

(علمی-ترویجی)

کمربندهای تشعشی ون آلن: چالش مهم مأموریت‌های زیست-فضا

مأموریت‌های فضایی سرشنسین‌دار بخش اعظمی از سفرهای آینده فضایی را به خود اختصاص می‌دهد. تشعشعات فضایی کمربندهای ون آلن یکی از چالش‌های مهم مأموریت‌های فضایی با رویکرد زیست-فضا است. فضایی‌هاها تحت نفوذ تشعشعات پرنانرژی موجود در فضا قرار دارند که تأثیرات زیادی بر وسایل الکترونیکی و محموله‌های آنها، به خصوص محموله‌های زیستی دارد. این امر نیاز به حفاظت تشعشی یا کاهش اثر آن را دارد. به عنوان مثال، زمانی که گیاهان تحت تأثیر تنش تشعشی قرار می‌گیرند، این تشعشعات تأثیر مخربی بر رشد آنها به علت آسیب دی ان ای می‌گذارد و منجر به کاهش رشد و تغییرات ژنتیکی آنها می‌شود. در این مقاله، به بررسی اثرات تشعشی کمربندهای ون آلن بر موجودات زنده در سفرهای فضایی پرداخته می‌شود.

واژه‌های کلیدی: مأموریت‌های فضایی، کمربندهای ون آلن، تشعشعات کیهانی، تشعشعات خورشیدی، زیست-فضا، محموله زیستی

ایمان شفیعی‌نژاد^{۱*}، شراره قاسمی^{۲**}
و نادیا نوری^{۱***}

۱- پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم،
تحقیقات و فناوری، تهران، کدپستی: ۸۳۴-
۱۴۶۶۵
۲- دانشگاه پلی تکنیک مادرید، مادرید،
اسپانیا

* استادیار (نویسنده پاسخگو)، ایمیل:
shafieenejad@ari.ac.ir

** دانش آموخته دکتری
*** دانشجوی کارشناسی ارشد

Van Allen Radiation Belts: An Important Challenge for Astrobiology Missions

Manned space missions account for a large proportion of future space travel missions. Van Allen radiation belts are major challenges of space missions with an astrobiology approach. In general, every living-being in space is affected by cosmic rays and solar charged particles. The amount of this radiation in two areas around the Earth, named Van Allen belts is significant. For example, planets exposed to radiation stress, due to DNA damage, has destructive effect on its growth, leading to reduced growth and genetic alteration. In this paper, effects of a Van Allen radiation belt on living organisms during space travel are investigated.

Keywords: Space Missions, Van Allen Belts, Cosmic Radiation, Solar Radiation, Astrobiology, Bio-cargo

I. Shafieenejad^{1*}, Sh. Ghasemi^{2**},
and N. Noori^{1***}

1- Aerospace Research Institute,
Ministry of Science, Research,
and Technology, Postal Code:
14665-834, Tehran, IRAN
2- Polytechnic University of
Madrid, Madrid, Spain

* Assistant Professor (Corresponding
Author): Email:

shafieenejad@ari.ac.ir

** Ph.D. Holder

*** M.Sc. Student

(علمی-ترویجی)

ایمان شفیعی نژاد، شراره قاسمی و نادیا نوری

۱- مقدمه

به طور کلی، هر موجود زنده در فضا تحت تأثیر تشعشعات کیهانی و ذرات باردار خورشیدی قرار دارد. میزان این تشعشعات در دو حوزه اطراف زمین تحت نام کمربندهای ون آلن قابل توجه است. تلاش انسان برای دستیابی به فضا و سفرهای فضایی روز به روز افزایش می‌یابد. بنابراین، ایمنی و سلامتی آینده فضانوردان مهم خواهد بود. اگر انسان به فضا سفر کند، آیا حیاتی برای او وجود دارد؟ هدف اصلی سفرهای فضایی کاوش سیاره‌ای و جستجوی حیات است، این امر نیاز به همکاری محققین علوم مختلف نظیر مهندسی هوافضا، زیست شناسی، کشاورزی، فیزیک، اخترشناسی، شیمی و غیره دارد. به طور کلی، فضا یک محیط متخاصم بوده و سفرهای فضایی با چالش‌های بیشماری همراه است. از جمله این چالش‌ها می‌توان به تغییرات مرتبط با گرانش (میکروگراویتی و هایپرگراویتی)، تشعشعات کیهانی، خلا زیاد، شدت‌های دمایی و غیره اشاره نمود. کمربندهای تشعشعی ون آلن^۱ از جمله مهمترین شرایط تشعشعی فضا هستند که عبور از میان این کمربندهای تابشی با خطرات بسیاری برای فضانوردان و محموله‌های زیستی همراه است [۸-۱].

بررسی تشعشعات کمربندهای ون آلن و اثر آن بر روی میکروارگانیسم‌ها در فضا از نکات کلیدی پروژه‌های آینده فضایی است. اهمیت مطالعه این کمربندها برای وسایل الکتریکی فضاییماها و همچنین محموله‌های زیستی به واسطه مخرب بودن تشعشعات کیهانی است. سیلوا و روکو^۲ از بخش مکانیک و کنترل فضایی موسسه ملی تحقیقات فضایی سائو پائولو، کمربندهای ون آلن را مدل‌سازی کردند [۹]. با استفاده از این مدل، گذر فضاییما از میان کمربندهای ون آلن مطالعه شده است. همچنین، برآورد میزان جذب شده تشعشع توسط ماهواره‌ها بر اساس میزان زمانی که فضاییما در مناطق تشعشعی بوده انجام شده است. کمربندهای تشعشعی ون آلن با توجه به زاویه عرض جغرافیایی و فاصله بین کمربندها که بخش‌های تشعشعی را جدا می‌کند، مدل‌سازی می‌شود. کمربندهای ون آلن به طور عمومی پایدار نیستند و فعالیت‌های خورشیدی بر آن اثر مستقیم دارد. کمربندهای تشعشعی ون آلن با استفاده از داده‌های ارائه شده توسط مأموریت کاوشگر ون آلن مدل‌سازی شده‌اند. با این حال، در حین تجزیه و تحلیل داده‌های مأموریت ون آلن پروبز^۳، برای همگن‌سازی مناطق تشعشعی کمربند ون آلن یک روش درونی برای

مقادیر شار تشعشعی را بیان کرده‌اند [۱۱-۱۰]. پیشنهاد شده است که کمربندهای تشعشعی ون آلن براساس استوای مغناطیسی مدل شوند. برای بررسی مانورهای مداری مشخص شده است که مانور ترکیبی هاهمن^۴ و پیشران-کم موفق به انجام مأموریت فضاییما در کمترین زمان در کمربندهای تشعشعی بوده است. همچنین، دوز تشعشعی جذب شده محاسبه و مشخص شد که موادی نظیر سرب، تانتالیم و تنگستن موادی هستند که بدون در نظر گرفتن دوره‌های فعالیت خورشیدی، حداقل میزان تشعشع را در لایه‌های حفاظتی خود دریافت می‌کنند. از طرف دیگر، برای ترکیب بین مانورهای هاهمن و پیشران-کم کمترین میزان دوز را در دوره فعالیت کم خورشیدی پیشنهاد داده‌اند [۱۳-۱۲].

