

## بررسی مدل‌های گوناگون QCD و مقایسه آنها با نتایج حاصل از نابودی $e^+e^-$ در انرژی مرکز جرم $60 \text{ GeV}$

ولی حیاتی، محمد ابراهیم زمردیان، حسین شرفی و مهران خسروی  
بخش فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد

(دریافت مقاله: ۸۰/۱۱/۲۳ ؛ دریافت نسخه نهایی: ۸۱/۱۰/۲۵)

### چکیده

در این مقاله مدل‌های گوناگون مبنی بر هادرونی شدن ذرات را مورد بررسی قرار می‌دهیم. برای این منظور ابتدا محور جت را با استفاده از تانسور تکانه و قطری کردن آن برای هر رویداد به دست می‌آوریم. این تحلیل را با بهره‌گیری از آشکارساز AMY در حلقه انباشت  $e^+e^-$  در انرژی مرکز جرم  $60 \text{ GeV}$  در شتابدهنده TRISTAN واقع در KEK ژاپن انجام داده‌ایم. مدل‌های مورد مطالعه عبارتند از: مدل وبر، مدل عناصر ماتریسی و مدل بارش پارتون. در اکثر موارد این مدل‌ها پیشگویی‌های صحیحی از الگوی هادرونی شدن ارائه می‌دهند. نتایج حاصل از داده‌های AMY نیز با این مدل‌ها سازگاری دارند.

واژه‌های کلیدی: کوانتوم رنگ، مدل‌های ترکش، پارتون

### ۱. مقدمه

یکی از موضوعات مهم در فیزیک ذرات بنیادی، درک روشی است که توسط آن کوارکها و گلوئونها در برهمکنش اصلی به صورت ذرات نهایی خارج می‌شوند. این پدیده به هادرونی شدن موسوم است. هم اکنون نظریه معتبر در مورد فرایند هادرونی شدن وجود ندارد، اما پاره‌ای از مدل‌ها به بررسی این پدیده پرداخته‌اند.

دینامیک کوانتمی رنگ (QCD)، نظریه پیمان‌های کوارکهای رنگی و گلوئونها، برای توصیف خواص هادرونها مشخص شد و به صورت یک نظریه قابل قبول برای برهمکنشهای قوی درآمد.

این نظریه به عنوان بخشی از مدل استاندارد الکتروضعیف (گلاشو - سلام - واینبرگ) است که از نظر کمی به خصوص در گذار از پارتونها به هادرونها قابل مشاهده کمترین

آزمایش بر روی آن انجام شده است. از جمله فرایندهای ممکن در نابودی زوج  $e^+e^-$  در انرژیهای بالا فرایندهای  $(e^+e^- \rightarrow \text{hadrons})$  است. براساس مدل پارتون، نابودی زوج الکترون - پوزیترون منجر به تولید یک کوارک و یک پادکوارک 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 کوارکها یک گلوئون تابش کند. در این صورت یک رویداد سه جتی خواهیم داشت. جت عبارتست از مجموعه‌ای از هادرونها (معمولاً پیون) که تمام آنها در یک جهت خاص تولید می‌شوند. همان گونه که قبلاً ذکر گردید دقیقاً مشخص نیست که فرایند هادرونی شدن بر مبنای چه نظریه‌ای انجام می‌شود. از این رو می‌توان برخی مدل‌ها را برای بررسی فرایندهای هادرونی شدن به کار برد. این مدل‌ها عبارتند از مدل وبر، مدل عناصر ماتریسی و مدل بارش پارتون

خوشه‌های یکتایه رنگ که به صورت حلقه‌های بیضوی شکل نمایش داده شده‌اند را تشکیل دهند. در انتهای تحول آشبار، هنگامی که کلیه پارتونها روی پوسته جرم پوشانده می‌شوند، گلوئونها به جفتهای  $q\bar{q}$  شکافته می‌شوند. بنابراین هر پارتون به یک همسایه با اندیس رنگ درست ملحق می‌شود تا یک خوشه یکتایه رنگ را تشکیل دهد.

