



## بررسی ترابرد ذرات باردار در میدان مغناطیسی و شبیه‌سازی تابش سینکروترون با استفاده از کد FLUKA

فرشاد قاسمی، مجید شهریاری، فریدون عباسی دوانی\*

گروه کاربرد پرتوها، دانشکده مهندسی هسته‌ای، دانشگاه شهید بهشتی، صندوق پستی: ۱۹۸۳۹۶۳۱۱۳، تهران - ایران

**چکیده:** روش اجزای محدود و نیز روش مونت کارلو، دو روش بسیار کاربردی و پایه‌ای در بسیاری از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی و مدل‌سازی هستند. ترابرد ذرات باردار در میدان الکتریکی و مغناطیسی بر پایه‌ی این دو روش، به وسیله‌ی تعدادی از نرم‌افزارها امکان‌پذیر است. اما تعداد معدودی از نرم‌افزارها از امکان ترابرد تابش ثانویه حاصل از حرکت ذره‌ی باردار در میدان مغناطیسی برخوردارند. کد FLUKA یکی از این نوع نرم‌افزارها است. در این مقاله، مدل‌سازی و شبیه‌سازی انجام شده برای بررسی تابش سینکروترونی الکترون به وسیله‌ی این کد ارائه شده است. نتیجه‌ی به دست آمده، با آنچه که از روابط فیزیکی مورد انتظار است، کاملاً مطابقت دارد. بررسی زوایای خروجی باریکه‌ی فوتونی تابش سینکروترون و کاهش انرژی آن از نتایج این مقاله است. این بررسی‌ها با کارت ویژه‌ی میدان magfld و کارت usrbn انجام شده است.

**کلید واژه‌ها:** ترابرد ذره‌ی باردار، میدان مغناطیسی، روش مونت کارلو، روش اجزای محدود، کد FLUKA، تابش سینکروترونی

## Investigation of Charged Particle Transport in Magnetic Field and Simulation of Synchrotron Radiation by FLUKA

F. Ghasemi, M. Shahriari, F. Abbasi Davani\*

Radiation Application Department, Nuclear Engineering Faculty, Shahid Beheshti University, P.O.Box: 1983963113, Tehran - Iran

**Abstract:** Finite element and Monte Carlo are two basic and useful methods in numerous modeling and simulation codes. Charged particles transport in electric and magnetic fields based on these methods is the feasible manipulation of some software. There are, however few codes that have the ability of explaining the secondary radiation transport resulting from the movement of the charged particles in a magnetic field. FLUKA, for example, is known to be one of them. In this paper, a modeling and the simulation process using the FLUKA code for the survey of the synchrotron radiation of the electron are presented. The results found to be in agreement with those predicted by the known theoretical approach. The analysis of the synchrotron radiation of the output photon beam and the beam energy reduction are the basic results of the present work. For this investigation a specific field card MAGFLD and a USRBIN card have been applied.

**Keywords:** Charged-Particle Transport, Magnetic Field, Monte Carlo Method, Finite Element Method, FLUKA Code, Synchrotron Radiation





## ۱. مقدمه

نرم‌افزارها را شامل می‌شوند، «روش اجزای محدود»<sup>(۱)</sup> و «روش مونت کارلو»<sup>(۲)</sup> است [۱].

روش اجزای محدود قابلیت محاسبه‌ی کمیت‌ها در گستره‌ی وسیعی از میدان‌ها را دارد. این گستره شامل میدان‌های مغناطیسی، میدان‌های الکتریکی و هم‌چنین فضای توزیع گرمایی می‌باشد. این کمیت‌ها توسط معادلات دیفرانسیل تحلیل می‌شوند. چنین معادلاتی را برای سیستم‌های ساده می‌توان به‌طور تحلیلی حل کرد اما وقتی با هندسه و رفتارهای پیچیده‌ای از مواد سروکار داریم، روش‌های عددی مفیدتری وجود دارند که می‌توان از آن‌ها استفاده کرد [۱].

برای حل یک معادله‌ی دیفرانسیلی به وسیله‌ی یک کامپیوتر عددی، معادله‌های دیفرانسیلی حاکم بر رفتار سیستم باید به مجموعه‌ای بزرگ از معادله‌های خطی تبدیل شوند. تدبیر و روش کار به این صورت است که فضای کار به قطعه‌ها و عناصر کوچک تقسیم می‌شود تا این که تغییرات زمینه در یک تک قطعه قابل مشاهده و محاسبه باشد. این عملیات مش‌بندی نامیده می‌شود و اساس روش اجزای محدود است.

