

نشریه تابش و فناوری هسته‌ای، دوره ۴، شماره ۱، بهار ۱۳۹۶

بررسی رفتار باریکه الکترونی در خطوط BDS شتابدهنده ILC توسط کد BDSIM_Geant4

سجاد منیری^۱، پیوند طاهرپرور^{۲*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه فیزیک، دانشگاه گیلان، رشت، گیلان، ایران

^۲ استادیار، گروه فیزیک، دانشگاه گیلان، رشت، گیلان، ایران

(تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۲/۰۵ - تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۴/۲۸)

چکیده

با توجه به اینکه براساس آزمایش‌ها و شواهد موجود تنها ۴ درصد جهان قابل رویت است و ۹۶ درصد باقیمانده از ماده و انرژی تاریک تشکیل یافته بنابراین فیزیکدانان برای پی بردن به حقیقت جهان به استفاده از شتابدهنده‌ها روی آوردند. یکی از قدرتمندترین شتابدهنده‌های پیشنهاد شده برای این امر که به عنوان جایگزین شتابدهنده LHC مورد توجه است، شتابدهنده ILC می‌باشد که در ابتدا قادر خواهد بود ذرات را تا انرژی برخوردی ۵۰۰ گیگا الکترون ولت برساند. اما تا انرژی ۱۰۰۰ گیگا الکترون ولت قابل ارتقا است. پس از شتابدهی ذرات در یک شتابدهنده خطی باریکه‌ها توسط سیستمی به نام BDS در یک انرژی انتقال می‌یابند. از آنجایی که در نقطه برخورد به حداکثر احتمال برخورد نیاز داریم در خطوط باریکه چنین سیستمی از الکترومغناطیس‌های چندقطبی به منظور انتقال و کانونی کردن باریکه در نقطه برخورد، استفاده می‌کنند. به دلیل اتلاف انرژی ناشی از عبور باریکه از میان چندقطبی‌ها، طراحی چنین خطوطی با انرژی ثابت بسیار مورد توجه است. در این مقاله با شبیه‌سازی خطوط BDS به کمک کد BDSIM-Geant4، کیفیت باریکه در طول خط شتابدهنده توسط پارامتر آمیتانس مورد ارزیابی قرار گرفته است، و در شبیه‌سازی‌ها سعی شده تا به حداقل پهن شدگی باریکه در نقطه برخورد دست یابیم. در ادامه میزان اتلاف انرژی باریکه در ۱۰۰ متر از خطوط باریکه بررسی شده است.

واژه‌های کلیدی: BDSIM-Geant4، ILC، الکترومغناطیس‌های چندقطبی، اتلاف انرژی

* گیلان، رشت، دانشگاه گیلان، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک، کد پستی: ۴۱۹۳۸۳۳۶۹۷.

پست الکترونیکی: p.taherparvar@guilan.ac.ir

۱. مقدمه

باریکه کمک می‌کند تا شانس برخورد بین دو ذره را در نقطه اشتراکی که باریکه‌ها از آن عبور خواهند کرد، بالا ببرند [۲]. در نتیجه دو پروتون در برخورد دهنده بزرگ هادرونی با یکدیگر برخورد داده می‌شوند که باعث ایجاد حجم زیادی از ذرات در سطح زیر اتمی می‌شود. با وجود به دست آمدن شواهد قانع کننده از وجود ذره بوزون هیگز در برخورد دهنده مرکز سرن، برخی دانشمندان به دنبال دستگاه پر قدرت تری هستند که قادر به جمع آوری حجم بیشتری از داده‌ها در خصوص کشف اخیر باشد.

