جامعة المنارة

مقرر الصيدلة الإشعاعية

ا.د.هيثم قطوف

مبادئ الطب النووي

الأسس الفيزيائية

مقدمة :

اكتشفت الإشعاعات والمواد المشعة وعرف أثرها على المادة الحية منذ أكثر من قرن ، وقد دأب العلماء منذ ذلك الوقت وحتى الآن على البحث عن أفضل الطرق لاستخدامها في الاستقصاءات التشخيصية والعلاجية بشكل عام ، وبشكل خاص معالجة الأمراض السرطانية .

تشير الإحصاءات إلى أن حوالي 40 – 70 % من المرضى المصابين بالسرطان تعطى لهم المعالجة الإشعاعية كجزء من تدبيرهم العلاجي . من ميزاتها أنها غير راضة للمريض وتحافظ على وظيفة الأعضاء.تستخدم المعالجة الإشعاعية وحدها أو بالمشاركة مع الوسائل العلاجية الأخرى كالمعالجة الجراحية و المعالجة الكيميائية .

المبدأ الأساسي الذي تعتمد عليه المعالجة الإشعاعية هو أن الأشعة المودعة في النسيج الحي تؤدي إلى حدوث بعض التغيرات الحيوية على مستوى الجينات أو بعض مكونات الخلية الأخرى ، تؤدي إلى توقف نمو الخلايا وانقسامها ، وبالتالي موت الورم وانكماشه.

من الإحصاءات الطبية العالمية : نجد أنه من بين كل مرضى السرطان حوالي 22% يشفون بالجراحة ، و18%بالمعالجة الشعاعية ،و5% بالمعالجة الكيميائية إما لوحدها أو بالمشاركة مع المعالجة الجراحية أو الشعاعية .

إذن وبمقاربة بسيطة نجد أن المعالجة الشعاعية تبقى المعالجة الغير جراحية الأكثر فعالية لعلاج مرضى السرطان .

1) تمهيد

تستخدم النظائر المشعة المفتوحة في تشخيص العديد من الحالات المرضية وتسهم في حل الكثير من المسائل السريرية المهمة. كما يمكن أن تستخدم في معالجة بعض الأمراض كأحد أشكال المعالجة الإشعاعية.

تسمى الفحوص التي نستخدم فيها النظائر المشعة بالفحوص الومضانية Scintigraphic Studies ، وهي تعتمد بشكل رئيسي على تقنية الواسم Tracer Technique والتي تتم بحقن مادة مشعة مناسبة كواسم إلى الجسم حيث تنتشر وتتوزع في الجسم بشكل يتناسب مع طبيعية هذه المادة ووظائف الأعضاء المختلفة ، وبواسطة أجهزة قياس مناسبة نقوم بتتبع نموذج انتشار وتراكم المادة المشعة في مناطق الجسم المختلفة .

من خلال هذا التعريف المبسط نستدل أنه لإنجاز أية دراسة ومضانية لعضو من أعضاء الجسم ، لابد من توفر عقار مشع يتراكم فيه بشكل انتقائي أو على الأقل بنسبة كافية تميزه عن النسج المجاورة له، وأجهزة قياس ذات كفاءة عالية تمكننا من تتبع ورصد توزع هذا العقار المشع المحقون .

بشكل عام نميز بين نوعين من الفحوص التي تجرى باستخدام النظائر المشعة حسب طبيعة النتائج المنتظرة من هذه الفحوص :

- فحوص تعطينا معلومات عن الآثار الوظيفية التي تسببها الحالات المرضية المختلفة على الأعضاء.
- فحوص تظهر الآفة المرضية بشكل مباشر عن طريق العقاقير المشع التي تتراكم في هذه الآفة بشكل انتقائي في خلاياه.

كما نميز بين فئتين من هذه الفحوص حسب الطريقة التي تجرى بها هذه الفحوص :

- الفحوص الساكنة *Static studies* : وفيها يتم تسجيل الصور الومضانية بعد مرور فترة زمنية للسماح للعقار المشع المحقون بالانتشار والتراكم في الهدف المدروس. وتختلف مدة الانتظار حسب وظيفة النسيج المدروس وآلية تراكم العقار المشع فيه ، وقد تكون عدة دقائق أو ساعات أو حتى أيام. وهذه الصور الومضانية تعطينا معلومات عن التوزع النهائي للعقار المشع في الجسم.

- الفحوص الحركية *Dynamic studies* : وهي فحوص يتم فيها تسجيل صور ومضانية متعددة بفواصل زمنية معينة تتيح لنا دراسة تغيرات توزع العقار المشع في الجسم مع مرور الوقت. وهذه الفحوص تتيح الحصول على معلومات وظيفية مهمة ودراسة التغيرات الوظيفية الناتجة عن الأمراض المختلفة.

وعند تقييم الصور الومضانية لا بد من معرفة الانتشار الطبيعي لكل عقار مشع في أعضاء ونسج الجسم المختلفة. في الصور الومضانية الساكنة نميز بين شكلين من تثبيت العقار المشع في الهدف المدروس : الأول نقص أو غياب التثبيت في بؤرة واحدة أو أكثر (منطقة باردة) تعكس غياب الوظيفة في خلايا هذه المنطقة ، والثاني زيادة التثبيت في بؤرة واحدة أو أكثر (منطقة حارة) تعكس زيادة النشاط الوظيفي أو شره الهدف للعقار المشع.

أما في الفحوص الومضانية الحركية ، فإنه إضافة للتغيرات التي يمكن أن تشاهد على الصور الومضانية المسجلة ، فإن دراسة تغيرات الفعالية المشعة مع الزمن تعطينا معلومات نصف كمية عن وظيفة العضو المدروس تفيد في رصد التغيرات الوظيفية المرافقة لمختلف الأمراض.

2) مبادئ أساسية في الفيزياء النووية

– بنية الذرة Atom structure

تتكون ذرة أي عنصر من جسم مركزي حجمه صغير جداً يعرف بالنواة Nucleus يحيط بها غمامات الكترونية تتوزع على مدارات متعددة ، ويحمل الإلكترون شحنة سالبة . تتكون النواة بدورها من جسيمات مشحونة بشحنة كهربائية موجبة تعرف بالبروتونات Protons وجسيمات متعادلة كهربائياً تسمى النيوترونات . ويسمى البروتون والنيوترون معاً نوكليون , شحنة البروتون مساوية تماماً لشحنة الإلكترون .

كتلة البروتون مساوية تقريباً لكتلة النيوترون وأكبر من شحنة الإلكترون بحوالي 1840 مرة. (كتلة البروتون تساوي 1.67×10^{-24} غ) وهي مساوية تقريباً وحدة كتلة ذرية واحدة Atomic Mass Unit (AMU) .

عدد البروتونات الموجبة الموجودة في النواة يتساوى دائماً مع عدد الإلكترونات السالبة في المدارات , لذلك تكون الذرة متعادلة كهربائيا . إضافة إلى ما ذكر هناك الإلكترونات المشحونة بشحنة إيجابية وتسمى البوزيترونات وهي غير موجودة في الطبيعة ولكن تتشكل في بعض أنواع التفكك النووي وتتواجد لفترة زمنية قصيرة جداً .

تتميز النواة بنيوياً بثلاثة مؤشرات هي :

- العدد الذري (Z) وهو عدد البروتونات في النواة ,
- عدد النيوترونات (N)

- العدد الكتلي (A) وهو مجموع عددي البروتونات والنيوترونات في نواة الذرة أو عدد النوكليونات

يشير العدد الذري إلى شحنة النواة الموجبة وهو الذي يحدد الخواص الكيميائية للعنصر.
تقع الإلكترونات في مدارات متعددة حول النواة تسمى من المركز نحو المحيط (K , L , M , N , O) وكلما ابتعد الإلكترون عن النواة ضعفت طاقة ارتباطه وازدادت طاقته الكامنة .
وقد اتفق على أن يرمز للعنصر بأحرفه اللاتينية الأولى ويكتب عدده الذري في الركن السفلي الأيسر وعدده الكتلي في الركن العلوي الأيسر (${}^{A}_{Z}X$) مثال :
الهيدروجين (${}^{1}_{1}H$) , الهليوم (${}^{4}_{2}He$) اليورانيوم (${}^{233}_{92}U$) . ويمكن كتابة رمز العنصر ويليه عدد الكتلة مثلاً اليود I-132 .
تحتوي ذرات العنصر الواحد على العدد نفسه من البروتونات ، إلا أنها قد تحتوي على أعداد مختلفة من النيوترونات ، أي أن العدد الذري للعنصر الواحد لا يتغير في حين يتغير عدده الكتلي تبعاً لعدد النيوترونات ، وتسمى هذه الذرات نظائر Isotopes .
فمثلاً نجد أن للهيدروجين ثلاثة نظائر هي :

- الهيدروجين (${}^{1}_{1}H$) : تتكون نواته من بروتون واحد ولا تحتوي على نيوترون (Z=1 , A=1).
- الديتريوم (${}^{2}_{1}H$) : تتكون نواته من بروتون ونيوترون (A=2 , Z=1) .
- التريتيوم (${}^{3}_{1}H$) : تتكون نواته من بروتون ونيوترونين (A=3 , Z=1) .

هناك بعض العناصر التي يصل عدد نظائرها إلى أكثر من خمسين نظيراً . بعض النظائر تكون مستقرة وبعضها يكون نشطاً غير مستقر (Radioactive) ويصدر إشعاعات نووية .
تجدر الإشارة إلى أن نظائر العنصر الواحد لها نفس الخصائص الكيميائية حيث أن العدد الذري هو الذي يحدد للعنصر خصائصه ألكيميائية.

– كتلة النواة Nucleus mass :

ذكر أن العدد الكتلي A يحدد بالتقريب كتلة النواة . وفي الحقيقة فإن الكتلة الفعلية للنواة تكون دائماً أقل من العدد الكتلي . فلكي تبقى النواة متماسكة ومترابطة فإنها تحتاج لطاقة تربط مكوناتها ، وإلا تفككت النواة إلى مكوناتها الأولية . وطبقا لعلاقة أينشتاين التي تربط الطاقة بالكتلة فإن جزءاً من كتلة النواة يتحول إلى طاقة ترابط وبذلك تصبح الكتلة الفعلية للنواة أقل من مجموع كتل مكوناتها .
وقد استخدمت وحدة قياس كتلة النواة تعرف باسم وحدة الكتلة الذرية (Atomic mass unit amu) . ولقد اتفق عالمياً على اعتبار كتلة نظير الكربون-12 (${}^{12}_{6}C$) مساوية 12 وحدة ، وهكذا فإن وحدة الكتلة الذرية (amu) التي هي عبارة عن $\frac{1}{12}$ من كتلة نظير الكربون تساوي كتلة مقدارها 1.6×10^{-24} g .

– الوحدات الذرية للطاقة Energy atomic units :

للتعبير عن الطاقة في المجالات الذرية والنووية تستخدم وحدة صغيرة تعرف باسم وحدة الإلكترون – فولت (eV). وهي عبارة عن الطاقة التي يكتسبها أو يفقدها الإلكترون (أو البروتون) عند اجتيازه فرق جهد مقداره فولت واحد . ومضاعفات هذه الوحدة هي :

- الكيلو إلكترون- فولت $KeV = 10^3$ eV
- الميغا إلكترون – فولت ($MeV= 10^6$ eV) .

– النشاط الإشعاعي Radioactivity :

النشاط الإشعاعي هو أحد خصائص نواة الذرة وهو عبارة عن التحول البنيوي التلقائي للنواة غير المستقرة إلى حالة بنيوية أكثر استقراراً ، يرافقه إصدار إشعاعات مؤينة. هناك ميزتان أساسيتان تحددان الاستقرار البنيوي لنواة الذرة الأولى : حجم الذرة (أو العدد الذري Z) ، والنسبة نيوترون- بروتون (N-to-Z ratio) . جميع الذرات الكبيرة التي يزيد عددها الذري عن 80 هي ذرات غير مستقرة بنيوياً ولها نشاط إشعاعي. أما الذرات الذي يساوي عددها الذري 80 أو أقل ($Z\leq 80$) فإن الاستقرار البنيوي يعتمد على نسبة النيوترونات إلى البروتونات. ففي الذرات ذات العدد الذري ($Z\leq \sim 20$) يتحقق استقرار النواة عند تساوي عدد النيوترنات مع عدد البروتونات (N/P : 1) . وفي الذرات التي يكون عددها الذري $\sim 20 \leq Z \leq \sim 80$ يتحقق الاستقرار عند وجود ثلاثة نيوترونات مقابل بروتونين N/P : 1.5 .
تعرف هذه النظائر التي يحدث فيها هذا التحول التلقائي بالنظائر المشعة . تجدر الإشارة إلى أن عملية التحول تحدث في النظائر المشعة سواء كانت في حالة نقية أم كانت ضمن مركبات كيميائية , وهذا التفكك لا يعتمد إطلاقاً على الظروف الطبيعية مثل الحرارة أو غير ذلك ..

- **أنواع الإشعاعات :**

تصنف الإشعاعات حسب طبيعتها إلى مجموعتين رئيسيتين :
الأشعة الكهرومغناطيسية (أو الأشعة الفوتونية) ، والأشعة الجسيمية .

- **الفوتونات :**

وهي أشعة موجية كهرومغناطيسية ، ليس لها أية شحنة كهربائية أو كتلة سكونية . هذه الفوتونات يمكن أن تولد باستخدام بعض الأجهزة الخاصة (كالمسرعات الخطية) أو تصدرها بشكل طبيعي بعض النظائر المشعة . والفوتونات الأكثر استخداماً في المعالجة الإشعاعية هي أشعة رونتجن أو الأشعة السينية وأشعة غاما. يمكن للفوتونات ذات الطاقة العالية أن تدخل عميقاً إلى جسم الإنسان ولذلك فهي مناسبة لمعالجة الأورام في الأماكن المختلفة للجسم وخاصة العميقة.

- **الأشعة السينية :**

الأشعة السينية المستخدمة في المعالجة الإشعاعية تتراوح طاقتها بين 10 كيلو فولت و 50 ميغا فولت ، وهي أشعةكهرطيسية ، تولد في أنبوب الأشعة المؤلف من اسطوانة مفرغةمن الهواء فيها مصعد ومهبط وبينهما تحريض كهربائي عالٍ أو فرق كمون كهربائي مرتفع ، حيث تسرع الالكترونات المولدة حرارياً من القطب السالب وتصدم على القطب الموجب المصنوع من مواد معدنية خاصة ، حيث تتولد نتيجة التأثير المتبادل بين الإلكترونات المسرعة ومادة القطب الموجب أشعة سينية .

أشعة غاما : وهي أشعة كهرومغناطيسية تصدرها بعض العناصر المشعة . والعناصر المشعة المستخدمة بشكل خاص هي الكوبالت – 60 ، والتسيزيوم _ 137 ، اللذان يصدران أشعة غاما وكل منهما بطاقة خاصة .

- **الأشعة الجسيمية : وتشمل ما يلي :**

- الالكترونات :

الالكترونات جسيمات تحمل شحنة كهربائية سالبة ، ولها كتلة ساكنة ، هذه الصفات تجعلها أكثر قدرة على التأثير والتفاعل المتبادل مع الأوساط التي تخترقها. لا تملك الإلكترونات نفس قدرة الفوتونات على الاختراق ، وتعطي معظم طاقتها على السطح. وهناك نوعان من أشعة الالكترونات ، الأول ينشأ من التحطم الذري لبعض العناصر المشعة مثل اليود المشع - 131ونطلق عليها اسم أشعة بيتا ، والثاني يمكن توليده عن طريق إثارة الذرة حرارياً أو شعاعياً ونطلق عليها اسم أشعة الالكترونات.

- الجسيمات المشحونة الثقيلة :

مثل جزيئات ألفا ، البروتونات ، الديترونات ، و غيرها ... ، و هذه يمكن الحصول عليها من بعض العناصر المشعة التي تصدر مثل هذا النوع من الجسيمات المشحونة ، أو تنتج بمساعدة مسرعات خاصة .

1. التأين و الإثارة :

عندما يحدث انتقال الطاقة من الأشعة إلى ذرات المادة بمقدار يكفي لنزع بعض الإلكترونات المدارية تتشكل أيونات موجبة والكترونات حرة تسمى الأزواج الأيونية وهذا يسمى التأين ، أما إذا كان مقدار الطاقة المنتقلة لا يكفي لنزع الإلكترونات وسبب إزاحتها من مدار إلى مدار فتحدث فقط إثارة للذرة وتغيير في مسار الأشعة.

يمثل عدد الأزواج الإيونية المتشكلة في واحدة المسافة التأين النوعي وهي تميز كل نوع من الإشعاعات ، فأشعة ألفا تسبب أعلى نسبة تأين تليها أشعة بيتا ثم الأشعة الفوتونية. وجرعة التأين تحسب بقياس شحنة الأيونات السالبة والموجبة التي تولدها الأشعة في حجرة مملوءة بالهواء ، واحدتها كولومب/كغ .

- **الأشعة المؤينة :**

هي الأشعة المستخدمة في المعالجة الإشعاعية ، وهي تلك التي تملك الطاقة الكافية والقدرة، إذا ما اخترقت وسط ما ، على نزع إلكترون من مداره محولة الذرة إلى شاردة. هناك أنواع متعددة من هذه الأشعة ، تصنف حسب الطريقة التي تقوم فيها بفعل التأين إلى مجموعتين رئيستين :

- الإشعاعات المؤينة بشكل مباشر: وتشمل الإشعاعات المكونة من الجسيمات المشحونة : وهي الإلكترونات ، البروتونات وجسيمات ألفا وبيتا. حيث يحدث التأين عن طريق التأثير المباشر على الإلكترونات المدارية لذرات الوسط مسببة تأينها.
- الإشعاعات المؤينة بشكل غير مباشر وتشمل الفوتونات (الأشعة السينية وأشعة غاما)و النترونات . يحدث التأين على مرحلتين : تسبب طاقة الأشعة تحرر جسيمات مشحونة (إلكترون أو بوزيترون ..) وهذه بدورها تتفاعل مع الإلكترونات المدارية لذرات الوسط مسببة التأين .

2. التأثير المتبادل بين الأشعة المؤينة والمادة :

عند اختراق الأشعة لوسط مادي ما ، تحدث عمليات تغيّر الأشعة والمادة بنفس الوقت. فالتغيرات التي تصيب الأشعة تشمل ، في الغالب ، تغيير اتجاهها وحدوث ما يسمى انتثار الأشعة ، أو تضعيفها عن طريق انتقال جزء من طاقتها أو كلها إلى المادة. أما التغيرات التي تصيب المادة فتشمل الإثارة ،و التأين . هذه العمليات بمجملها تقود إلى سلوك محدد للحزمة الإشعاعية عند عبورها المادة ، تحدده طاقة الأشعة وطبيعتها وطبيعة الوسط الذي تجتازه.

- **امتصاص الأشعة وتضعيفها :**

- تترافق العمليات المتبادلة بين الأشعة والمادة بحدوث انتقال للطاقة من الأشعة إلى الوسط المار فيها مما يؤدي لتحديد قدرة هذه الأشعة على الاختراق

- **أنواع التفكك الإشعاعي :**

1. تفكك ألفا α-Decay :

يحدث هذا التفكك في نوى النظائر المشعة ذات العدد الذري($Z \geq 80$~) بسبب انخفاض قيمة طاقة الترابط ضمن مكونات النواة ، ولذلك تكون النواة غير مستقرة وتتفكك لتتحول إلى نواة أخف وزناً وأكثر استقراراً . وينبعث نتيجة هذا التفكك جسيم ألفا (α) وهو مكون من بروتونين ونيوترونين وهو شبيه بنيوياً بنواة ذرة الهليوم H-4. تملك هذه الجسيمات طاقة حركية تبلغ حوالي 5MeV .

2. التفكك بيتا β-Decay :

في الذرات الأصغر التي يكون عددها الذري $Z \leq \sim 80$ وعدم الاستقرار النووي الذي يكون ناتجاً عن زيادة نسبة النيوترونات يتم الوصول إلى حالة استقرار أفضل بتحول نيوترون إلى بروتون وجسيم β^- . هذه الجسيمات مشابهة تماماً للإلكترونات . أما إذا كان عدم الاستقرار ناتجاً عن زيادة البروتونات مقارنة مع النيوترونات يتم تحقيق الاستقرار بتخلي بروتون عن شحنته الموجبة على شكل بوزيترون β^+ , وهو جسيم له نفس كتلة الإلكترون ، وتحوله إلى نيوترون .

ويمكن لهذه النوى أن تحقق الاستقرار بعملية تسمى الأسر الالكتروني ، حيث يمكن لأحد بروتونات النواة أن يأسر إلكترونا من أحد المدارات المحيطة بالنواة متحولاً إلى نيوترون .

3. **إصدار أشعة غاما γ-Ray emission :** في أغلب الأحيان تكون النوى الناتجة عن تفكك ألفا أو تفكك بيتا في حالة مثارة وهذا يعني أن طاقة مكونات النواة تكون أعلى من طاقتها في الحالة المستقرة .وتنتقل النواة من هذه الحالة عن طريق التخلص من هذه الطاقة الفائضة بإصدار إشعاعات كهرومغناطيسية تعرف باسم إشعاعات غاما. كما يمكن للنواة أن تتخلص من طاقته الفائضة بتجميعها وتركيزها على أحد الإلكترونات المدارية الذي ينطلق تاركاً مدار الذرة وحاملاً معه قيمة محددة من الطاقة وتعرف هذه العملية باسم التحول الداخلي Internal conversion .

– قانون التفكك الإشعاعي Radioactive decay law :

الفعالية المشعة والتي يرمز لها (A) تشير إلى عدد التحولات التي تحدث في وحدة الزمن. الواحدة الأساسية لقياس الفعالية المشعة هي البيكريل Bequerel (Bq) وهي تعبر عن كمية النظير المشع التي يحدث فيها تفكك واحد خلال ثانية واحدة .

سابقاً استخدمت واحدة الكوري (Curie : Ci) : وهي تعادل $1\ Ci = 3.7 \times 10^{10}\ Bq$ وهي تعادل تقريباً عدد التحولات النووية الحاصلة في ثانية واحدة في كمية قدرها غرام واحد من الراديوم .

بفرض أن عدد النوى في عينة من مادة مشعة هو (N) والتي لم تتفكك بعد في اللحظة الزمنية (t) . ما الذي سيحدث في اللحظة الزمنية القصيرة التالية ؟ بالتأكيد فإن عدداً من النوى سوف يتفكك , والسؤال هو ما عددها ؟ إن عدد النوى التي سوف تتفكك يتناسب مع العدد الكلي للنوى N ومع مقدار اللحظة الزمنية القصيرة التي سيتم فيها التفكك ، أي كلما كان عدد النوى في العينة كبيراً وكلما زاد الوقت كان عدد النوى المتفككة كبيراً .

لنفترض أن عدد النوى المتفككة هو (dN) والمدة الزمنية القصيرة هو (dt) ، فيكون عدد النوى المتفككة خلال الفترة الزمنية من t إلى t+dt متناسباً مع N و dt . أي :

$$- dN \propto N.dt$$

الإشارة السالبة تدل على أن العدد N في حالة تناقص .بتحويل التناسب إلى معادلة نحصل على :

$$-dN = \lambda N.dt$$

وتسمى λ بثابتة التفكك .

وتشير الإشارة السالبة إلى أن عدد النوى الباقية دون تفكك يقل كلما زاد الزمن . وبقسمة طرفي المعادلة السابقة على N وأخذ تكامل الطرفين مع اعتبار أن عدد النوى النشطة عند الزمن $t=0$ هو N_0 نجد أن :

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

حيث N(t) هو عدد النوى النشطة والمتبقية دون تفكك حتى اللحظة (t) , وتعرف هذه العلاقة بقانون التفكك الإشعاعي ، و λ هي ثابتة التفكك .

– الشدة الإشعاعية للعينة :

بشكل عام إن المطلوب دوماً هو معرفة عدد النوى التي تتفكك في الثانية وليس عدد النوى الباقية دون تفكك .

يعرف عدد النوى التي تتفكك في الثانية الواحدة في عينة من عنصر بالشدة الإشعاعية للعينة وهي :

$$A(t) = \frac{dN(t)}{dt} = \lambda N_0 \, e^{-\lambda t}$$

ويعرف المقدار $A_0 = \lambda N_0$ بالشدة الإشعاعية عند اللحظة $t = 0$.
لذا نجد أن :

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t}$$

– عمر النصف Half life :

عمر النصف لنظير مشع ما هو الفترة الزمنية التي تنخفض خلالها شدته الاشعاعية إلى النصف ، أو بتعبير آخر هو الزمن اللازم لتفكك نصف عدد نوى العينة ويرمز له $t_{1/2}$.

ـ تأثير الأشعة على الخلية الحية :

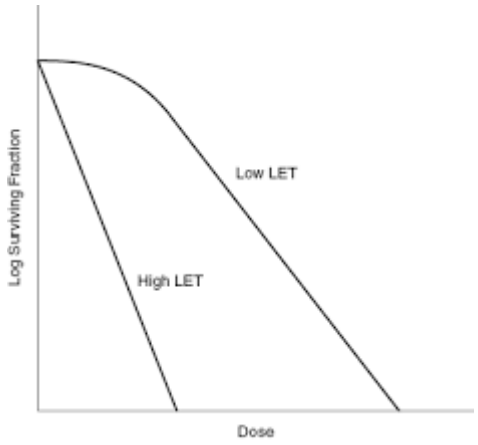
عندما تتعرض الخلايا للأشعة المؤينة ، تحدث أولاً الآثار الفيزيائية الأساسية بين الأشعة وذرات أو جزيئات الخلايا ، يعقبها الأثر الحيوي .
يمكن للأشعة المؤينة أن تغير عدداً كبيرا من الروابط الكيميائية ، بشكل مباشر عن طريق نقل طاقتها إلى الجزيء ، وهو الأثر السائد في الأشعة الجسيمية المشحونة (أو الأشعة ذات قيم LET مرتفعة)، أو بشكل غير مباشر عن طريق إحداث سلسة من التفاعلات ، أولها التسبب بتوليد جذور حرة (مثل جذور OH , H) التي لها قدرة عالية على التفاعل مع الجزيئات الحيوية المهمة في الخلية وتخريبها.كما هو الحال عند استخدام الأشعة الفوتونية (أشعة ذات قيم LET منخفضة) .
من المتفق عليه في الوقت الحاضر أن الأثر الإشعاعي المميت للخلية الحية هو الأذية الحادثة لجزيء الحمض النووي DNAفي نواة الخلية الذي يحمل المعلومات الوراثية الخاصة بالخلية.
إضافة للأذية التي يمكن أن تحدث للغشاء الخلوي.
تسبب الأشعة المؤينة بشكل عام حدوث فصم في الروابط الكيميائية في جزيء الحمض النووي ، عن طريق التأثير على الأسس الآزوتية الداخلة في تركيب الحمض النووي.هذا يسبب حدوث

قطع في سلسلة واحدة للحمض النووي أو في السلسلتين معاً مسببا ما يدعى القطع المضاعف (DS) للDNA ،
. (double stand breaks in DNA)
يملك جزيء الحمض النووي القدرة على إصلاح معظم الأذيات المختلفة الحادثة ، وهي ميزة مهمة للحفاظ على المعلومات الوراثية. فقد بينت الدراسات أن التعرض لجرعة إشعاعية قدرها (1 Gy) يسبب حدوث حوالي (4000-5000) أذية في الحمض النووي على مستوى الخلية الواحدة ، والتي يتم إصلاح معظمها دون أن تؤدي إلى موت الخلية.
تصنف الأذيات الإشعاعية التي تصيب الخلايا إلى ثلاثة أنواع :

- أذية مميتة : وهي الأذية غير العكوسة وغير القابلة للإصلاح والتي تسبب موت الخلية في النهاية.
- أذية تحت – مميتة : وهي تلك التي يمكن إصلاحها خلال ساعات إذا توفرت الطاقة والغذاء الكافيين ، ما لم تضف جرعة شعاعية إضافية تسبب أذية أخرى وتتحول إلى أذية مميتة.
- أذية مميتة كامنة: وهي تلك التي يتم التعامل معها بالإصلاح في حال بقيت الخلية في حالة عدم انقسام.

- منحنيات بقيا الخلايا الحية :

يمكن دراسة الأثر الإشعاعي على الخلايا تجريبياً عن طريق دراسة الدراسة الكمية لعدد الخلايا التي تبقى حية بعد التعرض لجرعات مختلفة من الأشعة المؤينة. الشكل -7.



الشكل –7 مخطط بياني يظهر نسبة بقيا الخلايا بعد التعرض للأشعة .