در واقع روش اجزای محدود، روشی برای ایجاد مجموعه معادلات خطی می‌باشد. در این روش، مرزهای هر یک از مش‌ها و نیز اجزایی که در هر مرز و مش وجود دارند تشخیص داده می‌شوند. مزیت این روش و نتیجه‌ی گرفته شده از آن، دقت بالا در تعداد عملیات محدود می‌باشد [۱].

روش مونت کارلو محدوده‌ی بسیار گسترده‌ای از دانش را پوشش می‌دهد که در آن سیستم‌های فیزیکی و پدیده‌ها به وسیله‌ی روش‌هایی که از اعداد تصادفی استفاده می‌کنند شبیه‌سازی می‌شوند. طرح کلی تحلیل مونت کارلو ساختن مدلی است که تا حد ممکن به سیستم فیزیکی واقعی موردنظر شبیه باشد. هم‌چنین تولید برهم‌کنش‌ها در سیستم براساس احتمال‌های وقوع معلوم با نمونه‌برداری تصادفی از توابع چگالی احتمال انجام می‌پذیرد. هر چه تعداد رخداد‌های جداگانه (تاریخچه‌ها) افزایش پیدا کند، کیفیت رفتار میانگین گزارش شده‌ی سیستم به همان اندازه بهبود می‌یابد. به این معنی که نایقینی آماری کاهش می‌یابد. اگر توزیع رخداد‌هایی که در سیستم اتفاق می‌افتند برحسب تجربه معلوم باشد، یک تابع چگالی احتمال می‌تواند تولید شده و به صورت تصادفی نمونه‌برداری شود تا سیستم واقعی را شبیه‌سازی کند [۲].

علم شتاب‌دهنده‌ها یکی از پیشرفته‌ترین و پیشروترین علوم رایج در دنیا است، به نحوی که امروزه بسیاری از دستاوردهای فن‌شناختی بشر از مراکزی که به‌طور گسترده بر روی ساخت و به‌کارگیری شتاب‌دهنده‌ها کار می‌کنند حاصل می‌شود. برای مثال، استفاده‌ی گسترده از شبکه‌های کامپیوتری نظیر اینترنت و ابررایانه‌ها و نیز گسترش آن‌ها را می‌توان از این دستاوردها دانست. لزوم استفاده‌ی گسترده از (ابر)رایانه‌ها در این دانش، از دو حقیقت: ۱- پیشرو بودن سطوح جدید این دانش (در بخش شتاب‌دهنده‌های پیشرفته‌ی جدید) و نبود تجربه‌ی عملی ۲- پرهزینه بودن ساخت و کسب تجربه‌ی عملی لازم، ناشی می‌شود. این محدودیت‌ها استفاده از شبیه‌سازی قطعات و اجزای شتاب‌دهنده‌ها و نحوه‌ی عملکرد آن‌ها با استفاده از انواع مختلف نرم‌افزارها را اجتناب‌ناپذیر می‌سازد [۱].

در این راستا نرم‌افزارهای زیادی طراحی شده‌اند که نحوه‌ی عملکرد اجزای مختلف و نیز باریکه را شبیه‌سازی می‌کنند. تعدادی از این نرم‌افزارها تنها برای یک نوع شبیه‌سازی طراحی شده‌اند اما تعداد زیادی از آن‌ها حالت کلی تری داشته و می‌توانند چندین نوع شبیه‌سازی را پوشش دهند و علاوه بر شبیه‌سازی شتاب‌دهنده‌ها در سایر علوم نیز کاربرد دارند.

حوزه‌های کاربرد نرم‌افزارهای به‌کار رفته در شبیه‌سازی اجزای مختلف یک شتاب‌دهنده را می‌توان به صورت: (۱) میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در محدوده‌ی بسامدهای متفاوت، (۲) دنبال کردن مسیر حرکت ذره‌ی باردار و طراحی تفنگ الکترونی و چشمه‌ی یونی، (۳) ترابرد گرمایی در جامدات و بافت‌ها، (۴) بررسی نفوذ الکترون‌ها، فوتون‌ها، پوزیترون‌ها و سایر ذرات باردار در ماده (۵) شبیه‌سازی مکانیکی سه‌بعدی اجسام برای ساخت دقیق آن‌ها، تقسیم‌بندی کرد.

