فصل اول

۱-۱ مونت کارلو

امروزه افزایش مقالات علمی که مبتنی بر تحقیقات انجام گرفته با کمک روش مونت‌کارلو می‌باشند، نشان از عمومیت یافتن این روش دارد. از جمله این تحقیقات می‌توان به تعیین توزیع واپاشی، طراحی باریکه‌ساز و تاثیر متغیرهای مختلف بر کیفیت تصویر اشاره نمود. لذا این سوال پیش می‌آید که وجود چه خصوصیتی در روش مونت‌کارلو این بازه گسترده از امکانات را برای ما فراهم می‌نماید.

شبیه‌سازی به کمک روش مونت‌کارلو را می‌توان به عنوان روشی آماری تعریف نمود که از اعداد تصادفی به عنوان پایه برای شبیه‌سازی هرگونه فرآیند خاص استفاده می‌کنند. این روش اولین بار در خلال جنگ جهانی دوم و آزمایشات مرتبط با پروژه منهتن و به دلیل شباهت آن با الگوریتم بازی‌های شانسی، به مرکزیت مونت‌کارلو، نامگذاری گردید. در بسیاری از کاربردهای این روش، پروسه فیزیکی را می‌توان مستقیما شبیه‌سازی نمود. تنها نیازمندی آن هم تعریف واضح توابع توزیع احتمال برای سیستم و پروسه، می‌باشد. اگر این توابع را بتوان به صورت دقیق مشخص نمود، شبیه‌سازی با نمونه‌برداری اتفاقی از این توابع، امکان‌پذیر می‌شود. لذا تعداد بالایی از *اتفاقات* برای به‌دست آوردن جواب دقیق باید شبیه‌سازی، ذخیره و تحلیل گردند.

در کل شبیه‌سازی دارای مزایای زیادی نسبت به روش‌های آزمایشگاهی می‌باشد. بعنوان مثال، برای هر مدل داده-شده می‌توان هر متغیری را که بخواهیم تغییر دهیم و اثر این تغییرات را بر بازدهی سیستم تحت مطالعه، مشاهده نماییم. در این میان حتی می‌توان متغیرهایی را که در واقعیت امکان دستکاری آنها وجود ندارد، تغییر داد و دستگاه ایده‌آل را شبیه‌سازی نمود. با توجه به موارد ذکرشده، بهبود دستگاه‌های تصویربرداری را می‌توان به عنوان هدفی اصلی در شبیه‌سازی تعریف نمود. همچنین مطالعه تاثیرات تغییر مشاهده‌پذیرهایی که در واقعیت امکان تغییر آنها وجود ندارد، از دیگر امکاناتی است که شبیه-سازی در اختیار ما قرار می‌دهد. برای مثال می توان به این نمونه اشاره کرد در عمل اندازه‌گیری بخش پراکنده ناشی از یک توزیع به صورت کاملا جدا از بخش ناپراکنده آن، امکان پذیر نمی‌باشد اما شبیه‌سازی این امکان را برای ما فراهم می‌کند.

۱-۲ روش مونت کارلو

بخش بنیادین در هر محاسبه مبتنی بر روش مونت‌کارلو، تولید اعداد تصادفی می‌باشد. برای مثال می‌توان اتفاقات طبیعی مانند واپاشی پرتوزا را تولید نمود، اما این پروسه بسیار زمان‌بر خواهد بود. به بیان دیگر، محاسبه اعداد تصادفی واقعی

توسط تابع توزیع یکنواخت و توالی اعداد معلوم، قابل پیش‌بینی نمی‌باشد. مثالی برای این مهم *الگوریتم تجانسی خطی*[1] می‌باشد که در آن اعداد تصادفی I_n از عدد اولیه I_0 و با توجه به رابطه ۱-۱ محاسبه می‌شوند.

$$I_{n+1} = (aI_n + b) \bmod (2^k) \qquad ۱-۱$$

که در آن a , b ثابت و k وابسته به نرم‌افزار مورد استفاده می‌باشد. اگر مقدار b=0 آنگاه به این رابطه *مولد اعداد تصادفی متجانس افزایشی*[2] می‌گویند.

۱-۳ نمونه‌گیری

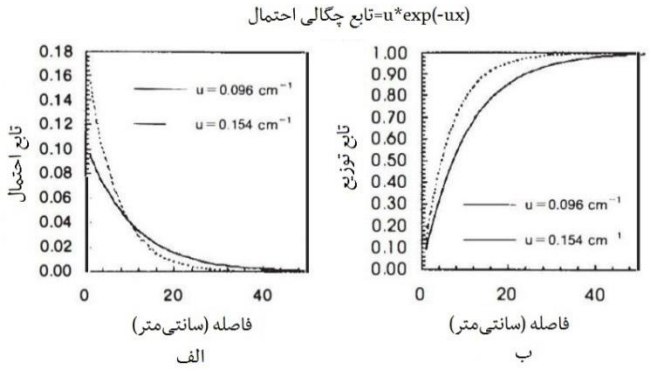
در تمامی شبیه‌سازی‌های مبتنی بر مونت‌کارلو برخی از اطلاعات اولیه در مورد فرآیندی که باید شبیه‌سازی شود، مورد نیاز است. این شرایط اولیه معمولا توسط توابع توزیع احتمال بیان می‌شوند. برای مثال هنگامی که اندرکنش‌های فوتونی بررسی می‌شوند، اطلاعات مرتبط با سطح مقطع جزئی و کلی، که طول مسیر و نوع اندرکنشهای ایجادشده را مشخص می‌کند، توسط این توابع مشخص می‌گردند. از این اطلاعات، انتخابی تصادفی برای اندرکنش و مسیر پیمایش تا برخورد بعدی محاسبه می‌شود. این توابع توزیع در بازه $[a,b]$ تعریف شده و انتگرال‌پذیر می‌باشد که امکان بهنجارش را فراهم می‌سازد. برای به‌دست آوردن یک متغیر آماری استاندارد ما نیازمند به دو تابع توزیع مختلف هستیم.

