



بررسی دوزهای تکنسیوم-99m در تصویربرداری های طبی

نامزد پوهنیا عبدالمناف سیحانی^{۱*}، پوهاند احدخان پیاوړی^۱

استادان دیپارتمنت فزیک، پوهنځی الکترومیکانیک، پوهنتون پولی تخنیک کابل

*د مسئول لیکوال برېښنالیک: A.rahimamin420@gmail.com، د اړیکې

شمېره: ۹۳۷۰۶۰۴۲۷۵۷+

چکیده

تصویربرداری های طبی با استفاده از رادیوایزوتوپ ($Tc - 99m$) یکی از مهم ترین و پرکاربردترین روش های تصویربرداری های تشخیصی در طب هسته ای معاصر محسوب می شود و نقش اساسی در ارزیابی مریضی های استخوان، کلیه، قلب، مغز و غده تایراید دارد. این رادیونوکلاید به دلیل نیمه عمر فزیکي کوتاه حدود ۶ ساعت، انرژی مناسب فوتون گاما (140 keV) و امکان تولید در سایکلوترون و ژنراتورهای مولیدنیوم-99/تکنسیوم-99m، به عنوان انتخاب نخست در رادیوداروهای تشخیصی شناخته می شود. با وجود دوز نسبتاً پایین اشعه در این روش ها، ارزیابی دقیق دوز جذبی و دوز مؤثر مریضان برای تضمین ایمنی اشعه ای و حفظ کیفیت تصویربرداری ضروری است. این مقاله یک مطالعه مروری و تحلیلی است که چارچوب های فزیکي و دوزیمتری کاربردهای $Tc - 99m$ را با تمرکز بر مدل دوزیمتری داخلی MIRD و روش های مبتنی بر بیوکینتیک (حرکت رادیودارو) بررسی می کند. داده های استاندارد منتشر شده توسط نهادهای بین المللی معتبر مورد تحلیل قرار گرفته و دامنه دوزهای مؤثر ناشی از پروسیجرهای مختلف تصویربرداری با $Tc - 99m$ مقایسه شده است. نتایج نشان می دهد که دوز مؤثر در کاربردهای تشخیصی این رادیوایزوتوپ معمولاً در محدوده چند میلی سیورت قرار دارد، به طوری که بیشترین دوز به تصویربرداری های قلبی و کمترین دوز به اسکن تایراید تعلق می گیرد. همچنین، نقش اصول حفاظت اشعه ای به ویژه اصل ALARA و استفاده از سطوح مرجع تشخیصی (DRL) در بهینه سازی دوز تأکید قرار گرفته است. در نهایت، این مطالعه نشان می دهد که اجرای دقیق رهنمودهای سازمان های بین المللی مانند IAEA، ICRP و EANM و مشارکت فعال فزیک دانان هسته ای می تواند منجر به کاهش خطرات اشعه، بهبود کیفیت تصویربرداری و ارتقای ایمنی مریضان، به ویژه در کشورهای در حال توسعه مانند افغانستان، گردد.

کلمات کلیدی: دوزیمتری، تکنسیوم-99m، طب هسته ای، دوزمؤثر و بیوکینتیک

د مقالې تاريخچه:

د مقالې ترلاسه کولو نېټه:

۱۳/دلو/۱۴۰۴

د مقالې منلو نېټه:

۱۸/حوت/۱۴۰۴

د مقالې خپرولو نېټه:

۱۴/اسد/۱۴۰۵

ددې مقالې استناد:

سیحانی، عبدالمناف (۱۴۰۵).

بررسی دوزهای تکنسیوم-

99m در تصویربرداری های

طبی. وردگ علمي څېړنيزه مجله

۲۶۷-۲۴۷: (۱) ۵

دغه ژورنال د وردگ پوهنتون په

چوکاټ کې د لوړو زدکړو

وزارت د رسمي جواز پر اساس

فعاليت کوي.



وردگ پوهنتون علمي څېړنيز

نشرات (۱۴۰۵).

زمونږ سره اړیکې:

+۹۳۷۴۵۶۰۶۳۱۷

ایمیل: rjd@wu.edu.af

آدرس: سیدآباد ولسوالۍ، ټوپ

دښته میدان وردگ ولایت-

افغانستان



Evaluation of Technetium-99m Doses in Medical Imaging

Abstract

Article History:

Received: 02. 02.2026

Accepted: 09. 03.2026

Online First: 05.

Aug.2026

Citation:

Amin , A.R. (2026).

Evaluation of

Technetium-99m

Doses in Medical

Imaging

Articles to WNNs.

Wardek J. of Soc Sci

2026;5(1):247-267

Email: rjd@wu.edu.af

This is an open access

article under the

Higher Education

license



Copyright:© 2026

Published by Wardak

University.

Medical imaging using the radioisotope technetium-99m (Tc-99m) is considered one of the most important and most widely used diagnostic imaging techniques in contemporary nuclear medicine. It plays a fundamental role in the evaluation of diseases of the bones, kidneys, heart, brain, and thyroid gland. Owing to its short physical half-life of approximately 6 hours, suitable gamma photon energy (140 keV), and the feasibility of its production via cyclotrons and molybdenum-99/technetium-99m generators, this radionuclide is recognized as the first choice for diagnostic radiopharmaceuticals. Despite the relatively low radiation dose associated with these procedures, accurate assessment of the absorbed dose and effective dose to patients is essential to ensure radiation safety and to maintain imaging quality. This article is a review and analytical study that examines the physical and dosimetric frameworks of Tc-99m applications, with a focus on the MIRD internal dosimetry model and biokinetic-based (radiopharmaceutical kinetics) methods. Standard data published by reputable international organizations have been analyzed, and the range of effective doses resulting from various Tc-99m imaging procedures has been compared. The results indicate that the effective dose in diagnostic applications of this radioisotope generally lies within the range of a few millisieverts, with the highest doses associated with cardiac imaging and the lowest doses with thyroid scans. Furthermore, the role of radiation protection principles—particularly the ALARA principle—and the use of Diagnostic Reference Levels (DRLs) in dose optimization is emphasized. Finally, this study demonstrates that strict implementation of guidelines issued by international organizations such as the IAEA, ICRP, and EANM, along with the active involvement of nuclear medical physicists, can lead to reduced radiation risks, improved imaging quality, and enhanced patient safety, especially in developing countries such as Afghanistan.

