



محاسبه دز پرتوهای گامای زمینه کیهانی و خورشیدی در ایستگاه بین‌المللی فضایی (ISS)

آرزو ریاحی، محمدرضا رضایی*

گروه مهندسی هسته‌ای، دانشکده علوم و فناوری های نوین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

چکیده

کارکنان ایستگاه‌های فضایی ISS با وجود محفظه‌های ایستگاه فضایی باز هم در معرض تشعشعات ذرات کیهانی و گامای زمینه کیهانی و خورشیدی قرار می‌گیرند. هدف از این مطالعه محاسبه دز موثر کارکنان ایستگاه فضایی ISS برای محافظت بیشتر در برابر تابش‌ها و خطرات پیش روی آن‌ها است. بدین منظور از شبیه‌سازی با کد MCNPX منطبق بر روش‌های مونت کارلو استفاده می‌گردد. در این کدنویسی، هندسه ماژول Destiny ایستگاه فضایی تعریف گردیده و فانتوم انسان داخل آن قرار داده شده است و میزان دز ناشی از گامای زمینه کیهانی و فعالیت خورشیدی محاسبه شده است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد میزان دز موثر سالیانه کل بدن ناشی از تابش گامای زمینه کیهانی در بازه $1/52 - 6/06 \text{ mSv/y}$ قرار دارد، این دز علاوه بر دز ناشی از ذرات کیهانی می‌باشد. همچنین دز موثر سالیانه کل بدن ناشی از تابش گامای خورشیدی $9/9 \text{ nSv/y}$ محاسبه شده است. برای صحت‌سنجی کد میزان دوز دیواره معده در انرژی 10 MeV برابر $23/5 \text{ pGy cm}^2$ بدست آمده است که با مقدار درج شده در گزارش ICRP 116 برای این شرایط (23 pGy cm^2) همخوانی دارد.

کلمات کلیدی: ایستگاه بین‌المللی فضایی (ISS)، گامای زمینه کیهانی، شبیه‌سازی کد MCNPX، فانتوم، گامای خورشیدی

Monte Carlo Calculation of cosmic background and solar gamma rays dose in the International Space Station (ISS)

Arezoo riahi, Mohammad Reza Rezaie *

1- Department of Nuclear Engineering, Faculty of Sciences and Modern Technologies, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

Abstract

ISS space station personnel despite the space station chambers are still exposed to cosmic particles, cosmic background and solar gamma radiation. The purpose of this study is to calculate the effective dose of ISS space station personnel to further protect them from radiation and hazards. For this purpose, simulation with MCNPX code based on Monte Carlo methods is used. In this coding, the geometry of the space station Destiny module is fully defined, the human phantom is placed inside it and the dose of cosmic gamma background and solar gamma activity was calculated. The results show that the effective annual dose of the whole body due to gamma radiation of the cosmic background is in the range of $1.52-6.06 \text{ mSv/y}$, this dose is in addition to the dose of other cosmic particles. Also, the effective annual dose by the whole body due to solar gamma radiation is 9.9 nSv/y . For code validation the dose of stomach wall in ISS at 10 MeV energy was calculated (23.5 pGy.cm^2) which is consistent with the ICRP 116 report for this condition (23 pGy.cm^2)

Keywords: International Space Station (ISS), Cosmic Gamma Background, MCNPX Code Simulation, Phantom, Solar Gamma Ray

