شبیه‌سازی حلقه انبارش الکترونی ۳GeV به کمک سلول های FODO توسط کد Geant4-BDSIM

طاهرپرور، پیوند- منیری، سجاد *

دانشگاه گیلان، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک

چکیده:

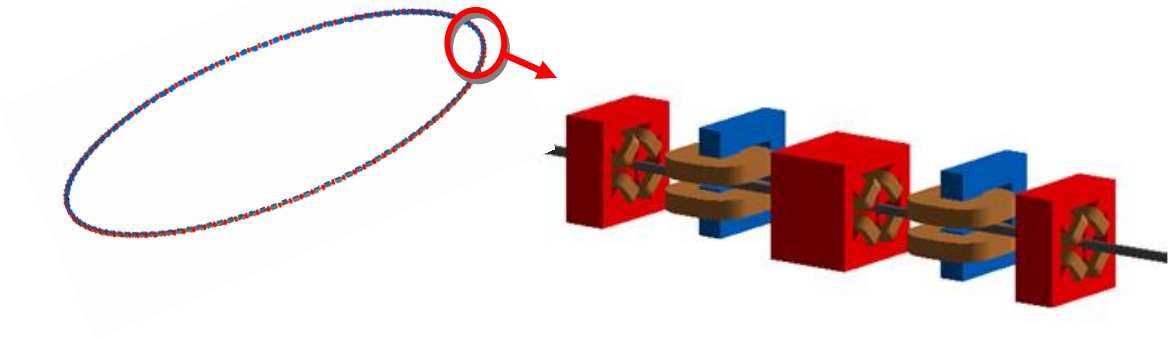
شتابدهنده‌های مدور و انرژی بالا از مهمترین ابزار در پیشرفت علوم در حوزه هسته ای و انرژی بالا محسوب می‌شوند. با توجه به اینکه باریکه الکترونی(یا یونی) شتاب یافته در داخل شتابدهنده و حلقه انبارشی، به شدت تحت تاثیر میدان های الکتریکی و مغناطیسی موجود است، استفاده از روش های شبیه‌سازی به منظور طراحی بهینه سیستم بسیار کارامد است. در این مقاله به کمک کد BDSIM-Geant4 به شبیه‌سازی حلقه انبارش الکترونی با استفاده از ۵۴۰ دوقطبی و چهارقطبی در یک محیط ۲۰۰ متری پرداخته شده است، و نتایج حاصل از تغییر مشخصات باریکه همچون توابع بتاترونی و پراکندگی و نیز اتلاف انرژی آن در طول مسیر باریکه بررسی شده است.

کلمات کلیدی: *حلقه انبارش، آهنربای دو قطبی، آهنربای چهار قطبی، FODO ، BDSIM*

مقدمه :

تحقیق و دانش افزایی در زمینه دنیای زیر اتمی نیازمند ابزاری برای تجسس است، و هرچه دستیابی به مشخصات جزئی‌تری از ماده مورد نظر باشد، طول موج ذره کاوشگر نیز باید کوچکتر شود تا بتواند اطلاعاتی از آن را در اختیار قرار دهد. دستیابی به طول موج‌های پایین (یا به عبارتی دیگر، انرژی‌های بالا)، نیازمند بهره گیری از شتابدهنده ذرات است. امروزه تحقیقات و توسعه شتابدهنده‌های مدور به منظور دستیابی به انرژی‌های بالا در قلمرو فیزیک هسته‌ای، فیزیک انرژی‌های بالا و مطالعه پادذرات و ذرات بنیادی بسیار مورد توجه است. یکی دیگر از کاربردهایی که به موازات تکامل شتابدهنده‌ها مورد توجه قرار گرفته است، استفاده از طیف تابشی ذرات باردار به واسطه عبور از میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی به نام تابش سینکروترونی است. با توجه به شدت و گستره طول موجی مناسب تابش سینکروترونی، این تابش کاربردهای فراوانی در مطالعه ساختمان مولکولی و تغییرات شکل و ترکیبات سلولی در واکنش‌های شیمیایی، در زمینه‌های مختلف تحقیقاتی و کاربردی در فیزیک، پزشکی، صنعت، زیست‌شناسی، باستان شناسی و ... یافته است [۱]. پس از شتابدهی ذرات در شتابدهنده اصلی، ذرات در حلقه‌ای به نام حلقه انبارش، با یک انرژی تقریبا ثابت، ذخیره می‌شوند. حلقهٔ انبارش یک شتابدهنده دایروی از انواع شتاب دهندهٔ سینکروترون می‌باشد که با توجه به کاربری آن، می‌تواند به منظور برخورد باریکه (Collider) و نیز به عنوان چشمه امواج الکترومغناطیسی استفاده شود [۱]. به صورت کلی، شتابدهنده‌های دوار از قسمت‌های متفاوتی تشکیل شده اند که از مهمترین

