

## توزیع تکانه عرضی و تابش گلوئون در فرایندهای نابودی $e^+e^-$ در انرژی مرکز جرم $60\text{ GeV}$

محمدابراهیم زمردیان، محمدرضا شعارابوذری، نیما قلعه، محمد رعایایی علی‌آبادی و حجت الله دانشمند

بخش فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی، مشهد

دریافت نسخه نهایی: ۸۰/۱۱/۱۰

دریافت مقاله: ۸۰/۴/۳

### چکیده

رویدادهای دوجتی و سه جتی حاصل از نابودی زوج  $e^+e^-$  در انرژی مرکز جرم  $60\text{ GeV}$  برای مقایسه بین جتهای گلوئون و جتهای کوآرک مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این مقاله با استفاده از ماتریس تکانه و نمودار مثلثی رویدادهای دوجتی را از رویدادهای سه جتی تفکیک می‌کنیم. می‌توان تفاوت‌هایی بین جتهای کوآرک و جتهای گلوئون مشاهده کرد. جتهای کوآرک ساختار شعاعی باریکتری نسبت به جتهای گلوئون دارند. نتیجه آنکه کسر بزرگتری از انرژی جت کوآرک در نزدیکی محور جت نمایان می‌شود. میانگین چندگانگی رویدادهای سه جتی بزرگتر از این میانگین برای رویدادهای دوجتی است. همچنین نسبت میانگین چندگانگی رویدادهای سه جتی به این میانگین برای رویدادهای دوجتی برابر است با  $1.1506 \pm 0.067$ . این نتایج با نظریه QCD سازگاری دارند.

واژه‌های کلیدی: جت، کوآرک، گلوئون، تکانه عرضی

### ۱. مقدمه

پوزیترون در شتابدهنده TRISTAN در انرژی مرکز جرم  $60\text{ GeV}$  در KEK ژاپن انجام داده‌ایم.

نابودی  $e^+e^-$  به هادرونها مناسبترین مثال از فرایندهای تولید هادرونی است. این فرایندها اجزای اصلی فرایندهای پیچیده‌تری که با هادرونها آغاز می‌شوند به شمار می‌آیند [۵] و [۶].

بر اساس مدل پارتون، نابودی زوج الکترون-پوزیترون منجر به تولید یک کوآرک و یک پادکوآرک می‌شود که حامل بار رنگ هستند. حالت نهایی ممکن است به صورت دو جت هادرونی در خلاف جهت یکدیگر باشد و یا این امکان وجود دارد که یکی از کوآرکها یک گلوئون تابش کند. در این صورت یک رویداد سه جتی خواهیم داشت. جت عبارت از مجموعه‌ای از هادرونهاست (معمولاً پیونها) که همه آنها در یک جهت خاص تولید می‌شوند.

فیزیک تفاوت بین جتهای کوآرک و جتهای گلوئون در دو دهه گذشته در آزمایشهای مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. این آزمایشها برهمکنشهای  $e^+e^- [1]$  و برهمکنشهای هادرونی [۲] را شامل می‌شوند. در مرجع [۳] آمده است که توزیعهای ذره‌ای که در رویدادهای سه جتی از تابش گلوئون سخت  $qq\bar{q}g \rightarrow e^+e^-$  به دست می‌آیند تنها توسط مدل‌هایی توصیف می‌شوند که در آنها جتهای گلوئون دارای ساختار پهنتری نسبت به جتهای کوآرک در انرژیهای یکسان هستند. بنابراین زاویه راس جت برای جتهای گلوئون از جتهای کوآرک بزرگتر بوده و چندگانگی آنها از چندگانگی جتهای کوآرک بیشتر خواهد بود [۴]. در این مقاله یک مقایسه تجربی از محصولات جتهای کوآرک و جتهای گلوئون را بر پایه تحلیل رویدادهای مشاهده شده توسط آشکارساز AMY در حلقه انباشت الکترون-

آشکارساز یک ناحیه زاویه‌ای  $\cos\theta < 0.73$  را کاملاً می‌پوشاند. به این ترتیب، تکانه ذرات باردار در CDC و انرژی ذرات خنثی در SHC اندازه‌گیری می‌شوند. در این آزمایش میانگین انرژی مرکز جرم مساوی با 60 GeV و تابندگی کل<sup>۱</sup> مساوی با  $160 \text{ Pb}^{-1}$  می‌باشد. در این مقاله از تعداد 700 رویداد استفاده شده است. برای شرح کاملتری از آشکارساز AMY مرجع [۷] را ببینید.

