

شبیه‌سازی شار پروتون‌ها در چرخه‌ها و شراره‌های خورشیدی مختلف

زهرا باقری*، پانته‌آ داوودی‌فر، حسین عبادی

گروه نجوم ذره‌ای، مرکز تحقیقات نجوم و اختر فیزیک مراغه، مراغه، ایران

دریافت: ۱۳۹۵/۰۵/۱۰ ویرایش نهایی: ۱۳۹۵/۰۸/۱۱ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۹/۰۳

چکیده

طوفان‌های ژئومغناطیسی سیستم‌های ناوبری فضایی مانند ماهواره‌ها را با ایجاد تغییرات سریع و بزرگ در شار ذرات مختل می‌کنند. برای بررسی اثرات پرتوهای کیهانی و محاسبه نرخ آسیب‌ها و خطاها و تهیه پوشش مناسب در مقابل آنها، نیاز به دانستن شار ذرات پرنرژی داریم. در کار حاضر ما شار و محدوده انرژی پروتون‌ها را به وسیله شبیه‌سازی در چرخه‌های مختلف خورشیدی و همچنین در زمان رویداد ۴ شراره بزرگ و مهم خورشیدی به دست آورده و با یکدیگر مقایسه کرده‌ایم. در اولین گام شبیه‌سازی شار پروتون‌ها از نرم افزار امره استفاده کرده، سپس داده‌های به دست آمده از شبیه‌سازی را با داده‌های تجربی حاصل از AMS مقایسه کرده‌ایم که در نهایت نتایج به خوبی در تطابق با یکدیگر قرار داشتند. در ادامه کار ابتدا با استفاده از نرم افزار امره، مختصات ماهواره و ویژگی‌های آن را تعیین کرده، سپس شار پروتون‌های پرنرژی را که به یک ماهواره معمولی در مدار لئو برخورد می‌کنند در زمان رخداد شراره‌های مختلف محاسبه کرده‌ایم. تعداد رویدادهای خورشیدی در بیشینه چرخه خورشیدی افزایش می‌یابند، در نتیجه باید چنین تحلیل‌هایی با دقت انجام گرفته و چنین طراحی‌هایی برای مأموریت‌های فضایی بلندمدت اهمیت بیشتری بیابند.

کلیدواژگان: شار، شبیه‌سازی، پروتون‌ها، چرخه خورشیدی، شراره خورشیدی

مقدمه

شتاب می‌دهد و در عین حال با جاروب کردن ذرات مانع رسیدن دسته‌ای از ذرات کم انرژی می‌شود که از خارج از منظومه شمسی نشأت گرفته‌اند. در مقیاس زمانی بزرگ در حد چرخه‌های خورشیدی، باد خورشیدی منجر به اثری به نام مدولاسیون خورشیدی می‌گردد که بر ذرات کیهانی تا حدود انرژی 1 GeV مؤثر است. چنان‌که، با افزایش فعالیت خورشید شار ذرات کیهانی کم انرژی کاهش و بالعکس با کاهش فعالیت خورشید شار ذرات کیهانی کم انرژی تا حدود 1 GeV افزایش می‌یابد. علاوه بر این اثر طولانی مدت، رخدادهای سطح خورشید، عمدتاً شراره‌ها و پرتاب جرم از تاج خورشیدی باعث تغییرات کوتاه مدتی در طیف ذرات کیهانی می‌گردند که آثار متفاوتی بر طیف

در این پژوهش تأثیر رخدادهای خورشیدی از زوایای متفاوت و در عین حال مرتبط با یکدیگر مورد بررسی قرار می‌گیرد. به‌طور کلی صرف نظر از تأثیر سایر منابع کیهانی در مقیاسی که برهم‌کنش بین محیط و ماهواره‌ها مورد نظر است، فعالیت خورشید می‌تواند منجر به تغییر در شار ذرات و یا تغییر در شدت (و جهت) میدان‌های اطراف زمین (به‌خصوص میدان مغناطیسی) گردد.

باد خورشیدی (به‌طور عام) ضمن خروج از خورشید و حرکت به سمت زمین علاوه بر حمل میدان‌های مغناطیسی و تداخل با میدان مغناطیسی زمین، طی فرآیندهای مختلفی (از جمله مکانیسم فرمی) به ذرات

فیزیکی مدل‌ها را شکل می‌دهند. برای مثال، قوانین نیوتن و اویلر معادلات حرکت را به وجود می‌آورند. مدل‌سازی و شبیه‌سازی در سطح مهندسی معیارهایی برای ارزیابی عملکرد سیستم‌ها و زیر سیستم‌ها را تعیین می‌کند [۱].

فراوانی پروتون‌ها در ذرات کیهانی (حدود ۹۱ درصد) باعث می‌گردد در مطالعه محصولات ناشی از برهم‌کنش‌های این ذرات، پروتون‌ها مورد توجه قرار گیرند [۲]. سه ناحیه مجزا در فضا وجود دارد که در آن نواحی پروتون‌ها به شیوه‌های مختلف مورد مطالعه قرار می‌گیرند:

۱. ارتفاع ۳۰ تا ۴۰ کیلومتر بالای سطح زمین. این ناحیه توسط آشکارسازهای قرار گرفته بر روی بالون‌ها، در چندین دهه مورد بررسی قرار گرفته است. این آزمایشات سهم به‌سزایی در درک طیف پرتو اولیه پروتون و رفتار ذرات ثانویه جوی در لایه بالایی جو داشته‌اند.

۲. کمرندهای تابشی درونی و بیرونی، که از ارتفاع حدود ۱۰۰۰ کیلومتر تا مگنتوسفر را در بر می‌گیرند. آشکارسازهایی با ابعاد کوچک که بر روی ماهواره‌ها قرار گرفته‌اند، برای مطالعه کمرندهای تابشی به‌کار رفته‌اند.

۳. ناحیه مابین بالای جو و کمرند تابشی درونی. سطوح تابش عموماً خیلی بالا نیستند، بنابراین پیش از استفاده از آشکارساز AMS [۳]، طیف پروتون در یک محدوده انرژی گسترده، به‌طور سیستماتیک مورد مطالعه قرار نگرفته بود.

برای بررسی اثرات پرتوهای کیهانی و بنابراین محاسبه نرخ آسیب‌ها و خطاها و تهیه پوشش مناسب در مقابل آنها، نیاز به دانستن شار ذرات پر انرژی خورشیدی داریم. بنابراین در اولین گام از شبیه‌سازی شار پروتون‌ها توسط نرم افزار امره استفاده کرده‌ایم و سپس

ذرات کیهانی کم انرژی (تا حدود 10GeV و ندرتاً 100GeV) دارند. این آثار شامل یک افزایش اولیه (در اثر رسیدن ذرات شتاب گرفته در جبهه موج) در شار ذرات کیهانی و افت پس از آن در شدت ذرات کیهانی می‌گردد که از این "افت در شدت ذرات" با نام اثر فوربوش یاد می‌گردد. علاوه بر این تغییرات، برهم‌کنش میدان مغناطیسی زمین با میدان مغناطیسی حمل شده توسط باد خورشیدی و توده‌های پلاسمای ناشی از رخدادهای خورشیدی، باعث تغییراتی در ساختار میدان‌های مغناطیسی در اطراف زمین و تغییر چگالی ذرات موجود در آن می‌گردد و به‌خصوص با تأثیر بر لایه یونسفر موجب ایجاد اختلال در امر ارتباطات ماهواره‌ای می‌گردد. لذا بررسی تغییر چگالی ذرات در مکان ماهواره اهمیت ویژه‌ای داشته ضمن آن که باید با توجه به شدت عوامل خارجی و پیش‌بینی رخدادهای خورشیدی به‌زمان‌بندی مأموریت‌های فضایی پرداخته شود.

پرتوهای کیهانی در هنگام برخورد با قطعات الکترونیکی باعث ایجاد آسیب‌هایی بر روی این قطعات می‌شوند. برای جلوگیری از این آسیب‌ها و تهیه یک پوشش مناسب نیازمند دانستن تأثیر این پرتوها بر روی قطعات می‌باشیم. به دلیل این‌که حمل قطعات به بالای جو و ارزیابی آسیب‌های ناشی از پرتوهای کیهانی روی قطعات مورد استفاده در ماهواره‌ها و تجهیزات مورد استفاده در بالای جو کاری بس دشوار و پرهزینه است، روند پرتوگیری قطعات بر روی زمین بازسازی شده و آسیب‌ها اندازه‌گیری می‌شوند. به این منظور ما به شبیه‌سازی شار پرتوهای کیهانی پرداخته‌ایم.