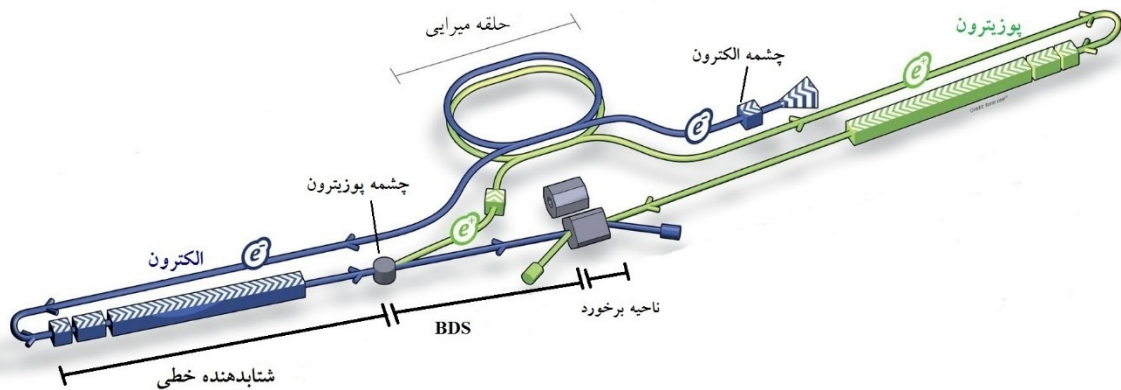
برخورد دهنده خطی بین المللی^۲ دستگاهی است که از آن به عنوان جایگزین احتمالی برخورد دهنده بزرگ هادرونی نام برده می‌شود [۲]. برخورد دهنده ی خطی بین المللی یا ILC، دارای طول ۳۲ کیلومتر (در حالیکه LHC، دارای طول ۲۷ کیلومتر) است. برخلاف LHC که ذرات سنگین‌تر مانند پروتون و یون‌ها را با حرکت دادن در یک مسیر حلقوی، شتاب می‌دهد، ILC، ذرات بسیار سبک مانند الکترون‌ها و پادذرات آنها را باید در مسیر یک خط راست شتاب دهد، زیرا هر بار که مسیر خمیده شود، اتلاف انرژی بیشتری را برای الکترون‌ها و پوزیترون‌ها شاهد خواهیم بود. برخورد دهنده LHC نمی‌تواند الکترون‌ها را با انرژی بالا با یکدیگر برخورد دهد، اما در ILC، قادر خواهیم بود، الکترون‌ها را از یک طرف مسیر و پوزیترون‌ها را از طرف دیگر شتاب داده و در میانه‌ی مسیر با یکدیگر برخورد دهند.

از طرفی دیگر، یکی از کارآمدترین و دقیق‌ترین روش‌ها در جهت بهینه‌سازی سیستم‌های شتابدهنده، استفاده از روش‌های شبیه‌سازی است، نرم افزارهای متفاوتی برای شبیه‌سازی سیستم‌های شتابدهنده ذرات توسعه یافته‌اند که از جمله آن می‌توان به magic, spiffe, elegant و... اشاره نمود.

کسب اطلاع و افزایش دانش تخصصی از دنیای میکروسکوپی زمانی میسر می‌شود که وسایل پژوهشی مورد نیاز آن تهیه گردد هر چه دنیای مورد تجسس کوچکتر باشد طول موج ذره کاوشگر نیز باید کوچکتر شود تا بتواند وارد آن ناحیه گردد و پس از خروج از آن ناحیه اطلاعات مربوط به آن را حاصل آید. برای کاهش طول موج ذره باید تکانه و در نتیجه انرژی آن افزایش یابد که این کار توسط دستگاه‌هایی به نام شتابدهنده‌ها انجام می‌شود. در واقع شتابدهنده ذرات، یک دستگاه خطی یا دایروی است که با افزایش سرعت (انرژی) ذرات باردار (مولکول، اتم یا زیراتم) و هدایت آنها جهت برخورد با یکدیگر یا با یک هدف، از میدان‌های الکترومغناطیسی استفاده می‌کند. با توجه به نوع سیستم شتابدهی ذرات، انواع گوناگونی از شتابدهنده‌ها در حال حاضر در سراسر جهان وجود دارد و مورد بهره برداری قرار گرفته‌اند [۱].

