

شبیه‌سازی سیستم تصویربرداری نوترونی راکتور تحقیقاتی تهران با استفاده از کد MCNPX و تکنیک کاهش واریانس کره‌های DXTRAN

مجید زمانی و محسن شایسته*

گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران.

*تهران، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک، صندوق پستی: ۳۴۷-۱۶۵۷۵.

پست الکترونیکی: mshayesteh@ihu.ac.ir

چکیده

انجام محاسبات شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای سامانه تصویربرداری نوترونی راکتور تهران به‌عنوان یک سامانه پیچیده، معمولاً بسیار زمان‌بر است. با استفاده از روش‌های کاهش واریانس می‌توان این زمان را برای به‌دست آوردن نتایج با دقت کافی، کاهش داد. هر یک از تکنیک‌های کاهش واریانس، مزایا، مشکلات و ویژگی‌های خاص خود را دارد؛ بنابراین کاربر، مسئول انتخاب صحیح روش کاهش واریانس مناسب است. در این تحقیق، اثر استفاده از تکنیک کاهش واریانس کره‌های DXTRAN در محاسبه آهنگ دُز نوترون و گاما در یک نقطه واقع در سامانه تصویربرداری نوترونی راکتور تحقیقاتی تهران، انتخاب و نتایج آن تحلیل شده است. بدین منظور با استفاده از نتایج شبیه‌سازی با کد MCNPX و محاسبه شار و دُز نوترونی در محل درجه لوله پرتو E راکتور تحقیقاتی تهران و شبیه‌سازی اتاقک تصویربرداری، آهنگ دُز نوترون و پرتوهای گاما با استفاده از تالی F4 به دو روش آنالوگ و غیرآنالوگ محاسبه و برای هر حالت ضرایب شایستگی (FOM) برای تعداد تاریخچه‌های مختلف مقایسه شد. نتایج بیان‌گر آن است که استفاده از این تکنیک، کمک شایانی به کاهش زمان محاسبات تا رسیدن به واریانس قابل‌قبول می‌نماید. این روش منجر به افزایش قابل‌توجه کمیت ضریب شایستگی در هر دو مورد نوترون و گاما گردید؛ ولی میزان این افزایش در محاسبات مربوط به نوترون و گاما یکسان نیست.

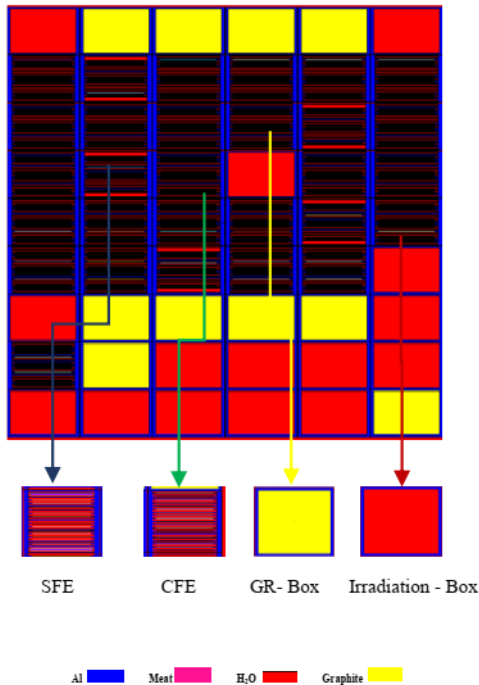
کلیدواژه‌گان: راکتور تحقیقاتی تهران، تصویربرداری نوترونی، MCNPX، خطای نسبی، تکنیک DXTRAN، کاهش واریانس.

۱. مقدمه

زمینه‌های مختلف پژوهشی، علوم و فناوری نیز استفاده می‌شود. طی چند سال گذشته، تلاش‌های زیادی برای در دسترس قرارگیری بیم نوترونی برای اهداف تصویربرداری نوترونی صورت گرفته است. در سال ۱۳۹۵ برای حصول یک باریکه نوترون حرارتی برای اهداف پرتونگاری نوترونی، یک کولیماتور نوترونی طراحی، ساخته و نصب شده و با موفقیت مورد آزمون قرار گرفته است [۱-۳]. پس از نصب کولیماتور،

راکتور تحقیقاتی تهران یک راکتور استخری ۵ مگاواتی با سوخت صفحه‌ای با غنای پایین (حدود ۲۰ درصد ^{235}U) و با خنک‌کننده و کندکننده آب سبک است. این راکتور علاوه بر استفاده در تولید رادیو ایزوتوپ‌ها، فعال‌سازی نمونه‌ها و مقاصد آموزشی با داشتن تجهیزاتی مانند کانال‌های پرتودهی، بیم تیوب‌ها، ستون حرارتی و غیره، با فراهم آوری امکان استفاده از پرتوهای نوترون و گامای تولیدشده در قلب، در

آب سبک و ۱۷۷ cm بتن است، قرار دارد. راکتور دارای شش لوله پرتو شعاعی ۶ اینچی است که با زوایای مختلفی دیدمستقیم به قلب دارند. یک لوله پرتو سرتاسری ۱۲ اینچی نیز وجود دارد که در بالای قلب و بدون دیدمستقیم به قلب است (شکل ۳).



شکل ۱: شبیه‌سازی پیکربندی قلب شماره ۷ راکتور.

Thermal column						
۹	IR-BOX	GR-BOX	GR-BOX	GR-BOX	IGR-BOX	DPT
۸	SFE	CFE/RR	SFE	SFE	SFE	SFE
۷	SFE	SFE	SFE	SFE	CFE/SR ^۲	SFE
۶	SFE	CFE/SR ^۱	SFE	IR-BOX	SFE	SFE
۵	SFE	SFE	SFE	SFE	CFE/SR ^۳	SFE
۴	SFE	SFE	CFE/SR ^۴	SFE	SFE	IR-BOX
۳	IR-BOX Plus	GR-BOX	GR-BOX	GR-BOX	IGR-BOX	end fit
۲	۲ plates	GR-BOX	IR-BOX Plus	Plug	IR-BOX Plus	Plug
۱	Plug	Plug	Plug	Plug	IR-BOX	GR-BOX
	A	B	C	D	E	F

شکل ۲: نمایش شعاعی از قلب راکتور (در جهت X-Y) و نمایش انواع مختلف SFE، SFE، جعبه‌های گرافیتی و جعبه‌های پرتو دهی [۵].

در سال ۱۳۹۹ یک اتاقک مجهز به تجهیزات و ملزومات مورد نیاز برای سامانه پرتونگاری دیجیتال نیز ساخته شد [۴]. در سال ۱۴۰۱ و به دلایل فنی، تغییراتی در طراحی سقف اتاقک ایجاد و ارتفاع قسمتی از سقف اتاقک که در بالای لوله پرتو E قرار گرفته بود به اندازه ۱۴۵ سانتی‌متر افزایش یافت.

شبیه‌سازی کل سیستم شامل قلب و متعلقات آن به همراه اتاق تصویربرداری راکتور به‌عنوان یک سامانه پیچیده، معمولاً بسیار زمان‌بر است و استفاده از شبیه‌سازی دومرحله‌ای و تکنیک‌های کاهش واریانس از جمله تکنیک DXTRAN که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است، می‌تواند این زمان را برای به‌دست آوردن نتایج با دقت کافی، کاهش دهد.