Email: mr.rezaie@kgut.ac.ir

۱. مقدمه

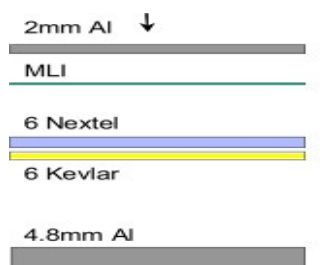
ایستگاه فضایی بین‌المللی (ISS)، یک مرکز تحقیقاتی مداری و در حال حاضر تنها ایستگاه دائماً ساکن در فضا است. بنابراین مهم است که از ویژگی‌های محافظ تابش ISS برای درک خطراتی که فضاوردان در معرض آن قرار دارند، از قبیل مسمومیت حاد با اشعه یا سرطان استفاده شود. شبیه‌سازی دقیق محیط تابش در ISS و میزان دز مربوطه، نیاز به درک کاملی از سازوکار تابش اشعه به فضاوردان دارد که شامل آگاهی از منشا تابش اشعه، انرژی آن، چگونگی تبدیل تابش در بدنه ISS و آسیب رادیوبیولوژیکی وارده به فضاوردان (در اثر ذرات اولیه و ثانویه ای که وارد کابین می‌شود). می‌باشد [۱]. این تحقیق به شبیه‌سازی میدان تابش گاما درون ماژول Destiny از ISS و میزان دز موثر دریافت شده توسط فضاوردان از طریق روش ترابرد ذرات مونت کارلو که در جعبه ابزار MCNPX پیاده‌سازی شده، پرداخته است؛ این ماژول واحد تحقیقاتی اصلی آمریکا در ایستگاه است. پرتوهای کیهانی جمعیتی از ذرات بنیادی پر انرژی است که از چند مگا الکترون ولت تا ده‌ها ژول در هر ذره گسترش می‌یابد. فعل و انفعالات اتمسفر پرتوهای اولیه کیهانی شار ذرات ثانویه را تولید می‌کند که می‌توانند در جو، در سطح زمین و زیر زمین شناسایی شوند. پرتوهای کیهانی "اولیه" آن ذراتی هستند که در منابع اختزینی تسریع می‌شوند و "ثانویه" آن ذراتی هستند که در تعامل مقدماتی با گاز بین ستاره‌ای تولید می‌شوند. بنابراین الکترون‌ها، پروتون‌ها، هلیوم، کربن، اکسیژن، آهن و سایر هسته‌های ساخته شده در ستاره‌ها اولیه هستند. هسته‌هایی مانند لیتیوم، بریلیم، بور، ضد پروتون‌ها و پوزیترون‌ها ثانویه هستند. تابش کیهانی جدا از ذرات مرتبط با شراره‌های خورشیدی، از خارج منظومه شمسی نیز ناشی می‌شود [۲]. به احتمال زیاد تابش گاما به وسیله الکترون‌های سریع که منشا ثانویه دارند (الکترون ثانویه) یعنی الکترون‌هایی که در نتیجه برخورد بین هسته‌های موجود در پرتوی کیهانی و گاز میان ستاره‌ای پدید می‌آیند، ایجاد می‌گردد. محیط تابش درون ISS وابسته به موقعیت آن است، به عنوان مثال، در بخشی از ISS با محافظت متوسط، تغییرات محافظ ژئومغناطیسی باعث می‌شود که میزان دز GCR (پرتو کیهانی کهکشانی) از عرض‌های جغرافیایی پایین $0.05 \mu\text{Gy}/\text{minute}$ به عرض‌های جغرافیایی بالا $0.25 \mu\text{Gy}/\text{minute}$ تغییر کند [۳]. دز متوسط (D) یا میزان دز که توسط دزیتر ثبت شده است در برنامه‌های ناسا از سال ۲۰۰۴، 26 mGy و دزهای موثر E دریافت شده توسط خدمه 68 mSv تخمین زده شده و میزان دز از همه فضاوردان در ISS حدود 100 mGy است [۴]. علاوه بر پرتوهای کیهانی، تابش‌های گامای زمینه‌ای کیهانی وجود دارد که تا انرژی 20 MeV توسط استگارد و همکاران در سال ۲۰۱۹ اعلام شده است [۵]. همچنین گامای ناشی از فعالیت خورشیدی تا انرژی 316 GeV توسط چینگ ون تانگ و همکاران در سال ۲۰۱۸ بیان شده است [۶]. هدف از این تحقیق محاسبه‌ی دز موثر ناشی از تابش گامای 316 GeV خورشیدی و 20 MeV در زمینه کیهانی است. هردو این تابش‌ها ایستگاه فضایی و کارکنان آن را تحت تاثیر قرار می‌دهند. جهت این کار اجزای مختلف ماژول ایستگاه فضایی ISS مورد بررسی قرار گرفت. بدنه این محفظه از لایه‌های مختلف با چگالی و مشخصات متفاوتی ساخته شده است. بدنه ماژول از عناصر آلومینیوم، عایق چند لایه (MLI)، نکستل (Nextel) و کولار (Kevlar) ساخته شده است. در ماژول ایستگاه فضایی یک فانتوم انسان (مرد) قرار داده شده است. با استفاده از کد MCNPX میزان دز ناشی از پرتوها قابل محاسبه است.