ایکاترینا، لوکاس و نیکولاس^۵ آزمایش‌های بسیاری را به منظور بررسی تغییرات ساختاری یا بیوشیمیایی بر گیاه آرابیدوپسیس تالیانا^۶ پس از قرار گرفتن در معرض تشعشعات شبیه‌سازی شده طولانی مدت انجام دادند. گیاهان در معرض تشعشع، از نظر ریخت‌شناسی^۷ تحت تأثیر قرار گرفتند و برگ‌های آنها نازکتر بوده و کلروپلاست^۸ کمتری داشتند. نتایج نشان داده که قرار گرفتن طولانی مدت در معرض تابش غیر در باند میکروویو، تأثیر جدی بر روی این گیاه مدل می‌گذارد [۱۴].

گوپتا^۹ اثرات تشعشع بر گیاهان و اکوسیستم را مورد بررسی قرار داد. وی معتقد بود هنگامی که گیاهان تحت تأثیر تشعشع قرار می‌گیرند، به دلیل دنا توره^{۱۰} شدن پروتئین و آسیب دی‌ان‌ای به طور غیر طبیعی رشد می‌کنند. برای تست این فرضیه بذره‌های گیاهان را تحت تابش میکروویو، مادون قرمز، ماورا بنفش و اشعه ایکس قرار داد. مشاهده شد بذره‌هایی که تحت تابش قرار نگرفته بودند، سریعتر رشد کردند و نتیجه گرفت که تشعشع باعث جهش در دی‌ان‌ای گیاهان و سبب تأثیر منفی بر روی رشد و زمان جوانه‌زنی آنها می‌شود. در واقع همه پرتوها بر توانایی جوانه‌زنی بذرها اثر منفی داشتند [۱۵].

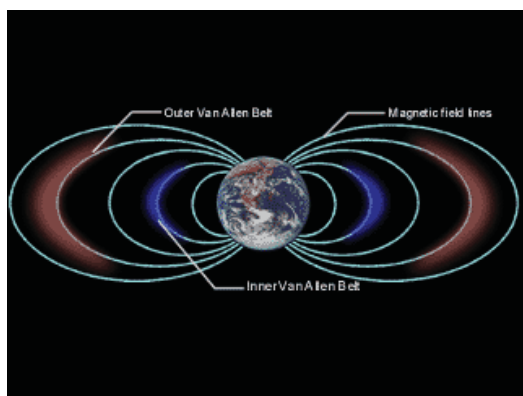
در ژانویه سال ۲۰۱۹ میلادی یک کاوشگر چینی برای اولین بار در تاریخ اکتشافات فضایی موفق به نشست بر نیمه پنهان ماه شده است. این کاوشگر چانگ-۴ نام دارد. چانگ-۴ در دهانه‌های به نام فون کارمان^{۱۱} درون حوضه قطب جنوب ماه فرود آمده و قرار است با کمک ابزارهای خود به بررسی

7. Morphology
8. Chloroplasts
9. Gupta
10. Denature
11. Von Karmen

1. Van Allen Belt
2. Silva and Rocco
3. Van Allen Probes
4. Hohmann
5. Ekaterina, Lucas and Nicholas
6. Arabidopsis Thalian

ذرات باردار خورشیدی از پروتون‌های انرژی متوسط و پایین و ذرات آلفا تشکیل شده‌اند که به طور پراکنده توسط خورشید در طول برخی از وقایع تابش خورشیدی ساطع می‌شوند. میزان تشعشعات فوق در دو حوزه اطراف زمین تحت نام کمربندهای ون آلن بسیار مورد توجه دانشمندان فضایی است. اهمیت مطالعه این کمربندها برای وسایل الکتریکی فضاپیماها و همچنین محموله‌های زیستی به واسطه مخرب بودن تشعشعات کیهانی است. بنابراین، سلول‌های خورشیدی، مدارهای مجتمع، سنسورها و محموله‌های زیستی می‌توانند از طریق تشعشعات کیهانی آسیب ببینند. ذرات بارداری که در میدان مغناطیسی زمین به دام می‌افتند، کمربندهای تابشی ون آلن را تشکیل می‌دهند. این کمربندها دو حلقه میان تهی اطراف زمین را تشکیل می‌دهند (شکل ۱). ون آلن در سال ۱۹۵۸ میلادی از داده‌های گردآوری شده توسط ماهواره اکسپلورر^{۱۶} این کمربند را کشف کرد و به افتخار او نام‌گذاری شده‌اند. فضاوردان در فاصله‌های ایمن بسیار پایین‌تر از این کمربندهای تابشی دور زمین می‌گردند (برای مثال زیر ارتفاع مداری ۵۰۰ کیلومتر مانند ایستگاه بین‌المللی فضایی). طوفان‌های خورشیدی، ذرات باردار را به صورت فواره‌های عظیمی پرتاب می‌کنند که بسیاری از آنها از نزدیکی زمین می‌گذرند و در میدان مغناطیسی آن به دام می‌افتند [۱۷-۱۶].