۱.۱ شبیه‌سازی قلب راکتور و اتاقک تصویربرداری

در تحقیق قبلی ما [۵]، شبیه‌سازی قلب راکتور تحقیقاتی تهران (۵ مگاوات) و محاسبه طیف و شار نوترون و گاما در محل دریچه لوله پرتو E، بر اساس آخرین تغییرات پیکربندی قلب راکتور (آرایش شماره ۷ قلب متوسط)، انجام شده است (مرحله اول). در شکل‌های ۱ تا ۳، پیکربندی این قلب به‌صورت ۲ و ۳ بعدی نشان داده شده است. صفحه نگه‌دارنده یک شبکه ۶×۹ آلومینیومی به ابعاد ۷۵ cm×۴۶ cm است که شامل ۵۴ محل برای قرارگیری میله‌های سوخت است. محل‌های خالی نیز برای پرتو دهی نمونه در قلب ایجاد شده است. قلب شامل ۲۸ مجتمع سوخت استاندارد SFE^۱ است که هر یک دارای ۱۹ صفحه سوخت با غنای ۲۰٪ و ۵ عدد مجتمع سوخت کنترلی CFE^۲ که هر یک شامل ۱۴ عدد صفحه سوخت با همان غنا است که میله‌های کنترل در این مجتمع‌ها وارد می‌شوند [۶].

نمای دو و سه بعدی از قلب، کولیماتور، لوله پرتو و دیگر اجزاء راکتور به‌ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ آورده شده است. قلب راکتور درون حفاظ بیولوژیکی راکتور که شامل ۱۰۰ cm

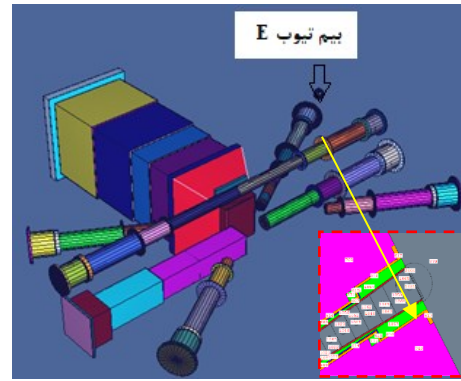
^۱ Standard Fuel Element (SFE)

^۲ Control Fuel Element (CFE)

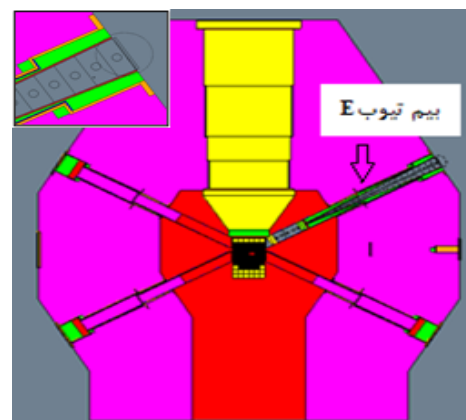
لازم به ذکر است که خروجی شبیه‌سازی که هندسه قلب و متعلقات آن با کد شبیه‌سازی شد (مرحله اول) و توزیع شار در محل دریچه به‌دست آمد (شکل ۵)، به‌عنوان کارت چشمه در محاسبه شار و دُز در برنامه شبیه‌سازی اتاقک (مرحله دوم) مورد استفاده قرار گرفت. با شبیه‌سازی اتاقک سیستم تصویربرداری نوترونی راکتور تحقیقاتی تهران در مرحله دوم، شبیه‌سازی کل سیستم در طی ۲ مرحله انجام شد.

در خصوص مبحث اعتباربخشی و تأیید^۱ (V&V) کد مورد استفاده، لازم به ذکر است که بر اساس مطالعات محک‌زنی (بنچ مارکینگ)^۲ انجام‌شده، بین نتایج محاسبات شار و شکل پروفایل محاسباتی شار (طیف) و نتایج تجربی-آزمایشگاهی، انطباق نسبتاً خوب و قابل قبولی وجود دارد [۷]. اتاقک تصویربرداری نوترونی راکتور تحقیقاتی تهران، مجهز به کلیه تجهیزات، ابزارها، نرم افزارها و دیگر ملزومات مورد نیاز برای یک سامانه پرتونگاری دیجیتال شامل شاتر، میز نمونه، متوقف‌کننده باریکه^۳ و غیره بوده که در مجاورت لوله پرتو E ساخته شده [۴] و از نظر کیفیت تصویربرداری نوترونی و بر اساس استانداردهای معتبر بین‌المللی مورد ارزیابی کیفیت قرار گرفته است [۸]. همان‌طور که در نتایج شبیه‌سازی مقطعی نشان داده شده در شکل‌های ۶ و ۷ مشاهده می‌شود، دیوارهای اتاق حفاظ دارای یک راهرو خمیده در خارج از فضای داخلی اتاق است و درب خروجی نیز در انتهای این راهرو قرار گرفته است. دیوارها تقریباً همگی با ضخامت یکسانی برابر با ۵۵ سانتی‌متر و از جنس بتن مسلح ساخته شده است.

برای محاسبات ترابرد پرتو مورد اشاره، از کد مونت‌کارلویی ۲۰۱۱: ۲.۷.۰۰ MCNPX [۹] و برای محاسبه شار به‌وسیله تالی F ۴ از کتابخانه‌ی داده‌های هسته‌ای ENDF/B-VII استفاده شده است [۱۰].

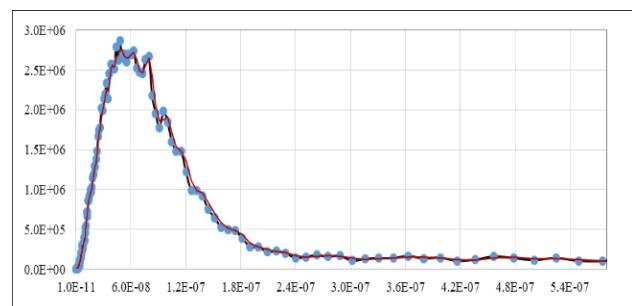


شکل ۳: نمایی کلی سه‌بعدی از شبیه‌سازی قلب و دیگر اجزاء ساختاری، شکل گوشه سمت راست پایین، نمایش‌گر سلول‌های تعریف شده در لوله پرتو E است.



شکل ۴: شبیه‌سازی دوبعدی از موقعیت لوله پرتو شمال غربی نسبت به اجزاء دیگر قلب.

نتایج مربوط به محاسبه طیف نوترون‌های کم انرژی در ناحیه انرژی حرارتی و فوق حرارتی (با تالی F ۴)، در محل دریچه لوله پرتو E در شکل ۵ آورده شده است [۵].



انرژی (MeV)

شکل ۵: طیف نوترونی برای نوترون‌های در بازه انرژی حرارتی و فوق حرارتی در محل دریچه لوله پرتو E [۵].

³ Beam Catcher

¹ Validation & Verification (V&V)

² Benchmarking Study

۲.۱ محاسبه آهنگ دُز نوترون و گاما در سامانه

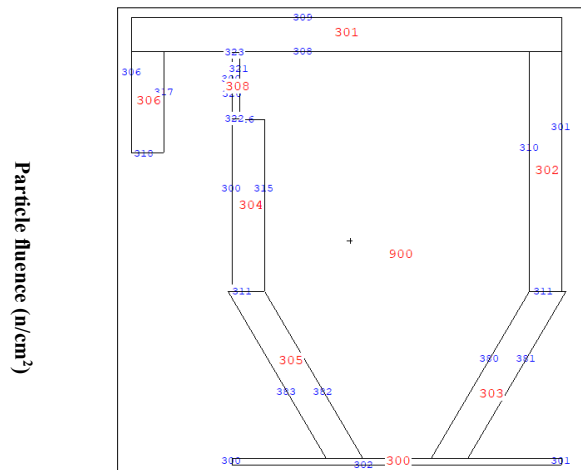
تصویربرداری نوترونی

پیشچیدگی سامانه تصویربرداری نوترونی راکتور، از یک سو، امکان انجام محاسبات شبیه‌سازی به یکبار مسئله با استفاده از نرم‌افزار MCNPX را با مشکلات و سختی‌های فراوانی از جمله بالا بودن خطای محاسباتی و طولانی شدن زمان محاسبات، روبرو می‌کند؛ بنابراین به‌عنوان یک راه‌حل مناسب، این کار در دو فاز انجام می‌شود [۴]. از سوی دیگر، محاسبات مربوط به آهنگ دُز گاما و نوترون در نقاط مختلف سامانه، در حالتی که از هیچ تکنیک کاهش واریانس (مونت کارلوی آنالوگ) استفاده نشده است مشروط به به‌کارگیری تاریخچه‌های بسیار زیادی از ذرات تا رسیدن به خطای قابل قبول محاسبات است. این امر نیز مستلزم محاسبات کامپیوتری طولانی و صرف هزینه‌های زیاد است. یک راه‌حل مناسب، استفاده از روش کاهش واریانس است.

