African Journal of Advanced Pure and Applied Sciences (AJAPAS)
Online ISSN: 2957-644X
Volume 4, Issue 4, 2025
Page No: 410-434
Website: ***https://aaasjournals.com/index.php/ajapas/index***
ISI 2025: 1.126 **SJIFactor 2024: 6.752** **معامل التأثير العربي: 1.62**

Applications of nuclear physics in the diagnosis of cancer

Asmaa Binour Emhamed Al-Qadi [1*] , Zainab Saeed Sassi Al-Hamri [2]
[1,2] Department of Physics, Faculty of Education-Zolten, University of Sabratha, Zolten, Libya

تطبيقات الفيزياء النووية في تشخيص الأمراض السرطانية

أسماء بنور إمحمد القاضي [1*] ، زينب سعيد ساسي الحمري [2]
[2،1] قسم الفيزياء، كلية التربية - زلطن، جامعة صبراتة، زلطن، ليبيا

[*]Corresponding author: asma.b.elgady369369a@gmail.com

Received: August 21, 2025	Accepted: October 26, 2025	Published: November 05, 2025

Abstract:
This study addresses the vital role of nuclear physics in cancer diagnosis, reviewing the basic physical principles of radiation interaction with living matter and the mechanisms of using radioisotopes in medical imaging. The paper focuses on explaining how nuclear imaging techniques such as positron emission tomography (PET) and single-photon emission computed tomography (SPECT) can be used to detect tumors early and accurately determine their stage of spread. It also reviews the most important radioisotopes used in clinical applications, such as fluorine-18, technetium-99m, and iodine-131, explaining their physical properties and role in diagnosing specific types of cancer, such as thyroid, lung, and bone tumors. The study also highlights the environmental and safety aspects associated with the use of nuclear technologies, including principles of radiation protection, international safety standards issued by the International Atomic Energy Agency (IAEA), and mechanisms for managing medical radioactive waste to reduce radioactive contamination and ensure environmental protection. In conclusion, the results confirm that nuclear physics is an essential tool in modern medicine, thanks to its ability to integrate functional and anatomical information, making it an effective means for early diagnosis and assessing the effectiveness of treatment. The paper also recommends supporting scientific research, developing the infrastructure for nuclear medicine, and enhancing cooperation between physicists and physicians to expand the scope of its applications and improve the quality of healthcare.

Keywords: Medical nuclear physics, radioisotopes, nuclear imaging, PET/CT, SPECT/CT, early cancer diagnosis, radioprotection, International Atomic Energy Agency (IAEA), effectiveness of cancer therapy.

الملخص
تتناول هذه الدراسة الدور الحيوي للفيزياء النووية في تشخيص الأمراض السرطانية، من خلال استعراض المبادئ الفيزيائية الأساسية للتفاعل الإشعاعي مع المادة الحية، وآليات استخدام النظائر المشعة في التصوير الطبي. تركز الورقة على توضيح كيفية توظيف تقنيات التصوير النووي مثل التصوير المقطعي بالإصدار البوزيتروني (PET) والتصوير المقطعي بالإصدار الفوتوني المفرد (SPECT) في الكشف المبكر عن الأورام وتحديد مراحل انتشارها بدقة عالية. كما تستعرض أهم النظائر المشعة المستخدمة في التطبيقات السريرية مثل الفلور-18، التكنيشيوم-99م، واليود-131، مع بيان خصائصها الفيزيائية ودورها في تشخيص أنواع محددة من السرطان كأورام الغدة الدرقية، والرئة، والعظام.تسلّط الدراسة الضوء أيضاً على الجوانب البيئية والأمنية المرتبطة باستخدام التقنيات النووية، بما في ذلك مبادئ الوقاية الإشعاعية، ومعايير الأمان الدولية الصادرة عن الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA)، وآليات إدارة النفايات المشعة الطبية للحد من التلوث الإشعاعي وضمان حماية البيئة.وفي الختام، تؤكد النتائج أن الفيزياء النووية تُعدّ أداة أساسية في الطب الحديث بفضل قدرتها على الدمج بين المعلومات الوظيفية والتشريحية، ما يجعلها وسيلة فعّالة للتشخيص المبكر وتقييم فعالية العلاج. كما توصي الورقة بضرورة

 Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

دعم البحث العلمي وتطوير البنية التحتية للطب النووي، وتعزيز التعاون بين الفيزيائيين والأطباء لتوسيع نطاق تطبيقاته وتحسين جودة الرعاية الصحية.

الكلمات المفتاحية: الفيزياء النووية الطبية، النظائر المشعة، التصوير النووي، PET/CT، SPECT/CT، التشخيص المبكر للسرطان، الوقاية الإشعاعية، الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA)، فعالية العلاج السرطاني.

1. المقدمة

تُعَدّ الفيزياء النووية الطبية من أهم الفروع الحديثة التي نشأت نتيجة التفاعل بين العلوم الفيزيائية والطبية، إذ تمثل تطبيقاً مباشراً للمبادئ النووية في خدمة الإنسان وصحته. وقد ساهم التطور السريع في تقنيات الفيزياء النووية خلال القرن العشرين في إحداث ثورة علمية في المجال الطبي، خصوصاً في تشخيص الأمراض المزمنة والمعقدة مثل السرطان. فبينما كانت الفيزياء النووية في بداياتها تُعنى بدراسة تركيب النواة وخصائصها وعمليات الانشطار والاندماج، فإنها سرعان ما تجاوزت حدود المختبرات الفيزيائية لتدخل بقوة إلى المستشفيات والمراكز الطبية، حيث أصبحت تُستخدم النظائر المشعة والأجهزة النووية في الكشف عن أدق التغيرات التي تصيب الخلايا والأنسجة الحية. ويُعزى هذا التطور إلى قدرة التقنيات النووية على تقديم صورٍ دقيقة وعميقة للبنية الداخلية للجسم الإنساني، مما يتيح للأطباء ملاحظة ما لا يمكن رؤيته بالوسائل التقليدية.[1,2]

إنّ أهمية الفيزياء النووية في تشخيص الأورام السرطانية تنبع من الدور الحاسم الذي تؤديه في الكشف المبكر عن المرض قبل ظهور أعراضه السريرية الواضحة. فالسرطان، بطبيعته، مرض يتطور بصمت داخل الجسم، وغالباً لا يمكن اكتشافه إلا بعد أن يكون قد بلغ مرحلة متقدمة يصعب علاجها. وهنا يأتي دور التقنيات النووية، مثل التصوير المقطعي بالإصدار البوزيتروني (PET) والتصوير المقطعي بالإصدار الفوتوني المفرد(SPECT) ، اللذين يسمحان بتحديد نشاط الخلايا وعمليات الأيض بدقة عالية. وبفضل هذه التقنيات يمكن اكتشاف الأورام الصغيرة جداً التي لا يمكن رؤيتها بالأشعة السينية أو بالرنين المغناطيسي. كما تساعد هذه الأساليب على التمييز بين الأنسجة السليمة والمصابة، وتحديد درجة انتشار الورم، مما يسهم في اختيار الخطة العلاجية المثلى لكل مريض على حدة. إنّ التشخيص المبكر لا يزيد فقط من فرص الشفاء، بل يقلل أيضاً من الحاجة إلى العلاجات المكلفة والمؤلمة ويحد من معدلات الوفيات[3].

تهدف هذه الدراسة إلى تسليط الضوء على التطبيقات المختلفة للفيزياء النووية في تشخيص السرطان، من خلال تناول الأسس النظرية التي يقوم عليها هذا المجال، واستعراض أهم النظائر المشعة المستخدمة في الطب النووي مثل التكنيشيوم-99م والفلور-18 واليود-131، والتي تلعب أدواراً أساسية في تتبع العمليات الحيوية داخل الجسم. كما تتناول الورقة تحليل آليات عمل الأجهزة المستخدمة في التصوير النووي وكيفية دمجها مع تقنيات أخرى مثل التصوير المقطعي المحوسب (CT) لتحقيق دقة تشخيصية أعلى. وسيتم التركيز كذلك على التحديات التقنية والعلمية التي تواجه هذا المجال، بما في ذلك محدودية توفر النظائر المشعة، والحاجة المستمرة إلى تطوير أجهزة أكثر كفاءة وحساسية، وضمان حماية العاملين في المجال الطبي من مخاطر الإشعاع.

تعتمد هذه الورقة منهجاً وصفياً تحليلياً يجمع بين المراجعة النظرية للمفاهيم الفيزيائية الأساسية والتطبيقات العملية السريرية للفيزياء النووية الطبية. وسيتم تحليل الدراسات العلمية السابقة التي تناولت فعالية هذه التقنيات في الكشف المبكر عن أنواع السرطان المختلفة، مع الإشارة إلى الجوانب البيئية والأمنية المتعلقة باستخدام الإشعاع في المجال الطبي، مثل إدارة النفايات المشعة وضمان تطبيق معايير الأمان الإشعاعي وفقاً لإرشادات الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA). وتسعى الدراسة في ختامها إلى تقديم رؤية مستقبلية حول الاتجاهات الحديثة في تطوير الطب النووي ودوره في تعزيز مفهوم الطب الشخصي، حيث يمكن من خلال هذه التقنيات تصميم خطط تشخيصية وعلاجية مخصصة لكل مريض بناءً على خصائصه الجينية والبيولوجية، مما يجعل الفيزياء النووية ركيزة أساسية في مستقبل الطب الحديث.

2. المبادئ الأساسية للفيزياء النووية الطبية

2.1 النشاط الإشعاعي وأنواعه

يُعدّ النشاط الإشعاعي من الظواهر الفيزيائية الأساسية التي تقوم عليها تطبيقات الفيزياء النووية في المجال الطبي، وهو ظاهرة طبيعية أو صناعية تنبع من عدم استقرار بعض أنوية الذرات، مما يؤدي إلى انبعاث جسيمات أو طاقة إشعاعية بهدف الوصول إلى حالة أكثر استقراراً. تُعرف هذه العملية باسم التحلّل النووي، وهي جوهر العمليات التي يتم استغلالها في التشخيص والعلاج الإشعاعي. فكل نظير مشع يمتلك معدل تحلّل ثابت يُعبّر عنه بما يُعرف بـــ العمر النصفي-Half)

 Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

(Life، وهو الزمن اللازم ليتحلّل نصف عدد الذرات المشعة في عينة معينة. ويُعد العمر النصفي من الخصائص الفيزيائية المهمة في الطب النووي، إذ يحدد ملاءمة النظير للاستخدام التشخيصي أو العلاجي: فالنظائر ذات الأعمار النصفية القصيرة تُستخدم غالباً في التصوير التشخيصي لتقليل الجرعة الإشعاعية للمريض، بينما تُستخدم النظائر ذات الأعمار الأطول في العلاج [4,5].

يحدث التحلّل النووي عندما تُصدر النواة غير المستقرة أحد أنواع الإشعاعات الثلاثة الرئيسية :أشعة ألفا(α) ، أشعة بيتا (β)، وأشعة جاما(γ) ، ولكل منها خصائص مميزة من حيث طبيعتها، وقدرتها على الاختراق، وتأثيرها على المادة. يمكن توضيح هذه الأنواع ومقارنة خصائصها في الجدول التالي:

جدول (1): مقارنة بين أنواع الإشعاعات النووية

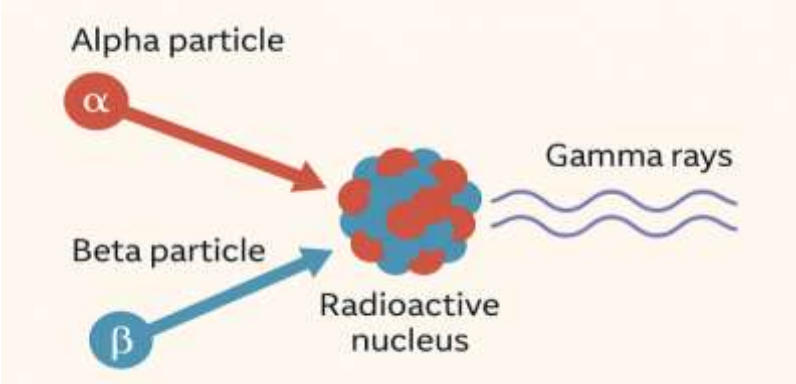
نوع الإشعاع	الاستخدامات الطبية	التأثير البيولوجي	القدرة على الاختراق	الشحنة	طبيعة الإشعاع
ألفا(α)	محدودة، تُستخدم في العلاج الداخلي لبعض الأورام	عالية عند التماس المباشر	منخفضة جداً، تتوقف بورقة	موجبة (+2)	نواة هيليوم (2 بروتون + 2 نيوترون)
بيتا(β)	تُستخدم في التشخيص والعلاج، مثل اليود-131	متوسطة	متوسطة، تُوقف بطبقة رقيقة من المعدن	سالبة أو موجبة	إلكترون أو بوزيترون
جاما(γ)	شائعة جداً في التصوير (مثل التكنيشيوم-99م)	منخفضة نسبياً مقارنة بألفا	عالية جداً، تحتاج إلى رصاص أو خرسانة للإيقاف	عديمة الشحنة	فوتونات عالية الطاقة

أولاً: إشعاعات ألفا(α) إشعاعات ألفا هي جسيمات ثقيلة نسبياً تتكوّن من نواتين للهيدروجين (أي بروتونين) ونيوترونين، وتُعتبر ذات قدرة اختراق ضعيفة بسبب كتلتها الكبيرة وشحنتها الموجبة. وعلى الرغم من ضعف قدرتها على اختراق الأنسجة، إلا أنها تُسبب ضرراً كبيراً في حال تفاعلها المباشر مع الخلايا، ولهذا فهي تُستخدم في العلاج الداخلي الموجّه لبعض أنواع السرطانات، حيث يتم إدخال النظير المشع داخل الورم لتدمير الخلايا السرطانية دون الإضرار بالأنسجة السليمة المحيطة. ومن أمثلة النظائر التي تُصدر إشعاعات ألفا نظير الراديوم-223 المستخدم في علاج سرطان العظام المنتشر[6].

ثانياً: إشعاعات بيتا(β) تنقسم إشعاعات بيتا إلى نوعين :بيتا السالبة (−β) وهي إلكترونات تنبعث من النواة عندما يتحول نيوترون إلى بروتون، وبيتا الموجبة (+β) وهي بوزيترونات (نظائر للإلكترون بشحنة موجبة) تنبعث عند تحوّل بروتون إلى نيوترون. تُعد إشعاعات بيتا أخف من ألفا وأكثر قدرة على الاختراق، مما يجعلها مناسبة للاستخدام في التطبيقات التشخيصية والعلاجية. من أشهر النظائر الباعثة لبيتا نظير اليود-131 (I-131) المستخدم في علاج أمراض الغدة الدرقية، حيث تمتص خلايا الغدة هذا النظير بشكل انتقائي فيعمل على تدمير الخلايا المصابة. أما نظائر بيتا الموجبة مثل الفلور-18 (F-18)، فهي أساس تقنية التصوير المقطعي بالإصدار البوزيتروني (PET) ، إذ تنبعث منها بوزيترونات تتفاعل مع الإلكترونات لتنتج إشعاعات جاما تُستخدم في رسم صورة دقيقة لتوزيع النظير داخل الجسم[7].

