



## ارزیابی روش دو بازه انرژی در اصلاح پراکندگی تصاویر SPECT با استفاده از برنامه شبیه‌سازی SIMIND

مهسا، نوری اصل<sup>۱</sup>؛ علیرضا، صدر ممتاز<sup>۱</sup>؛ احمد، بیطرفان رجیبی<sup>۲</sup>

۱- دانشگاه گیلان، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک

۲- دانشگاه علوم پزشکی ایران، مرکز آموزشی تحقیقاتی و درمانی قلب و عروق شهید رجایی، بخش پزشکی هسته‌ای

### چکیده

آشکارسازی فوتون‌های پراکنده شده در بازه فوتوپیک یکی از منابع اصلی خطا در تصویربرداری SPECT است، که منجر به کاهش کنتراست و در نتیجه کاهش کیفیت تصاویر به دست آمده می‌شود. هدف از این مطالعه، ارزیابی روش اصلاحی دو بازه انرژی است. ابتدا با استفاده از برنامه شبیه‌سازی SIMIND یک فانتوم استوانه‌ای، حاوی کره‌های سرد در زمینه گرم شبیه‌سازی می‌شود. سپس، تغییر ایجاد شده در کنتراست تصویری و نسبت سیگنال-به-نویز کره‌های سرد مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که این روش اصلاحی منجر به افزایش کنتراست تصویر تمام کره‌های سرد، و همچنین نسبت‌های سیگنال-به-نویز نزدیک به مقادیر پیش از اصلاح می‌شود.

کلید واژه: SPECT، اصلاح پراکندگی، بازه‌های انرژی، شبیه‌سازی.

### مقدمه

یکی از مشکلات اصلی در تصویربرداری SPECT، حضور فوتون‌های پراکنده شده کامپتونی است. این فوتون‌های پراکنده شده با انرژی کمتر از انرژی اولیه و در راستایی متفاوت از راستای اولیه به سطح آشکارساز می‌رسند. این تغییر راستا منجر به آشکارسازی فوتون‌ها در مکانی نادرست و در نتیجه کاهش کنتراست تصاویر به دست آمده می‌شود. به علت انرژی کاهش یافته این فوتون‌های پراکنده شده، به نظر می‌رسد که با قرار دادن یک بازه انرژی مناسب در انرژی گسیلی  $^{99m}\text{Tc}$  امکان حذف کامل این فوتون‌ها وجود داشته باشد. اما با توجه به تفکیک انرژی پایین بلور سوسوزن NaI(Tl) در ساختار آشکارساز (۱۰٪ برای انرژی گسیلی ۱۴۰keV) تعداد زیادی از این فوتون‌ها در بازه انرژی فوتوپیک آشکارسازی می‌شوند.

روش‌های زیادی برای اصلاح پراکندگی بازه فوتوپیک پیشنهاد شده‌اند [۹-۱]. هر یک از این روش‌ها دارای فواید و محدودیت‌های خاص خود می‌باشد. از این میان، روش‌های مبتنی بر قرار دادن بازه‌های انرژی در طیف  $^{99m}\text{Tc}$  به علت سادگی عملکرد، کاربرد وسیع‌تری در سیستم‌های تصویربرداری پزشکی یافته‌اند. در این مطالعه قصد داریم، روش دو بازه انرژی (DEW) را مورد ارزیابی قرار دهیم. ابتدا با استفاده از برنامه شبیه‌سازی SIMIND، یک فانتوم استوانه‌ای حاوی شش کره سرد (بدون اکتیویته) را در یک زمینه گرم (با اکتیویته یکنواخت) شبیه‌سازی می‌کنیم. سپس، با بررسی تغییر ایجاد شده در کنتراست تصویری و نسبت سیگنال-به-نویز کره‌های سرد عملکرد این روش اصلاحی را مورد ارزیابی قرار می‌دهیم.