۲. کد محاسباتی مونت کارلو

کد MCNPX یک کد مونت کارلو است که اغلب به عنوان کد ترابرد استفاده می‌شود. برای استفاده از این نرم‌افزار یک "فایل ورودی" آماده و تمام اطلاعات لازم برای اجرای برنامه فراهم می‌شود. این اطلاعات عبارتند از: (الف) تعریف منبع: نوع تابش یونیزه کننده، طیف انرژی و هندسه منبع؛ (ب) تعریف هدف: ساختار ماده، هندسه، محل آن نسبت به منبع و غیره؛ (ج) توصیف محیط جاذب بین منبع و هدف؛ (د) شمارش خروجی [۷]. در ادامه سعی می‌شود روش محاسبه‌ی دز دریافتی موثر کارکنان ایستگاه فضایی در اثر اشعه گاما توضیح داده شود.

۳. روش محاسبه‌ی دز

برای محاسبه‌ی دز سالانه کارکنان ISS در اثر تابش گامای زمینه کیهانی و گامای ناشی از فعالیت خورشیدی مشخصات کامل ماژول Destiny ایستگاه فضایی در یک فایل ورودی کد MCNPX تعریف می‌شود. اجزای فایل ورودی به صورت: کارت سلول، کارت هندسه و کارت داده تعریف و در ادامه توضیح داده می‌شود. سپس فانتوم انسان در داخل آن قرار داده و در کارت داده چشمه فایل ورودی، طیف گامای زمینه کیهانی و طیف گامای ناشی از فعالیت خورشیدی وارد می‌شود [۵، ۶] و در نهایت با استفاده از تالی $f6^*$ میزان دز ناشی از یک ذره‌ی چشمه محاسبه می‌شود و با تاثیر دادن مساحت چشمه و شدت پرتوهای گامای زمینه کیهانی و خورشیدی میزان دز سالانه در اندام‌های مختلف فانتوم واقع در ایستگاه فضایی محاسبه می‌شود. در قسمت کارت سلول، عناصر سازنده بدنه به همراه چگالی بیان می‌شوند.

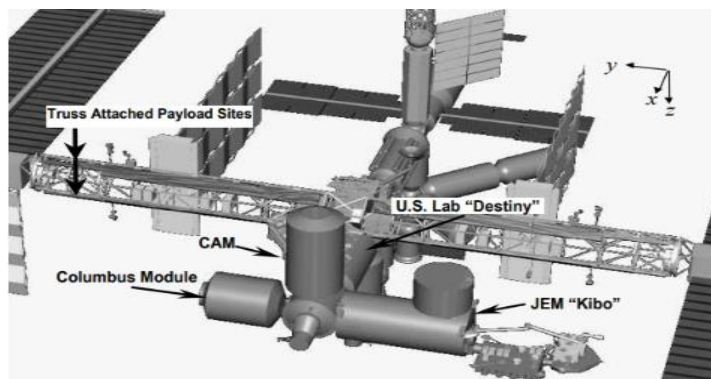


شکل ۱: ترتیب قرار گرفتن فلزات در بدنه ایستگاه فضایی

Multi-Layer Insulation (MLI): شامل یک لایه فایبرگلاس و یک لایه آلومینیوم و یک لایه فایبرگلاس دیگر است، لازم به ذکر است بجای فایبرگلاس میتوان از مایلر استفاده کرد که چگالی آن $1/56 \text{ g/cm}^3$ است. جنس فلزات سازنده بدنه ایستگاه فضایی و ابعاد و چگالی آن‌ها در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱: جنس فلزات سازنده بدنه ایستگاه فضایی [۹، ۸]

ضخامت (Cm)	چگالی (g/cm^3)	فلزات
۰/۲	۲/۷	آلومینیوم
۰/۰۲۳	۱/۳	فایبرگلاس
۰/۰۲	۲/۷	آلومینیوم
۰/۰۲۳	۱/۳	فایبرگلاس
۷/۵	۰/۰۰۷۱	فوم سلول یاز (پلی آمید AC۵۵۰)
۰/۰۶	۲/۷	نکستل (۶ لایه)
۰/۱۳۸	۱/۴۴	کولار (۶ لایه)
۷/۵	۰/۰۰۷۱	فوم سلول یاز (پلی آمید AC۵۵۰)
۰/۴۸	۲/۷	آلومینیوم



