

تكنولوجيا السايكلترون بين الفيزياء والطب

كتاب يأخذك في رحلة معرفية بين علوم الفيزياء النووية وتطبيقاتها الطبية، يستعرض كيفية تصميم وتشغيل السايكلترون، إنتاج النظائر المشعة، واستخدامها في التشخيص والعلاج، موفراً رؤية متكاملة تجمع بين النظرية والتطبيق، للطلاب والباحثين وكل المهتمين بعالم الطب النووي.

د احمد جاسم حمود

الأستاذ المساعد في فيزياء المواد والنانو تكنولوجي
جامعة البصرة - كلية التربية للعلوم الصرفة- قسم الفيزياء

د رافد رياض الطعمة

بورء الطب النووي الأردني وبورء الطب النووي الاوربي
وزارة الصحة / دائرة صحة البصرة / مركز الكوثر للطب النووي

٢٠٢٦-١٤٤٧

٦١٠/١٥٣

م ٢٨٨ المالكي، احمد جاسم حمود

تكنولوجيا السايكولوترون بين الفيزياء والطب/احمد جاسم
حمود المالكي، رافد رياض الطعمة..-١-البصرة، دار الامل ٢٠٢٦
٦٤ ص ، ٢٤ سم
١- الفيزياء الطبية -٢- الطب النووي-٣- الطعمة ، رافد رياض
(م.م) -أ-العنوان

رقم الايداع في دار الكتب والوثائق

ببغداد (١٨١٥) لسنة ٢٠٢٦

الاصدار ٢٦



AL KAWTHER
NUCLER MEEEDICINE CENTER



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

{ يَرْفَعُ اللَّهُ الَّذِينَ آمَنُوا مِنْكُمْ
وَالَّذِينَ أُوتُوا الْعِلْمَ دَرَجَاتٍ }

صدق اللع العظيم

سورة المجادلة (١١)



شكر وتقدير

أتقدم بأسمى آيات الشكر وعظيم الامتنان إلى الجمعية العراقية للبحوث والدراسات الطبية على تبنيهم ودعمهم الكريم لنشر كتابنا الجديد ((تقنية السايكلترون بين الفيزياء والطب)). إن اهتمامكم البالغ بالموضوع العلمي للكتاب ورعايتكم لكل جوانبه البحثية والطبية، يعكس روح المسؤولية الأكاديمية والحرص على تقدم المعرفة في مجالات الفيزياء الطبية والطب النووي. ويُعد هذا الدعم المتميز استمراراً لنهج الجمعية الموقرة في دعم الكفاءات العلمية العراقية ونشر نتائجها العلمي، وتعزيز الحركة العلمية والمعرفية لطلاب العلم والمجتمع العلمي في العراق والعالم العربي على حد سواء.

لقد لعبت الجمعية، التي تأسست في عام ٢٠١٧ وتعمل تحت إشراف وزارة التعليم العالي والبحث العلمي والمجلس الأعلى للجمعيات العلمية، دوراً رائداً في دعم البحث العلمي من خلال عقد المؤتمرات وورش العمل الدولية، وإصدار الدوريات والمجلات العلمية المتخصصة، وتبني المشاريع البحثية المهمة.

إن جهودكم المتواصلة على مدى السنوات الماضية، والتي تشمل أكثر من عشر فعاليات ومؤتمرات علمية سنوياً، تمثل محفزاً قوياً للارتقاء بالبحث العلمي وخدمة المجتمع الأكاديمي. فلکم منا كل الشكر والتقدير على جهودكم القيمة وتعاونكم الدائم.

المؤلفان

تنويه علمي

يأتي هذا العمل العلمي في إطار التعاون الأكاديمي والبحثي المؤسسي المشترك بين مركز الكوثر للطب النووي وجامعة البصرة / كلية التربية للعلوم الصرفة / قسم الفيزياء والجمعية العراقية للبحوث والدراسات الطبية، تجسيداً لتكامل الجهود العلمية وتضافر الخبرات في مجالات الفيزياء الطبية والتطبيقات النووية.

ويعكس هذا العمل نموذجاً متقدماً للتعاون العلمي البناء بين المؤسسات الأكاديمية والطبية، بما يسهم في ترسيخ قواعد البحث العلمي الرصين، ودعم الكفاءات العلمية، وتعزيز حركة التأليف والترجمة العلمية، بما يخدم طلبة العلم والباحثين، ويرفد المكتبة العلمية في العراق والعالم العربي بمصادر معرفية متخصصة وموثوقة.