۳.۱ کد MCNPX و روش‌های کاهش واریانس

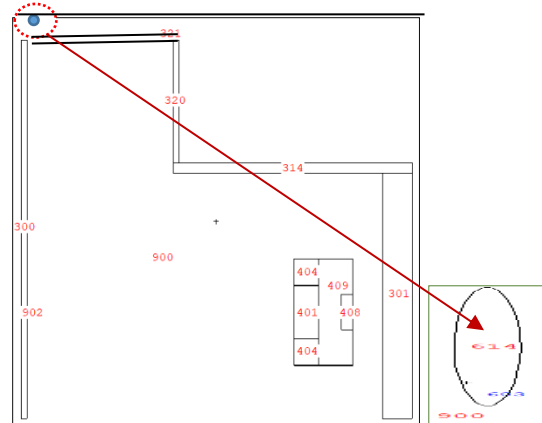
کد کامپیوتری MCNPX یک ابزار شبیه‌سازی برای استفاده در اهداف عمومی است که نسخه اولیه آن توسط آزمایشگاه لوس آلاموس در سال ۱۹۶۳ توسعه یافته است و نسخه‌های متفاوت آن طی سال‌های متوالی بهبود یافته است. داشتن طیف انرژی پیوسته، امکان انجام محاسبات ترابرد هم‌زمان نوترون، فوتون و الکترون، قابلیت استفاده از مجموعه فن‌های کاهش واریانس و داشتن پایگاه داده‌ی جامعی از سطح مقطع‌ها از مشخصات مهم آن است. دقت محاسبات MCNPX خود تابع عواملی چون تالی، فنون کاهش واریانس و تعداد تاریخچه‌ها است. این کد تالی‌ها را با نمونه‌برداری از تاریخچه‌های ذرات که به شکل آماری چگالی N دارند، به‌صورت رابطه (۱) تخمین می‌زند [۱۱]:

$$\langle T \rangle = \int d\vec{r} \int d\vec{v} \int dt N(\vec{r}, \vec{v}, t) T(\vec{r}, \vec{v}, t) \quad (1)$$



شکل ۶: شبیه‌سازی مقطعی از اتاقک جدید تصویربرداری نوترونی؛ در

جهت X-Y.



شکل ۷: تصویری شماتیک از اتاقک جدید تصویربرداری نوترونی در جهت Y-Z، محل انتخاب شده برای اندازه‌گیری دُز گاما و نوترون به همراه تعریف کره فرضی DXTRAN در گوشه پایین سمت راست نشان داده شده است.

خطای نسبی محاسبات انجام شده با کد شبیه‌سازی MCNPX در محدوده قابل قبول (۵-۱۰٪) قرار دارد و با نتایج تجربی محاسبه طیف و شار نوترونی از طریق اندازه‌گیری اکتیویته اشباع، مطابقت قابل قبولی دارد، به طوری که میزان اختلاف در ناحیه نوترون‌های حرارتی (مورد استفاده در تصویربرداری نوترونی) در حدود ۳۰٪ و در بقیه نواحی انرژی نوترون‌ها کمتر از این مقدار است [۷]؛ بنابراین مواد و ویژگی‌های هندسی مورد استفاده در برنامه‌های شبیه‌سازی به‌وسیله کد در کاربرد تصویربرداری، به‌خوبی مدل‌سازی شده است.

تالی T صفر است مگر جایی که آن تالی مورد نیاز است. به این ترتیب، یک محاسبه آنالوگ مونت کارلو که از روش‌های کاهش واریانس در آن استفاده نشده است، تعداد ذرات فیزیکی که در هر مسیر تصادفی مورد تأثیر واقع می‌شوند را تخمین می‌زند؛ بنابراین در این روش، از رویدادها با توجه به احتمالات فیزیکی طبیعی آن‌ها نمونه‌برداری می‌شود.

یکی از روش‌های متداول در شبیه‌سازی پدیده‌هایی که دارای طبیعت تصادفی هستند، استفاده از الگوریتم محاسباتی و نمونه‌گیری تصادفی بر اساس روش محاسباتی مونت کارلو است [۱۰]. در صورتی می‌توان به نتایج حاصل از محاسبات مونت کارلو اعتماد کرد که این نتایج دارای خطای نسبی^۱ قابل قبول باشند. روش‌هایی که منجر به کاهش خطا می‌شوند را روش‌های کاهش واریانس^۲ می‌نامیم و به روش مونت کارلویی که در آن از راه‌های کاهش واریانس استفاده شود، مونت کارلو غیر آنالوگ گفته می‌شود.

افزایش سرعت محاسبات کامپیوتری، تحلیل‌گران مونت کارلو را قادر نموده است تاریخچه کافی از ذرات را شبیه‌سازی کنند تا افزایش زمان اجرای کامپیوتر^۳ را به‌عنوان جایگزینی برای کاهش واریانس در نظر بگیرند. با این حال، هنوز برخی از مشکلات به‌اندازه کافی چالش‌برانگیز باقی می‌مانند که نیاز به استفاده مؤثر از فن‌های کاهش واریانس، به‌منظور دستیابی به نتایج قابل‌اعتماد در زمان مناسب، صرفه‌جویی در زمان تحلیل‌گر با صرف هزینه اقتصادی کمتر را برجسته ساخته‌اند [۱۲].

انگیزه تلاش کاربر در جهت کاهش واریانس، به نحوه برقراری تعادل میان زمان مصرف‌شده توسط کاربر برای کاهش واریانس و زمان ذخیره‌شده توسط کامپیوتر به‌عنوان نتیجه این

تلاش برمی‌گردد. در هر صورت، بدون دستیابی به نتایج قابل‌اعتماد با استفاده از کاهش واریانس، اطمینان از وجود نمونه‌برداری مناسب از تمام فضای فاز اصلی، دشوار است. مزیت استفاده از فن‌های کاهش واریانس در محاسبات مونت کارلو آن است که زمان موردنیاز کامپیوتر برای به‌دست آوردن نتایج با دقت کافی و هزینه‌های مرتبط را کاهش می‌دهد. با شرط به حداقل رسیدن سایر منابع خطا (از جمله خود کد شامل نوع مدل ریاضی، کتابخانه‌های مورد استفاده، سطح مقاطع و نوع مدل کردن مسئله و کاربر)، پیش‌بینی رفتار طبیعی مسئله، مستلزم تجزیه و تحلیل انجام یک محاسبه مونت کارلوی خوب است.

کاهش واریانس قوی از روشی متناسب با مسئله، بخشی جدایی‌ناپذیر از این تجزیه و تحلیل است تا اطمینان حاصل شود که با تمرکز بر دستیابی به اجرای آماری قابل قبول، تمام فضای فاز مهم در مسئله، به‌درستی نمونه‌برداری شود [۱۳].