شکل ۴ یک رخداد تولید شده توسط برنامه مونت کارلو در انرژی  $3\text{E}4\text{GeV}$  را برای این مدل نشان می‌دهد [۲].

۲.۳. مدل عنصر ماتریسی، (ME) Matrix Element [۴،۲،۱] QCD این مدل تولید پارتونها را مطابق با عناصر ماتریسی انجام می‌دهد و تولید هادرونها مطابق با طرح ترکش رشته‌ای انجام می‌شود. این مدل پیش‌بینیهای خود را برای تولید محصولات ۲، ۳ و ۴ پارتونی با استفاده از روش مونت کارلو تا مرتبه ۲ از  $\alpha_s$  انجام می‌دهد.  $\alpha_s$  به کار برده شده تا مرتبه اول به صورت 
$$\alpha_s = \frac{12\pi}{(23 - 2nf) \ln Q^2 / \Lambda^2}$$
 بیان می‌شود [۱]. عبارت از تعداد طعمهای فعال و  $\Lambda$  یکی از پارامترهای مدل است.

برای اجتناب از واگرایها در تولید مونت کارلو، رخدادهای سه پارتونی که در آن، یک پارتون، گلوئون نرم باشد، با رخدادهای ۲ پارتونی یکی می‌شود. متعاقب تولید پارتونها، هادرونها مطابق یک طرح ترکش رشته‌ای شکل می‌گیرند. یک رشته میان کوارکهای نهایی محکم شده و یک دستگاه یکتایی رنگ را تشکیل می‌دهد و مجاز می‌شود تا با تشکیل زوج کوارک پادکوارکهای اضافی بشکند.

گلوئونها به صورت یک شاخه روی رشته میانی دو انتهای کوارک قرار می‌گیرند. این عمل تا آنجا ادامه پیدا می‌کند که انرژی جنبشی آنقدر کاهش یابد تا کوارکها و گلوئونها به صورت خوشه‌هایی با بار رنگ خالص صفر و تکانه داخلی ناچیز ظاهر شوند. این مجموعه از حالت‌های بدون رنگ، هادرونها به جرم کوچک که اغلب آنها پایون هستند را تشکیل می‌دهند.

۳.۳. مدل بارش پارتون، (PS) Parton shower [۶،۵،۱] یک الگوریتم جدید برای مهیا کردن احتمال ترکیبات چند جتی در رخدادهای نابودی  $e^+e^-$ ، بارش پارتون هم‌دوس

[۱ و ۲]. در این مقاله برای محاسبات خود از داده‌های آشکارساز AMY که در شتاب دهنده TRISTAN در کشور ژاپن قرار دارد استفاده می‌کنیم. پس از آن نتایج تجربی را با نتایج حاصل از مدلها مقایسه می‌نماییم.

## 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 رانشی (اطاقک رانش مرکزی یا CDC) می‌باشد. ذرات باردار عمدتاً بر روی یک ناحیه زاویه‌ای قطبی  $\cos\theta < 0.87$  آشکار می‌شوند.

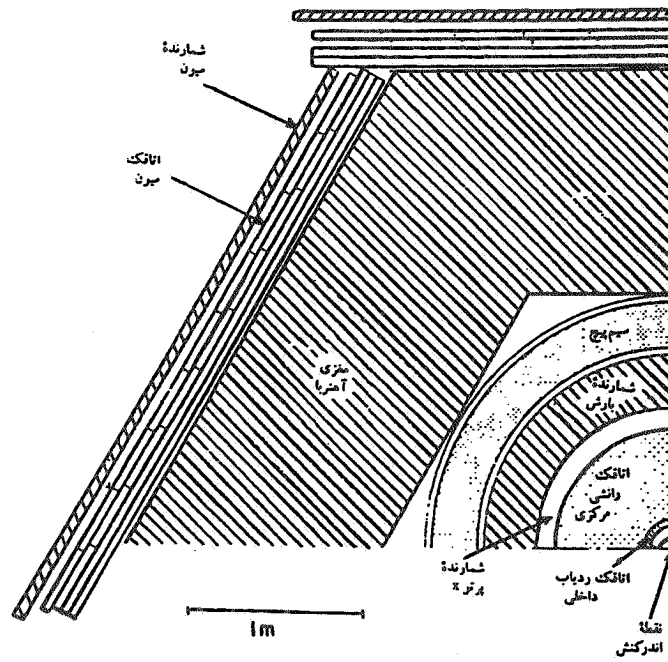
به صورت شعاعی و خارج از CDC یک کالریمتر الکترومغناطیسی به درازای ۱۵ طول تابشی وجود دارد که به عنوان یک آشکارساز فوتون عمل می‌کند و شمارنده رگباری یا SHC نامیده می‌شود.