این منطقه بپردازد. یکی از ابزارهای علمی این ماه‌نشین، یک محفظه حیاتی است که این محفظه سه کیلوگرمی شامل بذر برخی از گیاهان و تخم حشرات است. این موضوع به واسطه بررسی آن است که آیا گیاهان و حشرات می‌توانند با یکدیگر در شرایط فضا رشد کنند. فضای درون این بسته مشابه محیط زمین طراحی شده است و هدف آن بررسی رشد احتمالی و به بار نشستن این نمونه‌ها در مجاورت گرانش اندک و تشعشعات ماه است. آزمایش شامل شش نوع موجود زنده است که عبارتند از: کتان، سیب‌زمینی، کلزا^{۱۲}، آرابیدوپسیس تالیانا، مخمر و مگس میوه^{۱۳}. امید بود گیاهان و مگس‌های میوه بتوانند با هم یک همزیستی ساده در محفظه ایجاد کنند. از طرف دیگر، مخمر نقش مهمی در تنظیم دی‌اکسیدکربن و اکسیژن و همچنین تجزیه زیاله‌های فرآوری شده از مگس‌ها و گیاهان مرده برای ایجاد منبع غذایی اضافی برای حشرات دارد. ظرف چند ساعت پس از فرود در ۳ ژانویه ۲۰۱۹، دمای محفظه به ۲۴ درجه سانتیگراد تنظیم و دانه‌ها به صورت مکانیزه آب داده شدند. در ۱۵ ژانویه ۲۰۱۹ گزارش شده است که دانه‌های کتان، کلزا و سیب‌زمینی جوانه زده است. با این حال، در تاریخ ۱۶ ژانویه گزارش شد که آزمایش به دلیل کاهش درجه حرارت خارجی به ۵۲- درجه سانتیگراد به پایان رسیده و ناتوانی در گرم کردن نگهداشتن محفظه سبب شکست مأموریت شده است. بنابراین، عدم پیش‌بینی دمای محیط و به واسطه آن تنش‌های دمایی این پروژة بزرگ را با شکست روبه‌رو کرد [۱۶]. بنابراین، در مقاله حاضر به بررسی ماهیت کمربندهای تشعشعی ون آلن، بررسی و محاسبه میزان تشعشعی که می‌تواند توسط محموله‌های زیستی حین عبور از کمربند مذکور جذب شود پرداخته می‌شود.



شکل (۱): کمربندهای ون آلن [۱۷].

کمربند تشعشعی ون آلن یک منطقه از فضای پر انرژی ذرات باردار است که ساختار آن بیشتر توسط طوفان‌های

۲- کمربندهای تشعشعی ون آلن

بررسی اثرات تشعشعات فضایی از موضوعات مهم مورد توجه محققین فضایی است. تشعشعات کیهانی^{۱۴} و ذرات باردار خورشیدی^{۱۵} حیات موجودات زنده را با خطرات زیادی مواجه می‌نمایند. طیف GCR از پروتون‌های با انرژی بالا و هسته‌های اتمی یعنی حدود ۸۷ درصد پروتون‌های انرژی بالا، ۱۲ درصد ذرات آلفا و ۱ درصد یون‌های سنگین‌تر از آهن تشکیل شده است.

15. Solar Particle Effect (SPE)
16. Explorer

12. Rapeseed
13. Fruit fly
14. Galactic Cosmic Rays (GCR)

(علمی-ترویجی)

ایمان شفیعی نژاد، شراره قاسمی و نادیا نوری

تشکیل می‌دهد که مسئول از بین رفتن الکترون‌های کم انرژی در کمربند بیضوی خارجی است [۹].

اهمیت مطالعه این کمربندها به دلیل آن است که برای وسایل الکترونیکی فضایی و همچنین محموله‌های زیستی بسیار مخرب می‌باشند. طوفان‌های ژئومغناطیسی گاه به قطعات الکترونیکی بر روی فضایی‌های آسیب می‌رساند. به طور تقریبی تمام تشعشع در هنگام عبور از کمربند داخلی دریافت می‌شود. مأموریت‌های آپولو اولین رویدادی بودند که طی آن انسانها از میان کمربند ون آلن عبور کردند. یکی از مهمترین خطرات این سفر، تشعشع وارده از طریق کمربندهای مذکور بود. مسیرهای پرواز آپولو به طور کامل از کمربندهای داخلی و از قسمت‌های نازک کمربندهای خارجی عبور می‌کرد [۱۹].

۳- تعاریف و محاسبات دوز تشعشع

وسایل نقلیه فضایی در معرض انواع تشعشعات پرنرژی موجود در فضا قرار دارند. به‌طور کلی، این تشعشعات تأثیرات جانبی بر روی وسایل نقلیه، قطعات یا سرنشینان دارند و این امر نیاز به حفاظت در برابر تشعشع را ضروری می‌سازد. عوارض جانبی تشعشع به شکل تغییر در خواص مواد یا اجزای سازنده همراه با اختلال در عملکرد آنها آشکار می‌شود، یا منجر به تغییرات فیزیولوژیکی در سرنشینان وسیله نقلیه شده و حیات آنها را در معرض خطر قرار می‌دهد [۲۰]. اگر حفاظت کافی در برابر تشعشع انجام نشود، این تأثیرات می‌تواند منجر به شکست مأموریت یا آسیب دائمی سرنشینان وسایل نقلیه و یا هر دو شود. ما در این بخش به تعیین دوزهای ناشی از نفوذ اشعه فضایی و طراحی حفاظ مناسب برای وسایل نقلیه فضایی به منظور جلوگیری و یا کاهش نفوذ تشعشعات فضایی می‌پردازیم. تشعشعات کیهانی، پروتون‌ها و الکترون‌های مغناطیسی به دام افتاده در مجاورت زمین و سیارات دیگر و پرتوهای کیهانی خورشیدی و سایر تشعشعات محیط تشعشع فضا را تشکیل می‌دهند. مهمترین پارامترهای تعیین‌کننده میزان تشعشع عبارتند از: نوع تشعشع، شدت شار، طیف انرژی شار، جهت‌یابی شار، نوع و توزیع مکانی مواد بین منبع تشعشع و مؤلفه و ماده‌ای که دوز تشعشع در آن تعیین می‌شود [۲۱].

پاسخ یک ماده یا مؤلفه میدان تشعشع به‌طور کلی با نوع تشعشع متفاوت است و به اندازه، نرخ و الگوی رسوب انرژی بستگی دارد. با این حال، پاسخ به طور معمول می‌تواند مستقیماً با دوز جذب شده یا انرژی جذب شده در جرم واحد مرتبط باشد. واحد متداول دوز rad که برابر است با: $1rad =$