انواع روش‌های کاهش واریانس به‌طور سنتی، به چهار روش اساسی تقسیم می‌شوند: روش‌های برش (کوتاه کردن)^۴، کنترل جمعیت^۵، روش‌های نمونه‌گیری اصلاح‌شده^۶ و روش‌های تریبرد یقینی (قطعی)^۷ [۱۴]. همه فن‌های کاهش واریانس MCNPX به ما اجازه می‌دهد تا با انجام محاسبات غیر آنالوگ مونت کارلو و شبیه‌سازی طبیعت به‌طور غیرمستقیم، تخمین‌های آماری بهتری از تعداد ذرات N در جایی که T بزرگ است، تولید شود. تکنیک‌های غیر آنالوگ ایجاب می‌کنند که وزن آماری مورد انتظار برای هر "نتیجه" مانند روش آنالوگ باشد. به این ترتیب، تعداد مورد انتظار ذرات فیزیکی که هر مسیر تصادفی را طی می‌کنند، مشابه روش آنالوگ است.

⁵ Population Control Methods

⁶ Modified Sampling Methods

⁷ Deterministic Transport

¹ Relative Error (RE)

² Variance Reduction (VR)

³ Computer Run Time

⁴ Truncation Methods

علاوه بر این روش، MCNPX از دو نوع روش اصلی غیر آنالوگ دیگر شامل روش تقسیم (خلق ذره) و روش رولت روسی نیز استفاده می‌کند. روش تقسیم کردن، به تقسیم وزن ذره بین دو یا چند ذره دختر و دنبال کردن ذرات دختر به‌طور مستقل از دیگری اشاره دارد، در حالی که روش رولت روسی برای کاهش خطا سعی می‌کند خطا را با نابود کردن ذره کاهش دهد. با توجه به این که کد MCNPX ذاتاً با اهداف عمومی گسترش یافته و برای یک کاربرد خاص بهینه نشده است، بنابراین کاربرد مسئله، مسئول انتخاب صحیح روش کاهش واریانس مناسب است. مروری جامع در مورد تکنیک‌های کاهش واریانس [۱۵]، نشان‌دهنده آن است که هر روشی، مزایا، مشکلات و ویژگی‌های خاص خود را دارد. ولی در میان روش‌های اشاره شده، برخی اصول اساسی برای انتخاب استراتژی کاهش واریانس وجود دارد. از جمله، با بررسی فایل خروجی MCNPX، اطمینان حاصل نماییم که:

۱- تکنیک‌های کاهش واریانس منجر به بهبود نمونه‌برداری ذرات آن تالی می‌شوند.

۲- تکنیک‌های کاهش واریانس هم‌افزا هستند یعنی یکی به‌صورت مخرب بر دیگری تأثیر نمی‌گذارد.

۳- نتایج تالی، بر اساس ضریب شایستگی^۱ (FOM) نشان‌دهنده نمونه‌گیری ضعیف نباشد.

در تکنیک DXTRAN که مخفف کره‌های ترابری^۲ یقینی^۲ است، با به‌دست آوردن تعداد زیادی ذره در کره‌های DXTRAN توسط کاربر، نمونه‌برداری را در مجاورت تالی‌ها بهبود می‌بخشد و با افزایش تعداد نمونه‌گیری، باعث کاهش واریانس می‌شود. در واقع، این روش شامل انتقال قطعی ذرات، در هنگام برخورد به یک کره دلخواه و تعریف شده توسط کاربر در یک منطقه کوچک مورد علاقه مثل محل اندازه‌گیری تالی F4 و محاسبه مشارکت‌ها در تالی ناشی از این ذرات است؛ بنابراین،

تکنیک کاهش واریانس DXTRAN معمولاً زمانی استفاده می‌شود که در حالت عادی، نمونه‌برداری از یک منطقه کوچک به‌طور ناکافی امکان انجام داشته باشد، علت اطلاق نمونه‌برداری ناکافی آن است که ذرات احتمال بسیار کمی برای پراکندگی به سمت آن منطقه دارند. برای انجام این کار، در فایل ورودی برنامه (با دستور $p1 \ x \ y \ z \ r. \ r_1$ که $\alpha \ y \ z$ مرکز مختصات کره فرضی و r_1 و r_2 به ترتیب شعاع داخلی و خارجی کره فرضی است)، یک کره DXTRAN که ناحیه کوچکی را در برمی‌گیرد، تعریف شد به‌صورتی که این کره فرضی اطراف ناحیه مورد نظر تعریف شده و ذرات به‌صورت جبری از محل چشمه به سمت این کره فرضی سوق داده می‌شوند. باید توجه نمود که هنگامی که تکنیک DXTRAN به‌عنوان وسیله‌ای برای تولید جمعیت ذرات بالاتر در نزدیکی یک تالی استفاده می‌شود، شعاع داخلی (r_i) باید حداقل به اندازه ناحیه تالی باشد. در این روش، هدف از قرار دادن کره داخلی، قرار دادن بایاس ذرات در کره بیرونی است. کره‌های DXTRAN بدون همپوشانی بوده و باید به‌طور معمول منطقه شمارش را بپوشانند. این کارت برخلاف روش بایاس چشمه، ذرات پراکنده را به سمت کره فرضی سوق می‌دهد و در واقع کاربر با این روش، اطراف ناحیه کوچک مورد نظر خود را (که تالی مورد نظر در آنجا محاسبه خواهد شد) محدود می‌کند و کد ذرات را بدون برخورد به سمت آن کره ترابرد می‌کند. ضمناً، در این روش، ذرات اصلی بدون کاهش وزن ترابرد شده و اگر ذره وارد کره DXTRAN شود، تاریخچه آن پایان یافته تلقی می‌شود.

برای اطلاع کاربر از این که هیچ ناحیه‌ای از فضای فاز مسئله حذف نشده و نمونه‌برداری از همه نواحی آن به‌درستی انجام شده است، MCNPX ضریب FOM را برای یک تالی برحسب تعداد تاریخچه‌ها در انتهای خروجی چاپ می‌کند. این کمیت، معیار قضاوت در مورد موفقیت روش کاهش واریانس بوده و

² Deterministic Transport Sphere

¹ Figure of Merit (FOM)

واریانس DXTRAN در محاسبه میزان آهنگ دُز نوترون و گاما در یک نقطه در سامانه تصویربرداری نوترونی راکتور تحقیقاتی تهران مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲. روش کار

۱.۲ محاسبه آهنگ دُز نوترون و گاما با روش آنالوگ و

غیر آنالوگ

آهنگ دُز نوترون و گاما، به ترتیب با استفاده از تالی‌های F۴ و F۱۴ در محل نقطه انتخابی مشخص شده با سلول شماره ۶۱۴ (نقطه واقع در گوشه بالای سقف اتاقک جدید در شکل ۷) به روش مونت‌کارلوی آنالوگ (بدون استفاده از تکنیک کاهش واریانس) و روش مونت‌کارلوی غیر آنالوگ (با استفاده از روش کره‌های DXTRAN) انجام گرفت. در هر دو حالت از نتایج درج شده در فایل خروجی‌های برنامه MCNPX استفاده شده است. برای محاسبات مربوط به شار نوترونی (و آهنگ دُز)، تقسیم‌بندی انرژی برای حالت سه گروهی انرژی (نوترون‌های حرارتی، فوق حرارتی و سریع)، به ترتیب در محدوده‌های انرژی - قطع^۱ تا $2/5 \times 10^{-8}$ ، 1×10^{-2} و 20 مگا الکترون‌ولت انجام شد. با توجه به این که تالی F۴، شار را به ازای یک نوترون چشمه محاسبه می‌کند، در قدم اول، برای این که این شار نماینده همه ذرات باشد، شار به ازای یک ذره (F۴) با استفاده از کارت FM در شدت چشمه ضرب شد. در قدم دوم، برای محاسبه دُز از روش تبدیل شار به دُز استفاده شد. به این منظور از تالی F۴ به همراه کارت‌های DE۴ و DF۴ و ضرایب تبدیل شار به دُز بر اساس استاندارد ۱۱۶ ICRP Publication استفاده شد [۱۶] که خروجی شار را برحسب $\frac{n}{cm^2 \cdot sec}$ می‌دهد و در قدم سوم با اعمال ضریب مناسب با استفاده از کارت FM، میزان دُز برحسب $\mu Sv/h$ به دست خواهد آمد. استفاده از روش کاهش واریانس به روش کره‌های DXTRAN با استفاده از کارت DXT