### ۳. تفکیک رویدادهای دوجتی و رویدادهای سه جتی

برای جداسازی رویدادهای دوجتی از رویدادهای سه جتی از تانسور تکانه به صورت زیر استفاده می‌کنیم:

$$\Pi_{\alpha\beta} = \sum_j P_{j\alpha} P_{j\beta} \quad (1)$$

که در آن جمع بر روی ذرات باردار است، P تکانه ذره  $j$ ام است و  $\alpha$  و  $\beta$  مربوط به سه مؤلفه فضایی تکانه  $P_j$  می‌باشند.  $\mu_1, \mu_2$  و  $\mu_3$  ویژه مقادیر متناظر با ماتریس  $\Pi$  هستند، رابطه زیر بین ویژه مقادیر برقرار است.

$$\mu_1 < \mu_2 < \mu_3 \quad (2)$$

به دلیل آنکه رد یک ماتریس مستقل از نمایش است داریم:

$$\mu_1 + \mu_2 + \mu_3 = \sum_j P_j^2 \quad (3)$$

$Q_k$  بهنجار شده  $\mu_k$  عبارت است از:

$$Q_k = \frac{\mu_k}{\sum_j P_j^2}$$

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = 1$$

$$q_1 > q_2 > q_3 > 0 \quad (4)$$

$$0 < Q_1 < \frac{1}{3} \quad 0 < Q_2 < \frac{1}{2} \quad \frac{1}{3} < Q_3 < 1$$

$Q_1$  پهن شدگی رویداد،  $Q_2$  عرض رویداد و  $Q_3$  طول رویداد را به دست می‌دهد. رویدادهای هم خط توسط  $Q_3 \ll Q_2$  و رویدادهای هم صفحه توسط  $Q_1 \gg Q_2$  توصیف می‌شوند. کرویت<sup>۲</sup> به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$S = \frac{\sqrt{3}}{2} (Q_1 + Q_2) \quad (5)$$

$$A = \frac{3}{2} Q_1$$

دینامیک کوانتومی رنگ (QCD) به عنوان یک نظریه برای برهمکنشهای قوی در نظر گرفته می‌شود. در این نظریه نیروی قوی با تبادل گلوئونهای برداری بدون جرم بین کوارکها مبادله می‌شود. انتظار می‌رود که جفت شدگی کوارکها با گلوئون، با افزایش تکانه کاهش یابد به طوری که در انرژیهای بسیار بالا محاسبات بر پایه نظریه اختلال معتبر باشد.

با وجود این در استفاده از QCD در وضعیتهای تجربی، اثرات انتقال از کوارکها و گلوئونهای غیرقابل مشاهده به هادرونها قابل مشاهده به طور فیزیکی اجتناب ناپذیر است. این یک تابعیت پیچیده در انرژیهای پایین برای حالتی است که فرایند اختلال QCD قابل استفاده نیست و باید از مدل‌های پدیده شناختی استفاده کرد. نارسایی در مدل‌های حاضر مانع بزرگی برای امتحان QCD است. بنابراین کسب اطلاعات تجربی از فرایندهای هادرونی شدن با استفاده از واکنشهایی که دینامیک پارتون اولیه به خوبی قابل درک باشد، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. نابودی زوج  $e^+e^-$  به سه جت هادرونی که به سادگی به عنوان ترکیبی از دو جت کوارک و یک جت گلوئون تعبیر می‌شود، فرصت مناسبی برای مقایسه مستقیم فرایندهای هادرونی کوارکها و گلوئونها فراهم می‌سازد. در QCD گلوئونها دارای ضریب رنگ بزرگتری نسبت به کوارکها هستند. بنابراین گلوئونها آهسته‌تر تابش نموده و نسبت به کوارکها دارای ذرات بیشتری می‌باشند [۴]. این امر باعث افزایش تکانه عرضی در جتهای گلوئون می‌شود.