مدل‌سازی و شبیه‌سازی در سطح مهندسی ابزارهایی برای مصالحه طراحی در سطح سیستم و زیر سیستم را فراهم می‌کند و توسعه مشخصه‌های طرح را در کنار آزمایش و ارزیابی عملکرد پشتیبانی می‌نماید. قوانین

برای ورود به شبیه‌سازی که در مدل‌سازی باید رعایت گردد ذکر می‌گردد. این دستگاه‌ها عبارتند از:

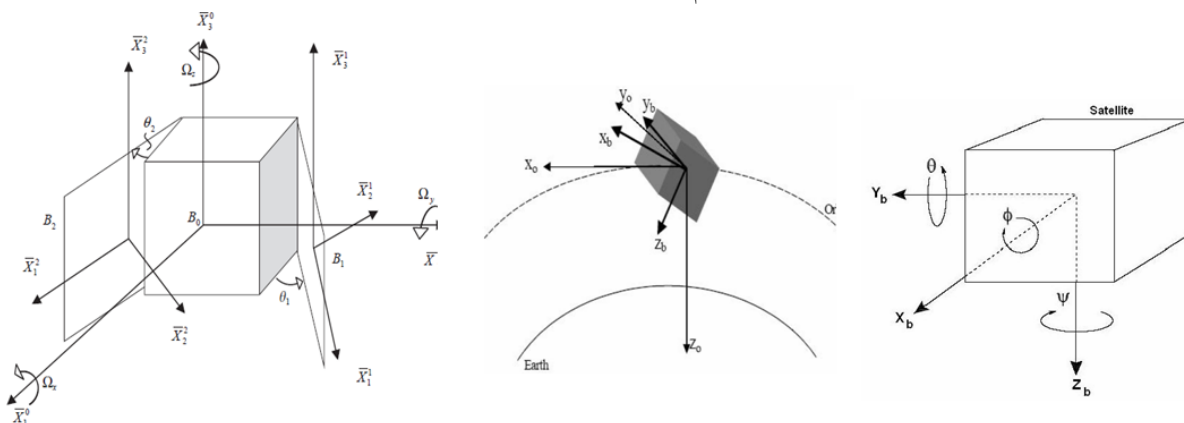
۱. دستگاه مختصات بدنی
۲. دستگاه مختصات مدار (محلی)
۳. دستگاه مختصات اینرسی

زوایای اویلر سینماتیک وسیله را بیان می‌کند در حالی که قوانین نیوتن دینامیک وسیله را بیان می‌کند که در مدل‌سازی و شبیه‌سازی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. معادلات دینامیک وسیله پرنده به دو دسته معادلات نیوتنی و معادلات اویلری تقسیم‌بندی می‌شوند. معادلات نیوتن، دینامیک انتقالی وسیله هوافضایی را با استفاده از اندازه‌حرکت خطی بیان می‌کند اما معادله اویلر، دینامیک دورانی را بیان می‌کند یا به عبارت بهتر قانون اویلر حاکم بر درجات وضعی است.

داده‌های به دست آمده از شبیه‌سازی را با داده‌های تجربی حاصل از AMS مقایسه کرده‌ایم که در نهایت نتایج به خوبی در تطابق با یکدیگر قرار داشتند. در ادامه کار ما ابتدا با استفاده از نرم افزار امره، مختصات ماهواره و ویژگی‌های آن را تعیین کرده‌ایم. سپس شار پروتون‌های پرنرژی خورشیدی را که به یک ماهواره معمولی در مدار لئو برخورد می‌کنند در زمان رخداد شارهای مختلف محاسبه کرده‌ایم. تعداد رویدادهای خورشیدی در بیشینه چرخه خورشیدی افزایش می‌یابند، در نتیجه باید چنین تحلیل‌هایی با دقت انجام گرفته و چنین طراحی‌هایی برای مأموریت‌های فضایی بلند مدت اهمیت بیش‌تری بیابند.

محاسبه شار پروتون‌ها در چرخه‌های خورشیدی مختلف

یکی از اولین و مهم‌ترین موضوعاتی که در هر شبیه‌سازی برای ماهواره‌ها باید مشخص شود دستگاه‌های مختصات و تبدیل این دستگاه‌ها به یک دیگر است. در این بخش دستگاه‌های مختصات لازم



شکل ۱. دستگاه مختصات بدنی، دستگاه مختصات مدار (محلی)، دستگاه مختصات اینرسی.

بر طبق تئوری اشترومر، قطع سختی مغناطیسی مورد نیاز برای یک ذره برای رسیدن به یک مکان در بالای زمین، که طول مغناطیسی اش λ و شعاع ژئومرکزی آن R است، توسط معادله زیر به دست می‌آید [۵]:

$$P_c = \frac{M(\cos \lambda)^4}{R^2 [\sqrt{(1 + \cos \alpha (\cos \lambda)^3)} + 1]^2}$$

P_c = قطع سختی مغناطیسی برحسب GV

M = مومنتوم دو قطبی مغناطیسی نرمالیزه شده زمین

α = زاویه یون مثبت رسیده (۰ درجه = غرب، ۹۰

درجه = عمودی، ۱۸۰ درجه = شرق و ...)

R = شعاع ژئومرکزی برحسب کیلومتر

λ = طول مغناطیسی

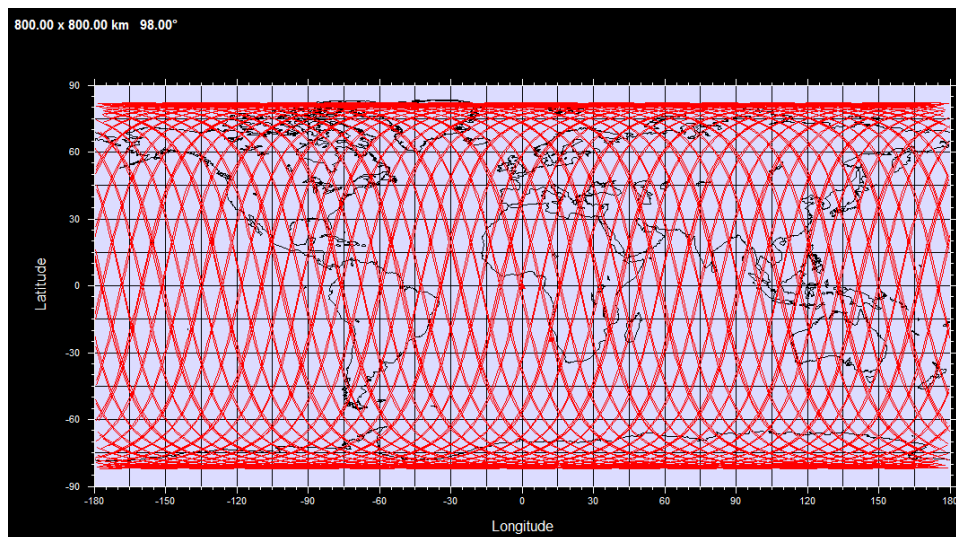
معادله اشترومر، نامتقارنی در قطع سختی مغناطیسی را نشان می‌دهد. برای مثال برای یک یون مثبت، راحت‌تر است که از سمت غرب (یعنی $\alpha = 0$ درجه) نفوذ کند تا قطع سختی مغناطیسی، مقدار کمتری داشته باشد.

برای اندازه‌گیری شار پروتون‌های خورشیدی، ما از نرم‌افزار شبیه‌سازی امره 3.6.4.0 استفاده کرده‌ایم [۴]. مدل GCR ISO از مدل SOLPRO از زیر مجموعه مدل‌های آماری انتخاب و استفاده شده است.