کارایی شبیه‌سازی مونت‌کارلو را به صورت کمی بیان می‌کند. کمیت FOM بر اساس رابطه (۲) تعریف شده است که R معرف خطای نسبی تالی (واریانس)، R^2 انحراف معیار نسبی نمونه از مقدار متوسط و T زمان محاسبه (به دقیقه) است. هرچه این پارامتر بزرگ‌تر باشد، مبین استفاده بهتر از روش‌های کاهش واریانس و کارایی بیشتر محاسبات مونت‌کارلو در مسئله است. چراکه زمان محاسبه کامپیوتری کمتری برای رسیدن به یک مقدار مشخص R وجود دارد.

$$FOM = \frac{1}{T \cdot R^2} \quad (2)$$

اگر زمان محاسبه ثابت فرض شود، هرچه واریانس کمتر باشد، FOM بزرگ‌تر است. از طرف دیگر، با توجه به این که مطابق رابطه (۳)، R^2 متناسب با $1/N$ (N تعداد ذرات، S^2 واریانس تاریخچه ذره و $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$ مقدار متوسط نمونه) و T نیز متناسب با N است:

$$R = \left(\frac{S}{\sqrt{N}} \right) / \bar{x} \quad (3)$$

بنابراین برای یک شبیه‌سازی به خوبی همگرا، FOM ثابت می‌ماند. به علاوه، چون ما به طور کلی علاقه‌مند به دست آوردن کوچک‌ترین R در یک زمان معین T هستیم، رابطه بالا نشان می‌دهد که برای کاهش R باید S را کاهش و N را افزایش دهیم. از یک سو، تکنیک DXTRAN، بر اساس ترکیبی از سه روش تقسیم ذرات، رولت روسی و نمونه‌برداری از تابع چگالی احتمال کار می‌کند و برخی مطالعات انجام شده نیز بیان‌گر آن است که استفاده از این روش دقت و کارایی بالاتری به همراه دارند؛ بنابراین روش کارآمدتری نسبت به سایر روش‌ها است. از سوی دیگر، با توجه به این که هندسه مسأله حاضر شامل ضخامت‌های نازک از نظر اپتیکی نیست، بنابراین توجیه‌پذیری و ارجحیت استفاده از این روش کاهش واریانس، دلیل انتخاب در تحقیق حاضر است؛ بنابراین، مسئله تأثیر استفاده از تکنیک کاهش

^۱ Cut-off Energy

در شکل ۷ و محاط بر کره DXTRAN)، به ترتیب در حالت اجرای برنامه مونت کارلوی آنالوگ (بدون استفاده از تکنیک کاهش واریانس) و غیرآنالوگ (با استفاده از روش کره DXTRAN) محاسبه و نتایج در جدول‌های ۱ و ۲ آورده شده است. مقایسه نتایج شبیه‌سازی استفاده از کد MCNPX با نتایج تجربی، بیان‌گر تطابق قابل قبول در حدود ۳۰٪ است [۷]. در این جداول، خطای نسبی خروجی‌ها نیز آورده شده است. نتایج پارامتر ضریب شایستگی (FOM) در هر دو حالت آنالوگ و غیر آنالوگ برای تالی‌های F_4 و F_{14} در جدول ۳ آورده شده است.

انجام شد. سلول مکعبی نازک فرضی برای محاسبه تالی F_4 در محل نقطه انتخاب شده تعریف شد. با توجه به این که شعاع داخلی و خارجی کره DXTRAN برابر ۱۲ و ۱۴ سانتی‌متر انتخاب شده است این کره کاملاً نقطه انتخاب شده برای محاسبه دُز را احاطه می‌نماید. شکل ۷ محل انتخاب شده برای محاسبه دُز پرتوهای گاما و دسته بیم نوترونی به همراه سلول ۶۱۴ و کره DXTRAN محیط بر آن را نشان می‌دهد.

۳. نتایج

آهنگ دُز گاما و نوترون، به ترتیب با استفاده از تالی‌های F_4 و F_{14} در محل سلول ۶۱۴ (نقطه گوشه بالای سقف اتاقک جدید

جدول ۱: نتایج محاسبه آهنگ دُز پرتوهای نوترون و گاما در محل سلول ۶۱۴، بدون استفاده از روش‌های کاهش واریانس (آنالوگ).