ثالثاً: إشعاعات جاما(γ) أما إشعاعات جاما فهي موجات كهرومغناطيسية ذات طاقة عالية تصدرها النواة بعد عمليات التحلّل، وغالباً ما تُرافق انبعاث جسيمات ألفا أو بيتا. تمتاز بقدرتها الكبيرة على الاختراق، إذ يمكنها عبور عدة سنتيمترات من الرصاص أو عشرات السنتيمترات من الخرسانة، ولذلك فهي تُستخدم على نطاق واسع في الطب النووي لأغراض التصوير. تعتمد معظم تقنيات التصوير النووي مثل SPECT وPETعلى قياس الفوتونات الصادرة من إشعاعات جاما لتكوين صور ثلاثية الأبعاد توضح توزيع النظائر المشعة داخل الجسم. ومن أكثر النظائر استخداماً في هذا المجال التكنيشيوم-99م (Tc-99m)، الذي يمتاز بطاقة مناسبة وعمر نصفي قصير (حوالي 6 ساعات) مما يجعله مثالياً للتصوير التشخيصي دون تعريض المريض لجرعة إشعاعية عالية.

 Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



شكل (1): تمثيل توضيحي لأنواع الإشعاعات النووية

إنّ فهم الفروق الجوهرية بين هذه الأنواع من الإشعاعات يمثّل الركيزة الأساسية لاختيار النوع المناسب لكل تطبيق طبي. فبينما تُستخدم أشعة جاما في التصوير التشخيصي بفضل قدرتها على الاختراق والوصول إلى أجهزة الكشف خارج الجسم، تُستخدم أشعة ألفا وبيتا بشكل مباشر في العلاجات الإشعاعية الموجّهة نظرًا لقدرتها على إحداث تأثير موضعي قوي داخل الورم. وبذلك، فإن النشاط الإشعاعي ليس مجرد ظاهرة فيزيائية، بل أداة دقيقة تُسخّر لخدمة الإنسان من خلال كشف المرض وعلاجه في آنٍ واحد، ضمن ضوابط علمية صارمة توازن بين الفائدة الطبية والسلامة الإشعاعية[8].

2.2 تفاعل الإشعاع مع المادة الحية

إنّ فهم كيفية تفاعل الإشعاع مع المادة الحية يُعدّ من الركائز الأساسية في الفيزياء النووية الطبية، إذ يُتيح هذا الفهم توظيف الإشعاع بشكل آمن وفعّال سواء في التشخيص أو العلاج. عندما تدخل الجسيمات أو الفوتونات المشعة إلى الأنسجة الحية، فإنها تتفاعل مع الذرات والجزيئات المكوّنة للخلايا، مؤدية إلى تغييرات في بنيتها الفيزيائية أو الكيميائية. تختلف طبيعة هذه التفاعلات باختلاف نوع الإشعاع (ألفا، بيتا، جاما)، وطاقته، وكثافة الأنسجة التي يخترقها. وعادةً ما تُصنّف التأثيرات الناتجة إلى نوعين رئيسيين :تأثيرات فيزيائية تحدث فور امتصاص الطاقة، وتأثيرات كيميائية وبيولوجية تظهر لاحقاً نتيجة تلف الجزيئات الحيوية[9].

في المستوى الفيزيائي، تبدأ التفاعلات عندما تصطدم الجسيمات المشعة بإلكترونات الذرات داخل الخلايا، مما يؤدي إلى تأين الذرات (إزالة الإلكترونات منها) أو إثارتها (رفعها إلى مستويات طاقة أعلى). هذه العمليات تنتج عنها أيونات وجذور حرّة، وهي جزيئات شديدة النشاط الكيميائي يمكنها أن تهاجم جزيئات حيوية مثل الحمض النووي (DNA) أو البروتينات. وعلى الرغم من أن الخلايا تمتلك آليات لإصلاح الأضرار الناتجة، فإن كثرة التفاعلات الإشعاعية قد تؤدي إلى طفرات جينية أو موت خلوي، وهي الظاهرة التي تُستغل في قتل الخلايا السرطانية أثناء العلاج الإشعاعي. ومن الناحية الطبية، فإن الجرعة الممتصة من الإشعاع تُقاس بوحدة الغيغري(Gray - Gy) ، بينما تُقاس التأثيرات البيولوجية بوحدة السيفرت (Sievert - Sv)التي تأخذ في الاعتبار نوع الإشعاع وحساسية الأنسجة المختلفة له[10].

يمكن تلخيص الفروق الأساسية بين أنواع التفاعل الإشعاعي في الأنسجة الحية من حيث آلية التأثير والنتائج الحيوية في الجدول التالي (مع ترتيب الأعمدة المقلوب كما طلبت:

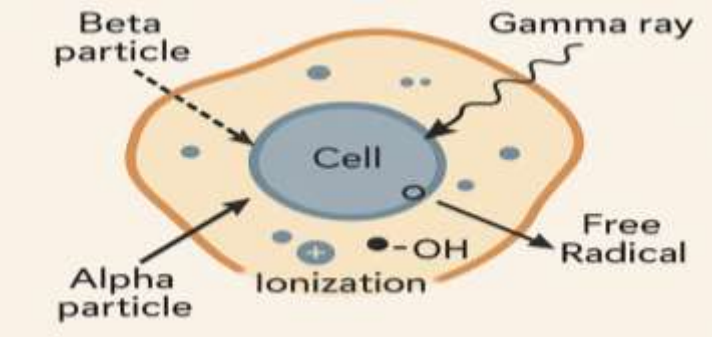
جدول (2): مقارنة بين تفاعل أنواع الإشعاعات المختلفة مع المادة الحية

نوع الإشعاع	طبيعة التفاعل مع المادة	عمق الاختراق في الأنسجة	مستوى التأين	التأثيرات البيولوجية
ألفا(α)	فقدان طاقة سريع نتيجة الكتلة الكبيرة	ضحل جداً (يتوقف في طبقات الخلايا السطحية)	عالٍ جداً	يسبب تلفاً موضعياً عالياً للخلايا عند ملامستها، ويُستخدم لتدمير الأورام الداخلية الصغيرة
بيتا(β)	يتفاعل مع الإلكترونات مسبباً تأيناً متدرجاً	متوسط (يخترق عدة مليمترات من الأنسجة)	متوسط	يُحدث أضراراً متوسطة داخل الخلايا، وقد يؤدي إلى تلف في الـ DNAعند التعرض المفرط
جاما(γ)	يسبب إثارة إلكترونات دون تأين مباشر في معظم الأحيان	عميق جداً (يمكن أن يخترق الجسم كاملاً تقريباً)	منخفض	تأثيره غير مباشر غالباً عبر تكوين الجذور الحرة، ويُستخدم أساساً في التصوير والتشخيص

 Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

عندما يمتص النسيج الحي الإشعاع، تتوزع الطاقة الممتصة بشكل غير متجانس داخل الخلايا، مما يؤدي إلى تفاوت في شدة الضرر .الأنسجة ذات الكثافة العالية مثل العظام تمتص كمية أكبر من الطاقة مقارنة بالأنسجة الرخوة مثل العضلات، في حين تكون الأنسجة الغنية بالماء أكثر عرضة لتكوين الجذور الحرة التي تهاجم الخلايا المجاورة. لذلك، فإن معرفة توزيع الجرعة الإشعاعية داخل الجسم تُعد أمراً أساسياً لتحديد الجرعة المثالية في العلاج الإشعاعي، بحيث تُدمّر الخلايا السرطانية دون الإضرار بالخلايا السليمة المحيطة[11,12].

من الناحية التطبيقية، تعتمد تقنيات التصوير النووي على هذه التفاعلات بطريقة محكومة، إذ تُستخدم جرعات إشعاعية صغيرة للغاية بحيث تُحدث تأيناً يمكن رصده بأجهزة الكشف دون أن يسبب ضرراً بيولوجياً. على النقيض من ذلك، فإن العلاج الإشعاعي يعتمد على جرعات عالية تهدف إلى قتل الخلايا السرطانية عبر إتلاف مادتها الوراثية. إن التمييز بين هذين الاستخدامين يعتمد على مبدأ أساسي في الفيزياء الطبية :العلاقة الطردية بين الجرعة الممتصة وشدة التأثير البيولوجي، وهو ما يتطلب مراقبة دقيقة وتخطيطاً مسبقاً لتوزيع الإشعاع داخل الجسم[13].



شكل (2): توضيح مسار تفاعل الإشعاع مع الخلايا الحية

يوضّح الشكل (2) خليةً حيةً في الوسط تحيط بها غشاءٌ خلوي، مع ثلاثة أنماط من الإشعاع تتفاعل معها بطرق مختلفة :ألفا (α)قصيرة المدى تتوقف عند الغشاء وتُحدث تأيّناً موضعياً قوياً، بيتا (β) متوسطة المدى تنفذ إلى السيتوبلازم وتسبب تأيّناً متدرجاً، وجاما (γ) طويلة المدى تعبر الخلية بأكملها. تُظهر الرموز داخل الخلية وخارجها عملية التأين وتكوين الجذور الحرّة التي قد تُلحق الضرر بالمكوّنات الحيوية مثل الـDNA.[14]

3.2 المتطلبات الفيزيائية للنظائر الطبية

تُعدّ النظائر المشعة الركيزة الأساسية في تطبيقات الفيزياء النووية الطبية، إذ يعتمد نجاح التشخيص أو العلاج الإشعاعي بشكل كبير على الخصائص الفيزيائية للنظير المستخدم. تتحدد هذه الخصائص وفق مجموعة من المعايير الدقيقة التي تضمن تحقيق التوازن بين الكفاءة الطبية والسلامة الإشعاعية للمريض والعاملين في المجال. ويُقصد بالمتطلبات الفيزيائية للنظائر الطبية تلك الصفات التي تجعل النظير ملائماً لتطبيق معين، سواءً كان في التصوير النووي أو في العلاج الإشعاعي. من أهم هذه المتطلبات :العمر النصفي المناسب، نوع الإشعاع المنبعث، طاقة الإشعاع، نقاء الإشعاع، وطريقة إنتاج النظير واستقراره الكيميائي[15].

أولاً، يُعتبر العمر النصفي (Half-life) عاملاً حاسماً في اختيار النظير المشع، إذ يجب أن يكون كافياً لإتمام الفحص أو العلاج دون أن يعرّض المريض لجرعة إشعاعية زائدة. فالنظائر المستخدمة في التصوير التشخيصي مثل التكنيشيوم-99م (Tc-99m)تمتاز بعمر نصف قصير (حوالي 6 ساعات)، ما يتيح إجراء الفحوص بسرعة مع تقليل الجرعة الممتصة. أما النظائر العلاجية مثل اليود-131 (I-131) فلها عمر نصف أطول (حوالي 8 أيام) لتوفير تأثير علاجي مستمر على الخلايا السرطانية[2,6].

ثانياً، يعتمد الاختيار على نوع الإشعاع المنبعث، إذ تُفضَّل إشعاعات جاما (γ) في التصوير لقدرتها على اختراق الأنسجة والوصول إلى أجهزة الكشف الخارجية، بينما تُستخدم إشعاعات ألفا (α) وبيتا (β) في العلاج بسبب قدرتها العالية على إحداث أضرار موضعية بالخلايا المستهدفة. كما تُعد طاقة الإشعاع (Radiation Energy) عاملاً مهماً، حيث يجب أن تكون طاقة الفوتونات أو الجسيمات كافية لاختراق الأنسجة المطلوبة دون تجاوزها إلى مناطق غير مستهدفة[16].

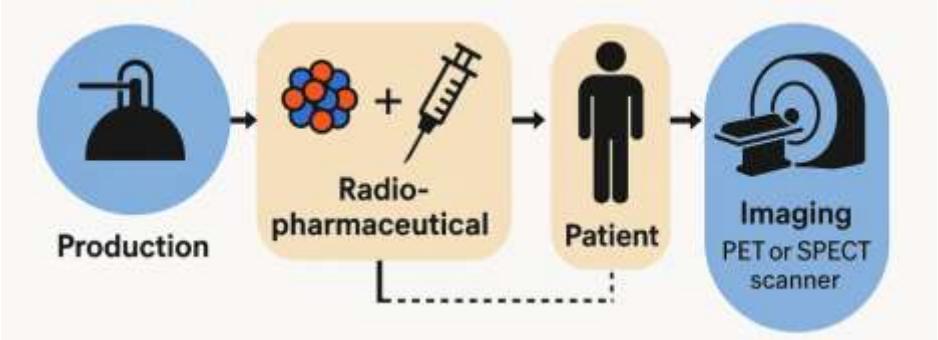
ثالثاً، يُراعى أن يكون للنظير نقاء إشعاعي وكيميائي عالٍ، أي أن لا يصاحبه نظائر أخرى غير مرغوبة قد تُحدث تداخلاً في القياسات أو زيادة في الجرعة الإشعاعية. إضافة إلى ذلك، يجب أن تكون له خصائص كيميائية مستقرة تتيح ربطه بسهولة بجزيئات دوائية (Radiopharmaceuticals) تُوجّه إلى أعضاء أو خلايا محددة في الجسم، مثل أنسجة الورم أو المستقبلات الخلوية الخاصة. وأخيراً، يجب أن يكون إنتاج النظير عملياً وآمناً، إما عبر المفاعلات النووية أو المسرّعات (Cyclotrons)، مع ضمان توافره المستمر في المرافق الطبية[1].

 Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

جدول (3): مقارنة فيزيائية بين أهم النظائر المستخدمة في الطب النووي

النظير المشع	العمر النصفي	نوع الإشعاع	طاقة الإشعاع (MeV)	الاستخدام الطبي
التكنيشيوم-99م (Tc-99m)	6ساعات	جاما(γ)	0.140	تصوير الأعضاء (العظام، القلب، الكبد)
الفلور-18 (F-18)	110 دقائق	بوزيترون (β^+)	0.511	تشخيص الأورام بواسطةPET
اليود-131 (I-131)	8أيام	بيتا/جاما	0.364(جاما) و0.606 (بيتا)	علاج أورام الغدة الدرقية
الراديوم-223 (Ra-223)	11.4أيام	ألفا(α)	5.78	علاج الأورام المنتشرة في العظام
الزينون-133 (Xe-133)	13ساعة	جاما(γ)	0.159	تقييم تدفق الدم في الدماغ

تُوضح هذه المقارنة كيف تختلف النظائر من حيث طاقتها ونوع الإشعاع المنبعث، وهو ما يجعل كل نظير مناسباً لتطبيق محدد. فمثلاً، النظائر ذات طاقة جاما منخفضة نسبيًا مثل التكنيشيوم-99م مثالية للتصوير لأنها تُنتج صوراً عالية الدقة دون جرعة زائدة. بينما النظائر الباعثة لألفا مثل الراديوم-223 تُستخدم في العلاج لأنها تُفرغ طاقتها في مسافة قصيرة جداً داخل الورم، ما يقتل الخلايا السرطانية بدقة عالية. هذا التنوّع في الخصائص هو ما يمنح الطب النووي مرونته الفريدة في الجمع بين التشخيص والعلاج في آن واحد.



شكل (3): توضيح مسار استخدام النظائر المشعة في الطب النووي

يُوضح الشكل (3) المراحل الأساسية لاستخدام النظائر المشعة في الطب النووي، بدءاً من إنتاج النظير في جهاز المسرّع النووي(Cyclotron) ، مروراً بمرحلة تحضير المركّب الدوائي المشع (Radiopharmaceutical) حيث يتم ربط النظير بالمادة الدوائية المناسبة، ثم حقن المريض بالمادة المشعة لتتبعها داخل الجسم، وأخيراً التصوير باستخدام جهاز PET أو SPECTالذي يرصد انبعاث أشعة جاما لتكوين صورة توضح توزيع النظير في الأنسجة. يبيّن المخطط تدفق العملية بخطوات مترابطة توضح التكامل بين الفيزياء النووية والتطبيق الطبي الإكلينيكي.

