Politzer. "Reliable Perturbative Results for Strong Interactions?" W: *Phys. Rev.*
709 *Lett.* 30 (1973). [,274(1973)], s. 1346–1349. DOI: 10.1103/PhysRevLett.30.1346.
- 710 [4] C. Patrignani i in. "Review of Particle Physics". W: *Chin. Phys.* C40.10 (2016), s. 100001.
711 DOI: 10.1088/1674-1137/40/10/100001.
- 712 [5] John C. Collins i M. J. Perry. "Superdense Matter: Neutrons Or Asymptotically Free
713 Quarks?" W: *Phys. Rev. Lett.* 34 (1975), s. 1353. DOI: 10.1103/PhysRevLett.34.1353.
- 714 [6] N. Cabibbo i G. Parisi. "Exponential Hadronic Spectrum and Quark Liberation". W:
715 *Phys. Lett.* 59B (1975), s. 67–69. DOI: 10.1016/0370-2693(75)90158-6.
- 716 [7] D. Boyanovsky, H. J. de Vega i D. J. Schwarz. "Phase transitions in the early and the
717 present universe". W: *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* 56 (2006), s. 441–500. DOI: 10.1146/
718 annurev.nucl.56.080805.140539. arXiv: hep-ph/0602002 [hep-ph].
- 719 [8] Mark G. Alford i Kai Schwenzer. "What the Timing of Millisecond Pulsars Can Teach
720 us about Their Interior". W: *Phys. Rev. Lett.* 113.25 (2014), s. 251102. DOI: 10.1103/
721 PhysRevLett.113.251102. arXiv: 1310.3524 [astro-ph.HE].
- 722 [9] Vardan Khachatryan i in. "Evidence for collectivity in pp collisions at the LHC". W:
723 *Phys. Lett.* B765 (2017), s. 193–220. DOI: 10.1016/j.physletb.2016.12.009. arXiv:
724 1606.06198 [nucl-ex].
- 725 [10] Jaroslav Adam i in. "Enhanced production of multi-strange hadrons in high-multiplicity
726 proton-proton collisions". W: *Nature Phys.* 13 (2017), s. 535–539. DOI: 10.1038/nphys4111.
727 arXiv: 1606.07424 [nucl-ex].
- 728 [11] Matteo Cacciari, Gavin P. Salam i Gregory Soyez. "The Anti-k(t) jet clustering algori-
729 thm". W: *JHEP* 04 (2008), s. 063. DOI: 10.1088/1126-6708/2008/04/063. arXiv:
730 0802.1189 [hep-ph].
- 731 [12] Vardan Khachatryan i in. "Charged-particle nuclear modification factors in PbPb and
732 pPb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV". W: *JHEP* 04 (2017), s. 039. DOI: 10.1007/
733 JHEP04(2017)039. arXiv: 1611.01664 [nucl-ex].
- 734 [13] Betty Abelev i in. "Centrality Dependence of Charged Particle Production at Large Trans-
735 verse Momentum in Pb–Pb Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV". W: *Phys. Lett.* B720 (2013),
736 s. 52–62. DOI: 10.1016/j.physletb.2013.01.051. arXiv: 1208.2711 [hep-ex].
- 737 [14] Carlos A. Salgado i Urs Achim Wiedemann. "Calculating quenching weights". W: *Phys.*
738 *Rev.* D68 (2003), s. 014008. DOI: 10.1103/PhysRevD.68.014008. arXiv: hep-ph/0302184
739 [hep-ph].
- 740 [15] Yuri L. Dokshitzer i D. E. Kharzeev. "Heavy quark colorimetry of QCD matter". W:
741 *Phys. Lett.* B519 (2001), s. 199–206. DOI: 10.1016/S0370-2693(01)01130-3. arXiv:
742 hep-ph/0106202 [hep-ph].
- 743 [16] Georges Aad i in. "Performance of b-Jet Identification in the ATLAS Experiment". W:
744 *JINST* 11.04 (2016), P04008. DOI: 10.1088/1748-0221/11/04/P04008. arXiv: 1512.
745 01094 [hep-ex].