Keywords

Dosimetry, Technetium-99m (Tc-99m), Nuclear Medicine, Effective Dose, Bio kinetics



مقدمه

الحمد لله رب العالمين، حمداً كثيراً طيباً مباركاً فيه، كما ينبغي لجلال وجهه وعظيم سلطانه، والصلاة والسلام على سيدنا محمد خاتم الأنبياء والمرسلين، وعلى آله وأصحابه أجمعين، ومن تبعهم بإحسان إلى يوم الدين. أما بعد: فهذا تمهيدٌ مباركٌ نفتتح به الكلام، راجين من الله التوفيق والسداد، وأن يجعل أعمالنا خالصة لوجهه الكريم

تصويربرداري های طب هسته ای با استفاده از رادیوایزوتوپ ($Tc - 99m$) یکی از پرکاربردترین روش های تشخیصی در طب هسته ای به شمار می رود و نقش اساسی در ارزیابی مریضی های استخوان، کلیه، قلب، مغز و غده تیروئید دارد. این ایزوتوپ به دلیل نیمه عمر فیزیکی کوتاه حدود ۶ ساعت، انرژی فوتون اشعه گامای مناسب (۱۴۰ کیلو الکترون ولت) برای آشکارسازی، و امکان تولید آسان از ژنراتورهای مولیدنیوم-تکنسیوم، به عنوان انتخاب مهم در تصویربرداري های تشخیصی شناخته می شود، (Cherry et al., 2012).

با وجود مزایای وسیع و $Tc - 99m$ ، استفاده ایمن و بهینه از آن ضرورت شدید به سنجش دقیق دوز جذبی و دوز مؤثر مریضان است. دوزیمتری در طب هسته ای چوکات اساسی و چارچوب علمی برای سنجش انرژی جذب شده در انساج بدن فراهم می کند و امکان ارزیابی خطرات اشعه ای مرتبط با کاربرد رادیوداروها را ممکن می سازد. در این زمینه، مدل (MIRD) به عنوان یکی از چارچوب های معیاری برای محاسبه دوز داخلی، به طور گسترده در مطالعات دوزیمتری رادیوفارماکوکتیکال های $Tc - 99m$ مورد استفاده قرار گرفته است (Bolch et al., 2009; Stabin, M. G. (2008)).



آزاده لاسرسی

څېړنیزه

محاسبه دوز در مدل MIRD بر اساس فعالیت تجمعی رادیودارو در اندام منبع و ضرایب دوز وابسته به هندسه و مشخصات فیزیکی اشعه انجام می‌شود. این عملکرد امکان برآورد دوز جذب‌شده در اندام‌های هدف و همچنان محاسبه دوز مؤثر را فراهم می‌کند که معیاری کلیدی برای ارزیابی خطر زیستی کل بدن است. گزارشات کمیسیون بین‌المللی حفاظت در برابر اشعه نشان می‌دهند که دوز مؤثر حاصل از پروسیجرهای تشخیصی مبتنی بر $Tc - 99m$ معمولاً در محدوده چند میلی‌سیورت قرار دارد، اما این مقدار بسته به نوع رادیودارو و اندیکاسیون کلینیکی می‌تواند متغیر باشد، (ICRP, 2015).

از نظر حفاظت اشعه‌یی، دستیابی به توازن بین کاهش دوز دریافتی مریض و حفظ کیفیت تصویربرداری تشخیصی اهمیت خاص دارد. اصل ALARA به‌عنوان تهداب اساسی حفاظت اشعه‌ی، بر ضرورت کاهش دوز تا حد معقول بدون افت کیفیت تصویر تأکید دارد. سازمان‌های بین‌المللی مانند آژانس بین‌المللی انرژی اتمی (IAEA) بر استفاده از پروتوکول‌های استاندارد، تنظیم فعالیت تزریقی بر اساس وزن و شرایط مریض، و به‌کارگیری وسایل با کارایی بالا برای بهینه‌سازی دوز تأکید کرده‌اند، (IAEA, 2018).

بررسی‌های تجربی نشان می‌دهند که دوزهای معمول تجویزی برای رادیوفارماکوتیکال‌های $Tc - 99m$ در تصویربرداری‌های طبی مختلف، مثل: اسکن استخوان، کلیه و پرفیوژن قلبی، دامنه‌های متفاوتی دارند و انتخاب فعالیت تزریقی باید بر اساس شواهد دوز و اثربخشی و تحلیل‌های دوزیمتری دقیق صورت بگیرد، ((Kupitz et al. (2021)). علاوه بر این، استفاده از روش‌های نوین دوزیمتری فردمحور و شبیه‌سازی‌های عددی می‌تواند به کاهش عدم قطعیت‌ها و بهینه‌سازی مؤثرتر دوز کمک کند (Stabin et al., 2008). هدف از نوشتن این مقاله، جمع‌بندی و تحلیل فیزیکی و دوزیمتری مقادیر توصیه‌شده فعالیت‌های $Tc-99m$ در اندیکاسیون‌های کلینیکی منتخب است؛ همچنین قصد داریم معیارهای مؤثر برای انتخاب دوز

آزاده لاسرسی

څېړنیزه

(شامل وزن، سن، بیوکیټیک، و قابلیت‌های سخت‌افزاری دستگاه) و رویکردهای عملی برای بهینه‌سازی دوز در شرایط کلینیکی واقعی با توجه به محدودیت‌های منابع در محیط‌های مشابه افغانستان را بررسی کنیم. در بخش‌های بعدی، ابتدا اساسات فیزیکی و روش‌های دوزیمتری MIRD و روش‌های مبتنی بر وکسل (مروور می‌شود، سپس دامنه‌های مرسوم فعالیت‌های تزریقی برای رادیوفارماکوتیک‌های $Tc - 99m$ ارائه و تحلیل می‌گردد و در نهایت پیشنهاداتی برای بهینه‌سازی و سیاست‌گذاری در مراکز تصویربرداری‌های طبی مطرح خواهد شد.