از آنجا که هر نقطه‌ای در روی زمین، طول و عرض جغرافیایی مخصوص به خود را دارد، در هر مختصاتی، ذره به یک حداقل انرژی نیاز دارد تا به زمین برسد. برای هر نقطه در مگنتوکره و برای هر جهت برای آن نقطه، یک مقدار آستانه برای بار/تکانه وجود دارد که به آن قطع مغناطیسی گویند. به‌طور مثال برای رسیدن ذرات به قطب‌ها، انرژی خیلی کمتری لازم است تا رسیدن ذرات به استوا. دلیل اصلی این که ذرات با انرژی پایین‌تر از مگنتو کره عبور نمی‌کنند نیروی لورنتس است که آنها را باز می‌گرداند.

$$F = qvB$$

که q بار ذره کیهانی، v سرعت آن ذره، و B میدان مغناطیسی زمین است.

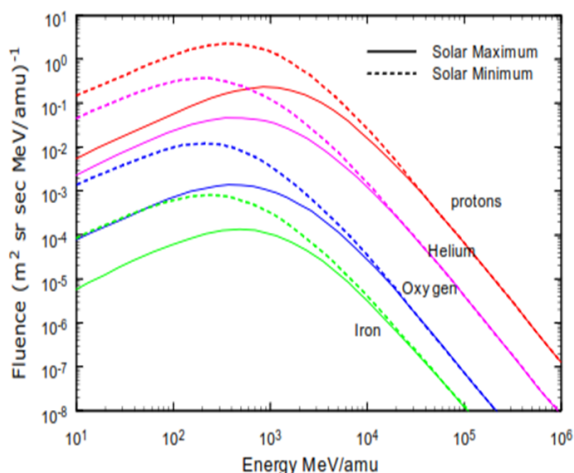


شکل ۲. مسیر چرخش ماهواره شبیه‌سازی شده پرتابی به دور زمین.

شده است. زمانی که یک یون مثبت (با صرف نظر از جو) از جهتی که کمترین مساعدت به آن وارد می‌شود

مکانی که بیشترین حفاظ را در برابر پرتوهای کیهانی دارد، روی ناحیه استوای مغناطیسی سطح زمین واقع

کردیم، اختلاف شار پرتوهای کیهانی در بیشینه و کمینه فعالیت خورشیدی (شکل ۳) است. به این دلیل بازه‌های شبیه‌سازی و طول مأموریت ماهواره به جای ۱۲ سال، ۱۵ سال انتخاب شده‌اند.



شکل ۳. طیف متوسط ذرات کیهانی در حالات بیشینه و کمینه فعالیت خورشید [۶].

ابتدا برای چرخه ۲۰ام از تاریخ ۱۹۶۳/۱ تا ۱۹۷۸/۱، شار خورشیدی انتگرالی و تفاضلی پروتون‌ها محاسبه گردیده و در شکل ۴ با رنگ‌های قرمز و سبز نشان داده شده‌است. سپس در شکل ۵، شار پروتون‌های خورشیدی به‌ازای طول و عرض‌های مختلف به نمایش درآمده‌است.

سپس تمام محاسبات بالا برای چرخه‌های ۲۱ام تا ۲۴ام تکرار شده‌اند و هر نوبت نتایج بر روی یک شکل رسم گردیده‌اند تا قابل مقایسه با یکدیگر باشند. محاسبات برای چرخه ۲۱ام برای تاریخ ۱۹۷۴/۱ تا ۱۹۸۹/۱ انجام گرفته‌اند و منحنی‌های شار تفاضلی و انتگرالی پروتون‌های خورشیدی در شکل‌ها آبی و سیاه هستند. برای چرخه ۲۲ام محاسبات از تاریخ ۱۹۸۴/۱ تا ۱۹۹۹/۱ انجام گرفته و منحنی‌ها صورتی و زرد می‌باشند. برای چرخه ۲۳ام محاسبات از تاریخ ۱۹۹۵/۲ تا ۲۰۱۰/۲ انجام گرفته و منحنی‌ها آبی

یعنی $\alpha=18.0^\circ$ ، به مکان استوای مغناطیسی می‌رسد، قطع سختی مغناطیسی بیشینه مقدار خود را دارد:

$$P_c = \frac{M}{R_0^2} \times 1 = 59.6 \text{ GV}$$

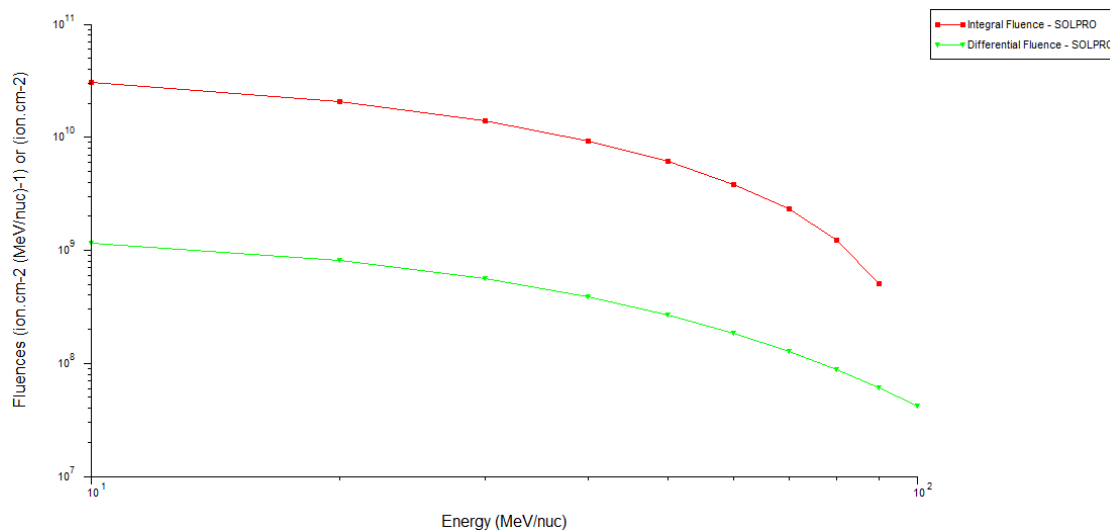
که R_0 شعاع متوسط کره زمین (۶۳۷۸ کیلومتر) است. بنابراین میدان ژئومغناطیسی، به‌طور کامل مانع رسیدن ذرات با سختی مغناطیسی‌های کوچکتر از 60GV می‌شود.

این محاسبه توسط اشترومر با روش تخمین دوقطبی برای میدان مغناطیسی زمین انجام شده‌است. از آنجا که کره زمین یک دوقطبی در نظر گرفته شده و نه یک جسم جامد، این تئوری در بعضی جاها خطا دارد و میزان قطع سختی مغناطیسی‌ای که حساب می‌کند، از میزان واقعی کمتر است.

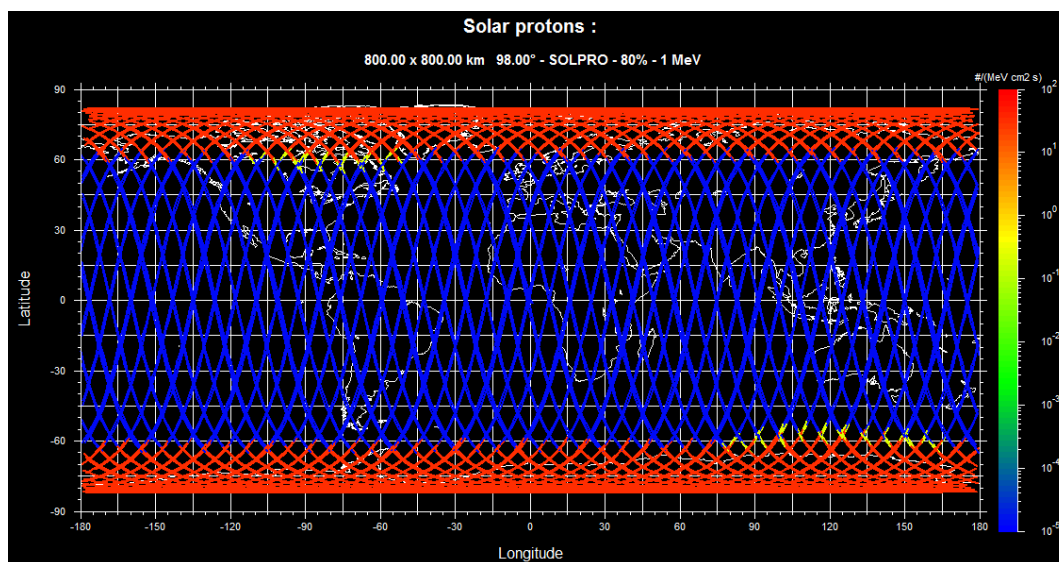
در کل میدان مغناطیسی زمین باعث ایجاد یک انرژی قطع برای ذرات باردار کیهانی می‌گردد که برای پروتون بسته به طول و عرض جغرافیایی در محدوده انرژی 10 MeV تا 100 GeV قرار می‌گیرد. مطالعات مختلف نشان می‌دهد که در انرژی‌های بالاتر از این محدوده، طیف پروتون به‌صورت نمایی افت می‌کند. در شبیه‌سازی‌های انجام شده در کار حاضر قطع مگنتو کره به‌صورت عمودی، شرایط آب و هوایی به‌صورت آرام فرض شده و اثر سایه زمین در نظر گرفته شده‌است. شار پروتون‌های خورشیدی برای یک ماهواره معمولی در مدار محاسبه گردیده که اوج و حضیض مدار هر کدام برابر 80000 Km هستند و انحراف مداری برابر 98 درجه می‌باشد. ماهواره شبیه‌سازی شده در مدار خود به‌دور زمین به‌صورت شکل ۲ گردش می‌کند.