۱-۳-۱ روش تابع توزیع

یک *تابع توزیع احتمال انباشتی*[3] $cpdf\ (x)$ از انتگرالگیری یک تابع توزیع احتمال بر بازه $[a,x]$ به‌دست می‌آید. در اینجا اگر نمونه اتفاقی x را با یک توزیع نرمال بر بازه $[0,1]$ جایگزین کنیم، آنگاه تابع انباشتی ما نیز بهنجار خواهد شد.

$$cpdf\ (x) = \int_a^x pdf\ (x')dx' \qquad ۲-۱$$

[1] Linear congruental algorithm
[2] Multiplicative congruental random number generator
[3] Cumulative probability distribution function



شکل ۱-۱ : تابع توزیع احتمال (الف) و تابع توزیع مرتبط (ب)

۱-۳-۲ روش عدم پذیرش

در کل روش تابع توزیع با توجه به محدودیت‌ها و سختی‌های ریاضی مرتبط، به ندرت مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این موارد از *روش عدم پذیرش*[۴]، طی سه مرحله ذیل، استفاده می‌گردد.

۱- تابع توزیع احتمال را محدود به بازه $[a,b]$ نموده و تابع بهنجارشده‌ای را به صورت $pdf^{*}(x) = pdf(x) / \max[pdf(x)]$ با بیشینه واحد تعریف می‌کنیم.

۲- نمونه گیری x به عنوان یک توزیع یکنواخت در بازه $[a,b]$ با توجه به رابطه $x = a + R_1(b-a)$، که در آن R_1 عددی تصادفی می‌باشد.

۳- در نظر گرفتن عدد تصادفی دیگری مانند R_2 به عنوان محکی برای پذیرش یا عدم پذیرش x . این محک بدین صورت انجام می‌پذیرد که مقدار تابع $pdf^{*}(x)$ در x محاسبه شده و امتحان می‌شود که آیا $R_2 < pdf^{*}(x)$. اگر این نامساوی برقرار باشد آنگاه x به عنوان مقدار احتمالی صحیح قبول می‌گردد. در غیر این صورت به مرحله ۲ باز می‌گردیم.

[4] Rejection method

۱-۳-۳ روش‌های ترکیبی

ترکیبی از دو روش ذکرشده را می‌توان به عنوان روشی بهینه برای فائق آمدن بر مسائل پیچیده‌تر و الگوریتم‌هایی که جداگانه بر هرکدام از روش‌های ذکرشده متکی‌اند، استفاده نمود. در این روش، تابع توزیع احتمال ترکیبی از دو تابع توزیع احتمال دیگر می‌باشد که طبق روش زیر با هم ادغام می‌گردند:

۱- اولین تابع توزیع احتمال $pdf_A(x)$ را در بازه $[a,b]$ بهنجار می‌کنیم به‌گونه‌ای که انتگرالش در این بازه برابر ۱ باشد.

۲- دومین تابع توزیع احتمال $pdf_B(x)$ را به گونه‌ای بهنجار می‌کنیم که بیشینه آن در بازه مورد نظر برابر ۱ باشد.

۳- مقدار x را از $pdf_A(x)$، طبق روش تابع توزیع (روش ۱)، انتخاب می‌کنیم.

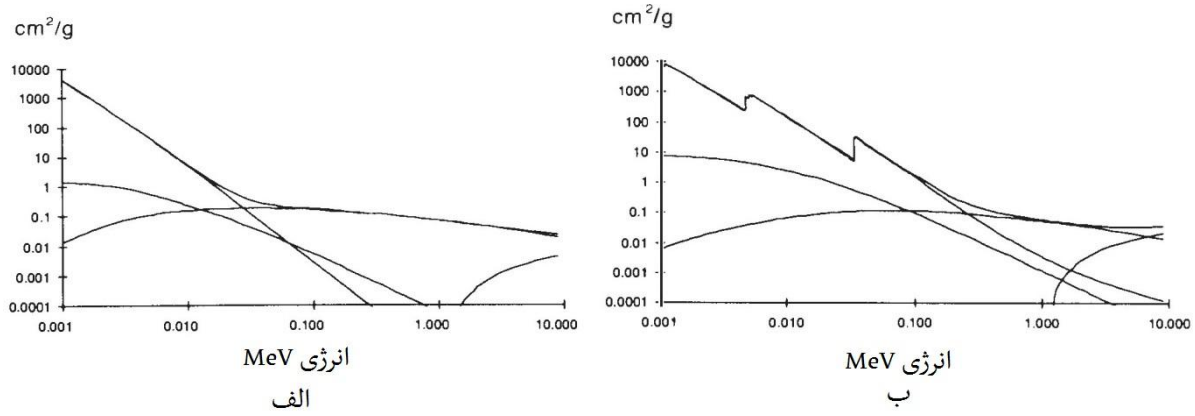
۴- روش عدم پذیرش را بر $pdf_B(x)$ با مقدار اعمال x می‌کنیم و امتحان می‌کنیم که آیا R از مقدار $pdf_B(x)$ کمتر است یا نه، اگر کمتر بود به مرحله سوم برمی‌گردیم.

۱-۴ نمونه‌گیری در شبیه‌سازی اندرکنش‌های فوتونی

۱-۴-۱ داده‌های سطح مقطع[5]

از آنجا که دقت تابع توزیع احتمال اثر مستقیمی بر دقت محاسبات دارد، لذا داده‌های مرتبط با جذب و پراکنش فوتون‌ها نقشی بنیادین را در شبیه‌سازی‌ها ایفا می‌کنند. سطح مقطع فوتونی مرکب را می‌توان به صورت دقیق (جز برای انرژی‌های نزدیک به لبه‌های جذب) از جمع وزنی سطوح مقاطع متشکله، محاسبه نمود. به همین منظور برنامه‌ای رایانه‌ای که سطوح مقطع عمومی و ضرایب میرایی را برای عناصر منفرد و مرکب محاسبه می‌نماید، با نام $XCOM$ [۱] طراحی شده‌است. این برنامه داده‌های مرتبط با هر عنصر یا ترکیب، در بازه انرژی $[1\,eV, 100\,GeV]$ را با کمک پایگاه داده موجود در هسته مرکزی‌اش، محاسبه می‌نماید. این نرم افزار سطح مقطع کلی برای عناصر از جمله ضرایب تضعیف، سطح مقطع جزئی پراکنش ناهمدوس، پراکنش همدوس، جذب فوتوالکتریک و تولید زوج در حیطه ذرات اتمی و الکترونی را محاسبه می‌نماید. برای ترکیبات نیز مقادیر جدول-بندی‌شده شامل ضرایب کلی و جزئی اندرکنش مواد، که برآورد عناصر متشکله می‌باشند، را محاسبه می‌نماید. در برنامه $XCOM$ پایگاه داده‌ای جامع با کمک جداول هسته‌ای مرجع و استاندارد، تهیه و اعمال شده‌است.

