# اعتبارسنجی شبیه‌سازی و ارزیابی کارآیی اسکنر PET در سیستم PET/CT تمام بدن Discovery RX به روش مونت‌کارلو با استفاده از کد GATE

**پرهام گرامی‌فر[۲۷*]، محمد رضا آی[۲]، مجتبی شمسایی ظفرقندی[۱]**

[۱] دانشکده مهندسی هسته ای و علوم فیزیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)

[۲] دانشکده فیزیک پزشکی و مهندسی پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی تهران

چکیده:

*بسته شبیه‌سازی مونت کارلو GATE (مخفف GEANT4 Application for Tomographic Emission) که با هدف شبیه‌سازی توموگرافی نشر با پوزیترون و توموگرافی کامپیوتری تابش تک فوتون طراحی شده است، توانایی مدلسازی و محاسبه اثرات ناهمراستا بودن فوتونهای نابودی، عمق برهمکنش، پاسخ آشکارساز، برد پوزیترون قبل از نابودی، پراکندگی فوتون و حرکت بیمار را در رزولوشن و کیفیت تصاویر PET داراست. هدف از این تحقیق، اعتبارسنجی شبیه‌سازی و ارزیابی کارآیی اسکنر PET در یکی از پیشرفته‌ترین سیستمهای تصویربرداری PET/CT تمام بدن، Discovery RX است. مدل سه‌بعدی شبیه‌سازی شده اسکنر PET، شامل ۱۵۱۲۰ آشکارساز است که در ۲۸۰ بلوک و ۳۵ ماژول کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند. مطابق با استانداردهای ارزیابی اسکنرهای PET در پروتکل NEMA-2001، آزمونهای مختلف بررسی کارآیی اسکنر انجام و نتایج بدست آمده در مدل شبیه‌سازی شده با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید. فانتومهای استاندارد این پروتکل به نحو کاملا صحیحی طراحی شدند تا اعتبارسنجی مدل را در پارامترهای حساسیت، کسر پراکندگی و کارآیی نرخ شمارش بررسی نمایند. نتایج آزمون حساسیت در اسکنر PET شبیه‌سازی شده خطایی کمتر از ٪۱ را با داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد. همچنین مقدار کسر پراکندگی در مدل، اختلافی کمتر از ٪۳/۵ با مقادیر آزمایشگاهی دارد. بیشینه مقدار شمارشهای درست در مدل ۴۵۵/۱۹ kcps در غلظت فعالیت ۳۰/۸ kBq/mL بدست آمد که با خطایی کمتر از ٪۱ بر داده‌های آزمایشگاهی منطبق است. همچنین بیشینه مقدار منحنی نویز معادل نرخ‌شمارش (NECR) در غلظت فعالیت ۲۲/۵ kBq/mL برابر با ۱۲۰/۴۱۶ kcps بدست آمد که در مقایسه با مقادیر آزمایشگاهی به ترتیب در حدود ٪۳/۷ و ٪۲/۳ خطا دارد. اسکنر PET در سیستم Discovery RX اسکنری است که حساسیت زیاد، NECR بالا و کسر پراکندگی پایینی دارد. استفاده از این مدل اعتبار یافته، نخستین گام مهم در انجام مطالعات شبیه‌سازی و بررسی پارامترهای موثر در کارآیی اسکنر PET در این مدل و دیگر مدلهای مشابه، با هدف بهبود عملکرد و افزایش کیفیت و صحت تصاویر PET در تحقیقات آینده می‌باشد.*