## مواد و روش‌ها

### ۱. روش دو بازه انرژی (DEW)

فرض اساسی در روش دو بازه انرژی [۱ و ۲]:

توزیع فضایی فوتون‌های پراکنده شده در بازه فوتوپیک ( $W_{pk}=126-154$  keV) می‌تواند به صورت  $k$  برابر توزیع فضایی فوتون‌های آشکارسازی شده در یک بازه ثانویه (اغلب  $W_c=92-125$  keV) که در بخش کامپتونی طیف انرژی  $^{99m}Tc$  قرار دارد، برآورد شود:

$$S_{pk}(i, j) = kT_c(i, j) \quad (1)$$

که در آن  $S_{pk}$  تصویر مؤلفه پراکندگی حاضر در بازه فوتوپیک،  $T_c$  تصویر فوتون‌های آشکارسازی شده در بازه ثانویه است. مختصه مکان پیکسل مورد نظر را در ماتریس تصویری نشان می‌دهد. بنابراین، تصویر اصلاح شده،  $SC_{pk}$ ، از رابطه زیر به دست خواهد آمد:

$$SC_{pk}(i, j) = T_{pk}(i, j) - S_{pk}(i, j) \quad (2)$$

این روش اصلاحی می‌تواند قبل از بازسازی تصویر بر روی نگاره‌ها یا بعد از بازسازی بر روی تصویر بازسازی شده انجام شود. در صورت استفاده از روش اول تنها نیاز به بازسازی تصویر اصلاح شده است، در حالی که در روش دوم باید تصاویر به دست آمده از بازه فوتوپیک و بازه پراکندگی بازسازی شده و سپس اصلاح اعمال شود. در این مطالعه، روش اول مورد استفاده قرار می‌گیرد.

### ۲. فانتوم حاوی کره‌های سرد در زمینه گرم

فانتومی که برای ارزیابی روش دو بازه انرژی شبیه‌سازی می‌شود، یک فانتوم استوانه‌ای (به قطر ۲۰ cm و ارتفاع ۲۲ cm) پر شده از آب با توزیع یکنواخت  $^{99m}Tc$  و حاوی شش کره بدون اکتیویته (کره‌های سرد) است. قطر این کره‌ها به ترتیب عبارتند از: ۳/۲، ۲/۶، ۲، ۱/۶، ۱/۳ و ۱ cm. مرکز این کره‌ها بر روی محیط دایره‌ای به شعاع ۵/۴ cm در صفحه گذرنده از نیم ارتفاع استوانه واقع شده است.

### ۳. معیارهای ارزیابی

در این مطالعه برای ارزیابی بازه‌های مختلف دو معیار سنجش ریاضی، کنتراست تصویری و نسبت سیگنال-به-نویز، استفاده می‌شوند. این معیارهای ارزیابی، در یک ناحیه مورد نظر (ROI) از تصویر کره‌های سرد و تصویر زمینه محاسبه می‌شوند. در این مطالعه، ناحیه مورد نظر در تصویر کره‌های سرد تقریباً شامل تمام پیکسل‌هایی است که به طور کامل در داخل تصویر هر یک از کره‌ها و به دور از لبه‌ها قرار گرفته‌اند. تعداد این پیکسل‌ها در مورد کره ۱ (قطر ۳/۲ cm) ۵۶ عدد، کره ۲ (قطر ۲/۶ cm) ۳۰ عدد، کره ۳ (قطر ۲ cm) ۱۲ عدد، کره ۴ (قطر ۱/۶ cm) ۱۰ عدد، کره ۵ (قطر ۱/۳ cm) ۸ عدد و در مورد کره ۶ (قطر ۱ cm) ۲ عدد می‌باشد. ناحیه مورد نظر در تصویر زمینه شامل سطر ۵۷ تا ۷۲ و ستون ۵۷ تا ۷۲، در مجموع ۲۵۶ پیکسل، می‌باشد. به

علت تعداد کم پیکسل‌های شامل شده در کره ۶ و تغییر زیاد کنتراست آن از یک شبیه‌سازی به شبیه‌سازی دیگر معمولاً از بررسی آن صرف نظر می‌شود.