[5] Cross-Section Data



شکل ۱-۲ – ضرایب تضعیف جزئی و کلی حاصله از $XCOM$ برای (الف) آب (ب) یدید سدیم

۱-۴-۲ طول سیر فوتون[۶]

طول سیر فوتون در مواد را باید برای محاسبه نقطه برخورد بعدی، به صورت دقیق محاسبه نمود. به صورت عمومی، این طول سیر به انرژی فوتون، چگالی ماده و ترکیبات موجود بستگی دارد.

روش تابع توزیع را می‌توان به عنوان نمونه‌گیر استفاده نمود. اگر تابع توزیع به صورت زیر باشد:

$$p(x) = \mu \exp(-\mu x) \qquad ۳-۱$$

آنگاه احتمال اینکه فوتون فاصله d را طی کند با کمک انتگرال زیر محاسبه می‌شود:

$$P(d) = \int_0^d \mu \exp(-\mu x) dx = \left[-\exp(-\mu x)\right]_0^d = 1 - \exp(-\mu d) \qquad ۴-۱$$

برای نمونه‌گیری طول سیر، یک عدد واحد مانند R با $P(d)$ جایگزین شده و معادله برای d حل می‌شود.

$$P(d) = [1 - \exp(-\mu d)] \qquad ۵-۱$$

$$d = -\frac{1}{\mu}\ln(1-R) = -\frac{1}{\mu}\ln(R) \qquad ۶-۱$$

و دلیل جایگزینی $(1-d)$ با d به این دلیل است که توزیعشان مشابه می‌باشد.

[6] Photon path length

۱-۴-۳ گزینش نوع اندرکنش فوتونی[7]

احتمال وقوع یک اندرکنش خاص وابسته به ضرایب تضعیف جزئی می‌باشد. این مقادیر برای مواد و انرژی-های مختلف، جدولبندی شده‌اند. مجموع ضرایب تضعیف جزئی برای اثر فوتوالکتریک (τ)، اندرکنش کامپتون $(\sigma_{incoh.})$، اندرکنش همدوس $(\sigma_{coh.})$ و تولیدزوج (κ)را ضریب تضعیف خطی $\mu = \tau + \sigma_{incoh.} + \sigma_{coh.} + \kappa$ یا ضریب تضعیف ماده، در صورت بهنجارش چگالی، می‌نامند. برای گزینش یک اندرکنش خاص، عدد تصادفی R را در نظر گرفته و شرط $R < \tau / \mu$ را امتحان می‌کنیم، اگر برقرار بود، اثر فوتوالکتریک اتفاق می‌افتد. در غیر این صورت اگر $R < (\tau + \sigma_{incoh.}) / \mu$، اندرکنش کامپتون به وقوع می‌پیوندد. اگر این حالت هم برقرار نبود، $R < (\tau + \sigma_{incoh.} + \sigma_{coh.}) / \mu$ را امتحان می‌نماییم که بیانگر یک اندرکنش همدوس می‌باشد. اگر هیچ‌کدام برقرار نباشد، تولید زوج خواهیم داشت و به وضوح مشخص است که در این حال انرژی فوتون از $1.022\ MeV$ بیشتر می‌باشد.

۱-۴-۴ پراکنش ناهمدوس فوتون

پراکنش ناهمدوس، که به طور عمومی پراکنش کامپتون نامیده می‌شود، اندرکنش بین الکترون فرودی و اتم می‌باشد که انرژی خود را از دست داده و تغییر جهت می‌دهد. انرژی فوتون پراکنده $h\nu'$ بوده و وابسته به انرژی اولیه فوتون، $h\nu$، و زاویه پراکنش ، θ، است که طبق رابطه زیر تعریف می‌شود.

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + (h\nu / m_0 c^2)[1 - \cos\theta]} \qquad ۷-۱$$

یکی از روش‌های معمول در نمونه‌گیری انرژی و مسیر پراکنش کامپتون، *الگوریتم کان*[8] [۲] می‌باشد.این الگوریتم بر پایه *معادله سطح مقطع کلاین-نیشینا*[9] استوار است که فرض می‌کند الکترون آزاد بوده و در ماده پراکن کننده در حالت پایه است.

$$d_e\sigma(\theta) = \left(\frac{r_0^2}{2}\right)\left(\frac{\lambda}{\lambda'}\right)^2\left(\frac{\lambda}{\lambda'} + \frac{\lambda'}{\lambda} - 1 + \cos^2\theta\right)d\Omega \qquad ۸-۱$$

[7] Selection of the type of photon interaction
[8] Kahn Algorithm
[9] Klein-Nishina Cross-Section Algorithm

روش نمونه‌گیری کان بر پایه روش ترکیبی بوده و طبق کد *فرترن*[10] زیر عمل می‌کند.

```
ALPHA = HV / 511.
TEST = (2.*ALPHA + 1.) / (2.*ALPHA + 9.)

1       RANDOM = 2. * RAN(SEED)
        IF (RAN(SEED).LT.TEST) THEN
                UU = 1. + ALPHA * RANDOM
                IF (RAN(SEED) . GT. 4.*(UU-1) / (UU*UU)) GOTO 1
                CONTEST = 1 – RANDOM
        ELSE
                UU = (2. * ALPHA + 1.) / (ALPHA * RANDOM + 1.)
                CONTEST = 1. – (UU-1.)/ALPHA
                IF (RAN(SEED)) .GT. 0.5*(CONTEST*CONTEST + (1. / UU)
GOTO 1
        ENDIF
```

در حالتی که انرژی فوتون ورودی برابر با انرژی بستگی الکترون باشد، فرض در نظر گرفتن اینکه الکترون در حالت پایه بوده‌است، صحیح خواهد بود. سطح مقطع در این حالت به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$d_a\sigma_{incoh}(\theta) = d_e\sigma_{KN}(\theta)S(x,Z) \qquad ۹-۱$$

که در آن $S(x,Z)$ تابع پراکنش ناهمدوس می‌باشد. Z عدد اتمی و $x = (\sin\theta/2)/\lambda$ متغیر تغییر لختی، که وابسته به انرژی فوتون و زاویه پراکنش است، می‌باشد.