هر کدام از نرم‌افزارهای تحلیلی با حل تعداد زیادی از معادلات ریاضی ساده و پیچیده که بر فیزیک حاکم بر هر یک از اجزای سیستم موردنظر دلالت دارند، به شبیه‌سازی آن سیستم می‌پردازد. روش‌های متفاوتی برای حل این معادلات وجود دارند که هر یک براساس ماهیت فیزیکی متفاوت حاکم بر معادلات عمل می‌کنند. هر نرم‌افزاری ناگزیر باید از یکی از این روش‌ها بهره بگیرد. دو روش بسیار کاربردی که اساس کار بسیاری از



## ۲. طرح مسئله و انتخاب ابزار مناسب

به طور کلی دنبال کردن ذره‌ی باردار در دو حالت قابل بررسی است. حالت اول، بررسی مسیر ذرات باردار در میدان (الکتریکی و مغناطیسی) و حالت دوم، دنبال کردن حرکت ذرات، بدون در نظر گرفتن میدان که بیش‌تر بر چگونگی دنبال کردن یک ذره در درون یک ماده و اندرکنش‌های آن استوار است [۱].

نرم‌افزارهایی که بر حالت اول استوارند، اغلب ابزارهایی هستند که خودشان ابتدا میدان الکتریکی و یا مغناطیسی را محاسبه کرده و سپس چگونگی حرکت ذره در چنین میدانی را شبیه‌سازی می‌کنند. تعداد اندکی نیز وجود دارند که از خروجی نرم‌افزارهای دیگر در به دست آوردن میدان، بهره گرفته و خودشان تنها حرکت ذره را دنبال می‌کنند. نرم‌افزاری که براساس حالت دوم کار می‌کنند، بیش‌تر براساس روش مونت کارلو عمل کرده و حرکت ذره را در اجسام مختلف دنبال می‌کنند [۱].

ابزارهایی که توانایی ترابرد ذره را دارند عبارت‌اند از: CST، Ansys، Geant4، MCNP، FLUKA، EStat، Mesh، Trak، PerMag، Simion، Mafia، Opera، TOSCA، SCALA، RADIA و OmniTrak. که از میان آن‌ها، نرم‌افزارهای CST، Ansys، OmniTrak، Simion، Mafia، Opera، TOSCA، SCALA و RADIA ابزارهای قدرتمندی برای شبیه‌سازی انواع میدان مغناطیسی و حرکت ذره در چنین میدان‌هایی هستند. کدهای Geant، MCNP و FLUKA نیز دنبال کردن حرکت ذره در درون یک ماده و اندرکنش‌های آن را به خوبی انجام می‌دهند [۱].

در این پژوهش ما به دنبال نرم‌افزاری هستیم که اولاً توانایی ترابرد ذره‌ی باردار در میدان مغناطیسی را داشته باشد و ثانیاً اندرکنش‌های ذره را در حضور میدان مغناطیسی ارائه دهد. نرم‌افزاری که برای این منظور مناسب تشخیص داده شد، کد FLUKA است.

FLUKA یک ابزار با اهداف عمومی برای محاسبه‌ی ترابرد ذرات و برهم‌کنش آن‌ها با ماده است. این کد در گستره‌ی وسیعی از کاربردها شامل حفاظ‌سازی شتاب‌دهنده‌های پروتون و الکترون، طراحی هدف، کالریمتری، فعال‌سازی، دزیمتری، طراحی آشکارساز، سیستم‌های شتاب‌دهنده، پرتوهای کیهانی،

زمان محاسبات برای یک شبیه‌سازی مونت کارلو به عوامل بسیاری بستگی دارد. اما به طور اساسی توسط دقت مورد انتظار از نتایج، تعیین می‌شود. چون مونت کارلو یک روش آماری است، دقت با مجذور تعداد تاریخچه‌ها و در نتیجه با مجذور زمان متناسب است [۲].

این مقاله، ابتدا به معرفی موردی تعدادی از نرم‌افزارهایی که در شبیه‌سازی ترابرد ذرات باردار در میدان مغناطیسی کاربرد دارند، می‌پردازد. در ادامه کد Fluka به عنوان یکی از معدود نرم‌افزارهایی که تابش‌های ثانویه‌ی الکترومغناطیسی را شبیه‌سازی می‌کند معرفی می‌شود و پس از ارایه‌ی توضیح مختصری از ویژگی شبیه‌سازی میدان مغناطیسی در کد Fluka، امکان شبیه‌سازی تابش سینکروترون در این کد مورد بررسی قرار می‌گیرد. از آن‌جا که می‌توان تابش سینکروترون را یکی از مهم‌ترین نموده‌های ترابرد ذره‌ی باردار در میدان مغناطیسی دانست، بررسی امکان شبیه‌سازی چنین پدیده‌ای بسیار حایز اهمیت است. زیرا هم شبیه‌سازی میدان مغناطیسی را شامل می‌شود و هم امکان مطالعه‌ی تابش ثانویه‌ی حاصل را فراهم می‌کند.

