شبیه‌سازی چشمه تابشی ذرات در تله افتاده جهت حفاظ‌سازی تجهیزات الکترونیکی ماهواره‌ها با استفاده از کد FLUKA

سلطانی نبی‌پور،جمشید* [(۱)]– جوان انابد،مرتضی[(۲)] – محمودی،مصطفی[(۲)]– رضایی راینی نژاد،محمدرضا[(۲)]

[۱] دانشگاه آزاد اسلامی واحد پرند، گروه فیزیک

[۲] دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، دانشکده مهندسی برق، گروه مهندسی هسته‌ای

چکیده:

محیط تابشی فضا شامل پروتون‌های پرانرژی، الکترون‌ها، یون‌ها و ذرات ثانویه است که برروی مدارات الکترونیکی تاثیر گذارند؛ بنابراین استفاده از حفاظ برای کاهش اثرات تابشی امری ضروری است. انتخاب و بهینه‌سازی حفاظ بااستفاده از نرم افزار صورت می‌گیرد. اصلی‌ترین مرحله شبیه سازی تعریف دقیق و صحیح چشمه تابشی است. در این تحقیق ابتدا روش تولید چشمه تابشی ذرات درتله افتاده با استفاده از نرم‌افزار فلوکا ارائه شده و در ادامه به عنوان نمونه چند ماده جهت حفاظ سازی مدارات الکترونیکی مورد بررسی قرار گرفته است. یافته‌ها نشان می‌دهند که کد فلوکا انتخاب مناسبی برای شبیه سازی محیط فضا و بررسی اثرات تابشی آن است.

کلمات کلیدی: *ذرات درتله افتاده - شبیه سازی - کد فلوکا – حفاظ سازی*

مقدمه :

محیط تابشی مدارات مختلف زمین از قبیل LEO و GEO اساسا متاثر از بادهای خورشیدی(شامل الکترون و پروتون)، پروتون‌ها و یون‌های کیهانی و همچنین تابش‌های ثانویه از قبیل الکترون‌ها، پروتون‌ها و محصـــولات برخورد ذرات با بدنه سیستم‌های فضایی است[1]. منبع دیگر تابش الکترون‌ها و پروتون‌های در تله افتاده در میدان تابشی ون آلن است. تمامی این تابش‌ها آثاری از قبیل اثرات تک رخداد (SEE)، آســیب جابجایی (DDD) و دوز کامل یونیزان (TID) برجا می‌گذارند[2]. مشابه این آثار در محیط نیروگاه‌های هسته‌ای نیز قابل بررسی است. تخمین اثرات تابشی به دو روش اندازه‌گیری مستقیم و شبیه سازی قابل انجام است. از جمله مزایای مزایای روش دوم می‌توان به تخمین پارامترها برای ماموریت‌های آینده و همچنین کارایی در مواردی که اندازه‌گیری ممکن نیست اشاره کرد. این کدها به دو گروه مبتنی بر مش‌بندی مونت کارلویی تقسیم می شوند. دقت محاسبات انجام شده در این روش مستقیما به صحت مدل فیزیکی کد

مورد استفاده، صحت هندسه و البته به طور خاص به پارامترهای میدان تابشی تعریف شده وابسته است[3]. بررسی کامل فرآیندهای هسته‌ای، قابلیت شبیه‌سازی هندسه‌های پیچیده و تولید چشمه ترکیبی تابشی از مزایای کدهای مونت‌کارلویی نسبت به کدهای مبتنی بر مش‌بندی است. امروزه کاربران زیادی جهت طراحی ماموریت‌های فضایی به کد GEANT4 متمایل شده‌اند[4]. کد فلوکا نیز قابلیت‌هایی که جهت طراحی ماموریت‌های فضایی لازم است را دارا می‌باشد.