آنها می‌توان به چشمه یون (برای تولید ذرات)، عدسی‌های الکتریکی و مغناطیسی شامل دو قطبی‌ها و چهارقطبی‌ها و ... (برای شتابدهی و کنترل باریکه) و نیز بخش مربوط به هندسه هدف اشاره نمود. در بیشتر موارد در طراحی شتابدهنده‌های دوار و نیز حلقه‌های انبارشی آن با محیط‌های بزرگ، به دلیل افت انرژی (بخصوص در نواحی پیش از ورود باریکه به حلقه انبارش و یا در داخل حلقه انبارش) از ترکیب یک آهنربای چهارقطبی واگرا و دو آهنربای چهارقطبی همگرا که طولشان نصف طول آهنربای چهارقطبی واگراست، استفاده می‌گردد، که به عنوان سلول FODO شناخته می‌شود (شکل ۱). با توجه به استفاده منظم از چنین آرایش متقارنی در طول حلقه انبارش، از حجم محاسبات برای تعیین مشخصات باریکه کاسته می‌شود. به منظور تعیین مشخصات باریکه از پارامترهای متفاوتی مانند امیتانس و درخشندگی استفاده می‌شود. در واقع با نمایش باریکه ذرات در فضای فاز، به کمک تئوری لیوویل می توان ثابت کرد، چگالی ذرات در فضای فاز در راستای خطوط باریکه تحت نیروهای پایستار تغییر نمی‌کند. ناحیه محصور در فضای فاز ذرات باریکه توسط یک بیضی معرفی می‌شود به طوری که جهت‌گیری آن، خصوصیات باریکه و مساحتش مقدار عددی کمیتی به نام امیتانس را بیان می کند.



شکل ۱. نمایش حلقه انبارشی شبیه‌سازی شده و شبیه‌سازی FODO به کمک نرم افزار BDSIM و GEANT4

برای تحلیل حرکت ذره باردار تحت تاثیر میدان‌های الکترومغناطیسی در طول یک شتابدهنده، به معادلات دینامیک حرکت ذره نیازمندیم. این معادلات به طور معمول در سیستم‌های دوار بدلیل تغییر مداوم جهت ذره از دستگاه مختصات متصل به ذره، که به دستگاه مختصات Frenet–Serret معروفند استفاده می‌شود، که حجم محاسبات را تا میزان بالایی کاهش می‌دهد[۱]، اما بدلیل وجود جملات اختلالی (غیر همگن) جواب‌های ریاضیاتی دقیقی ندارند و با تقریب همراه هستند. یکی از کارامدترین و دقیق ترین روش‌ها در جهت کاهش خطای محاسبات استفاده از روش‌های محاسباتی بر پایه روش مونت کارلو است[۲]. شبیه‌سازی

مونت کارلو به طور ویژه‌ای در مطالعه سیستم‌هایی با درجه آزادی زوج و در مدل سازی پدیده‌هایی با مقادیر قابل توجهی عدم اطمینان، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش پس از مدل سازی دقیق حالت تعادل، با تغییر تصادفی موقعیت و جهتگیری ذرات موجود در سیستم، پیکربندی‌هایی از سیستم تولید می‌شود. با نمونه برداری صحیح از این پیکربندی‌ها و میانگین‌گیری، می‌توان تغییرات کمیت را تعیین کرد. نرم افزارهای متفاوتی برای شبیه‌سازی سیستم‌های شتابدهنده ذرات توسعه یافته‌اند که از جمله آن می‌توان به magic, spiffe, elegant, و... اشاره نمود. یکی از این برنامه‌ها ، برنامه Geant4– BDSIM است [۴-۲].