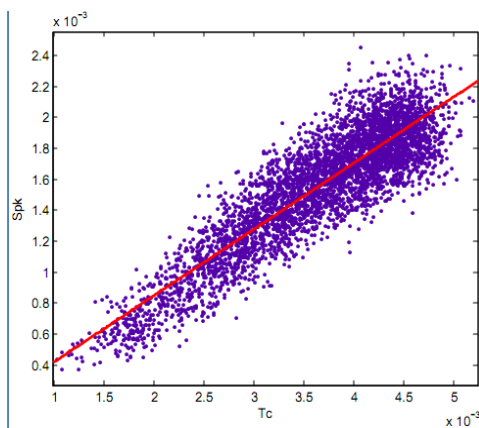
با توجه به نواحی مورد نظر تعریف شده، کنتراست تصویری هر کره سرد به صورت درصد اختلاف میانگین شمارش‌های داخل هر کره و میانگین شمارش‌های زمینه، تقسیم بر میانگین شمارش‌های زمینه محاسبه می‌شود. نسبت سیگنال-به-نویز برای هر کره به صورت قدر مطلق اختلاف میانگین شمارش‌های داخل تصویر کره‌ها و میانگین شمارش‌های تصویر زمینه، تقسیم بر انحراف استاندارد زمینه تعریف می‌شود [۱۰].

## نتایج

در این مطالعه برای به دست آوردن مقدار ضریب  $k$  به دو روش عمل می‌کنیم: در اولین روش، به جای محاسبه یک تک مقدار  $k$ ، به دنبال یافتن یک رابطه خطی بین داده‌های بدست آمده از بازه انرژی ثانویه ( $T_c$ ) و داده‌های پراکندگی مربوط به بازه فوتوپیک ( $S_{pk}$ ) هستیم. برای دستیابی به این هدف، داده‌های مربوط به یک نگاره از حوادث پراکندگی بازه فوتوپیک را برحسب داده‌های یک نگاره از حوادث آشکارسازی شده در بازه ثانویه بر روی یک نمودار رسم کرده، و یک منحنی خطی با معادله زیر را به آن جفت می‌کنیم (شکل (۱) را ببینید). معادله این منحنی خطی به صورت زیر می‌باشد:

$$S_{pk} = aT_c + b \quad (3)$$

هدف، به دست آوردن مقادیر ثابت‌های  $a$  و  $b$  است. باید توجه داشت که مقادیر این ثابت‌ها از یک نگاره به نگاره دیگر تا اندازه‌ای تغییر می‌کند. برای نمونه، مقادیر این ثابت‌ها برای تعدادی از نگاره‌های انتخابی در جدول (۱) داده شده است.



شکل (۱). یک نمونه از منحنی خطی جفت شده با داده‌های مربوط به یک نگاره از حوادث آشکارسازی شده در بازه ثانویه (محور طولی) و داده‌های مربوط به یک نگاره از حوادث پراکنده آشکارسازی شده در بازه فوتوپیک (محور عرضی).

در روش دوم، مقدار این ضریب را به طور مستقیم با تقسیم کردن داده‌های پراکندگی بازه فوتوپیک بر داده‌های بازه ثانویه محاسبه می‌کنیم. در این صورت برای هر پیکسل خاص یک مقدار  $k$  جداگانه به دست می‌آید. با میانگین‌گیری از مقادیر به دست آمده بر روی پیکسل‌های مختلف (۱۲۸×۱۲۸) و نگاره‌های مختلف (۱۲۸ نگاره)، یک مقدار ثابت میانگین برای  $k$  به دست می‌آید، که برای تمام پیکسل‌ها و تمام نگاره‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد.

باید توجه داشت که در هر دو روش، برای بررسی مقدار ضریب  $k$  از یک ناحیه مورد نظر (ROI) (سطر ۳۳-۹۶ و ستون ۳۰-۹۹)، در مجموع ۴۴۸۰ پیکسل، که در برگرنده سطح کامل فانتوم استوانه‌ای در هر نگاره است، استفاده می‌شود.

جدول (۱). مقادیر ثابت‌های به دست آمده برای تعدادی از نگاره‌های دلخواه فانتوم کره‌های -سرد در زمینه -گرم.