*Email: parsaeian@yrpc.ir

*کلید واژه: اعتبارسنجی، شبیه‌سازی مونت کارلو، PET، GATE.*

۱. مقدمه

امروزه تصویربرداری توموگرافی نشر با پوزیترون (PET) بویژه هنگامیکه با توموگرافی کامپیوتری(CT) در سیستمهای تصویربرداری PET/CT همراه می‌شود، به ابزاری ضروری برای تشخیص تومورها در رادیوتراپی(RT) تبدیل شده است. بهره‌مندی از مزیت آشکارسازی رادیوداروهای با نیمه عمر پایین و فعالیت ویژه بالا، مطالعات کلینیکی و تحقیقات بالینی را با حساسیتی بالا در دزهای تابشی کم و با غلظتی ناچیز از ماده نشاندار شده امکان پذیر ساخته است. با این وجود، دلایل متعددی همچون ناهمراستا بودن فوتونهای نابودی، برد پوزیترون قبل از نابودی، پراکندگی فوتون و حرکت بیمار در کاهش رزولوشن و کیفیت تصاویر PET نقش دارند. از آنجا که بررسی این عوامل و نحوه رفع آنها با روشهای آزمایشگاهی بسیار پرهزینه و بعضا غیرممکن است، کدهای پیشرفته شبیه سازی بر پایه روش مونت‌کارلو می‌توانند کمک زیادی در ارزیابی و حل این مشکلات بنمایند.

در این تحقیق با استفاده از کد GATE [۱] و بر پایه روش مونت‌کارلو، برای اولین بار شبیه‌سازی اسکنر PET در یکی از پیشرفته‌ترین سیستمهای تصویربرداری PET/CT تمام بدن، Discovery RX [۲] انجام شده است. مشخصات فیزیکی و ابعاد هندسی اسکنر از اطلاعات ارایه شده توسط کمپانی سازنده [۲] استخراج شده است. زنجیره مدارهای پردازشگر سیگنال هم با استفاده از سیستم شبیه‌ساز جمع‌آوری داده در کد GATE [۳]، همانند یک اسکنر واقعی شبیه‌سازی شده است. برای اعتبارسنجی، مطابق با استانداردهای سنجش کارآیی اسکنرهای PET در پروتکل NEMA-2001 [۴]، آزمونهای حساسیت، کسر پراکندگی و کارآیی نرخ شمارش در مدل انجام و نتایج با داده‌های آزمایشگاهی کمپ و همکارانش [۵]، مقایسه گردید.

هدف از این تحقیق ضمن اعتبارسنجی شبیه‌سازی با کد GATE، ارزیابی عملکرد این اسکنر در غلظتهای مختلف فعالیت چشمه است. در تحقیقات آینده، استفاده از این مدل اعتبار یافته می‌تواند نقش مهمی در بهبود عملکرد و افزایش کیفیت و صحت تصاویر PET ایفا کند.

۲. مواد و روشها

۲. ۱ شبیه سازی مونت‌کارلو

کد شبیه‌سازی GATE (مخفف GEANT4 Application for Tomographic Emission) [۱] از کتابخانه‌های کد GEANT4 با هدف دستیابی به یک ابزار شبیه سازی ماژولار، روان و با قابلیت برنامه‌نویسی به زبان اسکریپت منطبق با زمینه پزشکی هسته‌ای استفاده می‌کند. از دلایل متعدد استقبال محققان از کد GATE

می‌توان به هسته بسیار دقیق GEANT4 و سود جستن از چند صد کلاس C++ در این کد، دارا بودن مدلهای فیزیکی بسیار معتبر، توانایی توصیفات هندسی پیچیده، امکانات تجسمی قدرتمند، ابزارهای نمایش سه بعدی، متن باز بودن نرم‌افزار و مهمتر از همه پشتیبانی و بروزرسانی همیشگی که زمینه تحول و تطبیق کد GATE با نیازهای روز را فراهم و تضمین می‌کند، اشاره کرد.

GATE با ترکیب شکلهای هندسی ساده ساختارهای هندسی پیچیده ایجاد می‌کند و به کمک بلوکهای پردازش سیگنال طراحی شده در آن که دیجیتایزر نامیده می‌شود [۳]، برهمکنشهای فوتونهای نابودی را به پالسهای خروجی همانند عملکرد یک اسکنر واقعی، تبدیل می‌کند. هر کدام از بلوکهای دیجیتایزر بخش خاصی از فرآیند پردازش سیگنال را بر عهده دارند؛ راندمان کوانتمی کریستالها(QE)، حد آستانه بالا و پایین انرژیها، زمان مرده، تاخیر مدارات الکترونیک و ظرفیت بافرها از جمله موارد قابل شبیه‌سازی هستند.