3. النظائر المشعة المستخدمة في التشخيص السرطاني

تلعب النظائر المشعة دوراً محورياً في الكشف المبكر عن الأورام السرطانية وتحديد مواقعها بدقة داخل الجسم، إذ تعتمد تقنيات التصوير النووي على تتبّع إشعاعات صادرة من نظائر يتم حقنها أو استنشاقها أو تناولها عبر الفم، لتصل إلى العضو المستهدف. وتُعرف هذه النظائر بأنها مواد غير مستقرة تُصدر إشعاعات يمكن رصدها بواسطة أجهزة كشف متخصصة مثل الكاميرات الجاما (Gamma Cameras) أو ماسحات.PET يتم اختيار نوع النظير المشع وفقاً للغرض التشخيصي المطلوب، ونوع الإشعاع الذي يصدره، وطبيعة العضو أو النسيج المستهدف. ويمكن تصنيف النظائر المشعة التشخيصية إلى فئتين رئيسيتين :نظائر باعثة لأشعة جاما ونظائر باعثة للبوزيترونات[17].

1.3 تصنيف النظائر المشعة التشخيصية

أولاً: النظائر الباعثة لأشعة جاما(Gamma-Emitting Isotopes)

تُعد هذه الفئة الأكثر استخداماً في الطب النووي التشخيصي، إذ تمتاز إشعاعات الجاما بقدرتها الكبيرة على اختراق الأنسجة والوصول إلى أجهزة الكشف الخارجية دون إلحاق ضرر كبير بالخلايا. وتُستخدم هذه النظائر مع كاميرات جاما أو أنظمة

 Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

التصوير المقطعي بالإصدار الفوتوني المفرد (SPECT) للحصول على صور ثلاثية الأبعاد لتوزيع المواد المشعة داخل الجسم.من أشهر النظائر الباعثة لأشعة جاما نظير التكنيشيوم-99م (Tc-99m) الذي يُستخدم في أكثر من 80% من الفحوص النووية بفضل خصائصه الفيزيائية المثالية مثل طاقة جاما مناسبة (140 keV) وعمر نصف قصير (حوالي 6 ساعات)، مما يجعله آمناً وفعالاً في التصوير.كما يُستخدم اليود-123 (I-123) في تصوير الغدة الدرقية، والزينون-133 (Xe-133) في دراسات التنفس والرئة، والإنديوم-111 (In-111) في تتبّع العدوى والأورام الالتهابية[18,19].
تُوضح المقارنة التالية الخصائص الفيزيائية لهذه النظائر:

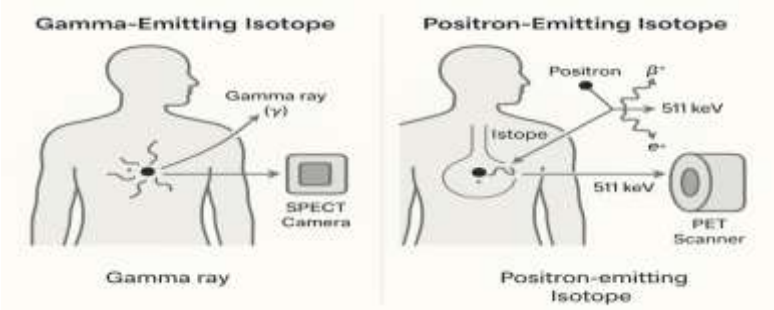
جدول (4): مقارنة فيزيائية بين بعض النظائر الباعثة لأشعة جاما

النظير المشع	وسيلة الكشف	العمر النصفي	طاقة جاما (keV)	الاستخدام التشخيصي
التكنيشيوم-99م (Tc-99m)	كاميرا جاما / SPECT	6ساعات	140	تصوير العظام والقلب والكبد
اليود-123 (I-123)	كاميرا جاما	13ساعة	159	تصوير الغدة الدرقية
الزينون-133 (Xe-133)	جهاز قياس التنفس الإشعاعي	5.3أيام	81	دراسات الجهاز التنفسي
الإنديوم-111 (In-111)	SPECT	2.8أيام	173و247	تتبع العدوى والخلايا المناعية

ثانياً: النظائر الباعثة للبوزيترونات(Positron-Emitting Isotopes)
تُستخدم هذه النظائر في تقنية التصوير المقطعي بالإصدار البوزيتروني(PET) ، وهي من أدق الوسائل التشخيصية الحديثة للكشف عن الأورام. تنبعث من هذه النظائر جسيمات موجبة الشحنة تُعرف بالبوزيترونات(β^+) ، وعند اصطدامها بإلكترونات الجسم، يحدث ما يُعرف بعملية الإفناء (Annihilation) التي تولد فوتونين من أشعة جاما يسيران في اتجاهين متعاكسين، وتلتقطهما كواشف PET لتكوين صورة دقيقة لتوزيع النشاط الإشعاعي داخل الجسم.
من أبرز هذه النظائر نظير الفلور-18 (F-18) المرتبط بجزيء الجلوكوز (FDG) لتكوين مركب (^{18}F-FDG)المستخدم في الكشف عن الأورام الخبيثة عبر تتبع نشاط الخلايا السرطانية المرتفع في استهلاك الجلوكوز. كما تُستخدم نظائر أخرى مثل الكربون-11 (C-11) والنيتروجين-13 (N-13) والأوكسجين-15 (O-15) في دراسة وظائف الدماغ والقلب[4,10].

جدول (5): مقارنة بين بعض النظائر الباعثة للبوزيترونات

النظير المشع	آلية التصوير	العمر النصفي	طاقة الفوتون الناتج (keV)	الاستخدام التشخيصي
الفلور-18 (F-18)	PET-CT	110دقائق	511	الكشف عن الأورام والأنشطة الأيضية
الكربون-11 (C-11)	PET	20دقيقة	511	تصوير وظائف الدماغ والناقلات العصبية
النيتروجين-13 (N-13)	PET	10دقيقة	511	تصوير تدفق الدم في القلب
الأوكسجين-15 (O-15)	PET	2دقيقة	511	دراسة الأيض الدماغي والأوكسجيني



شكل (4): مقارنة توضيحية بين النظائر الباعثة لأشعة جاما والبوزيترونات

 Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

3.2 أمثلة على النظائر المشعة الطبية

تُستخدم مجموعة من النظائر المشعة في الطب النووي لما تمتاز به من خصائص فيزيائية وكيميائية تجعلها مثالية للتصوير أو العلاج. ويُعدّ اختيار النظير المناسب خطوة أساسية في تحقيق تشخيص دقيق مع تقليل الجرعة الإشعاعية للمريض. ومن بين أبرز النظائر المشعة المستخدمة في تشخيص الأورام السرطانية ما يلي[20]:

أولاً: التكنيشيوم-99م(Technetium-99m, Tc-99m)

يُعتبر التكنيشيوم-99م الأكثر استخداماً على الإطلاق في الطب النووي، إذ يُستخدم في أكثر من 80% من الفحوص التشخيصية حول العالم. يتميّز هذا النظير بطاقة جاما مثالية تبلغ 140 keV، وهي طاقة كافية لاختراق الأنسجة دون أن تُحدث جرعة إشعاعية عالية للمريض. كما يمتاز بعمر نصف قصير يبلغ حوالي 6 ساعات، مما يقلل من تعرض الجسم للإشعاع.يتم إنتاج التكنيشيوم-99م من خلال تحلّل نظير الموليبدنوم-99 (Mo-99) في مولّدات خاصة بالمستشفيات تُعرف باسم مولّد التكنيشيوم.يُستخدم Tc-99m في تشخيص العديد من الأمراض السرطانية وغير السرطانية، مثل[20]:

- **سرطان العظام** من خلال فحص Scintigraphy للكشف عن النقائل العظمية.
- **سرطان الكبد** عبر تصوير تدفق الدم إلى الأنسجة.
- **سرطان الثدي والرئة** عبر تتبّع العقد اللمفاوية.ويُربط النظير عادةً بمركبات دوائية مختلفة (Radiopharmaceuticals)مثل MDP أو HMPAO لتوجيهه إلى الأنسجة المستهدفة.

ثانياً: الفلور-18 (Fluorine-18, F-18) المستخدم في تقنية PET

يُعدّ الفلور-18 من النظائر الباعثة للبوزيترونات (β^+) ويُستخدم بشكل واسع في تقنية التصوير المقطعي بالإصدار البوزيتروني .(PET) يتميّز بطاقة بوزيترون معتدلة (0.635 MeV) وعمر نصف يبلغ حوالي 110 دقائق، مما يسمح بتحضيره ونقله إلى مراكز التصوير القريبة.الفلور-18 غالباً ما يكون مرتبطاً بجزيء الجلوكوز لتكوين المركّب -^{18}F) (FDG، وهو أكثر المركّبات استخداماً في تشخيص الأورام، حيث تمتص الخلايا السرطانية هذا المركب بمعدل أعلى بسبب حاجتها الكبيرة للطاقة. وبذلك، تظهر مناطق الورم على صورة PET كأماكن ذات نشاط إشعاعي مرتفع. تُستخدم مركبات F-18-FDG لتشخيص أنواع متعددة من السرطان، منها[21]:

- **سرطان الدماغ والرئة والثدي والقولون.**
- **تحديد مدى انتشار الورم.(Metastasis)**
- **تقييم فعالية العلاج الكيميائي أو الإشعاعي من خلال مقارنة الصور قبل وبعد العلاج.**

كما توجد نظائر فلورية أخرى مشتقة من الفلور-18 تُستخدم لأغراض تخصصية، مثل F-18-NaFلتصوير العظام و-F 18-DOPAلتصوير الدماغ ووظائف الدوبامين العصبية[22].

ثالثاً: اليود-131 (Iodine-131, I-131) لعلاج وتشخيص أورام الغدة الدرقية

يُعدّ اليود-131 من النظائر المزدوجة الاستخدام، إذ يمكن استغلاله في التشخيص والعلاج على حد سواء. يصدر إشعاعات بيتا ($\beta-$) ذات طاقة متوسطة (0.606 MeV) تُستخدم لتدمير خلايا الغدة الدرقية المصابة، بالإضافة إلى إشعاعات جاما (γ)بطاقة (364 keV) يمكن التقاطها لأغراض التصوير.يمتاز بعمر نصف يبلغ حوالي 8 أيام، مما يمنحه القدرة على البقاء في الجسم لفترة كافية لتحقيق التأثير العلاجي.يُستخدم I-131 في:

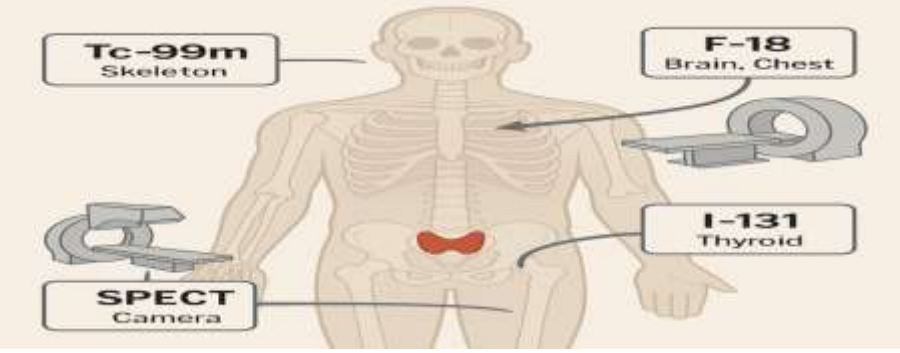
- **تشخيص أمراض الغدة الدرقية وتحديد نسبة امتصاصها لليود.**
- **علاج سرطان الغدة الدرقية المتمايز .(Differentiated Thyroid Cancer)**
- **علاج فرط نشاط الغدة الدرقية (Hyperthyroidism) عبر تدمير الأنسجة المفرطة النشاط.**

يُعطى المريض جرعة محسوبة من كبسولات أو سوائل تحتوي على النظير، ويتم رصد التوزيع الإشعاعي لاحقاً باستخدام كاميرا جاما.ورغم فعاليته الكبيرة، يتطلب استخدام اليود-131 إجراءات صارمة للسلامة الإشعاعية، نظراً لقدرته على البقاء في الجسم لفترة أطول مقارنة بالنظائر التشخيصية الأخرى[23].

 Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

جدول (6): مقارنة بين بعض النظائر المشعة الطبية المستخدمة في تشخيص السرطان

النظير المشع	آلية العمل داخل الجسم	العمر النصفي	طاقة الإشعاع	نوع الإشعاع	الاستخدام الطبي
التكنيشيوم-99م (Tc-99m)	يرتبط بمركبات دوائية مختلفة لتوجيهه إلى العضو المستهدف	6 ساعات	140 keV	جاما(γ)	تصوير العظام، الكبد، القلب، الثدي
الفلور-18 (F-18)	يُربط بالجلوكوز لتمييز الخلايا عالية النشاط (FDG)	110 دقائق	511 keV	بوزيترون (β^+) →جاما (511 keV)	الكشف عن الأورام وتقييم الاستقلاب الخلوي
اليود-131 (I-131)	يمتصه نسيج الغدة الدرقية ويُحدث تدميراً انتقائياً للخلايا	8أيام	0.606 / 364 keV	بيتا (β−) وجاما (γ)	تشخيص وعلاج سرطان الغدة الدرقية



شكل (5): توضيح استخدام النظائر المشعة Tc-99m و F-18و I-131في الطب النووي

يُوضّح الشكل (5) توزيع واستخدام ثلاثة من أهم النظائر المشعة في الطب النووي داخل جسم الإنسان. يُظهر النظير التكنيشيوم-99م (Tc-99m) تركيزه في الهيكل العظمي مستخدماً في فحوصات العظام بواسطة كاميراSPECT ، بينما يُبرز الفلور-18 (F-18) نشاطه في الدماغ والصدر لتصوير الأورام والعمليات الأيضية باستخدام جهاز .PET أما اليود-131 (I-131) فيُستخدم لتصوير وعلاج الغدة الدرقية نظرًا لقدرته على التراكم الانتقائي في أنسجتها. يعكس المخطط التكامل بين النظائر المختلفة في تشخيص السرطان باعتماد كل منها على خاصية إشعاعية مميزة تخدم هدفاً تشخيصياً محدداً.

3.3 تحضير وتثبيت النظائر المشعة

تُعَدّ عملية تحضير وتثبيت النظائر المشعة من المراحل الحيوية في تطبيقات الطب النووي، إذ تُحدد جودة هذه العمليات دقة التشخيص وفعالية العلاج الإشعاعي. وتشمل هذه العملية مرحلتين أساسيتين :إنتاج النظير المشع عبر المفاعلات أو المسرّعات النووية، ثم تثبيته وربطه بمركبات دوائية خاصة (Radiopharmaceuticals) تُمكّنه من الوصول إلى الأنسجة أو الأعضاء المستهدفة داخل الجسم بدقة عالية[24].

أولاً: آليات إنتاج النظائر في المفاعلات والمسرّعات النووية

تُنتَج النظائر المشعة بطريقتين رئيسيتين تبعاً لنوع النظير المطلوب وطبيعة إشعاعه:

1. **الإنتاج في المفاعلات النووية:(Nuclear Reactors)** تُستخدم المفاعلات لإنتاج النظائر المشعة التي تتكوّن نتيجة قصف ذرات مستقرة بالنيوترونات داخل قلب المفاعل، مما يؤدي إلى امتصاص النواة للنيوترون وتحولها إلى نظير مشع جديد.تُسمّى هذه العملية التنشّط بالنيوترونات(Neutron Activation) ، وتُستخدم لإنتاج نظائر مثل[25]:
   - **الموليبدنوم-99 (Mo-99)** الذي يتحلل لاحقاً ليُنتج التكنيشيوم-99م (Tc-99m) المستخدم على نطاق واسع في التصوير الطبي.
   - **اليود-131 (I-131)** المستخدم في تشخيص وعلاج أمراض الغدة الدرقية.
   - **الفسفور-32 (P-32)** المستخدم في دراسة العمليات الحيوية والعلاج الموضعي.