در این مقاله به کمک نرم افزار Geant4– BDSIM ، طراحی و شبیه‌سازی یک حلقه انبارش الکترونی شامل ۶۰ سلول FODO (۵۴۰ دو قطبی و چهارقطبی) در یک محیط دایره ای ۲۰۰ متری، پرداخته شده است. و به کمک سیستم شبیه‌سازی شده، مشخصات باریکه خروجی به کمک پارامترهایی مانند امیتانس و پروفایل انرژی و پروفایل فضایی مورد ارزیابی قرار گرفته است. علاوه بر آن، به کمک توانایی‌های این نرم افزار، به بررسی نحوه اتلاف انرژی در طول محیط حلقه انبارش و مختصات از دست دادن انرژی پرداخته شده است.

روش کار :

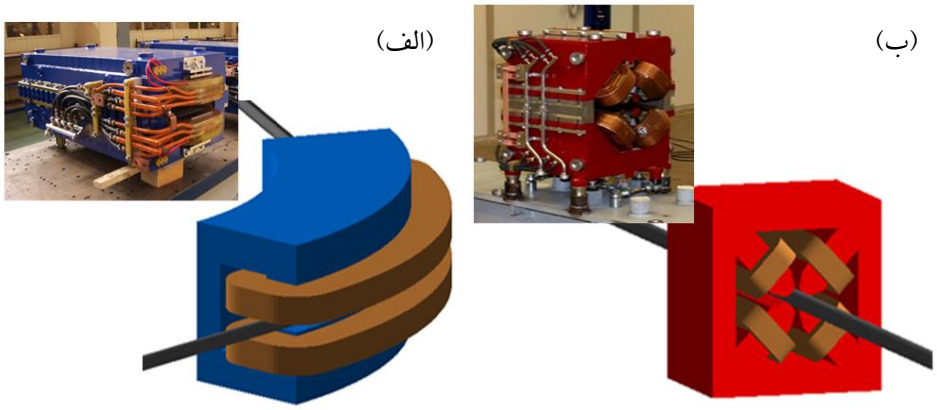
کد BDSIM (Beam Delivery Simulation) برنامه‌ای تحت زبان C++ است که با استفاده از ابزارها و کتابخانه Geant4 برای شبیه‌سازی خطوط انتقال ذرات در شتابدهنده‌ها و نیز برای برهمکنش ذرات با اجزای شتابدهنده بکارگرفته می‌شود. این برنامه توانایی شبیه‌سازی اجزای مختلف شتابدهنده وکنترل باریکه همچون دوقطبی‌ها، چهارقطبی‌ها، هشت قطبی‌ها و عدسی‌های الکترواستاتیکی را با استفاده از نرم افزار Geant4 دارا است [۴-۳]. با توجه به دقت و توانایی بالای این کد، کاربردهای بسیاری برای این نرم افزار توسعه یافته که از جمله آن می‌توان به شبیه‌سازی اتلاف باریکه LHC (Large Hadron Collider)، بررسی پس زمینه میون، CLIC(Compact Linear Collider)، پس زمینه‌های آشکارساز و بررسی کیفیت موازی ساز ILC (International Linear Collider)، پردازش تابش سینکروترون و ... اشاره نمود [۶-۵].