۱-۴-۵ پراکنش همدوس

پراکنش همدوس نوعی از اندرکنش بین فوتون و اتم است که در آن جهت حرکت فوتون تغییر می‌نماید اما انرژی آن ثابت می‌ماند. این نوع از اندرکنش فوتون را بیشتر در مسیر مستقیم پراکنده می‌کند. روش نمونه‌گیری برای پراکنش همدوس برا پایه سطح مقطع تامپسون می‌باشد که بر ضریب فرم اتمی، $F(x,Z)$، تقسیم می‌گردد.

[10] FORTRAN

$$d_a\sigma(\theta) = (d_e\sigma_{TH}(\theta))F^2(x,Z) = (r_0^2/2)(1+\cos^2\theta)F^2(x,Z)2\pi\sin\theta\, d\theta \qquad ۱۰-۱$$

می‌توان نشان داد [۳] که احتمال پراکنش فوتون از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$P(\theta)d\theta = K(h\nu,Z)G(\theta)f(x^2,Z) \qquad ۱۱-۱$$

که در آن $K(h\nu,Z)$ برای یک عدد اتمی خاص و انرژی معین، مقداری ثابت می‌باشد. $G(\theta)$ نیز بازه ثابتی دارد

و

$$f(x^2,Z) = \frac{F^2(x,Z)}{\int_0^{x^2_{\max}} F^2(x,Z)dx^2} \qquad ۱۲-۱$$

مقدار x^2 از تابع توزیع $f(x^2,Z)$ از پیش محاسبه شده، نمونه‌گیری می‌شود. از این مقدار می‌توان زاویه پراکنش را محاسبه نمود و رابطه $R < G(\theta)$ را تحقیق کرد.

۱-۴-۶ محاسبات دستگاه مختصات

پس از نمونه‌گیری جهت و طول حرکت یک فوتون جدید، دستگاه مختصات قائم جدید منطبق بر اندرکنش بعدی باید محاسبه شود. این امر را می‌توان با ملاحظات هندسی زیر به دست آورد:

$$\begin{array}{c}(x',y',z')\\ x' = x + du' \quad y' = y + dv' \quad z' = z + dw'\end{array} \qquad ۱۳-۱$$

که در آن d فاصله بین نقطه قبلی، (x,y,z)، و نقطه جدید، (x',y',z')، می‌باشد. θ و ϕ زوایای سمتی و جهتی در مختصات کروی بوده که جهت حرکت را مشخص می‌نمایند.

$$\begin{aligned}
u' &= \sin\theta'\cos\phi' = u\cos\Theta + \sin\Theta\,(w\cos\Phi\cos\phi - \sin\Phi\sin\phi)\\
v' &= \sin\theta'\sin\phi' = v\cos\Theta + \sin\Theta\,(w\cos\Phi\sin\phi + \sin\Phi\cos\phi)\\
w' &= \cos\theta' = w\cos\Theta - \sin\Theta\,(\sin\theta\cos\Phi)\\
v &= \sin\phi\sin\theta\\
u &= \sin\theta\cos\phi\\
w &= \cos\theta
\end{aligned} \qquad ۱۴-۱$$

۱-۵ روش کاهش انحراف معیار[11]

در برخی موارد شبیه‌سازی‌های مونت‌کارلو بسیار زمان‌بر می‌باشند. این امر زمانی اتفاق می‌افتد که فوتون‌های بسیاری که توسط روش مستقیم تولید می‌شوند، مورد قبول واقع نشوند. برای مثال می‌توان به یک منبع نقطه‌ای اشاره کرد که احتمال آنکه در فاصله دوری از آن یک آشکارساز بتواند فوتون خاصی را آشکارسازی کند، بسیار ضعیف است. روش‌های کاهش انحراف معیار را می‌توان برای افزایش کارایی شبیه‌سازی و مشخصات آماری تصویر به‌کار گرفت. این روش‌ها مبتنی بر اختصاص وزن[12]، W، به هر فوتون می‌باشد. این وزن مشخص می‌نماید که آیا یک فوتون خاص می‌تواند در یک رویداد خاص حضور داشته باشد یا خیر.

۱-۶ شبیه‌سازی

برای شبیه‌سازی رایانه‌ای تصویربرداری از تیروئید، از بسته نرم‌افزاری SimSET[13] استفاده گردید. این بسته نرم-افزاری از روش مونت‌کارلو برای مدلسازی روند فیزیکی و ابزار به‌کار رفته در تصویربرداری پرتوی استفاده می‌گردد. این بسته نرم‌افزاری از سال ۱۹۹۳ به عنوان یکی از نرم‌افزارهای اصلی توسط بسیاری از گروه‌های تحقیقی مرتبط با مطالعات پزشکی و تصویربرداری هسته‌ای، استفاده می‌شود. این نرم‌افزار رایگان توسط بخش پزشکی دانشگاه واشنگتون تولید شده و از آن زمان تا کنون، و با کمک کاربران متعدد، اشکالات نسخه اولیه آن برطرف گردیده و بسیار از قابلیتهای جدید نیز به آن اضافه شده‌است. نسخه مورد استفاده در این پایان‌نامه نسخه ۲,۹,۱ می‌باشد که در تاریخ ۱۵ جولای ۲۰۱۱ عرضه گردیده‌است. برای آشنایی با روال توسعه آن می‌توان به راهنمای نرم‌افزار [۴] مراجعه نمود.