خورشیدی ایجاد می‌شود. این ذرات باردار توسط میدان مغناطیسی زمین حبس شده و در اطراف آن نگهداری می‌شوند. زمین دو کمربند اصلی دارد و گاهی اوقات ممکن است کمربند سوم دیگری نیز به طور موقت ایجاد شود. کشف کمربندها به واسطه تحقیقات جیمز ون آلن نامگذاری شده است. کمربندهای ون آلن اصلی زمین از دو بخش تشکیل شده‌اند که در ارتفاع حدودی ۶۴۰ تا ۵۸,۰۰۰ کیلومتر بالاتر از سطح زمین قرار دارند. با ورود بادهای خورشیدی، میدان مغناطیسی زمین این ذرات پر انرژی را محصور کرده و از تخریب اتمسفر جلوگیری می‌کند. دو حلقه اصلی کمربند ون آلن با شکل دوایری متمرکز و مملو از ذره‌های پر انرژی هستند که گاهی اوقات به جو زمین نیز وارد می‌شوند و گاهی نیز به سطوح بالاتر فضا می‌روند. همچنین، بخشی از کمربندها در قسمت داخلی مگنتوسفر زمین قرار دارند. کمربندها دارای ذرات پر انرژی هستند که شامل الکترون‌ها و پروتون‌ها هستند. از طرف دیگر، هسته‌های دیگر مانند ذرات آلفا در کمربندهای ون آلن نیز موجود است اما کمتر شایع هستند. پس در کل دو کمربند تشعشعی وجود دارد که از پروتون‌ها و الکترون‌هایی به دام افتاده در میدان ژئومغناطیس شکل می‌گیرند اما شکل آنها متفاوت است. کمربند داخلی حاوی پروتون‌های بیشتری نسبت به کمربند بیرونی است و کمربند بیرونی الکترون‌های بیشتری دارد. علاوه‌براین، بین کمربندها، یک منطقه با شدت تشعشعی ضعیف وجود دارد که بر حسب فعالیت خورشیدی می‌تواند به عنوان کمربند بیرونی فعالیت نماید [۱۸]. بنابراین، اگر ماهواره‌ها و یا محموله‌های زیستی زمان قابل توجهی را در نزدیکی مناطق کمربند ون آلن که حاوی ذرات پر انرژی با چگالی بالا هستند سپری نمایند برای آنها پر خطر است. بنابراین، باید برای محافظت از آنها تدابیر مأموریتی اندیشیده شود.

در سال ۲۰۱۳، ناسا گزارش داده که کاوشگر ون آلن سومین کمربند ون آلن را کشف کرده که طول عمر آن چهار هفته است. با این وجود، ساختار جدیدی از رفتار تشعشعی کشف شد. در سال ۲۰۱۲، ناسا فضایی‌های دوقلوها را به نام کاوشگران طوفان کمربند تابشی^{۱۷} که بخشی از مأموریت آن تحقیق بر روی کمربند ون آلن است، راه‌اندازی کرد. در یک آزمایش که در دوره سپتامبر تا اکتبر در سال ۲۰۱۲ انجام شد، کاوشگرها ساختاری جدید از کمربند سوم بین کمربندهای داخلی و خارجی کشف کردند. ظهور ناحیه تشعشعی سوم با گذر از باد خورشید همراه است که موج‌هایی از فرکانس فوقانی با دامنه‌های بزرگ را

نشده است. در نتیجه عدم اطمینان در این محیط عامل اصلی در ایجاد الزامات محافظت در برابر اشعه برای مأموریت‌های طولانی مدت در خارج از میدان ژئومغناطیسی است. از دیدگاه عملی، مفیدترین روش برای حل این مشکل در این زمان بر این فرض استوار است که محیط تشعشعات خورشیدی از نظر آماری تصادفی است. با استفاده از چنین رویکردی، احتمال مواجهه با محیط پروتون خورشیدی معین در طی یک مأموریت با مدت زمان معین تخمین زده می‌شود. شدیدترین وقایع چرخه نوزدهم که به طور گسترده اندازه‌گیری و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت، حوادث نوامبر ۱۹۶۰ بود [۱۷].

زمین و سیارات با میدان مغناطیسی شبیه به زمین (زهره و مریخ هیچ میدان مغناطیسی قابل توجهی ندارند و مشتری دارای یک میدان قوی است) توسط تابش مغناطیسی به دام افتاده متشکل از الکترون‌ها و پروتون‌های پر انرژی احاطه شده‌اند. جهت‌یابی این ذرات با جهت‌یابی میدان مغناطیسی مرتبط است. با این حال، از آنجاکه جهت‌یابی یک وسیله نقلیه فضایی با توجه به میدان مغناطیسی در طول یک مأموریت متفاوت است، این ذرات معمولاً به منظور طراحی حفاظت در برابر اشعه، ایزوتروپیک محسوب می‌شوند. تشعشعات به دام افتاده در بالای جو و بیشتر در پوشش حاوی میدان مغناطیسی وجود دارند. برای زمین، این از ارتفاعی حدود ۲۰۰ کیلومتر تا فراتر از ارتفاع مدار همزمان (۳۵،۹۰۰ کیلومتر) متغیر است. الکترون‌های پرانرژی در کمربندهای داخلی و بیرونی موجود هستند که کل میدان ژئومغناطیسی را شامل می‌شوند. پروتون‌های پرانرژی در ارتفاعات تقریبی کمتر از ۱۵،۰۰۰ کیلومتر به کمربند داخلی محدود می‌شوند. پروتون‌های کم انرژی تا کمربند بیرونی امتداد دارند. شدت شار تابش به دام افتاده زمین و طیف انرژی به دلیل فعالیت خورشیدی، وابسته به زمان هستند. شار پروتون به دام افتاده با انرژی بالا نسبتاً پایدار است و در هنگام وقوع طوفان‌های خورشیدی تغییرات به اندازه یک ضریب ۲ وجود دارد. شار الکترون به دام افتاده بسیار متغیر است. بیشترین تغییرات در ارتفاعات بسیار زیاد (به عنوان مثال، در اطراف مدار همزمان) و در عرض‌های جغرافیایی ژئومغناطیسی بالا اتفاق می‌افتد. برای مأموریت‌های طولانی‌تر از مدت زمان چند هفته، شار متوسط تقریباً ثابت است [۱۸].

تشعشعات کیهانی یک منبع تابش مداوم از اساس ایزوتروپیک را تشکیل می‌دهند. این منبع دقیقاً شناخته شده است و عدم قطعیت ماهیت آن در طراحی محافظت در برابر اشعه به نسبت ناچیز است. انرژی این تشعشعات آنقدر زیاد است که محافظت در برابر آنها و تشعشعات ثانویه‌ای که در مواد محافظ تولید می‌شوند، عملی نیست و مطابق با میزان دوز در فضای آزاد