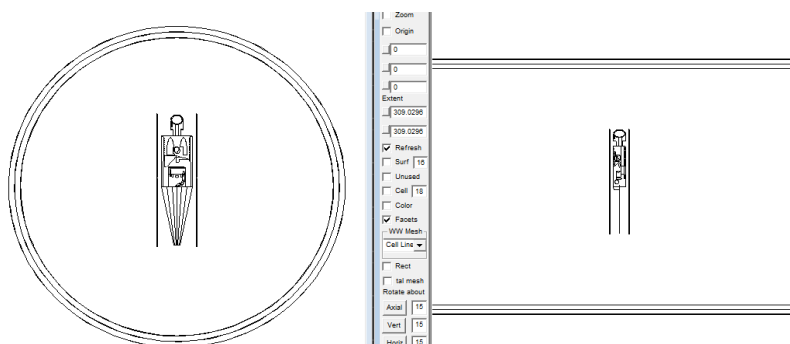
شکل ۲: ساختار کلی ایستگاه فضایی

سلول ماژول ایستگاه فضایی ISS از یک استوانه تشکیل شده است که در قسمت کارت سطوح تعریف می‌شود، مشخصات آن در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲: مشخصات سلول فضایی ISS [۱۰]

U.S. Lab, Destiny	U.S. CAM	Columbus Module	JEM-PM	
۸/۸ [۲۸/۸]	۸/۳ [۲۷/۱]	۶/۵ [۲۱/۵]	۱۱/۲ [۳۶/۸]	طول، نمای بیرونی، متر [فوت]
۷/۷ [۲۵/۲]	۷/۷ [۲۵/۳]	۵/۰ [۱۶/۴]	۸/۹ [۲۹/۱]	طول، منتهای مخروط‌های انتها، متر [فوت]
۴/۴ [۱۴/۶]	۴/۴ [۱۴/۶]	۴/۵ [۱۴/۸]	۵/۰ [۱۶/۲]	قطر، نمای خارجی، متر [فوت]

فانتوم بدن انسان یک نمایش ریاضی از بدن انسان شامل تمام اطلاعات مرتبط دیگر است. تمام اندامها با سایز واقعی توسط اشکال هندسی نمایش داده می‌شوند که با معادلات ریاضی مناسب توصیف می‌شوند. یک ساختار شیمیایی متناظر برای انواع مختلف بافت‌های بدن نیز تعریف می‌شود [۷]. فانتوم تعریف شده در شکل ۳ مربوط به یک مرد بالغ می‌باشد.



شکل ۳: فانتوم مدل شده برای یک مرد بالغ

تعریف چشمه در قسمت کارت داده: چشمه را به گونه ای تعریف می‌نماییم که ماژول Destiny با ابعاد ذکر شده در جدول ۲ را به طور کامل مورد تابش قرار دهد، بنابراین برای پرتوهای گامای زمینه کیهانی یک پوسته کروی با شعاع ۸۰۰ سانتی متر و ضخامت یک سانتی متر در نظر گرفته شده است، که دور این ماژول را احاطه کرده است. توزیع چشمه در داخل این پوسته کروی برای پرتوهای کیهانی