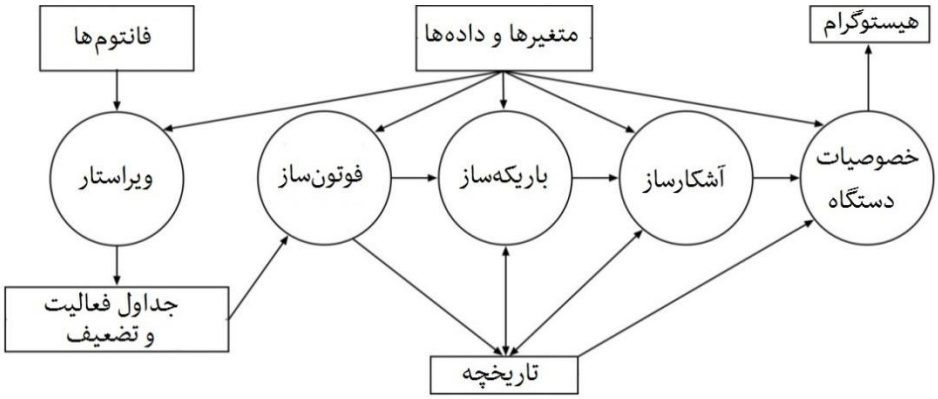
۱-۷ آشنایی با SimSET

همانگونه که اشاره شد SimSET از روش مونت‌کارلو برای محاسبات خود استفاده می‌نماید. ساختار آن به صورت قطعه‌ای[14] بوده و هسته اصلی آن *سازنده سابقه فوتون*[15] یا PHG می‌باشد(شکل ۱-۳). یک شبیه‌سازی ساده شامل ردگیری

[11] Variance Reduction Method
[12] Weight
[13] Simulation Software for Emission Tomography
[14] Modular
[15] Photon History Generator

تک تک واپاشی‌ها می‌باشد. PHG یک واپاشی ایجاد کرده و فوتونهای ایجاد شده را در طی عبور از *فانتوم*[۱۶] ردیابی می‌نماید. بخش *باریکه‌ساز*[۱۷] فوتونها را از PHG دریافت کرده ور ردیابی می‌نماید. سپس این فوتونها وارد بخش *آشکارساز*[۱۸] می‌شوند. البته باید در نظر داشت که وجود باریکه‌ساز الزامی نبوده و با تمهیداتی می‌توان آن را از روند شبیه‌سازی حذف نمود. تمامی این مراحل در یک فایل *تاریخچه*[۱۹] ذخیره می‌گردد تا برای مقاصد *عیب‌یابی*[۲۰] استفاده گردد.

برای یک شبیه‌سازی پیشرفته می‌توان فانتوم‌های دلخواه تعریف نمود یا از فانتوم‌های دیجیتال مانند Zubal, MCAT استفاده نمود و حتی آنها را با توجه به نیازهای مورد انتظار تغییر داد. علاوه بر آن، امکان *شخصی‌سازی*[۲۱] تمامی قسمت‌ها وجود دارد.



شکل ۱-۳ ساختار اصلی نرم‌افزار SimSET

۱-۸ استفاده از نرم‌افزار

پس از نصب نرم‌افزار در محیط *لینوکس*[۲۲] یا مک[۲۳] و اطمینان از نصب بودن کتابخانه‌های[۲۴] نرم‌افزاری لازم، می‌توان اقدام به اجرای برنامه نمود. استفاده از آن به سادگی استفاده از برنامه‌های روزمره نبوده و نیازمند ترفندهای برنامه‌نویسی و آشنایی با *زبان داده‌ها*[۲۵] می‌باشد.

16 Phantom
17 Collimator Module
18 Detector Module
19 History File
20 Debugging
21 Customization
22 Linux
23 MAC OX

- **قدم اول: تعریف توزیع فعالیت و واپاشی**[۲۶]

بدین منظور باید با کمک *ویراستار*[۲۷] ابعاد و چینش هندسی فانتوم مورد نظر را تعیین نمود. سپس جدول توزیع فعالیت و واپاشی را برای فانتوم تعریف شده، معین کرد.

- **قدم دوم: پیکربندی PHG**

در این مرحله ما با سه موضوع مهم روبرو خواهیم بود:

۱. گزینه‌های مرتبط با شبیه‌سازی از جمله: تعداد واپاشی، نوع شبیه‌سازی، الگوریتم مورد استفاده و ...
۲. مشخص نمودن هندسه *استوانه هدف*[۲۸] به منظور شناساندن اطلاعات مرتبط با ردیابی فوتون‌ها، زاویه دید.
۳. تعریف فایلهای مرتبط با ورودی و خروجی شبیه‌سازی.

- **قدم سوم: برپایی باریکه‌سازها**

در این مرحله انتخاب یکی از گزینه‌های زیر مد نظر می‌باشد.

Simple PET	for 3D PET
Monte Carlo PET	for 2D PET
UNC SPECT	for SPECT purposes
Monte Carlo slat collimators	for DHCI purposes

استفاده از باریکه‌ساز مناسب، تعیین پارامترهای درست و رعایت هندسه آن از مهم‌ترین بخش‌های یک شبیه‌سازی علمی می‌باشد.

- **قدم چهارم: برپایی آشکارساز**

در این مرحله انتخاب یکی از پنج آشکارساز زیر مد نظر می‌باشد.

Simple	(PET and SPECT) - just performs Gaussian energy blurring
Planar	(SPECT)
DHCI	(Dual-Head Coincidence Imaging)
Cylindrical PET	
Block detectors	

[24] Libraries
[25] Data
[26] Activity and Attenuation Distribution
[27] Object Editor
[28] Target Cylinder

که بسته به نوع شبیه‌سازی انتخاب می‌گردد.

- **قدم پنجم: تنظیم خروجی**

فوتون‌های آشکارسازی‌شده به صورت یک هیستوگرام[۲۹] توسط این بخش ثبت می‌گردند. این ثبت می‌تواند به صورت سینوگرام[۳۰]، پروجکشن[۳۱] یا دیگر فرمت‌های استاندارد مد نظر دیگر باشد. تعریف بازه انرژی برای ثبت فوتون‌ها نیز در این قسمت انجام می‌گیرد.

- **قدم ششم: اجرای شبیه‌سازی**

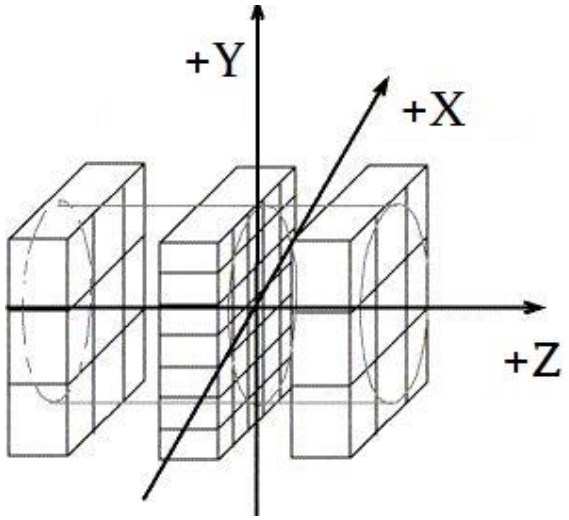
حال آماده هستیم تا در محیط متنی و با اجرای دستور مناسب، شبیه‌سازی را آغاز نماییم. بسته به متغیرهای تعریف شده و سخت‌افزار مورد استفاده هر شبیه‌سازی می‌تواند بین چند دقیقه تا چند روز زمان‌بر باشد.