ذرات در تله افتاده:

این ذرات به عنوان یکی از خطرات جدی ماموریت‌های فضایی شناخته می‌شوند در نتیجه مدل‌های متفاوتی برای پیش‌بینی جمعیت الکترون‌ها و پروتون‌های در تله افتاده برای ماموریت‌های فضایی معرفی شده‌اند[5].

طیف ذرات درتله افتاده بازه بزرگی از انرژی‌ها را پوشش می‌دهد و به همین دلیل تاثیرات متفاوتی روی تجهیزات فضایی و سیستم‌های زیستی برجای می‌گذارند. الکترون‌های در تله افتاده می‌توانند با برجای گذاشتن مستقیم انرژی و همچنین اثر پرتوهای ترمزی در دوز یونیزاسیون سهیم شوند. بخش اصلی دوز یونیزاسیون در بخش‌های حفاظ‌سازی شده را پروتون‌های پر انرژی ایجاد می‌کنند و پروتون‌های کم انرژی‌تر (تا بیش از ۱۰ MeV) با مکانیزم‌های غیر یونیزان روی آشکارسازها و سلول‌های خورشیدی تاثیر می‌گذارند[6].

مدل‌های استاندارد ذرات در تله افتاده که توسط ناسا توسعه یافته‌اند به ترتیب AE-8 برای الکترون‌ها و AP-8 برای پروتون‌ها است. مدل AP-8 شارپروتون‌ها در بازه انرژی ۴۰۰ MeV – ۱ را پیش‌بینی می‌کند [7] و مدل AE-8 بازه انرژی ۷MeV – ۰/۰۴ را برای الکترون‌ها پوشش می‌دهد[8].

در ادامه نحوه تولید چشمه تابشی ذرات در تله افتاده با استفاده از کد فلوکا مورد بررسی قرار می‌گیرد.

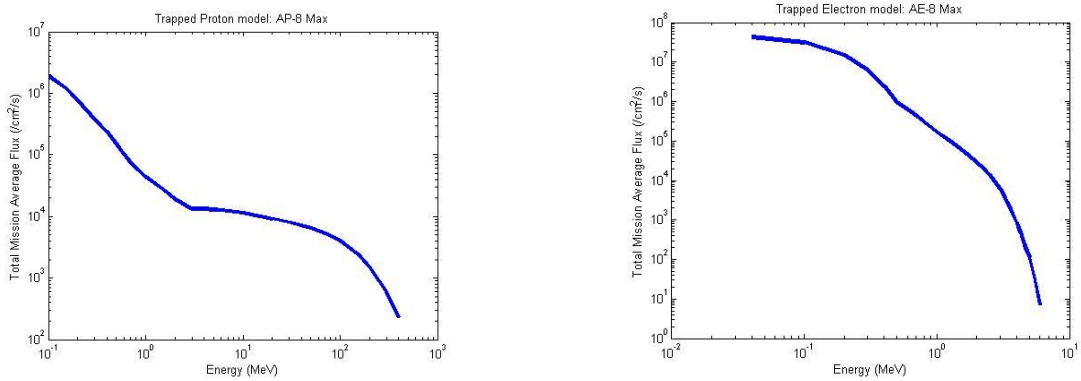
روش کار :

قبل از هر چیز لازم است که طیف ذرات برای ماموریت مورد نظر پیش‌بینی شود. این مهم به وسیله مدل‌های پیش‌بینی کننده شار ذرات انجام می‌گیرد. پارامترهای لازم جهت پیش‌بینی محیط تابشی به صورت زیر تعریف می‌شوند[9].

- پارامترهای مداری ماموریت، شامل ارتفاع از سطح زمین و زاویه حضیض (زاویه‌ای که مسیر حرکت فضاپیما با خط استوا می‌سازد)
- پیش بینی مبدا تاریخی برای پرتاب (پرواز)
- طول دوره ماموریت

ماموریت فرضی در ارتفاع ۱۰۰۰ km از سطح زمین، با زاویه میل مداری ۵۵ درجه و طول دوره ماموریت یک سال از تاریخ ۲۲ آگوست سال ۲۰۱۳ میلادی در نظر گرفته شده است. جهت پیش‌بینی شار ذرات درتله افتاده به ترتیب از مدل‌های AP − 8 و AE − 8 برای پروتونوها و الکترون‌ها استفاده شده است.