یکنواخت و همسانگرد است و از سرتاسر فضا به ماژول می‌رسد. برای پرتوهای گامای خورشیدی یک صفحه به مساحت 800×500 سانتی متر مربع بصورت پرتوهای موازی تعریف می‌شود که سطح چشمه روبروی ایستگاه باشد و کاملاً جلوی آن را ببوشاند. توزیع چشمه: چشمه برای تابش گامای زمینه کیهانی در محدوده انرژی از کمترین انرژی در حدود ۲۰ کیلو ولت تا حداقل ۲۰ مگا الکترون ولت است. این امر با دو لایه آشکارساز هم سطح، یک آشکارساز با انرژی زیاد (HED) پشت یک آشکارساز کم انرژی (LED) حاصل می‌شود. بازه انرژی LED از keV (۲۰ تا ۴۰۰) و بازه انرژی HED از keV ۲۰۰ تا MeV ۲۰ می‌باشد. شدت تابش گامای زمینه LED، $5-16$ شمارش بر ثانیه و شدت تابش گامای زمینه HED $3-12$ شمارش بر ثانیه است [۵]. در این تحقیق فقط برای HED، محاسبات انجام شده است. بازه‌ی انرژی گاما برای گامای ناشی از فعالیت خورشیدی از GeV ۱ تا GeV ۳۱۶ می‌باشد. شدت تابش گامای خورشیدی $10^{-9} \times 39/7$ شمارش بر ثانیه است [۶]. چشمه انرژی را طبق اطلاعات فوق تعریف کرده کد را اجرا می‌نماییم. برای استخراج دز موثر از تالی $f6^*$ استفاده می‌شود. این تالی یک تالی دزیمتری است که واحد آن $Jerks/g$ است. برای تبدیل واحد به Gy/Kg نتایج را در 10^{12} ضرب می‌کنیم. در نتیجه آن دز برحسب Gy به ازای یک ذره از چشمه بدست می‌آید. برای پرتو گاما مقدار عددی دز موثر برحسب Sv همان مقدار دز برحسب Gy است. برای محاسبه‌ی دز ناشی از تعداد پرتوهای گامای شمارش شده، شدت پرتو را در دز یک ذره و مساحت چشمه تعریف شده ضرب می‌کنیم. اکنون می‌توانیم این مقدار را برحسب واحدهای زمانی مختلف (ساعت، روز، ماه و سال) بدست آوریم. نتایج شامل دو قسمت می‌شود: دز ناشی از تابش (۱) گامای زمینه کیهانی (۲) گامای خورشیدی که در جداول ۳ و ۴ نشان داده شده است. لازم به ذکر است نتایج شبیه سازی ناشی از قرار دادن یک فانتوم انسان در ایستگاه فضایی است. دز جذب شده اعضای مختلف بدن وابسته به یک ضریب W_T است که مقادیر مختلفی دارد. مجموع حاصل ضرب دز جذب شده هر عضو در W_T میزان دز دریافتی کل بدن را می‌دهد [۱۱].

جدول ۳: دز اعضای مختلف بدن ناشی از گامای زمینه کیهانی در شبیه سازی ماژول Destiny ایستگاه فضایی ISS