اجزای مورد نیاز برای طراحی و شبیه‌سازی آرایش FODO :

آهنربای دوقطبی: به منظور انحراف ذرات باردار در خطوط باریکه شتابدهنده‌های دایروی حول یک مسیر منحنی با استفاده از میدان مغناطیسی از ابزاری به نام آهنربای دوقطبی استفاده می‌کنند. در واقع این آهنربا کوچکترین مرتبه میدان مغناطیسی در سیستم‌های انتقال باریکه را که مقداری ثابت و همگن در ناحیه نزدیک باریکه داراست را می‌سازد. آهنربای دوقطبی شامل دوقطبی‌های دایره‌ای (sector)، مستطیلی و لبه‌دار است. یکی از مهمترین معیارها در انتخاب نوع آهنربای دوقطبی میدان‌های لبه‌ای است [۱]. در شکل الف-۲

می‌توان نمونه‌ای از یک آهنربای دوقطبی شبیه‌سازی شده به همراه نمونه واقعی ساخته شده توسط DESY (Deutsches Elektronen Synchrotron) را مشاهده نمود.

آهنربای چهارقطبی: هنگامی‌که تمام ذرات باردار تمایل به واگرایی دارند حلقه‌ای تنها شامل آهنرباهای دوقطبی، مناسب خطوط انتقال باریکه نیستند. در نتیجه همانند کاربرد عدسی‌ها در اپتیک نوری، از ابزارهای همگرایی باریکه ذرات به محدوده خطوط ایده‌آل (خطوطی که ابزارهای مغناطیسی در آن مسیر نصب گردیده‌اند) مانند آهنربای چهارقطبی استفاده می‌شود. آهنربای چهارقطبی با توجه به علامت بار ذره در یک صفحه سبب همگرایی و در صفحه دیگر سبب واگرایی باریکه می‌گردد [۱]. در شکل ب-۲ یک چهارقطبی با ساختار مکعبی شبیه‌سازی شده در BDSIM به همراه یک نمونه آهنربای چهار قطبی ساخته شده در DESY نمایش داده شده است.



شکل۲. الف) شبیه‌سازی آهنربای دوقطبی به همراه نمونه واقعی، ب) شبیه‌سازی آهنربای چهارقطبی به همراه نمونه واقعی

حلقه انبارش شبیه‌سازی شده شامل ۶۰ سلول FODO (شکل ۱) است که در مجموع از ۵۴۰ قطعه تشکیل شده است. مشخصات کامل سیستم شبیه‌سازی شده را می توان در جدول ۱ مشاهده نمود. به منظور توصیف پروفایل ورودی باریکه الکترونی، از یک توزیع گاوسی برای پروفایل فضایی و انرژی استفاده شده، تا شبیه‌سازی‌ها تا حد ممکن به واقعیت نزدیکتر شود. در واقع توزیع ذرات را در برنامه‌های شبیه‌سازی وقتی که تعداد ذرات زیاد باشد به صورت یک توزیع گاوسی همانند رابطه (۱) در نظر می‌گیرند تا با نتایج واقعی قابل قیاس باشد (که x و z مختصات فضایی و σ_iها، انحراف معیار در راستاهای x و z هستند). در این مقاله مقادیر به صورت (σ_x =94.3μm , σ_z =8.4μm , N=10^5) انتخاب شده‌اند.

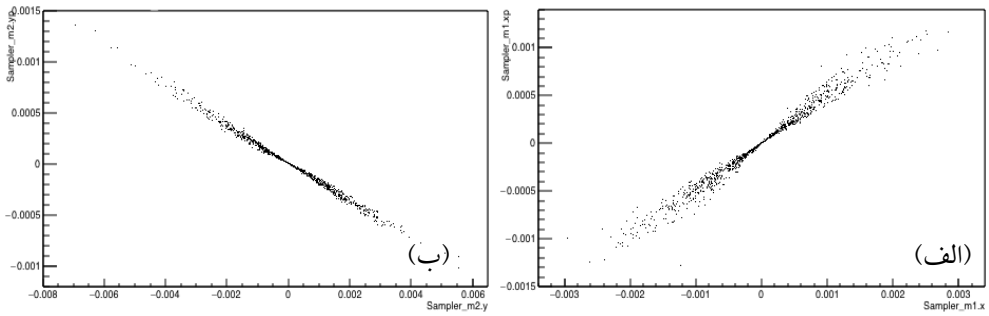
$$\rho(x,z) = \frac{Ne}{2\pi\sigma_x\sigma_z}\exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}-\frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right) \qquad (۱)$$