تولید چشمه تابشی به روش مونت‌کارلو و براساس انتخاب یک عدد تصادفی از روی تابع توزیع تجمعی از پیش ضبط شده، به صورت $P(E) = \xi$ می‌باشد که ξ یک عدد تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه $[0,1]$ است.

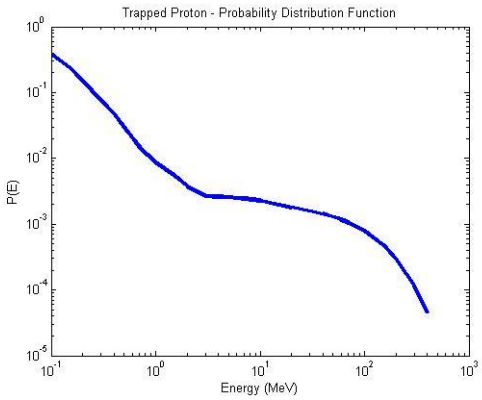


(الف) (ب)

شکل شماره(۱):طیف ذرات درتله افتاده پیش‌بینی شده برای ماموریت فرضی؛ الف)الکترون‌ها و ب)پروتون‌ها

در مواردی که $P(E)$ معلوم باشد از این روش استفاده می‌شود، ابتدا نمودار $P(E)$ به n بازه‌ی مساوی تقسیم شده و ξ معادل با هر بازه به صورت $P_n(E) \propto \xi_n$ محاسبه می‌شود. حال برای ξ هایی که بین دو مقدار ξ_n و ξ_{n-1} باشند، به روش درون‌یابی خطی $P(E)$ را محاسبه می‌کنیم[10]. تابع توزیع تجمعی از رابطه (۱) به دست می‌آید که در آن $P(x)$ تابع توزیع احتمال حاکم بر پیشامدهای مستقل و $P(X)$ تابع توزیع تجمعی است.

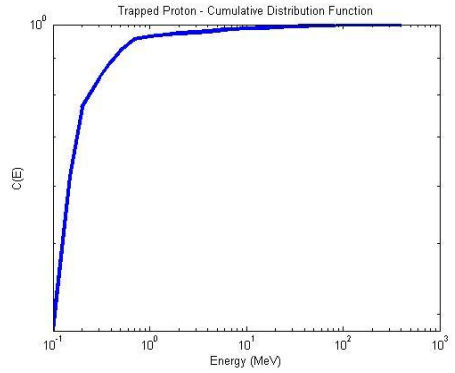
$$P(X) = \int_0^X P(x)dx$$ رابطه(۱)



شکل شماره (۲): نمودار تابع توزیع احتمال پروتون‌های در تله افتاده برای ماموریت فرضی

با توجه به رابطه ۱ توزیع تجمعی برای هر پیشامد مستقل مقداری در بازه [0,1] دارد لذا می‌توان اعداد تصادفی تولید شده در این بازه را به تابع توزیع تجمعی مرتبط کرد. خروجی مدل ذرات در تله افتاده نمودار تعداد ذرات برحسب انرژی آن‌ها را نشان می‌دهد، بنابراین ابتدا باید با توجه به اطلاعات موجود تابع توزیع احتمال حاکم بر طیف ذرات تولید شود. این مرحله از کار با به دست آوردن فراوانی نسبی ذرات صورت می‌گیرد. در ادامه مراحل برای طیف پروتون‌ها تشریح می‌شود، این مراحل عینا برای طیف الکترون‌ها نیز تکرار خواهد شد.