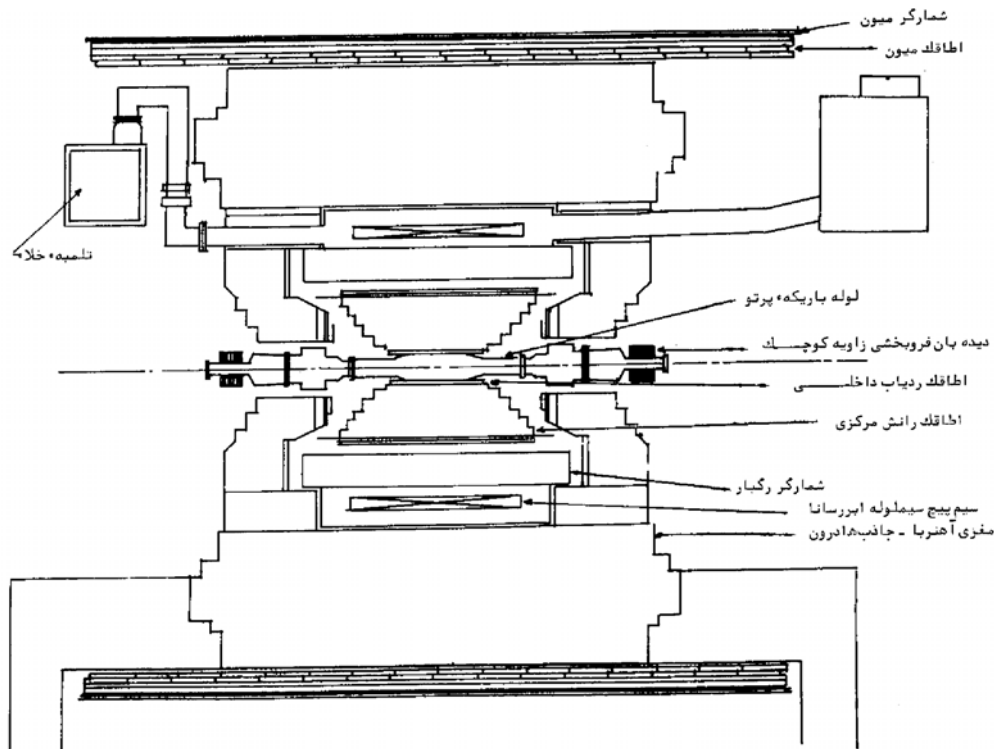
### ۲. شرح آزمایش

آشکارساز AMY (شکل ۱)، مشتمل بر یک آشکارساز ردیاب ذرات باردار و یک شمارگر رگباری است که در داخل یک سیم پیچ مغناطیسی با شدت میدان ۳ تسلا قرار داشته و مجموعه با قطعات ضخیم فولادی محصور شده است. در پشت سر این لایه ضخیم فولادی، دستگاه آشکارساز میون قرار دارد. آشکارساز ذرات باردار مشتمل بر یک آرایه استوانه‌ای با ۴ لایه از لوله‌های قطبی  $\cos\theta < 0.87$  آشکار می‌شوند.

به صورت شعاعی و خارج از CDC یک کالریمتر الکترومغناطیسی به درازای ۱۵ طول تابشی وجود دارد (شمارنده رگباری یا SHC)، که به عنوان یک آشکارساز فوتون عمل می‌کند.

1. integrated luminosity

2. sphericity



شکل ۱. آشکارساز AMY.