پیشنه‌تحقق

رادیو ایزوتوپ ($Tc - 99m$) به دلیل نصف عمر کوتاه (حدود ۶ ساعت)، انرژی اشعه گامای مناسب برای تصویربرداری تشخیصی در حدود (140 keV) و امکان تولید از ژنراتورهای $^{99}Mo / ^{99m}Tc$ ، یا روش سایکلوترونی با استفاده از تعامل هسته-ای $^{100}Mo(p, 2n)^{99m}Tc$ ، پرکاربردترین رادیونوکلاید در طب هسته‌ای تشخیصی به شمار می‌رود (Cherry, Sorenson, & Phelps, 2012; Gagnon, 2012).

این ویژگی‌ها سبب شده‌اند $Tc - 99m$ به‌طور گسترده در اسکن استخوان، تصویربرداری، پروسه خون‌رسانی قلب و بررسی عملکرد گرده مورد استفاده قرار بگیرد و در عین فراهم‌سازی کیفیت تصویری مناسب، دوز اشعه‌یی نسبتاً پایینی به مریض تحمیل کند (Cherry et al., 2012).

برای تخمین دوز اشعه‌یی ناشی از رادیوداروها، سیستم MIRD به‌عنوان چارچوب استاندارد دوزیمتری داخلی به‌کار می‌رود. در این مدل، دوز جذب‌شدهٔ اندام‌ها بر اساس داده‌های فروپاشی هسته‌ای، انرژی تابش‌ها، نصف عمر فیزیکی و الگوی توزیع زیستی رادیودارو محاسبه می‌شود (Bolch et al., 2009; Eckerman & Endo, 2008).



آزاده لاسرسی

څېړنیزه

علاوه بر دوز جذب شده، دوز مؤثر به عنوان شاخصی برای ارزیابی خطر کلی اشعه دهی مریض تعریف می شود که با اعمال ضرایب وزن دهی انساج، امکان مقایسه ریسک اشعه ای در روش های مختلف تصویربرداری را فراهم می سازد. این مفهوم مطابق توصیه های کمیسیون بین المللی حفاظت اشعه ای (ICRP) در پزشکی هسته ای تشخیصی به کار گرفته می شود، (ICRP, 2015).

اصل ALARA معیار اصلی حفاظت اشعه ای در طب هسته ای است و بر کاهش دوز اشعه ای تا حد معقول، بدون آسیب به کیفیت تشخیصی تصویر، تأکید دارد، (ICRP, 2015).

پیشرفت های تکنالوژی در بازسازی کمی تصاویر SPECT و استفاده از الگوریتم های پیشرفته پردازش تصویر، امکان بهبود نسبت سیگنال به نویز و در نتیجه کاهش فعالیت تزریقی $Tc-99m$ را فراهم کرده اند. مطالعات نشان داده اند که بهینه سازی روش های بازسازی می تواند منجر به کاهش دوز مریض بدون افت قابل توجه کیفیت تصویر شود (Kupitz, D., Wissel and others, 2021).

در کنار آن، استفاده از ابزارهای محاسباتی دوزیمتری مانند سافت ویرهای OLINDA/EXM نقش مهمی در تخمین دقیق تر دوز اندام ها ایفا می کند. این نرم افزار که مبتنی بر چارچوب MIRD است، به طور گسترده در مطالعات دوزیمتری رادیوداروهای تشخیصی مورد استفاده قرار گرفته و امکان کاهش عدم قطعیت در محاسبات دوز را فراهم می سازد (Stabin, Sparks, & Crowe, 2005).

اهمیت و ضرورت تحقیق

با وجود موجودیت منابع علمی و دستورالعمل های بین المللی در زمینه دوزیمتری و حفاظت اشعه ای، اجرای عملی این توصیه ها در کشورهای در حال توسعه همچنان با محدودیت هایی



آزاده لاسرسی

څېړنیزه

مثل کمبود تجهیزات و سامان آلات پیشرفته، دسترسی محدود به نرم افزارهای تخصصی و کمبود نیروی انسانی آموزش دیده و مسلکی مواجه است. این شرایط می تواند منجر به استفاده غیربهبوده از فعالیت تزریقی و افزایش غیرضروری دوز مریض شود. ازاین رو، انجام تحقیقات مروری که با تمرکز بر بهینه سازی دوز $Tc - 99m$ در شرایط واقعی مراکز کلینیکی و با تکیه بر منابع علمی معتبر، راهکارهای عملی ارائه دهند، ضرورت دارد. چنین مطالعاتی می توانند مبنایی علمی برای بهبود ایمنی اشعه ای مریضان و کارکنان در مراکزی با شرایط مشابه افغانستان فراهم سازند.

روش تحقیق

این تحقیق از نوع تحقیق مروری و کتابخانه ای است. داده ها از کتاب های مراجع معتبر و مقالات منتشر شده در مجلات علمی داوری شده استخراج شده اند. تحلیل داده ها با رویکرد توصیفی-تحلیلی انجام شده و تمرکز اصلی بر منابعی بوده است.