- 746 [17] M. Aaboud i in. “Measurements of b-jet tagging efficiency with the ATLAS detector using
 747 $t\bar{t}$ events at $\sqrt{s} = 13$ TeV”. W: *JHEP* 08 (2018), s. 089. DOI: 10.1007/JHEP08(2018)089.
 748 arXiv: 1805.01845 [hep-ex].
- 749 [18] Serguei Chatrchyan i in. “Identification of b-quark jets with the CMS experiment”. W:
 750 *JINST* 8 (2013), P04013. DOI: 10.1088/1748-0221/8/04/P04013. arXiv: 1211.4462
 751 [hep-ex].
- 752 [19] A. M. Sirunyan i in. “Identification of heavy-flavour jets with the CMS detector in pp
 753 collisions at 13 TeV”. W: *JINST* 13.05 (2018), P05011. DOI: 10.1088/1748-0221/13/
 754 05/P05011. arXiv: 1712.07158 [physics.ins-det].
- 755 [20] Linus Feldkamp. “Study of b-jet tagging performance in ALICE”. W: *J. Phys. Conf. Ser.*
 756 509 (2014), s. 012061. DOI: 10.1088/1742-6596/509/1/012061. arXiv: 1310.2817
 757 [hep-ex].
- 758 [21] Rüdiger Haake. “Machine and deep learning techniques in heavy-ion collisions with ALICE”.
 759 W: *Proceedings, 2017 European Physical Society Conference on High Energy Physics*
 760 (*EPS-HEP 2017*): *Venice, Italy, July 5-12, 2017*. T. EPS-HEP2017. 2017. DOI: 10.22323/
 761 1.314.0498. arXiv: 1709.08497 [physics.data-an]. URL: <https://pos.sissa.it/314/498/pdf>.
- 763 [22] Roel Aaij i in. “Identification of beauty and charm quark jets at LHCb”. W: *JINST* 10.06
 764 (2015), P06013. DOI: 10.1088/1748-0221/10/06/P06013. arXiv: 1504.07670 [hep-ex].
- 765 [23] K. Aamodt i in. “The ALICE experiment at the CERN LHC”. W: *JINST* 3 (2008),
 766 S08002. DOI: 10.1088/1748-0221/3/08/S08002.
- 767 [24] Betty Bezverkhny Abelev i in. “Performance of the ALICE Experiment at the CERN
 768 LHC”. W: *Int. J. Mod. Phys.* A29 (2014), s. 1430044. DOI: 10.1142/S0217751X14300440.
 769 arXiv: 1402.4476 [nucl-ex].
- 770 [25] Wikimedia Commons. *Schematics of the ALICE subdetectors*. 2014. URL: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:2012-Aug-02-ALICE_3D_v0_with_Text_\(1\)_2.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:2012-Aug-02-ALICE_3D_v0_with_Text_(1)_2.jpg).
- 773 [26] Sotiris B Kotsiantis, I Zaharakis i P Pintelas. “Supervised machine learning: A review
 774 of classification techniques”. W: *Emerging artificial intelligence applications in computer*
 775 *engineering* 160 (2007), s. 3–24.
- 776 [27] Marcin Wolter. “Metody analizy wielu zmiennych w fizyce wysokich energii”. Prac. dokt.
 777 IFJ PAN, 2012.
- 778 [28] Leo Breiman. “Bagging predictors”. W: *Machine learning* 24.2 (1996), s. 123–140.
- 779 [29] Yoav Freund i Robert E Schapire. “A decision-theoretic generalization of on-line learning
 780 and an application to boosting”. W: *Journal of computer and system sciences* 55.1 (1997),
 781 s. 119–139.
- 782 [30] Tianqi Chen i Carlos Guestrin. “XGBoost: A Scalable Tree Boosting System”. W: *Proce-*
 783 *edings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and*
 784 *Data Mining*. KDD ’16. San Francisco, California, USA: ACM, 2016, s. 785–794. ISBN:
 785 978-1-4503-4232-2. DOI: 10.1145/2939672.2939785. URL: <http://doi.acm.org/10.1145/2939672.2939785>.
- 787 [31] James Bergstra i Yoshua Bengio. “Random Search for Hyper-parameter Optimization”.
 788 W: *J. Mach. Learn. Res.* 13 (lut. 2012), s. 281–305. ISSN: 1532-4435. URL: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2188385.2188395>.