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 می‌شود. در این آزمایش میانگین انرژی مرکز جرم مساوی با  $60\text{GeV}$  و تابندگی کل مساوی با  $160\text{Pb}^{-1}$  می‌باشد. همچنین در این مقاله از تعداد  $700$  رویداد استفاده شده است. برای شرح کاملتری از آشکارساز AMY مرجع [۳] را ببینید.

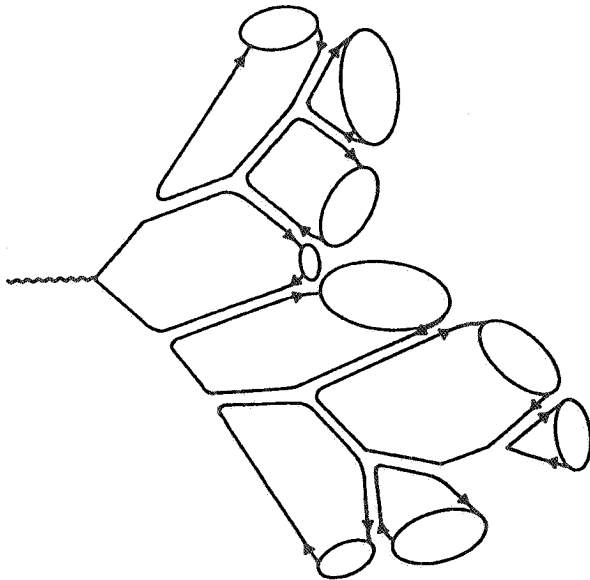
## ۳. مدل‌های گوناگون مبتنی بر هادرونی شدن

### ۱.۳. مدل وبر Webber [۱]

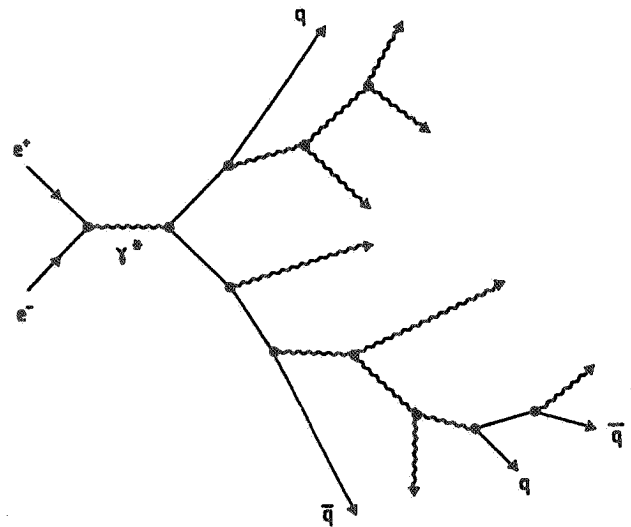
هدف اصلی، شکل‌گیری هادرونها در انتهای فضای فاز اختلال یافته توسعه جت از خوشه‌های یکتایه رنگ، یعنی پارتونها هستند که بعداً به هادرونها واپاشی می‌کنند. ساختار شاخص رنگ غالب برای دیاگرام شبیه شکل ۲ را می‌توان مطابق شکل ۳ نمایش داد. زوج اندیسهای مجاور می‌توانند



شکل ۱. آشکارساز AMY.



شکل ۳. ساختمان اندیس رنگ غالب شکل ۲.