   تمتاز هذه الطريقة بإنتاج كميات كبيرة من النظائر بكفاءة عالية، لكنها تتطلب بنية تحتية متقدمة ومراقبة دقيقة للسلامة الإشعاعية.

 Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

2. **الإنتاج في المسرّعات النووية:(Cyclotrons)** تُستخدم المسرّعات لإنتاج نظائر قصيرة العمر ذات انبعاثات بوزيترونية تُناسب التصوير المقطعي بالإصدار البوزيتروني.(PET) يتم فيها قذف الجسيمات المشحونة (مثل البروتونات أو الديوتيرونات) على أهداف معدنية أو غازية، مما يؤدي إلى تفاعلات نووية تنتج عنها نظائر مشعة جديدة.

من أمثلة النظائر المنتجة بهذه الطريقة:

- **الفلور-18 (F-18) المستخدم في مركب (FDG) لتصوير الأورام.**
- **الكربون-11 (C-11) والنيتروجين-13 (N-13) المستخدمان في دراسة وظائف الدماغ والقلب.**
- **الأوكسجين-15 (O-15) المستخدم لتصوير تدفق الدم الدماغي.تتميز المسرّعات بإنتاج نظائر نقية إشعاعياً وكيميائياً، ما يجعلها مثالية للتطبيقات التشخيصية الدقيقة.**

ثانياً: ربط النظائر بالمركبات الدوائية لتوجيهها إلى الأنسجة المستهدفة

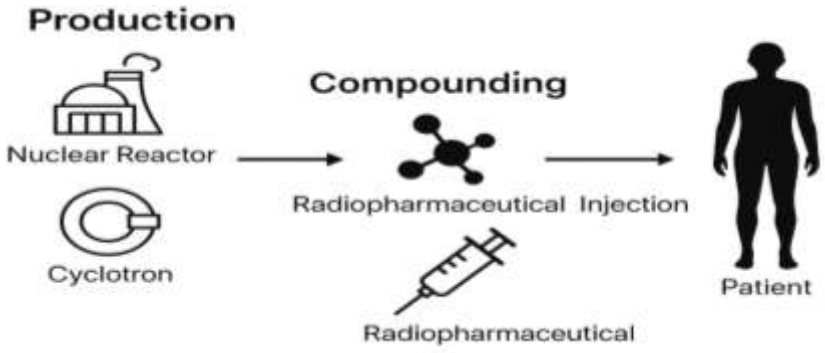
بعد إنتاج النظير المشع، تأتي مرحلة التثبيت الكيميائي التي تُحوّل النظير إلى مستحضر دوائي إشعاعي (Radiopharmaceutical)يمكن استخدامه سريرياً.تُعتبر هذه الخطوة جوهر الطب النووي الحديث، إذ تتيح توجيه الإشعاع إلى أعضاء أو خلايا محددة دون التأثير على باقي أنسجة الجسم. ويتم ذلك من خلال ربط النظير بجزيئات حيوية مثل البروتينات، أو الأجسام المضادة، أو الأحماض الأمينية، أو الجلوكوز[26].

آلية التثبيت:

- يتم دمج النظير مع الجزيء الحامل عبر تفاعل كيميائي مضبوط، يُعرف بعملية الوسم الإشعاعي.(Radiolabeling)
- يُختار الجزيء الحامل بناءً على العضو المستهدف، فمثلاً:
  - يتم ربط **الفلور-18** بالجلوكوز لتكوين **FDG**الذي يتجه إلى الخلايا ذات النشاط الأيضي العالي (مثل الخلايا السرطانية).
  - يُربط **التكنيشيوم-99م** بمركبات فسفورية لتصوير العظام، أو بمركب HMPAO لتصوير الدماغ.
  - يُستخدم **اليود-131** بشكل مباشر دون تثبيت معقّد نظراً لتراكمه الطبيعي في الغدة الدرقية.
- بعد التحضير، يُختبر المستحضر للتأكد من نقائه الكيميائي والإشعاعي واستقراره الحيوي قبل استخدامه على المريض.

جدول (7): مقارنة بين إنتاج وتثبيت النظائر المشعة في المفاعلات والمسرّعات

مصدر الإنتاج	مميزات الطريقة	آلية الإنتاج	أمثلة على النظائر	نوع النظائر المنتجة
المسرّعات النووية (Cyclotron)	إنتاج نظائر نقية وملائمة للتصوير الدقيق	قذف الجسيمات المشحونة على أهداف معدنية	F-18, C-11, N-13, O-15	قصيرة العمر باعثة للبوزيترونات
المفاعلات النووية (Nuclear Reactor)	إنتاج كميات كبيرة بتكلفة أقل	تنشّط بالنيوترونات داخل المفاعل	Mo-99, I-131, P-32	طويلة أو متوسطة العمر باعثة لجاما أو بيتا



شكل (6): توضيح مراحل إنتاج وتثبيت النظائر المشعة

يُوضّح الشكل (6) المراحل المتكاملة لإنتاج وتثبيت النظائر المشعة المستخدمة في الطب النووي، حيث تبدأ العملية من المفاعل النووي أو المسرّع (Cyclotron) لإنتاج النظائر مثل الموليبدنوم-99 أو الفلور-18، ثم تنتقل إلى مختبر

 Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

المستحضرات الدوائية الإشعاعية حيث يتم إجراء عملية الوسم الإشعاعي (Radiolabeling) بربط النظير بالمركب الدوائي المناسب. بعد ذلك يُحقن المستحضر في المريض لاستخدامه في التصوير التشخيصي أو العلاج الإشعاعي .يُظهر المخطط تسلسل العملية من المصدر الفيزيائي إلى التطبيق السريري في مسار منظم يربط العلم بالتطبيق الطبي[28].

4. تقنيات التصوير النووي في تشخيص السرطان

تُعَدّ تقنيات التصوير النووي من الأدوات الأكثر تطوراً في تشخيص الأمراض السرطانية، إذ تُمكّن الأطباء من رؤية النشاط الوظيفي والتمثيل الأيضي داخل الأنسجة الحية بدلاً من الاكتفاء بالصور التشريحية فقط. يعتمد هذا النوع من التصوير على تتبّع النظائر المشعة التي تُحقن في الجسم وتنبعث منها إشعاعات يمكن رصدها وتحويلها إلى صور رقمية دقيقة. ومن بين هذه التقنيات، يحتل التصوير المقطعي بالإصدار البوزيتروني (PET) مكانة رائدة بفضل دقته العالية في تحديد بؤر الأورام النشطة وتقييم مدى انتشارها[29,5,8].

1.4 التصوير المقطعي بالإصدار البوزيتروني(PET)

أولاً: المبدأ الفيزيائي والتقني

يعتمد التصوير المقطعي بالإصدار البوزيتروني (Positron Emission Tomography) على استخدام نظائر مشعة باعثة للبوزيترونات (β^+) مثل الفلور-18 (F-18) أو الكربون-11 (C-11) أو النيتروجين-13 .(N-13) بعد حقن النظير المشع المرتبط بمركب دوائي في جسم المريض، يتجه إلى الأنسجة التي تمتلك نشاطاً أيضياً مرتفعاً — وغالباً ما تكون الخلايا السرطانية هي الأكثر نشاطاً.عندما يتحلل النظير، يبعث بوزيتروناً يتفاعل مع إلكترون في الجسم، مما يؤدي إلى عملية الإفناء(Annihilation) ، حيث يتحول الزوج (بوزيترون + إلكترون) إلى فوتونين من أشعة جاما بطاقة 511 keV ينطلقان في اتجاهين متعاكسين بزاوية 180 درجة[11,30].

تلتقط أجهزة كواشف PET هذه الأزواج المتقابلة من الفوتونات في وقت متزامن، فيما يُعرف بـ الكشف المتزامن (Coincidence Detection).وتُستخدم الحواسيب المتقدمة في تحليل هذه الإشارات لتكوين صور ثلاثية الأبعاد تُظهر توزيع النشاط الإشعاعي داخل الجسم بدقة متناهية. وعادةً ما يتم دمج جهاز PET مع التصوير المقطعي المحوسب (CT) لتكوين نظام PET/CT، مما يتيح الجمع بين المعلومات الوظيفية) من (PET والتشريحية) من (CT في صورة واحدة عالية الدقة[17].

جدول (8): الخصائص التقنية الأساسية لتقنيةPET

العنصر المكوّن للتصوير	مبدأ العمل الفيزيائي	نوع الإشعاع المستخدم	طريقة الكشف	مخرجات التصوير
جهاز PET + نظير باعث للبوزيترونات)مثل(18-F	انبعاث بوزيترون من النظير المشع وتحوّله إلى إشعاع جاما مزدوج	فوتونات جاما ناتجة عن إفناء بوزيترون وإلكترون	الكشف المتزامن لفوتونين متقابلين (Coincidence Detection)	صور ثلاثية الأبعاد للنشاط الأيضي والوظيفي للأعضاء

ثانياً: تطبيقاته في الكشف عن الأورام الخبيثة

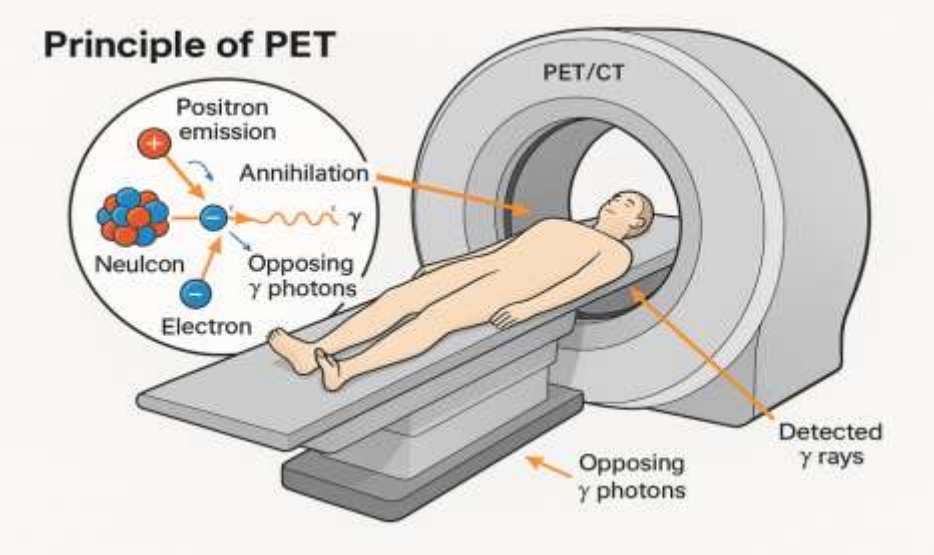
يُعدّ التصوير بـ PETمن أهم الأدوات الحديثة في تشخيص ومتابعة السرطان، إذ يُقدّم معلومات دقيقة عن النشاط الأيضي للخلايا، مما يساعد في التفريق بين الأنسجة السليمة والخبيثة. تعتمد هذه التقنية غالباً على مركّب (^{18}F-FDG)، وهو نظير من الجلوكوز الموسوم بالفلور-18، حيث تستهلك الخلايا السرطانية الجلوكوز بمعدل أعلى من الخلايا الطبيعية. تظهر هذه المناطق في الصورة على هيئة مناطق مضيئة ذات نشاط مرتفع، مما يسهّل تحديد موضع الورم وحجمه بدقة[31].

تشمل أبرز التطبيقات السريرية لتقنية PET في مجال الأورام ما يلي:

- **تشخيص أولي للورم :**تحديد موضع الورم الرئيسي بدقة عالية.
- **تقييم انتشار السرطان :(Metastasis)** رصد النقائل في العظام أو الأعضاء البعيدة.
- **تقييم الاستجابة للعلاج :**مقارنة الصور قبل وبعد العلاج الكيميائي أو الإشعاعي.
- **التمييز بين الأورام الخبيثة والحميدة :**من خلال تحليل النشاط الأيضي.
- **تخطيط العلاج الإشعاعي :**تحديد المناطق الأكثر نشاطاً لتوجيه الجرعة بدقة.

ومن الأمثلة الشائعة، يُستخدم PET-FDGفي تشخيص سرطانات الرئة، والقولون، والغدد اللمفاوية، والدماغ، والثدي، إضافة إلى دوره في متابعة فعالية العلاج وتوقع نسبة الانتكاس.

 Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



شكل (7): المبدأ الفيزيائي لتقنيةPET

يُوضّح الشكل (7) المبدأ الفيزيائي لتقنية التصوير المقطعي بالإصدار البوزيتروني(PET) ، حيث يظهر المريض داخل جهاز PET/CTتحيط به كواشف إشعاعية متصلة بالحاسوب. يُبيّن المخطط انبعاث بوزيترون من نظير مشع مثل الفلور-18 داخل جسم المريض، ثم تفاعله مع إلكترون قريب في عملية تُعرف بـ الإفناء(Annihilation) ، والتي ينتج عنها فوتونان من أشعة جاما بطاقة 511 keVيسيران في اتجاهين متعاكسين. تلتقط الكواشف المحيطة بالجسم هذه الفوتونات في الوقت نفسه لتُحوّلها إلى إشارات رقمية تُستخدم في بناء صورة ثلاثية الأبعاد توضّح توزيع النشاط الأيضي في الأنسجة، مما يمكّن من الكشف الدقيق عن الأورام السرطانية.

2.4 التصوير المقطعي بالإصدار الفوتوني المفرد(SPECT)

يُعَدّ التصوير المقطعي بالإصدار الفوتوني المفرد – (Single Photon Emission Computed Tomography (SPECTمن أكثر تقنيات الطب النووي استخداماً في التشخيص السريري، ويُعتبر مكملاً لتقنية PETمن حيث المبدأ العام مع اختلاف في نوع الإشعاع المستخدم وطبيعة الأجهزة. تهدف هذه التقنية إلى إنتاج صور ثلاثية الأبعاد تُظهر توزيع النشاط الإشعاعي داخل الجسم، مما يُتيح للأطباء تقييم وظيفة الأعضاء بدقة وتحديد وجود اضطرابات أو أورام سرطانية[32,22].

أولاً: آلية العمل ودقته المكانية

تعتمد تقنية SPECTعلى استخدام نظائر مشعة باعثة لأشعة جاما (γ) أحادية الفوتون مثل التكنيشيوم-99م(Tc-99m) ، الإنديوم-111(In-111) ، أو اليود-123 .(I-123) بعد حقن المريض بالمادة المشعة المرتبطة بمركب دوائي محدد، تبدأ النظائر بإصدار فوتونات جاما من الجسم.تقوم كاميرات جاما (Gamma Cameras) المثبتة حول المريض بالتقاط هذه الفوتونات من زوايا متعددة أثناء دورانها الكامل حول الجسم بزاوية 360 درجة. تُحوَّل الإشارات الملتقطة إلى بيانات رقمية بواسطة كواشف NaI(Tl)الحساسة، ثم تُعاد معالجتها بواسطة حواسيب متخصصة لتكوين صورة مقطعية ثلاثية الأبعاد تُظهر تركيز المادة المشعة في الأنسجة المختلفة[34].

تتميّز تقنية SPECTبقدرتها على تصوير الوظائف الفيزيولوجية بدلاً من البنية التشريحية فقط، مثل تدفق الدم، أو امتصاص المواد الكيميائية، أو نشاط المستقبلات الخلوية. ورغم أن دقتها المكانية (Spatial Resolution) أقل من تقنية PET (تتراوح عادة بين 8 – 12 ملم)، إلا أنها أكثر شيوعاً وأقل تكلفة، كما أن النظائر المستخدمة فيها أسهل إنتاجاً وأكثر استقراراً. يُمكن تحسين دقة الصور من خلال استخدام تقنيات دمج التصوير مثل SPECT/CT، التي تجمع بين المعلومات الوظيفية من SPECT والصور التشريحية الدقيقة من الأشعة المقطعية، مما يُعزّز القدرة على تحديد موقع الأورام بدقة متناهية[35].

 Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

جدول (9): الخصائص التقنية لتقنيةSPECT

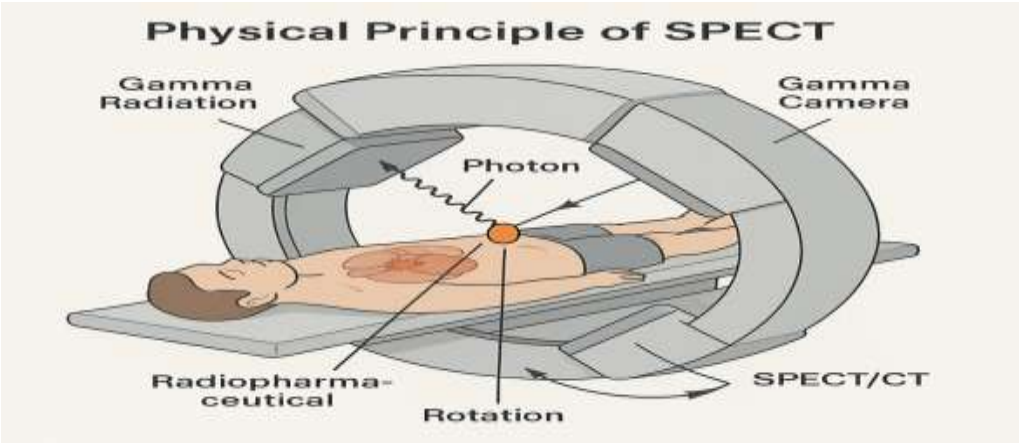
العنصر أو الجهاز المستخدم	مبدأ العمل	نوع الإشعاع	نوع الكشف المستخدم	دقة التصوير المكانية
نظائر باعثة لأشعة جاما + نظام SPECT/CT	انبعاث فوتونات جاما من النظير المشع داخل الجسم وتسجيلها من زوايا متعددة	أشعة جاما (γ)	كاميرا جاما دوّارة تلتقط فوتونات أحادية	متوسطة (8–12 ملم)

ثانياً: الاستخدامات السريرية في أنواع معينة من السرطان

يُستخدم التصوير بـ SPECTفي تقييم عدد من الأورام السرطانية والاضطرابات الوظيفية، خاصة عندما يُراد دراسة توزيع الدم أو تحديد بؤر النشاط غير الطبيعي في الأنسجة. ومن أبرز استخداماته في مجال الأورام ما يلي[36]:

1. **سرطان العظام:(Bone Metastasis)** يُعدّ فحص SPECTبالعظام (Bone SPECT) باستخدام نظير التكنيشيوم-99م (Tc-99m MDP) من أكثر التطبيقات شيوعاً، إذ يساعد على الكشف عن النقائل العظمية الناتجة عن سرطانات الثدي أو البروستاتا أو الرئة. وتتميز هذه التقنية بحساسيتها العالية في اكتشاف التغيرات المبكرة في نشاط الخلايا العظمية قبل ظهورها في الصور الشعاعية التقليدية[36].
2. **أورام الدماغ:**يُستخدم SPECTالدماغي في تحديد الأورام الدماغية وتمييزها عن الالتهابات أو التشنجات، إذ تُظهر الأورام عادة مناطق انخفاض أو ارتفاع في تدفق الدم تبعاً لطبيعتها. ويُستخدم نظير Tc-99m HMPAOأو Tc-99m ECDلتصوير تدفق الدم الدماغي.
3. **سرطان الغدة الدرقية:**يُستخدم **اليود-123 (I-123)** أو **التكنيشيوم-99م بيرتكنيتات** في فحص الغدة الدرقية للكشف عن الأورام الحميدة والخبيثة، وتحديد العقيدات الباردة أو الساخنة التي تُشير إلى احتمالية وجود ورم.
4. **الأورام العصبية الصماوية:(Neuroendocrine Tumors)** تُستخدم نظائر مثل الإنديوم-111 أوكتروناید-(In-111 Octreotide)لتصوير مستقبلات السوماتوستاتين الموجودة في هذه الأورام، مما يساعد على تحديد موضعها وانتشارها بدقة.

بالإضافة إلى ما سبق، يمكن استخدام SPECTلمراقبة فعالية العلاج الإشعاعي أو الكيميائي من خلال تقييم التغيرات في النشاط الوظيفي بعد العلاج، وهو ما يُعدّ مؤشراً حيوياً على نجاح الخطة العلاجية[37].



شكل (8): المبدأ الفيزيائي لتقنيةSPECT

يُوضّح الشكل (8) المبدأ الفيزيائي لتقنية التصوير المقطعي بالإصدار الفوتوني المفرد(SPECT) ، حيث يظهر المريض مستلقياً داخل جهاز SPECT/CTبينما تدور حوله كاميرتان جاما تلتقطان الفوتونات المنبعثة من المستحضر الدوائي الإشعاعي (Radiopharmaceutical) داخل الجسم. تمثّل الأسهم مسار الفوتونات (Photons)المنبعثة من العضو المستهدف والتي تُرصد بواسطة الكواشف أثناء دوران النظام حول المريض. يوضح الشكل أيضاً آلية الدوران (Rotation) التي تتيح جمع إشارات من زوايا متعددة لتوليد صورة ثلاثية

 Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

الأبعاد دقيقة لتوزيع النشاط الإشعاعي في الأنسجة، مما يساعد في تحديد الأورام أو المناطق ذات الوظيفة غير الطبيعية بدقة.

3.4 تقنيات الدمج بين التصوير النووي والتصوير التشريحي

مع تطوّر الطب النووي وتزايد الحاجة إلى تشخيصٍ أدقّ وأكثر شمولية، ظهرت تقنيات الدمج بين التصوير النووي والتصوير التشريحي كأحد أهم الابتكارات في الطب الحديث. هذه التقنيات مثل PET/CT و SPECT/CTتجمع بين الوظائف الحيوية والفيزيولوجية التي يكشفها التصوير النووي، والتفاصيل التشريحية الدقيقة التي يوفرها التصوير المقطعي المحوسب .(CT) يتيح هذا الدمج للأطباء القدرة على تحديد مكان الورم وشكله ووظيفته في آنٍ واحد، مما جعل هذه الأنظمة تُحدث نقلة نوعية في تشخيص السرطان وتخطيط علاجه.[38]

أولاً PET/CT وSPECT/CT:

تعمل تقنيتا PET/CTو SPECT/CTعلى الدمج بين جهازين مختلفين في نظام واحد، بحيث يُجري المريض فحصاً مزدوجاً متكامل النتائج دون الحاجة إلى نقل البيانات بين أجهزة منفصلة.

1. **نظام:PET/CT**

- يُستخدم فيه نظير مشع باعث للبوزيترونات مثل الفلور-18 (F-18) لتصوير العمليات الأيضية داخل الخلايا.
- يقوم جهاز PET بتحديد مناطق النشاط الأيضي العالي (مثل الخلايا السرطانية)، بينما يقدّم جهاز CT الصورة التشريحية المفصّلة للجسم.
- يتم دمج الصورتين رقمياً لإظهار توزيع النشاط الإشعاعي بدقة ضمن الإطار التشريحي الحقيقي، مما يسمح للطبيب بتحديد موضع الورم بدقة ميليمترية.
- تُستخدم هذه التقنية على نطاق واسع في تشخيص سرطانات الرئة، الدماغ، الثدي، والقولون، وكذلك في تقييم الاستجابة للعلاج الكيميائي أو الإشعاعي.

2. **نظام:SPECT/CT**

- يُستخدم فيه نظير باعث لأشعة جاما (γ) مثل التكنيشيوم-99م (Tc-99m) أو الإنديوم-111.(In-111)
- يوفر SPECT معلومات حول توزيع المستحضر الإشعاعي داخل الأنسجة، بينما يقدم CT خريطة تشريحية دقيقة.
- يُستخدم SPECT/CT في تشخيص سرطان العظام، الغدة الدرقية، والأورام العصبية الصمّاوية، وكذلك لتحديد بؤر الالتهاب أو العدوى المرتبطة بالأورام.

جدول (10): مقارنة بين تقنيتي PET/CT و SPECT/CT

نوع التقنية	المعلومة التي يوفرها النظام	نوع الإشعاع	نوع النظير المشع المستخدم	التطبيقات السريرية
PET/CT	نشاط أيضي دقيق + خريطة تشريحية عالية الدقة	بوزيترونات (β^+) → فوتونات جاما (511 keV)	F-18, C-11	الكشف عن الأورام الأيضية (الرئة، الدماغ، الثدي، القولون)
SPECT/CT	توزيع المستحضر الإشعاعي + بنية العضو المصاب	فوتونات جاما(γ)	Tc-99m, In-111, I-123	تشخيص النقائل العظمية وأورام الغدة الدرقية

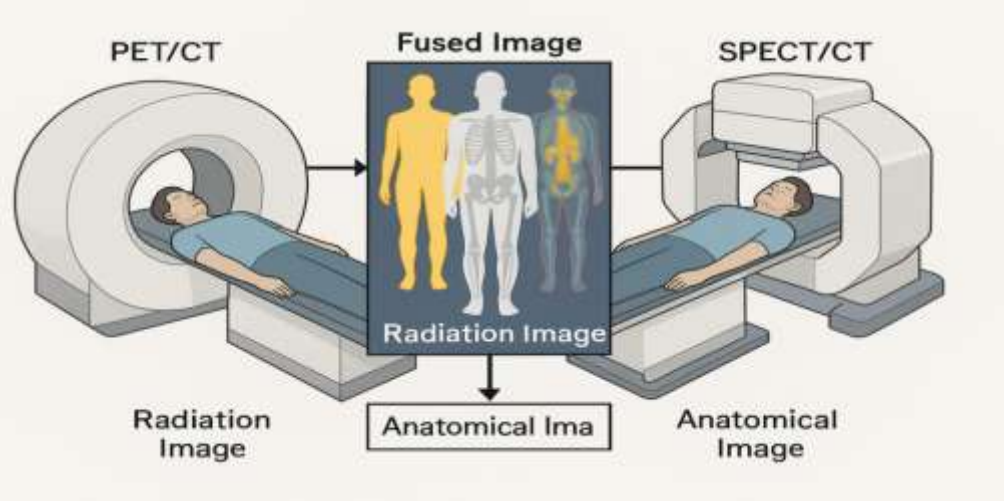
ثانياً: فوائد الدمج في تحسين دقة التشخيص ورسم خريطة الانتشار السرطاني

إنّ الدمج بين التصوير النووي والتصوير التشريحي لا يُعدّ مجرد تطوير تقني، بل يمثل تحوّلاً نوعياً في منهجية التشخيص الطبي، لما يوفره من دقة ووضوح في تحليل الصور[41-39].

1. **تحسين الدقة المكانية:(Spatial Resolution)** بفضل المعلومات التشريحية التي يوفرها التصوير المقطعي(CT) ، يمكن تحديد موقع النشاط الإشعاعي بدقة كبيرة داخل العضو، مما يقلل من احتمالات الخطأ في تفسير الصور النووية وحدها.

 Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

2. **التمييز بين الأورام والأنسجة الطبيعية:** كثيراً ما يصعب التفرقة بين الورم والأنسجة الملتهبة في صور PET أو SPECT فقط، لكن عند دمجها مع صور CT يمكن للطبيب تمييز البنية التشريحية ومعرفة ما إذا كان النشاط الإشعاعي ناجماً عن ورم حقيقي أو تفاعل التهابي.
3. **تحديد مرحلة المرض ورسم خريطة الانتشار (Staging and Mapping):** يسمح الدمج برسم خريطة دقيقة لانتشار الورم (Metastasis Map) ، تُظهر مكان الورم الرئيسي والنقائل الثانوية في الأعضاء المختلفة، ما يساعد في وضع خطة علاجية شاملة.
4. **تحسين تخطيط العلاج الإشعاعي:** من خلال تحديد حجم الورم وشكله وموقعه بدقة، يمكن توجيه الجرعة الإشعاعية العلاجية إلى الورم مباشرة، مع تقليل الإشعاع على الأنسجة السليمة.
5. **مراقبة فعالية العلاج:** يُستخدم PET/CT و SPECT/CT لتقييم الاستجابة للعلاج الكيميائي أو الإشعاعي عن طريق مقارنة النشاط الأيضي قبل العلاج وبعده، مما يُساعد في تعديل الخطة العلاجية في الوقت المناسب.



شكل (9): الدمج بين تقنيات التصوير النووي والتصوير التشريحي (PET/CT و SPECT/CT)

5. التطبيقات السريرية للفيزياء النووية في تشخيص السرطان

تُعَدّ الفيزياء النووية التطبيقية في الطب حجر الزاوية في تشخيص السرطان، إذ توفّر أدوات دقيقة لتصوير التغيّرات الوظيفية والبيوكيميائية التي تطرأ على الأنسجة قبل ظهور التبدلات التشريحية. تعتمد هذه التطبيقات على استخدام النظائر المشعة والمستحضرات الدوائية الإشعاعية التي تُوجَّه إلى خلايا معينة داخل الجسم، ليتمّ التقاط إشعاعاتها وتحويلها إلى صور رقمية توضّح أماكن النشاط الورمي أو انتشار الخلايا السرطانية. من خلال هذه التقنيات، يمكن للطبيب تحديد طبيعة الورم وامتداده ومتابعة فعالية العلاج في مراحل مختلفة من المرض[42-45].

1.5 تشخيص أنواع محددة من السرطان

يُسهم الطب النووي في تشخيص طيف واسع من السرطانات، وذلك عبر نظائر مختلفة تُختار وفقاً لنوع الورم وخصائصه الأيضية أو التشريحية. في ما يلي عرض تفصيلي لأبرز التطبيقات السريرية للفيزياء النووية في تشخيص ثلاثة أنواع رئيسية من السرطان:

أولاً: تشخيص سرطان الغدة الدرقية باستخدام اليود المشع I-131 وI-123

يُعَدّ استخدام نظائر اليود المشعة أحد أقدم التطبيقات الطبية للفيزياء النووية وأكثرها دقة في تشخيص أمراض الغدة الدرقية. تمتلك خلايا الغدة الدرقية خاصية فريدة في امتصاص اليود من الدم لاستخدامه في تصنيع الهرمونات، الأمر الذي يجعلها هدفاً مثالياً للتصوير باستخدام نظائر اليود المشعة. بعد إعطاء المريض جرعة محسوبة من اليود-131 (I-131) أو اليود-123(I-123) ، يتوزّع النظير داخل الغدة تبعاً لنشاط خلاياها، حيث تُصدر أشعة جاما يمكن التقاطها بواسطة كاميرا جاما لتكوين صورة توضّح المناطق النشطة أو الخاملة.

في حالات سرطان الغدة الدرقية المتمايز (Differentiated Thyroid Cancer) ، تُظهر الصور مناطق عالية النشاط تمثّل بؤر الخلايا الورمية، بينما المناطق الباردة أو غير الممتصة قد تدلّ على خلايا خبيثة فقدت

 Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

قدرتها على امتصاص اليود. يمكن الاستفادة من هذه التقنية ليس فقط في التشخيص، بل أيضاً في تحديد بقايا الأنسجة الورمية بعد الجراحة ومتابعة فعالية العلاج الإشعاعي باليود[46].