- 790 [32] Sandhya Samarasinghe. *Neural networks for applied sciences and engineering: from fun-*
 791 *damentals to complex pattern recognition*. Auerbach publications, 2016.
- 792 [33] Ian Goodfellow, Yoshua Bengio i Aaron Courville. *Deep Learning*. <http://www.deeplearningbook.org>. MIT Press, 2016.
- 793
- 794 [34] Kurt Hornik. “Approximation capabilities of multilayer feedforward networks”. W: *Neural*
 795 *Networks* 4.2 (1991), s. 251 –257. ISSN: 0893-6080. DOI: [https://doi.org/10.1016/0893-6080\(91\)90009-T](https://doi.org/10.1016/0893-6080(91)90009-T). URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/089360809190009T>.
- 796
- 797
- 798 [35] Alex Krizhevsky, Ilya Sutskever i Geoffrey E Hinton. “Imagenet classification with deep
 799 convolutional neural networks”. W: *Advances in neural information processing systems*.
 800 2012, s. 1097–1105.
- 801
- 802 [36] Petar Veličković. *Deep learning for complete beginners: convolutional neural networks with*
 803 *keras*. 2017. URL: <https://cambridgespark.com/content/tutorials/convolutional-neural-networks-with-keras/index.html> (term. wiz. 15.07.2018).
- 804
- 805 [37] Andrew Ng. *Convolutional Neural Networks*. 2017. URL: <https://www.coursera.org/learn/convolutional-neural-networks> (term. wiz. 15.07.2018).
- 806
- 807 [38] MathWorks. *Convolutional Neural Network*. URL: <https://www.mathworks.com/solutions/deep-learning/convolutional-neural-network.html> (term. wiz. 15.07.2018).
- 808
- 809 [39] Kendrick Tan. *Capsule Networks Explained*. 2017. URL: https://kndrck.co/posts/capsule_networks_explained/ (term. wiz. 15.07.2018).
- 810
- 811 [40] François Chollet i in. *Keras*. <https://keras.io>. 2015.
- 812
- 813 [41] Martín Abadi i in. *TensorFlow: Large-Scale Machine Learning on Heterogeneous Systems*.
 Software available from tensorflow.org. 2015. URL: <https://www.tensorflow.org/>.
- 814
- 815 [42] Timothy Dozat. *Incorporating Nesterov Momentum into Adam*. 2015. URL: {http://cs229.stanford.edu/proj2015/054_report.pdf}.
- 816
- 817 [43] Diederik P. Kingma i Jimmy Ba. “Adam: A Method for Stochastic Optimization”. W:
CoRR abs/1412.6980 (2014). arXiv: 1412.6980. URL: <http://arxiv.org/abs/1412.6980>.
- 818
- 819 [44] Nitish Srivastava i in. “Dropout: A Simple Way to Prevent Neural Networks from Over-
 fitting”. W: *J. Mach. Learn. Res.* 15.1 (sty. 2014), s. 1929–1958. ISSN: 1532-4435. URL:
<http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2627435.2670313>.
- 820
- 821 [45] Torbjorn Sjostrand, Stephen Mrenna i Peter Z. Skands. “A Brief Introduction to PYTHIA
 8.1”. W: *Comput. Phys. Commun.* 178 (2008), s. 852–867. DOI: 10.1016/j.cpc.2008.01.036. arXiv: 0710.3820 [hep-ph].
- 822
- 823
- 824 [46] Peter Skands, Stefano Carrazza i Juan Rojo. “Tuning PYTHIA 8.1: the Monash 2013
 Tune”. W: *Eur. Phys. J. C*74.8 (2014), s. 3024. DOI: 10.1140/epjc/s10052-014-3024-y. arXiv: 1404.5630 [hep-ph].
- 825
- 826
- 827 [47] René Brun i in. “GEANT Detector Description and Simulation Tool”. W: (1994). DOI:
 10.17181/CERN.MUHF.DMJ1.
- 828
- 829
- 830 [48] Matteo Cacciari, Gavin P. Salam i Gregory Soyez. “FastJet User Manual”. W: *Eur. Phys. J.* C72 (2012), s. 1896. DOI: 10.1140/epjc/s10052-012-1896-2. arXiv: 1111.6097 [hep-ph].
- 831
- 832 [49] D0 Collaboration. *Observation of Single Top Quark Production*. 2009. URL: https://www-d0.fnal.gov/Run2Physics/top/singletop_observation/singletop_observation_updated.html (term. wiz. 15.07.2018).
- 833
- 834

- 835 [50] Matteo Cacciari i Gavin P. Salam. “Pileup subtraction using jet areas”. W: *Phys. Lett.*
836 B659 (2008), s. 119–126. DOI: 10.1016/j.physletb.2007.09.077. arXiv: 0707.1378
837 [[hep-ph](#)].
- 838 [51] Andrew P Bradley. “The use of the area under the ROC curve in the evaluation of
839 machine learning algorithms”. W: *Pattern recognition* 30.7 (1997), s. 1145–1159.