از طرفی، وقتی نرم‌افزاری عرضه می‌شود، یکی از دغدغه‌های توسعه‌دهندگان آن یافتن نقاط قوت و ضعف آن است. این امر برای نرم‌افزارها با منبع آزاد<sup>(۳)</sup> از اهمیت بیش‌تری برخوردار است. یکی از دلایل منبع آزاد بودن این نرم‌افزارها استفاده‌ی افراد مختلف از آن‌ها، یافتن ایرادات، گزارش آن‌ها به توسعه‌دهندگان اصلی و پیشنهاد برای بهبود آن‌ها است. کدهای Geant و Fluka از جمله‌ی این نرم‌افزارها هستند که به راحتی از طریق اینترنت قابل دسترسی‌اند.

جستجوی مختصر مقالاتی که در مجلات معتبر به بررسی عملکرد این نوع کدها در یک مورد خاص می‌پردازند، نشان از اهمیت گزارش نحوه‌ی استفاده، امکانات و معایب آن‌ها دارد تا دیگر استفاده‌کنندگان با آشنایی بیش‌تری به انتخاب نرم‌افزار مناسب خود پردازند. مقاله‌ی حاضر تلاش دارد، پژوهشگران داخل کشور را با امکان ترابرد ذرات باردار در میدان مغناطیسی و انتشار فوتون ناشی از آن در کد Fluka آشنا سازد تا در صورت نیاز از آن استفاده کنند. ارایه‌ی پیشنهادات برای ادامه‌ی این پژوهش از دیگر نتایج این مقاله است.



از طرفی تابش الکترومغناطیسی به صورت تابعی از انرژی ذرات بوده و با افزایش انرژی، به شدت افزایش می‌یابد. با توجه به  $E=pc$  و  $\gamma=E/m_0c^2$  و با جای گذاری این روابط، توان تابشی در مدت شتاب‌دهی عرضی به صورت زیر به دست می‌آید [۴]

$$P_s = \frac{e^2 c}{6\pi\epsilon_0} \frac{E^4}{(m_0 c^2)^4 R^2} \quad (۴)$$

توزیع زاویه‌ای تابش سینکروترونی الکترون‌های نسبیته خیلی پیچیده‌تر از دایبل هرتر است. زاویه‌ی فوتون گسیلیده نسبت به راستای باریکه‌ی الکترون از رابطه‌ی ۵ به دست می‌آید. شکل (a-1) این زاویه را نشان می‌دهد [۴]. براساس اطلاعات این شکل باریکه‌ی فوتونی مشاهده شده توسط یک ناظر (یک نقطه) برای الکترون‌های نسبیته، به صورت باریکه‌های فوتونی با عرض  $2/\gamma$  است

$$\tan \Theta = \frac{p_y}{p_z} = \frac{p'_0}{\beta \gamma p'_0} \approx \frac{1}{\gamma} \quad (۵)$$

روابط فوق، بنیادی‌ترین روابط در بررسی ترابرد تابش ناشی از ذرات باردار و بررسی آن‌ها اولین قدم در به کارگیری یک نرم‌افزار با این قابلیت است. برای این منظور، ساده‌ترین هندسه‌ی ممکن در کد Fluka شبیه‌سازی شد. در این هندسه که در شکل (b-1) دیده می‌شود، میدان مغناطیسی در جهت مثبت محور xها و جهت اولیه‌ی باریکه در راستای محور zها است، این هندسه تداعی کننده‌ی میدان حاصل از یک دوقطبی ساده می‌باشد. علت این انتخاب علاوه بر سادگی بررسی روابط مورد اشاره در آن، نقشی است که مغناطیس‌های دوقطبی به وجود آورنده‌ی میدان یکنواخت در تولید تابش سینکروترونی دارند.