پیداست تعداد زیادی از رویدادها دارای  $A$  و  $S$  پایین هستند. این بدان معنی است که در انرژی مرکز جرم 60 GeV اکثر رویدادها دوجتی هستند. تعداد اندکی از رویدادها نیز دارای  $S$  بالا و  $A$  پایین هستند. این خصوصیت رویدادهای سه جتی است. در برنامه کامپیوتری برای جداسازی رویدادهای دوجتی و سه جتی از شرط  $S < 0.2$  استفاده شده است. تعداد رویدادهای دوجتی و سه جتی به انتخاب این شرط بستگی دارد. انتخاب  $S < 0.2$  از مطالعات مونت کارلو تعیین می‌شود [۹]. با استفاده از شرط فوق نسبت رویدادهای دوجتی به سه جتی برابر است با ۲/۳. برای تعیین تعداد جتهای موجود در هر رویداد و ذرات وابسته به هر جت از روش دیگری موسوم به روش JADE [۸] نیز استفاده شده است. در این روش چاربردار ذرات باردار در هر رویداد در نظر گرفته می‌شود و کمیت بدون بعد زیر محاسبه می‌گردد.

$$Y_{ij} = \frac{\sqrt{E_i E_j} (1 - \cos \theta_{ij})}{S} \quad (7)$$

در رابطه بالا  $E_i$  و  $E_j$  به ترتیب انرژی  $i$ -امین و  $j$ -امین ذره می‌باشند،  $\theta_{ij}$  زاویه بین بردارهای تکانه دو ذره را مشخص می‌کند و  $S$  مجذور انرژی قابل مشاهده در رویداد است. در

برای تفکیک رویدادهای دوجتی و سه جتی متغیرهای  $y$  و  $A$  را به صورت زیر تعریف می‌کنیم.

$$y = \frac{\sqrt{3}}{2} (Q_2 - Q_1) \quad (6)$$

$$A = \frac{3}{2} Q_1$$

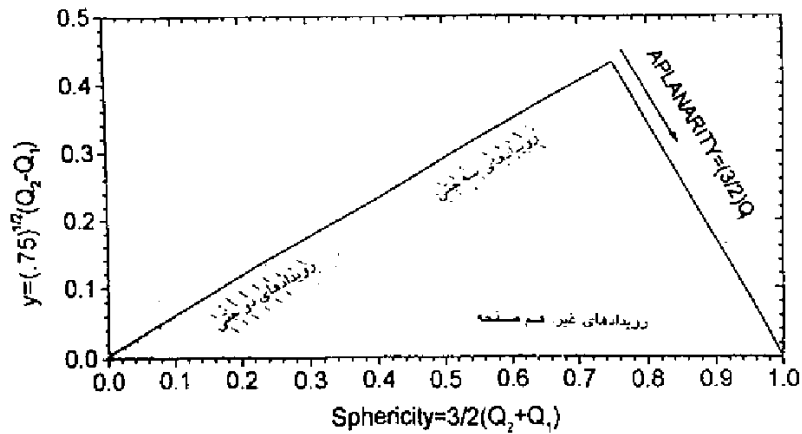
این متغیرها در شرایط زیر صدق می‌کنند:

$$0 < S < 1 \quad 0 < A < \frac{1}{2} \quad 0 < y < \frac{\sqrt{3}}{4}$$

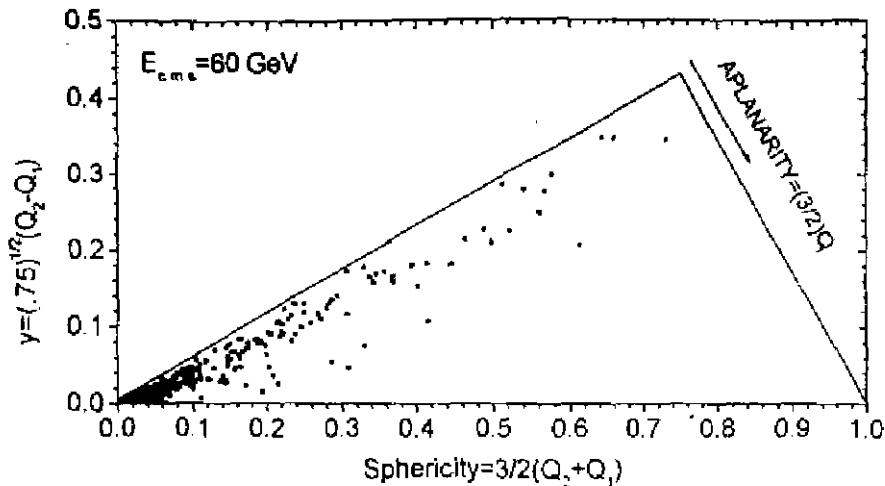
نمودار مربوط به متغیرهای  $S$  و  $Y$  در شکل ۲ رسم شده