پاسخ بیولوژیکی انسان اغلب $100 \text{ ergs/gr} = 0.01 \text{ J/kg}$ (اما نه همیشه) در واحد rem بیان می‌شود که یک واحد ویژه به نام «معادل دوز» است. محافظت از تشعشعات برای مأموریت‌هایی در ارتفاعات بالاتر از حدود ۲۰۰ کیلومتری زمین از اهمیت بالقوه‌ای برخوردار است. محیط تشعشعی به دام افتاده برای مأموریت‌های نزدیک به زمین و محیط‌های تشعشعات کیهانی و خورشیدی برای مأموریت‌های دورتر از سطح زمین (به عنوان مثال برای مأموریت‌های ماه و بین سیاره‌ای و مأموریت‌های مداری با ارتفاع بالا) با خطرات بسیاری همراه هستند. مهمترین محدودیتی که در وسایل نقلیه فضایی سرنشین دار مطرح است، به طور معمول دوز بیولوژیکی قابل قبول است. در سیستم‌های بدون سرنشین برای محافظت مدارهای الکتریکی، اجزای الکترونیکی، سلول‌های خورشیدی و سایر مواد حساس به تشعشع دقیق‌ترین الزامات به کار گرفته می‌شود. اگر دوز بیش از حد باشد، با وارد کردن مواد محافظ بین منبع تابش و مؤلفه می‌توان آن را به حد قابل قبولی کاهش داد. تشعشعات نافذ فضا که می‌توانند تأثیر مهمی بر وسایل نقلیه فضایی داشته باشند عبارتند از: الکترون، پروتون و تا حدی کمتر ذرات باردار سنگین‌تر. پروتون‌ها و الکترون‌ها به دلیل شدت نسبی بالاتر و نفوذپذیری بیشتر، بیشترین خطر را دارند و محافظت در برابر آنها سخت‌تر است. ذرات آلفا که بخشی از محیط تشعشعات خورشیدی را تشکیل می‌دهد، ممکن است برای مواقعی که میرایی شار کم است به دلیل رسوب دوز بیشتر مورد توجه باشند. هسته‌های سنگین پر انرژی که بخشی از محیط تشعشعات کیهانی را تشکیل می‌دهد با توجه به شدت شار آنها می‌تواند میزان خسارت بزرگی را ایجاد کنند، اما شدت شار کم مانع از کم اهمیت بودن آنها نمی‌شود [۲۲].

تشعشعات کیهانی خورشیدی برای مأموریت‌های خارج از میدان ژئومغناطیسی (به عنوان مثال، مأموریت‌های مدار زمین در طول و عرض جغرافیایی بسیار زیاد و مأموریت‌های بین سیاره‌ای) قابل توجه است که می‌تواند طیف انرژی را تغییر داده و شدت شار را به مقدار قابل توجهی کاهش دهند. سایه افکندن زمین باعث کاهش شار با ضریب ۲ برای مدارهای پایین می‌شود. پرتوهای کیهانی خورشیدی برای دوره‌هایی تا چند روز وجود دارند. محققان در تلاش هستند تا رابطه‌ای معتبر را برای پیش‌بینی مطمئن و طولانی مدت یک رویداد ارائه دهند. از آنجاکه بیشتر دوزهای تشعشعات خورشیدی دریافت شده در طول یک مأموریت به طور احتمالی به علت یک رویداد بزرگ است. چنین ارتباطی به خصوص برای وقایع مهم مطلوب است. اگرچه ارتباطی با تعداد لکه‌های خورشیدی و سایر شرایط قابل رویت در خورشید وجود دارد، اما هنوز هیچ روش معتبری پیدا

(علمی-ترویجی)

ایمان شفیعی نژاد، شراره قاسمی و نادیا نوری

هسته‌های سنگین، ذرات باردار بسیار سنگین‌تر از پروتون هستند و به عنوان ذرات آلفا طبقه‌بندی شوند. تنها منبع قابل توجه هسته سنگین‌تر از ذرات آلفا، محیط تشعشعات کیهانی است. اندازه‌گیری‌های موجود در جو زمین نشان می‌دهد که تابش ثانویه برای تعیین میزان دوز تشعشعات کیهانی بسیار مهم است. در واقع باعث می‌شود در حدود $\pm 20\%$ در پشت محافظ با ضخامت کمتر از 100 gr/cm^2 تقریباً یکنواخت باشد. تعامل ذرات آلفا با ماده در اصل شبیه به پروتون‌ها است [۲۰-۲۱].

۳-۳- تحلیل دوز برمسترالونگ و الکترون

برخلاف پروتون‌ها، جرم کم الکترون‌ها باعث می‌شود که در اثر برخورد با الکترون‌های اتمی و هسته‌ها، آنها به راحتی از بین بروند. این به نوبه خود باعث می‌شود که آنها برمسترالونگ^{۱۸} (یا اشعه X) تولید کنند که بسیار نفوذپذیرتر از الکترون‌ها است. از آنجاکه الکترون‌های به دام افتاده با محافظ نازک متوقف می‌شوند (محدوده عملی تقریبی $1/2 \text{ gr/cm}^2$ در هر $\text{MeV} = 1.603 \times 10^{-13}$ انرژی^{۱۳})، دوز برمسترالونگ اغلب به دلیل نفوذپذیری بیشتر بر دوز الکترون مسلط است. بنابراین در محیط تشعشعی فضا، منابع تابشی که باید در نظر گرفته شوند عبارتند از: تشعشعات خورشیدی، پروتون‌ها و الکترون‌های به دام افتاده و تشعشعات کیهانی هستند. پارامترهای مهم اولیه نظیر شدت شار و طیف انرژی باید مورد توجه قرار گیرند. جهت‌یابی شار و وابستگی به زمان از اهمیت کمتری برخوردار هستند. اگر انسان درگیر پرواز در فضا باشد، ایمنی او از آسیب اشعه باید اولین مورد باشد. پاسخ‌های انسان به در معرض قرار گرفتن تشعشعات عبارتند از:

دوز دستگاه گوارش - دوز مورد نیاز برای حالت تهوع در ۱۰ درصد خدمه = ۲۵ راد،

دوز پوست - دوز لازم برای تولید اربیتیم در ۱۰ درصد از خدمه (ممکن است ریزش موی موقت ایجاد کند) = ۲۰۰ راد،

دوز خون - دوز لازم برای کاهش ۲۰ درصد گلبول سفید خون و / یا ترومبوسیت‌ها (لخته‌ساز) = ۵۰ راد و

دوز چشم - دوز مورد نیاز برای تولید ۵ درصد بروز علامت آب مروارید از نظر بالینی = ۸۰ راد.

«برنامه‌ریزی دوز عملیاتی» باید دقیقاً نیمی از دوزهای بیان شده فوق در نقاط مختلف بدن باشد. مقدار «حداکثر دوز عملیاتی» همان است که در بالا آورده شده است (جدول ۱) [۲۲].