منابع و ابزار تحقیق

الف) در این مطالعه، از منابع زیر استفاده می شود:

- مقالات و گزارشات فنی آژانس بین المللی انرژی اتمی (IAEA Technical Reports Series)

- داده های تجربی از تحقیقات TRIUMF، Brookhaven National Laboratory

- سایت های علمی قابل دانلود در افغانستان

ب) ابزارهای تحلیلی و نرم افزارهای مورد استفاده:

- ایکسپل برای ثبت و تحلیل داده های تعامل هسته ای و مقایسه ای مؤثریت.
- پایتون برای تحلیل عددی، رسم گراف های احصایوی



مراحل انجام تحقیق

۱. جمع آوری داده‌ها از منابع علمی
۲. استخراج معلومات فزیک هسته‌ای
۳. تحلیل روابط ریاضیکی دوزیمتری
۴. مقایسه داده‌های گزارش شده در مطالعات بین‌المللی و ارزیابی قابلیت کاربرد آن‌ها در شرایط افغانستان.
۵. ارائه نتیجه‌گیری تحلیلی درباره امکان‌پذیری تولید $Tc - 99m$ در تصویر برداری های طبی.

محدودیت‌ها و کنترل متغیرها

محدودیت اصلی، نبود تجهیزات سایکلوترون فعال و جنراتورهای طبی بخاطر تولید $Tc - 99m$ در افغانستان است، بنابراین تمام تحلیل‌ها به صورت عددی و مروری انجام می‌شوند.

مبانی نظری و فزیکی دوزیمتری در تصویر برداری های $Tc - 99m$

۱. معرفی دوزیمتری هسته‌ای

دوزیمتری در طب هسته‌ای علم سنجش مقدار انرژی جذب شده از تابش‌های آیون‌ساز در انساج بدن است. هدف اصلی دوزیمتری در تصویر برداری‌های تشخیصی، تعیین دوز مؤثر و دوز جذب شده برای اندام‌های بحرانی (critical organs) است تا بتوان از یک سو کیفیت تصویر مطلوب و از سوی دیگر حداقل خطر اشعه را برای مریضان تضمین نمود، (AEA, 2018). در کاربردهای تشخیصی، به‌ویژه با $Tc - 99m$ ، بیشتر تابش‌های گاما در حدود 140 keV تولید می‌شوند که برای آشکارسازی توسط گاما‌کمره‌های (SPECT systems) بسیار مناسب است. انرژی مذکور باعث می‌شود سهم دوز جذبی (absorbed dose) نسبتاً پایین باشد؛ زیرا گاماها با احتمال بالایی از بدن فرار می‌کنند، (Cherry, Sorenson, & Phelps, 2012).

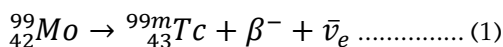


آزاده لاسرسی

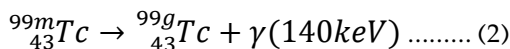
څېړنیزه

۲. معلومات فزیک هسته‌ای رادیو ایزوتوپ $Tc - 99m$

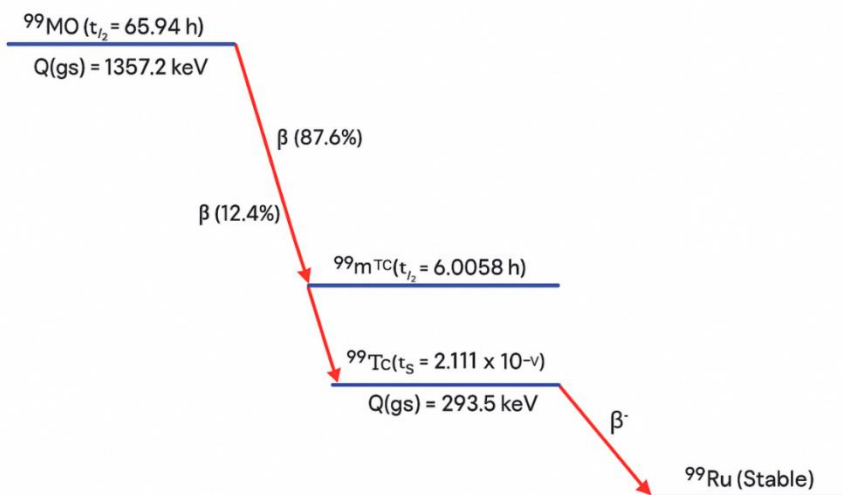
ایزوتوپ متاستیبل یا ناپایدار ($Tc - 99m$) به شکل کلاسیکی از فروپاشی ایزوتوپ مادر مولیبدنوم-۹۹ ($Mo - 99$) در ژنراتورهای طبی به دست می آید. تعامل کلی به صورت زیر است:



سپس $Tc - 99m$ با فروپاشی ایزومیری به حالت گروند $Tc - 99g$ تبدیل می شود و فوتون‌های گامای را با انرژی ۱۴۰ keV پخش می کند:



نصف عمر رادیوایزوتوپ $Tc - 99m$ برابر با (۶ ساعت) است که از نظر فیزیکی برای تصویربرداری‌های کلینیکی ایده آل محسوب می شود؛ زیرا اجازه می دهد تا در مدت زمان کوتاهی پس از تزریق، تصویربرداری انجام شده و دوز کلی به بدن پایین باقی بماند، (Cherry, 2010, Saha, 2012, & Sorenson).



گراف (1) مراحل فروپاشی ایزوتوپ $^{99}_{42}\text{Mo}$ ((IAEA. 2017)).

در شکل (1) مراحل فروپاشی ایزوتوپ (^{99}Mo) را نشان می‌دهد. مولیدنیوم-۹۹ با نصف عمر در حدود ۶۶ ساعت، به یک ایزوتوپ ناپایدار ($^{99\text{m}}_{43}\text{Tc}$) با احتمال 87,6% تبدیل می‌شود. این رادیوایزوتوپ ناپایدار، همان ماده‌ای است که در طب هسته‌ای برای تصویربرداری از اعضای بدن مانند قلب، استخوان و کلیه استفاده می‌شود، (IAEA. 2017).