يبدأ الخط البياني بشكل مسطح في الجرعات الإشعاعية الصغيرة للأشعة ذات LET منخفضة ، أي أن نسبة الخلايا التي تبقى حية تبقى عالية بسبب قدرتها على إصلاح الأذى الحادث ، مع ازدياد الجرعة الإشعاعية ينحدر مسار المنحني مم يشير إلى نسبة الخلايا التي تبقى حية أصبحت قليلة بسبب عدم القدرة على الإصلاح. أما بالنسبة للأشعة ذات LET مرتفعة فإن الخط البياني يأخذ شكلاً مستقيماً منذ البداية نتيجة قدرة هذه الأشعة المرتفعة على إحداث الأثر البيولوجي حتى في الجرعات الصغيرة.

- **معدل الجرعة الإشعاعية وتجزئتها (Fractionation):** يفهم تحت مصطلح تجزئة الجرعة الإشعاعية ، تقسيم الجرعة الإشعاعية الكلية على جرعات صغيرة يفصل بينها فترات زمنية محددة (عادة 24 ساعة) للسماح للخلايا الطبيعية بترميم نفسها مما

يقلل من الآثار الجانبية للعلاج الإشعاعي ، وبالتالي فإن تجزئة الجرعة الشعاعية تسمح بإيصال جرعة شعاعية أكبر إلى الورم مع إحداث أذية شعاعية أقل على النسج السليمة . وأيضا يسمح بإعادة أكسجة الخلايا التي تكون فقيرة بالأكسجين مع بداية المعالجة مما يزيد من أثر المعالجة.

العوامل المؤثرة على الأثر الإشعاعي :ويمكن اختصار هذه العوامل بما يدعى ال five "Rs" :

1- Repair and recovery .
2- Reoxygenation .
3- Radiosensitivity
4- Repopulation .
5- Redistribution .

-

- **الاصلاح والترميم (Repair and recovery)** إن القدرة على الترميم والإصلاح تساعد الخلايا على تحمل كميات أكبر من الأشعة إذا أعطيت بجرعات صغيرة متكررة. ولقد لوحظ بأن قدرة الخلايا على الترميم والإصلاح تختلف بين الخلايا الطبيعية والخلايا الورمية ، فالأولى أكثر قدرة وكفاءة من الخلايا الورمية . وإن معظم الاصلاح للنسج السليمة يحدث خلال 6 ساعات من التعرض للأشعة،وإذا أعطيت جرعة شعاعية ثانية خلال هذه الفترة فهذا سيزيد خطر أذية النسج السليمة.
- **أثر الأكسجين (Reoxygenation):** وجود الأكسجين يزيد من أثر الأشعة على الخلايا ، حيث يثبت الأذية الإشعاعية ويمنع إصلاحها بسبب زيادة تشكل الجذور والإلكترونات الحرة وبالتالي فإن الخلايا المنخفضة الأكسجة تكون معندة على العلاج الشعاعي أكثر من الخلايا الجيدة الأكسجة.
- **نوع الإشعاع :**كلما زادت قيم LET الخاصة بالإشعاع كلما زاد مقدرته على إحداث الأثر الحيوي.
- **حساسية الخلية للإشعاع خلال أطوار الانقسام الخلوي (Radiosensitivity):**

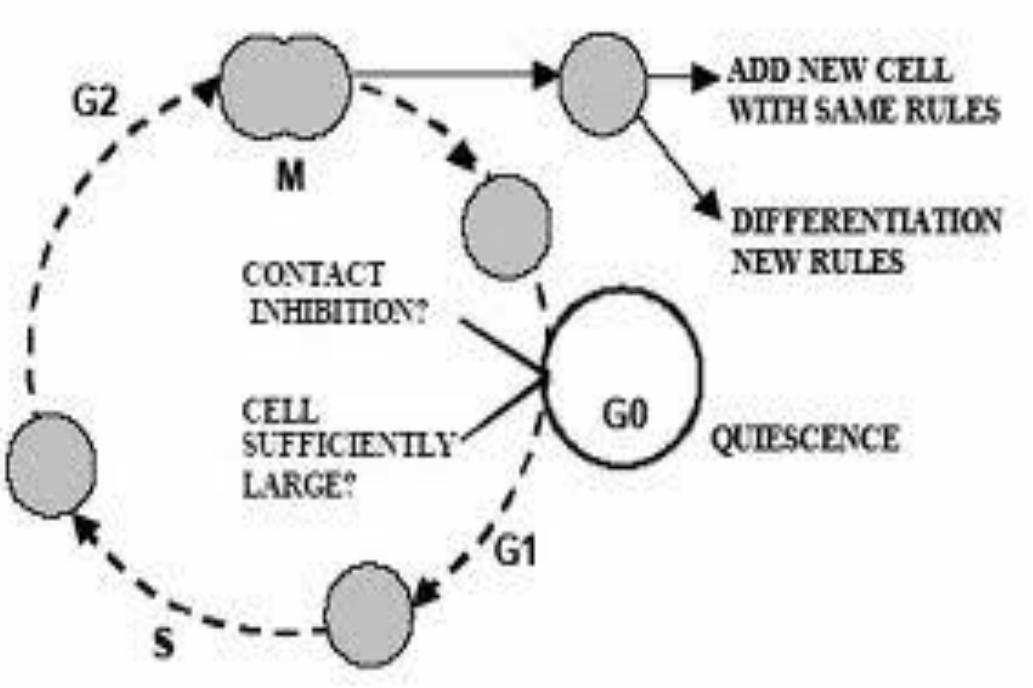
تتغير حساسة الخلية للأشعة تبعاً للطور الذي تكون فيه خلال عملية الانقسام الخيطي. من المعروف أن الخلية تمر بأطوار متعددة خلال مرحلة انقسامها وهي :

- الطور G1 : مرحلة نمو الخلية وتدوم من 1-8 ساعات
- الطور S : حيث يتم فيه تصنيع DNA ويدوم حوالي 6-8 ساعات
- الطور G2 : وفيه تكبر الخلية ويتم التأكد من كون عملية تضاعف DNA قد تمت بنجاح. (2-4 ساعات)
- الطور M : وفيه تتم عملية الانقسام . (أقل من ساعة) بعدها تدخل الخلية في الطور G_0 وهي مرحلة السكون التي قد تدوم أياماً أو أسابيع وحتى عدة سنوات.

تكون الخلية أكثر حساسية للأشعة في الطورينM و G2 وتنخفض هذه الحساسية إلى حدها الأدنى في الطور S وقد لوحظ أن الخلية في المرحلة الأولى من الطور G_1 تكون غير حساسة على عكس المراحل المتأخرة منه.

تسمح تجزئة الجرعة الإشعاعية للخلايا التي تكون في الأطوار غير الحساسة للأشعة ، أن تتابع طريقها لتصل إلى الأطوار الحساسة ، أي تحدث إعادة توزع الخلايا المنقسمة ليصبح معظمها في الأطوار الحساسة إشعاعياً وبالتالي زيادة الأثر الإشعاعي

مخطط يوضح أطوار الانقسام الخلوي



إعادة زيادة عدد الخلايا(Repopulation) :

يمكن لخلايا النسج السليمة أو الورمية أن تنقسم خلال المعالجة الإشعاعية المجزأة ، فالنسج السليمة يمكن أن تنشط بعض الخلايا الجذعية الساكنة وأن تقصر من زمن الانقسام ، هذه العمليات يمكن أن نشاهدها خاصة عند تشعيع الجلد أو مخاطية الفم وهي مهمة لتقليل الضرر على هذه النسج السليمة.

كذلك الأمر بالنسبة للنسج الورمية ، حيث يمكن للخلايا الورمية أن تسرع انقسامها بعد تعرضها للأشعة وهذا يتطلب منا في بعض الأحيان زيادة الجرعة الإشعاعية اليومية.

- **إعادة توزيع الخلايا (Redistribution) :**

هذا يحصل عندما تموت الخلايا التي تكون في أطوار الإنقسام الخلوي الأكثر حساسية للأشعة(G2/M)،فإن الخلايا الناجية الحساسة للمعالجة الشعاعية يعاد توزيعها لتقع في أطوار الانقسام الخلوي الحساسة للمعالجة الشعاعية، وبالتالي إعطاء المعالجة الشعاعية في هذه الحالة يكون أكثر فعالية في قتل هذه الخلايا.

تقنيات كشف الإشعاعات

وأجهزة القياس في الطب النووي

أولا: التفاعل المتبادل بين الإشعاع والمادة Interaction of radiation with matter

المقصود بالإشعاع هنا جميع أنواع الإشعاعات كالجسيمات المشحونة الثقيلة والجسيمات المشحونة الخفيفة وإشعاعات غاما.

1) التفاعل المتبادل بين الجسيمات المشحونة الثقيلة والمادة :

عند تعرض المادة لجسيمات مشحونة ثقيلة (جسيمات ألفا) تنتقل طاقة هذه الجسيمات إلى المادة عن طريق التصادم اللامرن مع الكترونات ذرات المادة التي تعبر من خلالها الجسيمات ينتج عن هذا التصادم إثارة لهذه الذرات نتيجة انتقال أحد الكترونات الذرة من مداره إلى مدار آخر ذي مستوى طاقة أعلى . أو يحدث تأين لهذه الذرة عندما ينفصل الإلكترون عن الذرة . وهكذا يحدث تأين أولي لذرات المادة ناتج عن الجسيمات الثقيلة ذاتها وهذا يشكل 30% من إجمالي التأين الناتج ، والنسبة الباقية والتي تعرف بالتأين الثانوي فينتج عن الكترونات التأين الأولي التي تنطلق بسرعة كبيرة تؤدي إلى تأين ذرات جديدة من المادة .

نتيجة هذا التفاعل تفقد الجسيمات المشحونة طاقتها بالتدريج مع تغلغلها داخل المادة وتقل بالتالي سرعتها إلى أن تصبح قريبة من سرعة الكترونات المدار K حيث تعطي كامل طاقتها .

تسمى الطاقة المعطاة في وحدة المسافة أثناء عبور الجسيمات خلال المادة بمصطلح نقل الطاقة الخطي (Linear Energy Transfer (LET ووحدة قياسه هي KeV/µm . وهي بالنسبة لجسيمات ألفا تكون قيمة LETكبيرة جداً .

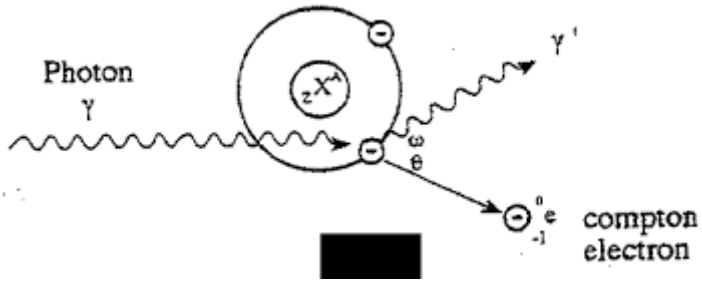
2) التفاعل المتبادل بين أشعة β^- والمادة :

يتم نقل الطاقة من الإلكترون إلى المادة عن طريق التصادم بأسلوب انتقال الطاقة نفسه من الجسيم الثقيل إلى المادة . وتبلغ نسبة التأين الأولي في حالة الإلكترون حوالي 20% والباقي ناتج عن التأين الثانوي . وعند زيادة طاقة الإلكترونات تفقد طاقتها على شكل إشعاع يعرف بأشعة الكبح Bremsstrahlung . وتفقد أشعة البوزيترون (β^+) طاقتها بنفس الأسلوب إلا أن هناك فرقاً جوهرياً بين البوزيترون والإلكترون عند نهاية الأثر . فبعد أن يفقد البوزيترون طاقته عند نهاية الأثر ، فإنه عند اصطدامه بالإلكترون يفنيان بعضهما مكونين بذلك شعاعي غاما ينطلقان باتجاهين متعاكسين وهذه الظاهرة تسمى بظاهرة التلاشي Annihilation .

3) التفاعل المتبادل بين إشعاعات غاما والمادة :

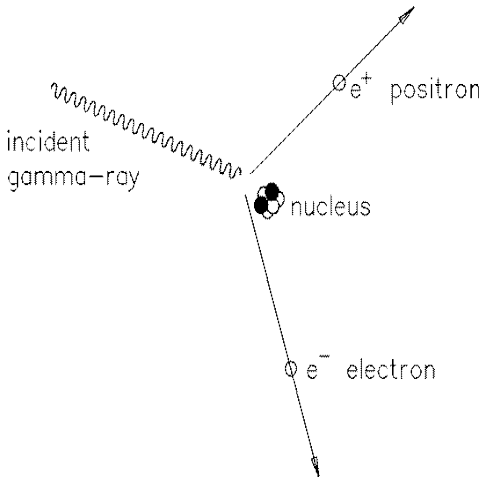
عندما ينفذ إشعاع غاما عبر المادة فإنه يفقد طاقته عن طريق إحدى الآليات الثلاث :

- الأثر الكهروضوئي Photoelectric Effect : يفقد خلاله إشعاع كامل طاقته ويعطيها لأحد الإلكترونات المرتبطة بذرة من ذرات المادة وبالتالي يفنى هذا الإشعاع .
- أثر كومبتون Compton Effect : هنا يفقد إشعاع غاما جزءاً من طاقته لأحد الالكترونات الحرة أو ضعيفة الارتباط بالذرة وبالتالي ينحرف هذا الإشعاع عن مساره . الشكل -1



الشكل -2 رسم تخطيطي يظهر أثر كومبتون

- إنتاج الأزواج Pair Production : هنا يفقد الإلكترون كامل طاقته منتجاً زوجاً الكترونيا- بوزيترونياً وبالتالي يفنى هذا الإشعاع . يحدث هذا الأثر في المجال الكهربائي لنواة الذرة إذا كانت طاقة الفوتون أعلى من 1.022 MeV . الشكل -3



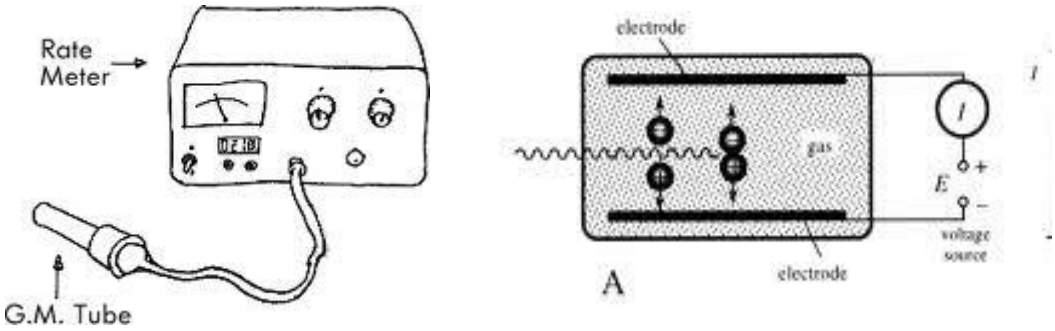
الشكل -2 رسم تخطيطي يظهر تشكل الأزواج

ثانياً : الكاشفات الإشعاعية Radiation Detectors :

جميع أجهزة القياس المستخدمة لقياس الإشعاعات فيها جزء أساسي هو الكاشف الإشعاعي، وله أنواع مختلفة، وهي تعتمد في عملها على التأثير المتبادل الذي يحدث بين الأشعة والمادة ، والتي يحولها إلى إشارات أو ظواهر قابلة للقياس.

1) الكاشف ذو حجرة التأين :

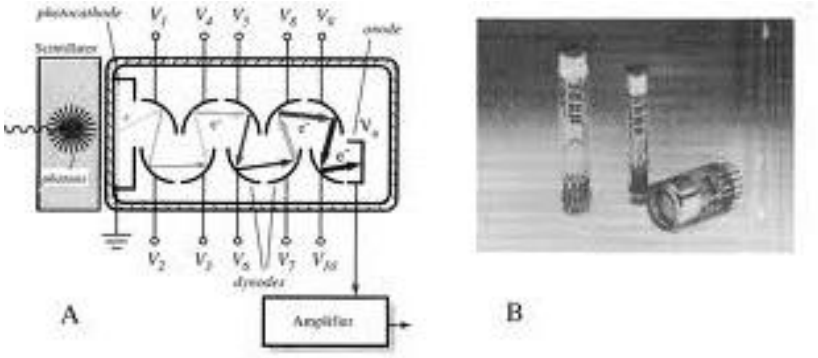
يتألف من حجرة مملوءة بالهواء ،الشكل-3 ، وبداخلها قطبان من المعدن يشكلان القطب الموجب والسالب ويطبق عليهما فرق كمون كهربائي . عند تعرض هذه الحجرة للإشعاعات يحدث تأين لجزيئات



الشكل-3 مبدأ عمل حجرة التأين

الهواء ، وتتحرك الأيونات السالبة إلى القطب الموجب و الأيونات الموجبة إلى القطب السالب مما يسبب مرور التيار الكهربائي.

2) الكاشف الومضاني : (الشكل-4):



الشكل-4 مبدأ عمل الكاشف الومضاني.

ويتألف من وماض وهو بلورة من مادة يود الصوديوم مفعلة بالتاليوم Na I (Tl) ، حيث تتولد فوتونات ضوئية عند التعرض للأشعة ، وهذه تسبب تحرر الكترونات يتم التعامل معها إلكترونياً لقياس الأشعة الساقطة على الكاشف. يستخدم هذا الكاشف بشكل رئيسي في أجهزة الطب النووي (الغاما كاميرا ، وأجهزة قياس جرعة المواد المشعة المستخدمة) . ويستخدم في العدادات التي تقيس كامل الجسم لكشف التلوث الداخلي وتحديد نوعه.

ثالثاً : أجهزة القياس والتسجيل في الطب النووي :

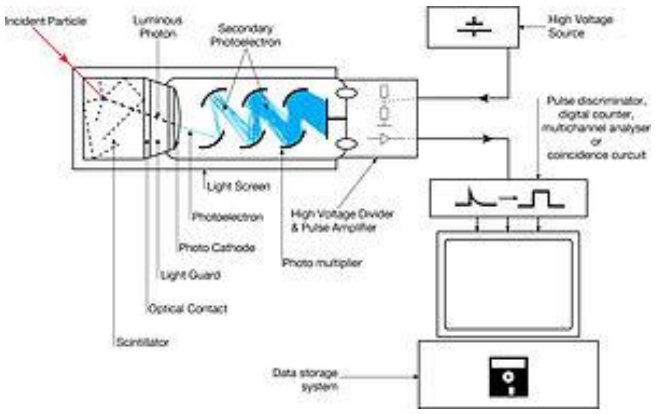
يتم تتبع النظير المشع المحقون في الجسم من خلال قياس وتسجيل الأشعة الصادرة عنه بوسائل تسجيل خاصة تسمى أجهزة التصوير الومضاني. كما أن العمل في أقسام الطب النووي يستوجب وجود مخابر خاصة للتعامل وتحضير وتخزين المواد المشعة والتي يجب أن تتوفر فيها أجهزة قياس ومعايرة المواد المشعة التي ستحقن للمريض .

1) العداد الومضاني Scintilation Counter :

العداد الومضاني جهاز يقيس أشعة غاما الصادرة من منبع شعاعي ما ويعطينا النتيجة على شكل عدد نبضات خلال وحدة الزمن . المكونات الرئيسية للعداد الومضاني (الشكل -5) هي :

- الكاشف الومضاني : شكله عادة اسطواني قطره بين 10-13 سم ، وسماكته بين 1-5 سم . يولد الإشارات الكهربائية (النبضات) التي تتناسب شدتها مع طاقة الأشعة الممتصة من قبل الكاشف .
- مضخم الكتروني : يقوم بتضخيم النبضات الناتجة ليتم التعامل معها في المكونات التالية .

- المحلل Analysator وهو الذي يسمح فقط بمرور الإشارات الكهربائية التي تتجاوز شدتها عتبة معينة. وتتم معايرته حسب طاقة الإصدار الإشعاعي للعنصر المشع المراد قياسه.
- محول Analog – Digital converter الذي يحول الإشارات الكهربائية الناتجة إلى أرقام للتعامل معها حاسوبياً.
- عداد أو كومبيوتر مرتبطين بساعة توقيت لضبط الزمن.

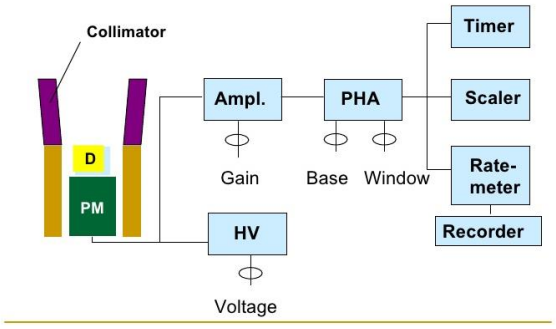


الشكل -5 يظهر رسماً تخطيطياً للعداد الومضاني

هناك أنواع متعددة للعدادات الومضانية مصممة حسب حاجة الاستخدام، أهمها عداد قياس الأعضاء ، وعداد قياس العينات.

2) عداد قياس الأعضاء :

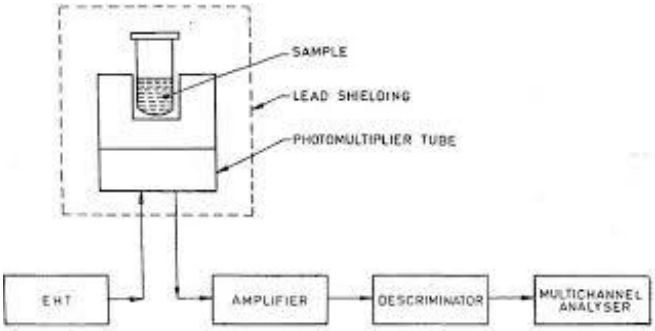
يستخدم بشكل عام لقياس نسبة تثبيت المادة المشعة فوق منطقة من الجسم كالغدة الدرقية ، وهو عداد ومضاني يضاف إليه محدد يقوم بتوجيه الأشعة من المنطقة المراد إجراء القياس فوقها وتمنع وصول الأشعة من الأماكن التي لا نرغب في قياسها. هذه المحددات هي أجسام من الرصاص لها شكل القمع . تجب ملاحظة أن القياس بهذه العدادات لا تعطي معلومات عن التوزع المكاني للمادة المشع في الجسم .شكل-6



الشكل-6 عداد قياس الأعضاء / مقياس نسبة قبط اليود في الغدة الدرقية .

3) عداد قياس العينات البئري Well Counter

وهو عداد ومضاني خاص مصمم لقياس الفعالية المشعة في عينات مأخوذة من المريض كالدم مثلاً. الكاشف فيه كاشف ومضاني شكله اسطواني فيه حفرة لوضع العينة فيه . توضع العينة بداخله للتمكن من قياس العينة من جميع الجهات كالدم مثلاً . الشكل -7



الشكل -7 مكونات عداد قياس العينات

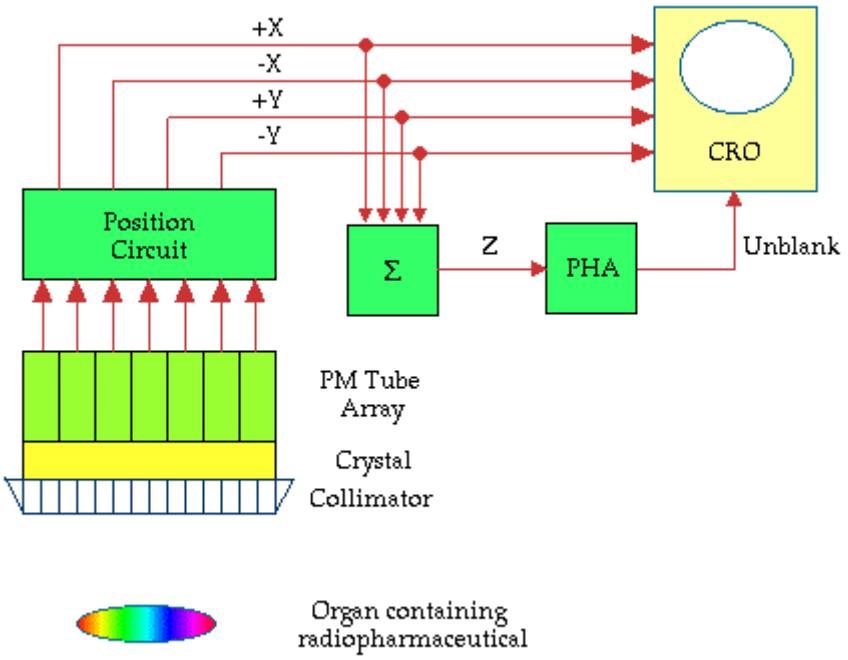
4) الكاميرا الغامية Gamma Camera :

هو الجهاز الأساسي المستخدم في إجراء معظم الدراسات الومضانية ، يسمح لنا بإجراء جميع الدراسات الومضانية الساكنة Static Studies والوظيفية Dynamic Studies المكونات الأساسية لهذا الجهاز هي التالية الشكل -8 :

1. المحدد :

هو عبارة عن جسم رصاصي فيه ثقوب متعددة يوضع أمام الكاشف ، وظيفته السماح فقط للأشعة العمودية أو شبه العمودية الصادرة من المريض بالوصول إلى الكاشف حتى نحصل

على صورة ومضانية ذات ميز جيد Resolution للمنطقة المدروسة تعكس التوزع المكاني للمادة المشعة المحقونة.



الشكل-8 رسم تخطيطي يظهر مكونات الغاما كاميرا

– الكاشف Photon Detector :

الكاشف مكون من بلورة واحدة كبيرة الحجم من ملح يود الصوديوم المنشطة بالتاليوم ، شكله دائري أو مستطيل يتراوح قطره بين 25 و50 سم وسماكته بين 6 و 12.5 ملم . مغلف بطبقة رقيقة من الألمنيوم لحمايته من الرطوبة.

– مجموعة المضخمات الإلكترونية

مرتبة على السطح الخلفي للكاشف و تغطي كامل سطح الكاشف, يتراوح عددها حسب مساحة الكاشف بين 30 و 100 مضخم ومثبته عليه بواسطة مادة لاصقة سيليكونية ويفصل بينهما طبقة زجاجية شفافة توجه الضوء نحو المضخمات. هذه المضخمات تحول الومضات الضوئية إشارة كهربائية قابلة للقياس . هذه المضخمات موصولة بشبكة من المقاومات لها دور رئيسي في تحديد موقع تولد الومضات الضوئية في الكاشف.

– دارات الكترونية وظيفتها التعامل مع الإشارات الكهربائية المتولدة لشكيل الصورة الومضانية .

- محطة التحكم : يتم فيها اختيار المعايير المطلوبة للحصول على الصورة الومضانية مثل :تحديد زمن جمع النبضات ، أو تحديد عدد النبضات المطلوبة ، اختيار نافذة الطاقة بما يتناسب مع طاقة العنصر المشع المستخدم . ومن الوظائف الأخرى اختيار اتجاه وضع الكاميرا وتخزين الصور وأرشفتها .

5) أجهزة التصوير الومضاني المقطعي Emission Tomography :

يمكن التمييز بين نوعين من التصوير الومضاني المقطعي حسب نوع الإشعاع الصادر من العنصر المشع المحقون في جسم المريض .

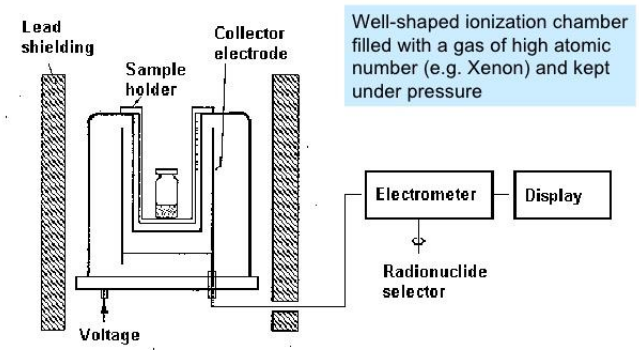
- التصوير المقطعي بوحيدات الفوتون Single Photon Emission CT : تستخدم فيها المواد المشعة التي تصدر أشعة وحيدة الفوتون (مثل التكنيسيوم-99م الذي يصدر أشعة غاما).
- التصوير المقطعي بمصدرات البوزيترون (Positron Emission Tomography PET) : وتستخدم فيها المواد المشعة المصدرة للبوزيترون الذي يتحد مع أحد الإلكترونات ويعطي شعاعي غاما باتجاهين متعاكسين بطاقة 511 KeV لكل منهما

6) أجهزة قياس خاصة بالمخبر الحار :

المخبر الحار هو المكان الذي يتم فيه تحضير وإعداد المواد المشعة الخاصة بإجراء الدراسات الومضانية المختلفة ، ويستلزم العمل بهذا المخبر وجود بعض التجهيزات الخاصة لقياس ومعايرة الفعالية المشعة لهذه المواد وأهمها مقياس جرعة الفعالية المشعة ، وأجهزة قياس جرعة التعرض الإشعاعي وكاشفات التلوث

– جهاز قياس جرعة الفعالية المشعة Dose Calibrator :

هو جهاز يستخدم لمعايرة كمية المادة المشعة التي ستعطى للمريض و يعطي نتائج القياس بالكوري وأجزائه أو البيكريل ومضاعفاته . والمكونات الأساسية لهذا الجهاز : حجرة تأين ، تغذية كهربائية ذات فولتاج عالي ، ومضخم الكتروني ولوحة مفاتيح لاختيار العنصر المشع المراد قياسه. حجرة التأين شكلها اسطواني بداخلها غاز الأرغون بضغط عالي ، تستخدم لقياس كامل التأين الذي تسببه العينة المراد قياسها. والتيار الناتج عن هذه الحجرة يتناسب مع شدة الفعالية المشعة الموجود في العينة . إن شدة التيار الناتج صغيرة جداً من رتبة الميكروأمبير، وتستخدم أداة خاصة لقياسه Electrometer والتي تعطي نتيجة القياس بواحدات الفعالية المشعة. الشكل-9



الشكل- 9 رسم تخطيطي يظهر مكونات جهاز قياس الفعالية المشعة Dose Calibrator

7) أجهزة قياس جرعة التعرض الإشعاعي وكشف التلوث :

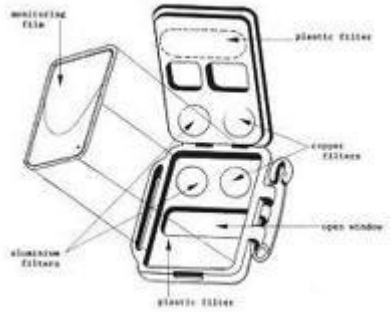
- **جهاز قياس الجرعة المكانية :**

تستخدم أجهزة تعتمد على الكاشف ذو حجرة التأين ، حيث تكون شدة التيار المارة فيه تتناسب مع معدل الجرعة ، وتدريجاته تعطينا قراءة عن معدل الجرعة الإشعاعية خلال وحدة الزمن. الشكل-10

الشكل-10 جهاز قياس الجرعة المكانية.