برای بررسی رابطه‌ی ۳ باریکه‌های مختلف با انرژی‌های متفاوت و در میدان‌های مغناطیسی با شدت‌های مختلف در نظر گرفته شد. در کد Fluka برای تعریف میدان مغناطیسی از کارتی به نام magfld استفاده می‌شود. شکل ساده‌ی استفاده از این کارت، تنها میدان مغناطیسی یکنواخت را برای دیدن اثر آن در اختیار ما قرار می‌دهد. برای مشاهده‌ی فوتون حاصل، از کارت usrbn که به نوعی انرژی به جا گذاشته شده به وسیله‌ی هر ذره (الکترون و فوتون) در ماده را ارایه می‌دهد، استفاده شده است.

فیزیک نوترینو و رادیوترابی استفاده می‌شود. این کد در مورد فوتون‌ها پدیده‌ی کامپتون، اثر فوتوالکتریک، تولید زوج، پراکندگی رایلی، تولید فوتوهادرون‌ها و در مورد فوتون‌های نوری، تولید و ترابرد تابش چرنکوف، سوسوزنی و علاوه بر این ترابرد نور با طول موج داده شده توسط کاربر در ماده را نیز پی می‌گیرد. این کد هم‌چنین قادر به ترابرد فوتون‌های پلاریزه شده (برای مثال تابش سینکروترونی) و فوتون‌های نوری است. تخمین زمانی و ردیابی تابش‌های گسیلی از یک هسته‌ی رها شده در حالت ناپایدار نیز در این کد قابل انجام است. این کد هم‌چنین قادر به ردیابی صحیح مسیر ذرات باردار (حتی در میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی) است [۳].

### ۳. شبیه‌سازی تابش سینکروترونی در کد FLUKA

مطابق با قوانین بنیادی الکترودینامیک کلاسیک، ذرات باردار شتاب‌دار، تابش الکترومغناطیس گسیل می‌کنند. این تابش برای الکترون‌هایی که انرژی‌شان به قدر کافی بالا است، نقش مهمی را بازی می‌کند. اما در مورد پروتون‌ها و یون‌های سنگین این تابش قابل چشم‌پوشی است.

فرمول عمومی تابش برای ذراتی که به صورت عمودی منحرف می‌شوند تا در مدار دایره‌ای شتاب‌دهنده حرکت کنند، با ثابت فرض کردن انرژی ذرات، به صورت زیر است [۴]

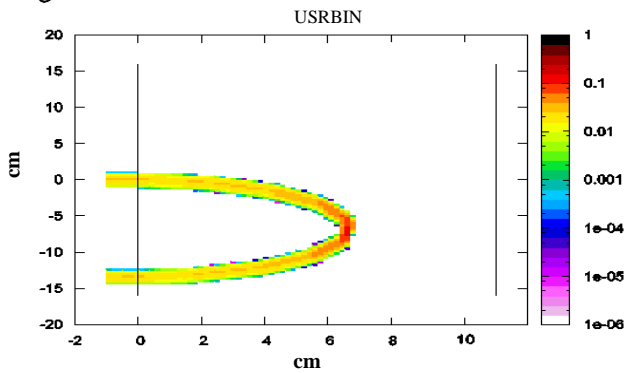
$$P_s = \frac{e^2 c}{6\pi\epsilon_0} \frac{1}{(m_0 c^2)^2} \left(\frac{dp}{dt}\right)^2 = \frac{e^2 c \gamma^2}{6\pi\epsilon_0 (m_0 c^2)^2} \left(\frac{dp}{dt}\right)^2 \quad (۱)$$

که در آن p تکانه‌ی ذره است. در مدت حرکت دایره‌ای تحت زاویه‌ی  $d\alpha$ ، تکانه‌ی ذره به شکل  $dp=p d\alpha$  تغییر می‌کند که به صورت زیر بازآرایی می‌شود

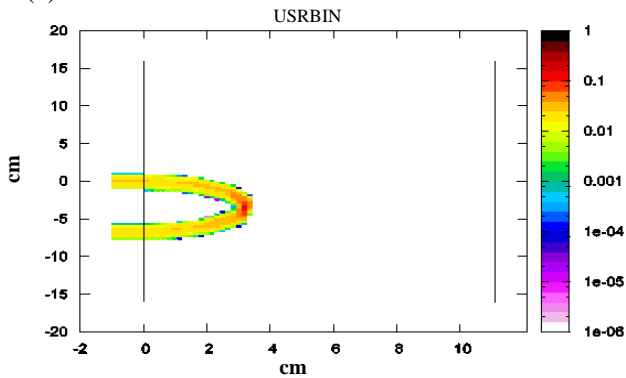
$$\frac{dp}{dt} = p\omega = p \frac{v}{R} \quad (۲)$$