شکل ۲. فرایند شاخه شدن  $(e^+e^- \rightarrow q\bar{q})$ .

ترکیبات چند پارتونی نیاز دارد. این اطلاعات را می‌توان هم با روش عناصر ماتریسی و هم با روش بارش پارتون به دست آورد.

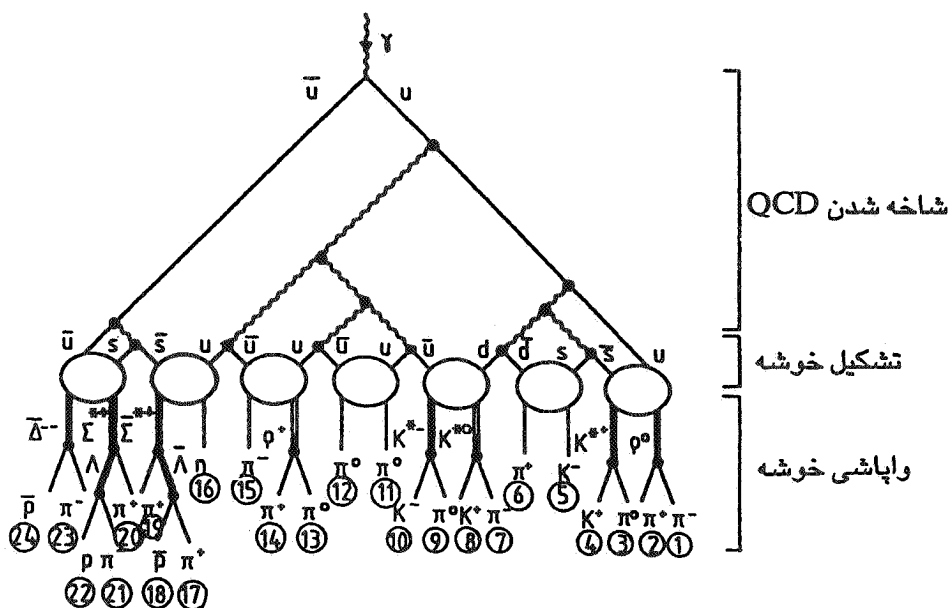
#### ۴. نتایج فیزیکی

در این بخش، نتایج فیزیکی حاصل از داده‌های AMY در انرژی مرکز جرم  $60\text{ GeV}$  را با نتایج به دست آمده از مدل‌های

است که به خوبی در کنار مدل ME سه جتی قرار می‌گیرد و توصیف بسیار خوبی از داده‌ها را فراهم می‌کند.

برای تحول بارش پارتون یک خط برش از مرتبه  $1\text{ GeV}$  به کار می‌رود که در نتیجه آن، رویدادها با پارتون‌های زیاد نقش مهمتری در انرژیهای مرکز جرم بازی می‌کنند.

مطالعه رویدادهای چند جتی هم در نابودی  $e^+e^-$  و هم در فیزیک هادرونی، به یک سزی اطلاعات دربارهٔ مقطع مؤثر



شکل ۴. یک رویداد تولید شده به روش مونت کارلو در انرژی مرکز جرم ۳.۴ GeV.

توافق نتایج داده‌ها و پیشگویی مدل‌های گوناگون در نمودار به خوبی روشن است. سرانجام در شکل‌های ۸ و ۹ توزیع تراست و توزیع Rapidity (Y) برای ذرات باردار به همراه پیشگویی مدل‌ها رسم شده است. Y, T به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$T = \max \frac{\sum (P_{Li})}{\sum (P_i)}$$

$$Y = \frac{1}{2} \ln \left[ \frac{E + P_L}{E - P_L} \right]$$

$P_L$  مؤلفه تکانه موازی با محور جت و  $E$  انرژی هر ذره است. بار دیگر نمودارهای فوق نشان می‌دهند که نتایج داده‌های AMY با نتایج پیشگویی مدل‌ها سازگاری کامل دارند.