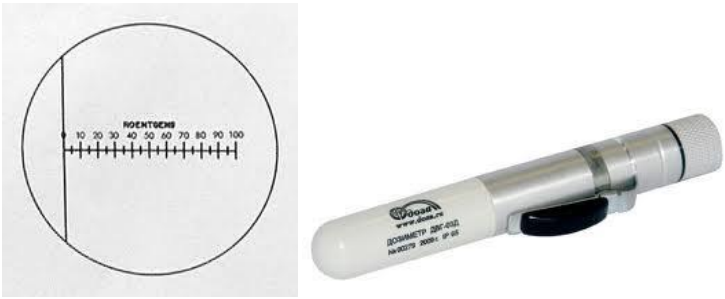
8) أجهزة قياس الجرعة الشخصية :

تستخدم عادة الأفلام الحساسة للضوء والتي توضع في حامل بلاستيكي يثبت على الصدر ودائماً بنفس الموقع أثناء العمل .الشكل110 .



الشكل-11 مقياس الجرعة الشخصي باستخدام الفلم.

كما تستخدم الكاشفات ذات حجرة التأين المصنوعة على شكل قلم يحمل في الجيب حيث يمكن قراءة مقدار التعرض مباشرة.الشكل-12 . وأخرى مزودة بإنذار صوتي يحملها الشخص أثناء العمل وإذا دخل لمنطقة ذات جرعة إشعاعية عالية أعطى إنذاراً صوتياً. الشكل -13



الشكل-12 مقياس الجرعة على شكل قلم ، الذي يمكن بواسطته قراءة التعرض مباشرة عن طريق نافذة في نهاية القلم.

الشكل-13 مقياس جرعة إشعاعية شخصي.

9) أجهزة كشف التلوث :

تستخدم أجهزة تعتمد على حجرة التأين أو الكاشفات الومضانية والتي تعطي القياس بشكل نبضات. وهي يمكن أن تكون أجهزة متنقلة تستخدم للكشف على السطوح الشكل -14 ، أو أجهزة مثبتة على مخارج مخابر تحضير المواد المشعة لفحص الأيدي والأقدام .

الشكل-7 كاشف إشعاعي لكشف التلوث.

المستحضرات الصيدلانية المشعة
Radiopharmaceuticals

1) النظائر المشعّة Radionuclide :

1. مصادر العناصر المشعة :

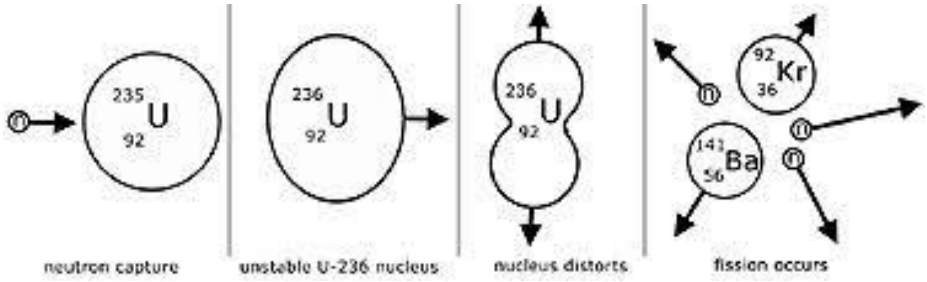
نحصل على النظائر المشعة المستخدمة لأهداف طبية عن طريق تحويل نوى عناصر مستقرة إلى عناصر مشعّة. ويتم هذا التحويل عن طريق تشعيع هذه العناصر المشعة بواسطة النيترونات في المفاعل الذري أو عن طريق قذفها بجسيمات مشحونة مسرّعة في المسرّع الحلقي(السايكلوترون). بعد تفعيل هذه النوى وتحويلها إلى نوى غير مستقرة (عناصر مشعّة)يتم فصلها بالطرق الكيميائية المختلفة كالتبخير أو التبادل الأيوني...

في الوقت الحالي هناك حوالي 1500 عنصر مشع يمكن إنتاجها وتوليدها من عناصر مستقرة والعناصر المستخدمة في الطب النووي هي في معظمها من هذا النوع.

إن إنتاج هذه النظائر بالطرق المذكورة يستدعي وجود تجهيزات باهظة التكاليف ولذلك لا تتوفر إلا في أماكن محدودة تقوم بعملية الإنتاج وتزويد المراكز الطبية بالنظائر المشعة اللازمة بشكل مستحضرات جاهزة للاستخدام.

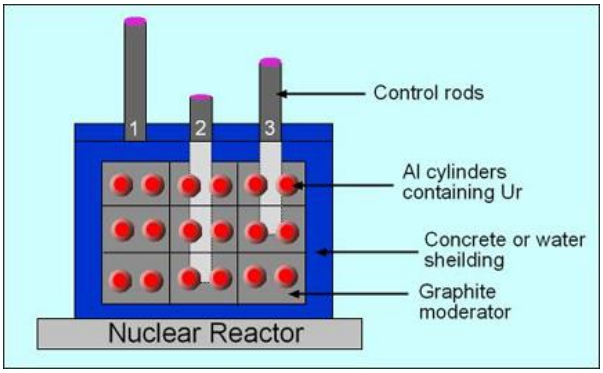
– العناصر المشعة المنتجة في المفاعل النووي (Reactor-produced Radionuclides):

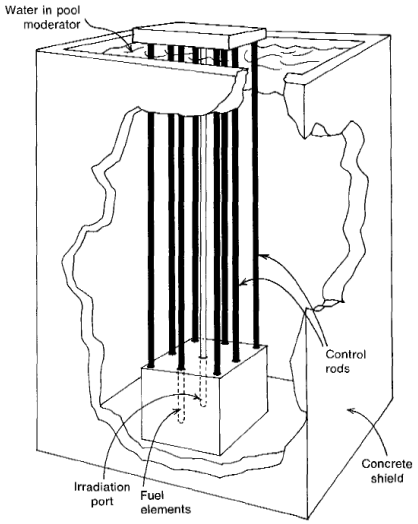
في المفاعل النووي يتم قذف عنصر اليورانيوم-235 (^{235}U) بواسطة سيل من النيوترونات مما ينتج عنه عنصر اليورانيوم-236 (^{236}U) هذا العنصر يكون بحالة عدم استقرار شديدة و تحدث لنواته سلسلة من عمليات الانشطار الذي تتولد عنه عناصر مشعة جديدة وتحرر كمية كبيرة من الطاقة بأشكال الإشعاعات المعروفة المختلفة. شكل-1



شكل -1 مخطط يمثل عملية الانشطار النووي لنواة عنصر اليورانيوم وتشكل عناصر مشعة جديدة

كما أن تحول عنصر ^{235}U إلى ^{236}U ينتج عنه تحرر العديد من النيوترونات ذات الطاقة العالية والسريعة وهذه بدورها تفعل المزيد من نوى اليورانيم لذلك لابد من ضبط هذا التفاعل وإبطائه و يتم ذلك بوساطة طرق عدة (بالتبريد بالماء العادي أو الماء الثقيل أو إدخال قضبان من الغرافيت في المفاعل) حيث تتحول إلى نيوترونات حرارية طاقتها شكل-2 .





شكل -2 رسم تخطيطي للمفاعل النووي

نحصل على العناصر المشعة في المفاعل النووي بطريقتين :

- تشعيع عناصر مستقرة بسيل الإلكترونات الموجود في المفاعل :

بهدف إنتاج عناصر مشعة توضع في أنابيب التشعيع عناصر مستقرة وتعرض إما للنيوترونات الحرارية أو السريعة.

إن تفعيل النوى بواسطة النيوترونات الحرارية يتم بالتفاعل (n,ɣ) حيث يزداد رقم الكتلة بمقدار (1) دون أن يتغير ترتيب العنصر في الجدول الدوري، ونحصل على نظير مشع للمادة المستقرة التي تم تفعيلها بالتشعيع بالنيوترنات.

ويمكن تمثيل هذا التفاعل بالمعادلة التالية :

$$^{A}X_{Z}\ (n, \gamma)\ ^{A+1}X_{Z}$$

أو تكتب بشكل آخر :

$$^{A}X_{Z} + n \rightarrow {}^{A+1}X_{Z} + \gamma$$

أما تفعيل النوى بواسطة النيترونات السريعة فينتج عنه التفاعل (n , p) حيث ينتج عنه عنصر جديد ناتج عن فقدان بروتون من النواة.

$$^{A}X_{Z}\ (n, p)\ ^{A}X_{Z-1}$$

أو :

$$^{A}X_{Z} + n \rightarrow {}^{A}X_{Z-1} + p$$

- الاستخلاص الكيميائي لنواتج الانشطار النووي لنوى عنصر (^{235}U) والذي ينتج عنه العديد من العناصر المشعة الجديدة التي يمكن استخلاصها واستخدامها في المجال الطبي.

من العناصر المشعة المنتجة في المفاعل والتي لها استخدامات عديدة في التشخيص والمعالجة بالنظائر المشعة هي :

- اليود- 131 (^{131}I)
- الموليبدينيوم- 99 (^{99}Mo)
- الكزينون- 133 (^{133}Xe)

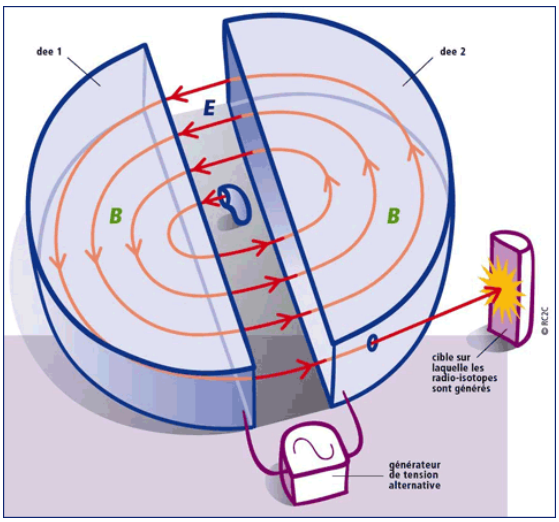
– العناصر المشعة المنتجة في المسرع الحلقي (السايكلوترون) Cyclotron produced radionuclides :

هناك العديد من العناصر المشعة المهمة المستخدمة في المجال الطبي بفعالية نوعية عالية عن طريقة تفعيل نوى نظائر مستقره بقذفها بجسيمات مشحونة مسرعة (دوتيرونات ، بروتونات ، جسيمات ألفا، ..) ويتم هذا في المسرع الحلقي (السايكلوترون).

يتألف المسرع الحلقي من قطبين بشكل حرف (D) متقابلين فيها مسارات دائرية عديدة. تسرع الجسيمات المشحونة أولا بعد توليدها بواسطة الحقل الكهربائي وتدخل بعدها في المسار الدائري ضمن القطبين حيث يتم فيها التسريع بتأثير حقل مغناطيسي كهربائي مطبق بشكل متعامد على الحقل الكهربائي الذي يشكله القطبين. الشكل -3

وتسرع الجسيمات في المسارات الدائرية حيث تزداد طاقتها الحركية بقيم تتراوح بين (40 kv حتى 150 kv).

يوضع في مسار التسريع العنصر المستقر الذي نريد تفعيله ' تحدث تفاعلات نووية نتيجة تخلي الجسيمات المشحونة المسرعة عن كامل طاقتها أو جزء منها، محولة نوى العنصر المستقر إلى عنصر مشع.



الشكل-3 طريقة إنتاج النظائر المشعة بالمسرع الحلقي

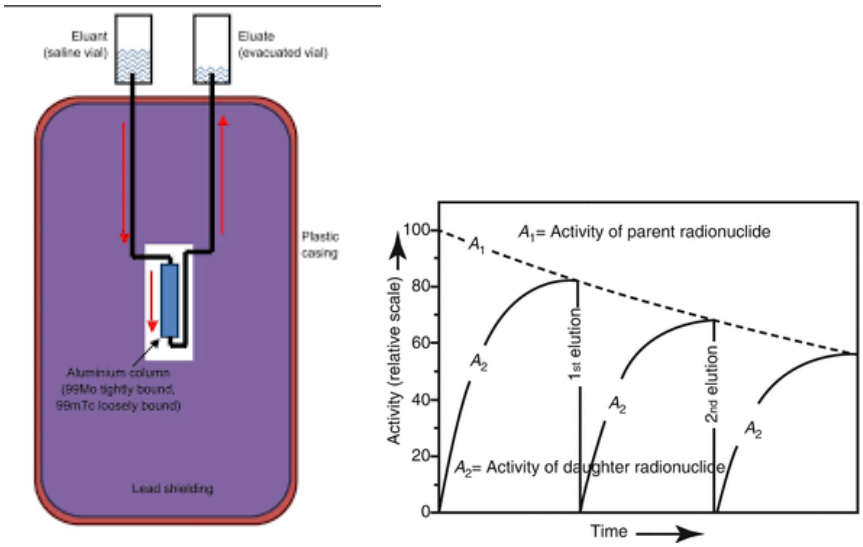
إن العناصر المنتجة بهذه الطريقة ذات أهمية بالغة في المجال الطبي لما تتمتع به من صفات مهمة ، حيث أنها معظمها ذات عمر نص قصير، مصدره لأشعة غاما دون وجود إصدار β مرافق. ويمكننا إنتاج العديد من العناصر المهمة بيولوجياً والمصدرة للبوزيترون. مثال : ^{11}C , ^{15}O , ^{13}N التي يمكن وسم العديد من المركبات العضوية مثل الحموض الأمينية والحموض الدسمة والكربوهيدرات التي تستخدم في العديد من الدراسات الاستقلابية.

ومن العناصر المشعة الأخرى المهمة نذكر (^{67}Ga (Gallium) , ^{123}I (Iodine) , ^{201}Tl (Thallium) .

– مولدات العناصر المشعة radionuclide Generators :

هناك نظائر مشعة تتفكك إلى عناصر مشعة كمرحلة انتقالية قبل وصولها إلى مرحلة النظير المستقر ، وهذه الظاهرة يمكن استغلالها بتصنيع مولدات لبعض النظائر المشعة المهمة . هذه

المولدات هي نظم تسمح بالحصول على نظائر مشعة ذات عمر قصير ناتجة عن التفكك التلقائي لعنصر مشع موضوع ضمن المولد.
هذا النظام يتكون من أنبوب زجاجي مملوء بمادة حاملة للعنصر المشع "الأم" وهو عادة ذو نصف عمر طويل نسبياً، وله ارتباط متين مع المادة الحاملة . والذي يتفكك ليعطي عنصراً مشعاً ثانياً. يكون في العادة ارتباط النظير المشع المتشكل ضعيفاً مع المادة الحاملة وبالتالي يمكن استخلاصه يومياً بإمرار سائل عبر الأنبوب الزجاجي الحاوي على العنصر المشع "الأم". ويجب الحفاظ على عقامة سائل الغسل بحيث يتم استخدامه مباشرة في تحضير المستحضرات المشعة للاستخدام السريري.
بعد عملية الاستخلاص تزداد كمية العنصر المشع تدريجياً حتى نصل إلى حالة توازن مع العنصر المشع "الأم"، بحيث نستطيع استخلاصها من جديد. وعندما تصل الفعالية المشعة للعنصر المشع "الأم" في المولد إلى خمس فعاليتها الأولية ، يستبدل المولد بمولد جديد. الشكل - 4
وأهم نظم المولدات المستخدمة هو عنصرالتكنيسيوم ^{99m}Tc الذي ينتج عن تفكك العنصر المشع "الأم" الموليبدينيوم ^{99}Mo .



شكل-4 شكل تخطيطي يظهر بنية مولد النظير المشع.

2) المستحضرات الصيدلانية المشعة Radiopharmaceuticals :

وهي عبارة عن مركبات عضوية أو لا عضوية موسومة بعناصر مشعة والتي تستخدم لأغراض تشخيصية وعلاجية، وهي موضع بحث ودراسة مستمرين للحصول على مستحضرات ذات مواصفات بيولوجية وإشعاعية مثالية.
بشكل عام نميز بين فئتين من المستحضرات المشعة المستخدمة في الطب النووي، وهي:

- **المستحضرات المشعة التشخيصية :**

وهي مستحضرات تستخدم لإجراء الدراسات الومضانية التشخيصية المختلفة ، ويجب أن تتمتع بالمواصفات الفيزيائية والكيميائية التالية :

- نصف عمر قصير نسبياً ومناسب يسمح بتحضيره وتداوله ، وكاف لتغطية العملية الحيوية المدروسة.
- له إصدار شعاعي من نوع (غاما) وطاقته قادرة على النفوذ عبر أنسجة الجسم ليمكن كشفها من خارج الجسم، ويمكن تسجيله بأجهزة التسجيل الومضاني.
- قدرتها على الارتباط مع المركبات المختلفة وخاصة العضوية والحيوية و التي يمكن أن تشكل حامل للنظائر المشعة تسمح لها بالتراكم في الأعضاء المرغوب دراستها.

- **المستحضرات المشعة العلاجية :**

وهي على خلاف المجموعة السابقة من ناحية المواصفات الفيزيائية ، حيث يشترط وجود إشعاع β كإصدار إشعاعي ويفضل أن يكون ذو طاقة عالية ، كما يفضل أن يكون نص العمر طويل نسبيا حتى نضمن زمن تشعيع طويل نسبيا للهدف الذي نريد علاجه .

3) طرق الوسم Methods of labeling :

تنتج المستحضرات الصيدلانية المشعة التي تستخدم في التشخيص أو المعالجة عن طريق ربط العنصر المشع كيميائيا مع المركبات العضوية أو الحيوية بطرق مختلفة نوجزها بما يلي :

- **تفاعلات تبادل النظير Isotope exchange reactions :**

وهو استبدال عنصر أو أكثر من بنية المركب الكيميائي بعنصر مشع ، وبطبيعة الحال هذا الاستبدال لا يغير من السلوك الكيميائي أو الحيوي للمركب ، لأن سلوك النظير المشع لا يختلف عن سلوك نظيره المستقر الموجود في البنية الأساسية للمركب.

- **الوسم الغريب Foreign labeling :**

وهي عملية وسم جزيء له وظيفة حيوية معروفة بواسطة نظير مشع غريب عن بنية الجزيء .

- **-التصنيع الحيوي Biosynthesis :**

وفيه تتم عملية ربط العنصر المشع أثناء عملية تصنيعه. مثال على ذلك : عملية تصنيع الفيتامين B12 الموسوم بالكوبالت-57 حيث يضاف الكوبالت-57 الى مزارع تقوم بتصنيع هذا الفيتامين ونحصل على فيتامينB12 المشع.

4) أهم المستحضرات الإشعاعية وتطبيقاتها السريرية

تستخدم في الوقت الحالي العديد من العقاقير المشعة التي تتيح لنا إجراء الدراسة الومضانية كجزء من العملية التشخيصية لكثير من الأمراض الورمية وغير الورمية. يمكن تصنيفها على نوعين حسب نوع الإصدار الإشعاعي الذي يعطيه النظير المشع إلى وحيدة الفوتون ومصدرات البوزيترون .

1. المستحضرات المشعة وحيدة الفوتون :

- **عقاقير مشعة موسومة بالتكنيسيوم-99م : ^{99m}Tc –Labeled Radiopharmaceuticals**

العنصر المشع تكنيسيوم -99م (Tc-99m) من أكثر العناصر المشعة المستخدمة في التشخيص لما يملكه من خواص فيزيائية مناسبة (عمر النصف : 6 ساعات ، يصدر أشعة غاما بطاقة 140 keV وقدرته على الارتباط مع العديد من المركبات ، وسهولة تأمينه وسعره الرخيص. أهم هذه المستحضرات المشعة يظهر في الجدول -1-

الجدول-1 أهم المستحضرات المشعة الموسومة بالعنصر المشع ^{99m}Tc

^{99m}Tc – Labeled Radiopharmaceuticals	
Agent	Applications
Tc-99m sodium pertechnetate	Thyroid gland scintigraphy
Tc-99m sulfur colloid	Lymphoscintigraphy , liver , spleen
Tc-99m diphosphonate	Bone scintigraphy
Tc-99m macroaggregated albumin	Lung perfusion scintigraphy
Tc-99m dimercaptoacetyltriglycine	Renal dynamic scintigraphy
Tc-99m sestamibi	Myocardial scintigraphy, breast

- **المستحضرات الصيدلانية الموسومة بنظائر اليود المشعة :(I-123 , I-131)**

Radioiodine isotopes labeled radiopharmaceuticals

اليود المشع -131 : هو العنصر المشع الأول الذي استخدم في الطب النووي السريري ، يستخدم بشكل رئيسي لدراسة الغدة الدرقية ، يصدر نوعين من الإشعاعات: أشعة غاما تسمح لنا بإجراء الفحوص التشخيصية و أشعة بيتا تفيد في الاستخدامات العلاجية .

اليود -123 : يتميز عن الأول بأنه يصدر أشعة غاما فقط ويستخدم فقط لوسم بعض العقاقير المشعة المستخدمة في التشخيص.

- نظائر مشعة أخرى وحيدة الفوتون :

هناك عدد من النظائر المشعة مثل Gallium-67 و Thallium-201 و Indium-111 التي لها بعض الاستخدامات في دراسة الأورام.

2. العقاقير المشعة المصدرة للبوزيترون

هناك العديد من النظائر المشعة من هذه الفئة مثل الكربون-11 والآزوت-13 والأكسجين-15 التي يمكن أن تستخدم لوسم العديد من المركبات الكيميائية ذات السلوك الحيوي. لكن قصر عمر النصف الفيزيائي لهذه النظائر وضرورة تحضيرها في مكان استخدامها يعيقان من استخدامها الواسع.

والنظير المشع المهم الذي يستخدم بشكل واسع هو الفلور-18 (عمر النصف : 110 دقيقة) الذي يستخدم لوسم مركب نظير للغلوكوز وهو فلورودي أوكسي غلوكوز(FDG).

الصيدلة الإشعاعية Radio pharmacy

أصبحت الصيدلة الإشعاعية من الاختصاصات المهمة في علم الصيدلة في أمريكا والدول الأوربية والتي تعنى بالتعامل مع المستحضرات الصيدلانية الإشعاعية

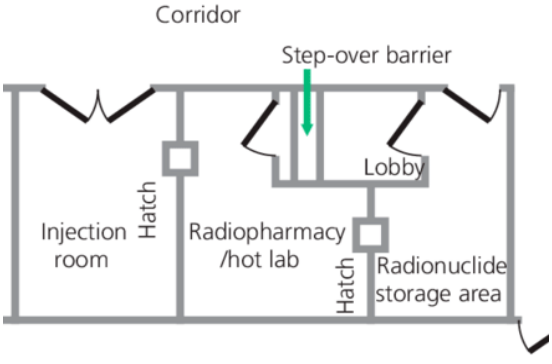
Radiopharmaceuticals من حيث الإنتاج والتحضير بسبب الانتشار الواسع لاستخدام النظائر المشعة المفتوحة في المجال الطبي لأغراض تشخيصية وعلاجية ولتطبيقاتها العديدة في الدراسات الوظيفية .

وظيفة الصيدلاني الممارس لهذا العمل الإشراف الكامل على كل الأعمال المتعلقة بتحضير المستحضرات المشعة اللازمة حسب الاحتياج المطلوب وفي الوقت المناسب .

سنستعرض في هذا البحث القواعد العامة والشروط المهمة لممارسة هذا العمل بما يخص أمكنة العمل الخاصة والشروط التي يجب توافرها فيها والخطوات العامة لتحضير المستحضرات المشعة ومراقبة الجودة لضمان تحقيق هذه المستحضرات للشروط المطلوبة لتحقيق الغرض الذي حضرت من أجله.

1. المواصفات المكانية للصيدلية الإشعاعية Radio-pharmacy Design :

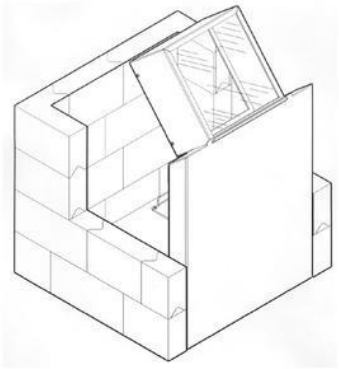
الصيدلية الإشعاعية هي المكان الذي يتم فيه جميع العمليات الضرورية للحصول على العنصر المشع وقياس فعاليته وعمليات التحضير اللازمة من وسم للمركبات المختلفة ومعايرة الجرعات الخاصة بكل مريض إضافة لتخزين هذه المستحضرات بالشكل المناسب .
عند تصميم الحيز اللازم لتأسيس صيدلية إشعاعية نراعي نوعين من الشروط الأولى : شروط تفرضها الجهات المسؤولة عن تنظيم ومراقبة العمل بمصادر الإشعاعات المؤينة ، وفي سوريا يقوم بذلك هيئة الطاقة الذرية , والتي تضع الشروط الواجب توافرها في أمكنة تحضير المستحضرات المشعة من حيث المساحة وشرط التهوية والتجهيزات اللازمة واستصدار التراخيص اللازمة للسماح بالعمل ، والثانية شروط تراعي الاحتياج الخاص بالمركز الذي سيتم العمل فيه .
بشكل عام يجب عند تصميم المكان يجب أن يكون الحد الأدنى للمكان هو توفر غرفتان يتم الدخول إليهما عبر بهو منفصل ، شكل- 1 ، الغرفة الأولى تستخدم كمخبر " حار " حيث يتم فيه تحضير المستحضرات المشعة بجميع مراحله من إعداد العنصر وعمليات الوسم الخاصة بالمركبات المختلفة واختبارات الجودة اللازمة والغرفة الثانية تستخدم كمستودع للمواد المشعة والنفايات المشعة الناتجة عن العمل في المخبر الحار.



الشكل -1 مخطط تمثيلي لصيدلية إشعاعية

ويجب أن تتوفر في الصيدلية الإشعاعية أدوات ووسائل التعامل وتخزين المواد المشعة بما يكفل تأمين الوقاية الإشعاعية. وأهمها :

- طاولة عمل خاصة بالعمل والتعامل مع المواد المشعة متصلة مع طاولة تحتوي على أدراج تتميز بسهولة الاستخدام وتؤمن الوقاية الإشعاعية (مدرعة بطبقة من الرصاص)
- منصة عمل لتحضير المواد المشعة مزودة بساحبة هواء وهي مكونة من جدار رصاصي بسماكة حوالي 5 سم ، مزودة بنافذة من الزجاج الرصاص . شكل -2



شكل -2 نموذج لمنصة عمل خاصة بتحضير المستحضرات المشعة.

- جهاز قياس الفعالية المشعة Dose Calibrator
- أدوات مختلفة مثل الملاقط وواقيات رصاصية للمحاقن وحاويات رصاصية لنقل المحاقن إلى غرفة الحقن.
- خزن و حاويات رصاصية لتخزين المواد المشعة والنفايات المشعة.
- جهاز لكشف التلوث الإشعاعي لفحص الأيدي ومساحات العمل لضمان عدم وجود أي تلوث بالمستحضرات المشعة التي يتم التعامل معها.