۳. اصول مدل دوزیمتری MIRD

مدل (MIRD) مرجع اصلی برای محاسبه دوز جذبی از رادیوداروها است. این مدل بر پایه مفهوم انرژی جذب شده در اندام هدف از تابش ناشی از منبع استوار است و توسط انجمن طب هسته‌ای آمریکا توسعه یافته است، (Bolch et al., 2009).
فورمول اساسی مدل MIRD طوری است:

$$D(r_T) = \tilde{A}(r_S) \times S(r_T \leftarrow r_S) \dots \dots \dots (3)$$

آزاده لاسرسی

څېړنيزه

که در رابطه (۳) :

- $D(r_T)$ دوز جذب شده در اندام هدف (Gy)
- $\tilde{A}(r_S)$ فعالیت تجمعی در اندام منبع ($\text{MBq} \cdot \text{s}$)
- $S(r_T \leftarrow r_S)$ ضریب دوز، یا مقدار انرژی جذب شده در واحد کتله از تابش های صادر شده از منبع به هدف ($\text{Gy}/\text{MBq} \cdot \text{s}$).

فعالیت تجمعی $\tilde{A}$ از طریق انتگرال زمانی فعالیت $A(t)$ محاسبه می شود:

$$\tilde{A} = \int_0^{\infty} A(t) dt \dots \dots \dots (4)$$

که برای فروپاشی نمایی ساده با ثابت فروپاشی مجموعی λ_{eff} برابر است با:

$$\tilde{A} = \frac{A_0}{\lambda_{eff}} \dots \dots \dots (5)$$

در اینجا λ_{eff} ترکیبی از فروپاشی فیزیکی و حذف بیولوژیکی رادیودارو است، (Stabin, 2008).

۴. محاسبه دوز مؤثر

دوز مؤثر که با (E) نمایش داده می شود، معیاری برای برآورد خطر زیستی کل بدن از تابش است و با فرمول زیر تعریف می شود:

$$E = \sum_T \omega_T \times H_T \dots \dots \dots (6)$$

که در رابطه (۶) :

- $H_T = D_T \times \omega_R$ دوز معادل اندام است،
- ω_T ضریب وزن نسج،
- ω_R ضریب وزن تابش (برای اشعه گاما معمولاً ۱ است).



آزاده لاسرسی

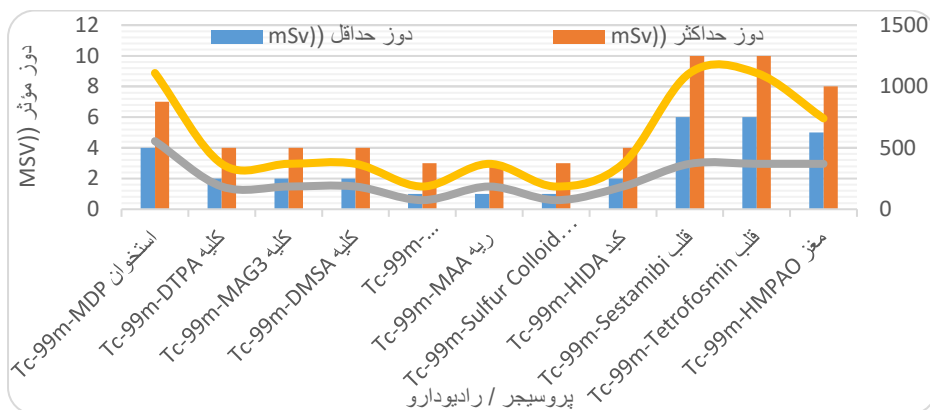
څېړنيزه

برای $Tc - 99m$ ، مقادیر معمول دوز مؤثر بین $(2 - 10)mSv$ بسته به نوع اسکن متغیر است، (ICRP Publication 128, 2015).

فورمول های فوق بخاطر محاسبه دوزهای مختلف تکنسیوم - $99m$ در جدول (۱) تطبیق شده است و نتیجه محاسبات دوز ها به شکل دوز مؤثر و فعالیت تزریقی تکنسیوم - $99m$ در شکل (۲) نمایش داده شده است.

جدول (۱) دوزهای مورد نیاز رادیو ایزوتوپ $^{99m}_{43}Tc$ در تصویر برداری های طبی مشخص شده است، (ICRP (2015)).

دوز مؤثر (mSv)	فعالیت تزریقی (MBq)	پروسیجر / رادیودارو
4-7	555-1110	Tc - 99m - MDP (اسکن استخوان)
2-4	185-370	Tc - 99m - DTPA (عملکرد کلیه)
2-4	185-370	Tc - 99m - MAG3 (خون رسانی کلیه)
2-4	185-370	Tc - 99m - DMSA (قشر کلیه)
1-3	74-185	Tc - 99m - Pertechnetate (تایراید)
1-3	185-370	Tc - 99m - MAA (اسکن ریه)
1-3	74-185	Tc - 99m - Sulfur Colloid (کبد/طحال)
2-4	185-370	Tc - 99m - HIDA / Mebrofenin (کبد و صفرا)
6-10	370-1110	Tc - 99m - Sestamibi (قلب)
6-10	370-1110	Tc - 99m - Tetrofosmin (قلب)



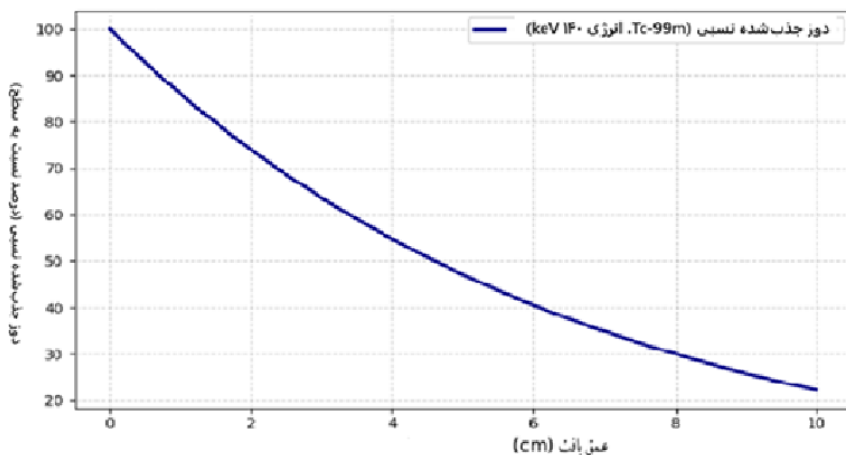
گراف (۲) بررسی دوزهای تکنسیوم-99m، (ICRP (2015)