(خارج از میدان ژئومغناطیسی) است که از حدود 8 rad در سال در طول حداقل فعالیت خورشیدی تا کمتر از نیمی از این مقدار در طول حداکثر فعالیت خورشید متغیر است. شدت شار در منظومه شمسی با افزایش فعالیت طوفان خورشیدی، به واسطه میدان‌های مغناطیسی بین سیاره‌ای مرتبط با طوفان‌های خورشیدی، کاهش می‌یابد. همچنین، شدت آن با فاصله از خورشید متغیر است، اگرچه ماهیت و علت تغییرات نامشخص است. میزان دوز را می‌توان تقریباً با درجه بزرگی توسط میدان ژئومغناطیسی کاهش داد و به اندازه یک ضریب ۲ توسط سایه زمین برای مأموریت‌های نزدیک به زمین کاهش داد. ضخامت محافظ عملی بیش از ۲۰ درصد بر نرخ دوز اثر نمی‌گذارد. دوز تشعشعات کیهانی در طراحی محافظت در برابر اشعه تأثیر می‌گذارد. زیرا باید از کل دوزهای مجاز کم شود تا دوزهای مجاز از سایر منابع تشعشع تعیین شود. تشعشعات نفوذپذیر به طور عمده توسط مکانیسم‌های یونیزاسیون و جایجایی اتمی باعث آسیب می‌شوند. تشعشع فضایی در اغلب مواقع توسط یونیزاسیون به بافت بیولوژیکی آسیب می‌رساند. دو نوع حفاظت در برابر ذرات باردار وجود دارد که محیط تشعشعی فضا را تشکیل می‌دهند که حفاظت‌های فعال و غیر فعال هستند. حفاظت فعال از میدان‌های الکتریکی یا مغناطیسی استفاده می‌کند تا ذرات باردار را به دور از فضایپا منحرف کند. اصل حفاظت غیرفعال صرفاً قرار دادن جرم بین منبع تشعشع و گیرنده است. هنگام عبور از جرم، اشعه در اثر تداخلات اتمی و هسته‌ای با مواد ضعیف می‌شود [۹].

۳-۱- تحلیل دوز پروتون

در طی کم شدن انرژی پروتون‌های اولیه (یعنی حادثه)، فعل و انفعالات هسته‌ای با ماده محافظ، هسته‌های ثانویه (پروتون و نوترون) را ایجاد می‌کنند. با این حال، این پرتوهای ثانویه برای طیف‌های انرژی پروتون خورشیدی و پروتون به دام افتاده بر روی ضخامت محافظ کمتر از 20 gr/cm^2 تنها حدود ۱۰ درصد بر دوز کلی جذب شده تأثیر می‌گذارند. مشخص شده است که سایر تشعشعات ثانویه ناشی از پروتون معمولاً خیلی مهم نیستند. به طور تقریبی در تمام موقعیت‌های طراحی فضایپا، عدم اطمینان در دوز تابش ثانویه خیلی مهم نیست، زیرا تنها بخش کوچکی از دوز کل را نشان می‌دهد [۱۹].

۳-۲- تحلیل دوز هسته‌های سنگین

جدول (۲): تراکم مواد محافظ.

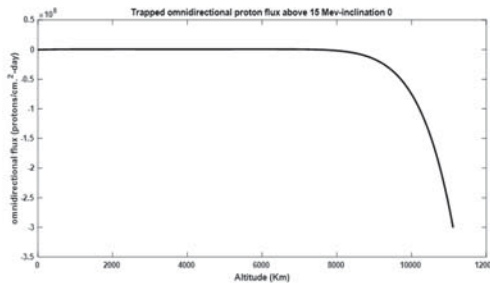
مواد	چگالی Kg/cm^3
آلومینیوم	۰/۰۰۲۶۹۷
تنگستن	۰/۰۱۹۲۵۰
سرب	۰/۰۱۱۳۴۰
تانتالیوم	۰/۰۱۶۶۵۰
سیلیکون	۰/۰۰۲۳۳۰

جدول (۱): محدودیت‌های دوز تشعشع برای مأموریت‌های ۳۰ الی ۶۰ روزه.

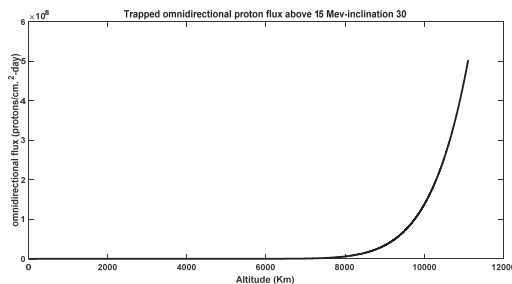
بافت	عمق	برنامه‌ریزی دوز عملیاتی	حداکثر دوز عملیاتی
پوست	0.1 mm	2.5 rads/day	5 rads/day
چشم	3.0 mm	1.25 rads/day	2.5 rads/day
استخوان مغز	5.0 mm	0.6 rad/day	1.0 rads/day

۴- نتایج

جهت مطالعه کمربندهای ون آلن نیاز است تغییرات شار پروتون و نرخ دوز الکترون بر حسب شیب مداری مورد تحلیل قرار بگیرد. تغییرات شیب مداری از صفر درجه تا نود درجه مورد بررسی قرار گرفته است. بنابراین، تغییرات شیب مداری با فواصل 30° مد نظر قرار گرفته است. در شکل‌های ۵-۲ تغییرات شار پروتون در شیب‌های مداری 0° الی 90° آورده شده است. همچنین، در شکل‌های ۹-۶ نرخ دوز الکترون بر حسب زوایای شیب مداری 0° الی 90° آورده شده است. شکل‌های ۵-۲ بیانگر آن است که میزان شار پروتون در ارتفاع مداری بالای $10,000$ کیلومتر افزایش پیدا می‌کند. همچنین، شکل‌های ۹-۶ بیان می‌دارند که میزان نرخ دوز الکترون در ارتفاع مداری $30,000$ کیلومتر به بالا افزایش دارد. بنابراین، دو ارتفاع اشاره شده در طراحی مأموریت‌های سرنشین‌دار بسیار مهم خواهد بود.



شکل (۲): نمودار شار پروتون بر حسب ارتفاع برای شیب مداری 0° و انرژی بالاتر از 15 MeV .



شکل (۳): نمودار شار پروتون بر حسب ارتفاع برای شیب مداری 30° و انرژی بالاتر از 15 MeV .