2. تحضير المستحضرات المشعة Production of Radiophamaceuticals:

كما ذكرنا في فصل سابق بأن الخصائص الفيزيائية للعنصر المشع ^{99m}Tc وإمكانية الحصول عليه بواسطة مولدات خاصة جعلته الخيار المفضل للاستخدام في التشخيص ، وليس مستغرباً بأن معظم المستحضرات المشعة المستخدمة في التشخيص هي مركبات موسومة بهذا العنصر. هذه المستحضرات يتم تحضيرها في مكان الاستخدام على عكس المستحضرات المشعة الموسومة بعناصر أخرى والتي يتم توريدها جاهزة للاستخدام ، ولذلك سنركز في هذا البحث بشكل خاص على طريقة تحضير المستحضرات الموسومة بعنصر ^{99m}Tc .

- **مستلزمات التحضير :**

1) مولد $^{99}Mo/^{99m}Tc$:

وهو مصدر العنصر المشع ^{99m}Tc ، العنصر المشع " الأم " الموجود ضمن المولد هو الموليبدينيوم-99 (^{99}Mo) بالشكل الكيميائي $^{99}Mo\ O_4^{2-}$ جزيئاته مثبتة ضمن أنبوب المولد على جزيئات أوكسيد الألمنيوم . تتفكك نوى هذا العنصر لتعطي الـ ^{99m}Tc على شكل تكنيسيوم بيرتكنيتات $^{99m}Tc\ O_4^-$ وهذا المركب ذو ارتباط ضعيف جداً مع جزيئات أوكسيد الألمنيوم . ويمكن استخلاصه من أنبوب المولد بإمرار محلول فيزيولوجي NaCl بتركيز 9% ونحصل على برتكنيتات الصوديوم $^{99m}Tc\ O_4\ Na$ والتي تستخدم لوسم المركبات المختلفة. إن الـ ^{99m}Tc المستخلص من المولد يكون بحالة الأكسدة (7+) الأكثر استقراراً لجزيئات البرتيكنيتات $^{99m}Tc\ O_4^-$ وهو غير نشط كيميائياً ، ولذلك لا بد من إرجاع الـ ^{99m}Tc (7+) إلى حالة الأكسدة 5+ , 2+ , 1+ بواسطة عوامل مرجعة (مثل أملاح الزنك) حتى يتمكن من تشكيل معقدات كيميائية مع المركبات العضوية التي نرغب بوسمها . مثل الأمينات ، الأميدات ، الفوسفينات .. وهي مركبات يمكنها أن تمنح أزواج الكترونية لذرة التكنيسيوم وترتبط معها. وحالة الأكسدة المطلوبة تتعلق بعدة عوامل : نوع المركب الذي نريد وسمه ونوع العامل المرجع ، درجة pH التفاعل ، ودرجة الحرارة اللازمة لحدوث التفاعل.

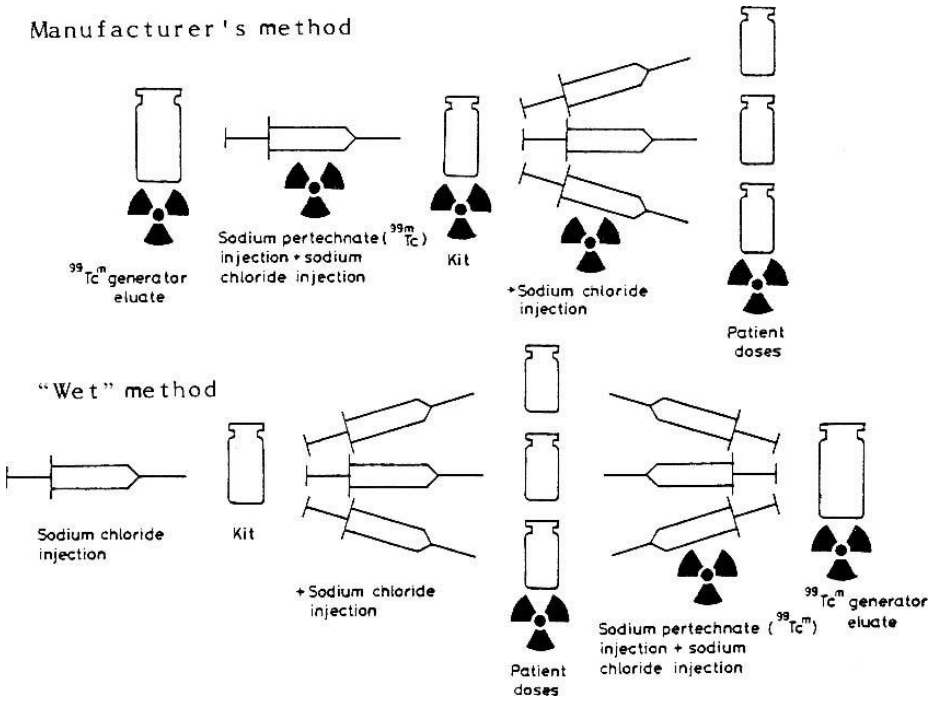
2) الـ Kits :

تحضر المستحضرات الموسومة بالـ ^{99m}Tc عن طريق ربط هذا العنصر بالعديد من المركبات التي تورد في زجاجات Vials مغلقة ومعقمة تسمى (Kits). وهو يعرف بأنه مجموعة من المكونات المعدة لتحضير نوع خاص من المستحضرات المشعة موضوعة ضمن الزجاجة بشكل جاف وبوسط من النتروجين. وهذه المكونات هي :

- المركب الذي نرغب بوسمه بالعنصر المشع ويسمى الربيطة Ligand : مثال مركب الميتيلين ثنائي الفوسفات المستخدم للتصوير الومضاني للعظام.
- أيونات القصدير (Sn^{+2}) Stannous Ions بأشكال كيميائية مختلفة (كلوريد أو فلوريد القصدير) ودوره كعامل مرجع Reducing Agent .
- مواد أخرى تساعد على استقرار التفاعل ، مضادات أكسدة ، مضادات جرثومية ..

ويتم تحضير المستحضر المشع بإضافة الـ $^{99m}Tc\ O_4^-$ مباشرة إلى الـ kit وبعد الانتظار فترة زمنية قصيرة وقد نحتاج لتسخين الـ kit ويصبح بعدها المستحضر جاهزاً للاستخدام.

ولتحضير الجرعات الخاصة بكل مريض يتم ذلك بطريقتين : إما إضافة كمية كبيرة من العنصر المشع وبعدها توزع جرعات المستحضر المشع النهائي إلى جرعات أصغر لكل مريض وهذه تسمى طريقة المصنع Manufacturer's Methods ، أو يمكن أن يمدد الـ kit أولا ويقسم لعدة جرعات ثم يضاف العنصر المشع لكل جزء وهذه تسمى الطريق الرطبة Wet Methods . الشكل -3 ، والطريقة الثانية لها ميزة أن الذي يقوم بعملية التحضير يتعرض لجرعة إشعاعية أقل أثناء القيام بهذا العمل لأنه يقوم بتحضير كمية قليلة من الفعالية المشعة (جرعة مريض واحد) وعند الحاجة.



الشكل -3 يظهر مقارنة بين طريقتي تحضير المستحضر المشع في المخبر الحار

الجدير ذكره انه لابد من استخدام المستحضر المشع في اليوم نفسه الذي يتم تحضيره فيه للأسباب التالية :

- لضمان أن المستحضر مازال عقيماً ومناسبا للحقن الوريدي
- الفعالية المشعة للمستحضر تضعف مع مرور الوقت (نصف عمر الـ ^{99m}Tc 6 ساعات)
- الاستقرار الكيميائي للمستحضر المشع يدوم من 4-8 ساعات فقط

3. التوثيق و التسجيل :

إن توثيق مراحل العمل في المخبر الحار خطوة مهمة لضمان سلامة التحضير وتوحيد إجراءات العمل ومراحله ويشمل نوعان من التوثيق : الأول ويشمل تعليمات مكتوبة مفصلة عن طرق التحضير لكل مستحضر مشع . والثاني وضع سجلات توثق العمل اليومي تتضمن كمية العنصر المشع المستخلصة من المولد (الفعالية المشعة والحجم) وتوقيت الاستخلاص . كما تسجل الـ kits التي استخدمت ومقدار الفعالية المشعة التي استخدمت لتحضير كل مستحضر. كما يوضع سجل يتضمن أسماء المرضى ونوع المستحضر الذي أعد له وفعاليته المشعة وتاريخ وساعة الحقن.

إضافة لذلك لا بد من توثيق عمليات مراقبة الجودة الدورية التي تخص وسائل القياس في المخبر وعمليات مراقبة الجودة التي تخص المستحضرات المشعة والتي ستذكر لاحقا.

يجب أن يسجل على الزجاجات التي يوضع فيها المستحضر المشع الذي تم تحضيره المعلومات التالية :

- الحجم
- اسم المستحضر وطريقة الحقن
- الفعالية المشعة
- توقيت وتاريخ التحضير

4. إجراءات ضمان الجودة Quality Assurance of Radiopharmaceuticals :

إجراءات ضمان الجودة تعني سلسلة من الإجراءات المصممة للتأكد من صلاحية المستحضر المشع للاستخدام. وتشمل مراقبة جميع خطوات التحضير. وتشمل هذه الإجراءات مراقبة ما يلي :

1) مراقبة مقياس الفعالية المشعة Dose Calibrator QC :

تقاس الفعالية المشعة للمستحضر المشع بواسطة جهاز الفعالية المشعة Dose Calibrator الذي ذكر في بحث سابق ' ولا بد من مراقبة أداء هذا الجهاز بشكل دوري من حيث دقة وصحة قياسه. ويتم اختبار صحة القياس باستخدام منابع مشعة ذات عمر نصف طويل , حيث يتم قياس المنبع المشع بواسطة مقياس الفعالية المشعة يومياً ويجب أن تكون نتائج القياس اليومية متقاربة وفي حال ظهور فروق كبيرة في نتائج القياس فهذا يشير إلى وجود خلل في صحة القياس ويجب أن يرسل الجهاز للصيانة والمعايرة في مختبرات خاصة.

2) نقاء العنصر المشع Radionuclide Purity :

نقاء العنصر المشع نعني به " **النسبة المئوية من كامل الفعالية المشعة المقاسة للعينة التي تعود إلى هذا العنصر المشع** " . وتعود مصادر عدم نقاء العنصر المشع إلى عملية إنتاج العنصر المشع ذاتها . فالعنصر المنتج في المفاعل النووي قد يرافقه نواتج إنتاج نظائر أخرى من نفس العنصر أو يتم التلوث من عنصر أخرى من نواتج الانشطار النووي. والعنصر المستخلص من المولد قد يتلوث بخروج جزء من العنصر المشع الأم أثناء عملية الاستخلاص . ولذلك من الضروري جداً اختبار نقاء العنصر المشع وذلك لأن التلوث بعناصر مشعة أخرى قد يتسبب بتعرض إشعاعي زائد للمريض .

وفي حالة الـ ^{99m}Tc يمكن أن يكون مصدر عدم النقاء وجود كمية ولو قليلة من عنصر الـ ^{99}Mo في السائل المستخلص من المولد . ويتم الكشف عن وجود عنصر الـ ^{99}Mo باختبار بسيط وسريع قبل استخدام السائل المستخلص من المولد في عمليات تحضير المستحضر المشع . مبدأ هذا الاختبار أن الإشعاع الصادر من عنصر الـ ^{99m}Tc يمكن تضعيفه حتى العامل 10^{-6} بواسطة سماكة من الرصاص قدرها 6 mm . لذلك عندما نضع الزجاجة الحاوية على عينة من المستخلص في حاوية رصاصية سمك جدارها 6mm ونقيس فعاليتها بواسطة مقياس الفعالية

الإشعاعية ، يفترض أن تكون نتيجة القياس صفر لأن الأشعة الصادرة عن الـ ^{99m}Tc تحجب بالكامل من قبل الحاوية الرصاصية ، وفي حال وجود تلوث بعنصر ^{99}Mo والذي يصدر أشعة غاما بطاقة قدرها 1.03 MeV فإن هذه الأشعة قادرة على اختراق جدار الحاوية الرصاصية ويمكن أن تكشف بواسطة مقياس الفعالية المشعة . يجرى هذا الاختبار عند استلام مولد جديد .

3) النقاء الكيميائي للمستحضر المشع Radiochemical Purity

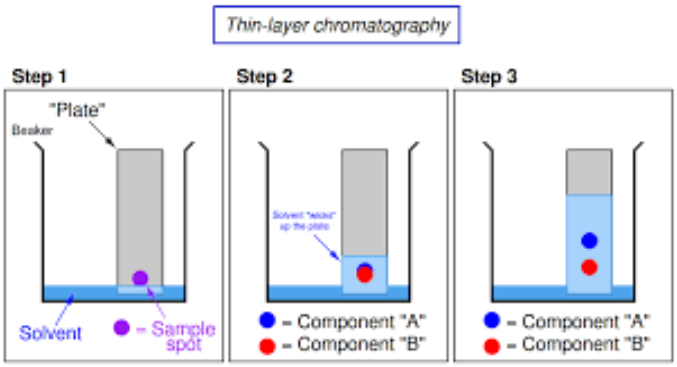
يعرف النقاء الكيميائي للمستحضر المشع " **بالنسبة المئوية للفعالية المشعة العائدة للعنصر المشع المرتبط مع المادة الحاملة من كامل الفعالية المشعة المقاسة للعينة** " حيث أن نسبة صغيرة من العنصر المشع قد تكون حرة غير مشاركة في عملية الوسم. ولتقييم حالة النقاء الكيميائي لابد من فصل مكونات المستحضر المشع بواسطة الكروماتوغرافي البسيط Planar Chromatography أو الرحلان الكهربائي Electrophoresis.

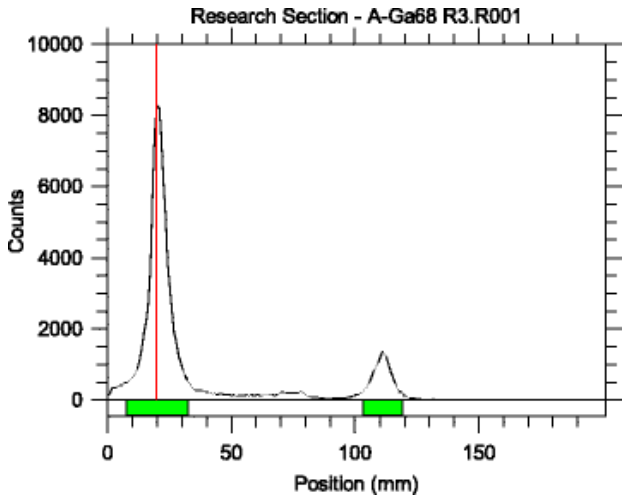
يعود مصدر عدم النقاء الكيميائي إلى عدم حدوث عملية الوسم بشكل جيد . يمكن أن يحدث عدم النقاء الكيميائي أثناء التفاعل كما يلي :

- وجود جزيئات $^{99m}TcO_4^-$ حرة بسبب فشل عملية إرجاعها بواسطة العامل المرجع أو بسبب إعادة أكسدته إذا أدخل الهواء إلى زجاجة الـ kit عند التحضير.
- شوارد الزنك Sn^{+2} نفسها قد ترجع جزيئات البرتيكنيات وتتفاعل معها مشكلة أكسيد ثنائي $^{99m}TcO_2$.

من الضروري مراقبة حالة النقاء الكيميائي لأن تشكل المركبات الجانبية المذكورة قد يسبب تغير نموذج التوزع الحيوي للمستحضر المشع في الجسم. والطريقة الأكثر استخداماً هي Thin Layer Chromatography . بعد فصل مكونات المستحضر المشع بهذه الطريقة تدرس الصفيحة بعدة طرق ابسطها تقطيعها حسب التوضعات النهائية للمكونات وقياسها بواسطة العداد الومضاني أو قراءتها بواسطة ماسح خاص Scanner . الشكل -4.

يجرى هذا الاختبار عند الشك بجودة عملية الوسم بسبب الحصول على صور ومضانية بنوعية سيئة للتأكد من جودة عملية التحضير.





الشكل -4 مراحل دراسة النقاء الكيميائي للمستحضر المشع بواسطة TLC . توضع نقطة من المستحضر المشع على بداية رقاقة من الجيلاتين Gel ويغمس طرفها في مذيب خاص دون أن يصل للمستحضر. تتحرك مكونات المستحضر مع حركة المذيب على رقاقة الجيلاتين وتتوضع في أماكن مختلفة على الرقاقة ، تمسح بعدها بواسطة ماسح ومضاني خاص ونحصل على مخطط بياني يمثل الفعالية المشعة الخاصة لمكونات المستحضر لكل جزء وخاصة المستحضر الموسوم والجزء الحر من العنصر المشع. في حالة النقاء الكيميائي الجيد يجب أن تكون الفعالية المشعة الخاصة بالمستحضر أكثر من 95% .

التطبيقات السريرية للتشخيص بالنظائر المشعة

هناك العديد من الفحوص التشخيصية التي تستخدم فيها المستحضرات الصيدلانية المشعة والتي تشمل الدراسة الوظيفية لمختلف أعضاء الجسم والتي تكشف التغيرات الوظيفية التي تسببها الحالات المرضية المختلفة والتي تسبق ظهور التغيرات الشكلية التي تدرس بواسطة وسائل التصوير الطبي التقليدية (التصوير الشعاع أو التصوير بالرنين المغناطيسي ..).

وسنستعرض فيما يلي أهم الفحوص الشائعة مع ذكر موجز للمستحضرات المشعة المستخدمة والآليات الحيوية المستخدمة في تركيز المستحضر المشع في الهدف المدروس وأهم استطبابات هذه الفحوص .

1. الغدة الدرقية :

تدرس الغدة الدرقية بنظائر اليود المشعة (^{131}I , ^{123}I) أو بواسطة التكنيسيوم برتيكنيتات ($Tc99m\ O_4^-$) Pertechnetate . تثبت خلايا الغدة الدرقية اليود المشع بعملية نقل فعالة بحيث يصل تركيزه إلى 30 ضعفاً مقارنة مع تركيزه في الدم .

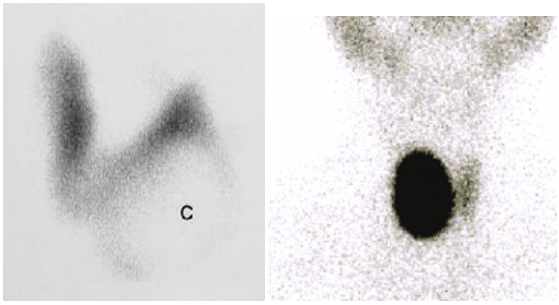
- يعطي التصوير الومضاني للغدة الدرقية معلومات شكلية ووظيفية عن الغدة الدرقية .

وأهم التغيرات المرضية التي يمكن مشاهدتها على الصورة الومضانية ، الشكل -1 :

- نقص تثبيت موضعي وحيد أو متعدد (عقدة باردة) والذي ينتج عن عدة أسباب منها الالتهاب الموضعي ، الورم الغدي السليم ، سرطان الدرق.
- نقص تثبيت شامل أو غياب التثبيت ، وهذا ينتج عن تثبيط كامل للغدة الدرقية نتيجة المعالجة بهرمونات الدرق أو ببعض الأدوية الحاوية لليود ، أو نتيجة وجود التهاب تحت حاد للغدة الدرقية.
- زيادة تثبيت بؤرية (عقدة حارة) تنتج عن وجود ورم غدب ذاتي الوظيفة .
- زيادة تثبيت شاملة في الغدة الدرقية تنتج عادة عن فرط نشاط الغدة الدرقية.

يستطب التصوير الومضاني للغدة الدرقية في الحالات التالية :

- التشخيص التفريقي لفرط نشاط الدرق.
- ضخامة الدرقية المترافقة بوجود تشكلات عقدية (الدراق العقيدي)
- متابعة المرضى المصابين بسرطان الغدة الدرقية.



(2) (1)

الشكل -1 صور ومضانية للغدة الدرقية : (1) عقدة حارة في الفص الأيمن . (2) عقدة باردة في القطب السفلي الأيسر

- **التصوير الومضاني لكامل الجسم باليود-131 : Whole Body ^{131}I – Scan**

يستطب التصوير الومضاني لكامل الجسم باليود المشع -131 لمراقبة المرضى المصابين بسرطانات الغدة الدرقية المتمايزة (الجريبي والحليمي) .حيث يمكن لخلايا هذه الأورام أن تثبت اليود المشع ، وبذلك يمكن كشف النقائل الورمية البعيدة وحدوث النكس.

2. التصوير الومضاني للغدد جارات الدرق Isotope Parathyroid Scan

يستخدم المستحضر المشع (Tc99m- MIBI (methoxy-isobutyl-isonitrile . تثبت الغدة الدرقية والغدد جارات الدرق هذا العقار المشع . لكن لوحظ أن معدل تصفيته من الغدة الدرقية أسرع من تصفيته من جارات الدرق وهذا يسمح بتمييزها على الصور الومضانية التي تجرى بعد حقن العقار المشع بوقت متأخر (2 ساعة).

تستطب هذه الطريقة في كشف أورام جارات الدرق وتحديد موقعها . الشكل -3

الشكل – 3 صورة ومضانية للعنق بعد 2 ساعة من حقن Tc-99m MIBI تظهر وجود تراكم زائد للعقار المشع في السرير الدرقي الأيمن / ورم غدي على حساب الغدة جارة الدرق على مستوى القطب الدرقي السفلي الأيمن.

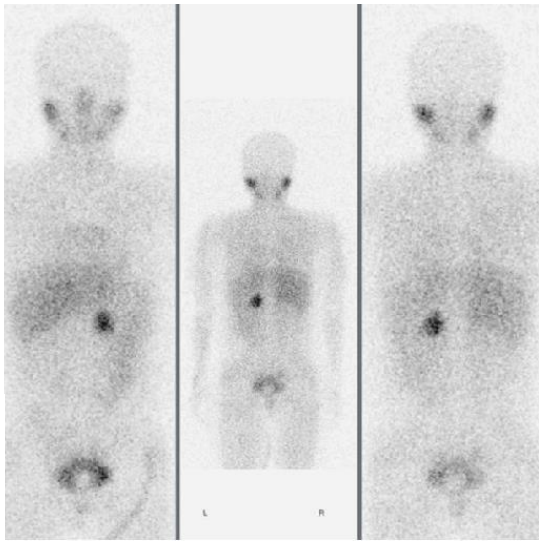
3. التصوير الومضاني للغدة الكظرية : Isotope Adrenal Scan

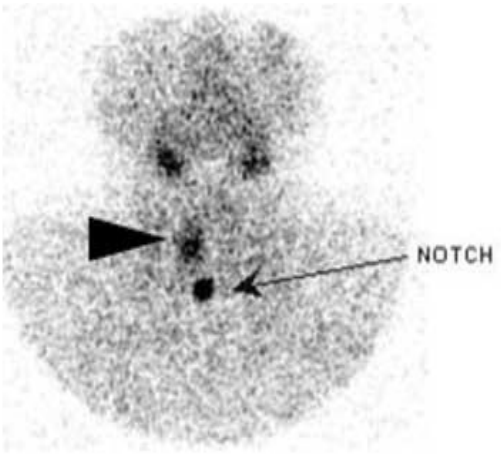
- **التصوير الومضاني لقشر الكظر :**

يستخدم المستحضر المشع **^{131}I- Norcholesterol** الذي يتراكم في خلايا قشر الكظر، حيث يحجز في هذه الخلايا و لا يتابع الطريق الوظيفي الطبيعي لإنتاج الهرمون. يمكن أن نشخص بهذه الطريقة الأورام الغدية في قشر الكظر الذي يظهر على شكل منطقة عالية التثبيت للعقار المشع في المنطقة فوق الكلية .

- **التصوير الومضاني للب الكظر :**

يدرس لب الكظر ومضانياً بواسطة المستحضر **^{131}I-Metaiodobenzylguanidine (*mIBG*)** وهي مادة مشابهة للنورأدرينالين تدخل خلايا لب الكظر بواسطة آلية نقل الأمينات الفعالة . يستطب هذا الفحص لتشخيص الورم القتاميني Pheochromocytoma الشكل -4 و Neuroblastoma .





الشكل- 4 صورة ومضانية بواسطة I-131 MIBG يظهر وجود تراكم مرضي في المنطقة المناسبة للغدة الكظرية فوق الكلية اليسرى تشير لوجود ورم قتاميني في الكظر

الأيسر (الصورة مسجلة من الأمام والخلف).

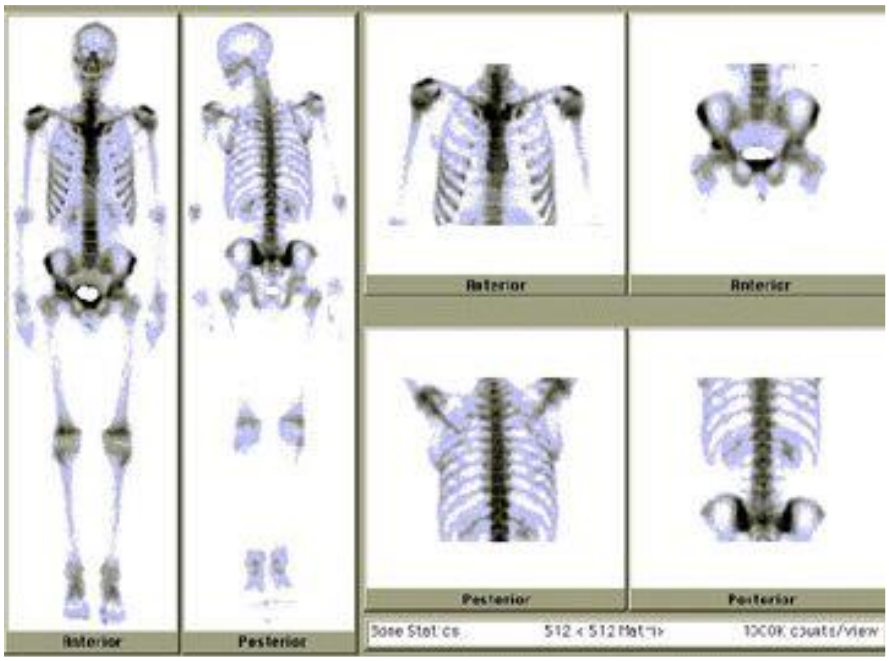
4. التصوير الومضاني للعظام :

تترافق الآفات المرضية العظمية المختلفة بزيادة معدل الاستقلاب ومحاولة الترميم الذاتي. هذه العملية الوظيفية يمكن تصويرها ومضانياً باستخدام عقار مشع يمكنه التراكم في مناطق تشكل العظم الجديد.

تستخدم مركبات Diphosphonate الموسومة بالتكنيسيوم-99م لهذا الغرض والمستحضرام المشعان الأكثر استخداماً هما :

- ^{99m}Tc Methylene diphosphonate (MDP)
- ^{99m}Tc Hydroxymethylene diphosphonate (HDP).

يجرى التصوير الومضاني عادة بعد 2-4 ساعات من حقن أحد العقارين المشعين ،ثم تسجل صور ومضانية متعددة من الأمام والخلف لجميع مناطق الجسم أو يجرى تصوير ومضاني لكامل الجسم الشكل -5



الشكل -5 صورة ومضانية طبيعية لكامل الهيكل العظمي

يملك التصوير الومضاني للعظام حساسية عالية في كشف الأورام العظمية البدئية والثانوية حيث تظهر على شكل مناطق مرتفعة التثبيت.

يستطب التصوير الومضاني للعظم في الحالات التالية :

- النقائل الورمية للعظم : تشخيص النقائل الورمية إلى العظم هي أهم استطبابات التصوير الومضاني للعظام . هناك عدد مهم من المرضى المصابين بأورام خبيثة يحدث عندهم نقائل ورمية إلى العظام. النقائل العظمية تنتشر في البداية إلى نقي العظم الأحمر الذي يتواجد بكثرة في الهيكل العظمي المحوري والنهايات القريبة لعظمي العضد والفخذ. وعندما تكبر النقائل ، تصاب قشرة العظم ، ويستجيب الجسم لمحاولة ترميم التخرب العظمي الناتج . يتراكم Tc-99m MDP في مناطق الترميم هذه. يمكن لتصوير العظم الومضاني أن يكشف التغير في مراحله الأولى في حين أن التصوير الشعاعي للمنطقة المصابة لا تكشف التغيرات العظمية الحاصلة حتى يفقد العظم على الأقل 50% من بنيته المعدنية . تظهر النقائل العظمية الورمية على الصورة الومضانية بشكل بؤر متعددة من زيادة تثبيت العقار المشع في الهيكل العظمي. الشكل -6

الشكل -6 صورة ومضانية للعظام تظهر وجود بؤر متعددة من زيادة تثبيت العقار المشع كدليل على وجود نقائل عظمية ورمية متعددة

- الأورام العظمية البدئية :

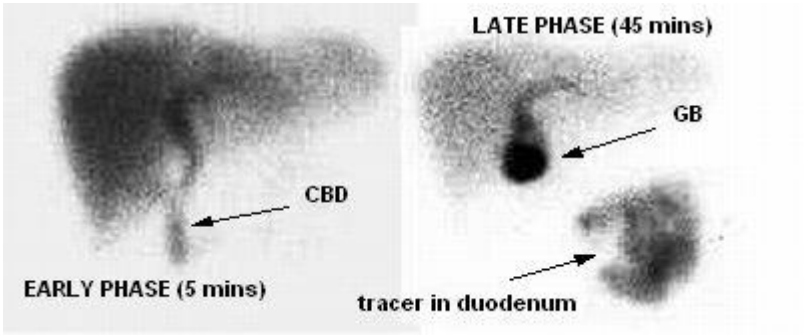
تبدي الأورام العظمية البدئية قابلية تثبيت المستحضر المشع المستخدم في التصوير الومضاني للعظم ، لكن نادراً ما تستخدم في التشخيص الأولي لهذه الأورام . وتستخدم عادة لكشف وجود بؤر ورمية متعددة في العظم .الشكل -7

الشكل – 7 صورة ومضانية للعظام تظهر وجود ورم عظمي في لوح الكتف الأيمن مع نقيلة بعيدة إلى العمود الفقري.