شارهای پروتون‌های خورشیدی به‌عنوان تابعی از انرژی برای چرخه‌های خورشیدی ۲۰ام تا ۲۴ام محاسبه گردیده‌اند. نکته دیگری که در این رابطه توجه

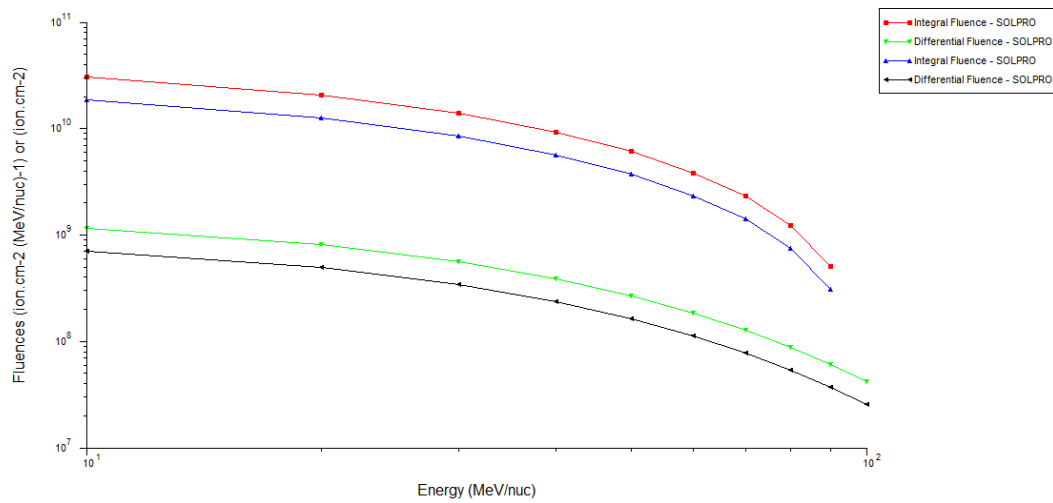
کمرنگ و نارنجی می‌باشند. و در نهایت برای چرخه ۲۰۰۷/۱ تا ۲۰۲۲/۱ انجام
 گرفته و منحنی‌ها سبز تیره و بنفش می‌باشند. تمام
 نتایج در شکل‌های ۴ تا ۱۳ نشان داده شده‌اند.



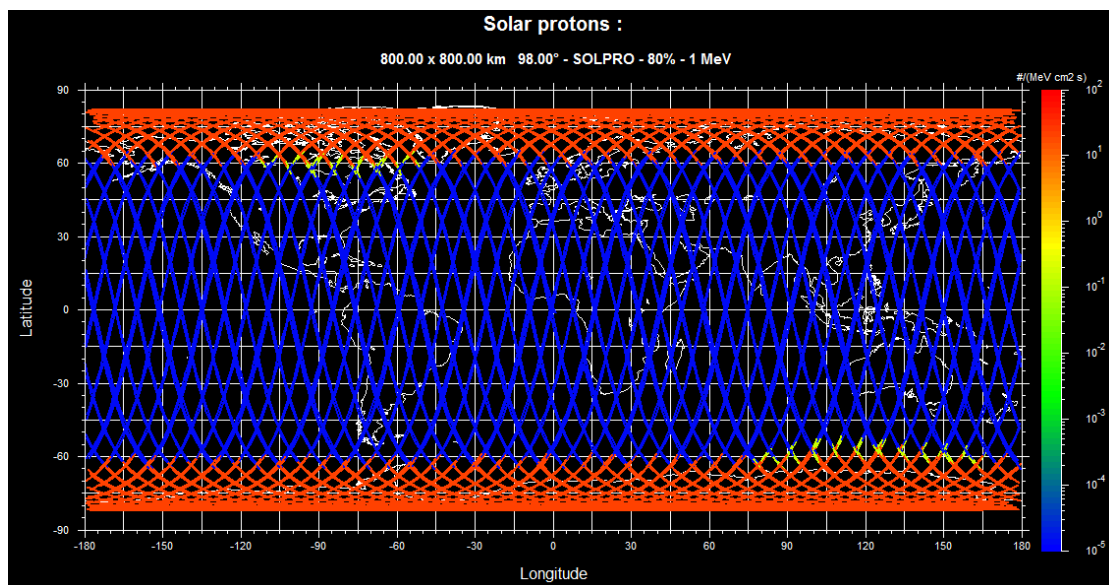
شکل ۴: شار انتگرالی و تفاضلی پروتون‌های خورشیدی در چرخه ۲۰ام از تاریخ ۱۹۶۳/۱ تا ۱۹۷۸/۱.



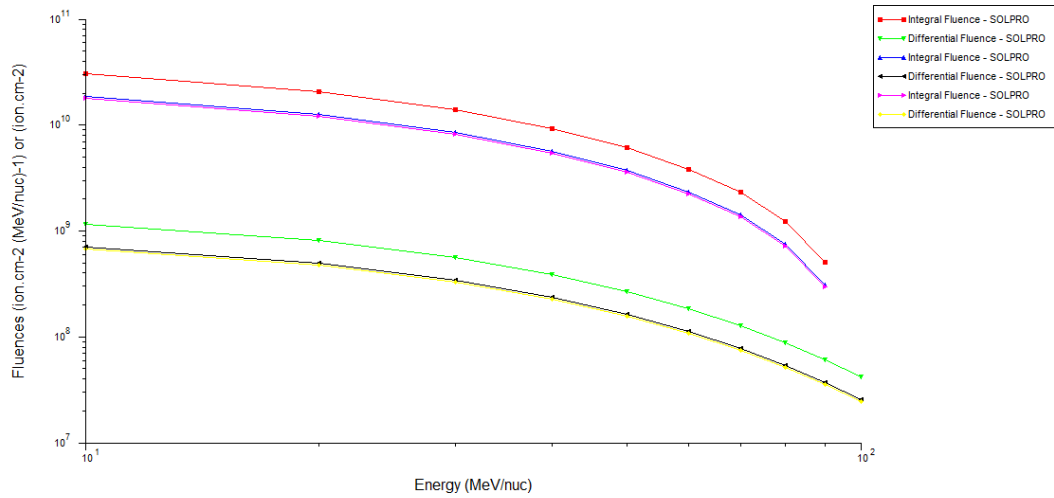
شکل ۵: شار پروتون‌های خورشیدی در طول و عرض‌های مختلف در چرخه ۲۰ام از تاریخ ۱۹۶۳/۱ تا ۱۹۷۸/۱.