یکی از این شتابدهنده‌ها برخورد دهنده بزرگ هادرونی (LHC^۱) است که در یک تونل دایره ای شکل با محیط ۲۷ کیلومتر و عمق بین ۵۰ تا ۱۷۵ متری زمین قرار دارد. ساختمان روی سطح زمین شامل تجهیزات فرعی مانند فشرده سازها، تجهیزات تهویه، الکترونیک‌های کنترل و دستگاه‌های خنک کننده است. تونل برخورد دهنده LHC دارای دو لوله‌ی مجاور و موازی است که در چهار نقطه تقسیم می‌شود و هر کدام یک باریکه پروتونی را خلاف جهت یکدیگر حمل می‌کنند. در اجرای اولیه هر باریکه به انرژی معادل ۴ TeV می‌رسید. ۱۲۳۲ الکترومغناطیس دوقطبی بکارگرفته در این برخورد دهنده باریکه را در مسیر دایره‌ای خود نگه می‌دارند، در حالی که ۳۹۲ الکترومغناطیس چهارقطبی به تمرکز

^۱ Large Hadron Collider^۲ International Linear Collider



شکل ۱. مدل پیشنهادی برای یک ILC [۲]

و پوزیترون که توسط چشمه یون‌های مربوطه تولید شده‌اند (معمولاً با استفاده از تفنگ الکترونی لیزری و یا با پرتاب الکترون و یا فوتون بر سطح یک هدف) در درون یک سیستم شتابدهی قرار داده می‌شوند ولی با توجه به اینکه چنین باریکه‌ای اجزای مورد نیاز برای برخورددهی همچون آمیتانس را که معیاری از کیفیت باریکه (مساحت اشغال شده توسط ذرات در فضای فاز) است را به اندازه مورد نیاز ندارد در ابتدا توسط یک حلقه میرایی میزان آمیتانس را کاهش، سپس باریکه به یک شتابدهنده خطی تزریق می‌شود.

محیط حلقه میرایی حدود ۳km است. باریکه پس از عبور از شتابدهنده خطی به انرژی ۲۵۰GeV می‌رسد. با توجه به اینکه در مکان برخورددهی حداکثر احتمال برخورد مورد نیاز است از سیستمی به نام BDS^۱ استفاده می‌شود. چنین سیستمی شامل اجتماع از الکترومغناطیس‌های چند قطبی است که به منظور انتقال و کانونی کردن باریکه استفاده می‌شود [۲].

الکترومغناطیس‌های چند قطبی، المان‌هایی هستند که طراحی آنها بر مبنای ایجاد میدان مغناطیسی توسط جریان خارجی در

یکی از پرکاربردترین برنامه‌ها، برنامه Geant4-BDSIM^۲ است. کد BDSIM برنامه‌ای تحت زبان C++ است که با استفاده از ابزارها و کتابخانه Geant4 برای شبیه‌سازی خطوط انتقال ذرات در شتابدهنده‌ها و نیز برای برهمکنش ذرات با اجزای شتابدهنده بکارگرفته می‌شود [۳-۴]. این برنامه توانایی شبیه‌سازی اجزای مختلف شتابدهنده و کنترل باریکه همچون دوقطبی‌ها، چهارقطبی‌ها، هشت قطبی‌ها و عدسی‌های الکترواستاتیکی را با استفاده از نرم افزار Geant4 دارا است [۴]. با توجه به دقت و توانایی بالای این کد، کاربردهای بسیاری برای این نرم‌افزار توسعه یافته که از جمله آن می‌توان به شبیه‌سازی اتلاف باریکه LHC، بررسی پس زمینه میون، CLIC پس زمینه‌های آشکارساز و بررسی کیفیت موازی سازی ILC، پردازش تابش سینکروترون و ... اشاره نمود. [۵-۶]