اعضای بدن		میزان دوز به ازای شمارش ۲ ذره کما در تلیه و مساحت کره یا شعاع ۸۰۰ cm				میزان دوز به ازای شمارش ۱۲ ذره کما در تلیه و مساحت کره یا شعاع ۸۰۰ cm				میزان دوز		خطا		
		W_T دوز* (Sv/year)	(Sv/year)	(Sv/day)	(Sv/h)	W_T دوز* (Sv/year)	(Sv/year)	(Sv/day)	(Sv/h)	(Sv/s)		(Sv/SP)		
بیضه‌ها		$5/99E-04$	$7/49E-03$	$2/05E-05$	$8/55E-07$	$2/38E-10$	$1/50E-04$	$1/87E-03$	$5/13E-06$	$2/14E-07$	$5/94E-11$	$0/0304$	$2/46E-18$	
روده بزرگ		$8/35E-04$	$6/96E-03$	$1/91E-05$	$7/94E-07$	$2/21E-10$	$2/09E-04$	$1/74E-03$	$4/76E-06$	$1/98E-07$	$5/51E-11$	$0/0095$	$2/29E-18$	
ریه‌ها		$9/19E-04$	$7/66E-03$	$2/10E-05$	$8/74E-07$	$2/43E-10$	$2/30E-04$	$1/91E-03$	$5/24E-06$	$2/19E-07$	$6/07E-11$	$0/0062$	$2/52E-18$	
دیوار معده		$8/40E-04$	$7/00E-03$	$1/92E-05$	$7/99E-07$	$2/22E-10$	$2/10E-04$	$1/75E-03$	$4/79E-06$	$2/00E-07$	$5/55E-11$	$0/0144$	$2/30E-18$	
مثانه		$2/73E-04$	$6/82E-03$	$1/87E-05$	$7/78E-07$	$2/16E-10$	$6/82E-05$	$1/70E-03$	$4/67E-06$	$1/95E-07$	$5/41E-11$	$0/0188$	$2/24E-18$	
کبد		$2/87E-04$	$7/16E-03$	$1/96E-05$	$8/18E-07$	$2/27E-10$	$7/16E-05$	$1/79E-03$	$4/91E-06$	$2/04E-07$	$5/68E-11$	$0/0083$	$2/35E-18$	
مری		$2/86E-04$	$7/14E-03$	$1/96E-05$	$8/15E-07$	$2/26E-10$	$7/14E-05$	$1/78E-03$	$4/89E-06$	$2/04E-07$	$5/66E-11$	$0/0196$	$2/35E-18$	
تیرئوئید		$2/92E-04$	$7/31E-03$	$2/00E-05$	$8/34E-07$	$2/32E-10$	$7/31E-05$	$1/82E-03$	$5/00E-06$	$2/09E-07$	$5/79E-11$	$0/0334$	$2/40E-18$	
پوست		$7/90E-05$	$7/90E-03$	$2/16E-05$	$9/01E-07$	$2/50E-10$	$1/97E-05$	$1/97E-03$	$5/41E-06$	$2/25E-07$	$6/26E-11$	$0/0024$	$2/59E-18$	
غده فوق کلیه		$6/72E-05$	$7/31E-03$	$2/00E-05$	$8/34E-07$	$2/32E-10$	$1/68E-05$	$1/82E-03$	$5/00E-06$	$2/08E-07$	$5/79E-11$	$0/0349$	$2/40E-18$	
مغز		$7/76E-05$	$7/76E-03$	$2/12E-05$	$8/86E-07$	$2/46E-10$	$1/94E-05$	$1/94E-03$	$5/32E-06$	$2/22E-07$	$6/15E-11$	$0/0093$	$2/55E-18$	
روده کوچک		$6/37E-05$	$6/92E-03$	$1/90E-05$	$7/90E-07$	$2/19E-10$	$1/59E-05$	$1/73E-03$	$4/74E-06$	$1/97E-07$	$5/49E-11$	$0/0097$	$2/27E-18$	
کلیه		$6/47E-05$	$7/02E-03$	$1/92E-05$	$8/02E-07$	$2/23E-10$	$1/62E-05$	$1/76E-03$	$4/81E-06$	$2/01E-07$	$5/57E-11$	$0/0138$	$2/31E-18$	
ماهیچه		$4/75E-05$	$5/17E-03$	$1/42E-05$	$5/90E-07$	$1/64E-10$	$1/19E-05$	$1/29E-03$	$3/54E-06$	$1/47E-07$	$4/10E-11$	$0/0027$	$1/70E-18$	
پانکراس		$6/26E-05$	$6/81E-03$	$1/87E-05$	$7/77E-07$	$2/16E-10$	$1/57E-05$	$1/70E-03$	$4/66E-06$	$1/94E-07$	$5/40E-11$	$0/0211$	$2/24E-18$	
طحال		$6/55E-05$	$7/12E-03$	$1/95E-05$	$8/12E-07$	$2/26E-10$	$1/64E-05$	$1/78E-03$	$4/88E-06$	$2/03E-07$	$5/64E-11$	$0/0183$	$2/34E-18$	
استخوان		$1/21E-03$	$1/21E-01$	$3/31E-04$	$1/38E-05$	$3/82E-09$	$3/02E-04$	$3/02E-02$	$8/27E-05$	$3/44E-06$	$9/57E-10$	$0/0114$	$3/97E-17$	

جدول ۴: دز اعضای مختلف بدن ناشی از گامای فعالیت خورشیدی در شبیه سازی ماژول Destiny ایستگاه فضایی ISS