ويأتي هذا المؤلف ضمن برامج وأنشطة قسم البحث والتطوير في مركز الكوثر للطب النووي، الهادفة إلى دعم البحث العلمي التطبيقي، وتطوير القدرات العلمية، وربط المخرجات البحثية بالتطبيقات العملية في المجالات الطبية المتقدمة.

وقد تم إعداد هذا العمل ضمن هذا الإطار العلمي وبإشراف الجهات المذكورة أعلاه، بما ينسجم مع توجهاتها في دعم البحث العلمي والتأليف الأكاديمي.

المؤلفان

السايكلترون (او معجل الجسيمات النووية)

١.١ . المقدمة

يُعدّ السايكلوترون أحد أهم المسرّعات الجسيمية التي طوّرها الإنسان في مجال الفيزياء التطبيقية، إذ يُستخدم لتسريع الجسيمات المشحونة، ولا سيّما البروتونات والأيونات الخفيفة، إلى طاقات عالية تمكنها من إحداث تفاعلات نووية داخل مواد محددة تُعرف بالأهداف (Targets).

وقد اكتسب هذا الجهاز أهمية علمية وتطبيقية كبيرة لكونه يجمع بين المبادئ الأساسية للفيزياء الكلاسيكية والكهرومغناطيسية من جهة، والتطبيقات الطبية والنووية المتقدمة من جهة أخرى.

من الناحية الفيزيائية، يعتمد السايكلوترون على حقيقة أساسية مفادها أن الجسيم المشحون عندما يتحرك داخل مجال مغناطيسي منتظم، فإنه يخضع لقوة لورنتز التي تجبره على الحركة في مسار دائري. وإذا ما أُضيف إلى ذلك مجال كهربائي متناوب مناسب، فإن طاقة هذا الجسيم تزداد تدريجياً في كل مرة يعبر فيها منطقة التسريع، مما يؤدي إلى زيادة سرعته ونصف قطر مداره بصورة منتظمة.

وبهذا الأسلوب، يمكن تسريع الجسيمات على مراحل متتالية داخل جهاز مدمج نسبياً مقارنة بالمسرّعات الخطية. يتكوّن السايكلوترون عملياً من مجموعة عناصر رئيسية تعمل بتناغم دقيق، تشمل المغناط القوية التي تؤكّد المجال

المغناطيسي، وأقطاب التسريع المعروفة بالديات (Dees) التي تُطبّق بينها الفولتية المتناوبة، إضافة إلى غرفة الفراغ التي تضمن تقليل فقدان الطاقة نتيجة تصادم الجسيمات مع جزيئات الهواء.

كما يضم الجهاز منظومات مساعدة مثل أنظمة التبريد، وأنظمة التحكم، وأنظمة الحماية الإشعاعية، التي تضمن استقرار التشغيل وسلامة العاملين.

تاريخياً، لم يكن السايكلوترون مجرد أداة بحثية لدراسة بنية الذرة، بل سرعان ما تطوّر ليصبح جهازاً إنتاجياً ذا أهمية كبيرة في المجالات التطبيقية، ولا سيما في الطب النووي. ففي هذا المجال، يُستخدم السايكلوترون لإنتاج نظائر مشعة قصيرة العمر، مثل الطور-١٨، الكربون-١١، النيتروجين-١٣، والأوكسجين-١٥، وهي نظائر باعثة للبوزيترونات تُستعمل في تقنيات التصوير المقطعي بالإصدار البوزيتروني (PET).

وتمتاز هذه النظائر بقصر عمرها النصفى، مما يجعل إنتاجها محلياً بالقرب من مواقع الاستخدام الطبي أمراً ضرورياً وملحاً.

وقد أسهم إدخال السايكلوترون إلى المجال الطبي في إحداث نقلة نوعية في طرق التشخيص، إذ انتقل الطب من الاعتماد على التصوير التشريحي الذي يبيّن شكل الأعضاء فقط، إلى التصوير الوظيفي والجزيئي الذي يوفر معلومات دقيقة عن النشاط الحيوي والتمثيل الغذائي للخلايا. وأصبح السايكلوترون بذلك حلقة أساسية تربط بين الفيزياء النووية والكيمياء الإشعاعية والطب السريري.

ولا تقتصر أهمية السايكلوترون على إنتاج النظائر المشعة فحسب، بل تمتد لتشمل منظومة متكاملة تضم مراحل النقل، والتخصير الكيميائي الإشعاعي، والسيطرة النوعية، والحماية الإشعاعية. لذلك فإن فهم مبدأ عمل السايكلوترون لا يُعدّ أمراً ضرورياً للفيزيائي فقط، بل يشكّل أساساً معرفياً مهماً لكل من الفيزيائي الطبي، والكيميائي الإشعاعي، والطبيب العامل في مجال الطب النووي.