۲. مواد و روش کار

۲.۱. روند برخورد دادن یک شتابدهنده ILC

همانطور که در شکل (۱) قابل مشاهده است، ابتدا باریکه الکترون

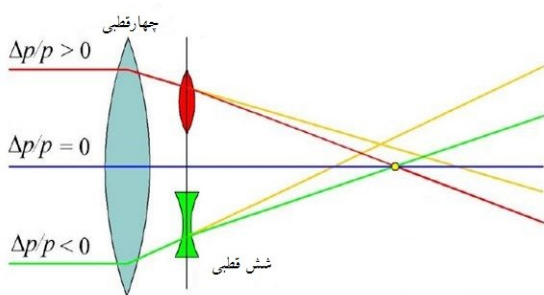
^۱ Beam Delivery Simulation

^۲ Compact Linear Collider

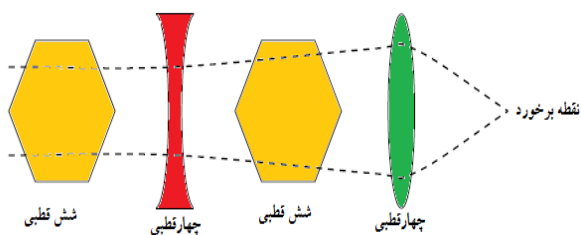
^۳ Beam Delivery System

پارامترهای γ, β, α پیچش نامیده می‌شوند که مقادیرشان با توجه به سیر حرکت باریکه در حال تغییر می‌باشد. اندازه و جهت این بیضی نمایش دهنده مشخصات باریکه است. همچنین بر اساس تئوری لیوویل امیتانس با وجود نیروهای پایستار تغییر نمی‌کند بلکه تنها توزیع ذرات تغییر می‌کند [۹].

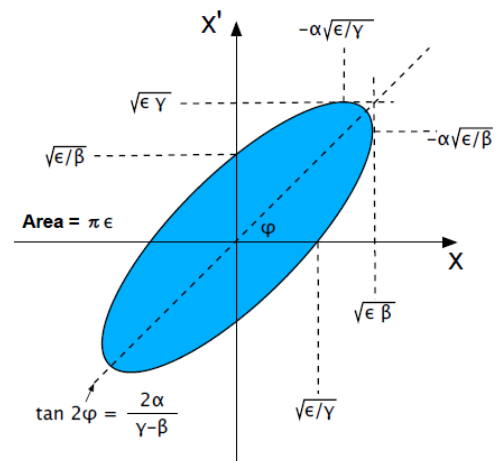
ناحیه انتهایی هر خطوط BDS به منظور ایجاد همگرایی توسط گرادیان میدان ۳۰۰-۲۰۰ (T/m) از الکترومغناطیس‌های چهار قطبی ابرسانا استفاده می‌کنند. در ادامه، ذرات به دلیل توزیع انرژی ذاتی، پدیده ای به نام کروماتیک را بوجود می‌آورند، به این معنی که ذرات با انرژی‌های متفاوت هنگام رسیدن به مغناطیس‌های چهارقطبی در نقاط مختلفی کانونی می‌شوند در نتیجه با قرار دادن مغناطیس‌های شش قطبی همانند شکل (۳) به منظور تصحیح ابیراهی‌های کروماتیک در شتابدهنده‌ها بکاربرده می‌شوند.