اگر کسی بخواهد مأموریت‌های طولانی مدت (یک یا دو سال) را بررسی کند، می‌تواند فرض کند که بدن در واقع بعضی از آسیب‌ها را ترمیم می‌کند. قابل درک است که یک مقدار دوز انباشته مجاز ممکن است برای مأموریت یک یا دو ساله دو برابر شود. این احتمالاً یک فرض معتبر برای پرواز فضایی عمیق نیست زیرا می‌توان 90% درصد از دوز مجاز را طی یک رویداد بزرگ پروتون خورشیدی دریافت نمود که حداکثر سه روز طول بکشد. برای به دست آوردن میزان دوز مناسب در یک فضاورد یا سایر اهداف نسبتاً بزرگ، میزان دوز به‌طور کلی باید نصف شود. همچنین، از آنجا که پیکربندی‌های واقعی فضاپیما پوسته‌های کروی نیستند، اگر یک نمایش هندسی واقع‌گرایانه استفاده شود که در آن محافظت از اجزای پردازنده، سایر فضاوردان و سازه‌های خارجی در نظر گرفته شود، کاهش اضافی دوز (به اندازه یک عامل دو) پیدا می‌شود. شار پروتون فضای آزاد در حداکثر فعالیت خورشیدی حدود $2.5 \frac{\text{protons}}{\text{cm}^2\text{-sec}}$ و تقریباً دو برابر این مقدار در حداقل فعالیت خورشیدی است. یک فضاپیما با ضخامت متوسط $6 \frac{\text{g}}{\text{cm}^2}$ آلومینیوم، دوز کلی 7.2 rads/year را در طول حداقل فعالیت خورشیدی دریافت می‌کند. در حداکثر فعالیت خورشیدی نرخ دوز می‌تواند توسط یک ضریب دو کاهش یابد. با این حال، اگر کسی از طیف انرژی تغییر یافته استفاده کند، مقدار دوز کلی حاصل از تشعشعات کیهانی در مدار دایروی 30° درجه و 240 ناتیکیال مایل 0.20 rad/year خواهد بود [۲۰-۲۳].

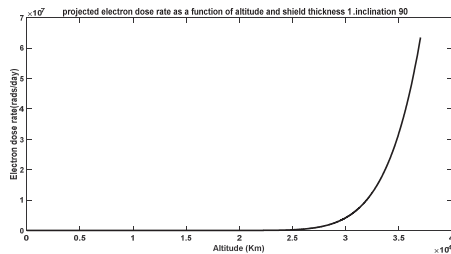
۴-۳- میزان جذب تشعشع

میزان دوز جذب از تعاریف دوز تشعشعی و شار شعاعی فارغ از هر جهت مکانی عبارتست از:

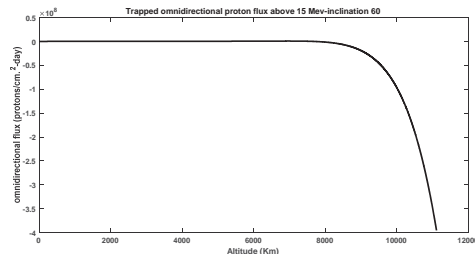
$$\dot{D}(E) = w_R K \frac{\Phi(E)E^2}{\rho t} \quad (۱)$$

که در آن، w_R ضریب وزنی تشعشعی است، به طوری که ۱ برای الکترون و ۲ برای پروتون است. همچنین، k برابر است با $4.80653199 \times 10^{-11}$. از طرف دیگر، Φ فاکتور شتاب به صورت تابعی از انرژی E است. t ضخامت محافظ و ρ بیانگر چگالی مواد محافظ است [۲۵].

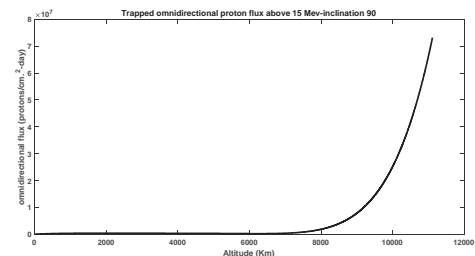
(علمی-ترویجی) ایمان شفیعی نژاد، شراره قاسمی و نادیا نوری



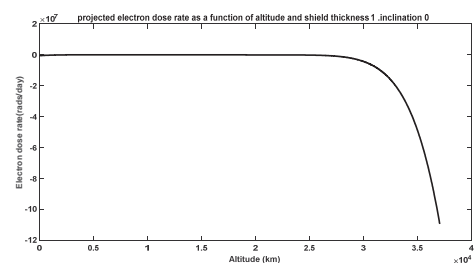
شکل (۹): نمودار نرخ دوز الکترون بر حسب ارتفاع و ضخامت محافظ 1 برای شیب مداری 90° .



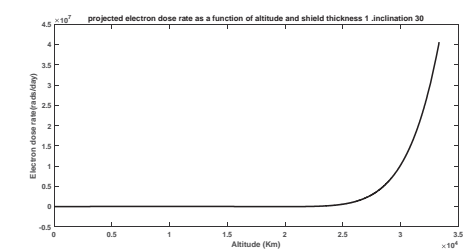
شکل (۴): نمودار شار پروتون بر حسب ارتفاع برای شیب مداری 60° و انرژی بالاتر از 15 Mev .



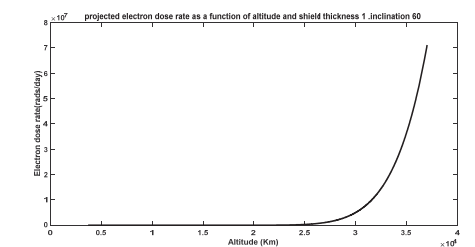
شکل (۵): نمودار شار پروتون بر حسب ارتفاع برای شیب مداری 90° و انرژی بالاتر از 15 Mev .



شکل (۶): نمودار نرخ دوز الکترون بر حسب ارتفاع و ضخامت محافظ 1 برای شیب مداری 0° .



شکل (۷): نمودار نرخ دوز الکترون بر حسب ارتفاع و ضخامت محافظ 1 برای شیب مداری 30° .



شکل (۸): نمودار نرخ دوز الکترون بر حسب ارتفاع و ضخامت محافظ 1 برای شیب مداری 60° .

۵- نتیجه گیری

مأموریت‌های اخیر سازمان‌های فضایی دنیا براساس زندگی در سیاره‌های منظومه شمسی دور و به طبع آن زمان‌های طولانی سفر، کاهش هزینه‌های اقتصادی جهت اعزام موجودات زنده و ارسال مواد غذایی دانش زیست-فضا مورد توجه قرار گرفته است. همچنین، این انتظار می‌رود که با توجه به اسناد آینده پژوهی فضایی و زیست-فضا برای دو دهه آینده و استقرار در ماه و مریخ، حضور مستمر موجودات زنده در فضا امری عادی خواهد شد. بنابراین، مسافران فضایی برای چرخه حیات خود نیازمند استفاده از گیاهان و جانوران هستند. از طرف دیگر، براساس تحلیل‌های صورت گرفته در حوزه اثرات مخرب تشعشعات فضایی این استنباط می‌شود که تنش‌های فوق حتما باید مورد بررسی و پژوهش گسترده قرار گیرند. از نتایج تحقیقات مشخص شده که در دوره فعالیت زیاد خورشیدی، امکان وجود یک ساختار تشعشی جدید که به عنوان سومین کمربند ون آلن (بین کمربند داخلی و بیرونی) وجود دارد. دوز تشعشی جذب شده محاسبه و مشخص شد که موادی نظیر سرب، تانتالیوم و تنگستن موادی هستند که بدون در نظر گرفتن دوره‌های فعالیت خورشیدی، حداقل میزان تشعشع را در لایه‌های حفاظتی خود دریافت می‌کنند. همچنین، تنش‌های تشعشی موجب آسیب جدی در دی‌ان‌ای فضاوردان و محموله‌های زیستی می‌شوند. بنابراین، این مقاله به بررسی اثرات مخرب تشعشی کمربندهای ون آلن با رویکرد محموله‌های زیستی در سفرهای فضایی پرداخته است.