### ۵. بحث و نتیجه‌گیری

در دو دهه گذشته بسیاری از مطالعات در زمینه تولید هادرونی در نابودی  $e^+e^-$  انجام شده است. دلیل این امر آنست که به وضوح مشخص نیست فرایندهای هادرونی شدن بر مبنای چه نظریه‌ای انجام می‌شود. از این رو از مدل‌های گوناگون استفاده شده است. با مرور زمان به منظور مطابقت با نتایج تجربی این مدل‌ها اصلاح شده‌اند.

مختلف مقایسه می‌نماییم [۱ تا ۶].

شکل ۵. الف و ب توزیع فراوانی تکانه عرضی (PT) و مجذور تکانه عرضی (PTY) را نسبت به محور اسفریستی و پیش‌بینی مدل‌های گوناگون نشان می‌دهد. تمامی مدل‌ها پیش‌بینی می‌کنند که اکثر ذرات دارای تکانه عرضی اندک هستند. با در نظر گرفتن خطای آماری توافق داده‌های آشکارساز AMY با نتایج حاصل از مدل‌ها قابل توجه است.

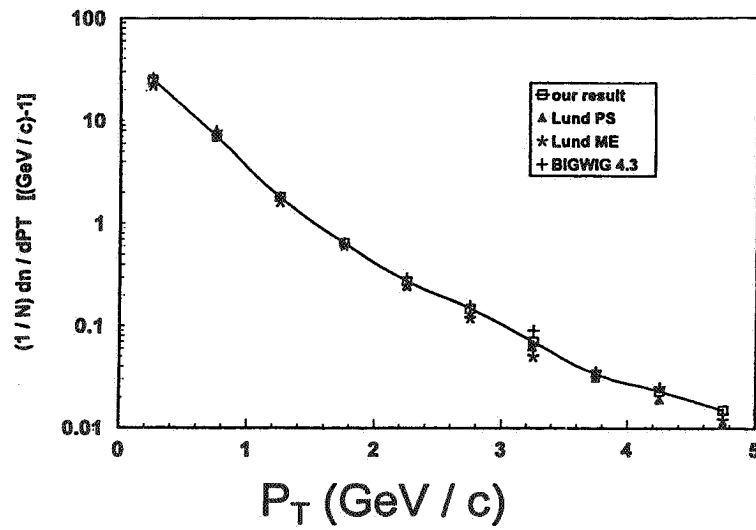
شکل ۶ توزیع تکانه طولی (PL) ذرات باردار نسبت به محور جت و پیشگویی مدل‌ها را نشان می‌دهد. پیش‌بینی تمام مدل‌ها بر این است که اکثر ذرات دارای PL اندک هستند. در این نمونه داده‌های آشکارساز AMY در توافق با مدل‌های گوناگون می‌باشند.

شکل ۷ توزیع XF (X فاینمن) را برای ذرات باردار نسبت به محور جت نشان می‌دهد. XF به صورت زیر تعریف می‌شود.

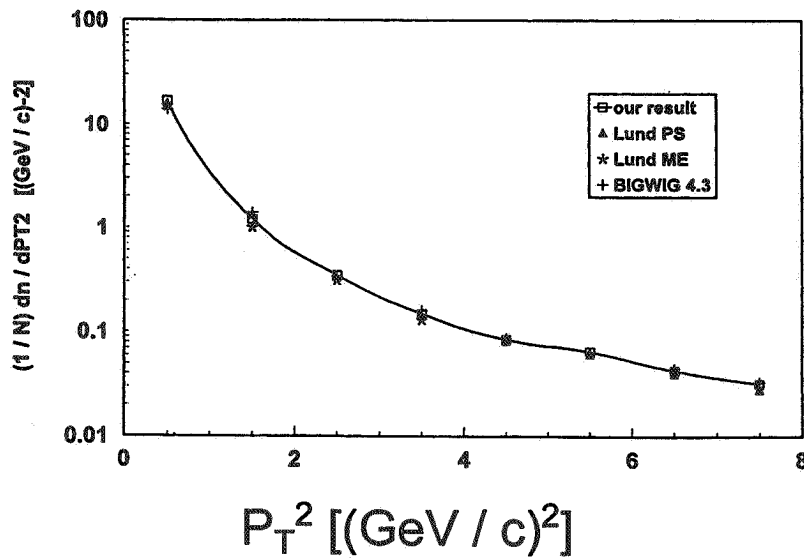
$$XF = \frac{yPL}{E_{cm}}$$

که در آن PL تکانه طولی هر ذره نسبت به محور جت و  $E_{cm}$  عبارتست از انرژی مرکز جرم.