شکل ۳. نمایش تصحیح کروماتیک توسط مغناطیس شش قطبی



شکل ۴. نمایش اپتیکی همگرایی نهایی قبل از برخورد



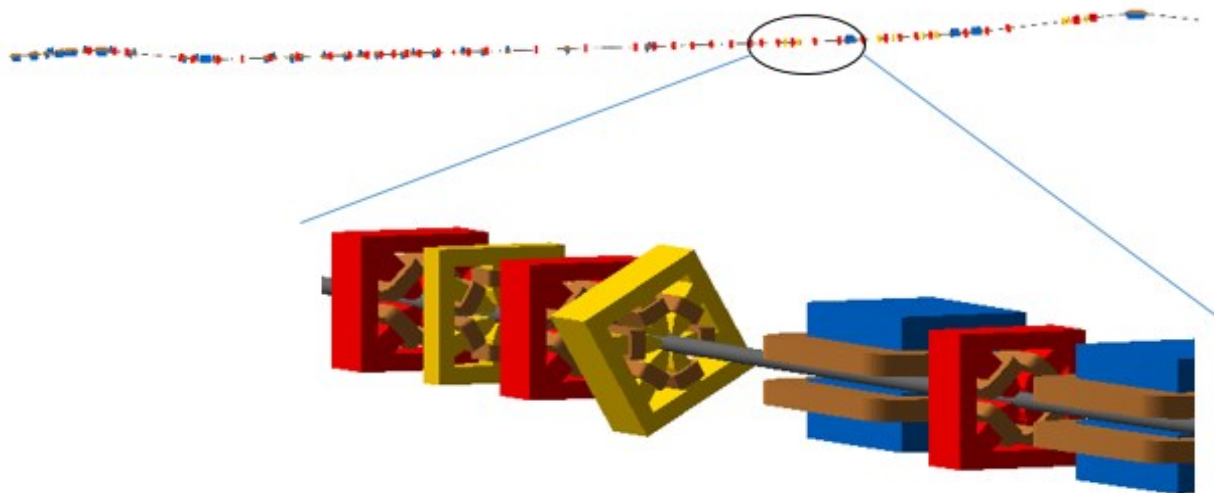
شکل ۲. نمایش بیضی فضای فاز

سیم پیچ‌های مسی و تقویت و هدایت میدان توسط هسته آهنی است. در این مغناطیس‌ها اغلب جریان به صورت DC و یا AC با تغییرات کم می‌باشد. مغناطیس‌ها در شتابدهنده‌ها نقشی کلیدی بر عهده دارند و با اعمال میدان ثابت عمود بر مسیر باریکه و یا میدان شعاعی باریکه ذرات را با مشخصات مورد نیاز بر مسیر مطلوب حفظ می‌کنند. هرچند که مغناطیس‌ها در شتابدهی ذرات نقشی ندارند اما در روابط نسبیتی، انرژی نهایی مورد نیاز نسبت مستقیم با میدان خمش دو قطبی B و شعاع خمش R دارد [۷-۸].

$$E_{beam} = 0.3BR \quad (۱)$$

با توجه به اینکه هدف خطوط BDS انتقال باریکه در یک انرژی ثابت و همگرا در ناحیه انتهایی است از پارامتری همچون امیتانس برای بررسی کیفیت باریکه استفاده می‌شود. امیتانس مساحت اشغال شده توسط ذرات در فضای فاز می‌باشد. ذرات براساس دینامیک حرکتشان مطابق رابطه (۲) در یک بیضی محصور شده‌اند، که در شکل (۲) به نمایش درآمده است.

$$\gamma X^2 + 2\alpha XX' + \beta X'^2 = \varepsilon \quad (۲)$$



شکل ۵. خطوط BDS شبیه سازی شده توسط کد BDSIM-Geant4

قطبی های مغناطیسی در این خط و قدرت همگرایی مغناطیسی های چهار قطبی، پراکندگی باریکه باید بسیار مورد توجه قرار گیرد زیرا یک اثر بسیار منفی در باریکه خروجی محسوب می گردد. بنابراین نحوه انتخاب قدرت چند قطبی های مغناطیسی و نیز اعمال میدان مغناطیسی در طول خطوط بزرگتری به باریکه اعمال می گردد. به منظور کاهش اندازه باریکه مطابق رابطه (۳) که بیانگر اندازه باریکه در نقطه برخورد است به حداقل امیتانس و آگاهی از توابع مربوط به نوسان باریکه (توابع بتاترونی) نیاز خواهیم داشت.