Projection Number	a	b	R-square
۱	۰,۴۲۷۸	-۰,۰۰۰۰۰۰۷۲۳۵	۰,۷۹۴۸۶
۸	۰,۴۲۸	-۰,۰۰۰۰۰۱۱۲۵	۰,۷۹۵۶۸
۱۶	۰,۴۲۷۴	-۰,۰۰۰۰۰۰۲۱۵۱	۰,۷۹۷۵۱
۲۴	۰,۴۲۴۶	-۰,۰۰۰۰۰۰۶۵۹۱	۰,۷۹۰۹۱
۳۲	۰,۴۲۵	-۰,۰۰۰۰۰۰۲۲۵	۰,۷۹۷۳۴
۴۰	۰,۴۲۹۲	-۰,۰۰۰۰۰۰۶۲۰۶	۰,۸۰۱۰۲
۴۸	۰,۴۲۳۴	-۰,۰۰۰۰۰۰۵۲۹۷	۰,۷۹۶۵
۵۶	۰,۴۲۷۱	-۰,۰۰۰۰۰۰۷۸۸۳	۰,۸۰۰۵۶
۶۴	۰,۴۲۵۲	-۰,۰۰۰۰۰۰۳۰۱۲	۰,۷۹۴۶۸
۷۲	۰,۴۲۵۱	-۰,۰۰۰۰۰۰۴۸۵۳	۰,۸۰۰۱۷
۸۰	۰,۴۲۸۱	-۰,۰۰۰۰۰۰۶۷۹۹	۰,۷۹۷۸۵
۸۸	۰,۴۳۰۵	-۰,۰۰۰۰۰۱۱۹۲	۰,۷۹۳۴۸
۹۶	۰,۴۲۷۴	-۰,۰۰۰۰۰۰۱۹۳۵	۰,۷۹۷۵۴
۱۰۴	۰,۴۳۳۳	-۰,۰۰۰۰۰۲۱۵۵	۰,۸۰۰۹۹
۱۱۲	۰,۴۲۳۵	-۰,۰۰۰۰۰۱۵۳۱	۰,۷۹۱۹۲
۱۲۰	۰,۴۲۴۴	-۰,۰۰۰۰۰۱۰۹۸	۰,۷۹۲۴
۱۲۸	۰,۴۲۷۲	-۰,۰۰۰۰۰۰۴۳۹۷	۰,۸۰۰۸۱
<b>Mean</b>	<b>۰,۴۲۶۹</b>	<b>۰,۰۰۰۰۰۰۷۶۲۴۶</b>	<b>۰,۷۹۶۷</b>

با توجه به داده‌های جدول (۱)، به علت اختلاف ناچیز میان مقادیر ثابت‌های نگاره‌های مختلف و برای کاهش محاسبات، می‌توان یک نگاره را به طور اختیاری انتخاب نمود و معادلهٔ مربوط به منحنی خطی آن نگاره را برای کل نگاره‌ها مورد استفاده قرار داد. با توجه به مقادیر مختلف ثابت  $a$ ، مقدار آن را به طور تقریبی برابر  $۰/۴۲۷$  در نظر می‌گیریم. از سوی دیگر، چون مقدار ثابت  $b$  برای نگاره‌های مختلف بسیار کوچک می‌باشد، می‌توانیم از این ثابت در محاسبات خود چشم‌پوشی کنیم. بنابراین، با توجه به این فرضیات، معادله (۳) به صورت زیر خواهد بود:

$$S_{pk} \cong 0.427 T_c$$

و این بدان معناست که مقدار ثابت  $k$  برای این توزیع مورد نظر برابر با مقدار  $۰/۴۲۷$  می‌باشد. مقدار محاسبه شده برای ثابت میانگین  $k$  با استفاده از دومین روش برابر  $۰/۴۲۵۴$  (با مقدار کمینه  $۰/۱۶۱۵$  و مقدار بیشینه  $۰/۷۴۴۴$ ) و انحراف استاندارد  $۰/۰۵۱۵$  می‌باشد. همان طور که دیده می‌شود، مقدار به دست آمده از دو روش بسیار نزدیک به هم می‌باشند و این بدان معناست که استفاده از روش DEW با یک مقدار ثابت  $k$  برای این فانتوم منطقی می‌باشد. برای ارزیابی این روش، در جدول (۲)، کنتراست‌های تصویری و در جدول (۳)، نسبت‌های سیگنال-به-نویز محاسبه شده برای هر یک از کره‌ها داده شده است.

جدول (۲). کنتراست‌های محاسبه شده برای کره‌های -سرد برای دو وضعیت بدون اصلاح و اصلاح شده با روش DEW.