۱-۹ ویراستار

۱-۹-۱ ویراستار چیست؟

ابعاد و چینش هر فانتوم در فایلی که توسط کاربر پیکربندی می‌شود، معین می‌گردد. مشخصات ابعاد برای فعالیت و واپاشی در یک شبیه‌سازی خاص باید یکسان باشد، اما پیکربندی هرکدام متفاوت می‌باشد. هندسه دستگاه بر مبنای دستگاه مختصات قائمه و مطابق شکل ۱-۴ می‌باشد.

[29] Histogram
[30] Sinogram
[31] Projection

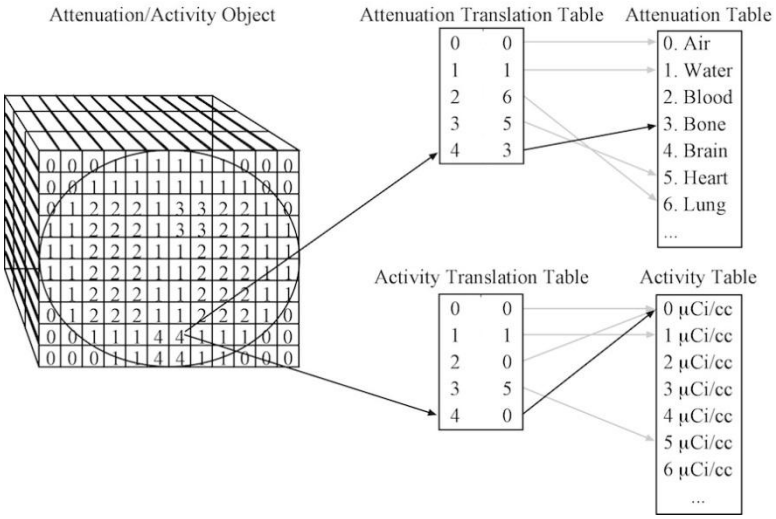


شکل ۱-۴ دستگاه مختصات استفاده شده در SimSET

باید در نظر داشت که نقطه (۰و۰و۰) مرکز محوری و فرامحوری تصویربرداری می‌باشد. فانتوم دارای حداقل یک *لایه*[۳۲] می‌باشد. این لایه ها دارای ابعاد مشابه در راستای X و Y بوده، اما ضخامت آنها در راستای Z متفاوت می-باشد. چینش فانتوم بوسیله تقسیم هر لایه به *خانه‌های*[۳۳] مشخص، تعیین می‌گردد. به کمک ساختار خانه‌ای به کار رفته در این نرم‌افزار، توانایی ما برای تعیین دقیق نوع بافت و میزان پرتوزایی آن، بهبود یافته‌است.

برای شناساندن نوع بافت و میزان پرتوزایی آن باید از یک جدول استاندارد بهره جست. این جدول اعداد صحیح را به عنوان ورودی دریافت کرده و آنها را به بافت‌های مشخص مرتبط می‌سازد. علاوه بر آن، به هنگام استفاده از فانتوم-های دیجیتالی از پیش ساخته‌شده، با کمک جدولهای کمکی، مفاهیم به‌کاررفته در آن فانتوم‌ها را برای نرم‌افزار قابل فهم می‌نماید. نمونه ای از کاربرد این جدول در شکل ۱-۵ نشان داده شده‌است.

[32] Slice
[33] Voxel



شکل ۱-۵ نمونه‌ای از معادلسازی برای شناسایی فعالیت و واپاشی در SimSET

پس از آنکه ابعاد، چینش و متعاقب آن متغیرهای فعالیت و واپاشی فانتوم مشخص گردید، یک لایه خارجی به عنوان *استوانه هدف*[۳۴] تعریف می‌گردد بزرگترین استوانه محاط بر فانتوم می‌باشد. این استوانه مرز میان فانتوم و حداقل فاصله آشکارساز از آن می‌باشد که در صورت استفاده از باریکه‌ساز، ضخامت باریکه‌ساز به این مرز اضافه می‌گردد.

جدول استاندارد SimSET برای معادلسازی در جدول ۱-۱ آورده‌شده‌است.

جدول ۱-۱ – جدول معادلسازی بافت در SimSET

شناسه تضعیف	ماده
0	هوا
1	آب
2	خون
3	استخوان
4	مغز
5	قلب
6	ریه
7	ماهیچه
8	سرب
9	یدید سدیم
10	BGO
11	آهن

[34] Object Cylinder

گرافیت	12
قلع	13
GI Tract	14
Connective tissue	15
مس	16
Perfect absorber	17
LSO	18
GSO	19
آلومینیوم	20
تنگستن	21
کبد	22
چربی	23
LaBr3	24
Low viscosity polycarbonate	25
NEMA polyethylene	26
Polymethyl methylcrylate	27
Polystyrene fibers	28
LYSO	29

۱-۹-۲ - نمونه‌ای از یک فایل PHG

این فانتوم شامل ۱۲ لایه می‌باشد که هرکدام ۴سانتی‌متر ضخامت دارند. مساحت هر لایه ۶۴ در ۶۴ سانتی‌متر مربع بوده و به ۱۲۸در۱۲۸ خانه تقسیم گردیده‌اند، لذا حجم هر خانه ۴در۰٫۵در۰٫۵سانتی‌متر مکعب می‌باشد. این ابعاد مناسب برای محاط شدن بر یک بالاتنه استاندارد می‌باشد.