ثانياً: تشخيص سرطان الثدي والرئة باستخدامPET-FDG

يُعتبر التصوير باستخدام PET-FDG (Fluorodeoxyglucose)أحد أكثر الأساليب دقة في الكشف المبكر عن الأورام الصدرية والثديية. يعتمد المبدأ على استخدام النظير الفلور-18 (F-18) المرتبط بمركّب الجلوكوز، حيث تمتص الخلايا السرطانية هذا المركّب بكميات أكبر نتيجة لارتفاع معدل الأيض فيها. بعد الحقن الوريدي للمريض، يتم تصوير الجسم بالكامل بواسطة جهاز PET/CT الذي يُظهر المناطق ذات النشاط الأيضي المرتفع على شكل بقع مضيئة في الصورة. تساعد هذه التقنية في تحديد حجم الورم بدقة، والكشف عن النقائل البعيدة، وتمييز الأورام الخبيثة عن الحميدة.يُعدّ PET-FDGأداة رئيسية أيضاً في متابعة فعالية العلاج الكيميائي والإشعاعي، إذ يمكن من خلال مقارنة الصور قبل وبعد العلاج تقييم مدى استجابة الورم، وبالتالي تعديل الخطة العلاجية إذا لزم الأمر.كما أن دقة الدمج بين PETو CTتتيح للأطباء رسم خريطة تفصيلية للانتشار الورمي داخل الصدر، بما في ذلك الغدد اللمفاوية والنقائل الرئوية الدقيقة التي قد لا تُرى في الفحوص التشريحية التقليدية[47,48].

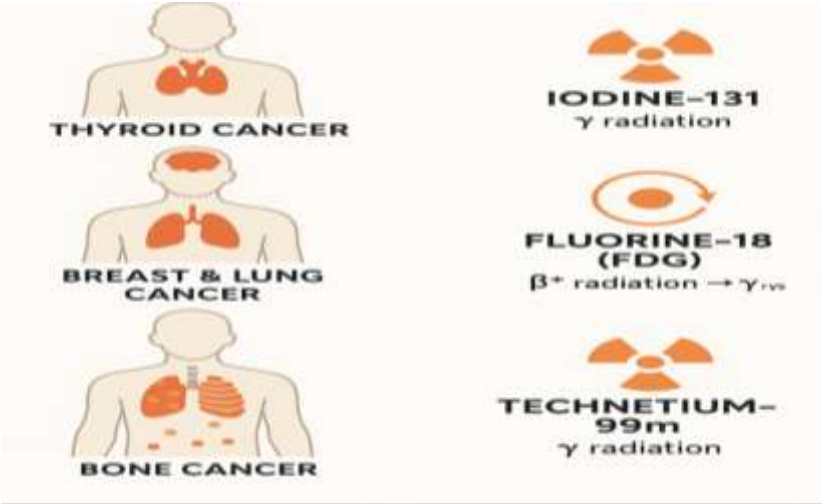
ثالثاً: تشخيص سرطان العظام باستخدام تقنياتSPECT

يُعدّ التصوير النووي للعظام أحد التطبيقات الكلاسيكية للفيزياء النووية في الأورام، إذ يتيح اكتشاف النقائل العظمية مبكراً قبل ظهور أي تغيّرات شعاعية في صور الأشعة السينية. يتم استخدام نظير التكنيشيوم-99م (Tc-99m)المرتبط بمركّب ميثيلين داي فوسفونات (MDP) الذي يتركّز في المناطق ذات النشاط الأيضي العظمي المرتفع. بعد حقن المستحضر في الوريد، يقوم الجهاز SPECT/CTبتصوير الجسم كاملاً لتحديد مناطق امتصاص النظير.تظهر النقائل العظمية عادةً كبؤر ذات نشاط إشعاعي مرتفع على الصور النووية، مما يساعد في تحديد موقعها بدقة وتقييم مدى انتشارها. تُعتبر هذه التقنية أساسية في متابعة سرطانات الثدي والبروستاتا والرئة، التي تُعرف بميولها العالية للانتشار إلى الهيكل العظمي.كما يمكن استخدام الصور المقطعية الناتجة عن SPECT/CT لتمييز النقائل السرطانية عن الإصابات الالتهابية أو التنكسية في العظام، وهو ما يزيد من دقة التشخيص ويُسهم في تخطيط العلاج الإشعاعي[49].

جدول (11): مقارنة بين التطبيقات النووية في تشخيص أنواع مختلفة من السرطان

نوع السرطان	العضو أو النسيج المستهدف	نوع النظير المشع	آلية العمل الفيزيائية	دقة التحديد والتطبيق السريري
سرطان الغدة الدرقية	الغدة الدرقية	I-131 / I-123	امتصاص اليود المشع وانبعاث أشعة جاما	عالية جدًا – تحديد بؤر الامتصاص وتقييم بقايا الورم
سرطان الثدي والرئة	الثدي والرئة	F-18 (FDG)	انبعاث بوزيترونات من F-18 وقياس فوتونات الإفناء	عالية –تحديد النشاط الأيضي ومتابعة الانتشار والنقائل
سرطان العظام	العظام	Tc-99m	امتصاص-Tc-99mMDPفي مناطق تكوين العظم	متوسطة إلى عالية – رصد النقائل في الهيكل العظمي بدقة

 Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



شكل (10): مقارنة توضيحية لاستخدام النظائر المشعة في تشخيص السرطان

يُوضّح الشكل (10) مقارنة بصرية بين أهم تطبيقات الفيزياء النووية في تشخيص الأنواع المختلفة من السرطان. يُظهر المخطط الأول على اليسار تركّز اليود المشع (I-123 / I-131) في الغدة الدرقية، حيث يُستخدم لتصوير وتشخيص أورام الغدة وتحديد بقايا النسيج الورمي بعد الجراحة. في المنتصف يظهر نموذج يوضّح استخدام الفلور-18 FDG في التصوير المقطعي بالإصدار البوزيتروني(PET/CT) ، حيث تُضيء مناطق الصدر والدماغ دلالةً على ارتفاع النشاط الأيضي في أورام الثدي والرئة. أما النموذج الثالث على اليمين فيُبرز استخدام التكنيشيوم-99م (Tc-99m MDP) في تصوير العظام بتقنيةSPECT ، حيث تظهر النقائل العظمية كبؤر مضيئة ذات نشاط إشعاعي مرتفع. يعبّر الشكل عن تنوّع النظائر واختلاف أهدافها التشخيصية، مع توضيح المواقع التشريحية لكل نوع من أنواع السرطان المدروسة.

2.5 تقييم انتشار الأورام(Metastasis)

يُعدّ تقييم انتشار الأورام أو ما يُعرف بـ النقائل السرطانية (Metastasis) من أهم مراحل تشخيص السرطان وتخطيط العلاج، إذ يحدد بدقة مدى توسّع المرض داخل الجسم وانتقال الخلايا الخبيثة من الورم الأصلي إلى أعضاء أخرى. وقد أسهمت الفيزياء النووية إسهاماً محورياً في هذا المجال، حيث أتاح استخدام النظائر المشعة وتقنيات التصوير المتقدمة مثل PET/CT وSPECT/CTإمكانية الكشف عن النقائل حتى في مراحلها المبكرة، حين تكون صغيرة الحجم وغير قابلة للرصد في وسائل التصوير التقليدية[50].

تعمل هذه التقنيات على تتبّع المواد الإشعاعية داخل الجسم لتحديد المناطق التي تظهر فيها زيادة غير طبيعية في النشاط الأيضي أو التكويني. فعلى سبيل المثال، تُظهر تقنية PET-FDGالنقائل في شكل بؤر مضيئة تمثل خلايا ذات استقلاب مرتفع، وهو سلوك مميز للخلايا السرطانية النشطة. أما SPECTفيتيح رؤية دقيقة لتوزيع النظائر في العظام أو الأنسجة اللمفاوية، مما يساعد في تحديد مواقع النقائل الهيكلية أو العقدية. بفضل هذه القدرات، أصبح الطب النووي أداة لا غنى عنها لتقييم مدى انتشار الورم (Tumor Staging) وتحديد ما إذا كان المرض محصوراً أو متقدماً، الأمر الذي يوجّه الطبيب نحو الخطة العلاجية المثلى[50].

تتم عملية الكشف عن النقائل عبر سلسلة من الخطوات المتكاملة تبدأ بحقن المريض بمستحضر دوائي إشعاعي مناسب، ثم إجراء تصوير شامل للجسم باستخدام الكاميرات النووية أو أنظمة الدمج. بعد تحليل الصورة رقمياً، يمكن رسم خريطة ثلاثية الأبعاد لانتشار الورم تُظهر النقائل في الكبد، والرئتين، والعظام، والغدد اللمفاوية، أو أي عضو آخر متأثر. تسمح هذه الخريطة بتحديد حجم النقائل وعددها وموقعها بدقة، ما يساعد في تقييم مرحلة المرض وتصنيفها وفق النظام الدولي TNM (Tumor, Node, Metastasis).[50]

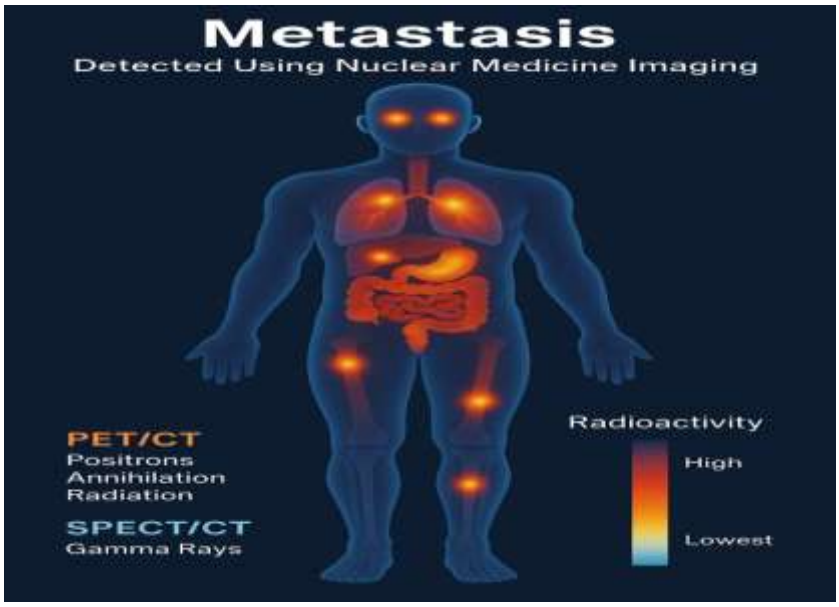
وتبرز أهمية الفيزياء النووية هنا في الدمج بين الدقة الكمية والتحليل المكاني، حيث يمكن قياس شدة النشاط الإشعاعي في النقائل المختلفة لتقدير حيوية الخلايا السرطانية واستجابتها للعلاج. في الوقت نفسه، يتيح الجمع بين المعلومات التشريحية) من (CT والوظيفية) من PET أو (SPECT تمييز النقائل الفعالة من الآفات غير النشطة، ما يقلل من احتمالات التشخيص الخاطئ. بهذه الطريقة، تُساهم الفيزياء النووية في رسم خريطة ديناميكية للمرض، لا تقتصر على رؤية الورم فقط، بل تتبع مساره وتطور نشاطه عبر الزمن[50].

 Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

جدول (12): مقارنة بين تقنيات الطب النووي في الكشف عن النقائل السرطانية

التقنية التصويرية	النظير أو المستحضر المستخدم	نوع الإشعاع	آلية الكشف الفيزيائية	المميزات التشخيصية
PET/CT	F-18 FDG	بوزيترونات (β^+) ← فوتونات جاما 511keV	تتبع النشاط الأيضي المرتفع وانبعاث بوزيترونات	أعلى دقة للكشف عن النقائل النشطة أيديولوجياً وتحديد المرحلة بدقة
SPECT/CT	Tc-99m MDP / In-111 Octreotide	أشعة جاما(γ)	امتصاص Tc-99m في مناطق بناء العظم أو الالتهاب	تحديد النقائل العظمية واللمفاوية ورسم خريطة انتشارها الهيكلي
Hybrid Imaging (SPECT-CT Fusion)	I-123 / Ga-67	جاما(γ)	انبعاث جاما منخفض الطاقة ورسم صور تشريحية متراكبة	تمييز النقائل الصغيرة في الكبد والرئة بتباين تشريحي ووظيفي

يُظهر الجدول كيف تتيح كل تقنية من تقنيات التصوير النووي زاوية مختلفة لرؤية النقائل السرطانية؛ فـ PET/CTيوفر أدق تحليل للنشاط الأيضي للخلايا الورمية، بينما يتفوّق SPECT/CTفي تحديد النقائل الهيكلية، في حين تُستخدم تقنيات الدمج الأخرى لزيادة وضوح الصورة وتحسين تمييز الحدود الورمية. كل هذه الأدوات تعمل بتكامل لتكوين خريطة تشخيصية شاملة تُظهر تطوّر الورم وانتشاره في أعضاء متعددة، مما يمكّن الفريق الطبي من تحديد العلاج الأنسب سواء كان جراحياً أو إشعاعياً أو كيميائياً.



شكل (11): خريطة توضيحية لانتشار النقائل السرطانية باستخدام تقنيات الطب النووي

يُوضّح الشكل (11) خريطة انتشار النقائل السرطانية في الجسم باستخدام تقنيات التصوير النووي، حيث يُظهر الرسم نموذجاً بشرياً تظهر عليه مناطق مضيئة تمثل أماكن تراكم المواد الإشعاعية في أعضاء مختلفة مثل العظام، الكبد، الرئتين، والعقد اللمفاوية .تشير الألوان الزاهية إلى الامتصاص العالي للمستحضر الإشعاعي، ما يدل على وجود نشاط ورمي مرتفع. يدمج الشكل بين طريقتين من التصوير هما PET/CT وSPECT/CT، حيث تُستخدم الأولى لتحديد النقائل ذات النشاط الأيضي العالي عبر مادة FDG، بينما تُستخدم الثانية لرصد النقائل الهيكلية بواسطة نظير .Tc-99mتُظهر الكواشف المحيطة بالجسم كيفية التقاط

 Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

الإشعاعات وتحويلها إلى خريطة دقيقة توضّح مدى انتشار الورم داخل الجسم، مما يساعد في تقييم مرحلة المرض وتوجيه الخطة العلاجية.

3.5 مراقبة فعالية العلاج

تُعَدّ مراقبة فعالية العلاج من أهم المراحل في إدارة الأمراض السرطانية، إذ تتيح للطبيب تقييم مدى استجابة الورم للعلاج الكيميائي أو الإشعاعي أو الجراحي، وتحديد ما إذا كان ينبغي الاستمرار في الخطة العلاجية أو تعديلها. وقد قدّمت الفيزياء النووية الطبية أدوات دقيقة تمكّن من رصد التغيرات الحيوية في الخلايا والأنسجة قبل ظهور أي علامات تشريحية مرئية، مما يجعلها أكثر حساسية من طرق التصوير التقليدية مثل الأشعة المقطعية أو الرنين المغناطيسي[51,1,9].

تقوم تقنيات التصوير النووي، مثل PET/CTوSPECT/CT، على قياس النشاط الأيضي أو الحيوي داخل الورم قبل وأثناء وبعد العلاج. فعلى سبيل المثال، يُستخدم PET-FDGلتقييم استهلاك الجلوكوز داخل الخلايا السرطانية، إذ تُظهر الخلايا المستجيبة للعلاج انخفاضاً واضحاً في الامتصاص الإشعاعي بعد عدة جلسات، بينما يدل استمرار النشاط المرتفع على مقاومة الورم للعلاج. بهذه الطريقة، يمكن للطبيب تقييم فعالية الخطة العلاجية في مراحل مبكرة، دون الحاجة لانتظار تقلص حجم الورم في الصور التشريحية[9].