### ۲. ۲ اسکنر **PET** در سیستم **Discovery RX**

اسکنر PET در سیستم Discovery RX [۲]، از کریستالهای LYSO با ابعاد ۴/۲ میلیمتر عمود بر محور، ۶/۳ میلیمتر در راستای محور و ۳۰ میلیمتر در راستای شعاع در بلوکهای ۶ × ۹ استفاده می‌کند. این اسکنر شامل ۲۴ رینگ با ۶۳۰ کریستال در هر یک با قطر ۸۸/۶ سانتیمتر است. میدانهای دید عمود بر محور و محوری به ترتیب ۷۰ سانتیمتر و ۱۵/۷ سانتیمتر است. این اسکنر دیواره‌های قابل جابجایی دارد و توانایی فعالیت در دو بعد و سه بعد را داراست. جمع‌آوری اطلاعات در حالت سه بعدی از ۲۳ رینگ مجاور دیگر انجام می‌شود. عرض پنجره همزمانی ۶/۵ نانو ثانیه و پنجره انرژی آن بازه ۶۵۰–۴۲۵ کیلوالکترون ولت است.

### ۲. ۳ پروتکل ارزیابی **NEMA-2001**

پروتکلهای NEMA، مخصوصا NEMA-2001 [۴]، یک معیار جهانی در ارزیابی و مقایسه خصوصیات و عملکرد اسکنرهای PET با یکدیگر است. از جمله آزمونهایی که استاندارد سنجش آنها در این پروتکل تدوین شده است، آزمون سنجش حساسیت، کسر پراکندگی و نرخ شمارش همزمانیها است. نتایج این آزمونها برای اغلب اسکنرهای PET تجاری، از جمله Discovery RX موجود می‌باشند. به همین دلایل این پروتکل، به عنوان معیار استاندارد در اعتبارسنجی شبیه‌سازی اسکنر PET مورد استفاده قرار گرفت.

مطابق استانداردهای NEMA-2001، فانتوم حساسیت متشکل از۵ پوسته استوانه‌ای آلمینیومی با قطرهای مختلف با طول ۷۰۰ میلیمتر است که در میان یکدیگر قرار گرفته‌اند. ضخامت تمامی پوسته‌ها ۲/۵ میلیمتر است. یک تیوب پلاستیکی که به صورت کاملا متقارن با $^{18}F$ پر شده است، به عنوان چشمه خطی در داخلی‌ترین پوسته قرار داده می‌شود. قطر داخلی و خارجی این تیوب پلی‌اتیلنی به ترتیب ۱ میلیمتر و ۳ میلیمتر است و طول

آن ۸۰۰ میلیمتر می‌باشد. همچنین فانتوم کسر پراکندگی و کارآیی نرخ شمارش، استوانه‌ای از جنس پلی‌اتیلن با قطر ۲۰۳ میلیمتر، طول ۷۰۰ میلیمتر، چگالی ۹۶ گرم بر میلی‌لیتر و وزن تقریبا ۲۳/۵ کیلوگرم است. یک حفره ۶/۴ میلیمتری در راستای محور و با فاصله ۴۵ میلیمتر از مرکز استوانه در سرتاسر استوانه ایجاد شده است. یک تیوب پلاستیکی با قطر داخلی ۳/۲ میلیمتر قطر خارجی ۵ میلیمتر و طول ۸۰۰ میلیمتر به عنوان حامل چشمه خطی در این حفره قرار می‌گیرد.