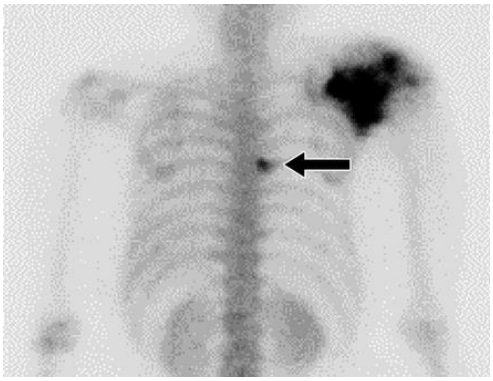
- استطبابات أخرى للتصوير الومضاني للعظام :
  - التهاب العظم والنقي
  - أمراض العظم الاستقلابية
  - رضوض العظم وخاصة الكسور الجهدية .

5. الدراسة الومضانية الوظيفية للجهاز الصفراوي : Isotope Biliary System Scan

يدرس الجهاز الصفراوي بواسطة مستحضر مشع يؤخذ من قبل الخلية الكبدية بعد حقنه في الدم ، ثم يطرح بشكل رئيسي عن طريق الجملة الصفراوية إلى الأمعاء. أهم المستحضرات المشعة المستخدمة لهذا الغرض هي مشتقات (IDA) Imino-diacetic acid التي تفرز عن طريق الجهاز الصفراوي بنسبة 80% والباقي يطرح عن طريق الكلية . تتم الدراسة بتسجيل صوراً ومضانية متتابعة فوق منطقة الكبد والبطن لتسجيل تغيرات توزع العقار المشع في الكبد والجملة الصفراوية مع مرور الوقت حتى طرحها إلى الأمعاء. شكل-8



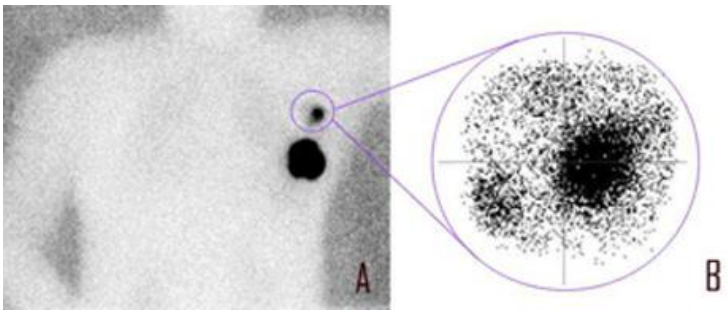
الشكل-8 صورة ومضانية للجملة الصفراوية تظهر المرحلة الكبدية المبكرة لتراكم المستحضر المشع والمرحلة المتأخرة بعد طرحها في الأمعاء.



الاستطبابات الرئيسية لهذه الدراسة الومضانية هي تشخيص التهاب المرارة الحاد والمزمن وفي التشخيص التفريقي لليرقان ، التي يشكل سرطان الأقنية الصفراوية أحد أسبابها .

6. التصوير الوضائي اللمفاوي Lympho-scitigraphy

يمكن بمساعدة التصوير الوضائي دراسة اتجاه التصريف اللمفاوي في بعض أنواع الأورام، وتحديد العقدة اللمفاوية الأولى التي يصل إليها السائل اللمفاوي والتي تسمى العقدة الحارسة ، هذه يتم استئصالها وفحصها نسيجياً لمعرفة وجود نقائل ورمية فيها . ففي حال غياب النقائل الورمية في هذه العقدة الرئيسية (أو الحارسة) فإن احتمال وجود نقائل في العقد الأخرى نادر جداً وبالتالي يمكننا الاستغناء عن تجريف العقد من المنطقة. أما إذا كانت هذه العقدة مصابة فمن الواجب تجريف العقد. يستخدم هذا التصوير بشكل خاص في أورام الثدي والميلانوما الجلدية . الشكل-9

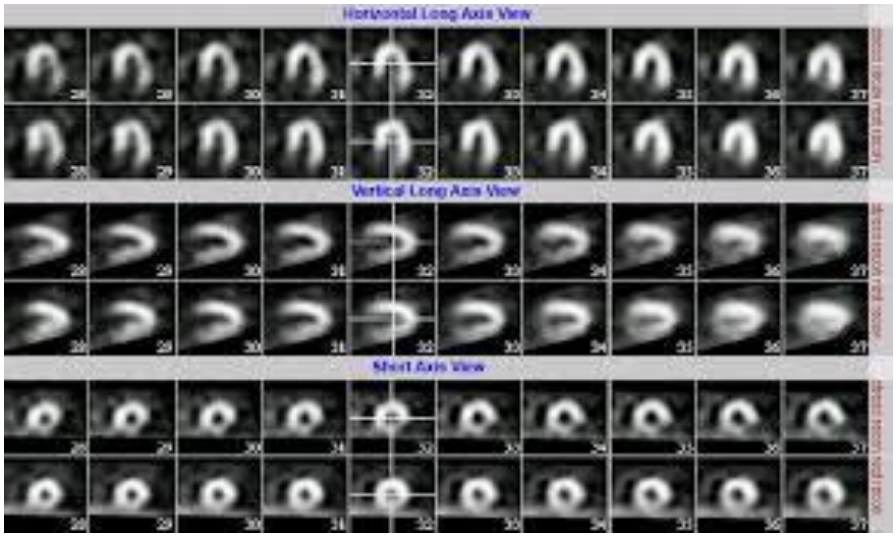


الشكل -9 تحديد العقدة الحارسة ومضانياً عند مريضة مصابة بسرطان الثدي ، حيث يحقن العقار المشع في منطقة الورم الذي يتم تصريفه لمفاوياً إلى العقدة الحارسة.

7. التصوير الوضائي للعضلة القلبية Isotope Myocardium scan

يستخدم لهذا الغرض المستحضران المشعان ^{201}Thallium chloride أو ^{99m}Tc- MIBI . اللذين يمكنهما دخول خلايا العضلة القلبية، وتوزعهما في نسيج العضلة القلبية يتناسب مع نسبة التروية الدموية الواردة في الشرايين الاكليلية المغذية للقلب. وتراكمه في الورم يعتمد على التروية الدموية للورم ويدخل للخلية بآلية مشابهة لشوارد البوتاسيوم بواسطة مضخة الصوديوم-البوتاسيوم الموجودة على الغشاء الخلوي.

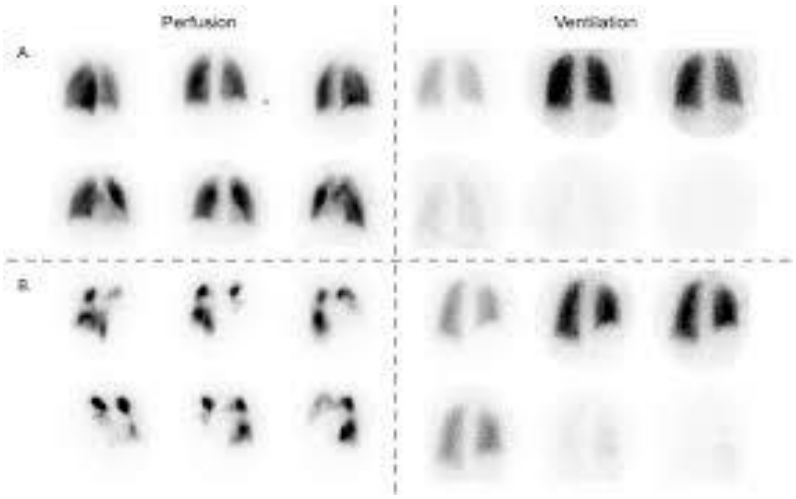
يستطب هذا الفحص في أمراض نقص التروية القلبية . شكل -10



الشكل-10 صورة ومضانية للعضلة القلبية أجريت في ظروف جهد أعظمي للمريض ، حيث يشاهد نقص تثبيت المستحضر المشع في الجدار الخلفي للبطين الأيمن يشير لوجود نقص تروية دموية في هذه المنطقة ناتج عن وجود تضيق شرياني أكليلي.

8. التصوير الومضاني للرئتين .Isotope lung scan

الدراسة الومضانية للرئتين تشمل دراسة التهوية والتروية الدموية الرئويتين. دراسة التهوية الرئوية تفيد في تقييم المرضى المصابين بآفات قصبية سادة كالتهاب القصبات المزمن أو أورام القصبات ونستخدم لهذا الغرض غاز الكزينون المشع ^{144}Xe حيث تسجل صورة ومضانية للرئتين بعد استنشاق هذا الغاز . أما دراسة التروية الدموية فتتم باستخدام المستحضر المشع (^{99m}Tc- HSA(Human Serum Albumin وهو ألبومين مصنع على شكل كريات صغيرة عند حقنه في الوريد تصل للدوران الرئوي وتتوقف في الأوعية الشعرية في الرئتين حيث يمكن تسجيل صور ومضانية تعكس التروية الدموية الرئوية وتستطب بشكل خاص لتشخيص الصمات الرئوية. شكل -11



الشكل -11 صور ومضانية للتهوية والتروية الرئويتين (A) تروية وتهوية طبيعيتان (B) مناطق متعددة من غياب التروية الدموية في الرئتين مع تهوية رئوية طبيعية كدليل على وجود صمات رئوية متعددة.

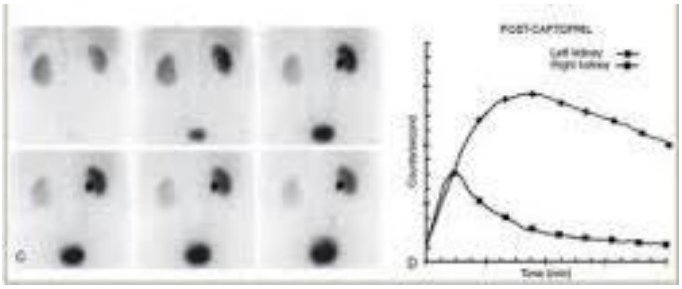
9. التصوير الومضاني للجهاز البولي Isotope renal scan

من الفحوص المهمة ، تستخدم عدة مستحضرات مشعة لهذا الغرض جميعها يطرح عن طريق الكليتين بنسبة عالية بحيث يمكننا دراسة الوظيفة الكلوية بشكل جيد. أهم هذه المستحضرات :

- ^{99m}Tc-MAG3 (Mercaptoacetyltriglycine Tc99m
- ^{99m}Tc -DTPA (diethylenetriaminepentacetate)

يجرى الفحص بتسجيل صور ومضانية متتابعة للكليتين بعد حقن المستحضر المشع وريديا , شكل-12 .

تستطب هذه الدراسة في تقييم الآثار الوظيفية الناتجة عن الأمراض الكلوية المختلفة وخاصة الحالات السادة التي تعيق الإفراغ الكلوي وتأثير التداخلات الجراحية على هذه الوظيفة .



الشكل-12 دراسة ومضانية وظيفية للكلية تظهر كلية يسرى طبيعية ، وإعاقة في الإفراغ من الكلية اليمنى.

10. التصوير الومضاني بالغاليوم-67 ^{67}Gallium imaging

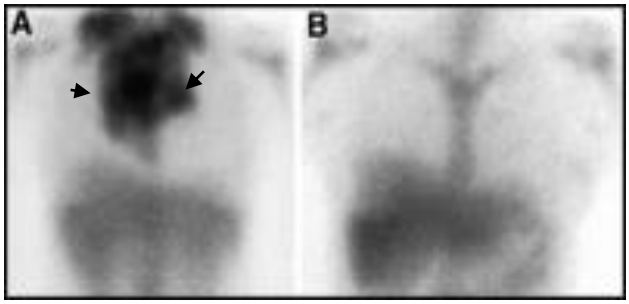
الغاليوم-67 من النظائر المشعة ذات الاستخدام الواسع في تشخيص بعض الأورام . سلوكه الحيوي في الجسم يشبه الحديد. ينقل في الدم بالارتباط على البروتينات الناقلة للحديد خاصة الترانسفرين . يتراكم هذا النظير المشع بشكل طبيعي في الكبد ، والعظام ، ونقي العظم . تصفيته من الجسم بطيئة وتتم عن طريق الكليتين والجهاز الهضمي لذلك لا يمكن إجراء التصوير إلا بعد 48-72 بعد الحقن.

تراكم الغاليوم-67 في الأورام مرتبط بزيادة نسبة مستقبلات الترانسفرين على الخلية الورمية التي يرتبط بها الغاليوم-67 ويدخل إلى الخلية الورمية و يتركز في الليزوزومات.

بشكل عام لا يستخدم التصوير بالغاليوم-67 من أجل التشخيص الأولي للورم لكن يفيد في دراسة انتشار الورم و بالتالي تحديد مرحلته ، وفي مراقبة الاستجابة للمعالجة وكشف حدوث النكسة الورمية. الأورام التي تبدي تراكماً جيداً للغاليوم-67 بحيث يسمح بإجراء التصوير الومضاني هي :

- مرض هودجكن
- كارسينوما الخلية الكبدية
- أورام الرأس والعنق

وتظهر هذه الأورام بشكل مناطق زائدة التثبيت للغاليوم-67 الشكل –13



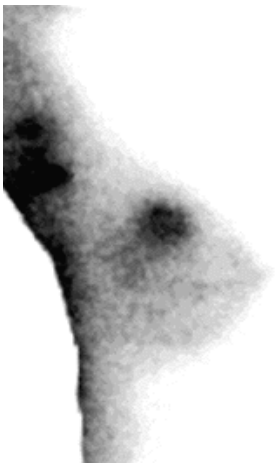
الشكل-13 مريض لديه مرض هودجكن . (A) قبل المعالجة : تشاهد زيادة في تثبيت الغاليوم - 67 في العقد اللمفية في المنصف . (B) بعد المعالجة : يشاهد زوال هذا التثبيت مما يشير لحدوث استجابة جيدة للمعالجة.

11. تصوير الأورام بالعقارين المشعين Thallium-201 و Tc-99MIBI :

وهما كما ذكرنا سابقا مستحضران مشعان يستخدمان لدراسة تروية العضلة القلبية والغدد جارات الدرق ، لوحظ أن العديد من الأورام تثبتهما. الاستطبابات السريرية الورمية لاستخدام هذين العقارين المشعين إضافة لأورام جارات الدرق تشمل :

- سرطان الثدي

تثبت الكارسينومات الغدية للثدي العقارين المشعين المذكورين مما يمكننا من إجراء التصوير الومضاني للثدي لتشخيص هذه الحالات.الشكل -14 ونلجأ إلى هذا النوع من التصوير في الحالات التي يخفق فيها تصوير الثدي الشعاعي في المساعدة على التشخيص .



الشكل-14 تصوير ومضاني بواسطة Tc-99m MIBI تشاهد زيادة تراكم بؤرية للعقار المشع تشير لوجود سرطان ثدي.

- سرطان الغدة الدرقية

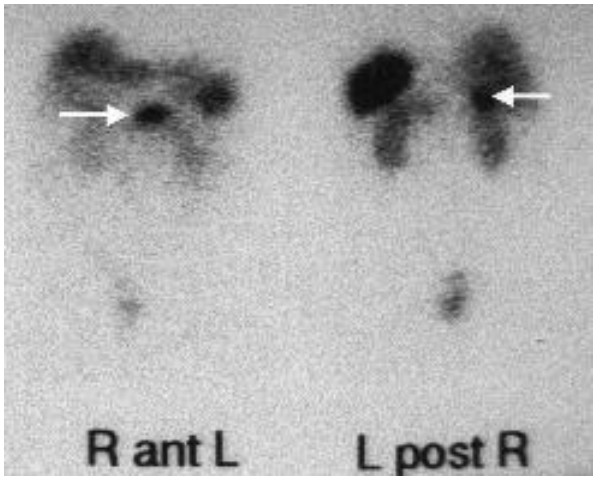
يفيد التصوير الومضاني بالتاليوم-201 في سرطانات الدرق فقيرة التمايز و غير المتمايزة وسرطان الدرق اللبي Medullary thyroid cancer التي لا تبدي أي تثبيت لليود المشع مثل سرطانات الدرق المتمايزة. شكل-15

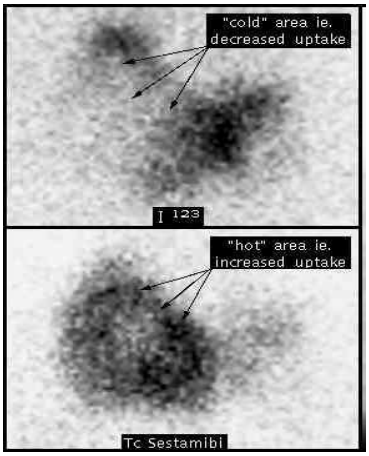
الشكل-15 مريض لديه عقدة باردة في الغدة الدرقية وجدت بالتخطيط الومضاني باليود المشع ، أجريت إعادة للتخطيط باستخدام Tc-99m MIBI وجد زيادة تثبيت هذا العقار في هذه العقدة والتي تشير إلى احتمال كبير لوجود ورم خبيث في الغدة الدرقية.

12. التصوير الومضاني لمستقبلات الببتيد Peptide Receptor Isotope Imaging :

هناك العديد من الببتيدات الداخلية التي تساهم في عملية نمو واستقلاب الأورام ، مثل العديد من الهرمونات وعوامل النمو التي تتفاعل مع مستقبلات نوعية على غشاء الخلية الورمية . من بين هذه الببتيدات السوماتوستاتين Somatostatin . هذا الببتيد ينتج في الجهاز العصبي المركزي والجهاز الهضمي والبنكرياس ويعمل كناقل عصبي في الدماغ . ويقوم خارج الجهاز العصبي بتثبيط إفراز هرمونات النمو والأنسولين والغلوكاكون والغاسترين والكالسيتونين. كما أن له تأثير مثبط لنمو الأورام.

درست العديد من العوامل التي يمكنها الارتباط مع مستقبلات السوماتوستاتين أهمها الببتيد Octreotide وهو عامل نظير للسوماتوستاتين الذي يمكن وسمه بالنظير المشع إنديوم-111 (^{111}Indium) ونحصل على المستحضر المشع الذي يمكن استخدامه للتصوير الومضاني للأورام التي فيها نسب مرتفعة من مستقبلات السوماتوستاتين. مثل الأورام الغدية العصبية الشكل -16 .





الشكل – 6 صورة ومضانية باستخدام ^{111}In- Octreotide تظهر وجود تثبيت مرتفع للعقار المشع في ورم غاستريني

Gastrinoma أولي (السهم على الصورة من الاتجاه الأمامي) وفي نقيلة كبدية (الصورة من الاتجاه الخلفي).

13) التصوير الومضاني المناعي (Immunoscintigraphy)

تستخدم أجسام ضدية موسومة بعنصر مشع ترتبط مع مستضدات نوعية موجودة على سطح الخلايا الورمية. وقد طورت تقنيات حيوية تمكن من إنتاج كميات كبيرة من هذه الأجسام الضدية ووسمها بالنظائر المشعة واستخدامها في تشخيص ومعالجة بعض الأورام .

يساهم التصوير الومضاني المناعي في دراسة انتشار الورم وحالات النكس وكشف النقائل البعيدة .

وأهم الأجسام الضدية المستخدمة (Prostacint) ^{111}Indium - Capromab penditide وهو جسم ضدي يرتبط مع المستضد الموثي النوعي الذي يتواجد فقط على الغشاء الخلوي لخلايا الموثة الطبيعية وخلايا سرطانة الموثة.

14) التصوير المقطعي بمصدرات البوزيترون Positron Emission Tomography

على مدى عقود عدة كان استخدام هذا النوع من التصوير مقتصراً على التطبيقات البحثية. وفي الأعوام الأخيرة وبعد التحسينات التقنية التي حصلت على الأجهزة المستخدمة ، دخل هذا النوع من التصوير مجال الاستخدام السريري . والاستعمال الرئيسي له هو دراسة الأورام الخبيثة. (التشخيص ، تحديد المرحلة ، مراقبة الاستجابة للعلاج) . في معظم الحالات ، تكون خلايا الورم الخبيث نشيطة استقلابياً وتنقسم بسرعة أكبر من خلايا النسيج الطبيعي. ويمكن باستعمال العقاقير المشعة التي ترصد بعض المؤشرات الوظيفية مثل استقلاب الغلوكوز أن نصور ونقيس هذا المؤشر الوظيفي ونكشف الورم. وهذه الطريقة لها ميزات وفوائد غير موجودة في الطرق الأخرى مثل التصوير الطبقي المحوري .

هناك العديد من النظائر المشعة المصدرة للبوزيترون يمكنها الارتباط بجزيئات حيوية حاملة و التي يمكن أن تساعد على دراسة وظائف عديدة على المستوى الخلوي. وأهم العقاقير المشعة المستخدمة بشكل واسع هي

^{18}F- Flourodeoxyglucose(FDG) وهو مركب نظير للغلوكوز.حيث يؤخذ من قبل الخلية وتتم فسفرته بنفس آلية فسفرة الغلوكوز لكنه لا يتابع الطريق الاستقلابي العادي للغلوكوز ولا يمكنه الخروج من الخلية فيتراكم فيها.

من المعروف أن للخلية الورمية نشاط استقلابي مرتفع وتحتاج لكميات أكبر من الغلوكوز لإنتاج الطاقة اللازمة لعملياتها الاستقلابية ، وتؤمن هذه الاحتياجات بزيادة مستويات ناقلات الغلوكوز على الغشاء الخلوي وخاصة GLUT 1 وبنسبة أقل GLUT3. لذلك فإن خلايا الورم تثبت كميات أعلى من العقار المشع F-18 FDG مقارنة مع النسيج الطبيعي.

- **الانتشار الطبيعي للعقار المشع F-18 FDG في الجسم :**

يعكس الانتشار الطبيعي للعقار المشع F-18 FDG استقلاب الغلكوز ، حيث نشاهد نسبة تثبيت عالية في الدماغ ، العضو الذي يستخدم الغلوكوز بشكل أساسي ،و تشاهد زيادة خفيفة إلى متوسطة في الكبد ،القلب ، الجهاز الهضمي ، الغدد اللعابية والخصيتين. كما تشاهد فعالية إشعاعية عالية في الجهاز البولي ناتجة عن طرح العقار عن هذا الطريق.

- العلامات المرضية :

يتراكم F-18 FDG بنسبة عالية في الأورام ذات الهجومية العالية بسبب زيادة فعاليتها الاستقلابية ، وتكون نسبة التثبيت أقل في الأورام ذات درجة الخباثة المنخفضة . في حال وجود نخرة في الورم فإن هذه المناطق تبدي تثبيتاً ضعيفاً للعقار المشع .

- **الاستطبابات السريرية**

يستخدم التصوير الومضاني باستخدام F18- FDG في تقييم العديد من الأورام السرطانية . ويتمحور هذا الاستخدام في نقاط ثلاث رئيسية : التشخيص ، دراسة انتشار الورم (تقييم المرحلة) وفي إعادة تقييم المرحلة بعد المعالجة .

- **الاستطبابات :**

- **تصنيف مرحلة الورم :**

تقييم مرحلة الورم خطوة أساسية في تدبير المريض المصاب بالسرطان من أجل تحديد الإنذار وتقرير المعالجة المناسبة للمريض. وقد أصبح التصوير الومضاني باستخدام F-18 FDG من الوسائل الأساسية التي يلجأ إليها في هذا السياق وأهم الأورام التي يستطب فيها هي :

- سرطان الرئة : يفيد ^{18}F- FDG في معرفة إصابة العقد اللمفاوية ، حيث يمكن كشف إصابة العقد ولو كان حجمها طبيعي . كما يمكنه كشف الإصابات العقدية خارج الصدر. وبالتالي فهو يساعد في تحديد خطة العلاج الجراحية ، وخاصة عند اكتشاف عقد لمفاوية منصفية أو نقائل بعيدة.

- اللمفوما : تبدي الأورام اللمفاوية بنوعيها (هودجكن و لاهودجكن) تثبيتاً مرتفعاً للعقار المشع ^{18}F- FDG . ويملك التصوير الومضاني حساسية عالية في كشف الإصابات العقدية أنى كان موضعها أو حجمها . كما أنه يملك حساسية عالية في كشف الإصابات خارج العقدية في الكبد أو الطحال أو الجهاز العصبي.
- سرطان المري : يعتبر التصوير الومضاني F-18 FDG PET من الوسائل الحساسة في كشف الورم البدئي في المري وتحديد امتداده وكشف النقائل الورمية وبشكل يتفوق عل التصوير الطبقي المحوري والتنظير الداخلي للمري.

_ سرطان الكولون والمستقيم

يفيد التصوير الومضاني ^{18}F- FDG PET بشكل رئيسي هنا في كشف الإصابة العقدية وكشف النقائل الورمية.

_ سرطانات الرأس والعنق

يلعب ^{18}F- FDG PET دوراً مهماً في تصنيف مرحلة هذه الأورام وخاصة الانتشار إلى العقد اللمفاوية الرقبية . كما أنه يساهم في كشف الورم البدئي في الحالات التي يكون التظاهر الرئيسي للورم هو الاعتلال العقدي الرقبي .

- **مراقبة الاستجابة على المعالجة :**

هذا الاستطباب يمثل أهم استخدامات التصوير الومضاني ^{18}F- FDG PET .حيث أن الطرق المستخدمة حالياً تعتمد بشكل رئيسي على التغيرات المشاهدة في حجم الآفة والتي قد تتأخر في الظهور إلى ما بعد الانتهاء من المعالجة . أما الاستجابة الاستقلابية للمعالجة الكيميائية أو الشعاعية والتي تشمل التغيرات في استقلاب الغلوكوز فتحصل مبكراً بعد البدء بالمعالجة ، والتي يمكن رصدها بواسطة ^{18}F- FDG PET وهذا له الأثر المهم في اتخاذ قرار الاستمرار في المعالجة المطبقة أو تعديلها.

. إعادة التصنيف وكشف نكس الورم

مازال كشف وتحديد امتداد الورم الناكس من المعضلات التشخيصية التي تواجه الأطباء. حيث أن طرق التصوير التقليدية لا يمكنها في كثير من الأحيان التمييز بين الندبة الليفية وبين الورم الناكس.والمعالجة الشعاعية والجراحية تغيران المعالم التشريحية للمنطقة بصورة كبيرة مما يعيق التشخيص.

ونظراً لأن التصوير الومضاني باستخدام ^{18}F- FDG يملك القدرة على كشف الفعالية الاستقلابية للورم فإنه يقدم وسيلة رائعة لكشف الأورام الناكسة ، وقد أصبح الخيار الأول في العديد من الحالات :وخاصة في أورام المستقيم والكولون.

الوسم الإشعاعي للخلايا الدموية

Radionuclide labeling of Blood Cells

لعبت الكريات الحمر الموسومة كمستحضر مشع دورا مهما في إجراء العديد من الدراسات الومضانية المهمــة وأهما الدراسة الومضانية لوظائف البطينات القلبية . كما أن الكريات البيض الموسومة تلعب دوراً مهما في تشخيص الحالات الالتهابية وخاصة تلك التي يصعب تحديد موقعها بوسائل التصوير الطبي التقليدية المعروفة .

1) وسم الكريات الحمر Red Cell Labeling :

تستخدم الكريات الحمر الموسومة بعنصر مشع في العديد من الدراسات التشخيصية المهمة ، أهمها :

- قياس حجم الدم الكلي
- قياس عمر الكريات الحمر
- دراسة وظيفة العضلة القلبية
- دراسة حالات النزف الهضمي
- الدراسة الومضانية الانتقائية للطحال.

وتبعاً للاستطباب الذي سنستخدم فيه الكريات الحمر الموسومة يتم اختيار العنصر المشع المناسب كما أن سهولةٍ هولة إجراءات عملية الوسم وثبات المستحضر ضمن العضوية تلعب دورا مهماً . مثلاً لقياس عمر الكريات الحمر نحتاج إلى عنصر مشع نصف عمره طويل نسبياً بينما دراسة العضلة القلبية والتي يمكن أن تنجز خلال نصف ساعة فيمكن الوسم بعنصر نصف عمره قصر.