كما تُستخدم تقنية SPECT/CTفي متابعة الأورام التي تستهدف نظائر معينة مثل اليود-131 في الغدة الدرقية أو التكنيشيوم-99م في الأورام العظمية .إذ يمكن من خلال مقارنة الصور المسجلة في فترات زمنية مختلفة تحليل التغيرات في توزع الإشعاع داخل الجسم، وبالتالي تحديد مدى تراجع النشاط الورمي أو استقراره. تُتيح هذه المراقبة الديناميكية إجراء تقييم كمي دقيق عن طريق تحليل ما يُعرف بـ القيم المعيارية لامتصاص النظير(SUV - Standardized Uptake Value) ، والتي تُستخدم لقياس شدة امتصاص المادة المشعة وتقدير نسبة الاستجابة[1].

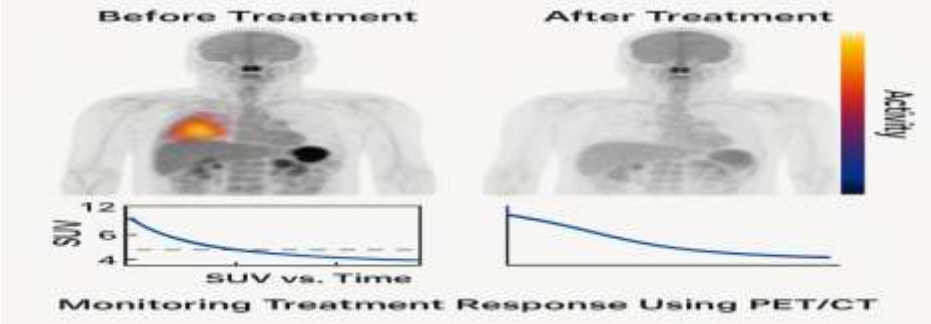
تُسهم هذه التقنيات في تحسين جودة الرعاية العلاجية من خلال الكشف المبكر عن الاستجابة الإيجابية أو السلبية للعلاج، وتقليل التعرض غير الضروري للأدوية أو الإشعاع، كما تساعد في التنبؤ بمآل المرض وتخطيط المتابعة المستقبلية.

جدول (13): مقارنة بين تقنيات التصوير النووي في مراقبة فعالية العلاج

التقنية التصويرية	النظير المستخدم	نوع الإشعاع	المعلمة المقاسة	دقة التقييم الزمني للعلاج
PET/CT	F-18 FDG	بوزيترونات (β^+) → جاما (511 keV)	معدل استهلاك الجلوكوز (SUV)	عالية – رصد التغير الأيضي المبكر في الخلايا السرطانية
SPECT/CT	Tc-99m, I-131	أشعة جاما(γ)	توزيع النشاط الإشعاعي في الزمن	متوسطة – تتبع تراكم النظائر في العضو المستهدف
Hybrid Imaging (PET/SPECT-CT Fusion)	متعدد النظائر	جاما + (γ) بيانات تشريحية	التغير في الحجم والموقع والوظيفة	مكمّلة – تحليل التغير التشريحي والوظيفي بعد العلاج

تبيّن المقارنة أن تقنية PET/CTهي الأكثر دقة في الكشف المبكر عن فعالية العلاج بفضل قدرتها على قياس التغيرات الأيضية قبل حدوث التغير التشريحي، بينما تُعدّ SPECT/CTأداة مناسبة لتقييم العلاجات الموضعية أو المتخصصة، خصوصاً في الأورام التي تمتص نظائر معينة. كما يوفّر الدمج بين الطريقتين معلومات تكاملية عن التغير الوظيفي والتشريحي، مما يُعطي صورة شاملة لتطور استجابة الورم.

 Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



شكل (12): مراقبة فعالية العلاج باستخدام تقنيات التصوير النووي

يُوضّح الشكل (12) مبدأ مراقبة فعالية العلاج باستخدام تقنيةPET/CT ، حيث تُعرض صورتان متقابلتان للمريض تم التقاطهما في فترتين زمنيتين مختلفتين — قبل العلاج وبعده. تُظهر الصورة على اليسار تركّزاً عالياً لمادة FDGفي الورم، ما يُعبّر عن نشاط أيضي مرتفع في الخلايا السرطانية قبل بدء العلاج، بينما تُظهر الصورة على اليمين انخفاضاً ملحوظاً في شدة الإشعاع، مما يدل على استجابة الورم للعلاج الكيميائي أو الإشعاعي .أسفل الشكل يظهر منحنى) SUV القيمة المعيارية لامتصاص النظير (الذي يُبيّن تراجع معدل استهلاك الجلوكوز مع مرور الوقت، في إشارة إلى انخفاض حيوية الخلايا الخبيثة. يُجسّد الشكل التكامل بين التصوير الوظيفي والتقييم الكمي في متابعة فعالية العلاج بدقة عالية.

6. الجوانب البيئية والأمنية في استخدام التقنيات النووية

تُعدّ الجوانب البيئية والأمنية في استخدام التقنيات النووية محوراً أساسياً لضمان سلامة الإنسان والبيئة معاً، إذ إن التعامل مع المواد المشعة في التطبيقات الطبية يتطلّب دقّة بالغة وإجراءات أمان صارمة. فبينما تمكّن الفيزياء النووية الأطباء من تشخيص الأورام ومتابعة علاجها بفعالية عالية، إلا أن الاستخدام غير المنضبط للإشعاع قد يُعرّض العاملين والمرضى لمخاطر صحية. لذلك، تأتي الوقاية الإشعاعية كإطار علمي وعملي يهدف إلى تقليل الجرعات الإشعاعية إلى أدنى مستوى ممكن مع تحقيق الفائدة الطبية المرجوة.

1.6 الوقاية الإشعاعية

أولاً: المبادئ الأساسية للسلامة (الوقت، المسافة، التدريع)

تعتمد أنظمة الحماية من الإشعاع في المنشآت الطبية على ثلاثة مبادئ فيزيائية رئيسية تُعدّ الركيزة الأساسية لكل إجراءات الأمان الإشعاعي[52]:

1. **الوقت:(Time)** كلما قلّ الوقت الذي يقضيه الفرد بالقرب من مصدر الإشعاع، قلّت الجرعة الممتصّة في الجسم. لذلك، تُطبّق قاعدة الحد الأدنى من التعرض في غرف الطب النووي من خلال تقليل مدة التعامل مع النظائر إلى أقصر وقت ممكن أثناء التحضير أو الحقن أو التصوير.
2. **المسافة:(Distance)** تُعدّ زيادة المسافة بين الشخص والمصدر الإشعاعي وسيلة فعّالة لتقليل التعرض، لأن شدة الإشعاع تتناقص مع مربع المسافة وفق قانون التربيع العكسي .(Inverse Square Law) أي أن مضاعفة المسافة تُقلّل التعرض إلى ربع قيمته الأصلية. لذلك تُصمم غرف الحقن وغرف الفحص بحيث تتيح للمشغّلين الحفاظ على مسافة آمنة من المرضى أثناء الإجراءات.
3. **التدريع:(Shielding)** يُستخدم التدريع كوسيلة أساسية لحماية العاملين من الإشعاعات المؤيّنة، وذلك من خلال مواد كثيفة تمتص أو تضعف الإشعاع قبل وصوله إلى الجسم. تختلف مواد التدريع باختلاف نوع الإشعاع :الرصاص (Pb) يُستخدم لأشعة جاما، الزجاج الأكريليكي أو الألومنيوم لجسيمات بيتا، وورقة أو هواء كافية لحجب جسيمات ألفا. تُصمّم الجدران، والنوافذ الواقية، وأدوات التحضير مثل الحقن والأنابيب لتضمّ طبقات تدريع مناسبة وفق الجرعات الإشعاعية المسموح بها.

 Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

جدول (14): مبادئ الوقاية الإشعاعية الأساسية

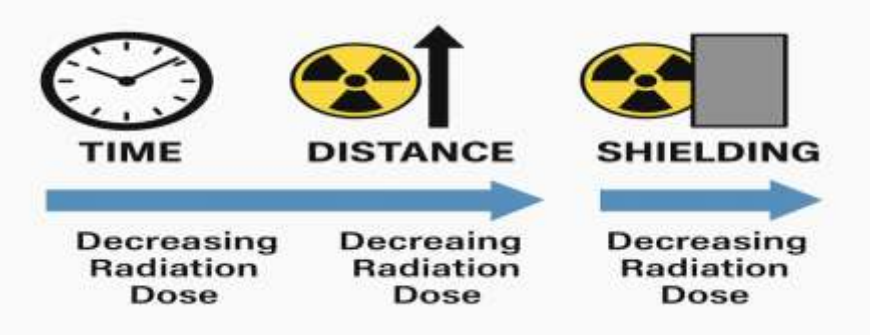
مبدأ الحماية	طريقة تقليل زمن التعرض	العلاقة بين المسافة وشدة الإشعاع	مادة التدريع المناسبة	نوع الإشعاع
الوقت – المسافة – التدريع	تنفيذ العمل بسرعة دون تأخير قرب المصدر	شدة الإشعاع $\propto 1$ / (المسافة)^2	الرصاص أو الخرسانة الكثيفة	أشعة جاما (γ)
الوقت – المسافة – التدريع	تقليل مدة التحضير والحقن	انخفاض الشدة مع زيادة المسافة الخطية	الألومنيوم أو الزجاج الأكريليكي	جسيمات بيتا(β^-)
الوقت – المسافة – التدريع	تجنّب ملامسة المصدر مباشرة	شدة منخفضة جداً – تأثير محلي فقط	ورقة أو هواء كافٍ للحجب	جسيمات ألفا(α)

ثانياً: تدريب الكادر الطبي وتطبيق معايير الأمان

تُعدّ ثقافة الأمان الإشعاعي من الركائز الجوهرية لأي مركز يستخدم التقنيات النووية في الطب. إذ لا تقتصر الوقاية على الأجهزة والتدريع فحسب، بل تشمل تدريب الكادر الطبي والفني على الإجراءات الصحيحة للتعامل مع المواد المشعة. يتلقى العاملون دورات متخصصة حول كيفية تحضير المستحضرات الإشعاعية، والتعامل مع المرضى بعد الحقن، واستخدام أجهزة القياس الشخصية مثل شارات قياس الجرعة (Dosimeters)، بالإضافة إلى التدريب على بروتوكولات الطوارئ في حال حدوث تسرب أو تلوث إشعاعي[53].

تلتزم المراكز الطبية بمعايير أمان صادرة عن منظمات دولية مثل الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA) واللجنة الدولية للحماية من الإشعاع(ICRP) ، والتي تحدد الحدود القصوى للجرعات المسموح بها للعاملين والمرضى على حد سواء. كما تُطبّق أنظمة صارمة للتخلّص من النفايات المشعة بطريقة آمنة، بما يضمن حماية البيئة والحد من التلوث الإشعاعي[54].

تُظهر هذه الإجراءات تكاملاً بين العلم والتطبيق، إذ تسعى الفيزياء النووية ليس فقط لتشخيص المرض وعلاجه، بل لضمان أن يتم ذلك ضمن إطار من الأمان والسلامة المستدامة.



شكل (13): تمثيل توضيحي لمبادئ الوقاية الإشعاعية (الوقت – المسافة – التدريع)

2.6 الأنظمة والمعايير الدولية

تُعتبر الأنظمة والمعايير الدولية الركيزة الأساسية التي تُنظِّم استخدام التقنيات النووية في المجال الطبي، إذ تهدف إلى ضمان الاستخدام الآمن والمسؤول للإشعاع بما يحمي الإنسان والبيئة على حد سواء. تتكامل هذه المعايير بين المستويات الدولية والوطنية لتشكّل إطاراً موحّداً لإدارة المواد المشعة ومراقبة الجرعات وضبط الممارسات داخل المستشفيات والمراكز البحثية.

دور الوكالة الدولية للطاقة الذرية(IAEA)

تلعب الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA) دوراً محورياً في تطوير ونشر ثقافة الأمان النووي عالميّاً، إذ تُصدر سلسلة من المعايير التقنية والإرشادات العملية المعروفة باسم Safety Standards Series، التي تشمل جوانب متعددة مثل حماية المرضى والعاملين، مراقبة الجرعات، والتعامل مع النفايات المشعة. كما تتابع الوكالة تنفيذ برامج التدريب والتأهيل الدولي للعاملين في مجال الطب النووي من خلال مبادرات مثل

 Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

برنـــامج Safety in Radiation Oncology (SAFRON)، وتعمـــل علـــى تقيـــيم الممارســـات الســـريرية لضـمان الامتثـال للمعـايير الدوليـة.بالإضـافة إلـى ذلـك، تضـع الوكالـة إطـاراً قانونيـاً شـاملاً يُعـرف باسـم Basic Safety Standards (BSS)، يُـنظّم كـل مـا يتعلـق بالاسـتخدام السـليم للمصـادر الإشـعاعية فـي الطـب والصـناعة والبحـث العلمـي، بالتعـاون مـع منظمـات مثـل منظمـة الصـحة العالميـة (WHO) واللجنـة الدوليـة للحمايـة مـن الإشعاع[55].(ICRP)

القوانين المحلية الخاصة بإدارة المواد المشعة

علـى المسـتوى الـوطني، تعتمـد كـل دولـة لوائحهـا التنظيميـة بنـاءً علـى توصـيات الوكالـة الدوليـة للطاقـة الذريـة. وتشـرف الهيئـات الرقابيـة الوطنيـة —مثـل هيئـة الرقابـة النوويـة والإشـعاعية أو هيئـة الطاقـة الذريـة —علـى مـنح التـراخيص لاسـتخدام المصـادر المشـعة، ومراقبـة تطبيـق معـايير الأمـان، وتنظـيم نقـل وتخـزين المـواد النوويـة. تشـمل هـذه القـوانين تحديـد الجرعـات القصـوى المسـموح بهـا للعـاملين (عـادة 20 ميلـي سـيفرت سـنوياً كحـد متوسـط)، وتحديـد شـروط إنشـاء غـرف التصـوير والعـلاج الإشـعاعي، بالإضـافة إلـى مراقبـة عمليـات الـتخلص مـن النفايـات المشـعة.تهـدف هـذه التشـريعات إلـى تحقيـق التـوازن بـين الاسـتفادة الطبيـة مـن الإشـعاع وحمايـة الإنسـان والبيئة، مع ضمان المساءلة القانونية في حال حدوث أي مخالفة أو تسرب إشعاعي [56].

جدول (15): مقارنة بين المعايير الدولية والتشريعات المحلية

المستوى التنظيمي	الهدف الأساسي	نوع المعيار أو التشريع	نطاق التطبيق	الجهة المسؤولة / الهيئة
دولي	حماية الإنسان والبيئة وتوحيد الممارسات	معايير الأمان الأساسية (BSS)وإرشادات الاستخدام الآمن للإشعاع	عالمي	الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA) – اللجنة الدولية للحماية من الإشعاع(ICRP)
محلي / وطني	ضمان الامتثال الوطني لمعايير الأمان الإشعاعي	قوانين تنظيم استخدام النظائر المشعة، الترخيص والتدريب والإشراف	وطني	هيئة الرقابة النووية أو الطاقة الذرية

3.6 إدارة النفايات المشعة الطبية

تُشـكّل إدارة النفايـات المشـعة الطبيـة جـزءاً أساسـياً مـن منظومـة الأمـان النـووي، إذ تتولّـد هـذه النفايـات مـن أنشـطة التصـوير والعـلاج النـووي داخـل المستشـفيات. وتشـمل بقايـا المستحضـرات الإشـعاعية، والحقـن، والأنابيـب، والملابـس الواقيـة، وكـل المـواد التـي تعرضـت لمصـادر إشـعاعية.تُـدار هـذه النفايـات وفـق نظـام دقيـق يبـدأ مـن جمعهـا فـي حاويـات محكمـة الإغـلاق ومصـنّفة حسـب نـوع النظيـر ونشـاطه الإشـعاعي، مـروراً بمرحلـة التخـزين المؤقـت فـي غـرف مخصصـة ذات تـدريع مناسـب، وانتهـاءً بعمليـة الـتخلص النهـائي الآمـن بعـد أن يصـل النشـاط الإشعاعي إلى مستويات طبيعية وفق مبدأ التحلل الزمني[57].(Decay Storage)

فـي المستشـفيات التـي تسـتخدم نظـائر قصـيرة العمـر مثـل Tc-99m، تُخـزَّن النفايـات لبضـعة أيـام فقـط حتـى يـزول النشـاط الإشـعاعي، ثـم تُعامَـل كنفايـات طبيـة عاديـة. أمـا النظـائر الأطـول عمـراً مثـل I-131أو Cs-137، فتُخـزَّن لفترات أطول في منشآت مرخّصة، حيث تُراقَب مستويات الإشعاع دورياً.