در گراف (۲) میله‌های آبی حداقل دوز مؤثر (mSv) و میله‌های سرخ حداکثر دوز مؤثر هر پروسیجر را نمایش می‌دهند. مشاهده می‌شود که اسکن‌های قلبی با $Tc - 99m$ Sestamibi و $Tc - 99m - Tetrofosmin$ بیشترین دوز مؤثر را دارند، در حالی که اسکن تایراید با $Tc - 99m - Pertechetate$ و اسکن ریه با $Tc - 99m - MAA$ در پایین‌ترین بازه دوز قرار می‌گیرند. منحنی سبز حداقل فعالیت تزریقی (MBq) و منحنی بنفش حداکثر فعالیت تزریقی را نشان می‌دهد. این منحنی‌ها بیانگر آن هستند که پروسیجرهای قلبی و مغزی معمولاً به فعالیت تزریقی بالاتری نیاز دارند، در حالی که تصویربرداری‌های کلیوی و غده تایراید با فعالیت کمتر انجام می‌شوند. مقایسه هم‌زمان میله‌ها و منحنی‌ها نشان می‌دهد که افزایش فعالیت تزریقی لزوماً به صورت خطی منجر به افزایش دوز مؤثر نمی‌شود؛ بلکه نوع رادیودارو، توزیع زیستی و اندام هدف نقش تعیین‌کننده‌تری در دوز دریافتی مریض دارند (ICRP (2015).

آزاده لاسرسی

څېړنیزه

از شکل (۲) و جدول (۱) می توان استنتاج نمود که دامنه فعالیت تزریقی و دوز مؤثر - Tc ۹۹m به طور مستقیم به نوع پروسیجر و اندام هدف ارتباط دارد. پروسیجرهای قلبی با را دیو داروهای مشخص شده در جدول و شکل فوق بالاترین فعالیت تزریقی - (۳۷۰ MBq) و بیشترین دوز مؤثر (۱۰ - ۶ mSv) را دارند که ناشی از نیاز به کیفیت تصویری بالا در ارزیابی میزان خون رسانی به عضله قلب است. در مقابل، تصویربرداری های غده تیارید، ریه و کبد/طحال با فعالیت های پایین تر (۳۷۰ - ۷۴ MBq) انجام شده و دوز مؤثر کمتری (۳ - ۱ mSv) ایجاد می کنند که بیانگر حساسیت بالای این اندام ها و کارایی مناسب رادیودارو است. پروسیجرهای کلیوی و مغزی در محدوده میانی قرار دارند و تعادل نسبی میان فعالیت تزریقی و دوز مؤثر را نشان می دهند که اهمیت بهینه سازی دوز بر اساس اصل ALARA^۱ در طب هسته ای برجسته می سازد. رابطه بین دوز های جذب شده رادیو ایزوتوپ $Tc - 99m$ با عمق نسج درگرف (۱) بررسی شده است.



گراف (۳) رابطه بین دوزهای جذب شده و عمق نسج، (Rehani & Tsapaki, 2011;)
(ICRP (2015).

آزاده لاسرسی

څېړنیزه

در این گراف (۳)، توزیع دوز جذبی ناشی از فوتون‌های ۱۴۰ کیلو الکترون ولت ایزوتوپ $Tc - 99m$ نسبت به عمق نسج نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، دوز در سطح نسج بیشترین مقدار را دارد و با افزایش عمق، به‌صورت نمایی کاهش می‌یابد. این رفتار مطابق با قانون تضعیف نمایی اشعه‌های گاما در ماده است و نشان می‌دهد که بیشتر انرژی در لایه‌های سطحی بدن جذب می‌شود، ((Rehani & Tsapaki, 2011; ICRP (2015)).

ارزیابی خطر اشعه‌ی و اصول حفاظت در تصویربرداری‌های $Tc-99m$

۱) اصول حفاظت اشعه‌ای در طب هسته‌ای

در طب هسته‌ای، حفاظت از اشعه مبتنی بر سه اصل کلیدی است: ۱) کاهش زمان مواجهه، افزایش فاصله از منبع رادیوایزوتوپ، و استفاده از حفاظ‌های مناسب، کاهش مدت قرارگیری مریض و کارکنان در معرض تابش، و افزایش فاصله از منبع اشعه، به‌طور نمایی دوز دریافت‌شده را کاهش می‌دهد، ((Rehani & Tsapaki, 2011)). همچنین، استفاده از حفاظ فلزی نظیر سرب (Pb) یا مواد ترکیبی در سورنچ‌ها، میزها و فضای اتاق تصویربرداری، مانع از پراکندگی و تابش ثانویه می‌شود.

۲) ارزیابی دوز مؤثر و خطرات زیستی

دوز مؤثر (Effective Dose, E) معیاری است که کل خطرات استوکاستیک (تصادفی) ناشی از تابش آیون‌ساز را برای بدن نشان می‌دهد. بر پایه گزارش ((ICRP) Publication 128)، دوز مؤثر ناشی از روش‌های تشخیصی با $Tc - 99m$ معمولاً بین ۲ تا ۱۰ mSv است، ((ICRP, 2015)). با فرض مدل خطی بدون آستانه (LNT model)، احتمال اضافه‌بار خطر سرطان برای دوزی در حدود ۱۰ mSv ~ حدود ۰.۰۵٪ برآورد می‌شود، ((Bolch et al., 2009)). بنابراین، اگرچه دوزهای تشخیصی نسبتاً پایین هستند، اما باید در چارچوب سیاست ALARA اعمال گردند.