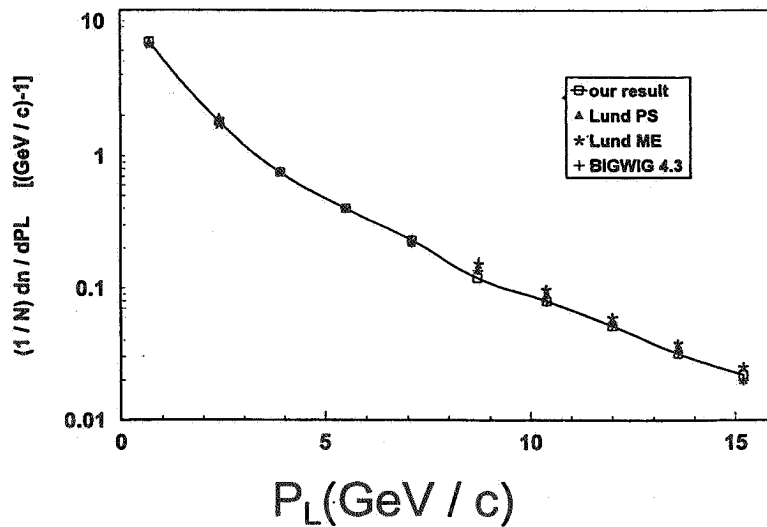
این نمودار پیرامون  $XF = 0$  دارای بیشینه است. این بدان دلیل است که اکثر ذرات تولید شده دارای PL اندکی هستند.



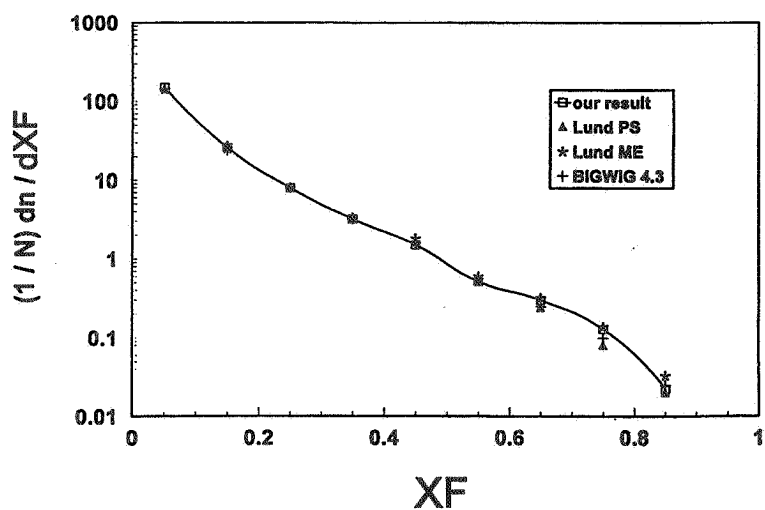
شکل ۵. الف. توزیع فراوانی  $P_T$  ذرات باردار نسبت به محور جت و پیشگویی مدلها.