۲. ۴ بنیان شبیه‌سازی

مطابق با استانداردهای پروتکل NEMA-2001 [۴]، آزمون حساسیت با چشمه خطی $F^{18}$ و فعالیت ۱۶ مگابکرل انجام شد. همچنین برای ارزیابی کسر پراکندگی و نرخ شمارش همزمانیها، مقدار فعالیت چشمه خطی $F^{18}$ از ۲۲۰ مگابکرل تا ۱ گیگابکرل تغییر داده شد. پس از مدلسازی صحیح هندسه و فانتومها در کد GATE، پارامترهای زیر بدین ترتیب انتخاب شدند؛

میانگین رزولوشن انرژی ٪۱۴ در انرژی ۵۱۱ کیلوالکترون‌ولت و کارآیی کوانتمی ٪۹۲/۵ در تمام کریستالها اعمال شد. در پنجره همزمانی ۶/۵ نانوثانیه، از زمانهای مرده ۱۵۰ نانوثانیه و ۷۵ نانوثانیه به ترتیب در بلوک کریستالی و مدارات شمارش همزمانیها استفاده شد. همچنین بافر با حافظه ۳۲ همزمانی در مدارات الکترونیکی شبیه‌سازی شد. در نهایت زمان جمع‌آوری داده در تمام شبیه‌سازی‌ها، ۱۰ ثانیه انتخاب شد.

۳. نتایج

برای اعتبارسنجی، نتایج با داده‌های آزمایشگاهی منتشرشده توسط کمپ و همکارانش [۵] مطابق با استانداردهای NEMA-2001، مقایسه شد. جدول۱، مقایسه حساسیت در اسکنر شبیه سازی شده با GATE و نتایج آزمایشگاهی را در دو حالت فانتوم بر روی محور اسکنر(R0) و به فاصله ۱۰ سانتیمتری از محور اسکنر(R10) و همچنین نسبت این دو حساسیت نشان می‌دهد. حساسیت اسکنر شبیه‌سازی شده خطایی کمتر از ٪۱ نسبت به اسکنر واقعی دارد. همچنین تغییرات حساسیت در مدل شبیه‌سازی شده اسکنر PET بر حسب شعاع، مطابقت بسیار خوبی با داده‌های اندازه‌گیری شده دارد. همانگونه که در ستون سوم جدول۱ مشاهده می‌شود، خطا در نسبت حساسیت در حدود ٪ ۰/۶ است و تایید مهمی در صحت مدل شبیه‌سازی شده محسوب می‌شود.

مقایسه نتایج آزمون کسر پراکندگی(SF) با داده‌های اندازه‌گیری شده نیز نشان می‌دهد که مقدار کسر پراکندگی در پنجره انرژی ۶۵۰-۴۲۵ کیلوالکترون‌ولت بسیار نزدیک به داده‌های آزمایشگاهی است (خطا بین ٪۲/۵ تا ٪۳/۵). این نتایج (جدول۲) صحت عملکرد مدل در این آزمون را نیز تایید می‌کند.

جدول(۱) مقایسه حساسیت اسکنر شبیه سازی شده با GATE و نتایج آزمایشگاهی در دو حالت فانتوم بر محور اسکنر(R0) و به فاصله ۱۰ سانتیمتری از محور(R10)

| مکان فانتوم حساسیت | نتایج آزمایشگاهی(cps/kBq) | نتایج شبیه سازی(cps/kBq) | خطا |
|---|---|---|---|
| بر محور اسکنر(R0) | ۷/۳۰ | ۷/۳۶ | ۰/۸۲ ٪ |
| در فاصله ۱۰cm از محور اسکنر(R10) | ۷/۵۴ | ۷/۵۵ | ۰/۱۳ ٪ |
| نسبت R0/R10 | ۰/۹۶۸ | ۰/۹۷۴ | ۰/۶۲ ٪ |

جدول(۲) مقایسه نتایج آزمون کسر پراکندگی با داده‌های اندازه‌گیری شده در غلظتهای مختلف فعالیت

| | نتایج آزمایشگاهی | داده های حاصل از شبیه سازی در غلظتهای مختلف فعالیت | | |
|---|---|---|---|---|
| | | ۵-۱۵ (kBq/mL) | ۱۵-۲۵ (kBq/mL) | ۲۵-۴۰ (kBq/mL) |
| کسر پراکندگی(SF) | ۳۱/۸٪ | ۳۲/۹٪ | ۳۲/۷٪ | ۳۲/۶٪ |
| میزان خطا | - | ۳/۴۶٪ | ۲/۸۳٪ | ۲/۵۱٪ |