که در آن R شعاع مدار دایره‌ای ذرات است. برای ذرات نسبیته  $(v=c)$ ، شعاع مدار متناسب با انرژی افزایش می‌یابد. در این صورت داریم

$$R = \frac{v m c^2}{e c^2 B} = \frac{v}{e c^2 B} E \approx 0.3 \frac{E}{B} \quad (۳)$$

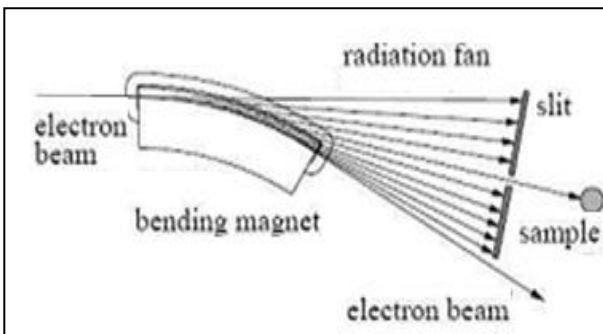


(a)

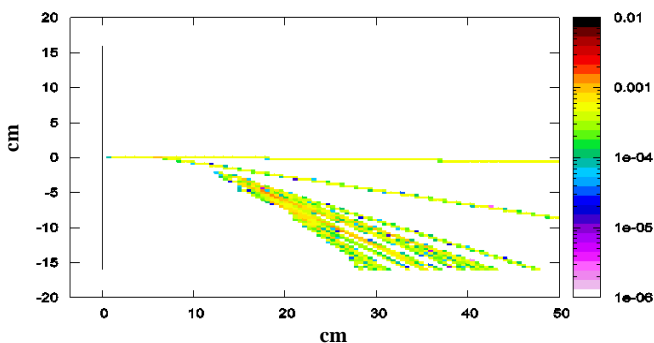


(b)

شکل ۲. اثر میدان مغناطیسی (۵ تسلا) بر باریکه‌ی الکترونی با انرژی ۱۰۰ MeV (a) و ۵۰ MeV (b).

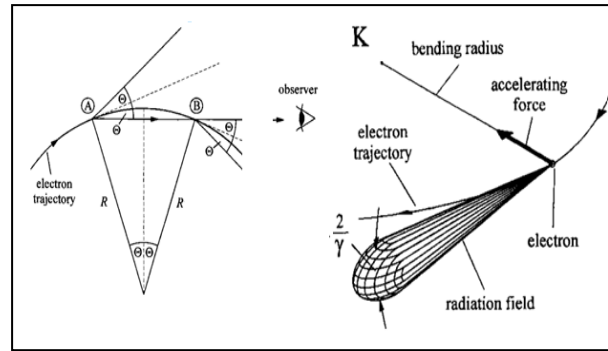


(a)

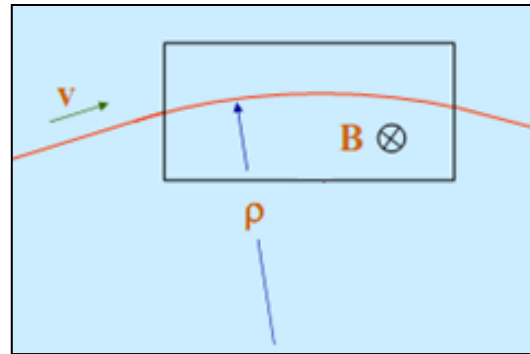


(b)

شکل ۳. تابش انتظاری از یک دوقطبی مغناطیسی [۴] (a) و نتیجه شده از کد Fluka (b) برای باریکه‌ی الکترونی ۱۰۰ MeV در میدان ۱T.



(a)



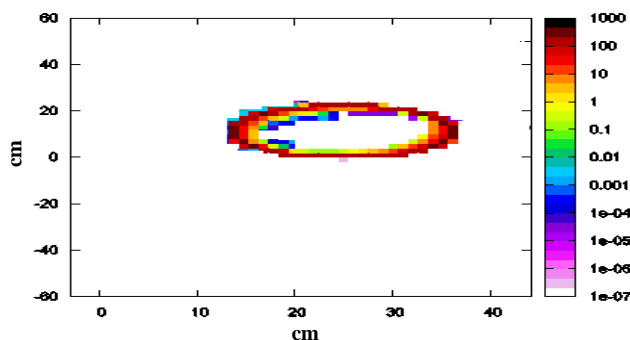
(b)

شکل ۴. سینکروترون [۴] (a) یک هندسه‌ی ساده در کد Fluka.