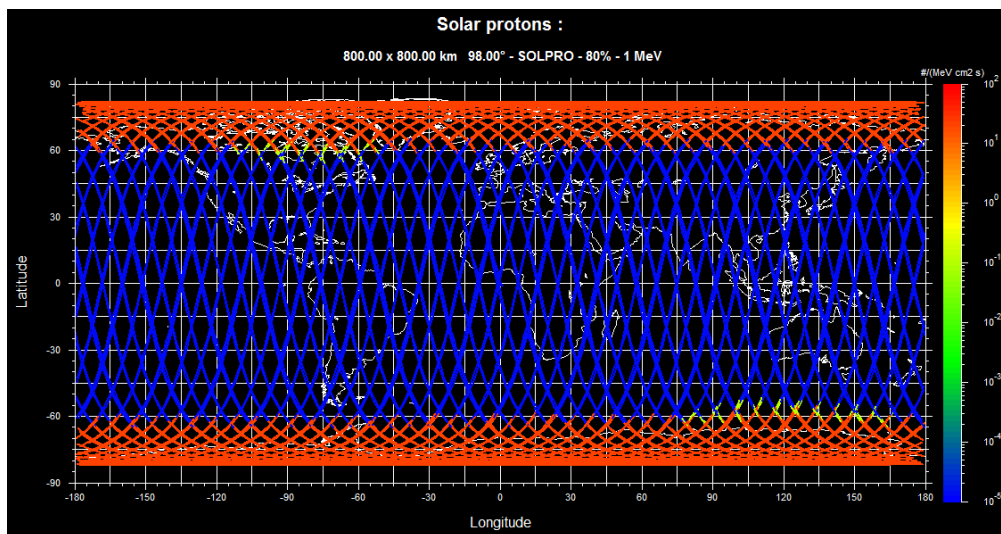
شکل ۶. شار انتگرالی و تفاضلی پروتون‌های خورشیدی در چرخه ۲۰ام از تاریخ ۱۹۶۳/۱ تا ۱۹۷۸/۱ (قرمز و سبز) و چرخه ۲۱ام از تاریخ ۱۹۷۴/۱ تا ۱۹۸۹/۱ (آبی و سیاه).



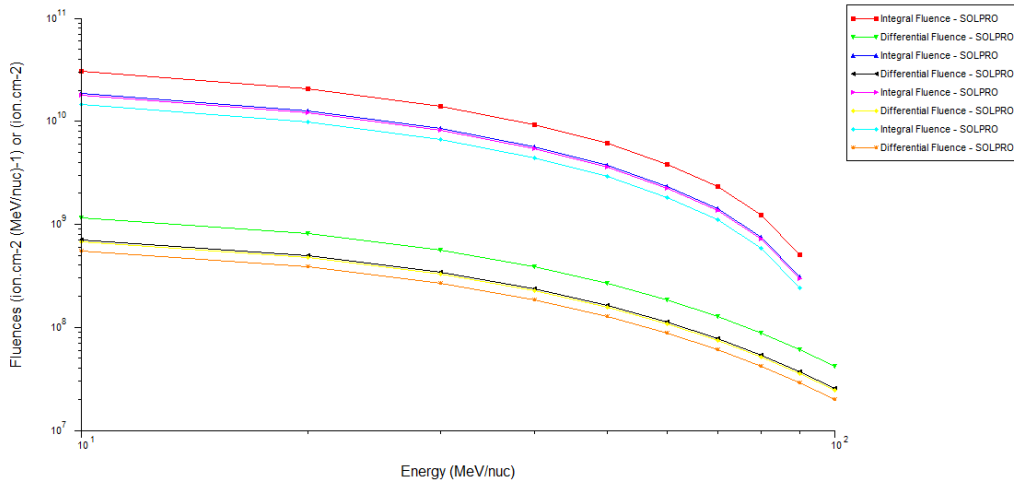
شکل ۷. شار پروتون‌های خورشیدی در طول و عرض‌های مختلف در چرخه ۲۱ام از تاریخ ۱۹۷۴/۱ تا ۱۹۸۹/۱.



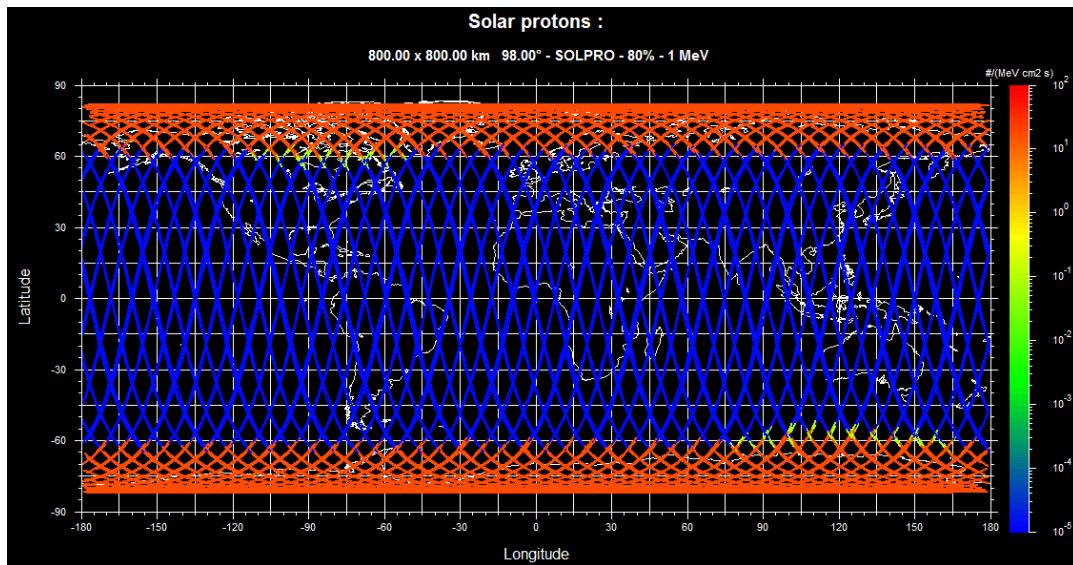
شکل ۸. شار انتگرالی و تفاضلی پروتون‌های خورشیدی در چرخه ۲۰ام از تاریخ ۱۹۶۳/۱ تا ۱۹۷۸/۱ (قرمز و سبز)، چرخه ۲۱ام از تاریخ ۱۹۷۴/۱ تا ۱۹۸۹/۱ (آبی و سیاه) و چرخه ۲۲ام از تاریخ ۱۹۸۴/۱ تا ۱۹۹۹/۱ (صورتی و زرد).



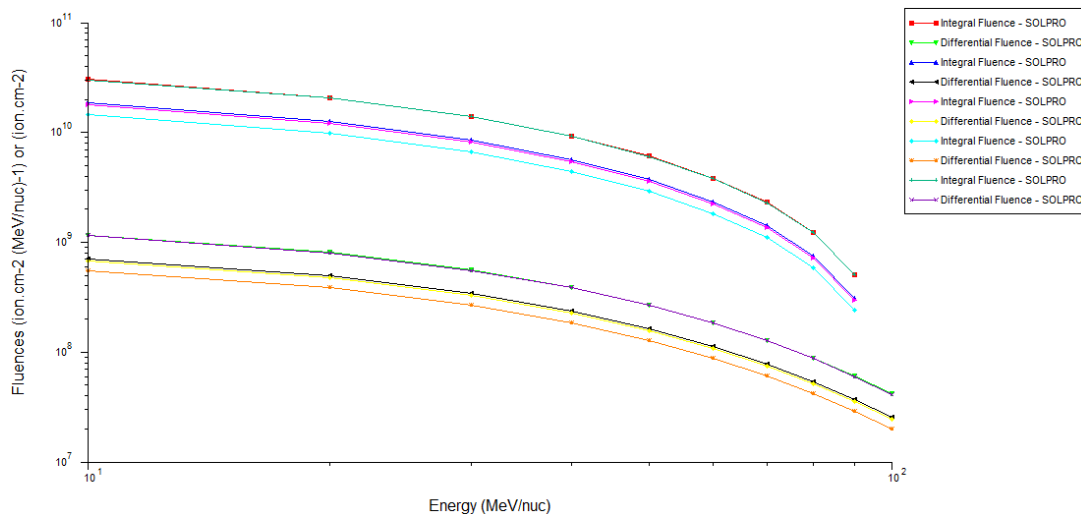
شکل ۹. شار پروتون‌های خورشیدی در طول و عرض‌های مختلف در چرخه ۲۲ام از تاریخ ۱۹۸۴/۱ تا ۱۹۹۹/۱.