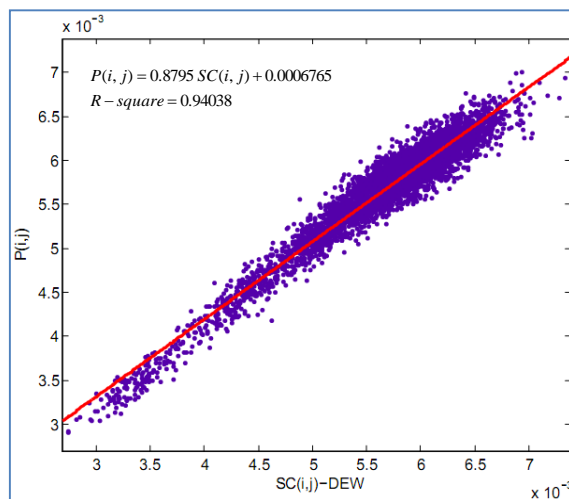
Spheres	NC	SC
۱ (۳,۲ cm)	-۶۴,۰۲۷۱	-۸۶,۶۱۴۵
۲ (۲,۶ cm)	-۵۴,۵۱۹۴	-۷۵,۸۷۹۳

۳ (۲ cm)	-۳۸,۶۱۶۵	-۵۵,۹۲۰۳
۴ (۱,۶ cm)	-۲۱,۴۰۹۳	-۳۱,۹۲۸۳
۵ (۱,۳ cm)	-۶,۶۷۴۴	-۱۲,۶۸

جدول (۳). نسبت‌های سیگنال-به-نویز محاسبه شده برای کره‌های سرد در دو وضعیت بدون اصلاح و اصلاح شده.

Spheres	NC	SC
۱ (۳,۲ cm)	۲۰,۴۹	۱۹,۰۸۶۹
۲ (۲,۶ cm)	۱۷,۴۴۷۳	۱۶,۷۲۱۳
۳ (۲ cm)	۱۲,۳۵۸۱	۱۲,۳۲۲۹
۴ (۱,۶ cm)	۶,۸۵۱۴	۷,۰۳۵۹
۵ (۱,۳ cm)	۲,۱۳۵۹	۲,۷۹۴۲

داده‌های جدول (۲) نشان می‌دهند که کنتراست تصویری کره ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ به ترتیب در حدود ۰.۲۲/۶٪، ۰.۲۱/۳۶٪، ۰.۱۷/۳٪، ۰.۱۰/۵۲٪ و ۰.۶٪ نسبت به وضعیت بدون اصلاح افزایش یافته است. با توجه به جدول (۳)، نسبت سیگنال-به-نویز در مورد کره ۱، ۲ و ۳ نسبت به وضعیت بدون اصلاح اندکی کاهش و در مورد کره‌های ۴ و ۵ اندکی افزایش یافته است. شکل (۲)، یک جفت‌سازی خطی بین مقادیر پیکسلی تصویر اصلاح شده و تصویر اولیه (بدون پراکندگی) را به همراه معادله خط و پارامتر جفت‌سازی  $R$ -square نشان می‌دهد. این پارامتر آماری برای توضیح میزان تغییرات داده‌ها و کیفیت جفت‌سازی استفاده می‌شود و هر چه به واحد نزدیکتر باشد، جفت‌سازی بهتری را نشان می‌دهد.



شکل (۲). منحنی شمارش‌های اولیه 'بازه' فوتوپیک،  $P(i,j)$ ، بر حسب شمارش‌های اصلاح شده با روش دو بازه انرژی،  $SC(i,j)$ -DEW، برای یک نگاره دلخواه. معادله خط به همراه مقدار پارامتر جفت‌سازی  $R$ -square نیز نشان داده شده است.

### بحث و نتیجه‌گیری

در این مطالعه یکی از روش‌های رایج و مؤثر مورد استفاده در اصلاح پراکندگی تصاویر  $^{99m}\text{Tc}$  SPECT مورد بررسی قرار گرفت. بررسی انجام شده بر روی یک فانتوم استوانه‌ای حاوی کره‌های بدون اکتیویته در یک زمینه با اکتیویته یکنواخت نشان داد که این روش اصلاحی منجر به افزایش کنتراست تصویری تمام کره‌های