استخدمت لوسم الكريات الحمر عناصر مشعة عدة أهما الفوسفور-32 (^{32}p) والكروم -51 (^{51}Cr) ، لكن العنصر المفضل من ناحية خصائصه الفيزيائية هو الـ ^{99m}Tc والذي أمكن تطوير طرق فعالة وسهلة وسريعة لربطه مع الكريات الحمر وقد أصبح الخيار الأول المستخدم لهذا الغرض . تتميز الكريات الحمر الموسومة بالـ ^{99m}Tc بانتشارها المتجانس في الحيز الوريدي ومغادرتها له بمعدل بطيء جداً.

إن الـ ^{99m}Tc pertechnetate بحالة الأكسدة 7+ يمكنه العبور للكريات الحمراء بسهولة لكنه لا يمكنه البقاء ضمنها إذ سرعان ما ينتشر خارجها وينتشر إلى الحيز خارج الأوعية الدموية ويتراكم في بعض الأعضاء كالغدة الدرقية والغشاء المبطن للمعدة . ولذلك من أجل ربط هذا العنصر بشكل ثابت على الكرية الحمراء وضمان عدم انتشاره إلى خارج الحيز الوعائي لابد من إرجاع غلى درجة أكسدة أقل. وهذا يتم بالاستعانة بشوارد القصدير Stannous ions العامل المرجع المستخدم في المساعدة في عملية وسم المستحضرات المشعة المختلفة.

1. الخطوات العامة لوسم الكريات الحمر General Steps in labeling RBCs with ^{99m}Tc

قبل شرح طرق وسم الكريات الحمر المستخدمة حالياً ، لابد من معرفة الخطوات الرئيسية العامة لهذه العملية لأنها عامة لكل الطرق. هناك ثلاث خطوات رئيسية :

- **معالجة الكريات الحمر بشوارد القصدير :** إن المستحضر ^{99m}Tc Pertecnetate قادر على عبور غشاء الكرية الحمراء والدخول إليها لكنه في حالة الأكسدة (7+) لا يمكنه الارتباط على جزيء الهيموغلوبين بثبات إلا إذا كان بحالة أكسدة أقل. ولأن مستحضر ^{99m}Tc Pertecnetate في حالة الإرجاع لا يمكنه دخول الكرية الحمراء ، لا بد من تحضير الكريات الحمراء بعامل مرجع لكي يقوم بأكسدته بعد دخول الكرية حتى يتمكن من الارتباط مع جزيء الهيموغلوبين بثبات. تستخدم بشكل عام شوارد القصدير الموجودة بشكل كلور القصدير في المستحضر Stannous pyrophosphate complex .

- إزالة الفائض من شوارد القصدير الموجود خارج الكريات : إن الكمية الفائضة من شوارد القصدير في البلاسما خارج الكرية لابد من التخلص منها لأن بقاءها قد يسبب إرجاع جزيئات ^{99m}Tc Pertecnetate بعد إضافتها من أجل عملية الوسم وهي في هذه الحالة غير قادرة على الدخول إلى الكرية. وتتم إزالة الفائض حسب طريقة الوسم كما سيرد لاحقاً.

- إضافة ^{99m}Tc Pertechnetate إلى الكريات المحضرة سواء ضمن العضوية أو خارجها (في الزجاج) .

2. طرق وسم الكريات الحمراء ^{99m}Tc RBCs Labeling Methods :

- طريقة الوسم داخل العضوية In Vivo method :

هذه الطريقة تشمل حقن المستحضر الحاوي على شوارد القصدير (Stannous pyrophosphate complex) ثم بعد 20-30 دقيقة يحقن ^{99m}Tc Pertechnetate . والتأخر بحقن العنصر المشع هدفه السماح بتصفية الفائض من أيونات القصدير في البلاسما . يتم إرجاع التكنيسيوم بعد دخوله إلى الكرية بفعل شوارد القصدير الموجودة داخلها ويرتبط على جزيء الهيموغلوبين.

- **طريقة الوسم في الزجاج In Vitro Method :** في هذه الطريقة يتم سحب عينة من الدم وتعزل الكريات الحمر منها بواسطة التثفيل ثم يضاف مستحضر شوارد القصدير إليها وبعد ذلك توسم بواسطة التكنيسيوم. ثم يعاد حقنها للمريض.

هناك طريقة معدلة للوسم تجمع بين الطريقتين المذكورتين حيث يتم فيه حقن المستحضر الحاوي على شوارد القصدير للمريض ثم تسحب عينه من دمه وتوسم خارج الجسم ويعاد حقنها ثانية .

3. العوامل المؤثرة في عملية الوسم :

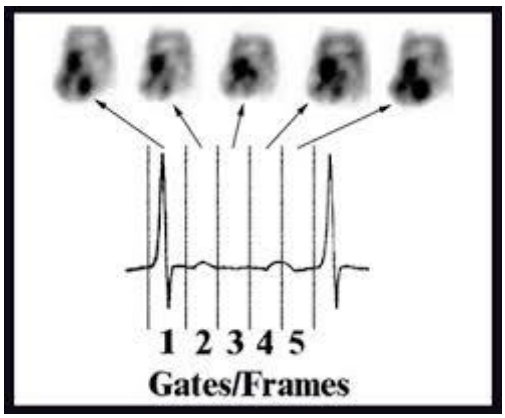
- **الحرارة :** في طريقة الوسم بالزجاج والطريقة المعدلة هناك علاقة مباشرة بين درجة حرارة المزيج من الكريات والعنصر المشع وبين معدل الوسم وكميته، والحرارة المناسبة للحصول على أفضل نسبة وسم هي حرارة 37 درجة مئوية. ورفع درجة حرارة المزيج حتى 50 درجة مئوية يؤدي لأذية الكريات الحمراء والتي يمكن استخدامها لإجراء الدراسة الومضانية للطحال.
- **خضاب الدم Hematocrit :** كمية الهيماتوكريت الكلية الموجودة في الدم هي المؤثر الرئيسي في معدل وكمية الوسم. القيمة الطبيعية للهيماتوكريت تختلف حسب عمر الشخص وجنسه . تتراوح بين 30 – 40 % عند النساء وبين 42 - 52 % عند الرجال. في حال انخفاض قيم نسبة الهياتوكريت بسبب فقر أو ضياع الدم فإن عملية الوسم لا تتم بكفاءة وينتج عن ذلك زيادة كمية العنصر المشع خارج الأوعية.
- **جرعة القصدير :** حتى نضمن حدوث وسم جيد لكريات الدم لا بد من حقن كمية من شوارد القصدير بحد أدنى قدره 10µG/Kg .

4. بعض الأمثلة السريرية المهمة :

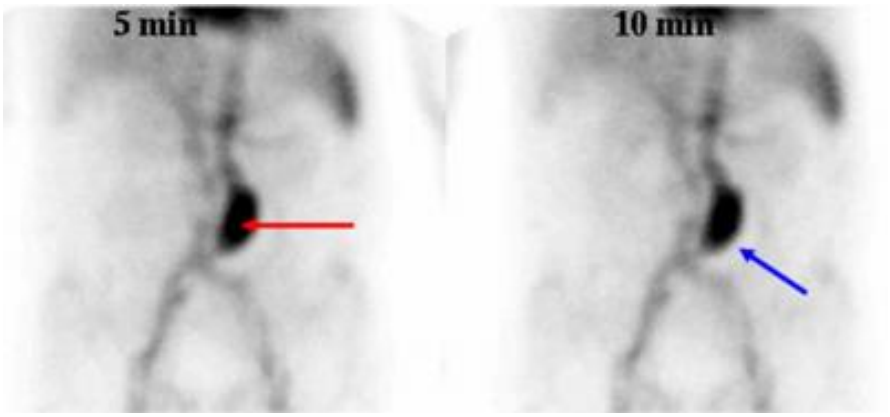
دراسة وظيفة العضلة القلبية . الشكل-1

حالة أم دم أبهرية في البطن. الشكل-2

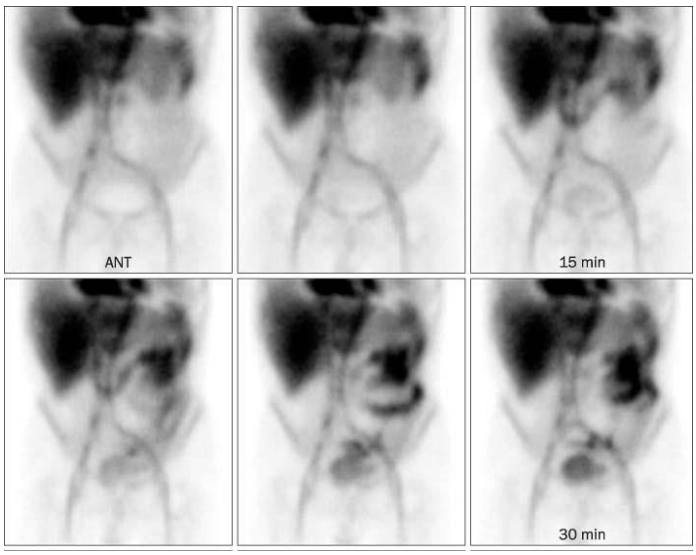
حالة نزف هضمي . الشكل-3



الشكل -1 يظهر دراسة ومضانية للقلب بعد وسم الكريات الحمر . يتم تسجيل صور ومضانية للقلب خلال زمن الدورة القلبية يتم بعدها حساب بعض المؤشرات الوظيفية للقلب.



الشكل-2 صورة ومضانية لمنطقة البطن بعد وسم الكريات الحمر ، يظهر تجمعا كبيراً للدم في الأبهر البطني بسبب وجود أم دم أبهرية بطنية.



الشكل-3 حالة نزف هضمي . صورة للبطن بعد وسم الكريات الحمر في أوقات مختلفة تظهر وجود تجمع للكريات الحمر في الزاوية الكولونية اليسرى نتيجة النزف.

2) وسم الكريات البيض Labeling of White Blood Cells :

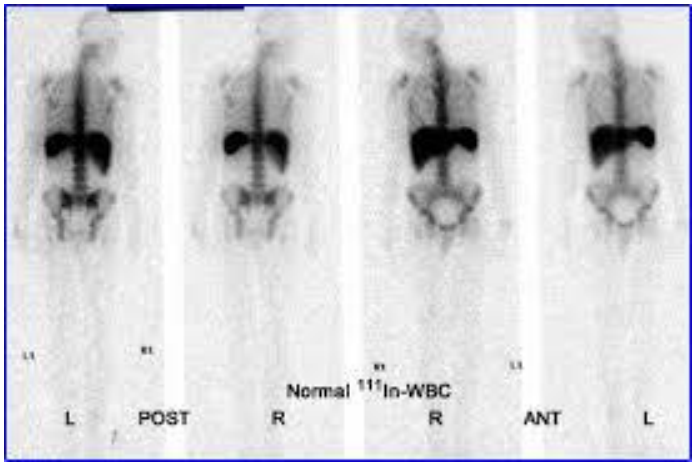
تستخدم الكريات البيض الموسومة لدراسة الحالات الانتانية وخاصة تلك التي يصعب تحديد موقعها بواسطة طرق التصوير الطبي التقليدية . يستخدم لوسم الكريات البيضاء بأحد العنصرين ^{99m}Tc أو ^{111}In . المستحضرات المشعة المستخدمة لهذه الغرض تتصف بأنها " محبة للبيدات " (Lipophilic) ويمكنها عبور الغشاء الخلوي للكرية البيضاء. داخل الكرية البيضاء يتفكك هذا المستحضر ويرتبط النظير المشع على مكونات الستوبلاسما . هذه للمستحضرات المشعة يمكنها الدخول إلى جميع الخلايا الدموية لذلك لابد من فصل الكريات قبل عملية الوسم.

أهم المستحضرات المستخدمة :

- المستحضر المشع ^{111}In – Oxine : وهو مستحضر يورد جاهز للاستخدام من المصدر .
- المستحضر المشع ^{99m}Tc HMPAO (المستحضر المستخدم لدراسة التروية الدموية للدماغ) تتم عملية تحضيره في المكان قبل استعماله .

تتم عملية الوسم في الزجاج خارج العضوية ، حيث تؤخذ عينة دم من المريض وتفصل الكريات البيض عن مكونات الدم الأخرى بعدها يضاف المستحضر المشع . بعد إتمام عملية الوسم يعاد حقنها للمريض .

الانتشار الطبيعي للكريات البيض الموسومة بالانديوم بعد 45 دقيقة من الحقن يكون في الدم والكبد والطحال وجزء بسيط في نقي العظم والرئتين – شكل-1 . وبعد 24 ساعة من الحقن يصفى المستحضر من الدروان الدموي ويتراكم بشكل رئيسي في الكبد والطحال . يتم تسجيل الصور الومضانية بشكل عام بعد 4 ساعات و24 ساعة من الحقن.

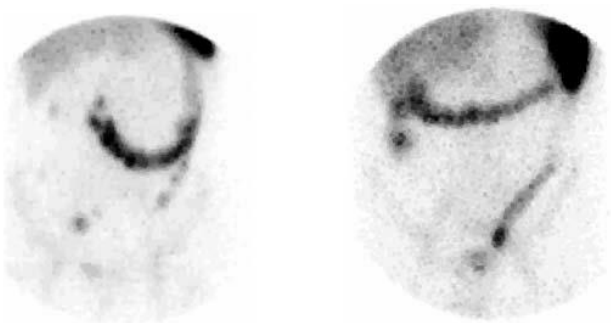


الشكل-1 الانتشار الطبيعي للكريات البيض الموسومة بالانديوم-111

الاستطبابات السريرية :

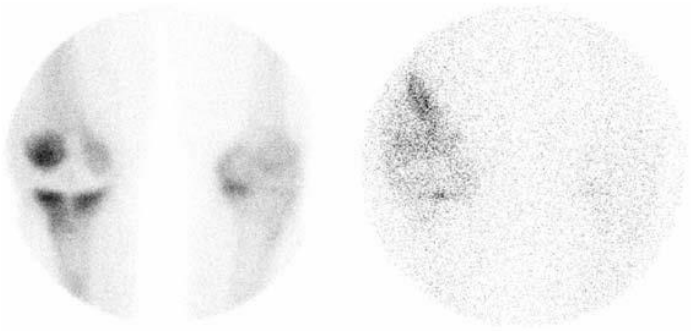
- خراجات البطن . شكل-2
- أمراض الأمعاء الالتهابية. شكل-3
- التهابات العظام والمفاصل. شكل-4

الشكل -2 صورة ومضانية لكامل الجسم بعد حقن كريات بيضاء موسومة بالانديوم . يظهر تجمع زائد للكريات البيض في الحوض يشير لوجود خراج في الحوض.



الشكل-3 مريض مصاب بالتهاب كولون قرحي

يظهر التصوير الومضاني بواسطة الكريات البيض الموسومة تراكم زائد للكريات البيض في معظم أجزاء الكولون.



A B

الشكل -4 مريض مصاب بالتهاب مفصل جرثومي

(A) تخطيط ومضاني للعظام بواسطة المستحضر المشع ^{99m}Tc MDP يظهر زيادة تثبيت في مفصل الركبة الأيمن. (B) دراسة أجريت بواسطة الكريات البيض الموسومة لنفس المريض أظهرت وجود تجمع زائد للكريات في هذا المفصل كدليل على وجود التهاب مفصل إنتاني.

آليات توضع المستحضرات المشعة

Mechanisms of Radiopharmaceuticals Localization

من الضروري للصيدلي الإشعاعي فهم آليات تراكم المستحضرات المشعة في الأعضاء المختلفة للجسم ومعرفة وفهم آليات إجراء الفحوص المختلفة في الطب النووي .

سنذكر في الفقرات اللاحقة وصف هذه الآليات وخصائصها وبعض الأمثلة عنها.

1) الانتشار ضمن الحيز Compartment Distribution

من الممكن للمستحضر المشع المحقون في الجسم أن ينتشر ضمن مجال مغلق نطلق عليه اسم الحيز دون أن يتجمع ويتراكم في أي من أعضاء الجسم. ومن الأمثلة على ذلك يمكن أن نذكر : الحيز الوعائي ، حيز السائل الوعائي الدماغي ، جوف البريتوان ، القناة الهضمية ، الجهاز الصفراوي ، الجهاز المفرغ للكليتين.

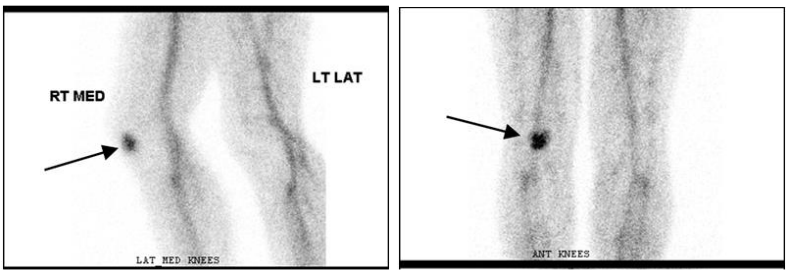
هناك عدة حالات لانتشار المستحضر المشع في حيز ما من حيزات الجسم. في الحالة الطبيعية يكون انتشار المستحضر المشع متجانساً في كل أجزاء الحيز وهذا الانتشار قد يضطرب في بعض الحالات المرضية حيث يحدث عدم انتظام في التجانس أو تسرب المستحضر خارج مجال الحيز أو تغير في طبيعة حركته في الحيز.

a) الانتشار المتجانس ضمن الحيز :

مثال على ذلك انتشار المستحضر المشع بشكل متجانس في الحيز ضمن الأوعية وبقاؤه ضمن هذا الفراغ دون أن تغادره . مثال ذلك الكريات الحمر الموسومة بالـ ^{99m}Tc حيث تنتشر هذه الكريات في كامل الفراغ الوعائي وبشكل متجانس وهذا يسمح بإجراء بعض الدراسات المهمة مثل دراسة وظيفة العضلة القلبية حيث يمكن تسجيل تغيرات الفعالية المشعة فوق القلب خلال الانقباض والانبساط ونتمكن بذلك من إجراء حساب كمي للنتاج القلبي.

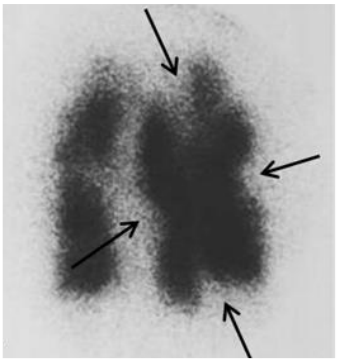
b) الانتشار غير المتجانس في الحيز :

في بعض الحالات قد تظهر المستحضرات المشعة انتشارا غير متجانس ضمن الحيز الذي تتواجد فيه وهذا يعكس وجود حالة مرضية ما. مثال على ذلك في حالة انتشار كريات حمراء موسومة في الحيز الوعائي للجسم وعند وجود ورم وعائي في منطقة ما من الجسم مما يسبب وجود زيادة في حجم الدم في هذا الورم مقارنة مع النسج المجاورة والصورة الومضانية المسجلة فوق المنطقة تبدي زيادة في كمية الكريات الحمر الموسومة . شكل-1 .



الشكل -1 صورة ومضانية للطرفين السفليين بعد حقن كريات حمر موسومة بالـ ^{99m}Tc . يشاهد زيادة في تركيز الكريات الحمر في منطقة قريبة من الركبة اليمنى (السهم).

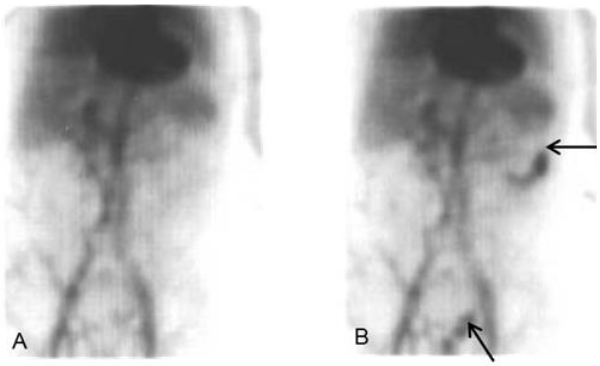
من جهة أخرى قد يكون عدم التجانس على شكل نقص في كثافة المستحضر المشع في المنطقة وهذا ينتج عن وجود عائق يمنع من انتشار المستحضر إلى هذه المنطقة. مثال على ذلك عند دراسة التهوية الرئوية باستخدام غاز الكزينون-133 المشع ، في الحالة الطبيعية يجب أن ينتشر الغاز المشع بشكل متجانس ضمن حيز القصبات الهوائية وفي حال وجود أي انسداد قصبي في أي مستوى من تفرعات القصبات سيمنع دخول الغاز أو يقلل من دخوله وستظهر المنطقة على الصورة الومضانية ذات تركيز ضعيف للمستحضر المشع . الشكل-2



الشكل-2 صورة ومضانية للرئتين بعد استنشاق غاز الكزينون المشع -133 . تظهر مناطق لم يصل لها الغاز المشع بسبب وجود انسداد في القصبات المحيطية.

c) التسرب من الحيز :

في بعض الحالات المرضية يحدث تسرب لمكونات الحيز إلى خارج فراغه . ولذلك يمكن بمساعدة العقاقير المشعة تحديد مكان التسرب . مثال ذلك في حالات النزف الهضمي يحدث خروج للدم من الفراغ الوعائي وتجمعه في القناة الهضمية ، وبمساعدة الكريات الحمر الموسومة يمكن تحديد مكان النزف بسهولة . شكل-3

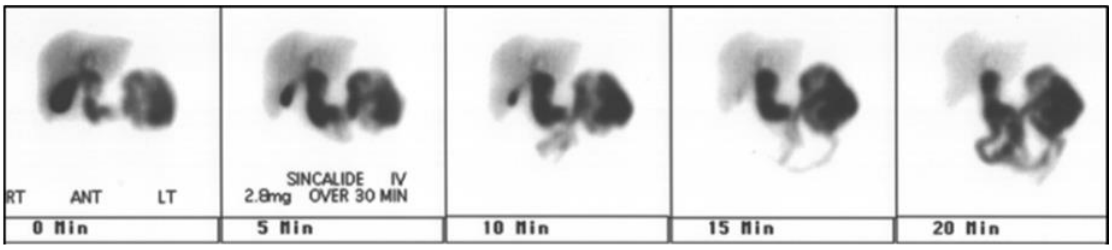


الشكل-3 صورة ومضانية لمنطقة البطن بعد حقن كريات حمر موسومة . (A) حالة طبيعية تتواجد الكريات الحمر فقط ضمن الحيز الوعائي . (B) منطقتان من زيادة تركيز الكريات الحمر الموسومة في منطقتين من الكولون النازل.

d) الحركة ضمن الحيز:

في بعض الحالات يمكن تقييم الحالة المرضية بدراسة معدل الجريان في الحيز أو اتجاهه أو كميته. مثال يمكن تشخيص القلس المعدي المريئي (عودة الطعام من المعدة إلى المري) بتتبع حركة مستحضر مشع متواجد في حيز المعدة والذي يجب أن يتحرك في الحالة الطبيعية باتجاه الأمعاء وليس بشكل راجع نحو المري .

مثال آخر مهم على دراسة حركة الواسم ضمن الحيز دراسة حركة المستحضر المشع ^{99m}Tc HIDA في حيز الجملة الصفراوية . شكل -4



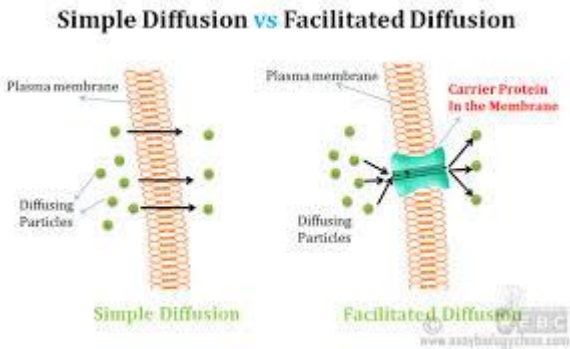
الشكل -4 دراسة ومضانية للجملة الصفراوية باستخدام مستحضر ^{99m}Tc-HIDA . صور ومضانية مسجلة في فواصل زمنية / كل 5 دقائق / تظهر حركة الواسم ابتداء من الكبد حتى الأمعاء.

2) الانتشار السلبي أو المنفعل Passive Diffusion

وهو الحركة العشوائية للجزيئات بين حيزين حتى تحقيق تركيز متساوي لهذه الجزيئات في الحيزين. وفي النظم البيولوجية تتم هذه الحركة عبر الأغشية حيث تتحكم فيها عوامل عدة منها : قابلية الانحلال في الليبيدات ، درجة pH الحالة الشاردية Ionization ، حجم الجزيئات. بطبيعة الحال يتعلق أيضا بوجود تروية دموية كافية للمنطقة تؤمن وصول الجزيئات بتركيز جيد حتى تحدث عملية النقل هذه. من الأمثلة المهمة على هذه الآلية الدراسة الومضانية للتروية الدموية للدماغ باستخدام المستحضر المشع ^{99m}Tc Exametazime (HMPAO). حيث يؤمن الجريان الدموي وصول المستحضر إلى النسيج الدماغي ، بعدها يحدث النقل والانتشار إلى داخل الخلية العصبية لأن هذا الجزيء ينحل للدسم (Lipophilic) وفي داخل الخلية يتحول بفعل الاستقلاب الأنزيمي إلى جزيء ينحل بالماء (hydrophilic) مما يمنع خروجه من الخلية ويحتجز داخلها.

3) العبور الميسر Facilitated Diffusion :

هو نوع من النقل عبر الأغشية يتم بواسطة حوامل خاصة تقوم بحمل الجزيء ومساعدته على الانتقال عبر الغشاء. وكل حامل من هذه الحوامل متخصص بنقل نوع خاص من الجزيئات . أن عملية النقل هذه يمكن أن تثبط بوجود جزيئات شبيهة تنافس هذه الجزيئات على هذه الحوامل .الشكل-5

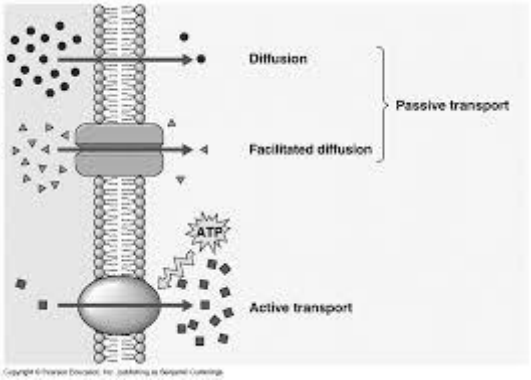


الشكل -5 رسم تخطيطي يظهر الفرق بين الانتشار البسيط والانتشار الميسر

المثال الرئيسي على هذه الآلية هي عملية نقل الغلوكوز . حيث ينقل الغلوكوز عبر جدار الخلية بواسطة بروتين ناقل خاص هو (GLUT) والمستحضر المشع ^{18}F Deoxyglucose (FDG) يدخل إلى الخلية بنفس الطريقة . بعد دخول الغلوكوز والـ FDG تتم فسفرتهما بواسطة أنزيم Hexokinase والغلكوكوز المفسفر Glucose-6-phosphate يتابع في الطريق الاستقلابي المعتاد ، أما ناتج فسفرة FDG فلا يتابع هذا الطريق ويحبس ضمن الخلية . الجدير ذكره أن هذين الجزيئين يتنافسان على الناقل (GLUT) ومن الضروري ضبط مستوى السكر في الدم إذا كان مرتفعا قبل إجراء الدراسة الومضانية بالـ FDG .

4) النقل الفعال Active Transport

هو أحد أشكال النقل عبر الأغشية بواسطة حوامل نوعية ويختلف عن النقل الميسر بأنه عملية تحتاج لطاقة تؤمن من جزيئات ATP ، لذلك يمكن أن نطلق اسم المضخة على هذه الحوامل أو الناقلات. هذا النقل الفعال يؤمن عبور الجزيئات ضد فروق التركيز ، (أي يتم النقل من منطقة ذات تركيز منخفض إلى منطقة عالية التركيز). من الأمثلة التقليدية على هذا النقل عبور نظائر اليود المستقرة أو المشعة إلى خلايا الغدة الدرقية بواسطة ناقل نوعي هو Na^+ / I^- Symporter وتركيزها ضمن الخلية بمستويات عالية مقارنة مع مستواها في الدم. ولذلك يمكن استخدام نظائر اليود المشع في دراسة الوظيفة الدرقية. يجب ملاحظة أن وجود تركيز عال من اليود في الدم ناتج عن حقن مادة ظليلة شعاعياً يمكن أن تنافس اليود المشع على العبور بواسطة الناقل النوعي له وتقلل كثيرا من عبوره. الشكل-6



الشكل-6 رسم تخطيطي يظهر الفرق بين أشكال الانتشار الثلاثة.