$$\sigma = \sqrt{\epsilon \beta} \quad (3)$$

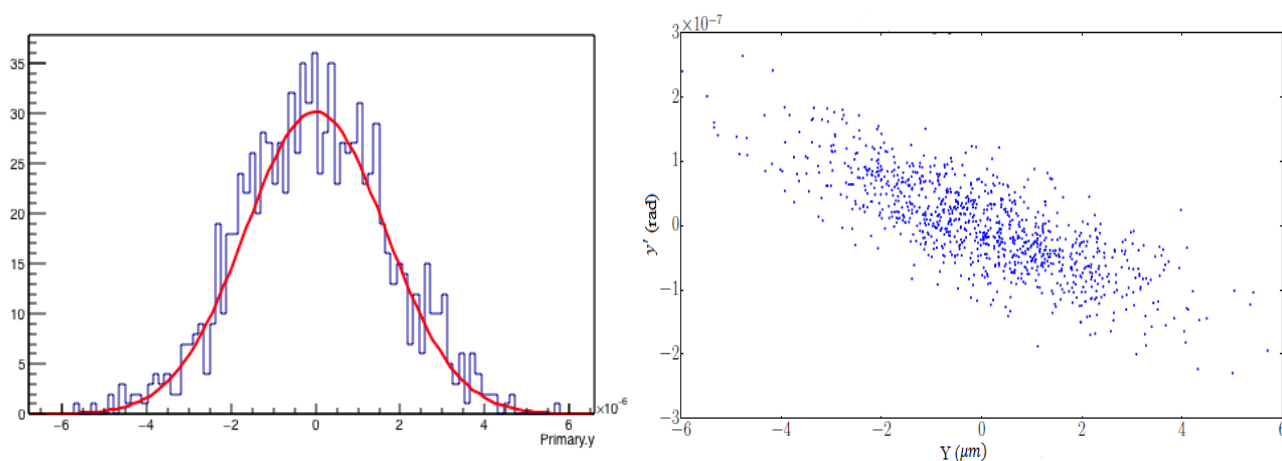
جدول ۱. پروفایل باریکه

ϵ_x	2.04e-11
ϵ_y	8.18e-14
β_x	71.48
β_y	39.60
α_x	-1.56
α_y	1.28

عملکرد الکترومغناطیس شش قطبی به این صورت است که مانع از این پخش شدگی ذرات می شوند و همچنین می توانند مولفه شش قطبی ناشی از اولین خطای مجاز مغناطیس های دو قطبی را جبران کنند [۹-۱۰]. علاوه بر این، به دلیل آنکه الکترومغناطیس چهار قطبی تنها در یک صفحه همگرا است باید از دو الکترومغناطیس چهار قطبی به منظور خنثی کردن واگرایی استفاده کرد. بنابراین با قرار دادن دو الکترومغناطیس چهار قطبی ابررسانا و دو الکترومغناطیس شش قطبی بین آنها، اندازه باریکه را می توان به مقدار مورد نیاز رساند. همان طوری که در شکل (۴) می توان مشاهده کرد، پوش باریکه در نقطه برخورد از نظر ابعادی به حداقل می رسد. AFT^۱ یکی از مراکزی است که در صدد ساخت و تست خطوط مناسب برای استفاده در ILC است.

در این مقاله با استفاده از مشخصات پیشنهاد شده برای خطوط BDS ابتدا به شبیه سازی دقیق المان های موجود در این خط باریکه پرداختیم (شکل ۵). با توجه به تعدد استفاده از چند

^۱ Accelerator Test Facility



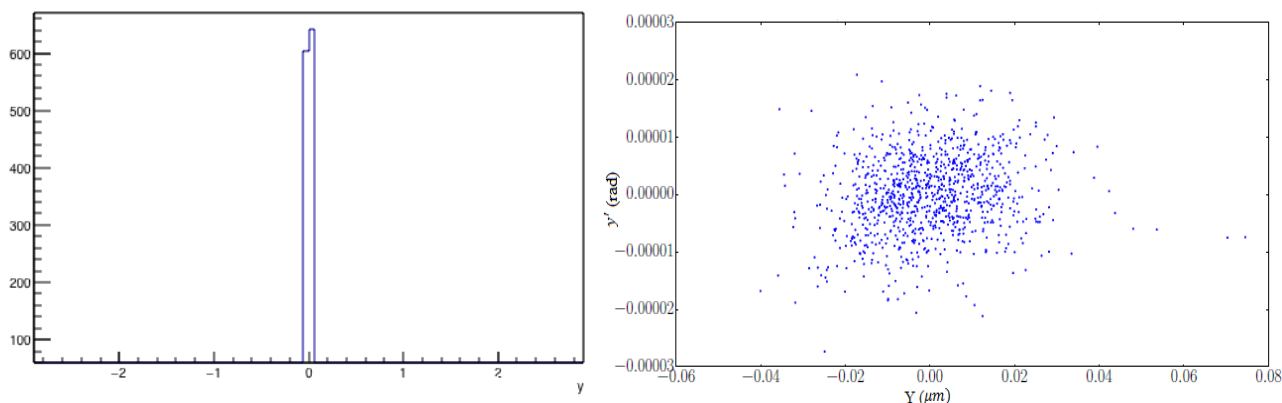
شکل ۶. نمایش توزیع الکترون‌ها در فضای فاز (راست) و فضای مکان (چپ) در ابتدای خطوط BDS