تعداد تاریخیچه	زمان اجرا (min)	آهنگ دُز گاما ($\mu Sv/h$)	خطای نسبی MCNP در محاسبه دُز گاما	آهنگ دُز نوترون ($\mu Sv/h$)	خطای نسبی MCNP در محاسبه دُز نوترون
۱×۱۰ ^۶	۷	۳/۸۴×۱۰ ^{-۱}	۰/۶۴۳	۳/۵۷×۱۰ ^{-۱}	۰/۳۰۲
۲×۱۰ ^۶	۱۳	۶/۴۶×۱۰ ^{-۱}	۰/۶۰۵	۳/۴۵×۱۰ ^{-۱}	۰/۳۰۳
۳×۱۰ ^۶	۲۶	۶/۵۱×۱۰ ^{-۱}	۰/۴۷۸	۳/۰۵×۱۰ ^{-۱}	۰/۱۴۷
۵×۱۰ ^۶	۳۲	۵/۴۶×۱۰ ^{-۱}	۰/۴۵۵	۳/۲۹×۱۰ ^{-۱}	۰/۱۲۸
۶×۱۰ ^۶	۳۹	۴/۷۱×۱۰ ^{-۱}	۰/۴۴۱	۳/۳۷×۱۰ ^{-۱}	۰/۱۱۷
۱۸×۱۰ ^۶	۵۲	۶/۸۹×۱۰ ^{-۱}	۰/۳۳۳	۳/۱۷×۱۰ ^{-۱}	۰/۱۰۲۷
۹×۱۰ ^۶	۵۸	۶/۲۶×۱۰ ^{-۱}	۰/۳۲۶	۳/۱۲×۱۰ ^{-۱}	۰/۰۹۶
۷×۱۰ ^۶	۶۴	۷/۲۸×۱۰ ^{-۱}	۰/۲۷۳	۳/۰۹×۱۰ ^{-۱}	۰/۰۹۲
۱/۱×۱۰ ^۶	۷۱	۶/۸۵×۱۰ ^{-۱}	۰/۲۶۴	۳/۱۶×۱۰ ^{-۱}	۰/۰۸۸۵
۱/۲×۱۰ ^۷	۷۷	۶/۸۸×۱۰ ^{-۱}	۰/۲۵۲	۳/۱۳×۱۰ ^{-۱}	۰/۰۸۴۴
۱/۳×۱۰ ^۷	۸۴	۷/۸۶×۱۰ ^{-۱}	۰/۲۲۹	۳/۱۹×۱۰ ^{-۱}	۰/۰۸۰۸
۱/۴×۱۰ ^۷	۹۰	۷/۶۳×۱۰ ^{-۱}	۰/۲۲۰	۳/۱۹۶×۱۰ ^{-۱}	۰/۰۷۸۰
۱/۶×۱۰ ^۷	۱۰۳	۷/۷۹×۱۰ ^{-۱}	۰/۲۰۰	۳/۱۴۲×۱۰ ^{-۱}	۰/۰۷۳۳
۱/۷×۱۰ ^۷	۱۱۰	۹/۰۲×۱۰ ^{-۱}	۰/۱۸۵۲	۲/۸۶۲×۱۰ ^{-۱}	۰/۰۷۰۶
۱/۸×۱۰ ^۷	۱۱۹	۸/۸۰×۱۰ ^{-۱}	۰/۱۸۰	۳/۲۰×۱۰ ^{-۱}	۰/۰۶۵۶
۱/۹×۱۰ ^۷	۱۲۷	۸/۹۵۹×۱۰ ^{-۱}	۰/۱۷۳	۳/۱۷۰×۱۰ ^{-۱}	۰/۰۶۶۷
۲/۰×۱۰ ^۷	۱۳۶	۸/۵۷۶×۱۰ ^{-۱}	۰/۱۷۲۴	۳/۱۱۸×۱۰ ^{-۱}	۰/۰۶۵۳
۲/۱×۱۰ ^۷	۱۴۵	۸/۷۹۸×۱۰ ^{-۱}	۰/۱۶۶	۳/۰۹۸×۱۰ ^{-۱}	۰/۰۶۳۸
۲/۲×۱۰ ^۷	۱۵۳	۸/۶۵۵×۱۰ ^{-۱}	۰/۱۶۲	۳/۱۳۶×۱۰ ^{-۱}	۰/۰۶۲۳
۲/۳×۱۰ ^۷	۱۶۳	۸/۸۹۸×۱۰ ^{-۱}	۰/۱۵۹۹	۳/۱۱۸×۱۰ ^{-۱}	۰/۰۶۰۹
۲/۴×۱۰ ^۷	۱۷۳	۸/۷۹۴×۱۰ ^{-۱}	۰/۱۵۶۳	۳/۱۱۹×۱۰ ^{-۱}	۰/۰۵۹۷
۲/۶×۱۰ ^۷	۱۹۳	۸/۳۷۹×۱۰ ^{-۱}	۰/۱۵۲۵	۳/۱۳۸×۱۰ ^{-۱}	۰/۰۵۷۴
۲/۷×۱۰ ^۷	۲۰۱	۹/۰۵۴×۱۰ ^{-۱}	۰/۱۵۵۰	۳/۲۰۸×۱۰ ^{-۱}	۰/۰۵۵۸
۲/۸×۱۰ ^۷	۲۱۱	۸/۷۷۵×۱۰ ^{-۱}	۰/۱۵۴۳	۳/۱۴۶×۱۰ ^{-۱}	۰/۰۵۵۲
۲/۹×۱۰ ^۷	۲۲۳	۸/۶۱۶×۱۰ ^{-۱}	۰/۱۵۲۲	۳/۱۹۵×۱۰ ^{-۱}	۰/۰۵۴۹
۳/۰×۱۰ ^۷	۲۳۲	۸/۷۷۲×۱۰ ^{-۱}	۰/۱۴۷۸	۳/۱۹۴×۱۰ ^{-۱}	۰/۰۵۳۷
۳/۱×۱۰ ^۷	۲۳۹	۸/۵۶×۱۰ ^{-۱}	۰/۱۴۶	۳/۱۵۸×۱۰ ^{-۱}	۰/۰۵۳۱
۳/۱×۱۰ ^۷	۲۴۶	۸/۸۳۹×۱۰ ^{-۱}	۰/۱۴۲۹	۳/۱۱×۱۰ ^{-۱}	۰/۰۵۲۵
۳/۲×۱۰ ^۷	۲۵۲	۸/۶۳۲×۱۰ ^{-۱}	۰/۱۴۲۰	۳/۰۹۹×۱۰ ^{-۱}	۰/۰۵۱۷
۲/۴×۱۰ ^۷	۲۶۶	۸/۶۰۱×۱۰ ^{-۱}	۰/۱۳۷۵	۳/۱۱۶×۱۰ ^{-۱}	۰/۰۴۹۸
۳/۵×۱۰ ^۷	۲۷۳	۸/۳۸۸×۱۰ ^{-۱}	۰/۱۳۷۱	۳/۱۱۳×۱۰ ^{-۱}	۰/۰۴۹۱
۴/۰×۱۰ ^۷	۳۱۳	۸/۳۶۲×۱۰ ^{-۱}	۰/۱۳۲۹	۳/۱۱۶×۱۰ ^{-۱}	۰/۰۴۶۷
۶/۰×۱۰ ^۷	۴۸۴	۸/۵۷۴×۱۰ ^{-۱}	۰/۱۰۴۰	۳/۰۸۸×۱۰ ^{-۱}	۰/۰۳۸۳
۶/۲×۱۰ ^۷	۵۱۶	۹/۶۸۲×۱۰ ^{-۱}	۰/۱۰۲۴	۳/۰۴۵۷×۱۰ ^{-۱}	۰/۰۳۷۸

جدول ۲: نتایج محاسبه آهنگ دز پرتوهای نوترون و گاما در محل سلول ۶۱۴، با استفاده از روش کاهش واریانس کره DXTRAN.

کاهش زمان اجرا (نسبت به روش آنالوگ) - به درصد	خطای نسبی در محاسبه دز نوترون	آهنگ دز نوترون	خطای نسبی در محاسبه دز گاما	آهنگ دز گاما ($\mu Sv/h$)	زمان اجرا (min)	تاریخچه (nps)
۵۳/۱	۰/۰۵۷	$2/827 \times 10^1$	۰/۱۴۶۶	$6/737 \times 10^{-1}$	۳۰	$1/1 \times 10^7$
۳۰/۰	۰/۰۵۷۳	$2/919 \times 10^1$	۰/۱۱۴۵	$6/821 \times 10^{-1}$	۶۳	$1/4 \times 10^7$
۱۶/۸	۰/۰۴۴۴	$2/993 \times 10^1$	۰/۱۰۱۳	$6/836 \times 10^{-1}$	۹۹	$1/7 \times 10^7$
۱۱/۷	۰/۰۳۶۲	$2/952 \times 10^1$	۰/۰۹۵۸	$7/245 \times 10^{-1}$	۱۲۸	$2/1 \times 10^7$
۲۲/۳	۰/۰۳۴۲	$2/99 \times 10^1$	۰/۰۸۵۷	$7/379 \times 10^{-1}$	۱۵۰	$2/6 \times 10^7$
۲۶/۳	۰/۰۲۹۹	$2/942 \times 10^1$	۰/۰۷۵۶	$7/268 \times 10^{-1}$	۱۷۱	$3/0 \times 10^7$
۲۳/۸	۰/۰۲۷۳	$2/952 \times 10^1$	۰/۰۶۹۷۸	$6/923 \times 10^{-1}$	۱۹۲	$3/2 \times 10^7$
۲۰/۱	۰/۰۲۵۱	$2/950 \times 10^1$	۰/۰۶۵۹	$7/196 \times 10^{-1}$	۲۱۸	$3/5 \times 10^7$
۴۹/۲	۰/۰۲۶۳	$3/010 \times 10^1$	۰/۰۷۵۶	$7/418 \times 10^{-1}$	۲۴۶	$6/0 \times 10^7$
۴۷/۵	۰/۰۲۴۴	$2/972 \times 10^1$	۰/۰۴۲۳	$7/420 \times 10^{-1}$	۲۷۱	$6/2 \times 10^7$

جدول ۳: نتایج محاسبه ضریب شایستگی (FOM) برای تالی‌های F۴ و F۱۴ در دو حالت مونت کارلوی آنالوگ و غیر آنالوگ.