مثال آخر على النقل الفعال عبور جزيئات ^{201}Tl Cl المستخدم لدراسة تروية العضلة القلبية ، حيث أن شاردة التاليوم لها شحنة موجبة (Tl^+) شبيهة بشاردة البوتاسيوم وبالتالي يمكن أن تدخل الخلية القلبية بواسطة مضخة الصوديوم / بوتاسيوم (K^+ / Na^+ pump) .

5) الرشح Filtration

الرشح هو عملية عبور الجزيئات عبر مسامات أو قنيات تحت تأثير فرق الضغط الحلولي. وأهم مثال عليه الرشح الكبي في الكلية. يتحكم في عملية الرشح عاملين أساسيين : أولهما حجم الجزيئات مقارنة مع حجم المسام والعامل الثاني يجب أن تكون هذه الجزيئات حرة في البلاسما وليست مرتبطة على أي بروتين. إن عملية الرشح عملية غير مستهلكة للطاقة ولا تحتاج لعوامل ناقلة أو مستقبلات .

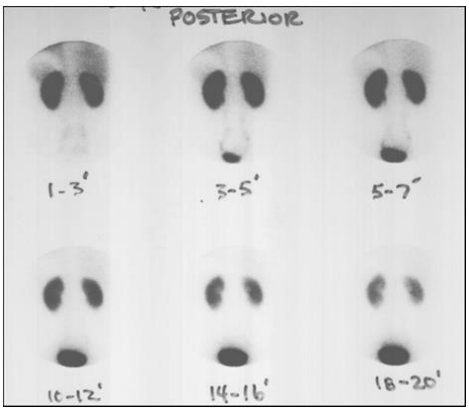
من الأمثلة المهمة على هذه الآلية دراسة الوظيفة الكلوية بواسطة بعض المستحضرات المشعة التي تطرح بآلية الرشح الكلوي Renal Filtration . رغم أن العديد من المستحضرات المشعة المستخدمة بمختلف الفحوص تطرح عن طريق الرشح الكبي ولو بشكل جزئي ، فإن المستحضر المستخدم لدراسة وتقييم الوظيفة الكلوية وقياس معدل الرشح الكبي هو المستحضر – ^{99m}Tc DTPA (diethylene-triamine-pentaacetic acid) .

6) الإفراز Secretion :

هو شكل من أشكال النقل الفعال إلى خارج الخلايا .مثال ذلك إفراز حمض كلور الماء من بعض الخلايا في المعدة , إفراز بعض المواد بواسطة الأنابيب الكلوية إلى البول ، إفراز بعض المواد من قبل الخلية الكبدية إلى القنوات الصفراوية.

مثال على ذلك دراسة وظيفة الأنابيب الكلوية المستحضر المشع (^{99m} Tc mertiatide MAG3) هذا المستحضر يفرز من قبل خلايا الأنابيب الكلوية ويطرح في البول. الشكل-7

مثال آخر على استخدام آلية الإفراز هو دراسة وظيفة الخلية الكبدية والجملة الصفراوية باستخدام المستحضر المشع (^{99m} Tc IDA (disofenin .الذي يستخلص من الدم ويفرز إلى الجملة الصفراوية.

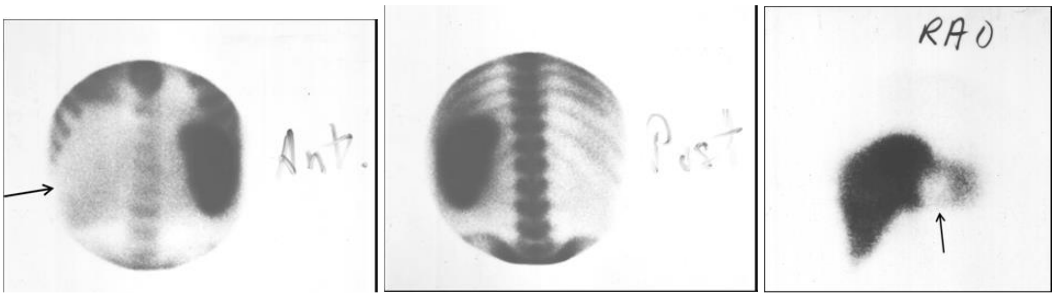


الشكل-7 دراسة وظيفية ومضانية للكليتين باستخدام المستحضر المشع ^{99m}Tc MAG3 . يلاحظ الاستخلاص السريع للمستحضر من الدم وطرحه في البول .

7) البلعمة الخلوية Phagocytosis :

وهي عملية تقوم بها خلايا الشبكة البطانية الداخلية Reticuloendothelial Cells . هذه الخلايا تتواجد بشكل أولي في الكبد والطحال ونقي العظم كما يمكن أن تتواجد في الأعضاء الأخرى في ظروف استثنائية ، وظيفتها قنص و ابتلاع الأجسام الغريبة و الكريات الدموية المتفككة . حيث ترسل الخلية استطالات تحيط بالجزيء وتدخله ضمن وسطها الداخلي حيث يمكن أن تهضمها أو تغلفها وتحتفظ بها داخلها . هذه العملية الحيوية يمكن استغلالها لإجراء دراسة ومضانية للكبد والطحال بواسطة مستحضر مشع على شكل غروي هو ^{99m} Tc Sulfer Colloid . ينتشر هذا النوع من الخلايا في الكبد والطحال بشكل متجانس مع المكونات الخلوية

الأخرى لهذين العضوين. فالمناطق التي تغيب فيها هذه الخلايا بسبب وجود ورم أو خراج أو كيسات تظهر على شكل مساحات باردة في بارانشيم الكبد. كما أنه في حال إصابة الكبد بالتشمع فإن توزع هذه الخلايا يضطرب وتضعف وظيفتها مما يسبب ضعف تثبيت شامل لهذا المستحضر المشع وحدوث زيادة في تراكمه في الطحال ونقي العظم. شكل -9



(b) (a)

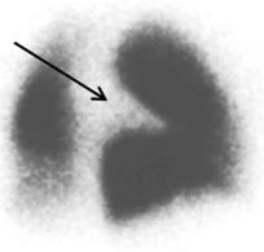
الشكل -9 دراسة ومضانية للكبد بواسطة ^{99m}Tc Sulfur Colloid . (a) كيسة كبدية تظهر على شكل منطقة باردة . (b) تشمع كبد يظهر غياب شبه تام لتثبيت المستحضر في الكبد وزيادة في التثبيت في الطحال ونقي العظم.

8) قفل الأوعية الشعرية Capillary Blockade

الأوعية الشعرية هي صلة الوصل بين الدوران الشرياني والدوران الوريدي والتي يبلغ قدرها حوالي 7 ميكرون وعبر جدارها يتم تبادل الجزيئات المختلفة في الاتجاهين .

وفي الرئتين تفصل هذه الشبكة بين الدوران القلبي الأيمن والأيسر وعبر جدارها يتم التبادل الغازي . ولذلك تعتبر كمرشح بين الدوران الوريدي والدوران الشرياني . هذه الآلية يمكن استخدامها لدراسة التروية الدموية الرئوية عن طريق " تصميم Embolization " عدد قليل من أوعية الشبكة الشعرية بجسيمات موسومة قابلة للتحلل بحيث يكون حجمها أكبر بقليل من أقطار هذه الأوعية والتي يتراوح قطرها بين 10 -90 ميكرون والتي تحقن في الوريد ليتم إيقافها في الشبكة الشعرية الرئوية . مما يتيح لنا تسجيل صور ومضانية تعكس التوزع المكاني للتروية الدموية الرئوية .

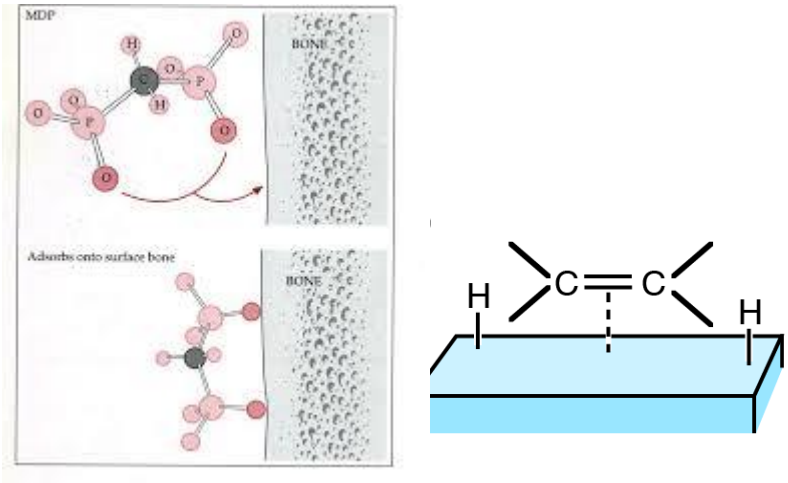
يستخدم لهذا الغرض المستحضر المشع (^{99m}Tc MAA (macroaggregated albumin وهو عبارة عن ألبومين مكثف لجسيمات كبيرة لتعلق في الشبكة الشعرية للرئة ، والتي تتم بلعمتها فيما بعد خلوياً وإزالتها من الشبكة الوعائية. إن عدد الجزيئات في المستحضر المشع يجب ألا يغلق إلا عدداً محدوداً من الأوعية الشعرية حتى لا يتأثر الدوران الدموي في الرئة. في حالات وجود صمة رئوية تحدث إعاقة تمنع جزيئات المستحضر المشع من الوصول إلى الأوعية الشعرية في المنطقة التي تتغذى من الشريان المسدود وتظعلر على شكل منطقة باردة . الشكل-10



الشكل-10 صورة ومضانية للرئتين باستخدام المستحضر المشع ^{99m}Tc MAA تظهر منطقة باردة بشكل المثلث كدليل على وجود صمة رئوية.

9) الامتصاص الكيميائي Chemisorption

الامتصاص الكيميائي هو نوع من الادمصاص Absorption والذي يتم فيه حصول تفاعل كيميائي بين سطح الامتصاص والعامل الممتص . شكل –11



شكل -11 رسم تمثيلي يظهر آلية الامتصاص الكيميائي .

وأهم مثال على هذه الآلية ارتباط جزيئات المستحضر المشع (^{99m}Tc MDP Methylendiphosphate) المستخدم في الدراسة الومضانية للعظام. وبسبب هذا التوضع السطحي للمستحضر والذي يعكس المناطق السطحية يحدث زيادة في التثبيت عند حدوث زيادة في الاستقلاب العظمي المرافق للأورام أو الالتهابات أو الكسور .

10) التبادل الشاردي Ion Exchange

في هذه الآلية يتم تبادل شاردة كيميائية بأخرى من نفس الزمرة الكيميائية وخاصة في الجزيئات البلورية . والمثال التقليدي على ذلك استبدال جزيئات الكالسيوم Ca^{+2} بجزيئات السترونسيوم Sr^{+2} في جزيئات الهيدروكسي أباتيت Hydroxyapatite في نسيج العظم .

والمستحضر المشع الذي يعتمد على هذه الآلية في توضعه هو كلورالسترونسيوم-89 ^{89}Sr (Cl) الذي يستخدم لمعالجة النقائل الورمية العظمية.

11) الارتباط على المستقبلات Receptor Binding :

هذه الآلية تشير إلى ارتباط جزيء ما على مستقبل نوعي على سطح الخلية على مبدأ " القفل والمفتاح " . والمثال التقليدي لهذه الآلية بالارتباط هو ارتباط جسم ضدي أو جزء منه على مستضد نوعي ، والمثال الآخر هو ارتباط بعض الببتيدات أو الهرمونات أو جزيئات مشابهة للناقلات العصبية على مستقبلات نوعية لها. أهم خصائص آلية الارتباط هذه أنها نوعية ، إمكانية تثبيطها بجزيئات مشابهة وإمكانية حصول حالة إشباع للمستقبلات. من الأمثلة على المستحضرات المشعة التي تعتمد في تراكمها على هذه الآلية الجسم الضدي وحيد النسيلة هو ^{111}In-Capromab Pendetide الذي يرتبط على مستضد نوعي على خلايا سرطان البروستات. والذي يستخدم في متابعة مرضى سرطان البروستات.

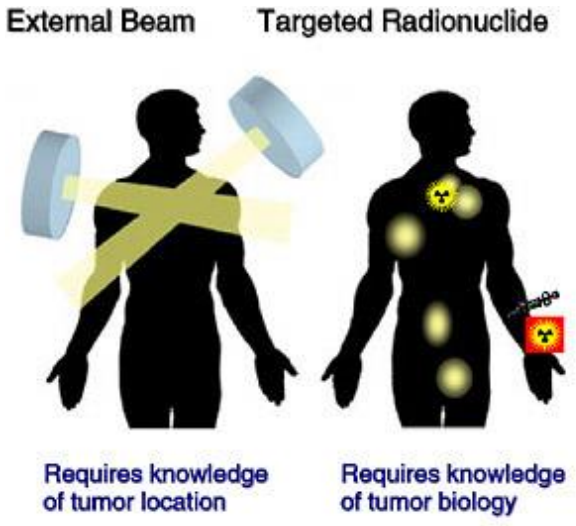
النظائر المشعة العلاجية

Therapeutic Radionuclides

تستخدم المعالجة الإشعاعية ، إحدى الخيارات الرئيسية لمعالجة الأورام السرطانية ، الأشعة المؤينة Ionizing Radiation لقتل الخلايا السرطانية وتصغير حجم الورم عن طريق إحداث أذية غير قابلة للإصلاح في جزيئات DNA في نواة الخلية ، والذي يؤدي إلى إيقاف والانقسام والتكاثر في هذه الخلايا. الطريقة الشائعة في تشعيع الأورام السرطانية هي توجيه حزم إشعاعية من خارج الجسم حيث يمكننا تعريض منطقة محددة من الجسم التي يقع فيها النمو الورمي. ولتحقيق الشرط المثالي للمعالجة الإشعاعية : إيصال أكبر كمية من الجرعة الإشعاعية في الهدف (الورم) والتقليل من تعرض النسج السليمة المجاورة ، نلجأ إلى استخدام تقنيات تشعيع مختلفة وأنواع متنوعة من الإشعاعات.

المعالجة الهدفية بالنظائر المشعة ، شكل من أشكال المعالجة الإشعاعية نستخدم فيها عناصر مشعة أو جزيئات موسومة بعناصر مشعة ذات خواص فيزيائية وحيوية معينة تحقن في الجسم نستهدف من خلالها خلايا الورم السرطاني أينما كان موضعها في الجسم حيث يتم تعريض هذه الخلايا للإشعاع الصادر من النظير المشع للوصول إلى مستوى من الجرعة الإشعاعية قادر على قتل هذه الخلايا ، مع الحفاظ على تعرض الخلايا السليمة في الحدود الدنيا. يمكن اعتبار هذا النوع من المعالجة معالجة إشعاعية جهازية . قد تستخدم في بعض الأحيان جزيئات حاملة للنظير المشع لها أثر علاجي على الخلايا الورمية ، وبذلك يضاف الأثر الإشعاعي للنظير المشع على الأثر الدوائي للحامل ونحصل على فائدة علاجية أفضل.

تتميز هذه المعالجة بقدرتها على استهداف الورم الأولي والورم الثانوي في نفس الوقت ويتطلب تطبيقها بشكل رئيسي فهم بيولوجيا الورم الخبيث أكثر من تحديد موقعه ، في حين تحديد موقع الورم يحتل الأفضلية عند تطبيق المعالجة الإشعاعية الخارجية. الشكل-1 .



الشكل -1

يوضح الفرق بين المعالجة الإشعاعية الخارجية والمعالجة الهدفية بالنظائر المشعة.

1. العقاقير المشعة العلاجية Therapeutic Radiopharmaceuticals :

عدد من النظائر المشعة يمكن استخدام أملاحه للعلاج ، مثلاً : ^{131}I-Na أو ^{89}Sr-Cl . وبعضها يجب ربطه كيميائياً مع بعض المركبات الكيميائية أو الجزيئات الحيوية التي تقوم بدور الحامل لها لإيصاله إلى الخلايا المستهدفة. وأهم الجزيئات الحاملة المستخدمة في هذا المجال الأجسام الضدية وخاصة الأجسام الضدية وحيدة النسيلة Monoclonal antibodies وأجزائها والببتيدات الصغيرة .

يجب أن تحقق النظائر المشعة المستخدمة للمعالجة الشروط التالية :

- أن تكون قادرة على إصدار أشعة لها أثر بيولوجي علاجي وهي بشكل خاص النظائر المشعة التي تصدر أشعة ألفا أو بيتا أو إلكترون Auger .
- عمر نصف مناسب (طويل نسبياً) بحيث يتوفر الوقت الكافي لإنتاج هذا العنصر وشحنه وتطبيقه وتراكمه في الهدف وبقائه فيه مدة كافية ليعطي الفعل العلاجي.
- القدرة على الارتباط مع الجزيئات الحيوية المختلفة والتي تعمل كحامل لهذا النظير لتوصله إلى الهدف.

هنالك العديد من النظائر المشعة التي تستخدم حالياً وأهمها :

- اليود-131 (^{131}Iodine) :من أكثر العناصر المستخدمة في المعالجة الهدفية بالنظائر المشعة وأهم مميزاته :
  - خواص فيزيائية مناسبة : عمر نصف مناسب ($T_{1/2}$ = 8.1 days) .إصداره أشعة بيتا (600 MeV) ، تفيد في المعالجة وأشعة غاما تسمح بتسجيل انتشاره بالجسم بأجهزة القياس.
  - سلوكه الحيوي : حيث يتراكم بشكل طبيعي في النسيج الدرقي الوظيفي.مما يتيح استخدامه في علاج عدد من أمراض الغدة الدرقية.
  - إمكانية ربطه مع العديد من المركبات الكيميائية والجزيئات الحيوية مما يسمح بزيادة طيف الحالات التي يمكن معالجتها بواسطته.
- السماريوم-153 (^{153}Samarium) :أهم مميزاته :
  - إصدار أشعة بيتا ذات طاقة 810 KeV .
  - عمر نصف : 1.95 days .
  - يمكن ربطه مع مركبات الديفوسفونات التي تحمله إلى النسيج العظمي.
- السترونسيوم -89 (^{89}Strontium) :أهم مميزاته :
  - إصدار أشعة بيتا ذات طاقة 1460 KeV
  - عمر نصف : 50.5 days .
  - قدرته على التراكم في النسيج العظمي.
- اليتريوم-90 (^{90}Yttrium) :أهم مميزاته :
  - إصدار أشعة بيتا ذات طاقة 2300 KeV
  - عمر نصف : 64 h.

- قدرته على الارتباط مع العديد من الجزيئات.

- الفوسفور -32 (^{32}Phosphorous) :أهم مميزاته :
  - إصدار أشعة بيتا ذات طاقة 1710 KeV
  - عمر نصف : 14.3 day .

2. طرق تطبيق المعالجة بالنظائر المشعة :

هناك طريقتان لتطبيق المعالجة النظائر المشعة :

- المعالجة الجهازية Systemic therapy : وفيها يعطى العقار المشع عن طريق الوريد أو الفم ، حيث ينتشر في الجسم ويتراكم في خلايا الورم المستهدف. وهذا التراكم يمكن أن يتم داخل الخلية أو على سطحها أو في الحيز بين الخلايا.
- المعالجة الموضعية Local therapy : وهنا يتم إيصال العقار المشع مباشرة إلى الورم ، إما عن طريق الحقن الشرياني أو الحقن اللمفاوي أو الحقن ضمن الأجواف أو الحقن في الورم مباشرة.

3. استطبابات المعالجة بالنظائر المشعة

1) أمراض الغدة الدرقية :

تملك خلايا النسيج الدرقي الطبيعي وخلايا سرطان الدرق المتمايز القدرة على قبط اليود بشكل فعال بسبب وجود مضخة اليود-الصوديوم في غشاءها الخلوي Sodium-Iodide Symporter مما يسمح بالحصول على تركيز مرتفع لليود في هذه الخلايا.

يستطب اليود المشع في معالجة العديد من أمرض الغدة الدرقية السليمة والخبيثة.

- أمراض الغدة الدرقية السليمة :

يستخدم اليود المشع لعلاج الحالات التالية :

- فرط نشاط الغدة الدرقية الناتج عن مرض غريفز أو العقد الدرقية السمية.
- الدراق العقدي في حال وجود مضاد استطباب جراحي.

قبل إعطاء المعالجة باليود المشع لابد من تشخيص المرض سريرياً ومخبرياً ، ومن المهم إجراء التفريسةالومضانية للغدة الدرقية .يعطى اليود -131 بجرعة تتراوح بين 5-30 mCi .

– سرطان الدرق :

يشمل التصنيف النسيجي لسرطان الدرق أربعة أنواع رئيسية هي : الحليمي (65%) الجريبي (25%) اللامصنع (5%) واللبي (10%) . ومن المعروف أن خلايا سرطان الدرق الحليمي والجريبي لها القدرة على قبط اليود-131.

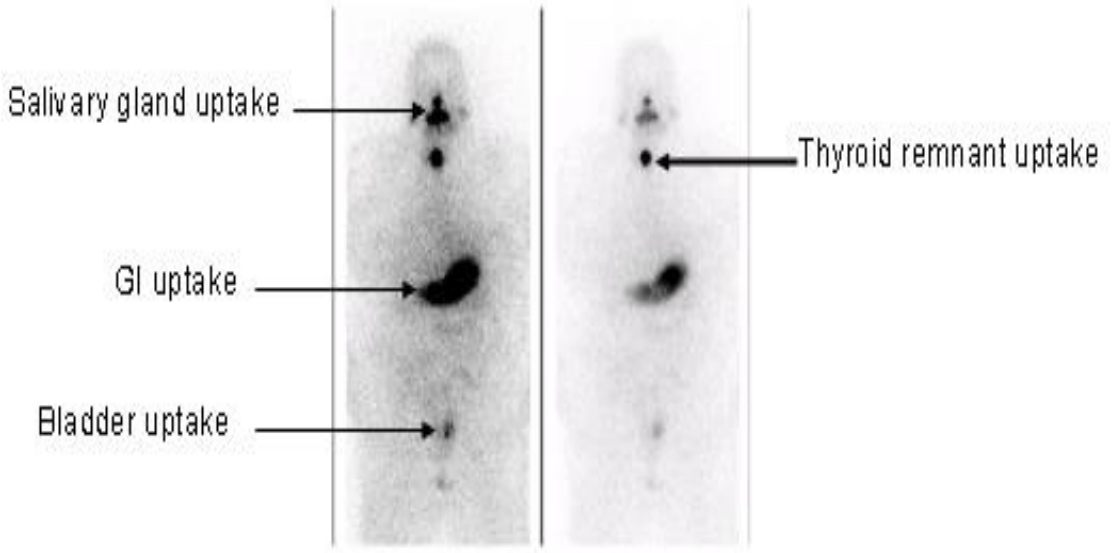
يتظاهر سرطان الدرق بشكل عقدة درقية . قد يتظاهر المرض بنقائل في العقد الرقبية أو بنقائل بعيدة.

لليود المشع -131 دور مهم في سرطان الغدة الدرقية المتمايز (الحليميوالجريبي) يعطى اليود المشع -131 بعد إجراء الاستئصال التام للغدة الدرقية بهدف الاستئصال الإشعاعي لبقية النسيج الدرقي في مسكن الدرق.

تعطى المعالجة باليود المشع عادة بعد الاستئصال الجراحي التام أو تحت التام للغدة الدرقية مع بدون تجريف للعقد اللمفاوية في العنق كعلاج متمم بهدف القضاء على بقايا النسيج الورمي لتخفيف نسبة النكس أو النسيج الدرقي الطبيعية المتبقي لتحسين ظروف متابعة المريض على المستوى البعيد.

قبل تطبيق المعالجة يفضل إجراء مسح ومضاني (للعنق أو كامل الجسم) والذي يساعد على تحديد حجم النسيج الدرقي الباقي ونسبة تثبيت اليود فيه مما يسمح بتقدير الجرعة اللازمة للمعالجة . الشكل-2

تعطى عادة جرعة وحيدة من اليود-131 عن طريق الفم تتراوح بين 30-150 mCi .



الشكل –2 صورةومضانية لكامل الجسم باليود-131 . يشاهد تثبيت طبيعي لليود المشع في الغدد اللعابية والغشاء المخاطي للمعدة في النسيج الدرقي المتبقي بعد الاستئصال الجراحي.

قبل إعطاء الجرعة العلاجية لابد من إحداث حالة تنبيه قصوى بالهرمون النخامي المنبه للدرق TSH الذي يرفع من مستوى تثبيت اليود في النسيج الدرقي المستهدف ويتم ذلك عن طريقين :

- الطريق الداخلي : حيث يوقف إعطاء هرمون الدرق (Thyroxin) للمريض مما يزيد من مستوى TSH .
- الطريق الخارجي : حقن Recombinant TSH عضلياً وهو هرمون مصنع.

يعطى اليود المشع أيضاً لعلاج النقائل الورمية من سرطان الغدة الدرقية

2) المعالجة الملطفة للنقائل الورمية العظمية :

يعتبر حدوث النقائلالورمية إلى العظام من التطورات المهمة التي تحدث في العديد من الأورام الخبيثة وخاصة سرطانات البروستات والثدي و الرئتين. والتي تترافق مع العديد من الأعراض والمضاعفات المهمة كالألم والكسور المرضية وارتفاع كالسيوم الدم وانضغاط النخاع الشوكي.

ينتج الألم العظمي في النقائل بسبب حدوث كسور مجهرية وحدوث تمدد للسمحاق كما أن بعض السيتوكينات التي تفرزها الخلايا اللمفاوية المحيطة بالورم البروستاغلاندينوالبراديكينين تلعب دوراً مهما. و الأثر الملطف للعلاج الشعاعي ناتج عن التأثير على هذه الخلايا.

هناك وسائل عديدة لعلاج النقائل الورمية العظمية تشمل المعالجة المسكنة والعلاج الكيميائي والشعاعي. وتشكل المعالجة بالنظائر المشعة وسيلة مهمة لمعالجة هذه النقائل وخاصة المتعددة والمنتشرة. وأهم النظائر المشعة المستخدمة السترونسيوم-89 والساماريوم-153 المرتبط مع مركبات الدي فوسفونات والفوسفور-32.

3) المعالجة بالفوسفور المشع / احمرار الدم مجهول السبب Polycythamiavera :

من الأمراض النادرة مجهولة السبب يتميز بزيادة بفرط تنسج نقي العظم وزيادة عدد الخلايا الناضجة والخلايا النقوية وانتشار النقي الأحمر في العظام الطويلة ، ويترافق بزيادة إنتاج كريات الدم وخاصة الحمراء.

إضافة للمعالجة بفصد الدم والمعالجة الكيميائية يمكن علاج هذه الحالة بالفوسفور المشع P^{32} الذي يتراكم في خلايا نقي العظم.

4. المعالجة المناعية الإشعاعية (المعالجة بالأجسام الضدية المشعة) / اللمفوما :

يشاهد المستضد CD-20 على سطح الخلايا طليعة الخلايا اللمفاوية البائية Pre-B lymphocytes والخلايا للمفاوية البائية الناضجة وأكثر من 90% من الخلايا اللمفاوية البائية في ورم لاهودجكن ، هذا المستضد يمكن استهدافه بأجسام ضدية وحيدة النسيلة Monoclonal antibodies وهذا الارتباط المناعي بين المستضد والجسم الضدي يحفز حدوث الموت االخلوي المبرمج . ويمكن ربط الأجسام الضدية بنظائر مشعة بحيث يضاف للفعل المناعي أثر إشعاعي وتسمى هذه المعالجة " المعالجة المناعية – الإشعاعية Radio-immunotherapy "

وأهم العناصر المشعة المستخدمة لوسم الأجسام الضدية للمستضد CD-20 هي اليود-131 أو اليتريوم-90 تستخدم هذه الطريقة في المعالجة كخط علاجي أول أو في الحالات التي لا تستجيب للعلاج الكيميائي التقليدي.

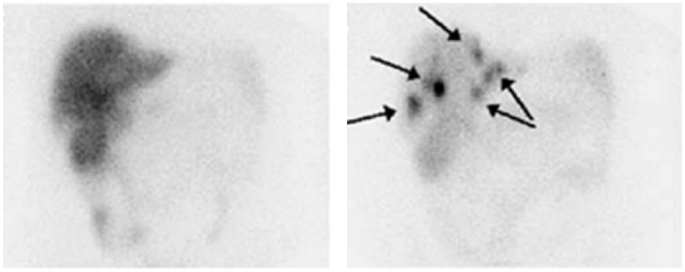
4) المعالجة بالببتيدات المشعة / الأورام الغدية العصبية :

الأورام الغدية العصبية مجموعة من الأورام تنشأ على حساب الخلايا المفرزة للهرمون في الجهاز الغدي-العصبي المكون من خلايا غدية وخلايا عصبية. وهو ينتشر في أماكن متعددة من الجسم وخاصة في الجهاز الهضمي والرئتين والكظر . تصنف هذه الأورام حسب العضو الذي تنشأ منه كما تصنف إلى أورام جيدة التمايز وهي ذات إنذار جيد وأورام سيئة التمايز وإنذارها سيء. إذا تم تشخيص هذه الأورام بشكل مبكر فإن الاستئصال الجراحي غالباً ما يكون شافياً. لكن وجود أعراض متعددة وغير نوعية تسببها هذه الأورام وخاصة الناتجة عن نوعا الهرمون الذي

تفرزه خلايا هذه الأورام يجعل تشخيصها مبكراً بالغ الصعوبة وبالتالي غالباً ما تشخص في أطوارها المتقدمة. (50% من الحالات).