است.  $S$  به ازای  $y = \frac{\sqrt{3}}{4}$  برابر است با  $\frac{3}{4}$ . از این نقطه به ابتدا و انتهای محور افقی وصل شده است.  $A$  به طور طبیعی ظاهر می‌شود. در این مثلث می‌توان رویدادهای دوجتی، سه جتی و غیر هم صفحه را از هم تفکیک نمود. برای رویدادهای همگن  $A$  به سمت  $\frac{1}{2}$  میل می‌کند. برای رویدادهای دوجتی و سه جتی  $A$  به صفر نزول می‌کند. این نواحی نیز در شکل ۲ نشان داده شده است.

شکل ۳ این توزیع مثلثی را برای رویدادهای  $e^+e^-$  در انرژی مرکز جرم 60 GeV نشان می‌دهد. همان گونه که از نمودار



شکل ۲. مثلث رویدادهای دوجتی، سه جتی و غیر هم صفحه.



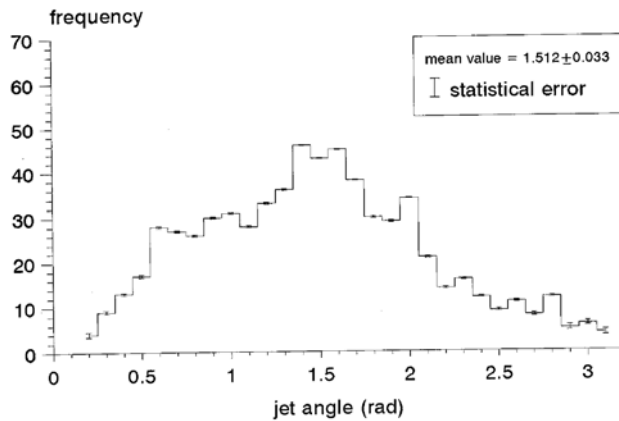
شکل ۳. توزیع مثلث رویدادهای دوجتی، سه جتی و غیر هم صفحه برای رویدادهای  $e^+e^-$  در انرژی مرکز جرم 60 GeV.

#### ۴. نتایج فیزیکی

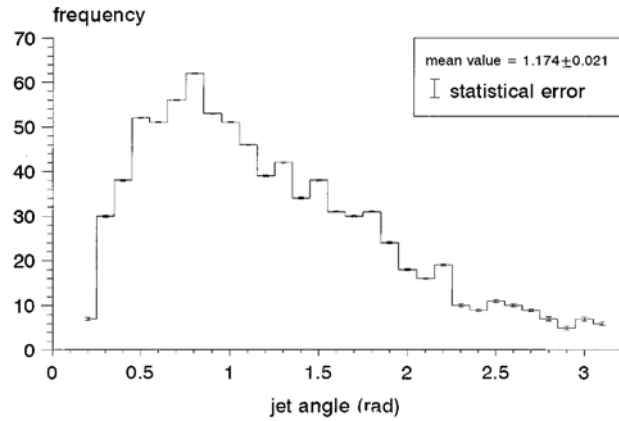
##### ۴.۱. زاویه رأس جت در رویدادهای دو و سه جتی