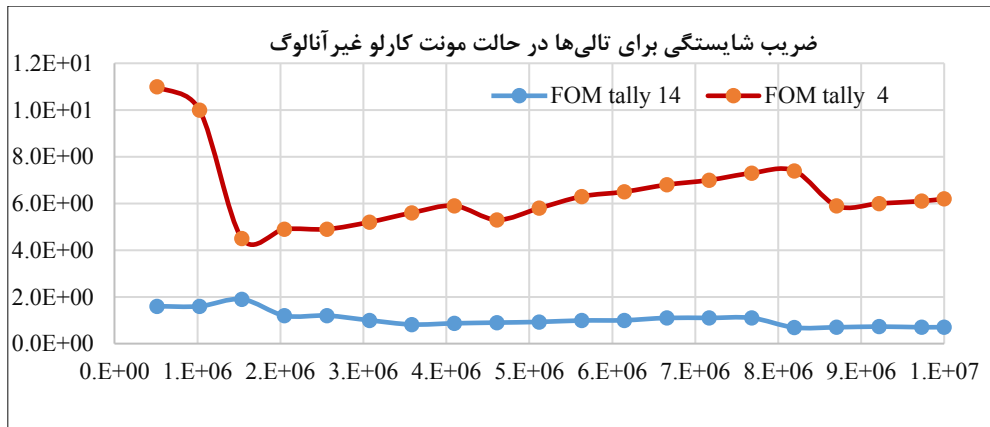
مونت کارلوی غیر آنالوگ			مونت کارلوی آنالوگ		
FOM تالی F۴	FOM تالی F۱۴	تعداد تاریخچه	FOM تالی F۴	FOM تالی F۱۴	تعداد تاریخچه
۱۱	۱/۶۰	۵۱۲۰۰۰	۱/۷	۰/۰۱۶	۴۰۹۶۰۰۰
۱۰	۱/۶۰	۱۰۲۴۰۰۰	۱/۸	۰/۱۷	۸۱۹۲۰۰۰
۴/۵	۱/۹۰	۱۵۳۶۰۰۰	۱/۸	۰/۲۲	$1/2 \times 10^7$
۴/۹	۱/۲۰	۲۰۴۸۰۰۰	۱/۸	۰/۲۵	$1/6 \times 10^7$
۴/۹	۱/۲۰	۲۵۶۰۰۰	۱/۷	۰/۲۴	$2/0 \times 10^7$
۵/۲	۱/۰۰	۳۰۷۲۰۰۰	۱/۶	۰/۲۳	$2/5 \times 10^7$
۵/۶	۰/۸۲	۳۵۸۴۰۰۰	۱/۵	۰/۲	$2/9 \times 10^7$
۵/۹	۰/۸۷	۴۰۹۶۰۰۰	۱/۵	۰/۲	$3/3 \times 10^7$
۵/۳	۰/۹۰	۴۶۰۸۰۰۰	۱/۵	۰/۱۹	$3/7 \times 10^7$
۵/۸	۰/۹۳	۵۱۲۰۰۰۰	۱/۵	۰/۱۹	$4/1 \times 10^7$
۶/۳	۰/۹۹	۵۶۳۲۰۰۰	۱/۵	۰/۱۹	$4/5 \times 10^7$
۶/۵	۱/۰۰	۶۱۴۴۰۰۰	۱/۴	۰/۱۹	$4/9 \times 10^7$
۶/۸	۰/۱۱	۶۶۵۶۰۰۰	۱/۴	۰/۱۹	$5/3 \times 10^7$
۷	۰/۱۱	۷۱۶۸۰۰۰	۱/۴	۰/۲	$5/7 \times 10^7$
۷/۴	۰/۶۹	۸۱۹۲۰۰۰	۱/۴	۰/۱۹	$6/1 \times 10^7$
۶/۲	۰/۷۱	۱۰۰۰۰۰۰۰	۱/۴	۰/۱۹	$6/1 \times 10^7$

و گاما یکسان نیست. مطابق جدول ۱، در مورد محاسبات آنالوگ آهنگ دز بیم نوترونی (تالی F۴)، به ازای استفاده از تعداد تاریخچه نسبتاً پایینی از ذرات ($8E6$ ذره) و با گذشت زمان اجرای نسبتاً کم (۵۰ دقیقه)، خطای نسبی قابل قبول $\leq 10\%$ به دست آمده است و لذا نتایج در ناحیه عموماً قابل قبول قرار می‌گیرد. مطابق جدول ۲، در صورت استفاده از روش کاهش واریانس کره (محاسبات غیر آنالوگ) آهنگ دز نوترونی، طی تعداد تاریخچه $1/1EV$ ذره، زمان لازم برای رسیدن به خطایی حدود 53% کمتر، حتی کوتاه‌تر نیز شده است (۳۰ دقیقه).

نتایج محاسبه ضریب شایستگی برای تالی‌های F۴ و F۱۴ در حالت مونت کارلوی غیر آنالوگ و آنالوگ به ترتیب در شکل‌های ۸ و ۹ رسم شده است.

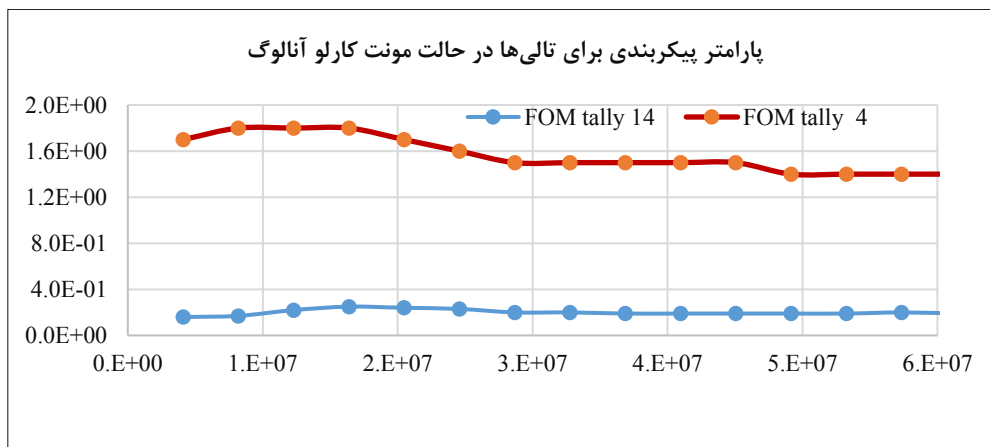
۴. بحث و نتیجه‌گیری

استفاده از روش‌های کاهش واریانس سبب کاهش زمان محاسبات شبیه‌سازی با کد MCNPX می‌شود، این کاهش زمان در سیستم‌های پیچیده شامل تعداد زیادی سلول با مواد متفاوت، قابل ملاحظه است. بررسی نتایج ارائه شده در جدول‌های ۱ و ۲ بیان‌گر آن است که تأثیر روش کاهش واریانس در مورد نوترون



تعداد تاریخچه ذرات

شکل ۸: نتایج محاسبه ضریب شایستگی FOM برای تالی‌های F_4 و F_{14} در حالت مونت کارلوی غیر آنالوگ.



تعداد تاریخچه ذرات

شکل ۹: نتایج محاسبه ضریب شایستگی FOM برای تالی‌های F_4 (آهنگ دُز نوترون) و F_{14} (آهنگ دُز گاما)، در حالت مونت کارلوی آنالوگ.