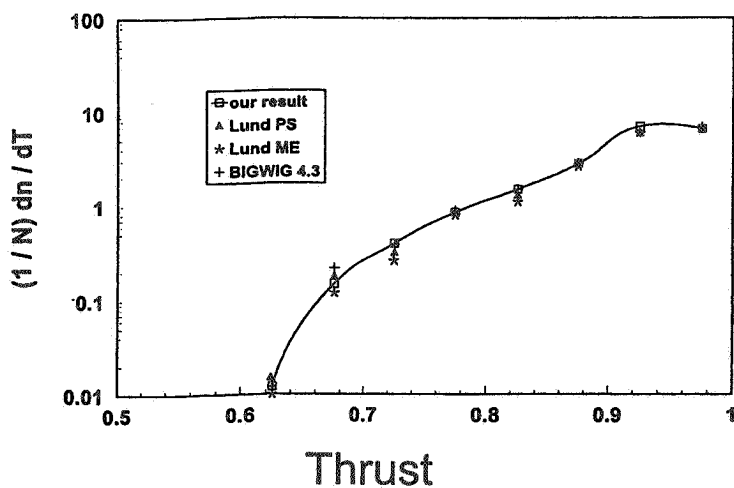
شکل ۵. ب. توزیع فراوانی  $P_T^2$  ذرات باردار نسبت به محور جت و پیشگویی مدلها.



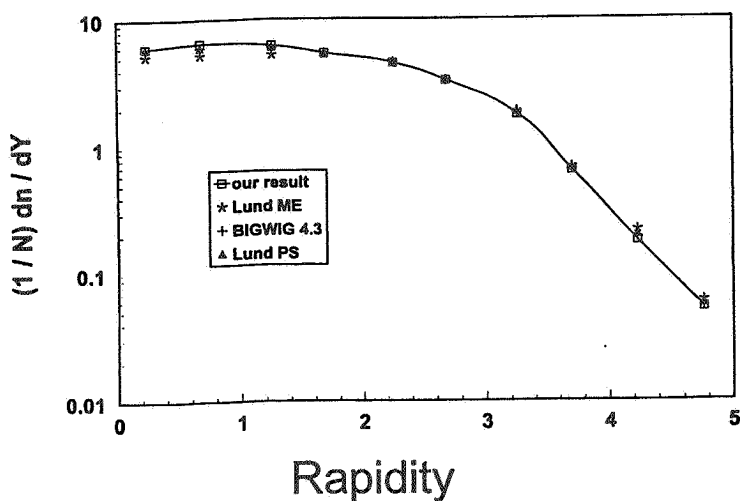
شکل ۶. توزیع فراوانی  $P_L$  ذرات باردار نسبت به محور جت و پیشگویی مدلها.



شکل ۷. توزیع فراوانی XF ذرات باردار نسبت به محور جت و پیشگویی مدلها.



شکل ۸. توزیع تراست ذرات باردار نسبت به محور جت و پیشگویی مدلها.



شکل ۹. توزیع فراوانی rapidity ذرات باردار نسبت به محور جت و پیشگویی مدلها.

برای این منظور از رویدادهای نابودی  $e^+e^-$  آشکارساز TRISTAN در انرژی مرکز جرم  $60\text{ GeV}$  در شتابدهنده TRISTAN واقع در KEK ژاپن استفاده شده است. نتایج ما نشان می‌دهند که توزیعهای به دست آمده با استفاده از داده‌های AMY با توزیعهای متناظر با مدل‌های فوق سازگاری کامل دارند.

مدلهایی که امروزه عمدتاً مورد مطالعه قرار می‌گیرند عبارتند از مدل وبر، مدل عناصر ماتریسی و مدل بارش پارتون. در این مقاله سه مدل فوق را مبنی بر هادرونی شدن ذرات مورد مطالعه قرار داده‌ایم.

#### مراجع

1. S Lupia and W Ochs, *phys. Lett. B* **418** (1998) 214.
2. G Marchesini and B R Webber, *Nucl. Phys. B* **310** (1998), B R webber, *Nucl. Phys. B* **238** (1984) 492.
3. AMY Collaboration, K L Sterner, A Abashian, K Gotow, *Phys.Lett. B* **303** (1993) 385
4. T Sjostrand, *comput. Phys. Commun.* **39** (1986) 347.
5. T Sjostrand and M Bengtsson, *Comput. Phys. Commun.* **43** (1987) 367.
6. M Bengtsson and T Sjostrand, *Phys. Lett. B* **185** (1987) 435, A Capella et al., *Phys. Rev. D* **61** (2000) 7409.