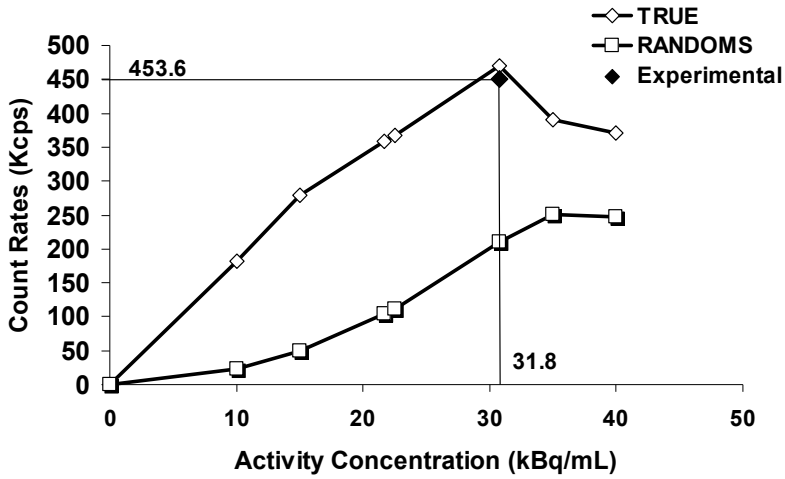
شکل۱، نمودارهای نرخ همزمانیهای درست و تصادفی را در غلظتهای مختلف از فعالیت چشمه نشان می‌دهد. تعداد همزمانیهای تصادفی ۵ برابر کاهش یافته‌اند تا هر دو نمودار در یک شکل نشان داده شوند. در شکل۱، نرخ شمارشهای همزمانی درست با افزایش غلظت فعالیت ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. این کاهش بدلیل ظرفیت محدود بافرها و اصطلاحا سرریزشدن اطلاعات از آنها صورت می‌گیرد. نرخ همزمانیهای تصادفی نیز در غلظتهای فعالیت بالا به اشباع می‌رسد. در شکل۱ بیشینه مقدار منحنی شمارش همزمانیهای درست ۴۵۵/۱۹ kcps است که در غلظت فعالیت ۳۰/۸ kBq/mL رخ می‌دهد و نسبت به داده آزمایشگاهی ۴۵۳/۶ kcps خطایی کمتر از ۰/۵٪ دارد.

برای داشتن ارزیابی واقع بینانه‌تری از عملکرد اسکنر، از مفهوم نویز معادل نرخ شمارشها (NECR) استفاده شده است. NECR رابطه‌ای خطی با مربع سیگنال به نویز تصویر دارد و با رابطه(۱) تعریف می‌شود؛

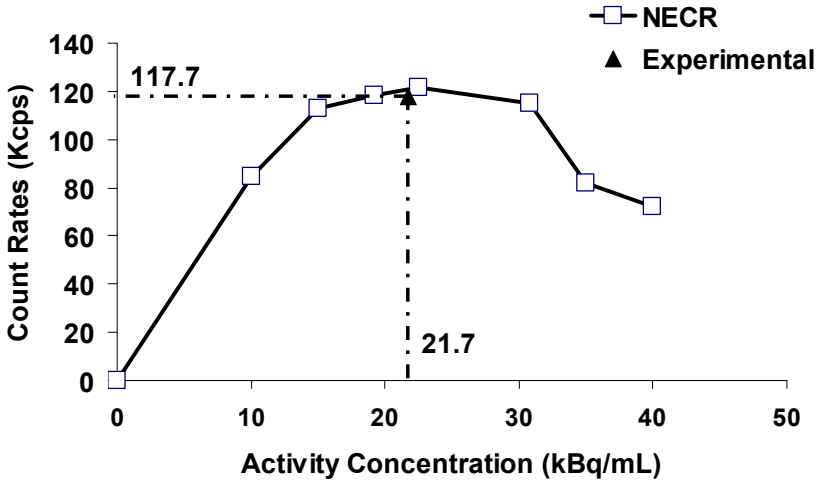
$$NECR = T^2 / (T + S + R) \qquad \text{رابطه(۱)}$$