مطابق جدول ۱، در مورد محاسبات آنالوگ آهنگ دُز گاما (تالی F_{14})، تنها پس از گذشت تاریخچه نسبتاً بالایی از ذرات ($6/2EV$ ذره) و با گذشت زمان اجرای نسبتاً زیاد (۵۱۶ دقیقه)، خطای نسبی نزدیک به مقادیر قابل قبول ($\leq 10\%$) به دست آمده است و بدین صورت در ناحیه عموماً قابل قبول قرار می‌گیرد. مطابق جدول ۲، در صورت استفاده از روش کاهش واریانس کره DXTRAN برای محاسبات غیر آنالوگ آهنگ دُز گاما، بازهم طی تاریخچه کمتری ($1/8EV$ ذره)، زمان لازم برای رسیدن به خطای نسبی نزدیک به مقادیر قابل قبول ($\leq 10\%$)، بسیار کوتاه شده (۹۹ دقیقه) و به حدود یک‌پنجم کاهش یافته

در ستون آخر جدول ۲، زمان محاسبات لازم برای به دست آوردن نتایج آهنگ دُز نوترون تا رسیدن به خطای نسبی قابل قبول برای تاریخچه‌های مساوی، در حالت آنالوگ و غیر آنالوگ مقایسه شده است. نتایج همچنین بیان‌گر آن است که در تاریخچه مساوی، در صورت استفاده از روش‌های کاهش واریانس کره DXTRAN، زمان محاسبات برای رسیدن به واریانس قابل قبول، به طور متوسط ۳۰٪ کاهش می‌یابد، این موضوع بیان‌گر آن است که استفاده از این تکنیک، کمک شایانی به کاهش زمان اجرای محاسبات مسئله تا رسیدن به واریانس قابل قبول نموده است.

به‌علاوه، افزایش FOM برای محاسبات نوترون و گاما به نسبت مساوی نبوده است: در مورد محاسبه دز نوترون (خطوط قرمز رنگ در شکل‌های ۸ و ۹)، متوسط ضریب شایستگی در حالت بدون استفاده از روش کاهش واریانس، از مقدار متوسط حدود ۱/۵ در شکل ۹، به مقدار متوسط حدود ۶ در شکل ۸ (حالت استفاده از روش کاهش واریانس) افزایش یافته است (۴ برابر افزایش). در حالی که در مورد محاسبه دز گاما (خطوط آبی رنگ در شکل‌های ۸ و ۹)، متوسط ضریب شایستگی در حالت بدون استفاده از روش کاهش واریانس از مقدار متوسط ۰/۲ در شکل ۹ با ۵ برابر افزایش، به حدود ۱ در شکل ۸ (حالت استفاده از روش کاهش واریانس) افزایش یافته است. این بدان معنی است که با توجه به تفاوت در فیزیک پراکندگی ذرات نوترون و پرتوهای گاما، در مورد پرتوهای گاما، روش کاهش واریانس، بیشتر منجر به بهبود نتایج در رسیدن به خطای نسبی قابل قبول (انحراف معیار نسبی کوچک‌تر: R) و کاهش زمان شده است.

است. این نتایج بیان‌گر آن است که در صورت استفاده از این روش کاهش واریانس برای محاسبه آهنگ دز گاما، تاریخچه لازم برای رسیدن به واریانس قابل قبول نسبت به حالتی که در آن از هیچ روش کاهش واریانس استفاده نشده است، حدود ۳/۵ برابر کاهش می‌یابد. در تاریخچه مساوی، استفاده از این روش کاهش واریانس، با کاهش خطای نسبی از ۱۰/۲٪ به ۷/۲٪، بیان‌گر بهبودی ۳۰٪ در واریانس نسبت به حالت آنالوگ است.

بررسی ضرایب شایستگی (FOM) در جدول ۳ و نیز مقایسه شکل‌های ۸ و ۹ بیان‌گر آن است که در صورت استفاده از روش‌های کاهش واریانس برای محاسبه تالی‌های مورد اشاره، کمیت FOM در هر دو مورد نوترون و گاما افزایش قابل توجهی یافته است. این مطلب بیان‌گر آن است که در زمان کمتری، نتایج به خطای قابل قبول رسیده‌اند و به ازای خطای نسبی برابر برای هر دو روش آنالوگ و غیر آنالوگ، زمان اجرای برنامه در تمامی حالات با استفاده از روش غیر آنالوگ بسیار کاهش یافته است.

۵. مراجع

1. M. H. Choopan Dastjerdi, H. Khalafi, Y. Kasesaz. Design, construction, and characterization of a new neutron beam for neutron radiography at the Tehran Research Reactor, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* 818 (2016) 1-8.
2. M. H. Choopan Dastjerdi, H. Khalafi. Design a thermal neutron beam for a new nuclear imaging facility at Tehran research reactor. *Phys. Procedia* 69 (2015) 92-95.
3. M. H. Choopan Dastjerdi, A. Movafeghi, H. Khalafi, Y. Kasesaz. The quality assessment of radial and tangential neutron radiography beamlines of TRR. *JINST* 12 (2017) P07008.
4. ب. رکرک، م. ح. چوپان دستجردی، ا. موافقی. طراحی و ساخت ملزومات سامانه پرتونگاری نوترونی در راکتور تحقیقاتی تهران با قابلیت تصویربرداری دیجیتال زمان واقعی. *مجله فناوری‌های غیرمخرب*. ۲ (۷) (۱۳۹۹)
5. م. زمانی و م. شایسته. به روزرسانی محاسبات طیف و شار نوترون و گاما در دریچه لوله پرتو E راکتور تحقیقاتی تهران، مورد استفاده در سامانه‌ی دیجیتال تصویربرداری نوترونی، خلاصه مقالات بیست و نهمین کنفرانس ملی هسته‌ای ایران، ۷ اسفند ۱۴۰۱، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران، ۱۴۰۱.
6. م. ا. امیرخانی دهکردی، م. م. سید حبشی، ع. رحیمیان، ر. عادل. مطالعات نوترونی و ایمنی کانال خشک در قلب راکتور تهران، بیست و ششمین کنفرانس هسته‌ای ایران، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران، ایران، ۱۳۹۸.
7. M. Zamani, M. Shayesteh. Benchmark MCNP computer code simulation results against experimental data of neutron flux and spectrum from the neutron imaging system of the Tehran research reactor. *Radiat. Phys. Eng.* 5 (1) (2024) 11-19.

8. Y. Kasesaz, B. Rokrok, H. Choopan Dastjerdi. Radiation safety assessment of the new neutron radiography system at Tehran research reactor. *J. Radiat. Safety Measurement* 9 (4) (2020) 251-256.
9. X-5 Monte Carlo Team 2003 MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5 (Oak Ridge: Los Alamos National Laboratory) LAUR-03-1987 LA-CP-03-0245.
10. M. B. Chadwick, ENDF/B-VII Next generation evaluated nuclear data library for nuclear science and technology, nuclear data sheets, special issue on evaluated nuclear data file ENDF/B-VII (Brookhaven: National Nuclear Data Center), 2006.
11. N. J. Carron. *An Introduction to the Passage of Energetic Particles through Matter*. TK Mission Research Corporation Santa Barbara, Taylor & Francis Group, California, USA, 2006.
12. T. E. Booth, R. A. Forster, R. L. Martz. MCNP variance reduction developments in the 21st century. *Nucl. Tech.* 180 (3) (2012) 355-371.
13. R. Olsher. A practical look at Monte Carlo variance reduction methods in radiation shielding. *Nucl. Eng. Tech.* 38 (3) (2006) 225-230.
14. T. E. Booth. Sample problem for variance reduction in MCNP (No. LA-10363-MS). *Los Alamos National Lab.*, NM (USA), 1985.
15. S. Kilby, J. Fletcher, Z. Jin, A. Avachat, D. Imholte, N. Woolstenhulme, H. Lee, J. Graham. Comparison of a semi-analytic variance reduction technique to classical Monte Carlo variance reduction techniques for high aspect ratio pencil beam collimators for emission tomography applications. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sec. A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 1001 (2021) 165236.
16. N. Petoussi-Hens, W. E. Bolch, K. F. Eckerman, A. Endo, N. Hertel, J. Hunt, M. Pelliccioni, H. Schlattl, M. Zankl. Conversion coefficients for radiological protection quantities for external radiation exposures. *Ann. ICRP* 40 (2-5) (2010) 1-257.