نتایج

با توجه به اینکه برنامه BDSIM تحت Geant4 اجرا می‌شود می‌توان فرایندهای فیزیکی مختلفی همچون تابش برمشترلانگ، تابش سینکروترون، تابش چرنکوف، پراکندگی‌های چند گانه و ...را به کمک آن ارزیابی نموده و نتایج آن را به کمک نرم افزار ROOT نمایش داد. در وهله نخست، امیتانس باریکه مورد ارزیابی قرار گرفت تا اثرات سلول‌های FODO در حلقه انبارش، بر کیفیت باریکه مورد مطالعه قرار گیرد. همانطور که از نمودارهای امیتانس باریکه در شکل ۳ قابل مشاهده است باریکه در ابتدای مسیر خود کمی واگرا بوده اما باریکه خروجی از همگرایی مناسبی برخوردار است.

جدول ۱. مشخصات حلقه FODO شبیه‌سازی شده

محیط حلقه	200 m	
آهنربای دو قطبی دایره ای	L	angle
	0.83 m	0.052 rad
آهنربای چهارقطبی همگرا	L	K
	0.17 m	2.57
آهنربای چهارقطبی واگرا	L	K
	0.33 m	-2.57
انرژی باریکه	3 GeV	



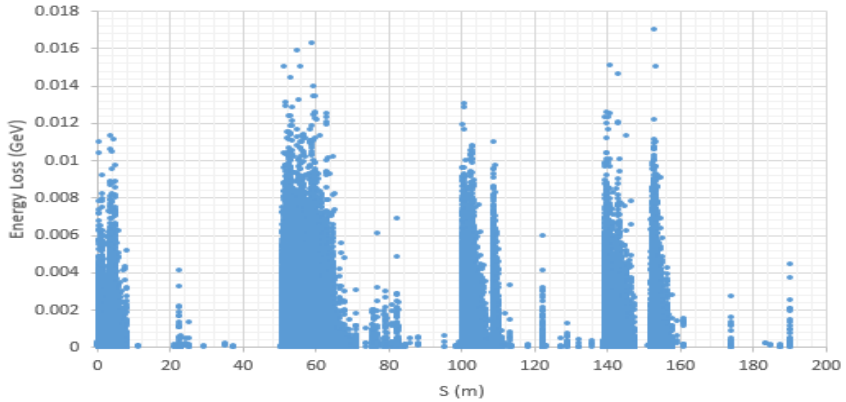
شکل۳. امیتانس باریکه (الف) فرودی و (ب) خروجی شبیه‌سازی شده توسط BDSIM و تحلیل به کمک کد ROOT

با توجه به اینکه در سیر باریکه در حلقه انبارشی، دستیابی به بیشینه شدت ذرات فرودی با کمترین اتلاف انرژی برخوردی ذرات مورد نظر است، بررسی میزان اتلاف انرژی باریکه در طول مسیر ذرات حائز اهمیت است. این اتلاف به واسطه تابش و برخورد ذرات باریکه با سلول‌های FODO روی می دهد. در شکل ۴ نمودار اتلاف انرژی ذرات در طول محیط حلقه به نمایش درآمده است. همانطورکه از شکل قابل استنباط است، اگرچه در برخی از نواحی محیط حلقه انبارش، اتلاف انرژی محسوس و به نسبت قابل توجه است،