شکل ۲ اثر میدان مغناطیسی بر باریکه‌ی الکترونی را نشان می‌دهد. در این شکل شعاع انحراف باریکه با انرژی‌های مختلف نشان داده شده است. نتیجه‌ی به دست آمده با آنچه که از رابطه‌ی (۳) انتظار می‌رود، مطابقت دارد.

شکل (۳-۲) تابش انتظاری یک دوقطبی مغناطیسی در یک شتاب‌دهنده‌ی سینکروترون الکترونی را نشان می‌دهد. در شکل (۳-۲) نیز تابش نتیجه شده از کد Fluka برای باریکه‌ی الکترونی به انرژی ۱۰۰ MeV در میدان مغناطیسی یک تسلا، نشان داده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، زوایای خروجی باریکه‌ی فوتونی، با آنچه که مورد انتظار است مطابقت دارد. همان‌سان که مشاهده می‌شود، این زوایا مماس بر مسیر چرخش ذره‌اند.

شکل (۴-۲) انحراف باریکه‌ی الکترونی به انرژی ۱ GeV در میدان ۱۵ تسلا و شکل (۴-۲) نیز فوتون حاصل از آن را نشان می‌دهد. نتیجه‌ی عینی به دست آمده از شبیه‌سازی ذرات باردار در میدان مغناطیسی با استفاده از کد Fluka را می‌توان در شکل‌های ۵ و ۶ مشاهده کرد.

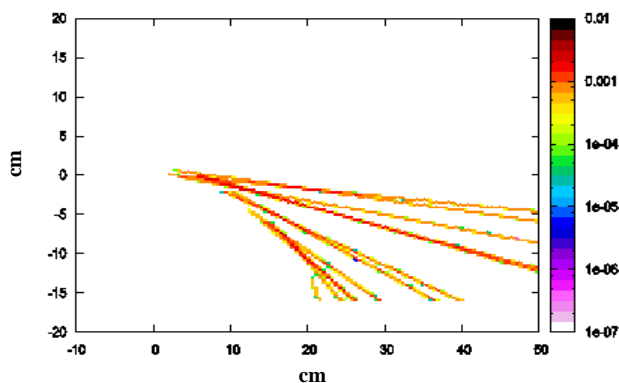


شکل ۶. دوران باریکه‌ی پروتونی.

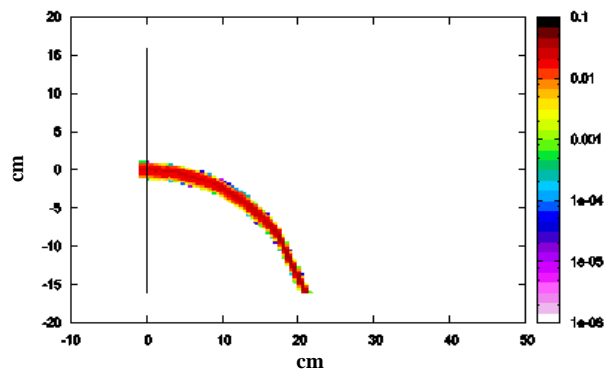
شکل (a-۵) باریکه‌ی الکترونی به انرژی اولیه‌ی ۵۰ MeV را در میدان ۵ تسلا نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، خطوط رنگی این شکل که نشان‌دهنده‌ی انرژی به جا گذاشته شده توسط الکترون در کارت usrbn است، از رنگ قرمز در شعاع‌های بزرگ‌تر شروع شده تا رنگ‌های سبز و آبی که انرژی کم ذره را در شعاع‌های کوچک نشان می‌دهند، گسترده است. پوشیده شدن کل دایره‌ی دوران نشان‌دهنده‌ی این است که، انرژی باریکه رفته رفته کم‌تر و کم‌تر می‌شود تا جایی که شعاع دوران به صفر می‌رسد. کم شدن انرژی باریکه به دلیل گسیل تابش سینکروترونی الکترون است. شکل (b-۵) این تابش را نشان می‌دهد. این شکل در واقع عدم کاربرد شتاب‌دهنده‌ی سیکلوترون برای شتاب‌دهی به الکترون را نمایش می‌دهد. این در حالی است که براساس رابطه‌ی (۴) برای باریکه‌ی یون‌های سنگین‌تر، توان تابشی در انرژی‌های پایین بسیار ناچیز است. کد Fluka قابلیت تعریف هر باریکه‌ای از یون‌ها را دارد. شکل ۶ دوران باریکه‌ی پروتونی در یک میدان یکنواخت را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، شعاع تغییری نکرده است. زیرا پروتون به واسطه‌ی جرم سنگین‌اش تابش ناچیزی دارد.