زاویه رأس جت عبارتست از بزرگترین زاویه بین ذرات موجود در هر جت، که با محاسبه زاویه هر دو ذره از یک جت و پیدا کردن بیشینه این زاویه به دست می‌آید. شکل‌های (۴.الف) و (۴.ب) به ترتیب توزیع فراوانی زاویه رأس جت را برای رویدادهای ۲ جتی و ۳ جتی نشان می‌دهند. با مقایسه این دو نمودار مشاهده می‌شود که مقدار متوسط زاویه جت رویدادهای سه جتی برابر  $1/512 \pm 0/33$  رادیان است که اندکی بزرگتر از مقدار متوسط زاویه جت رویدادهای دوجتی است که برابر  $1/174 \pm 0/21$  رادیان می‌باشد. با توجه به آن که رویدادهای دو جتی فقط جت کوآرک را شامل می‌شوند، اما در رویدادهای سه

اینجا ذرات باردار را به عنوان پایون در نظر می‌گیریم. اگر  $Y_{kl}$  از میان تمام  $Y_{ij}$ های ممکن، کوچکترین باشد، ذرات  $l$  و  $k$  با یک شبه ذره جایگزین می‌شود این رهیافت آنقدر تکرار می‌گردد تا  $Y_{kl}$  از یک  $Y_{cut}$  آستانه تجاوز کند. تعداد شبه ذرات باقیمانده تعداد جتها و بردار تکانه آنها جهت جتها را مشخص می‌کند. توزیع فراوانی جتهای به دست آمده به پارامتر  $Y_{cut}$ ، که از مطالعات مونت کارلو معین می‌شود، بستگی دارد. در این مقاله از  $Y_{cut} = (9 \text{ GeV})^2/S$  استفاده شده است [۸]. شایان ذکر است که روش برش  $S$  و روش JADE نسبتاً یکسانی را برای تعداد رویدادهای دوجتی و رویدادهای سه جتی به دست می‌دهد.



شکل ۴. ب. توزیع فراوانی زاویه راس جت برای رویدادهای سه جتی.



شکل ۴. الف. توزیع فراوانی زاویه راس جت برای رویدادهای دو جتی.

چندگانگی آنها نیز از چندگانگی جتهای کوآرک بیشتر است، از اینرو انتظار می‌رود تکانه عرضی ذرات در جتهای گلوئون نیز بزرگتر از تکانه عرضی ذرات در جتهای کوآرک باشد. برای این منظور شکل ۶. الف و ب توزیع تکانه عرضی را به ترتیب برای رویدادهای دو جتی و سه جتی در انرژی مرکز جرم ۶۰ GeV نشان می‌دهد. میانگین تکانه عرضی برای رویدادهای دو جتی مساوی با  $0.19 \pm 0.183$  و برای رویدادهای سه جتی مساوی با  $0.22 \pm 0.268$  می‌باشد. با مقایسه دو منحنی نتیجه می‌گیریم که حضور جت گلوئون در رویدادهای سه جتی باعث بهتر شدن ساختار جت و از اینرو باعث افزایش میانگین  $P_T$  در این رویدادها می‌شود. بار دیگر این پدیده با مدل‌های QCD سازگار است.

### ۵. بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله یک مقایسه تجربی از خصوصیات جتهای کوآرک و جتهای گلوئون بر مبنای یک تحلیل از رویدادهای جت گونه در انرژی مرکز جرم ۶۰ GeV در برهمکنشهای  $e^+e^-$  انجام شده است. با قطری کردن ماتریس تکانه برای هر رویداد و محاسبه محورهای اصلی و همچنین با استفاده از نمودار مثلی رویدادهای دو جتی را از رویدادهای سه جتی تفکیک نموده‌ایم. این نمودار نشان می‌دهد که در این انرژی بیشتر رویدادها دو جتی هستند. با این همه رویدادهای سه جتی نیز به حد کافی وجود دارند به گونه‌ای که می‌توان دو نوع جت را با یکدیگر مقایسه نمود. نتایج نشان می‌دهند که میانگین زاویه راس جت برای رویدادهای سه جتی بزرگتر از این

جتی علاوه بر جت کوآرک، جت گلوئون نیز وجود دارد، این افزایش میانگین در رویدادهای سه جتی را می‌توان دلیلی بر بزرگتر بودن زاویه جت گلوئون و از اینرو بهتر بودن آن نسبت به جت کوآرک دانست. این نتیجه با نظریه QCD نیز مطابقت دارد [۴].