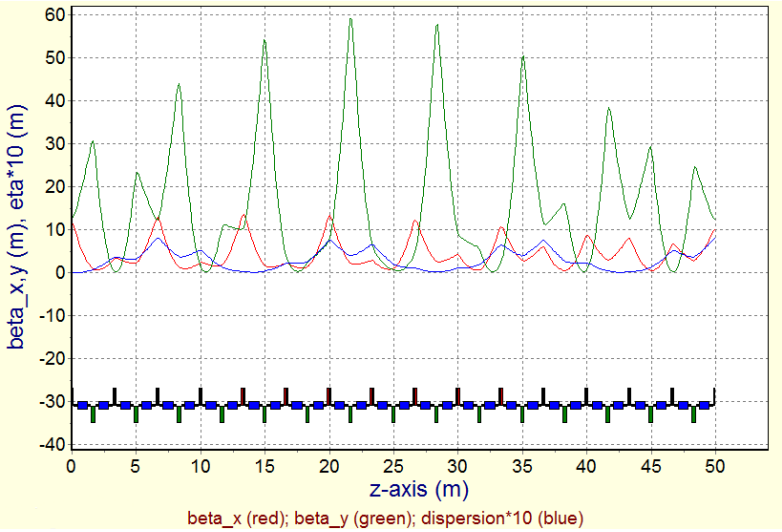
اما میزان بیشینه آن در حدود MeV می باشد که با توجه به انرژی بالای ذرات، چندان تاثیرگذار نخواهد بود. با توجه به اینکه اجزای خطوط انتقال باریکه در مسیر حرکت باریکه نصب شده‌اند، ذرات در راستای حرکتشان حول این مسیر، نوسان انجام می‌دهند که به نوسان بتاترونی معروف است و با توجه به دینامیک حرکتشان، مسیر آنها از توابع خاصی به نام توابع بتاترونی تبعیت می‌کند. درواقع این توابع توصیف کننده مدولاسیون دامنه نوسان بتاترونی ذرات هستند. در شکل ۵ تغییرات توابع بتاترونی و پراکندگی باریکه به نمایش درآمده است. کاهش امیتانس باریکه خروجی نشان از کارایی مناسب سیستم شبیه‌سازی شده برای حلقه انبارشی باریکه الکترونی است.

نتیجه گیری

نتایج شبیه‌سازی حلقه انبارش الکترونی۳GeV و ارائه داده‌های خروجی متفاوت، توانایی و قدرت نرم‌افزار BDSIM-Geant4 را برای مدل‌سازی سیستم‌های شتابدهنده پرانرژی و حلقه انبارشی، نشان می‌دهد. با توجه به همگرایی امیتانس باریکه خروجی توسط نمودارهای امیتانس، شعاع باریکه خروجی را می توان به کمک عدسی‌های مناسب تنظیم نمود. از طرفی دیگر، نمودارهای بدست آمده به کمک شبیه‌سازی حلقه انبارش الکترونی نشان می‌دهد که در ابتدای مسیر بدلیل وجود واگرایی باریکه احتمال برخورد با سلول‌های FODO وجود دارد، و نیز باریکه طی حرکت در راستای خطوط باریکه، بخشی از انرژی خود را به صورت تابش و حتی برخوردی از دست می‌دهد، که البته در مقایسه با انرژی باریکه بسیار ناچیز است.



شکل ۴. نمودار مقدار انرژی(GeV) اتلافی ذرات در واحد طول محیط حلقه انبارش



شکل ۵. نمایش تغییرات توابع بتاترونی وپراکندگی در ۵۰ متراز مسیر باریکه

مراجع :

[1] H. Wiedemann, Particle accelerator physics, Springer, Fourth edition, 2015.
[2] S. Koonin,D. Meredith,Computational Physics:Fortran Version,Westview Press,1989 ,ch.8.
[3] I. Agapov, GMAD Accelerator description language, Eurotev-Memo, 2006.
[4] S. Agostinelli et al., Geant4 - a simulation toolkit, Nucl. Instrum. Methods A, 506, 2003.
[5]G.A.Blair, interaction region and backgrounds using BDSIM, in Proceedings of 2005 International Linear Collider Workshop, Stanford, 2005.
[6] I. Agapov and et al., BDSIM: A particle tracking code for accelerator beam-line simulations including particle-matter interactions, Nucl. Instrum. Methods A, 606, 2009.