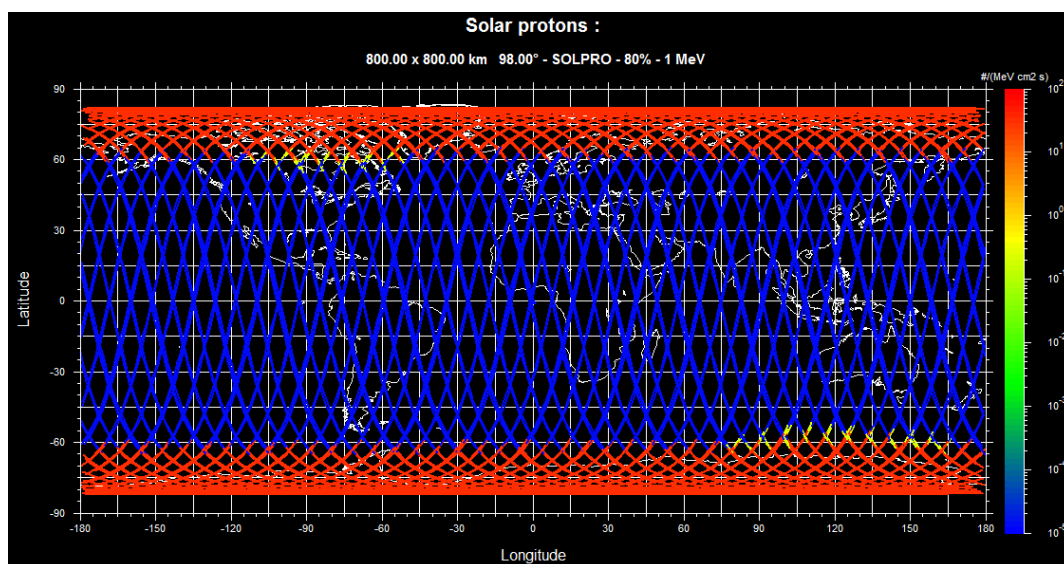
شکل ۱۰. شار انتگرالی و تفاضلی پروتون‌های خورشیدی در چرخه ۲۰ام از تاریخ ۱۹۶۳/۱ تا ۱۹۷۸/۱ (قرمز و سبز)، چرخه ۲۱ام از تاریخ ۱۹۷۴/۱ تا ۱۹۸۹/۱ (آبی و سیاه)، چرخه ۲۲ام از تاریخ ۱۹۸۴/۱ تا ۱۹۹۹/۱ (صورتی و زرد) و چرخه ۲۳ام از تاریخ ۱۹۹۵/۲ تا ۲۰۱۰/۲ (آبی کم‌رنگ و نارنجی).



شکل ۱۱. شار پروتون‌های خورشیدی در طول و عرض‌های مختلف در چرخه ۲۳ام از تاریخ ۱۹۹۵/۲ تا ۲۰۱۰/۲.



شکل ۱۲. شار انتگرالی و تفاضلی پروتون‌های خورشیدی در چرخه ۲۰ام از تاریخ ۱۹۶۳/۱ تا ۱۹۷۸/۱ (قرمز و سبز)، چرخه ۲۱ام از تاریخ ۱۹۷۴/۱ تا ۱۹۸۹/۱ (آبی و سیاه)، چرخه ۲۲ام از تاریخ ۱۹۸۴/۱ تا ۱۹۹۹/۱ (صورتی و زرد)، چرخه ۲۳ام از تاریخ ۱۹۹۵/۲ تا ۲۰۱۰/۲ (آبی کمرنگ و نارنجی) و چرخه ۲۴ام از تاریخ ۲۰۰۷/۱ تا ۲۰۲۲/۱ (سبز تیره و بنفش).



شکل ۱۳. شار پروتون‌های خورشیدی در طول و عرض‌های مختلف در چرخه ۲۴ام از تاریخ ۲۰۰۷/۱ تا ۲۰۲۲/۱.

داده‌های AMS Collaboration [۳] استفاده کرده‌ایم (شکل ۱۴).

در نتیجه با استفاده از شبیه‌سازی، ما شار پروتون‌های خورشیدی را به‌دور زمین به‌دست آوردیم. برای مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی، از

محاسبه شار پروتون‌ها در شراره‌های

خورشیدی مختلف

در طول یک رویداد خورشیدی (به‌عنوان مثال شراره خورشیدی یا فوران جرمی تاج) انرژی ذخیره شده در یک منطقه نسبتاً متمرکز از اتمسفر خورشید به‌طور ناگهانی به‌شکلی انفجاری منتشر می‌گردد. شواهد به‌روشنی نشان می‌دهند که طوفان‌های ژئومغناطیسی بزرگ می‌توانند سیستم‌های ناوبری مبتنی بر فضا مانند ماهواره‌ها را با ایجاد تغییرات سریع و بزرگ در شار ذرات مختل کنند. ۴ شراره‌های خورشیدی بزرگ عبارتند از:

۱. رویداد آگوست ۱۹۷۲ که تا به‌حال:

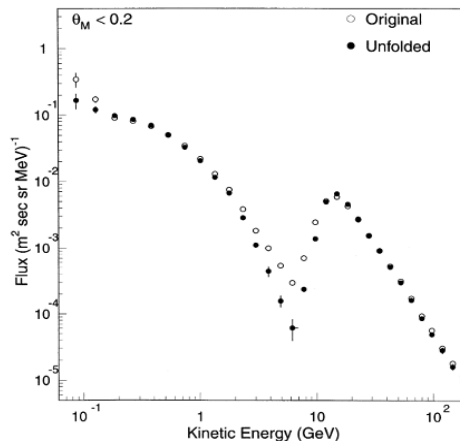
الف: سریع‌ترین زمان انتقال ثبت شده CME را دارد (رسیدن به زمین تنها ۱۴/۶ ساعت پس از خروج از خورشید زمان برد).

ب: شدیدترین طوفان تابشی در دوران اولیه فضا را داشت.

با این حال این رویداد تنها یک طوفان ژئومغناطیسی متوسط بود زیرا Dst آن به ۱۲۰ nT- رسید. Dst یک متریک ژئومغناطیسی است که در واحد نانو تسلا اندازه‌گیری می‌شود). با دانش علمی که ما ۵۰ سال بعد از آن واقعه داریم، محتمل است که این رویداد مشابه به رویداد کارینگتون بوده است، اما با یک میدان مغناطیسی رو به شمال بین سیاره‌ای (IMF).

۲. طوفان تابشی اکتبر ۱۹۸۹ در واقع یک سری

از حوادث بزرگ بود که همگی در عرض یک هفته رخ دادند، در نتیجه دوز (شار مجموع در طول زمان) بسیار بالایی از ذرات با انرژی‌های بالای 60MeV را به‌همراه داشت. این رویداد تقریباً به بزرگی چهار برابر طوفان تابشی سال ۱۹۷۲ بود و از نظر دوز، بزرگترین رویداد تاکنون دیده شده در عصر فضا است و از نظر



شکل ۱۴. مقادیر تجربی شار ذرات کیهانی (AMS).

برای به‌دست آوردن شار پرتوهای کیهانی در مدار ماهواره از نرم‌افزار DigXY استفاده کرده و نمودار مقادیر نرمالیزه شده به شار واقعی ذرات که قبلاً توسط AMS اندازه‌گیری شده است را خوانده‌ایم و شار پروتون‌ها در انرژی‌های مابین 9GeV تا 650GeV در ارتفاع ۳۸۰ کیلومتری را به‌دست آوردیم که در جدول ۱ آمده است. تطابق نتایج تجربی اندازه‌گیری شده توسط AMS و شبیه‌سازی انجام شده در کار حاضر به‌وسیله نرم‌افزار امره مشهود است.

جدول ۱. توزیع شار پروتون‌های کیهانی در محدوده انرژی‌های مختلف در مدار ماهواره با استفاده از داده‌های AMS.

| Kinetic energy (GeV) | Flux (m ² sr s GeV) ⁻¹ |
|----------------------|----------------------------------------------|
| 9.65 | 3.22951e-3 |
| 12 | 2.0692e-3 |
| 14.9 | 1.40364e-3 |
| 18.5 | 9.5215e-4 |
| 22.9 | 5.82831e-4 |
| 28.25 | 3.82052e-4 |
| 34.8 | 2.31208e-4 |
| 42.85 | 1.44795e-4 |
| 52.75 | 9.82211e-5 |
| 64.85 | 6.01231e-5 |
| 79.89 | 3.80846e-5 |
| 97.9 | 2.44014e-5 |
| 120 | 1.49366e-5 |
| 147 | 9.5701e-6 |
| 180.5 | 6.13171e-6 |
| 250 | 2.88669e-6 |
| 350 | 1.29834e-6 |
| 450 | 7.25383e-7 |
| 550 | 4.44021e-7 |
| 650 | 3.15272e-7 |

۷۰۰ کیلومتر داشته و دوره تناوب مداری ماهواره در آن مابین ۶۰ تا ۹۰ دقیقه است. ماهواره‌های در این مدار برای اهداف نظامی و هواشناسی و مأموریت‌هایی رصدی مانند شاتل استفاده می‌گردند.