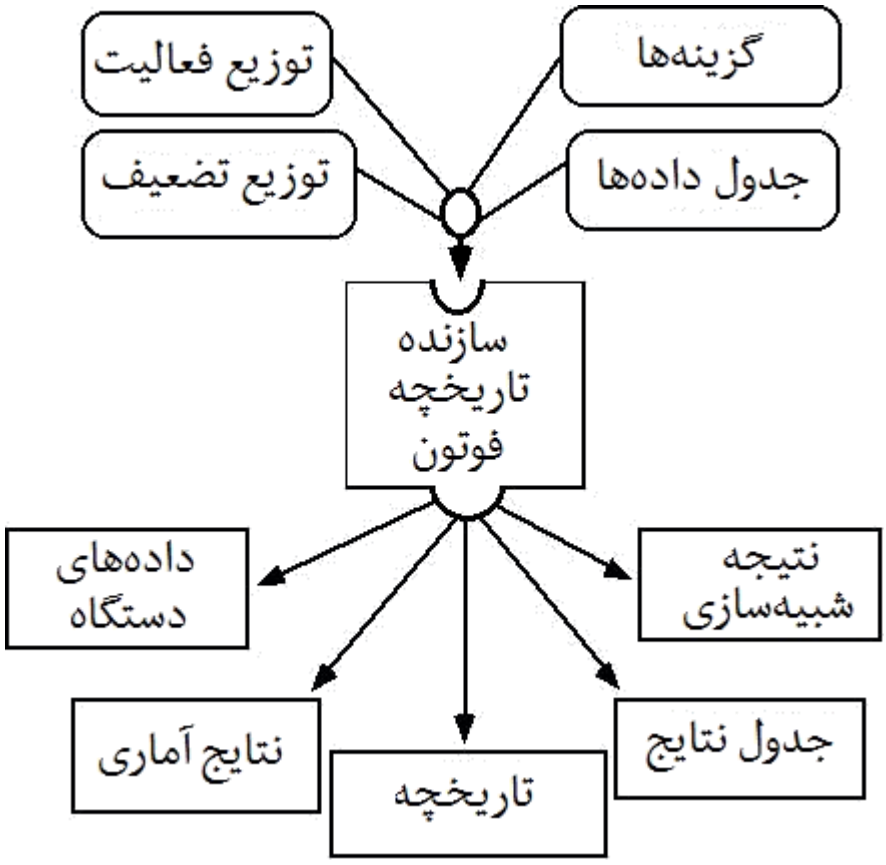
```
# RUNTIME OPTIONS
INT     num_to_simulate                     = 100000000
REAL    length_of_scan                      = 60.0
BOOL    simulate_SPECT                      = true
BOOL    simulate_PET_coincidences_only      = false
BOOL    simulate_PET_coincidences_plus_singles = false
REAL    photon_energy                       = 140.5
REAL    minimum_energy                      = 110.0
BOOL     model_coherent_scatter_in_obj      = true
BOOL    model_coherent_scatter_in_tomo      = true
BOOL    adjust_for_collinearity             = false
BOOL    adjust_for_positron_range           = false
# ENUM  isotope                             = c11
INT     random_seed                         = 0
```

```
# IMPORTANCE SAMPLING OPTIONS
BOOL        simulate_stratification                 = false
BOOL        simulate_forced_detection               = false
BOOL        forced_non_absorbtion                   = true
REAL        weight_window_ratio                     = 1.0

# OBJECT GEOMETRY VALUES
BOOL        point_source_voxels                     = false
BOOL        line_source_voxels                      = false

NUM_ELEMENTS_IN_LIST object = 13
   INT num_slices = 12
   NUM_ELEMENTS_IN_LIST slice = 9
      INT slice_number = 0
      REAL zMin = -24
      REAL zMax = -20
      REAL xMin = -32.00
      REAL xMax = 32.00
      REAL yMin = -32.00
      REAL yMax = 32.00
      INT num_X_bins = 128
      INT num_Y_bins = 128
.
.
.

   NUM_ELEMENTS_IN_LIST slice = 9
      INT slice_number = 11
      REAL zMin = 20
      REAL zMax = 24
      REAL xMin = -32.00
      REAL xMax = 32.00
      REAL yMin = -32.00
      REAL yMax = 32.00
      INT num_X_bins = 128
      INT num_Y_bins = 128

# TARGET CYLINDER INFORMATION
NUM_ELEMENTS_IN_LIST target_cylinder = 3
   REAL target_zMin = -4.0
   REAL target_zMax =  4.0
   REAL radius      = 36.00
REAL acceptance_angle = 5.0

# COHERENT ANGULAR DISTRIBUTION FILES
STR coherent_scatter_table = "../../phg.data/phg_ad_files"

# ISOTOPE DATA
#STR isotope_data_file = "../../phg.data/isotope_positron_energy_data"

# ACTIVITY INDEX FILE
STR activity_indexes = "tutor1.act_index"

# ACTIVITY TABLE FILE
STR activity_table = "../../phg.data/phg_act_table"

# ACTIVITY INDEX TO TABLE TRANSLATION FILE
STR activity_index_trans = "../../phg.data/phg_act_index_trans"

# ACTIVITY IMAGE OUTPUT FILE
STR         activity_image = "tutor1.actimg"

# ATTENUATION INDEX FILE
STR attenuation_indexes = "tutor1.att_index"

# ATTENUATION TABLE FILE
STR attenuation_table = "../../phg.data/phg_att_table"

# ATTENUATION INDEX TO TABLE TRANSLATION FILE
STR attenuation_index_trans = "../../phg.data/phg_att_index_trans"

# ATTENUATION IMAGE OUTPUT FILE
STR         attenuation_image = "tutor1.attimg"

# PRODUCTIVITY INPUT TABLE FILE
STR    productivity_input_table = ""
```

```
# PRODUCTIVITY TABLE FILE
STR productivity_output_table = ""

# COLLIMATOR PARAMETER FILE
STR     collimator_params_file = ""

# DETECTOR PARAMETER FILE
STR     detector_params_file = ""

# BINNING PARAMATER FILE
STR bin_params_file = "tutor1.bin_params"

# HISTORY FILE
STR             history_file = ""

# HISTORY PARAMETERS FILE
STR             history_params_file = ""

# STATISTICS FILE (for debugging purposes only)
STR statistics_file = ""
```

۱-۹-۳ – PHG چگونه کار می‌کند؟

PHG یک نرم‌افزار برای شبیه‌سازی فوتونهای تولیدی ناشی از واپاشی در بافت همگن بر اساس الگوریتم مونت‌کارلو می‌باشد. اجزای مختلف ورودی و خروجی آن در شکل ۱-۶ نشان داده شده‌است.