۵- مراجع

- [1] Shafieenejad, I. and Ghasemi, Sh., "Effects of Gravitational and Radiate Stresses on Plants Growth for Space Travels", *Journal of Technology in Aerospace Engineering*, Vol. 2, No. 4, pp 1-5, 2019 (In Persian).
- [2] Shafieenejad, I., Ghasemi, Sh., Mahmoodi, A., and Safarzadeh, R., "Futurology in Astrobotany and Future Space Travels", *Journal of Technology in Aerospace Engineering*, Accepted (In Persian).

- [13] Shafieenejad, I., Novinzadeh, A.B., and Molazadeh, V.R., "Comparing and Analyzing Min-time and Min-effort Criteria for Free True Anomaly of Low-thrust Orbital Maneuvers with New Optimal Control Algorithm", *Aerosp. Sci. Technol.*, Vol. 35, No. 1, pp. 116-134, 2014.
- [14] Stefi, A.L., Margaritis, L.H., and Christodoulakis, N.S., "The Effect of the Non Ionizing Radiation on Cultivated Plants of Arabidopsis Thaliana (Col.)", *Flora: Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, Vol. 223, pp. 114-120, 2016.
- [15] Gupta, S., "The Effects of Radiation on Plants", *Science*, Vol. 7, No. 2, pp. 22-32, 2002.
- [16] Ye, P.J., Sun, Z.Z., Zhang, H., and Li, F., "An Overview of the Mission and Technical Characteristics of Change'4 Lunar Probe", *Sci. China Technol. Sci.*, Vol. 60, No. 5, pp. 658-667, 2017.
- [17] Narici, L., Casolino, M., Di Fino, L., Larosa, M., Picozza, P., and Zacont, V., "Radiation Survey in the International Space Station", *J. Sp. Weather Sp. Clim.*, Vol. 5, pp 30-37, 2015.
- [18] Shankar, U.J., Kirk, M.N., and Rogers, G.D., "Van Allen Probes On-Orbit Verification of Spacecraft Dynamics", *The 24th International Symposium on Space Flight Dynamics*, Maryland, USA, 2014.
- [19] Williams, T., Palmer, E., Hollister, J., Godine, D., Ottenstein, N., and Burns, R., "Lunisolar Perturbations of High-eccentricity Orbits Such as the Magnetospheric Multiscale Mission", *The 29th AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting*, Ka'anapali, Maui, HI, USA, 2019.
- [20] Zhao, Li, X., Baker, D.N., Claudepierre, S.G., Fennell, J.F., Blake, J.B., Larsen, B.A., Skoug, R.M., Funsten, H.O., Friedel, R.H.W., Reeves, G.D., Spence, H.E., Mitchell, D.G., and Lanzerotti, L.J., "Ring Current Electron Dynamics During Geomagnetic Storms Based on the Van Allen Probes Measurements", *J. Geophys. Res.*, Vol. 121 No. 4, pp. 3333-3346, 2016.
- [21] Baker, M.B., "Geomagnetically Trapped Radiation", Vol. 3, No. 6, pp. 577-590, 1965.
- [22] Vallado, D.A., *Fundamentals of Astrodynamics and Applications*, Springer Science & Business Media, Berlin, Germany, 2013.
- [23] Summers, D., Mann, I.R., Baker, D.N., and Schulz, M. *Dynamics of the Earth's Radiation Belts and Inner Magnetosphere*. American Geophysical Union Monograph, 2012.
- [3] Srinivasan, D.K., Adams, N., and Wallis, R., "In-Flight Performance of the Van Allen Probes RF Telecommunications System", *The 65th International Astronautical Congress (IAC 2014)*, Toronto, Canada, 2014.
- [4] NASA, "The NASA Fundamental Space Biology Science Plan 2010-2020", NASA Headquarters, Washington, USA, 2010.
- [5] Shafieenejad, I., Ghasemi, Sh., and Ghadyani, N., "Expansion of Biospace and the Use of Medicinal Plants for the Health of Astronauts in Space Travel", *The 5th National Conference on Mechanical and Aerospace Engineering*, Tehran, Iran, 2020 (In Persian).
- [6] Shafieenejad, I., Ghasemi, Sh., and Safarzadeh, R., "Plant-space and Inanimate Stresses in Space Conditions", *The 5th National Conference on Mechanical and Aerospace Engineering*, Tehran, Iran, 2020 (In Persian).
- [7] Shafieenejad, I., Ghasemi, Sh., Mahmoodi, A., and Mirsiafi, A.H., "A Review of Recent Research on Space Missions with the Van Allen Belt and Biospace Approach-Part One", *The 4th National Conference on Mechanical and Aerospace Engineering*, Tehran, Iran, 2020 (In Persian).
- [7] Shafieenejad, I., Ghasemi, Sh., Mahmoodi, A., and Mirsiafi, A.H., "A Review of Recent Research on Space Missions with the Van Allen Belt and Biospace Approach-Part Two", *The 4th National Conference on Mechanical and Aerospace Engineering*, Tehran, Iran, 2020 (In Persian).
- [9] Da Silva, M.R. and Rocco, E.M., "Analysis of the Passage of a Spacecraft between the Van Allen Belts Considering a Low and High Solar Activity", *J. Phys.*, Vol. 911, No. 1, pp. 1-6, 2017.
- [10] Baker, D.N., Erickson, P.J., Fennell, J.F., Foster, J.C., Jaynes, A.N., and Verronen, P.T., "Space Weather Effects in the Earth's Radiation Belts", *Space Science Reviews*, Vol. 214, No. 1, pp.1-31, 2018.
- [11] George, H., Kilpua, E., Osmane, A., Asikainen, T., Kalliokoski, M.M.H., Rodger, C.J., Dubyagin, S., and Palmroth, M., "Outer Van Allen Belt Trapped and Precipitating Electron Flux Responses to Two Interplanetary Magnetic Clouds of Opposite Polarity", *Ann. Geophys.*, Vol. 38, 931-951, 2020.
- [12] Shafieenejad, I., Novinzadeh, A.B., and Molazadeh, V.R., "Introducing a Novel Algorithm for Minimum-time Low-thrust Orbital Transfers with Free Initial Condition", *Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 229, No. 2, pp. 333-351, Feb. 2015.