بدین منظور در ادامه کار ما ابتدا با استفاده از نرم افزار امره، مختصات ماهواره و ویژگی‌های آن را تعیین کرده‌ایم. سپس شار پروتون‌های پر انرژی خورشیدی را که به یک ماهواره معمولی در مدار لئو برخورد می‌کنند در زمان رخداد شراره‌های مختلف محاسبه کرده‌ایم. تعداد رویدادهای خورشیدی در بیشینه چرخه خورشیدی افزایش می‌یابند، در نتیجه باید چنین تحلیل‌هایی با دقت انجام گرفته و چنین طراحی‌هایی برای مأموریت‌های فضایی بلند مدت اهمیت بیشتری بیابند.

برای تعیین بازه انرژی در قبال شار پروتون‌های خورشیدی، ما از نرم افزار شبیه‌سازی امره استفاده کرده‌ایم. ابتدا در قسمت "مأموریت" ابتدا نوع مدار دلخواه، ارتفاع و دیگر ویژگی‌های مورد نظر را انتخاب کردیم سپس از مدل "شراره خورشیدی" استفاده کرده و شار پروتون‌های خورشیدی را در ۴ شراره بزرگ و شناخته شده زیر حساب کرده‌ایم:

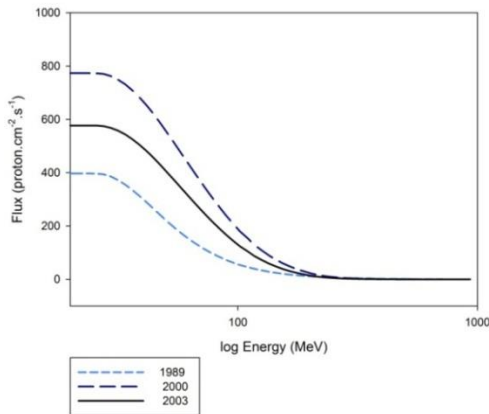
۱. بدترین ساعت آگوست ۱۹۷۲.
۲. اکتبر ۱۹۸۹ (بدترین ۵ دقیقه، بدترین ساعت و بدترین روز) که توسط ماهواره GOES7 اندازه گرفته شده است.
۳. جولای ۲۰۰۰ روز باستیل (بدترین ۵ دقیقه، بدترین ساعت و بدترین روز) که توسط ماهواره GOES8 اندازه گرفته شده است.
- اکتبر ۲۰۰۳ روز هالووین (بدترین ۵ دقیقه، بدترین ساعت و بدترین روز) که توسط ماهواره GOES11 اندازه گرفته شده است.

شار لحظه‌ای، قله آن تقریباً همسان با رویداد ۱۹۷۲ است.

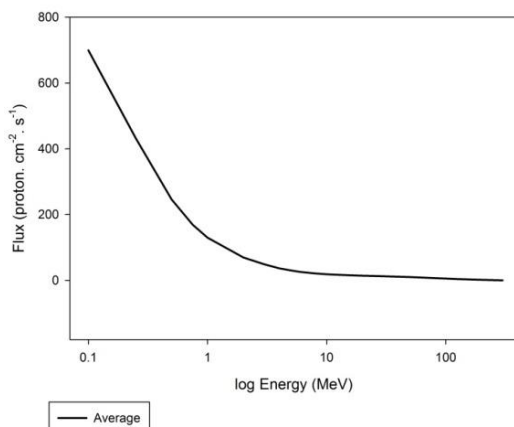
۳. یکی دیگر از رویدادهای بسیار مورد مطالعه قرار گرفته، طوفان تابشی است که در ۱۴ جولای ۲۰۰۰ (به اصطلاح رویداد روز باستیل) رخ داده است و طوفان ژئومغناطیسی مرتبط با آن در ۱۵-۱۶ جولای است. این رویداد کوچکتر از رویدادهایی بود که در بالا توضیح داده شدند: قله شار و دوز به ترتیب ۳۰٪ و ۷۰٪ رویداد ۱۹۷۲ بودند و DST به -301 nT کاهش یافت. این رویداد یک بیدارباش مفید و کم هزینه برای کمپته پرتاب ماهواره "کلاستر ۱" بود که برای آن روز برنامه راه اندازی اولین جفت از این سفینه فضایی را داشتند. تیم راه اندازی در مورد طوفان تابشی هشداری دریافت کرد و خوشبختانه پرتاب تا پس از طوفان به تعویق افتاد.

۴. روزهای آخر ماه اکتبر ۲۰۰۳ شاهد یکی دیگر از رویدادهای آب و هوای فضایی بزرگ (به اصطلاح رویداد هالووین) بودیم. این رویداد ضعیف‌تر از رویداد سال ۱۹۸۹ بود. Dst به -383 nT کاهش یافت و نفوذ تابش ۶۰ درصد رویداد ۱۹۷۲ بود، اما شواهد زیادی از اثرات آب و هوا فضای ارائه داد. این رویداد شامل غالب تجربه ما در حال حاضر از آب و هوای فضایی می‌شود زیرا هم آخرین رویداد اتفاق افتاده است و هم اینکه داده‌های زیست محیطی و تأثیر آن غنیاً در دسترس است.

ما می‌توانیم تغییرات شار ذرات را در طول رخ دادن شراره‌های خورشیدی در فضا محاسبه کرده و بنابراین نرخ آسیب‌ها و خطاها را به دست آوریم. برای جلوگیری از این آسیب‌ها و تهیه پوشش مناسب در مقابل آنها، نیاز به دانستن شار ذرات پر انرژی خورشیدی داریم. بنابراین شار ذرات پروتون را در مدار لئو برآورد کرده‌ایم. مدار لئو ارتفاعی در حدود ۲۰۰ تا



شکل ۱۷. شار پروتون‌ها در بدترین روز شراره‌های خورشیدی در برابر انرژی (به‌دست آمده توسط امره).



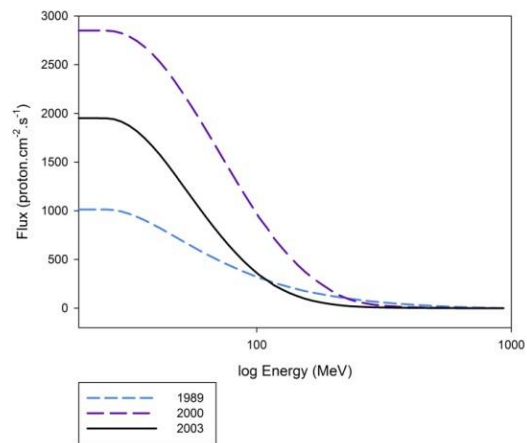
شکل ۱۸. شار پروتون‌ها در زمان عادی بدون رویداد خورشیدی در برابر انرژی (به‌دست آمده توسط امره).

همان‌طورکه در شکل‌های ۱۵ تا ۱۸ دیده می‌شود، شار پروتون‌هایی که به ماهواره در مدار لئو می‌رسند در بازه انرژی تا 1000 MeV به‌دست آمده‌اند.

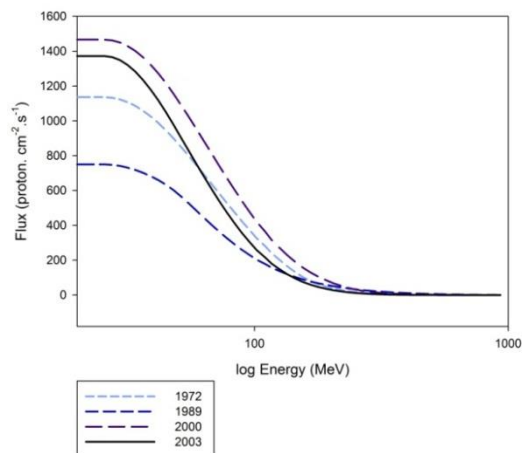
نتیجه‌گیری

طوفان‌های ژئومغناطیسی بزرگ می‌توانند سیستم‌های ناوبری مبتنی بر فضا مانند ماهواره‌ها را با ایجاد تغییرات سریع و بزرگ در شار ذرات مختل کنند. برای بررسی اثرات پرتوهای کیهانی و بنابراین محاسبه نرخ آسیب‌ها و خطاها و تهیه پوشش مناسب در مقابل آنها، نیاز به دانستن شار ذرات پر انرژی خورشیدی داریم.