۳. نتایج

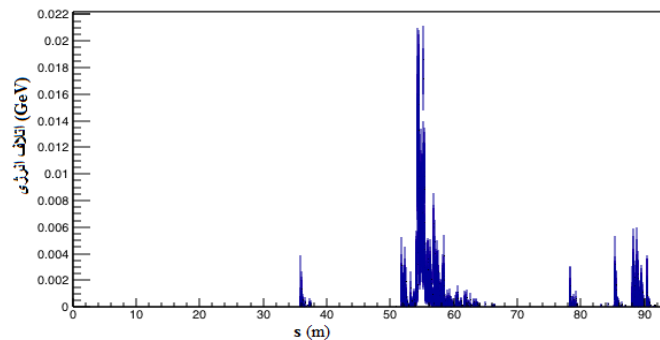
شکل (۶) نمایش دهنده توزیع ذرات به کمک برنامه ROOT در ابتدای خطوط BDS است که معرف یک توزیع گاوسی در راستای محور y دستگاه مختصات Frenet-Serret می‌باشد (دستگاهی که با حرکتش همراه باریکه باعث کاهش درجات آزادی و در نتیجه کاهش محاسبات می‌شود). باریکه پس از عبور در آرایشی تناوبی از مغناطیس‌های چهارقطبی سبب می‌شود توابع بتاترونی کاهش پیدا کند و با وجود قسمت انتهایی این خطوط ناشی از مغناطیس‌های ابرسانا و مغناطیس‌های شش‌قطبی (به منظور تصحیحات کروماتیک) به حداقل برسد و در نتیجه با توجه به رابطه (۳) اندازه باریکه در نقطه برخورد به حداقل برسد. در

با توجه به اینکه اجزای خطوط انتقال باریکه در مسیر حرکت باریکه نصب شده‌اند، ذرات در راستای حرکتشان حول این مسیر، نوسان انجام می‌دهند که به نوسان بتاترونی معروف است و با توجه به دینامیک حرکتشان، مسیر آنها از توابع خاصی به نام توابع بتاترون تبعیت می‌کند. درواقع این توابع توصیف کننده مدولاسیون دامنه نوسان بتاترونی ذرات هستند [۱۱].

در نتیجه با تعریف باریکه ورودی مطابق جدول ۱ که به صورت یک توزیع گاوسی است و تغییر مشخصات مغناطیس‌های چند قطبی به دنبال کاهش اندازه باریکه در نقطه برخورد هستیم.



شکل ۷. نمایش توزیع الکترون‌ها در فضای فاز (راست) و فضای مکان (چپ) در نقطه برخورد



شکل ۸. نمایش اتلاف انرژی برحسب سیر حرکت باریکه در

جویی در هزینه‌ها بسیار قابل اهمیت است. یکی از این کدهای قدرتمند در زمینه‌های مختلف شتابدهنده کد BDSIM_Geant4 است. پس از شبیه‌سازی ۱۰۰ متر از خطوط BDS و بررسی میزان همگرایی با توجه به تصحیحات کروماتیک انجام گرفته به این نتیجه رسیدیم خطوطی با چنین مشخصات دارای حداکثر کانونیک و حداقل اتلاف انرژی را خواهد داشت.

مراجع:

- [1] D. A. Edwards, M. J. Syphers, An Introduction to the Physics of High Energy Accelerators, Wiley-VCH, 2008.
- [2] The International Linear Collider Technical Design Report, 2013.
- [3] I. Agapov, GMAD Accelerator description language, Eurotev-Memo, 2006.
- [4] S. Agostinelli et al., Geant4 - a simulation toolkit, *Nucl. Instrum. Meth. A*, 506, 2003.
- [5] I. Agapov and et al., BDSIM: A particle tracking code for accelerator beam-line simulations including particle-matter interactions, *Nucl. Instrum. Meth. A*, 606, 2009.
- [6] G.A.Blair, interaction region and backgrounds using BDSIM, in Proceedings of 2005, *International Linear Collider Workshop*, Stanford, 2005.
- [7] M.J. Barnes, Injection and extraction magnets lecture, Bruges, Belgium, 2009.
- [8] J. Tanabe, Iron dominated electromagnets design, Fabrication, Assembly and Measurements, 2004.
- [9] H. Wiedemann, Particle accelerator physics, Springer, Fourth edition, 2015.
- [10] S. Guiducci, Chromaticity, CAS-CERN Accelerator School :4th General Accelerator Physics Course, Jülich, Germany, 1991
- [11] A. Wolski, Beam Dynamics in High Energy Particle Accelerators, World Scientific, 2014.