نمونه‌های مقایسه‌ای

(۱) دُزهای Tc-99m و تابش طبیعی

برای مثال، در روش تصویربرداری استخوان با ترکیب $Tc - 99m - MDP$ دوز مؤثر $5mSv$ این میزان تقریباً معادل با دو سال قرارگیری در تابش طبیعی محیطی است (Cherry, Sorenson & Phelps, 2018) این مقایسه نشان می‌دهد که روش تشخیصی ایمن است اما نباید کم‌اهمیت شمرده شود، به ویژه در میزانی که ممکن است چندین روش تصویربرداری دریافت نمایند.

(۲) بهینه‌سازی دوز برای مریض و کارکنان

بهینه‌سازی دوز به معنای دستیابی به کیفیت تصویر مطلوب با کمترین دوز ممکن است. اقداماتی که نقش مؤثری در این زمینه دارند عبارت‌اند از: تعیین فعالیت تزریقی با توجه به وزن، سن و اندازه مریض (EANM, 2018) استفاده از تجهیزات تصویربرداری با کارایی بالا (مانند آشکارسازهای CZT یا SPECT/CT جدید) که امکان کاهش دوز را بدون افت کیفیت فراهم می‌کنند. کاهش تعداد شمارش‌ها یا زمان مواجهه در مریض بزرگ سال و یا استفاده از تکنیک‌های تجدیدسازی داخلی برای کاهش نوز احصایوی ثبت و کنترل دوز مریض و کارکنان، و رعایت اصول سطوح مرجع تشخیصی DRL مطابق با رهنمایی‌های سازمان جهانی حفاظت از اشعه (ICRP) انجام می‌شود، (ICRP, 2017).

(۳) نقش فزیک هسته‌ای در کنترل کیفیت و ایمنی اشعه

فزیک‌دان هسته‌ای در مراکز طبی هسته‌ای، مسئول کالیبریشن دستگاه‌ها، تحلیل دوزیمتری، محاسبه دوزهای اندامی با مدل‌های MIRD یا شبیه‌سازی‌های Monte Carlo، و اجرای برنامه‌های تضمین کیفیت است. با استفاده از نرم‌افزارهایی مانند OLINDA/EXM یا GATE می‌توان نقشه‌های سه‌بعدی دوز را تولید و فعالیت تزریقی را بهینه کرد، در این مدل



آزاده لاسرسی

څېړنیزه

واقعی تر، تصادفی بودن مسیر فوتون ها، زاویه پراکندگی و احتمال جذب در نظر گرفته می شود،
(Stabin, Sparks & Crowe, 2009).

نتیجه گیری و مناقشه

از تحلیل و توصیف مطالعات مرتبط با دوزیمتری در کاربردهای تشخیصی رادیوایزوتوپ تکنسیوم-99m می توان نتیجه گرفت که این رادیونوکلاید به دلیل ویژگی های فیزیکی و فنی مطلوب، از جمله نصف عمر فیزیکی کوتاه و انرژی مناسب فوتون گاما، یکی از پرکاربردترین ایمن ترین ایزوتوپ ها در تصویربرداری های تشخیصی طب هسته ای محسوب می شود. دوز مؤثر حاصل از پروسیجرهای مختلف مبتنی بر $Tc - 99m$ معمولاً در محدوده ۱ الی ۹ میلی سیورت قرار دارد که در مقایسه با بسیاری از روش های تصویربرداری دیگر، پایین و از نظر کلینیکی قابل قبول ارزیابی می شود. با وجود پایین بودن نسبی دوز، رعایت اصول دوزیمتری دقیق مبتنی بر مدل های استاندارد مانند MIRD و در نظر گرفتن فکتورهای فردی مریض از جمله وزن، سن و بیوکینتیک رادیودارو برای بهینه سازی دوز و حفظ کیفیت تصویر، امری ضروری و اجتناب ناپذیر است. در این میان، اجرای دقیق اصول حفاظت اشعه یی مخصوصاً اصل ALARA و استفاده از سطوح مرجع تشخیصی (DRL) به عنوان راهبردهای کلیدی، نقش مهمی در جلوگیری از تجویز دوزهای غیرضروری و تضمین کیفیت تشخیصی مطلوب ایفا می کنند.

نقش فزیک دانان هسته ای در کالیبریشن دستگاه ها، کنترل کیفیت تصویربرداری و بهره گیری از نرم افزارهای پیشرفته محاسباتی مانند OLINDA/EXM و GATE برای کاهش عدم قطعیت در برآورد دوز و ارتقای ایمنی مریضان و کارکنان، نقشی حیاتی و غیرقابل اجتناب است. در نهایت، برای ارتقای استانداردهای ایمنی به ویژه در کشورهای در حال توسعه مانند افغانستان، تدوین و اجرای دستورالعمل های ملی دوزیمتری مبتنی بر پروتوکلهای سازمان های معتبر بین المللی نظیر IAEA، ICRP و EANM و سرمایه گذاری بر آموزش تخصصی و مستمر



آزاده لاسرسی

څېړنیزه

نیروی انسانی، اقدامی ضروری و راهبردی محسوب می‌شود. این اقدامات می‌توانند ضمن کاهش خطرات اشعه‌یی، هماهنگی و قابلیت اطمینان پروتوکل‌های تصویربرداری را در سطح ملی افزایش دهند و در آینده زمینه مشارکت فعال کشور در تولید و استفاده از رادیوایزوتوپ‌های طبی را فراهم سازند.