سرد می‌شود. هم چنین، مقادیر به دست آمده برای نسبت‌های سیگنال-به-نویز نشان می‌دهد که این مقادیر بسیار نزدیک به مقادیرهای اولیه (قبل از اصلاح) می‌باشند. از سوی دیگر، مقدار پارامتر جفت‌سازی ( $R^-$ )  $square=0.94$  حاکی از توافق خوب داده‌های اصلاح شده با داده‌های بدون پراکندگی است. یکی از محدودیت‌های این روش اصلاحی نیاز به محاسبه یک مقدار میانگین  $k$  می‌باشد. استفاده از یک مقدار میانگین برای تمام پیکسل‌های ماتریس تصویری منجر به اصلاح بیش از حد برای پیکسل‌ها با مقدار  $k$  کمتر از مقدار میانگین و اصلاح کمتر از حد برای پیکسل‌ها با مقدار  $k$  بیشتر از میانگین می‌شود. از سوی دیگر، در مطالعات شبیه‌سازی به علت امکان دسترسی به تصاویر پراکنده شده و پراکنده نشده به طور جداگانه، می‌توان مقدار این ضریب را مستقیماً محاسبه نمود. اما در وضعیت‌های واقعی (بالینی)، تنها یک تصویر از شمارش‌های کلی آشکارسازی شده وجود دارد و بنابراین، امکان محاسبه مستقیم این پارامتر وجود ندارد. در این چنین وضعیت‌هایی یا باید از محاسبات غیرمستقیم (تصویربرداری از یک منبع خطی در دو وضعیت، "در آب" و "در هوا") و یا از یک مقدار  $k$  پیش فرض (معمولاً ۰/۵) استفاده نمود.

## مراجع

- [۱] R. J. Jaszczak, K. L. Greer, C. E. Floyd, C. C. Harris, and R. E. Coleman. Improved SPECT quantification using compensation for scattered photons. J. Nucl. Med. ۱۹۸۴; ۲۵: ۸۹۳-۹۰۰.
- [۲] R. J. Jaszczak, K. L. Greer, C. E. Floyd, and R. E. Coleman. Scatter compensation techniques for SPECT. IEEE Trans. Nucl. Sci. ۱۹۸۵, ۳۲:۷۸۶.
- [۳] Logan K. W. and McFarland W. D. Single photon scatter compensation by photopeak energy distribution analysis. IEEE Trans. Med. Imag. ۱۹۹۲; ۱۱:۱۶۱-۱۶۴,
- [۴] King M. A., Hademenos G. J. and Glick S. J. A dual-photopeak window method for scatter correction. J. Nucl. Med. ۱۹۹۲; ۳۳: ۶۰۵-۶۱۲.
- [۵] Pretoris P. H., van Rensburg A. J., van Aswegen A. and et al. The cannel ratio method of scatter correction for radionuclide image quantification. J. Nucl. Med. ۱۹۹۳; ۳۴: ۳۳۰-۳۳۵.
- [۶] Ogawa K., Harata Y., Ichihara T. and et al. A practical method for position dependent Compton-scatter correction in Single Photon Emission CT. IEEE Trans. Med. Imag. ۱۹۹; ۱۱۰: ۴۰۸-۴۱۲.
- [۷] Buvat I., Rogriguez-Villafuerte M., Todd-Pokropek A., Benali H. and Paola R. D. Comparative assessment of nine scatter correction methods based on the spectral analysis using Monte Carlo simulations. J. Nucl. Med. ۱۹۹۵; ۳۸(۸): ۱۴۷۶-۱۴۸۸.
- [۸] Axelsson B., Msaki P., and Israelsson A. Subtraction of Compton-Scattered Photons in Single Photon Emission Computerized Tomography. J. Nucl. Med. ۱۹۸۴; ۲۵: ۴۹۰-۴۹۴.
- [۹] Floyd C. E., Jr., Jaszczak R. J., Greer K. L., and Coleman R. E. Deconvolution of Compton Scatter in SPECT. J. Nucl. Med. ۱۹۸۵; ۲۶:۴۰۳-۴۰۸.
- [۱۰] Mähler E, Sundström T, Axelsson J, Larsson A. Detecting small liver tumors with In-۱۱۱-Pentetreotide SPECT-A Collimator study based on Monte Carlo simulations. IEEE Trans. Nucl. Sci. ۲۰۱۲; ۵۹(۱): ۴۷-۵۳.