توجد على سطح خلايا النسيج الغدي – العصبي مستقبلات خاصة بهرمون السوماتوستاتينSomatostatin الذي يلعب دورا مهما في كبح إفراز الهرمون من هذه الخلايا وهي تتواجد بكثافة على سطح الخلايا الناتجة عن هذه الأورام. ولم يستخدم هرمون السوماتوستاتين في معالجة هذه الأورام بسبب قصر عمره الفعال واستخدمت بدائل نظيرة له تستطيع الارتباط على مستقبلاته وتقوم بنفس عمله وأهمها ببتيدOctreotide . الذي يلعب دوراً مهماً في علاج هذه الأورام . إن إمكانية وسم هذا الببتيد بنظائر مشعة أعطى الفرصة لإمكانية تشخيص هذه الأورام ومعالجتها معالجة هدفية بالنظائر المشعة.

يستخدم لعلاج هذه الأورام العقار المشع ^{90}Y-Octreotide وهو ذو فعالية جيدة وخاصة في حال وجود بؤر ورمية متعددة أو نقائل بعيدة. الشكل -3

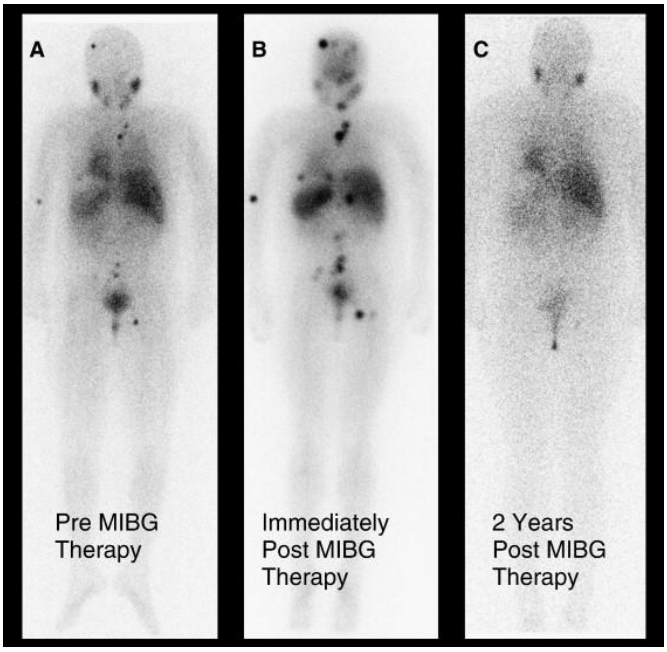


الشكل - 3صورةومضانية باستخدام ^{111}In-Octreotideلمريض مصاب بورم غدي عصبي في البنكرياس حيث تشاهد نقائل كبدية متعددة ، بعد المعالجة بالـ ^{90}Y-Octreptide تشاهد حدوث استجابة تامة واختفاء هذه النقائل.

5) المعالجة بالـ MIBG / الورم القتاميني Pheochromocytoma

ورم ينشأ على حساب خلايا الكرومافين في لب الكظر ويتظاهر بأعراض وعلامات سريرية ناتجة عن فرط إفراز الكاتيكولامينات (الأدرينالين والنور أدرينالين والدوبامين) ، وقد ينشأ على حساب خلايا الكرومافين خارج الكظر.

من المعروف قدرة هذه الأورام على تثبيت العقار المشع ^{131}I-metaiodobenzyguanidine (MIBG) وبالتالي يمكن استخدامه كأحد العقارات العلاجية وخاصة في حال تعذر العلاج الجراحي ووجود نقائل بعيدة. الشكل -4 .



الشكل –4 مريض مصاب بورم قتاميني مع نقائل متعددة . معالجة بالـ ^{131}I-MIBG .

Principles of radiation protection مبادئ الوقاية الإشعاعية

1) Introduction مقدمة

إن التعامل مع المنابع المشعة في المجال الطبي إن كان في التشخيص أو المعالجة ينتج عنه نسبة من التعرض الإشعاعي المزمن للعاملين والذي قد يسبب بعض الأخطار الجسدية . وقد أدى الجهل بتأثيرات الإشعاعات على الجسم في البدايات إلى التعامل معها دون أية إجراءات وقائية مما سبب تعرض الكثير من الذين عملوا في هذا المجال لآثارها الضارة ومات الكثير منهم نتيجة ذلك.

2) أهداف الوقاية الإشعاعية Purposes of radiation protection

الغرض الأساسي من الوقاية الإشعاعية يمكن اختصارها بالنقاط التالية :

- التعرف المبكر على أخطار التعامل مع الإشعاعات المؤينة
- وضع الإجراءات المناسبة لتقليل التعرض الإشعاعي إلى الحد الأدنى.وذلك من أجل حماية العاملين والمرضى وعموم السكان من التعرض لجرعات إشعاعية قد تسبب الضرر لهم .
- حماية البيئة من إمكانية حدوث التلوث الإشعاعي.

هناك هيئات على المستوى الوطني والدولي تقوم بوضع الأسس والقواعد الناظمة للتعامل الآمن مع مصادر الإشعاعات المؤينة والتي تضع الحدود القصوى للتعرض الإشعاعي المسموح به ، كما تقوم بعمليات مراقبة الالتزام بقواعد الوقاية الموضوعة.

3) الأسس الفيزيائية Physical basics

1. التأثير المتبادل بين الأشعة المؤينة والمادة Radiation-matter interaction

عند اختراق الأشعة لوسط مادي ما ، تحدث عمليات تغير الأشعة والمادة بنفس الوقت. نتيجة انتقال جزء أو كامل طاقة الإشعاعي إلى جزيئات الوسط الذي تجتازه . فالتغيرات التي تصيب المادة تشمل الإثارة ، والتأين و لذلك تسمى الأشعة المؤينة . أما التأثيرات التي تصيب الأشعة تشمل في الغالب تغيير اتجاهها وحدوث ما يسمى انتثار الأشعة ، أو تضعيفها .

2. التحلل الجزيئي الإشعاعي Molecular radiolysis

نتيجة التأين والإثارة يحدث تفكك للجزيئات بما يسمى التحلل الإشعاعي مثلاً : يتجزأ الماء نتيجة التعرض للأشعة المؤينة إلى هيدروجين وأكسجين، والجزيئات العضوية تتفكك إلى هيدروجين ،و أول و ثاني أكسيد الكربون.

3. قياسات الجرعة الإشعاعية Radiation dose measurements

- **جرعة الطاقة الإشعاعية radiation dose unit**

جرعة الطاقة الإشعاعية التي تنتقل من الإشعاع إلى الوسط مصطلح يصف كمية الطاقة الممتصة في واحدة الوزن من مادة ما تعرضت لأشعة مؤينة. وواحدتها الغراي Gray وهي كمية الطاقة الممتصة مقدرة بالجول في واحدة الوزن (كغ).

$$1\ Gy = 1\ J/kg$$

إن قياس الجرعة الإشعاعية بشكل مباشر نظرياً يمكن أن يتم عن طريق قياس الحرارة التي تنتج عن امتصاص الطاقة ، ولكن هذا غير ممكن عملياً إلا في الجرعات الإشعاعية الكبيرة أما في الجرعات الإشعاعية المنخفضة فهو غير ممكن ، حيث أن جرعة إشعاعية قدرها 10 غراي ترفع

درجة الحرارة 0,001 درجة مئوية فقط. ولذلك نلجأ في مسائل الوقاية الإشعاعية لتقدير الجرعة الإشعاعية بشكل غير مباشر عن طريق قياس بعض الآثار التي تسببها الأشعة المؤينة على بعض الأوساط مثل الهواء.

– **جرعة التعرض Exposure dose**

وتحسب بقياس شحنة الأيونات السالبة والموجبة التي تولدها الأشعة الفوتونية في الوسط.
واحدتها (C/kg)كولومب/كغ . والوحدة القديمة لجرعة التعرض هي الرونتجن R .
وتستخدم لقياس هذه الجرعة حجرة التأين التي ورد ذكرها سابقاً.

4. قياس الإشعاعات في الوقاية الإشعاعية Dose monitoring

تساعدنا تقنيات قياس الأشعة بالحصول على قياسات مهمة عن الحقول الإشعاعية والمنابع المشعة. فعند استخدام المنابع الإشعاعية في المجال الطبي والمجالات الأخرى ، نحتاج لقياس الإشعاعات لمراقبة حدوث التعرض الإشعاعي الحادث أو المحتمل للأشخاص ، ولمراقبة أماكن العمل ، ووضع الضوابط الخاصة لمنع التعرض الإشعاعي. وهذه القياسات تسمى قياسات المراقبة الإشعاعية. ويجب على جميع العاملين من أطباء وفنيين ومهندسين ، والذين يتعاملون مع المنابع الإشعاعية المؤينة ، معرفة مبادئ هذه القياسات وإجراء بعض القياسات الأساسية أثناء ممارسة عملهم.

– **قياسات المراقبة الإشعاعية :**

هناك أربعة أنواع من القياسات المهمة التي تجرى لضبط التعرض الإشعاعي :

- قياسات الجرعة الإشعاعية في أماكن العمل.
- قياسات الجرعة الإشعاعية للأشخاص.
- قياسات التلوث الإشعاعي بالعناصر المشعة.
- قياسات التلوث الداخلي بالعناصر المشعة عند الأشخاص.

وفيا يلي سنستعرض أهم هذه القياسات والأجهزة الضرورية لإجرائها.

1) قياسات أماكن العمل : Area monitoring

وهي قياسات معدل الجرعة الإشعاعية في بيئة المصادر المشعة ، وخاصة في الغرف الموجودة فيها والأماكن القريبة منها ، التي يمكن للأشخاص أن يتواجدوا فيها. حيث يمكن من خلال هذه القياسات تحديد الجرعة الإشعاعية التي يمكن أن يتلقاها الشخص أثناء عمل أجهزة الأشعة ، وتحديد الأماكن التي يمكن أن تكون فيها معدلات الجرعة الإشعاعية عالية، وبالتالي اتخاذ الإجراءات اللازمة للوقاية .

2) قياس الجرعة الإشعاعية عند الأشخاص Personal monitoring

وهي قياس الجرعة الإشعاعية التي يتلقاها الشخص أثناء تعامله مع المصادر الإشعاعية ، عن طريق وسائل قياس يحملها الشخص أثناء ممارسة عمله. وهي تفيد لمراقبة الجرعة الشهرية والسنوية وضمان عدم تجاوزها للجرعات المسموح بها وتلافي الأمر عند وجود تعرض مهني كبير عن طريق دراسة ظروف العمل التي سببت ذلك.

3) قياس التلوث الخارجي External contamination monitoring

عند استخدام المواد المشعة بشكل مفتوح للتشخيص أو المعالجة كما هو الحال في أقسام الطب النووي ، قد يحدث تلوث غير مرغوب به في أماكن العمل أو للأشخاص العاملين. لذلك هناك أجهزة خاصة تفيد في كشف هذا التلوث وشدته وللتأكد من زواله بعض تنظيفه.

4) قياس التلوث الداخلي Internal contamination monitoring

عند حدوث تلوث أماكن العمل بالمواد المشعة ، من المحتمل دخول هذه المواد إلى جسم الأشخاص العاملين عن طريق الفم أو التنفس أو الجلد . ودخول هذه المواد إلى الجسم يسبب تعرضاً إشعاعياً داخلياً للشخص. ومراقبة التلوث الداخلي يتم باستخدام أجهزة خاصة ، تكشف وجود المواد المشعة في الجسم ونوعها وكميتها.

جميع أجهزة القياس المستخدمة لقياس الإشعاعات فيها جزء أساسي هو الكاشف الإشعاعي، وله أنواع مختلفة، وهي تعتمد في عملها على التأثير المتبادل الذي يحدث بين الأشعة والمادة ، والتي يحولها إلى إشارات أو ظواهر قابلة للقياس.

وأهم الآثار الفيزيائية التي نستغلها لقياس الأشعة هي :

- التغيرات في الناقلية الكهربائية لبعض الغازات أو أنصاف النواقل.حيث تعبر شدة التيار عن الجرعة الإشعاعية.
- حدوث إصدار ضوئي عند تعرض بعض الأجسام للأشعة، وبقياس الشدة الضوئية المتولدة تحدد كمية الجرعة.
- تغيرات كيميائية قد تصيب بعض المواد ، مثل المواد التي تستخدم في الأفلام ، حيث يعبر السواد الحاصل في عن مقدار الجرعة.

وأهم الكاشفات المستخدمة لأغراض الوقاية الإشعاعية هي :

- الكاشف ذو حجرة التأين
- الكاشف الومضاني
- الكاشف الكيميائي

4) المبادئ الأساسية للبيولوجيا الإشعاعية The basics of radiation biology

تسبب الإشعاعات بعض الآثار الحيوية بغض النظر إذا كان مصدر الإشعاع طبيعياً أو من صنع الإنسان، أو إذا كانت الجرعة الإشعاعية صغيرة أو كبيرة. يدرس علم الحياة الإشعاعي أو البيولوجيا الإشعاعية الأثر الذي تسببه الإشعاعات على النسج الحية . وهي توفر المعلومات الضرورية عن الحدود الآمنة للجرعات الإشعاعية المسموح بالتعرض لها.

أول من لاحظ هذا الأثر البيولوجي للإشعاعات كان العالم الفيزيائي بيكريل عام 1901 عندما وضع في جيبه حاوية صغيرة فيها 200 مغ من الراديوم المشع عدة ساعات، حيث لاحظ حدوث تقرح في الجلد المجاور لجيبه بعد حوالي أسبوعين من ذلك، واستغرق شفاء هذا التقرح عدة أسابيع.

درست الآثار البيولوجية للإشعاعات في البدايات بطرق بدائية عن طريق تقدير كمية الأشعة التي تقتل بعض الحيوانات أو تلك التي توقف إنبات البذور النباتية. ومع تطوير طرق استزراع الخلايا والنسج الحية في الزجاج ، فتحت آفاق جديدة مكنت من دراسة الآثار الإشعاعية بشكل أفضل.

5) تأثير الأشعة على الخلية الحية Radiation effects on living cells

إن عملية الإثارة والتأين التي تحدث لذرات الجزيئات المكونة للخلية الحية , وخاصة البروتينات ، بعد تعرضها للأشعة المؤينة هي الأساس الذي يسبب حدوث الأثر الإشعاعي على الإنسان . حيث أن تأين ذرات الجزيئات المكونة للمادة الحية يسبب اضطراب عملها ، وهذا يسبب اضطراب عمل الخلية ككل ، ونتيجة ذلك قد يتأثر النسيج الذي تشكله هذه الخلايا وبذلك تتأثر الأعضاء وكامل الجسم. ويتعلق احتمال حدوث الأثر البيولوجي ومقداره بكمية الطاقة الممتصة. ويمكن تلخيص مراحل حدوث الأثر على الخلية الحية بأربعة خطوات :

- مرحلة فيزيائية : وفيها يتم امتصاص الطاقة وحدوث التأين .
- مرحلة فيزيائية-كيميائية : الأثر المباشر وغير المباشر على الخلية.
- مرحلة كيميائية –حيوية : حدوث تغيرات على مستوى الجزيئات الحيوية المهمة.
- تغيرات بيولوجية : تغيرات في الوظيفة وحدوث الموت الخلوي أو حدوث الطفرات الجينية.

هناك آليتان يمكن للإشعاعات المؤينة أن تؤثر فيها على الخلية الحية :

- الأثر المباشر :

إذا تفاعلت الإشعاعات مع الذرات المكونة لجزيئات DNA أو لبعض المكونات المهمة لحياة الخلية، يسمى هذا الأثر الإشعاعي أثراً مباشراً. حيث يمكن للأشعة المؤينة أن تغير عدداً كبير من الروابط الكيميائية بشكل مباشر عن طريق نقل طاقتها إلى الجزيء وهو الأثر السائد في الأشعة الجسيمية المشحونة . هذا الأثر قد يسبب توقف الخلية عن الانقسام أو يسبب حدوث الموت الخلوي.

- الأثر غير المباشر :

إن احتمال حدوث الأثر المباشر على جزيء DNA صغير لأنها تشكل جزءاً صغيراً من الخلية . لكن المكون الذي يشكل القسم الأكبر من الخلية الحية وهو الماء ، فالاحتمال الأكبر هو أن يتعرض الماء الموجود في الخلايا للأثر الإشعاعي. حيث تتحطم الروابط بين الذرات المشكلة للماء ونحصل على جذور حرة مثل جذور OH , H التي قد تعود وتتفاعل مع بعضها لتشكل الماء أو لتشكل مركب H_2O_2 وهو ذو سمية عالية للخلية. يشاهد الأثر غير المباشر عادة عند استخدام الأشعة الفوتونية.

من المتفق عليه في الوقت الحاضر أن الأثر الإشعاعي المميت للخلية الحية هو الأذية الحادثة لجزيء الحمض الريبي النووي DNA في نواة الخلية والذي يحمل المعلومات الوراثية الخاصة بالخلية. إضافة للأذية التي يمكن أن تحدث للغشاء الخلوي.

6) الآثار البيولوجية للإشعاعات Biologic effects of radiation

تصنف الآثار البيولوجية للإشعاعات تقليدياً إلى مجموعتين. المجموعة الأولى تشمل الآثار الإشعاعية الناتجة عن التعرض لجرعات عالية خلال وقت قصير وهي آثار حادة أو قصيرة الأمد. والمجموعة الثانية تشمل التعرض لجرعات صغيرة خلال فترة زمنية طويلة تسبب حدوث آثار مزمنة أو طويلة الأمد.

تسبب الجرعات العالية موت عدد كبير من الخلايا ، مما يؤدي إلى حدوث أذية على مستوى النسيج أو العضو. وهذا بدوره يسبب حدوث رد فعل على مستوى الجسم بالكامل ، يسمى التناذر الإشعاعي الحاد. بينما تسبب الجرعات المنخفضة حدوث أذية خلوية أو تغيير في جيناتها.وهي لا تسبب حدوث مشاكل فورية واضحة لأنها تؤثر فقط على المستوى الخلوي وليس على مستوى النسيج بالكامل أو العضو.

وبناء عليه تصنف الآثار الإشعاعية على نوعين :

- آثار حدية :

وهي الآثار التي تحدث فوق عتبة محددة من الجرعة الإشعاعية. وشدة الأثر تزداد مع ازدياد الجرعة. وتنتج عن موت كمية كافية من الخلايا تسبب تأثر وظيفة العضو المصاب بالتعرض. وتسمى هذه الآثار آثار حادة أو مبكرة ، ومن أمثلة الأذيات الإشعاعية التي تقع تحت هذا النوع :

- العقم المؤقت أو الدائم عند الذكور.
- تثبيط النسيج المولد للدم في نقي العظم .
- أذية في الجهاز الهضمي.
- الأذية التي تحصل للجلد.
- تكثف الجسم البلوري في العين.

- الآثار غير الحدية :

وهي الآثار لا يتعلق حدوثها بعتبة معينة من الجرعة ، أي يمكن أن تحدث عند التعرض لأي جرعة , لكن احتمال حدوثها يتناسب طرداً مع زيادة جرعة التعرض. تحدث هذه الآثار عادة عند التعرض المزمن طويل الأمد لجرعات إشعاعية صغيرة. وهي تصنف إلى :

- آثار جينية Genetic : وهي تظهر على الأجيال اللاحقة للأشخاص الذين تعرضوا للإشعاع.حيث تنتج عن حصول طفرات في الخلايا التناسلية (الحيوانات المنوية أو البويضات) وتظهر نتيجة هذه الطفرات على هذه الأجيال.
- آثار جسمية Somatic : وهي آثار تظهر على الشخص الذي تعرض للإشعاع. وهي التي تتمثل باحتمال إصابة الشخص بالسرطان.

7) الجرعة المكافئة Equivalent dose

إن العلاقة بين جرعة الطاقة الممتصة وقدرتها على إحداث الأثر الحيوي علاقة معقدة تتعلق بعوامل عدة منها نوع الأشعة وطاقتها وتوزع الجرعة الزمني والفراغي في العضو الذي يتعرض للأشعة إضافة للعوامل الحيوية المتعلقة بهذا العضو . لذلك عند دراسة الأثر الإشعاعي على النسيج الحي نلجأ إلى حساب قيمة الأثر البيولوجي النسبي لكل نوع من الإشعاعات ولمقادير الطاقة المختلفة، وذلك بمقارنة أثر الإشعاع المدروس مع أشعة غاما أو الأشعة السينية. حيث يعرف الأثر البيولوجي النسبي بقيمة النسبة بين طاقة الإشعاع المدروس وطاقة أشعة غاما التي تسبب نفس الأثر الحيوي. ونظراً لوجود أعداد كبيرة من قيم الأثر البيولوجي النسبي الذي يمكن أن نحصل عليها، تم إيجاد علاقة أكثر سهولة عن طريق إيجاد قيم تقريبية يمكن أن تميز كل نوع من الأشعة والطاقات المستخدمة.سميت عوامل النوعية وهي تتعلق بالتأين النوعي لكل نوع من الأشعة (عامل النوعية لأشعة غاما وبيتا = 1 ولأشعة ألفا =10). ولحساب الجرعة المكافئة نضرب قيمة الجرعة الإشعاعية مع عامل النوعية . وبالتالي تعرف الجرعة المكافئة بالجرعة الممتصة المعدلة حسب قدرة الإشعاعات المختلفة على إحداث الأثر الإشعاعي.

واحدة قياس الجرعة المكافئة هي السيفرت Sv (Sievert) .

8) الوقاية الإشعاعية في الطب النووي Radiation protection in nuclear medicine

تستخدم النظائر المشعة في المجال الطبي لهدفين أساسيين : تشخيصي وعلاجي. هناك الكثير من النظائر المشعة ، بعضها موجود في الطبيعة وأخرى يمكن تصنيعها ، لكن المستخدم منها فقط عدد قليل ، وهي تلك التي تملك بعض الصفات الفيزيائية والكيميائية والحيوية المناسبة للاستخدام عند الإنسان.

1) **بيئة العمل في قسم الطب النووي :** تتكون بيئة العمل في قسم الطب النووي من الأجزاء الرئيسية التالية :

- المخبر الحار : وهو المكان الذي يتم فيه تحضير وتخزين النظائر المشعة المستخدمة في القسم . ويجب أن تتوفر فيه تجهيزات خاصة لقياس جرعة المادة المشعة التي ستعطى للمريض ، وأجهزة كشف التلوث بالمواد المشعة ، وأدوات مساعدة للتعامل مع المواد المشعة ، وخزائن رصاصية خاصة لتخزين المشعة والنفايات المشعة .
- غرف أجهزة التصوير الومضاني
- غرف انتظار المرضى : وهنا يجب أن تخصص أماكن خاصة للمرضى بعد حقنهم بالمادة المشعة ، وأماكن للمرضى قبل الحقن ولمرافقيهم.

تختلف أحجام أقسام الطب النووي من العيادات الصغيرة التي تحتوي أجهزة محدودة إلى الأقسام الكبيرة الموجودة في المستشفيات وتبعاً لذلك يختلف عدد الفحوص ونوعيتها.

2) **مخطط التدبير الإشعاعي أو تنظيم العمل في قسم الطب النووي :** يوضع من قبل مسؤول الوقاية الإشعاعية ، ويشمل هذا المخطط النقاط التالية :

- تخزين واستخدام المواد المشعة ومعالجة النفايات المشعة الناتجة عنها.
- وقاية العاملين في القسم والمرضى وعموم السكان.
- وقاية العاملين الطبيين أو الأشخاص المرافقين الذين يمكن أن يكونوا على تماس مع المرضى الذين يتلقون فحوصاً في الطب النووي.

3) **مصادر التعرض الإشعاعي :** يحصل التعرض الإشعاعي أثناء العمل في أقسام الطب النووي من مصدرين أساسيين :

- التعرض الإشعاعي الخارجي الذي يسببه التعامل المباشر مع مستحضرات المادة المشعة أثناء تحضيرها أو حقنها أو من الأشعة الصادرة من المريض المحقون. وهذا النوع من التعرض لا يمكن تجنبه ، لكن يمكن التقليل منه.
- التعرض الإشعاعي الداخلي الذي يمكن أن ينتج عن دخول المواد المشعة إلى الجسم بطريق الخطأ ، إما عن الطريق الهضمي أو التنفسي أو عبر الجلد في حال وجود جروح أو خدوش فيه.والآثار الإشعاعية الناتجة تتعلق بنوع المادة المشعة وخواصها الفيزيائية . وهذا التعرض يمكن تجنبه بإتباع بعض الإجراءات الوقائية أثناء العمل.

4) **إجراءات الوقاية الإشعاعية :**

تطبق قواعد الوقاية الإشعاعية العامة المعروفة المذكورة سابقاً. لكن خصوصية العمل في أقسام الطب النووي تستدعي مراعاة بعض الإجراءات الإضافية ، وهدف هذه الإجراءات درء خطر حدوث التلوث الإشعاعي الداخلي والتقليل من التعرض الإشعاعي الخارجي. ويمكن إيجاز هذه الإجراءات بالنقاط التالية :

- على جميع العاملين حمل مقياس الجرعة الشخصي أثناء العمل .
- الترتيب والتحضير الجيدان لمكان العمل ، والاهتمام بنظافة المكان (في المخبر أو في غرف التصوير) وتحضير جميع الوسائل المساعدة اللازمة بشكل يضمن إنجاز العمل بشكل سريع.
- وضع إشارات دالة على العبوات الحاوية على المادة المشعة ،والأدوات الملوثة بها ، حتى لا تشكل مصدراً لتلوث الأيدي.

- تغطية سطوح العمل في المخبر بالورق الماص ، واستخدام الملاقط المساعدة وارتداء القفازات الواقية.
- تجنب جميع الأعمال التي يمكن أن تسبب أو تساعد على دخول المواد المشعة إلى الجسم ، مثل تحضير المادة المشعة في مكان دون وجود ساحبة للهواء ، تناول الطعام أو الشراب والتدخين في أماكن العمل ، استعمال ماصات الفم في المخبر.
- غسل اليدين بعد انتهاء العمل بشكل جيد ، وفحص اليدين والأكمام والوجه الأمامي للثياب بواسطة جهاز كشف إشعاعي للتحري عن وجود تلوث محتمل.
- وضع كمية المادة المشعة التي نحتاجها فقط في مكان العمل .
- وضع المحاقن الحاوية على المادة المشعة في واقيات خاصة من الزجاج الرصاصي .
- أثناء تصوير المريض الحفاظ على مسافة كافية منه ، ويمكن استخدام بعض الحواجز الرصاصية المتحركة للتقليل من التعرض .
- بعد الانتهاء من العمل جمع جميع النفايات المشعة (محاقن ، فلاكونات ، كفوف ..) ووضعها في أماكن خاصة للتعامل معها حسب الأصول.
- إجراء اختبار كشف التلوث (اختبار المسح) بشكل دوري : و يتم باستخدام قطع صغيرة من الورق حيث يمسح بقطع الورق في أماكن العمل التي يحتمل حدوث التلوث فيها ويسجل على كل ورقة المكان الذي تم المسح فيه ، بعد ذلك يتم قياس هذه الأوراق في عدادات خاصة وبالتالي يمكن كشف أي تلوث والتعامل معه.

5) **الحوادث الإشعاعية :** قد يحدث أثناء التعامل مع المادة المشعة (التحضير ، الحقن) حدوث تلوث بالمادة المشعة غير مرغوب فيه نتيجة انسكاب المادة المشعة في المخبر أو في المكان الذي نحقن فيه المريض ، أو من المريض المحقون بمادة مشعة نتيجة حدوث إقياء أو تبول لا إرادي . هذا التلوث قد يصيب الأشخاص العاملين أو بيئة العمل. هذه الحوادث يجب التعامل معها بسرعة لإزالة التلوث ومنع انتشاره ، وطبيعة الحال يجب البدء بإزالة التلوث عن الأشخاص ثم من المكان . والخطوات المتبعة هي التالية :
   - تحديد مكان التلوث ومنع أي شخص من الاقتراب منه.
   - إخبار الشخص المسؤول في القسم عن الحادث.
   - تقدير شدة التلوث ، ومساحته ونوعه .
   - إزالة التلوث باستخدام محاليل خاصة لإزالة التلوث والبدء بالتنظيف من المحيط باتجاه المركز. وفي حال كون عمر النصف قصيراً ، يجب الحجر على المنطقة والانتظار حتى تزول الفعالية المشعة من تلقاء نفسها ثم يتم تنظيف المكان بشكل عادي.
   - يمكن التأكد من زوال التلوث باستخدام جهاز الكشف الإشعاعي .