يهدف هذا الفصل إلى تقديم مدخل تدريسي متكامل لتكنولوجيا السايكلوترون، يبدأ بشرح المفاهيم الفيزيائية الأساسية التي يقوم عليها عمل الجهاز، مروراً بتطوره التاريخي وأنواعه المختلفة، وصولاً إلى تصنيقاته الحديثة وتطبيقاته الطبية.

ويُعد هذا المدخل ضرورياً لفهم الفصول اللاحقة من الكتاب، التي ستتناول النموذج الفيزيائي لحركة الجسيمات داخل السايكلوترون، والمعادلات الحاكمة لها، إضافة إلى التطبيقات الطبية والسريرية المتقدمة.

٢.١. الملحة التاريخية لتطور السايكلوترون.

بدأت فكرة السايكلوترون في مطلع القرن العشرين بالتزامن مع تطور الفيزياء الذرية والنووية، عندما أدرك العلماء أن دراسة بنية الذرة والتفاعلات النووية تتطلب جسيمات مشحونة ذات طاقات أعلى بكثير مما يمكن توفيره بالوسائل الطبيعية أو بالمصادر الإشعاعية التقليدية.

وقد قاد هذا التحدي العلمي إلى البحث عن طرائق فعالة لتسريع الجسيمات المشحونة والتحكم بحركتها داخل الحقول الكهرومغناطيسية. في هذا السياق، تمكن الفيزيائي الأمريكي إرنست أورلاندو لورنس (١٩٥٨-١٩٠١) عام ١٩٣٠ من تصميم وبناء أول سايكلوترون عملي. اعتمد هذا الجهاز على مبدأ بسيط ولكنه عبثي، يتمثل في استخدام مجال مغناطيسي ثابت لإجبار الجسيمات المشحونة على الحركة الدائرية، مع مجال كهربائي متناوب يزود الجسيم بطاقة إضافية في كل مرة يعبر فيها فجوة التسريع. وقد مثل هذا الابتكار نقلة نوعية في تقنيات تسريع الجسيمات، إذ أتاح الوصول إلى طاقات نووية عالية باستخدام جهاز صغير نسبياً مقارنة بالسرعات الخطية في ذلك الوقت.

خلال ثلاثينيات وأربعينيات القرن الماضي، شهدت تقنيات السايكلوترون تطوراً سريعاً، حيث تم بناء أجهزة أكبر وأكثر قدرة على إنتاج حزم جسيمية ذات طاقات أعلى. استخدمت هذه الأجهزة على نطاق واسع في الأبحاث النووية الأساسية، مثل دراسة التفاعلات النووية، وإنتاج نظائر مشعة لأغراض علمية وطبية. غير أن التقدم في الطاقات كشف عن محدودية جوهرية في السايكلوترون الكلاسيكي، إذ تبدأ التأثيرات النسبية بالظهور عند السرعات العالية، مما يؤدي إلى زيادة الكتلة النسبية للجسيم وفقدانه التزامن مع تردد المجال الكهربائي المتناوب.

ونتيجة لذلك، يصبح تسريع الجسيمات أقل كفاءة ويصعب الوصول إلى طاقات أعلى. دفعت هذه المشكلة العلماء إلى تطوير نماذج جديدة تتجاوز قيود السايكلوترون الكلاسيكي. وكان أول هذه الحلول هو السايكلوترون المتزامن (Synchrocyclotron)، الذي يعتمد على تغيير تردد المجال الكهربائي أثناء عملية التسريع ليتلاءم مع التغير النسبي في سرعة وكتلة الجسيم. وقد أتاح هذا الأسلوب الوصول إلى طاقات أعلى، إلا أنه جاء على حساب استمرارية الحزمة الجسيمية، حيث يعمل هذا النوع غالباً بنمط نبضي، مما يقلل من كفاءته في التطبيقات التي تتطلب إنتاجاً مستمراً.

لاحقًا، تم تطوير السايكلوترون الإيزوكروني (**Isochronous Cyclotron**)، الذي يمثل خطوة متقدمة في تاريخ السايكلوترونات. في هذا النوع، يتم تشكيل المجال المغناطيسي بطريقة مدروسة بحيث يبقى زمن دورة الجسيم ثابتًا حتى عند الطاقات العالية، مما يسمح باستخدام تردد كهربائي ثابت دون فقدان التزامن.

وقد أدى ذلك إلى تحقيق استقرار أعلى للحزمة الجسيمية وكفاءة تشغيلية أفضل، الأمر الذي جعل هذا النوع الخيار المفضل في العديد من التطبيقات العملية.