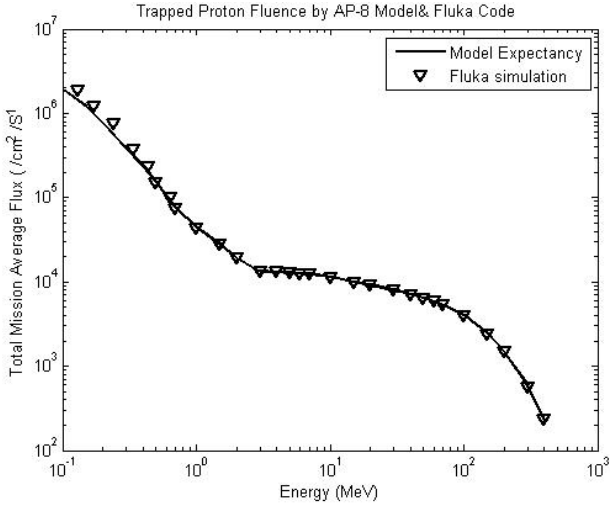
شکل شماره ۲ نمودار تابع توزیع احتمال حاکم بر طیف ذرات خورشیدی را نشان می‌دهد. اما جهت شبیه‌سازی نیاز به تابع توزیع تجمعی داریم. برای این کار محور انرژی را به n بازه تقسیم و انتگرال‌گیری روی بازه‌های مذکور انجام شده است (شکل شماره ۳). تابع توزیع تجمعی حاصل، اساس تولید چشمه تابشی است. برای انتخاب ذرات از این توزیع با استفاده از زیر برنامه Source.f کد فلوکا ابتدا عدد تصادفی ξ را در بازه [0,1] تولید کرده و سپس با استفاده از مقدار این عدد و توزیع تجمعی ذخیره شده، انرژی ذره را تعیین می‌کنیم.



شکل شماره ۳: تابع توزیع تجمعی پروتون‌های در تله افتاده برای ماموریت فرضی

نتایج:

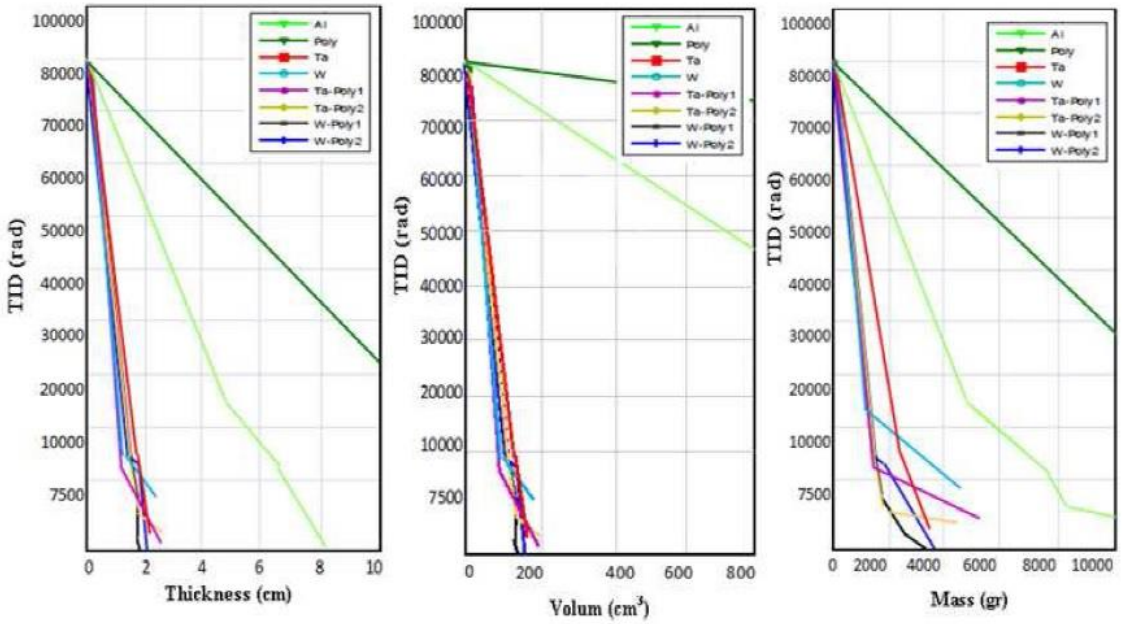
شکل شماره ۴ مقایسه طیف پیش‌بینی شده پروتون‌ها توسط مدل با طیف تولیدی توسط کد فلوکا را نشان می‌دهد. مطابق شکل چشمه تولید شده از دقت بسیار بالایی برخوردار است.