دوز معادل	میزان دوز به ازای شدت $10^{-9} * 3977$ ذره بر تقیه و مساحت چشمه $500 * 800 \text{ cm}^2$				میزان دوز به ازای یک ذره از منبع		اعضای بدن
	(Sv/year)	(Sv/day)	(Sv/h)	(Sv/s)	خطا	(Sv/SP)	
دوز * W_t (Sv/year)							
۹/۱۶E-۱۰	۱/۱۴E-۰۸	۳/۱۴E-۱۱	۱/۳۱E-۱۲	۳/۶۳E-۱۶	-/۰.۵۸۱	۲/۲۹E-۱۴	بیضه‌ها
۱/۲۹E-۰۹	۱/۰۸E-۰۸	۲/۹۵E-۱۱	۱/۳۳E-۱۲	۳/۴۲E-۱۶	-/۰.۲۸۴	۲/۱۵E-۱۴	روده بزرگ
۱/۴۴E-۰۹	۱/۲۰E-۰۸	۳/۲۹E-۱۱	۱/۳۷E-۱۲	۳/۸۱E-۱۶	-/۰.۱۱۱	۲/۴۰E-۱۴	ریه‌ها
۱/۵۳E-۰۹	۱/۲۷E-۰۸	۳/۴۸E-۱۱	۱/۴۵E-۱۲	۴/۰۳E-۱۶	-/۰.۲۰۵	۲/۵۴E-۱۴	دیوار معده
۴/۶۱E-۱۰	۱/۱۵E-۰۸	۳/۱۶E-۱۱	۱/۳۱E-۱۲	۳/۶۵E-۱۶	-/۰.۳۶۴	۲/۳۰E-۱۴	متانه
۳/۵۹E-۱۰	۸/۹۷E-۰۹	۲/۴۶E-۱۱	۱/۰۲E-۱۲	۲/۸۵E-۱۶	-/۰.۱۵۲	۱/۷۹E-۱۴	کید
۴/۵۰E-۱۰	۱/۱۳E-۰۸	۳/۰۸E-۱۱	۱/۲۸E-۱۲	۳/۵۷E-۱۶	-/۰.۳۵۳	۲/۲۵E-۱۴	مری
۶/۰۲E-۱۰	۱/۵۱E-۰۸	۴/۱۲E-۱۱	۱/۷۲E-۱۲	۴/۷۷E-۱۶	-/۰.۵۲۵	۳/۰۱E-۱۴	تیرئوئید
۱/۲۸E-۱۰	۱/۲۸E-۰۸	۳/۵۱E-۱۱	۱/۴۶E-۱۲	۴/۰۷E-۱۶	-/۰.۰۵۱	۲/۵۶E-۱۴	پوست
۹/۴۳E-۱۱	۱/۰۲E-۰۸	۲/۸۱E-۱۱	۱/۱۷E-۱۲	۳/۲۵E-۱۶	-/۰.۰۵۶	۲/۰۵E-۱۴	غده فوق کلیه
۱/۳۲E-۱۰	۱/۳۲E-۰۸	۳/۶۱E-۱۱	۱/۵۰E-۱۲	۴/۱۸E-۱۶	-/۰.۱۴۲	۲/۶۳E-۱۴	معز
۹/۴۸E-۱۱	۱/۰۳E-۰۸	۲/۸۲E-۱۱	۱/۱۸E-۱۲	۳/۲۷E-۱۶	-/۰.۲۴۸	۲/۰۶E-۱۴	روده کوچک
۱/۰۱E-۱۰	۱/۰۹E-۰۸	۳/۰۰E-۱۱	۱/۲۵E-۱۲	۳/۴۷E-۱۶	-/۰.۳۴۹	۲/۱۹E-۱۴	کلیه
۷/۳۹E-۱۱	۸/۰۳E-۰۹	۲/۲۰E-۱۱	۹/۱۷E-۱۳	۲/۵۵E-۱۶	-/۰.۰۴۹	۱/۶۰E-۱۴	ماهیچه
۱/۰۷E-۱۰	۱/۱۷E-۰۸	۳/۲۰E-۱۱	۱/۳۳E-۱۲	۳/۷۰E-۱۶	-/۰.۶۲۵	۲/۳۳E-۱۴	پانکراس
۱/۲۸E-۱۰	۱/۳۹E-۰۸	۳/۸۰E-۱۱	۱/۵۸E-۱۲	۴/۴۰E-۱۶	-/۰.۲۹۵	۲/۷۷E-۱۴	طحال
۲/۰۰E-۰۹	۲/۰۰E-۰۷	۵/۴۷E-۱۰	۲/۲۸E-۱۱	۶/۳۳E-۱۵	-/۰.۰۱۵	۳/۹۹E-۱۳	استخوان

جدول ۳ نتایج دز ناشی از قرار دادن فانتوم در داخل ایستگاه فضایی ISS و تحت تابش پرتو گاما را نشان می‌دهد. با مقایسه نتایج جدول ۳ و نتایج دز روزانه ناشی از قرار دادن فانتوم انسان خارج از ایستگاه فضایی ISS تحت تابش تمام پرتوهای کیهانی کهکشانی [۱۲] مشاهده می‌شود که مقدار دز بدست آمده برای فانتوم داخل ایستگاه کمتر از دز بدست آمده فانتوم خارج از ایستگاه است، در نتیجه دز بدست آمده منطقی بنظر می‌آید.