فهرست منابع

- Bolch, W. E., Eckerman, K. F., Sgouros, G., & Thomas, S. R. (2009). *MIRD pamphlet no. 21: A generalized schema for radiopharmaceutical dosimetry—Standardization of nomenclature*. *Journal of Nuclear Medicine*, 50(3), 477-484. <https://doi.org/10.2967/jnumed.108.056036>
- Cherry, S. R., Sorenson, J. A., & Phelps, M. E. (2012). *Physics in nuclear medicine* (4th ed.). Elsevier.
- Eckerman, K. F., & Endo, A. (2008). *MIRD: Radionuclide data and decay schemes* (2nd ed.). Society of Nuclear Medicine
- Gagnon, K. (2012). *Cyclotron production of technetium-99m*. *Journal of Nuclear Medicine*, 53(5), 748–752. <https://doi.org/10.2967/jnumed.111.099044>
- International Atomic Energy Agency. (2017). *Technetium-99m radiopharmaceuticals: Manufacture of kits*. International Atomic Energy Agency.
- International Atomic Energy Agency. (2008). *Technetium-99m radiopharmaceuticals: Manufacture of kits* (Technical Reports Series No. 466). IAEA. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/trs466_web.pdf IAEA Publications
- International Atomic Energy Agency. (2018). *Radiation protection and safety in medical uses of ionizing radiation*. International Atomic Energy Agency.
- International Commission on Radiological Protection. (2017). *Diagnostic reference levels in medical imaging* (ICRP Publication 135). *Annals of the ICRP*, 46(1), 1–144.
- International Commission on Radiological Protection. (2015). *Radiation dose to patients from radiopharmaceuticals* (ICRP Publication 128). *Annals of the ICRP*, 44(2S). <https://doi.org/10.1177/0146645314558019>



څېړنیزه

آزاده لاسرسی

Kupitz, D., Wissel, H., Wuestemann, J., Blümmel, S., Pech, M., Amthauer, H., Kreissl, M. C., & Grosser, O. S. (2021). *Optimization of SPECT/CT imaging protocols for quantitative and qualitative 99mTc SPECT*. *EJNMMI Physics*, 8, Article 57. <https://doi.org/10.1186/s40658-021-00405-3>

Rehani, M. M., & Tsapaki, V. (2011). *Impact of the International Atomic Energy Agency (IAEA) actions on radiation protection of patients in many countries*. *Radiation Protection Dosimetry*, 147(1–2), 34–37. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncr259>

Saha, G. B. (2010). *Fundamentals of nuclear pharmacy* (6th ed.). Springer.
 Stabin, M. G. (2008). *Fundamentals of nuclear medicine dosimetry*. Springer.
 Stabin, M. G., Sparks, R. B., & Crowe, E. (2005). *OLINDA/EXM: The second-generation personal computer software for internal dose assessment*. *Health Physics*, 85(3), 294–310. <https://doi.org/10.1097/00004032-200309000-00008>

Zoetelief, J. (2014). *Physics in nuclear medicine*. *Physics in Medicine & Biology*, 59(13), R233–R257. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/59/13/R233>

ضمیمه

تعریف / توضیح	نام کامل	واحد یا مخفف
واحد فعالیت رادیواکتیف (1 فروپاشی در ثانیه)	Becquerel	Bq
یک میلیون بکرل؛ واحد فعالیت تزریق رادیودارو	Mega-Becquerel	MBq
واحد دوز جذبی تابش (۱ ژول انرژي در هر کيلوگرم)	Gray	Gy
هزارم گري؛ برای دوزهای پایین تر	Milli-Gray	mGy
واحد دوز مؤثر زیستی تابش	Sievert	Sv
هزارم سیورټ؛ برای تصویربرداری طبي رایج	Milli-Sievert	mSv
واحد انرژي ذرات تابشی (1 کيلوالکترون ولت)	Kilo-Electronvolt	keV



آزاده لاسرسی

څېړنيزه

ثابت فروپاشی رادیواکتیف، $\lambda =$

$$\frac{\ln(2)}{T_{\frac{1}{2}}}$$

λ (Lamba Decay Constant

$T_{\frac{1}{2}}$ Half-life

زمان لازم برای فروپاشی نیمی از ماده رادیواکتیف

Tc

ایزوتوپ متاستیبل Tc-99m، پرکاربرد در تصویربرداری

– 99m Technetium-99 metastable

Mo

– 99 Molybdenum-99

ایزوتوپ مادر برای تولید Tc-99m مدل ستندرد محاسبه دوز داخلی در طب هسته‌ای

MIRD Medical Internal Radiation Dose International Atomic Energy

IAEA Agency

آژانس بین‌المللی انرژی اتمی

International Commission on کمیسیون بین‌المللی حفاظت در برابر

ICRP Radiological Protection

اشعه‌ها

European Association of Nuclear

EANM Medicine

انجمن اروپایی طب هسته‌ای

DRL Diagnostic Reference Level

سطح مرجع تشخیصی برای کنترل دوز مریضان

ALARA As Low As Reasonably Achievable Single Photon Emission

اصل حداقل‌سازی دوز تا حد معقول

SPECT Computed Tomography

توموگرافی با گسیل تک‌فوتون

نوعی آشکارساز نیمه هادی با حساسیت بالا

CZT Cadmium Zinc Telluride

MDP Methylene Diphosphonate

Tc-99m-MDP رادیوداروی استخوان

Diethylene Triamine Pentaacetic Tc-99m- رادیوداروی عملکرد کلیه

DTPA Acid

DTPA

رادیوداروی خون‌رسانی کلیه Tc-

MAG3 Mercaptoacetyltriglycine

99m-MAG3

Hexamethylpropyleneamine رادیوداروی جریان خون مغز Tc-

HMPAO Oxime

99m-HMPAO

OLINDA

نرم‌افزار محاسبه دوز داخلی

/EXM Dose Calculation Software

(OLINDA/EXM)



آزاده لاسرسی

څېړنیزه

	Geant4	Application	for	نرم افزار شبیه سازی مونت کارلو برای
GATE	Tomographic Emission			تصویر برداری هسته ای
SNR	Signal-to-Noise Ratio			نسبت سگنال به نویز در تصویر برداری