840 Dodatek A Metryki

841 W poniżej tabeli zebrano stosowane najczęściej miary jakości klasyfikatorów. We wzorach defi-
842 niujących metryki wykorzystano następujące wielkości:

843 TP (ang. *true positives*) – liczba poprawnie zaklasyfikowanych przypadków klasy pozytywnej

844 TN (ang. *true negatives*) – liczba poprawnie zaklasyfikowanych przypadków klasy negatywnej

845 FP (ang. *false positives*) – liczba błędnie zaklasyfikowanych przypadków klasy negatywnej

846 FN (ang. *false negatives*) – liczba błędnie zaklasyfikowanych przypadków klasy pozytywnej

847

nazwa metryki	nazwa angielska	wzór
dokładność	accuracy	$(TP+TN) / (TP+TN+FP+FN)$
precyzja	precision	$TP / (TP+FP)$
czułość, wydajność id. sygnału	recall, sensitivity, TP Rate	$TP / (TP+FN)$
swoistość	specificity, TN Rate	$TN / (TN+FP)$
F1	F1	$2 \frac{precision \cdot recall}{precision + recall}$
prawd. błędnej klas. tła	mistagging rate, FP Rate	$FP / (FP+TN)$

Tablica A1: Tabela zawierająca nazwy i definicje popularnych metryk.

848 Podanie tylko jednej metryki jest zwykle niewystarczające i stosuje się pary metryk, np.
849 precyzja - czułość. Jeśli predykcja klasyfikatora ma charakter ciągły, to poprzez zmienianie
850 wartości progowej otrzymuje się różne punkty pracy, scharakteryzowane przez wartości obu
851 metryk. Kolejne punkty pracy wykreślone np. na wykresie $TPR(FPR)$ dają krzywą nazywaną
852 krzywą ROC. Pole pod tą krzywą (ang. *ROC Area Under Curve – ROC AUC*) jest kolejną
853 metryką, bardzo często wykorzystywaną w praktyce, gdyż łączy w sobie wszystkie możliwe
854 punkty pracy.

855 W literaturze dot. klasyfikacji dżetów wyniki zwykle przedstawia się z użyciem dwóch po-
856 wszechnie znanych metryk, ale o zmienionych nazwach: *True Positive Rate*, nazywanej *b jet*
857 *tagging efficiency* – wydajności na identyfikację dżetów *b* oraz *False Positive Rate*, nazywanym
858 *mistagging rate* – prawdopodobieństwa błędnej klasyfikacji dżetów tła jako dżety *b*.

859 Dodatek B Skróty i oznaczenia

860 W pracy używane są następujące skróty i oznaczenia:

- 861 • algorytmy:
862 FC – sieci neuronowe w pełni połączone,
863 $Conv$ – sieci neuronowe konwolucyjne,
864 BDT - wzmacniane drzewa decyzyjne
- 865 • zbiory danych:
866 SV – zestaw zawierający tylko zmienne związane z wtórnymi wierzchołkami,
867 $constit$ – zestaw zawierający tylko zmienne związane z częstками tworzącymi dżet,
868 $merged$ – zestaw zawierający wszystkie zmienne (tj. $SV + Constit +$ zmienne na poziomie
869 dżetu)
- 870 • modele (zestaw danych + algorytm): nazywane są wg wzoru:
871 (oznaczenie_zbioru_danych)-(oznaczenie_algorytmu),
872 np. $SV\text{-}Conv$ oznacza konwolucyjną sieć neuronową wytrenowaną na zmiennych związanych
873 z wtórnymi wierzchołkami a $merged\text{-}BDT$ - wzmacniane drzewa decyzyjne, do
874 treningu których użyte zostały wszystkie zmienne
- 875 • poszczególne zmienne (kolumny w zbiorze danych) oznaczane są według wzoru:
876 (nazwa_zmiennej) – (numer_obiektu),
877 np. $\sigma_{L_{xy}}$ – $SV2$ oznacza niepewność wyznaczenia L_{xy} dla wtórnego wierzchołka nr 2, a
878 IP_Z – parametr zderzenia wzdłuż osi wiązki częstki nr 5 (numery na posortowanych
879 listach, por. Rozdz. 3, gdzie znajdują się także opisy wielkości fizycznych)