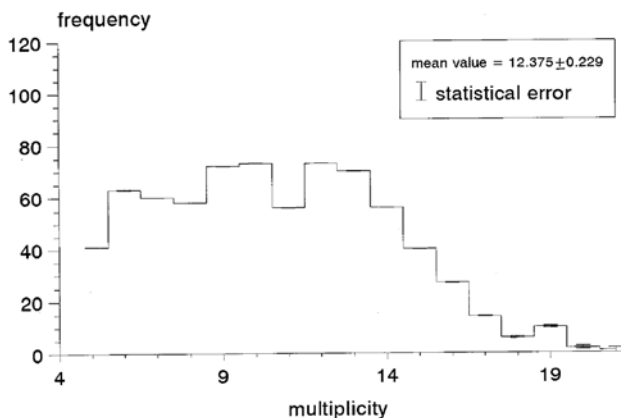
### ۲.۴. چندگانگی<sup>۱</sup> جتها در رویدادهای دو و سه جتی

تعداد ذرات موجود در هر جت را چندگانگی آن جت می‌نامیم. برای توضیح بیشتر، شکلهای (الف.۵) و (ب.۵) به ترتیب توزیع فراوانی چندگانگی جتها را در رویدادهای دو جتی و سه جتی نشان می‌دهد. جتهای با کمتر از ۴ ذره حذف شده‌اند. همچنین از آنجا که جتها از ذرات پرنرژی تشکیل می‌شوند، جتهای با کمتر از انرژی ۱ GeV نیز حذف شده‌اند. مقدار متوسط چندگانگی در رویدادهای دو جتی برابر با  $2.13 \pm 0.217$  و در رویدادهای سه جتی برابر با  $2.29 \pm 0.375$  می‌باشد. این افزایش چندگانگی در رویدادهای سه جتی دلیلی بر بزرگتر بودن چندگانگی جتهای گلوئون نسبت به جتهای کوآرک است. نسبت این دو میانگین عبارتست از  $0.67 \pm 0.0506$ ، که با نتیجه حاصل از آزمایش OPAL در CERN که در انرژی ۹۱ GeV انجام شده است و برابر است با  $0.6 \pm 0.051$  نیز توافق خوبی دارد [۱۰].

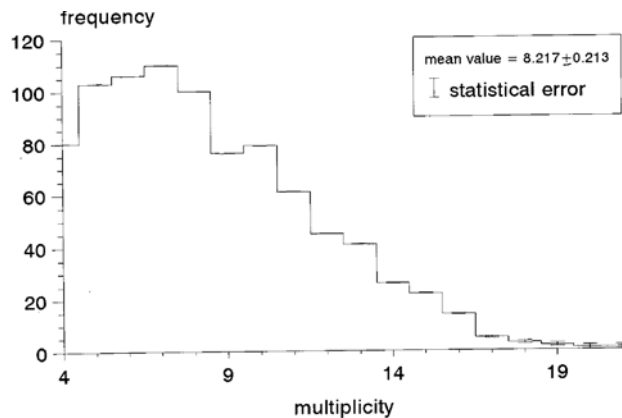
### ۳.۴. تکانه عرضی در رویدادهای دو و سه جتی