در رابطه۱ حروف T، S و R به ترتیب نرخ شمارش همزمانیهای درست، پراکنده و تصادفی هستند. در شکل۲، بیشینه مقدار منحنی NECR برابر ۱۲۰/۴۱۶ kcps است که در غلظت فعالیت ۲۲/۵ kBq/mL رخ می‌دهد و به ترتیب خطایی کمتر از ۲/۳٪ و ۳/۷٪ با داده‌های آزمایشگاهی دارد. بیشینه مقدار منحنی NECR در داده‌های آزمایشگاهی برابر ۱۱۷/۷ kcps است که در غلظت فعالیت ۲۱/۷ kBq/mL رخ می‌دهد این مطابقت بسیار زیاد تایید مهم دیگری بر اعتبار مدل شبیه‌سازی شده محسوب می‌شود. رسم منحنی NECR در بازه غلظتهای از صفر

تا ۴۰ kBq/mL (شکل۲) نشان می‌دهد مقادیر NECR در بازه نسبتا بزرگی از غلظتهای فعالیت چشمه نزدیک به مقادیر بیشینه خود است. همچنین بیشینه مقدار منحنی NECR در غلظت




شکل(۱) نمودارهای نرخ همزمانیهای درست و تصادفی و بیشینه مقدار داده آزمایشگاهی برای شمارشهای درست[۵]در غلظتهای مختلف از فعالیت چشمه. تعداد همزمانیهای تصادفی ۵ برابر کاهش یافته‌اند تا هر دو نمودار در یک شکل نشان داده شوند.




شکل(۲) نمودار منحنی NECR به همراه بیشینه مقدار NECR از داده آزمایشگاهی [۵] در غلظتهای مختلف از فعالیت چشمه

نسبتا کمی از فعالیت چشمه رخ می‌دهد. این دو نکته مخصوصا زمانی که میزان دز رادیوداروی تزریقی در بدن بیمار حایز اهمیت باشد، قابلیت بالای اسکنر را نشان می‌دهد.

## ۴. نتیجه‌گیری

با استفاده از ماژولهای دیجیتایزر کد و مطابق با الزامات پروتکلهای NEMA؛ آزمونهای حساسیت، کسر پراکندگی و کارآیی نرخ شمارش بدرستی شبیه‌سازی شدند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد کد GATE می‌تواند جنبه‌های اصلی کارآیی اسکنر PET در سیستم Discovery RX را بدرستی شبیه‌سازی کند. اسکنر PET در سیستم Discovery RX اسکنری است که حساسیت زیاد، NECR بالا و کسر پراکندگی پایینی دارد. استفاده از این مدل اعتبار یافته، نخستین گام مهم در انجام مطالعات شبیه‌سازی و بررسی پارامترهای موثر در کارآیی اسکنر PET در این مدل و دیگر مدلهای مشابه، با هدف بهبود عملکرد و توسعه کاربردهای بالینی آنها است. همچنین استفاده از این مدل شبیه‌سازی شده، نقش بزرگی در افزایش عملکرد و افزایش کیفیت و صحت تصاویر PET در مطالعات و تحقیقات آینده ایفا می‌کند.

## ۵. مراجع

*[1] D. Strul, G. Santin, D. Lazaro, V. Breton, and C. Morel, "GATE (Geant4 application for tomographic emission): A PET/SPECT general purpose simulation platform," Nucl. Phys. B 125, 75–79 (2003).*
*[2] GE Healthcare Technologies, Waukesha, WI, USA, http://www.GE.com*
*[3] OpenGATE Collaboration, GATE Users Guide, May 2004, http://www-lphe.epfl.ch/GATE/*
*[4] "NEMA standards publication NU 2-2001: Performance measurements of positron emission tomographs," Technical report (National Electrical Manufactures Association, 2001).*
*[5] Brad J Kemp; Chang Kim; John J Williams; Alexander Ganin; Val J Lowe, "NEMA NU 2-2001 Performance Measurements of an LYSO-Based PET/CT System in 2D and 3D Acquisition Modes," The Journal of Nuclear Medicine; 47,12, Dec 2006.*