شکل شماره ۴: مقایسه طیف پروتون‌های در تله افتاده تولید شده توسط کد FLUKA و پیش‌بینی مدل AP-8

علاوه بر اطلاعات مربوط به ماموریت فضایی، اطلاع از مشخصات تجهیزات تحت تابش نیز برای طراحی حفاظ امری ضروری است. قطعه انتخاب شده یک (RDM) است[2]. چشمه تابشی مورد استفاده به صورت کروی در نظر گرفته شده [6] و نتایج برای چهار ماده آلومینیوم، پلی‌اتیلن، تنگستن و تانتالیوم و همچنین چهار ترکیب متفاوت این مواد به دست آمده است [11].

باتوجه به اهمیت دو فاکتور جرم و حجم در طراحی حفاظ، نمودار دوز برا ساس ضخامت، جرم و حجم محا سبه و در شکل شماره ۵ مقایسه شده‌اند.



شکل شماره ۵: نمودار دوز کامل یونیزان نسبت به ضخامت، جرم و حجم ماده محافظ در هندسه کروی

بحث و نتیجه‌گیری:

یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهند که کد فلوکا نه تنها قادر به شبیه‌سازی چشمه‌های ترکیبی از جمله چشمه تابشی محیط فضا با دقت بالا است بلکه می‌توان با دسترسی به زیربرنامه Source.f این کد چشمه تابشی را در هندسه دلخواه شبیه‌سازی کرد. همچنین با توجه به شکل شماره ۵ در طراحی یک حفاظ کروی در برابر ذرات در تله افتاده ترکیب Ta-Poly1 در مقایسه با سایر ترکیبات و مواد کارایی بهتری دارد.

مراجع :

[1] J. Barth, Modeling Space Radiation Environments, 1997 IEEE NSREC short course, Snowmass, Jul. 1997.

[2] Bhowmik S. and Benedictus R., Applied Electromagnetics Conference, AEMC IEEE, p 1- 4, 2007.

[3] Alankrita Isha Mrigakshi, Daniel Matthiä, Thomas Berger, et all, Assessment of galactic cosmic ray models, JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 117, A08109, doi: 10.1029/2012JA017611, 2012.

[4] P. Truscott, F. Lei, C. Dyer, ET all, GEANT4 A new Monte Carlo Toolkit for Simulating Space Radiation Shielding and Effects, IEEENSREC 2000 data workshop proceeding, pp. 147-152, 2000.

[5] Roederer, J. G., Dynamics of Geomagnetically Trapped Radiation, Springer-Verlag, 1970.

[6] http://SPENVIS.oma.be/help.php

[7] J.I. Vette, The AE-8 Trapped Electron Model Environment, NASA-GSFC, NSSDC/WDC-A-R&S 91-24, 1991.

[8] D.M. Sawyer, and J.I. Vette, AP8 Trapped Proton Environment for Solar Maximum and Solar Minimum, NASA-GSFC, NSSDC/WDC-A-R&S 76-06, 1976.

[9] 2002 IEEE Nuclear and Space Radiation Effects Conference, Short Course Notebook, IEEE/NPSS Radiation Effects Committee, 2002.

[10] Alex F. Bielajew, Fundamental of the Monte Carlo Method for the Neutral and Charged Particle Transport, The University of Michigan, 2001.

[11] Polyrad Performance Data Sheet, Long Hill Technologies Inc., 2000.