با توجه به آنکه جتهای گلوئون از جتهای کوآرک بهتر بوده و

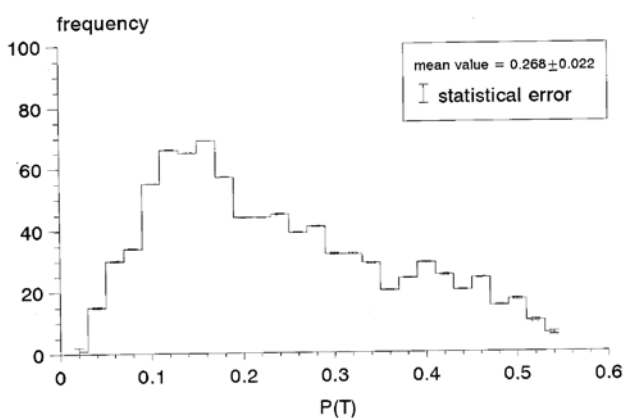
## 1. Multiplicity



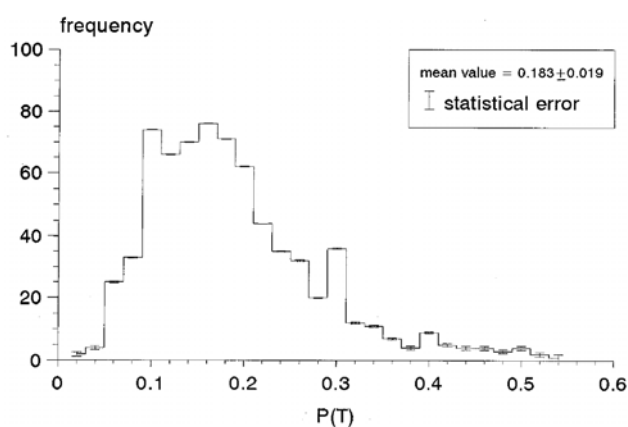
شکل ۵.ب. توزیع چندگانگی برای رویدادهای سه جتی.



شکل ۵.الف. توزیع چندگانگی برای رویدادهای دو جتی.



شکل ۶.ب. توزیع تکانه عرضی برای رویدادهای سه جتی.



شکل ۶.الف. توزیع تکانه عرضی برای رویدادهای دو جتی.

علاوه، میانگین تکانه عرضی برای رویدادهای سه جتی بزرگتر از این میانگین برای رویدادهای دو جتی است. این نتایج نیز با نظریه دینامیک رنگ سازگاری دارند.

میانگین برای رویدادهای دو جتی است. همچنین نسبت میانگین چندگانگی رویدادهای سه جتی به این میانگین در رویدادهای دو جتی برابر است با  $1/0.6 \pm 0.06$  که با نتیجه حاصل از آزمایش OPAL در CERN نیز توافق کامل دارد. به

#### مراجع

1. OPAL Collaboration, G Alexander, J Allison, P P Allport et al., *Phys. Lett. B* **265** (1991) 462; ALEPH Collaboration, D Busculic et al., *Phys. Lett. B* **384** (1996) 353; TASSO Collaboration, *Z. Phys. C* **45** (1989) 193.
2. J Pumplin, *Phys. Rev. D* **44** (1991) 2025; *Phys. Rev. D* **45** (1992) 806.
3. W Bartel et al., JADE Collaboration, *Phys. Lett. B* **101** (1981) 129; H Aihara, M Alston-Garjost, J A Bakken et al., *Phys. Rev. Lett.* **54** (1985) 270.
4. Z Bern et al., *Phys. Rev. Lett.* **70** (1993) 2677; G S Dzhaparidze, *Z Phys. C* **32** (1986) 59; M Dress et al., *J. Phys. G* **21** (1995) 1559.
5. B W Harris et al., *Phys. R. D* **56**, No 7 (1997) 4007.
6. K Klasen et al., *Phys. Rev. D* **56**, No 5 (1997) 2702.
7. Y K li et al., *Phys. Rev. D* **41** (1990) 2675; K B Lee, H Sagawa, Y S Chung et al, *Phys. Lett. B* **313** (1993) 469.
8. W Bartel et al., JADE Collaboration, *Z. Phys. C* **33** (1986) 23.
9. G Bergmann, *Phys. Rep.* **107**, 1 (1984) 123.
10. S Lupia et al., *Phys. Lett. B*, **418** (1998) 214; P Eden et al., *JHEP* **09** 015.