۴. نتیجه گیری

جهت اجرای شبیه سازی ابتدا بایستی کد نوشته شده صحت‌سنجی شود. برای این کار یک چشمه سطحی فوتون با انرژی 10 MeV مقابل فانتوم در داخل ماژول Destiny ایستگاه ISS قرار داده و میزان دوز در دیواره معده برابر $23/5 \text{ pGy cm}^2$ بدست می‌آید که با مقدار 23 pGy cm^2 درج شده در گزارش ICRP 116 برای این شرایط همخوانی دارد [۱۳]. به علت تایید صحت‌سنجی در ادامه به ذکر نتایج بدست آمده پرداخته می‌شود. فانتوم انسان را در ماژول Destiny ایستگاه فضایی ISS قرار داده‌ایم. دز موثر سالیانه کل بدن ناشی از تابش گامای زمینه کیهانی (جدول ۳) با تاثیر دادن ضرایب W_t ، در بازه $1/52$ تا $6/06$ است. با وجود ذرات کیهانی دیگر این مقدار افزایش می‌یابد. همچنین دز موثر سالیانه کل بدن ناشی از تابش گامای خورشیدی (جدول ۴) با تاثیر دادن ضرایب W_t ، $9/9 \text{ nSv/y}$ است. دز روزانه ناشی از کل پرتوهای کیهانی کارکنان ISS مقدار $0/40 \text{ msv}$ بوده است که به مقدار دز گامای زمینه کیهانی افزوده می‌شود [۴]. با توجه به حد دز موثر در مأموریت های ۱ ساله [۴] و حد دز مجاز برای کارکنان ایستگاه فضایی [۱۴] دز سالیانه محاسبه شده کمتر از حد مجاز سالیانه است.



مراجع:

- [1] T. Ersmark *et al* / “Geant4 Monte Carlo Simulations of the Galactic Cosmic Ray Radiation Environment On-Board the International Space Station/Columbus,”/ *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 54 no. 5 / page 1854–1862/ 2007
- [2] Revised and J.J. Beatty and J. Matthews and S.P.Wakely / “Cosmic Rays“ / *IEEE Trans. Nucl. Sci* / page 1-21 / 2019
- [3] C. Zeitlin and L. Pinsky, / “Current Active Detectors for Dosimetry and Spectrometry on the International Space Station,” / *IEEE Nuclear Science Symposium & Medical Imaging Conference. IEEE* / page 380-398 / 2020
- [4] Francis A. Cucinotta / ” Space Radiation Organ Doses for Astronauts on Past and Future Missions” / *Space Physiology and Medicine.* / page 122-134 / 2019
- [5] Jan E. Balling and Shiming Yang / ”The Modular X- and Gamma-Ray Sensor (MXGS) of the ASIM Payload on the International Space Station“/ *Space Science* / page 87-98 / 2020
- [6] Q. Tang, K. Ng, T. Linden, B. Zhou, J. Beacom, and A. Peter / “An Unexpected Dip in the Solar Gamma-Ray Spectrum,”/ *physical review* / page 1-23 / 2018
- [7] Dragoslav Nikezic and D. Krstić / “Input files with ORNL - Mathematical phantoms of the human body for MCNP-4B /,” *ResearchGate.*/ page 37-49 / 2006
- [8] Davis, Bruce A and Christiansen, Eric L. and Lear, Dana M. and Prior, Tom / “NASA Technical “Reports Server (NTRS).” / book / 2020
- [9] NASA/“Cicada.pdf.” 2018
- [10] NASA / “ISS.User.Guide.” 2019
- [11] “Individual Calculation of Effective Dose and Risk of Malignancy Based on Monte Carlo Simulations after Whole Body Computed Tomography / *Scientific Reports.*” 2020.
- [12] G. Reitz *et al.*, “Astronaut’s Organ Doses Inferred from Measurements in a Human Phantom Outside the International Space Station,” *Radiat. Res.*, vol. 171, . page 225–235,
- [13] N. Petoussi-Henss, W.E. Bolch / “ICRP Publication 116 the first ICRP/ICRU application of the male and female adult reference computational phantoms,”/ vol. 59 / 2014
- [14] N. A. and S. A. NASA, *Design considerations for a Space Station radiation shield for protection from both man-made and natural sources.* .