ما روز پرتاب ماهواره را در شبیه‌سازی همان روز رخداد شراره‌های خورشیدی در نظر گرفتیم و مشخصات محل پرتاب ماهواره مورد شبیه‌سازی را شهر تهران با همان مختصات قرار داده‌ایم و سپس از این مدل استفاده کرده شار پروتون‌ها را برای یک ماهواره معمول در مدار لئو به‌دست آوردیم. اوج و حضیض مدار برابر 40000 Km است، انحراف مداری 51.5° بوده و دوره تناوب برابر 5545 ثانیه است. نمودارهای شار پروتون برحسب انرژی برای هر مدل در شکل‌های ۱۵ تا ۱۸ نشان داده شده‌اند.



شکل ۱۵. شار پروتون‌ها در بدترین ۵ دقیقه شراره‌های خورشیدی در برابر انرژی (به‌دست آمده توسط امره).



شکل ۱۶. شار پروتون‌ها در بدترین ساعت شراره‌های خورشیدی در برابر انرژی (به‌دست آمده توسط امره).

در ادامه کار ما ابتدا با استفاده از نرم افزار امره، مختصات ماهواره و ویژگی‌های آن را در مدار لثو تعیین کرده‌ایم. سپس شار پروتون‌های پر انرژی خورشیدی را که به یک ماهواره معمولی در این مدار برخورد می‌کنند در زمان رخداد ۴ شراره بزرگ و شناخته شده آگوست ۱۹۷۲، اکتبر ۱۹۸۹، جولای ۲۰۰۰ و اکتبر ۲۰۰۳ محاسبه کرده‌ایم. ما روز پرتاب ماهواره را در شبیه‌سازی همان روز رخداد شراره‌های خورشیدی در نظر گرفتیم و مشخصات محل پرتاب ماهواره مورد شبیه‌سازی را شهر تهران با همان مختصات قرار داده ایم. اوج و حضیض مدار برابر 400000 Km است و انحراف مداری $51/5^\circ$ بوده و دوره تناوب برابر 5545 ثانیه است. نمودارهای شار پروتون برحسب انرژی برای هر مدل در شکل‌های ۱۵ تا ۱۸ نشان داده شده‌اند.

در نتیجه در کار حاضر ما شار و محدوده انرژی پروتون‌های خورشیدی را به وسیله شبیه‌سازی در چرخه‌های مختلف خورشیدی و همچنین در زمان رویداد ۴ شراره بزرگ و مهم خورشیدی به دست آورده و با یکدیگر مقایسه کرده‌ایم. تعداد رویدادهای خورشیدی در بیشینه چرخه خورشیدی افزایش می‌یابند، در نتیجه باید چنین تحلیل‌هایی با دقت انجام گرفته و چنین طراحی‌هایی برای مأموریت‌های فضایی بلند مدت اهمیت بیشتری بیابند.

مرجع‌ها

[1] P.H. Zipfel, *Modeling and Simulation of Aerospace Vehicle Dynamic*. AIAA Education Series, American Institute of Aeronautics and Astronautics, (2014).

[2] S. Koontz, B. Reddell, P. Boeder, Using FLUKA to calculate Spacecraft Single Event Environments, *Microelectronics Reliability and Qualification Workshop*, United States (2009).

[3] J. Alcaraz, D. Alvisi, B. Alpat, et al. "Protons in near earth orbit *Physics Letters B* 472 (2000) 215-226.

در ناحیه مابین بالای جو و کمربند تابشی درونی، سطوح تابش عموماً خیلی بالا نیستند بنابراین پیش از استفاده از آشکارساز AMS، طیف پروتون در یک محدوده انرژی گسترده، به‌طور سیستماتیک مورد مطالعه قرار نگرفته بود. ما در کار حاضر به بررسی این ناحیه از طریق شبیه‌سازی پرداخته‌ایم. در اولین گام از شبیه‌سازی شار پروتون‌های خورشیدی، ما از نرم افزار شبیه‌سازی امره 3.6.4.0 استفاده کرده‌ایم. مدل GCR از ISO از مدل SOLPRO از زیرمجموعه مدل‌های آماری انتخاب و استفاده شده است. قطع مگنتو کره به‌صورت عمودی، شرایط آب و هوایی به‌صورت آرام فرض شده و اثر سایه زمین در نظر گرفته شده است.

شار پروتون‌های خورشیدی به‌عنوان تابعی از انرژی برای چرخه‌های خورشیدی ۲۰ام از تاریخ ۱۹۶۳/۱ تا ۱۹۷۸/۱ (قرمز و سبز)، چرخه ۲۱ام از تاریخ ۱۹۷۴/۱ تا ۱۹۸۹/۱ (آبی و سیاه)، چرخه ۲۲ام از تاریخ ۱۹۸۴/۱ تا ۱۹۹۹/۱ (صورتی و زرد)، چرخه ۲۳ام از تاریخ ۱۹۹۵/۲ تا ۲۰۱۰/۲ (آبی کم‌رنگ و نارنجی) و در نهایت برای چرخه ۲۴ام از تاریخ ۲۰۰۷/۱ تا ۲۰۲۲/۱ (سبز تیره و بنفش) به صورت انتگرالی و تفاضلی پروتون‌ها محاسبه گردیده و هر نوبت نتایج بر روی یک شکل رسم گردیده‌اند تا قابل مقایسه با یکدیگر باشند. سپس شار پروتون‌های خورشیدی به‌ازای طول و عرض‌های مختلف در چرخه‌های متفاوت به نمایش درآمده‌اند. تمام نتایج در شکل‌های ۴ تا ۱۳ نشان داده شده‌اند. در نتیجه با استفاده از شبیه‌سازی، ما شار پروتون‌های خورشیدی را به‌دور زمین به‌دست آوردیم. برای مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی، از داده‌های AMS Collaboration استفاده کرده‌ایم که در نهایت نتایج به‌خوبی در تطابق با یکدیگر قرار داشتند.

[4] OMERE, OMERE software, Solution provider for radiation assurance process, <http://www.trad.fr/OMERE-software.html>

[5] C. Stormer, Periodische Elektronenbahnen im Felde eines Elementarmagneten und ihre Anwendung auf Brches Modellversuche und auf Eschenhagens Elementarwellen des Erdmagnetismus. *Zeitschrift fur Astrophysik*, **1** (1930) 237-274.

[6] P. Grieder, Cosmic Rays at Earth, *1st Edition, Elsevier* (2001).

Simulation of proton's flux in different solar cycles and solar flares

Zahra Bagheri*¹, Pantea Davoudifar¹, Hosein Ebadi¹

¹Research Institute for Astronomy and Astrophysics of Maragha, Maragha, Iran

Received: 31.07.2016 Final revised: 01.11.2016 Accepted: 23.11.2016

Abstract

Geomagnetic storms disrupt space navigation systems such as satellite with rapid and large changes in particle flux. To study the effects of cosmic rays and calculate the rate of faults and errors and provide a suitable shield against them, we need to know the energetic particles flux. In the present work, we have obtained protons flux and energy range by simulating in different solar cycles and in 4 major solar flare events. In the first step of the proton flux simulation, we have used OMEREH. software; We have then compared the obtained data from the simulation with the experimental data from AMS collaboration and they were in a good agreement with each other. In the next step, first we have determined satellite's coordinates and properties using OMEREH; then we have calculated the flux of energetic protons that collide to a typical satellite in Leo orbit at the time of flares occurrence. The number of solar events increases in solar maximum. Therefore, these analyses should be done carefully and the design should be more significant in long-term space missions.

Keywords: Flux, Simulation, Protons, Solar cycle, Solar flare

* Corresponding Author: Bagheri.zahra87@gmail.com