كمـا تُتّبـع إجـراءات صـارمة للحـد مـن التلـوث الإشـعاعي داخـل غـرف الطـب النـووي، مثـل تغطيـة الأسـطح بمـواد غيـر ماصّـة، واسـتخدام أدوات مخصّصـة لكـل نـوع مـن النظـائر، وإجـراء قياسـات إشـعاعية دوريـة فـي بيئـة العمـل باستخدام عدادات Geiger-Müllerأو .Dosimeters

وتتضـمن خطـط الحمايـة البيئيـة أيضـاً بـرامج للتعامـل مـع الانسـكابات الطارئـة، وإزالـة التلـوث فـي حـال حـدوث تسرب إشعاعي، إضافة إلى تدريب العاملين على إجراءات الاستجابة السريعة[58,59].

 Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

جدول (16): خطوات إدارة النفايات المشعة الطبية

المرحلة الإجرائية	مصدر التوليد	نوع النفايات	طريقة التخزين	وسيلة الحد من التلوث
جمع وتصنيف النفايات	أقسام الطب النووي والتصوير الإشعاعي	سوائل مشعة، أدوات حقن، بقايا مواد دوائية	حاويات رصاصية مغلقة داخل غرف مدرعة	تغطية الأسطح، تهوية جيدة، مراقبة إشعاعية يومية
تخزين مؤقت	غرف التحضير أو المرضى المعالجين بالنظائر	مواد مشعة قصيرة أو طويلة العمر	غرف مؤمنة بتدريع رصاصي أو خرسانة	فصل المواد حسب نصف العمر وتخزينها حتى التحلل
التخلص النهائي الآمن	مواقع التخلص النهائية	بقايا منخفضة النشاط الإشعاعي	نقل بإشراف هيئة الأمان النووي	التخلص عبر القنوات المرخّصة أو إعادة التدوير بعد التحلل

7. الخاتمة والتوصيات

تمثل الفيزياء النووية الطبية اليوم أحد الأعمدة الأساسية للطب التشخيصي الحديث، إذ أحدثت ثورة في فهم طبيعة الأورام السرطانية وآليات تشخيصها بدقة على المستويين التشريحي والوظيفي. فقد مكّنت تقنيات التصوير النووي مثل PET و SPECT الأطباء من رؤية ما وراء الأنسجة السطحية، لتحديد التغيرات الحيوية في الخلايا قبل أن تظهر أعراض المرض أو تُكتشف بالوسائل التقليدية. وتؤكد الدراسات السريرية الحديثة أن استخدام النظائر المشعة في التشخيص المبكر للسرطان قد أسهم بشكل ملحوظ في رفع نسب الشفاء وتحسين نوعية حياة المرضى، حيث أصبح من الممكن الكشف عن الأورام في مراحلها الأولى وتقييم مدى استجابتها للعلاج بشكل مستمر ودقيق.

إن التكامل بين التكنولوجيا النووية والطب الإكلينيكي يُعدّ من أبرز مظاهر التقدّم العلمي في العقود الأخيرة، إذ لم يعد التصوير مقتصراً على تحديد شكل الورم فحسب، بل أصبح أداة لتحليل سلوكه الحيوي وديناميكية نموه واستجابته للعوامل العلاجية. لقد أسهم الدمج بين الفيزياء النووية والتقنيات الرقمية في إنشاء منظومات تصوير هجينة تجمع بين القوة التحليلية للتصوير النووي والدقة التشريحية للتصوير المقطعي، مما جعل التشخيص أكثر شمولية وموضوعية. كما أن تطوّر برامج الحوسبة والذكاء الاصطناعي ساهم في تحسين دقة تحليل الصور الإشعاعية واستخراج مؤشرات كمية تساعد الأطباء في اتخاذ القرارات العلاجية المثلى.

رغم هذه الإنجازات الكبيرة، لا تزال هناك تحديات حقيقية تواجه تطبيقات الفيزياء النووية في الطب، أهمها ارتفاع تكلفة الأجهزة والمعدات الإشعاعية وصعوبة توفير المواد المشعة قصيرة العمر في بعض الدول النامية، إضافة إلى الحاجة المستمرة لتدريب كوادر طبية وفيزيائية مؤهلة قادرة على التعامل مع التكنولوجيا المتقدمة وفق أعلى معايير الأمان. كما أن زيادة الطلب على خدمات الطب النووي تتطلب بنية تحتية قوية تتضمن مفاعلات أو مسرّعات نووية، وشبكات نقل آمنة للمواد المشعة، وأنظمة رقابة صارمة تضمن الاستخدام المسؤول لهذه التقنيات الحساسة.

من هذا المنطلق، تبرز الحاجة إلى دعم البحث العلمي والتطوير التقني في مجال الطب النووي من خلال تشجيع التعاون بين الجامعات والمراكز البحثية والقطاع الصحي. إن الاستثمار في تطوير نظائر جديدة أكثر أماناً ودقة، وتعزيز التكامل بين الفيزيائيين والأطباء والمهندسين، يمثل الطريق نحو مستقبل أكثر تقدماً في تشخيص السرطان وعلاجه. كما يُوصى بتوسيع برامج التعليم والتدريب في الفيزياء الطبية لتأهيل جيل جديد من المتخصصين القادرين على قيادة هذا المجال الحيوي بكفاءة عالية. إن الرؤية المستقبلية للطب النووي تقوم على توظيف العلم لخدمة الإنسان، وتحقيق التوازن بين التقدّم التقني والمسؤولية الأخلاقية في استخدام الطاقة النووية لأغراض السلام والصحة العامة.

Compliance with ethical standards

Disclosure of conflict of interest

The authors declare that they have no conflict of interest.

 Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

المراجع

1. L. Schäfer et al., “Current Approaches of Nuclear Molecular Imaging in Breast Cancer Management,” *Cancers*, vol. 17, no. 13, 2025.
2. D. Li et al., “Recent advances of nuclear medicine for tumor precision,” , 2025.
3. A. Cuocolo et al., “PET and SPECT Specialty Grand Challenge,” *Frontiers in Nuclear Medicine*, 2021.
4. M. Crișan et al., “Radiopharmaceuticals for PET and SPECT Imaging: A Systematic Review,” , 2022.
5. N. Zamani-Siahkali et al., “SPECT/CT, PET/CT, and PET/MRI for Response Assessment of Bone Metastases,” , 2024.
6. R. Bitar et al., “Positron Emission Tomography Radiotracers for Identification of Site of Recurrence in Prostate Cancer,” *Cancers*, vol. 17, no. 10, 2025.
7. Y. Wang et al., “Nanoparticles in nuclear medicine: From diagnostics to therapy,” , 2025.
8. Y. Zhang et al., “PET radiomics in lung cancer: advances and translational potential,” *EJNMMI Physics*, 2024.
9. J. Lee et al., “Current Status and Future Perspectives of Nuclear Medicine,” , 2025.
10. P. Garg et al., “Molecular PET imaging: Unlocking the secrets of cancer,” , 2025.
11. F. Cicone, “Editorial: ‘Nuclear medicine in cancer diagnosis,’” *Frontiers in Medicine*, 2022.
12. S. C. Vaz et al., “The current role of nuclear medicine in breast cancer,” *PMC*, 2023.
13. A. McMillan, T. J. Bradshaw, “AI-based data corrections for attenuation and scatter in PET and SPECT,” arXiv, 2021. a
14. M. Francesca Spadea et al., “Deep learning-based synthetic-CT generation in radiotherapy and PET: a review,” arXiv, 2021.
15. K. H. Leung et al., “A Physics-Guided Modular Deep-Learning Based Automated Framework for Tumor Segmentation in PET Images,” arXiv, 2020.
16. M. R. Salmanpour et al., “Handcrafted vs. Deep Radiomics vs. Fusion vs. Deep Learning: A Comprehensive Review … in PET and SPECT Imaging,” arXiv, 2025.
17. H. Hricak et al., “Lancet Oncology Commission on Medical Imaging and Radiation in Cancer,” , 2021.
18. T. O. Alkahtani et al., “Investigating the significance of SPECT/CT-SUV for prostate cancer imaging,” BMC Medical Imaging, 2025.
19. P. H. Kuo et al., “PSMA PET Imaging in the Management of Patients with Prostate Cancer,” 2025.
20. M. Palihati, “Emerging PET Imaging Agents and Targeted Radioligand Therapies,” Tomography, vol. 11, no. 8, 2025.
21. A. Brink, “New Targets for Imaging in Nuclear Medicine,” [Journal], 2025.
22. I. D. Dev et al., “Current and Future Perspectives of PDL1 PET and SPECT,” European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging, 2024.
23. S. McDonald et al., “Nuclear Medicine and Molecular Imaging in Urothelial Cancer,” Frontiers / PMC, 2025.
24. D. Armany et al., “The Role of 18F-PSMA-1007 PET/CT in the Staging and Recurrence of Prostate Cancer,” PMC, 2025.
25. F. von Stauffenberg et al., “Current Clinical Applications of PSMA-PET for Prostate Cancer,” Cancers, vol. 16, 2024.
26. J. Meier et al., “Development of ^{43}Sc/^{47}Sc-PSMA-617 as Theranostics for Prostate Cancer,” Journal of Nuclear Medicine, 2023.
27. FO Garcia-Perez et al., “[^{99}mTc]Tc-iPSMA SPECT/CT as an Alternative to PET,” Journal of Clinical Oncology (JCO), 2025.
28. P. Cegła et al., “Diagnosis and Treatment of Lung Cancer Using Nuclear Medicine,” Nuclear Medicine Review, 2023.
29. Fast SPECT acquisitions for single time-point dosimetry in ^177Lu-PSMA therapy, Egyptian Journal of Radiology and Nuclear Medicine, 2025.
30. J. Lee et al., “Current Status and Future Perspectives of Nuclear Medicine,” Medicines, vol. 13, no. 5, 2025.
31. J. Rehm et al., “αvβ6-integrin Targeted PET/CT Imaging in Pancreatic Cancer,” Frontiers in Nuclear Medicine, 2024.
32. Kweku Enninful et al., “From Diagnosis to Therapy: Progress in SPECT and PET Reconstruction for Theranostics,” arXiv preprint, 2025.
33. Mohammad R. Salmanpour et al., “Handcrafted vs. Deep Radiomics vs. Fusion vs. Deep Learning: A Comprehensive Review,” arXiv preprint, 2025.
34. “The Role of PSMA PET Imaging in Prostate Cancer,” PMC article, 2025.
35. “Projected Lifetime Cancer Risks From Current Computed Tomography Exposure,” JAMA Internal Medicine, 2025.

 Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

36. “Supply Issues in Nuclear Medicine,” Clinical Nuclear Medicine, 2023.
37. “Comparison of the Detection Performance Between FAP and FDG PET/CT in Various Cancers: A Systematic Review and Meta-analysis,” Clinical Nuclear Medicine, 2023.
38. “Development and Validation of ^{18}F-FDG PET/CT-Based Models for Predicting Successful Complete Cytoreduction in Advanced Ovarian Cancer,” Clinical Nuclear Medicine, 2023.
39. R. Costanzo et al., “Nuclear medicine imaging modalities to detect incidentalomas and their impact on patient management: a systematic review,” Journal of Nuclear Medicine & Molecular Imaging, 2024.
40. M. Palihati, “Emerging PET Imaging Agents and Targeted Radioligand Therapies,” Tomography, vol. 11, no. 8, 2025.
41. D. Li et al., “Recent advances of nuclear medicine for tumor precision,” ScienceDirect Review, 2025.
42. A. Brink, “New Targets for Imaging in Nuclear Medicine,” ScienceDirect Editorial, 2025.
43. I. D. Dev et al., “Current and Future Perspectives of PDL1 PET and SPECT,” Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging, 2024.
44. R. Smith-Bindman et al., “Projected Lifetime Cancer Risks From Current Computed Tomography Exposure,” JAMA Internal Medicine, 2025. J
45. P. H. Kuo et al., “The Role of PSMA PET Imaging in Prostate Cancer: Current Applications and Future Directions,” Springer Link Review, 2025.
46. “Hyperpolarized carbon-13 MRI” (review of imaging techniques), Journal of Imaging Science & Techniques, 2025.
47. “Cherenkov luminescence imaging (CLI)” — principles and applications in radiotracer imaging, EJNMMI Physics / Imaging, 2022–2025.
48. “Theranostics in Nuclear Medicine: Combing Diagnosis and Therapy,” Molecules Review, 2023–2025.
49. Kweku Enninful et al., “From Diagnosis to Therapy: Progress in SPECT and PET Reconstruction for Theranostics,” arXiv preprint, 2025.
50. Tyler J. Bradshaw & Alan B. McMillan, “Anatomy and Physiology of Artificial Intelligence in PET Imaging,” arXiv preprint, 2023.
51. “Editorial: Reviews in Nuclear Medicine 2023,” Frontiers in Medicine, 2024.
52. R. Islam et al., “The Role of PSMA PET Imaging in Prostate Cancer,” PMC open-access article, 2025.
53. “Malignancies with Low FDG Uptake at PET/CT: Pitfalls and Prognostic Importance,” Radiographics Review, 2024.
54. R. R. Flavell, “Malignancies with Low FDG Uptake at PET/CT: Pitfalls and Prognostic Importance,” Radiographics, Radiological Society of North America (RSNA), 2024.
55. D. A. Jadvar and P. M. Colletti, “Supply Issues in Nuclear Medicine: Isotope Shortages and Impact on Diagnostic Imaging,” Clinical Nuclear Medicine, vol. 48, no. 2, pp. 170–172, Feb. 2023.
56. A. El-Sayed, M. M. Abd El-Khalek, and R. Farid, “Fast SPECT Acquisitions for Single Time-Point Dosimetry in ^{177}Lu-PSMA Therapy,” Egyptian Journal of Radiology and Nuclear Medicine, SpringerOpen, vol. 56, no. 3, 2025.
57. UroToday Conference Editorial Board, “PSMA SPECT vs PSMA PET in Response Evaluation: Comparative Insights from Clinical Practice,” UroToday Conference Highlights, 2025.
58. J. Lee, “Current Status and Future Perspectives of Nuclear Medicine,” Medicines (MDPI), vol. 13, no. 5, 2025.
59. P. Garg, S. Gupta, and R. K. Sharma, “Molecular PET Imaging: Unlocking the Secrets of Cancer,” Journal of Molecular Imaging and Diagnostics (ScienceDirect), vol. 42, 2025.

Disclaimer/Publisher’s Note: The statements, opinions, and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of **AJAPAS** and/or the editor(s). **AJAPAS** and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions, or products referred to in the content.

 Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).