شکل (۷) این کاهش کاملاً قابل مشاهده است. سپس به کمک نمایش اتلاف انرژی برحسب سیر حرکت باریکه (شکل (۸))، میزان اتلاف انرژی در خطوط BDS، مورد بررسی قرار گرفته است، باریکه در مکان‌هایی که میزان انحراف زیادی داشته و یا با اجزای خطوط برخورد داشته انرژی بیشتری را به صورت تابش و یا برخورد (تولید ذرات ثانویه) از دست می‌دهد. بیشترین انرژی که از دست داده در حدود ۲۰ MeV است که با مقایسه این مقدار با انرژی متوسط باریکه (در حدود ۲۵۰ GeV) قابل چشم پوشی است.

۴. نتیجه‌گیری

با توجه به اینکه ذرات شتابدار خروجی از شتابدهنده خطی به منظور برخورد دادن با انرژی ثابت و حداقل اندازه باریکه در ناحیه برخورد از سیستمی به نام BDS استفاده می‌کنند می‌توان با قرار دادن الکترومغناطیس‌های شش قطبی در چنین خطوطی موجب کاهش اثر کروماتیک و در نتیجه همگرایی باریکه در یک نقطه شد. با فرض اینکه تعداد 2×10^{10} الکترون داشته باشیم که انرژی هر کدام ۲۵۰ GeV باشد انرژی یک خوشه معادل ۸۰۰ J است و این در حالی است که انرژی ۱g ماده TNT برابر ۰,۱۹ J است و همچنین با توجه به هزینه بر بودن و طولانی بودن مسیر چنین شتابدهنده‌هایی روی آوردن به کدهای شبیه‌سازی به منظور صرفه

Journal of Radiation and Nuclear Technology / Vol. 4 / No. 1 / Spring 2017

Investigation of electron beam characteristics in ILC BDS beam line by BDSIM_Geant4 code

S. Moniri¹, P. Taherparvar^{2*}

1. M. Sc. Student, Department of Physics, University of Guilan, Rasht, Guilan, Iran

2. Assistant professor, Department of Physics, University of Guilan, Rasht, Guilan, Iran

** Corresponding author's E-mail: p.taherparvar@guilan.ac.ir*

(Received: 2016/04/27 - Accepted: 2016/07/18)

ABSTRACT

Scientists, based on the evidence, believe that nearly 4 percent of the universe is visible and the remaining 96 percent consists of dark matter and dark energy. Hereby, the development of the accelerator technology and high energy physics were considered extensively.

ILC is the most powerful of proposed accelerator that is planned to have collision energy of 500GeV initially, with the possibility for a later upgrade to 1000GeV (1 TeV). The most powerful of proposed accelerator that is an alternative for the LHC accelerator is ILC. After being accelerated to the desired energy in a linear accelerator, beam could be transport from the exit of the main linacs to the interaction point. Since we need maximum possibility in the interaction point, beam lines are equipped with electromagnetic multipoles for beam transport and focusing, in such systems. Due to energy loss by beam passing through the electromagnetic multipoles, beam line designing is important to conserve beam energy in beam transport. In this paper, simulation of BDS was done by use of the BDSIM-Geant4 code. Then, beam characteristics were evaluated by use of the some criteria such as emittance. We estimated the distribution of particles at the beginning and end of the BDS line, to find minimum beam size at the interaction point. Finally the amount of energy loss within 100 meters of the lines was studied.

Keywords: *ILC, BDSIM-Geant4, Multipole Electromagnets, Energy Loss*