#### ۴. بحث و نتیجه‌گیری

کد Fluka قادر به ردیابی مسیر ذرات باردار در میدان مغناطیسی است. در این کد برای تعریف میدان مغناطیسی از کارت magfld استفاده می‌شود. با وجود تعریف کارت elcfld در این کد برای لحاظ نمودن میدان الکتریکی، این کارت در سری ۲۰۰۹ این کد غیرفعال است. امکان تعریف میدان‌های پیچیده‌تر

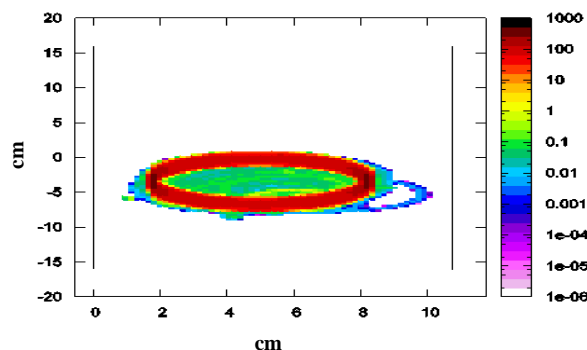


(a)

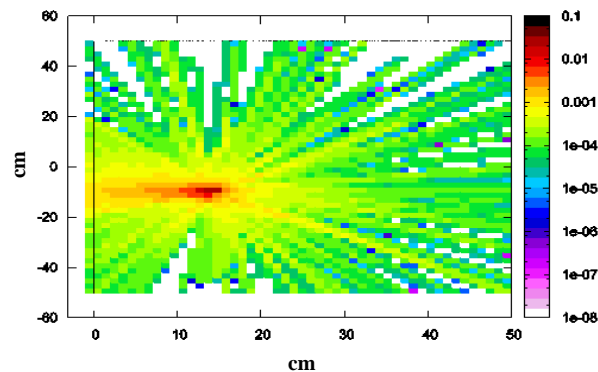


(b)

شکل ۴. (a) انحراف باریکه‌ی الکترونی ۱ GeV در میدان ۱۵ تسلا و (b) فوتون حاصل از آن.



(a)



(b)

شکل ۵. (a) باریکه‌ی الکترونی به انرژی اولیه‌ی ۵۰ MeV در میدان ۵ T و (b) تابش سینکروترونی حاصل از آن.



## References:

1. ف. قاسمی، "گزارش علمی بررسی نرم‌افزارهای مطرح در شبیه‌سازی قسمت‌های مختلف شتاب‌دهنده‌ها،" دانشگاه شهید بهشتی، گروه کاربرد پرتوها، (۱۳۸۹).
2. A. Andreo, "Monte Carlo techniques in radiation," *Physicsphys Med Biol*, 36: 861-920 (1991).
3. WWW.Fluka.org, Fluka.php, August (2010).
4. KLAUS WILLE, *Principle of Charge Particle Acceleration*, OXFORD University Press, (2000).

مغناطیسی نیز برای کارت magfld وجود دارد. اما این کار مستلزم برنامه‌نویسی برای شکل میدان دلخواه است. مطالعه‌ی کیفی تابش سینکروترونی ناشی از الکترون‌های نسبی و زاویه‌ی گسیل این تابش در یک میدان دوقطبی از نتایج این مقاله است. میزان انحراف باریکه‌ی الکترونی، زوایای خروجی باریکه‌ی فوتونی تابش سینکروترونی و کاهش انرژی آن، که از شبیه‌سازی با کد Fluka به دست آمده است با آنچه که از محاسبات انتظار می‌رود، مطابقت دارد. در این کد برای دیدن اثر میدان مغناطیسی می‌توان از کارت usrbn که به نوعی انرژی به جا گذاشته شده به وسیله‌ی هر ذره (الکترون و فوتون) را نشان می‌دهد استفاده کرد. Fluka قابلیت تعریف هر باریکه‌ای از یون‌ها را دارد. پیشنهاد می‌شود در فعالیت علمی و پژوهشی مفصل‌تری میدان‌های مغناطیسی پیچیده‌تر (نظیر مغناطیس‌های Wiggler و Undulator) و نیز کمی‌سازی نتایج، مورد بررسی قرار گیرد.

## پی‌نوشت‌ها:

۱. Finite Element Method
۲. Monte Carlo Method
۳. Open Source