شکل ۱-۶ – نمای کلی PHG

همانگونه که ملاحظه می‌گردد چهار ورودی و پنج خروجی داریم:

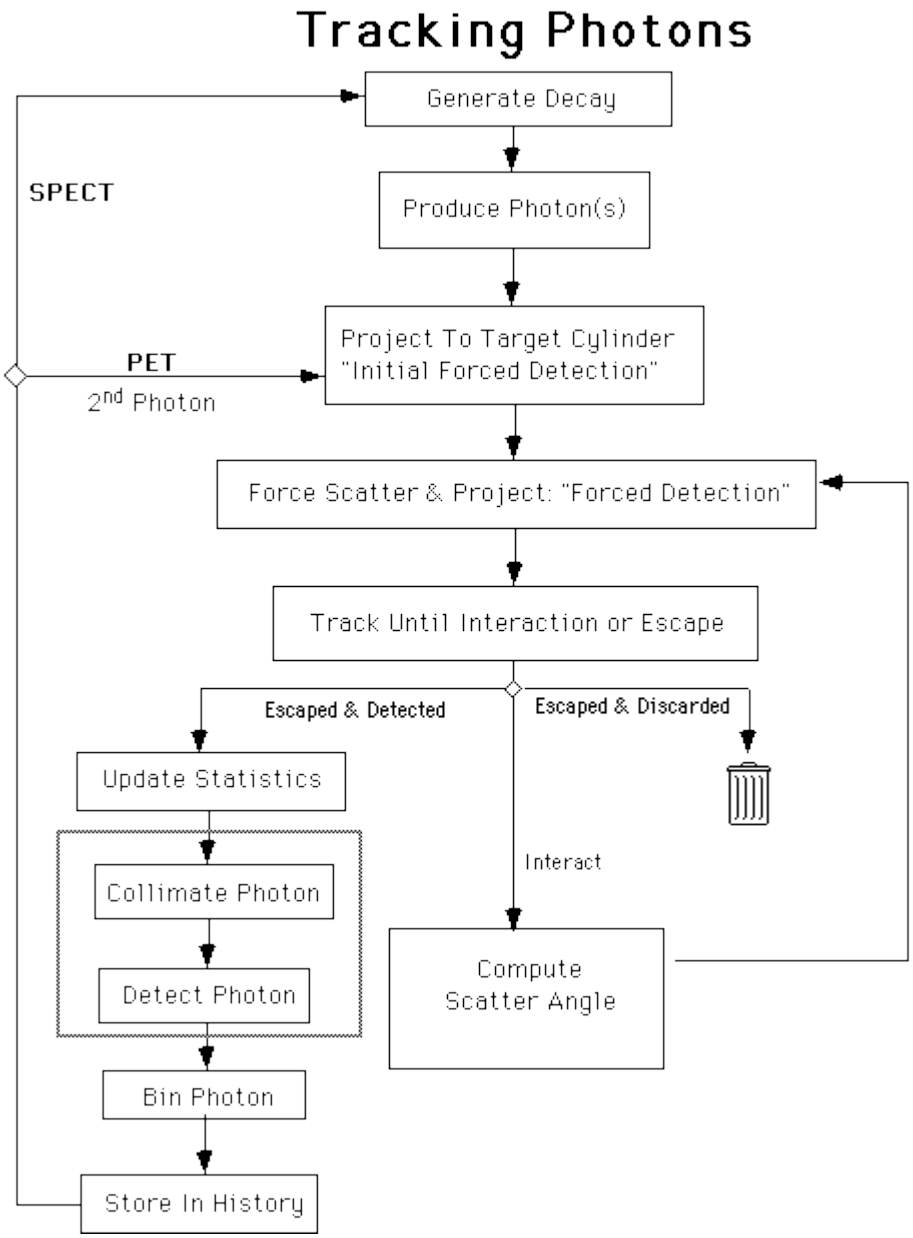
ورودی‌ها:

- توزیع فعالیت: این فایل توزیع فعالیت ایزوتوپی را که برای شبیه‌سازی به‌کار می‌رود، مشخص می‌کند.
- توزیع تضعیف: این فایل توزیع تضعیف ماده‌ای را که شبیه‌سازی می‌گردد، مشخص می‌کند.
- گزینه‌ها: این فایل انتظارات ما از شبیه‌سازی را مشخص می‌نماید.
- جدول داده‌ها: فایل مفسر داخلی برای انجام شبیه‌سازی.

خروجی‌ها

- داده‌های دستگاه: فوتون‌های رهگیری شده از این بخش عبور کرده و به سینوگرام، پروجکشن یا فرمتهای دیگر تبدیل می‌شوند. همچنین می‌توان آنها را بر اساس انرژی یا زمان مرتب نمود.
- نتایج آماری: بدون توجه به اینکه چه متغیرهایی تعریف یا چه نوع شبیه‌سازی‌ای اجرا شده‌باشد، PHG اطلاعات آماری مفصلی را برای جمع‌بندی شبیه‌سازی ارائه می‌نماید.
- تاریخچه: در این فایل تمامی واپاشی‌های رصد شده تکت تک فوتونها ذخیره می‌گردد.
- جدول نتایج: این جدول برای اهمیت تکنیک‌های نمونه‌برداری‌های مختلف استفاده می‌گردد.
- نتیجه شبیه‌سازی: اطلاعاتی شامل ورودی، خروجی، متغیرها و دیگر مسائل مرتبط با شبیه‌سازی می‌باشد که بر روی مانیتور نمایش داده می‌شود.

الگوریتم رهگیری فوتونها در شکل ۱-۷ آورده شده‌است



شکل ۱-۷ – الگوریتم رهگیری فوتون‌ها

۱-۱۰ فانتوم ها

یکی از پویاترین جنبه‌های تحقیقاتی در مطالعات پرتوی، تصویربرداری پزشکی و پرتودرمانی و مدلسازی آناتومی بدن انسان برای شبیه‌سازی‌های مبتنی بر روش مونت‌کارلو می‌باشد. اهداف آن تعیین مقدار، الگوی پخش انرژی، نهشت و تاثیر بالینی ناشی از پرتوگیری در بدن می‌باشد. برای محافظ بدن در برابر پرتوگیری، سازمان‌های مربوطه حداکثر مجازی از