مع النصف الثاني من القرن العشرين، بدأ التركيز ينتقل تدريجيًا من الاستخدامات البحثية البحتة إلى التطبيقات الطبية، ولا سيما في مجال الطب النووي. أدى هذا التحول إلى تصميم سايكلوترونات مدمجة، ذات أحجام أصغر، وكفاءة أعلى، ومواصفات أمان صارمة، مخصصة لإنتاج نظائر مشعة قصيرة العمر مثل نظائر التصوير المقطعي بالإصدار البوزيتروني (**PET**).

وقد أسهم هذا التطور في إدخال السايكلوترون إلى المستشفيات والمراكز الطبية، بعد أن كان محصورًا في المختبرات البحثية الكبرى.

ومع استمرار التقدم التكنولوجي في مجالات الإلكترونيات، وأنظمة التحكم، ومواد المغناط، أصبحت السايكلوترونات الحديثة أكثر دقة واستقرارًا وسهولة في التشغيل، فضلًا عن تحسّن مستويات الأمان الإشعاعي.

وبهذا، تحوّل السايكلوترون من جهاز فيزيائي بحثي إلى منظومة طبية متكاملة تمثل حلقة وصل أساسية بين الفيزياء النووية والتطبيقات السريرية الحديثة، ولا تزال تقنياته تتطور باستمرار لتلبية متطلبات الطب التشخيصي والعلاجي المعاصر.

٢٠١. أنواع السايكلوترونات.

بعد التعرّف على المبدأ العام لعمل السايكلوترون وتطوره التاريخي، يصبح من الضروري تصنيف أنواعه المختلفة، لأن هذا التصنيف يساعد الطالب على فهم لماذا لا يوجد سايكلوترون واحد يصلح لكل التطبيقات. فاختلاف الطاقة المطلوبة، ونوع الجسيمات المسرّعة، واستقرار الحزمة، وطبيعة الاستخدام البحثي أو الطبي، كلها عوامل أدت إلى ظهور أنواع متعددة من السايكلوترونات. يمكن تصنيف السايكلوترونات اعتماداً على آلية التزامن بين حركة الجسيمات والحقول الكهرومغناطيسية، وكذلك على الشكل الهندسي لمسار الحركة، إلى مجموعات رئيسية يندرج تحتها عدد من النماذج التطويرية.

أولاً: السايكلوترونات الدائرية (Circular Cyclotrons)

وهي أقدم وأكثر أنواع السايكلوترونات انتشاراً، ويتميز هذا النوع بأن الجسيمات المشحونة تتحرك ضمن مسار دائري أو حلزوني متزايد نصف القطر داخل مجال مغناطيسي، بينما تكتسب طاقتها من مجال كهربائي متناوب. ويعد هذا التصميم مناسباً جداً لتسريع الجسيمات الخفيفة، ولا سيما البروتونات.

١- السايكلوترون الكلاسيكي (Classical Cyclotron)

يُعد السايكلوترون الكلاسيكي أول نموذج عملي تم تطويره، ويعتمد على:

• مجال مغناطيسي ثابت الشدة.

• مجال كهربائي متناوب بتردد ثابت.

في هذا النوع، يكون زمن دورة الجسيم ثابتاً طالما كانت سرعته صغيرة مقارنة بسرعة الضوء.

لذلك يعمل السايكلوترون الكلاسيكي بكفاءة عند الطاقات المنخفضة، إلا أن كفاءته تتناقص عند الطاقات العالية بسبب التأثيرات النسبية التي تؤدي إلى فقدان التزامن بين الجسيم والمجال الكهربائي. ولهذا السبب، يُستخدم هذا النوع غالباً في الأبحاث الفيزيائية الأساسية ولا يُعد مناسباً للتطبيقات الطبية الحديثة.

٢- السايكلوترون المتزامن (Synchrocyclotron)

تم تطوير السايكلوترون المتزامن للتغلب على مشكلة فقدان التزامن في السايكلوترون الكلاسيكي. ويعتمد هذا النوع على:

• مجال مغناطيسي ثابت.

• مجال كهربائي متغير التردد.

يتم تعديل تردد المجال الكهربائي أثناء عملية التسريع ليتلاءم مع الزيادة النسبية في كتلة الجسيم، مما يسمح بالحفاظ على التزامن والوصول إلى طاقات أعلى. غير أن هذا الأسلوب يؤدي عادة إلى تشغيل الجهاز بنمط نبضي بدل التشغيل المستمر، الأمر الذي يقلل من شدة الحزمة الجسيمية ويحد من كفاءته الإنتاجية في التطبيقات التي تتطلب تدفقاً ثابتاً من الجسيمات.

٣- السايكلوترون الإيزوكروني (Isochronous Cyclotron)

يُعد السايكلوترون الإيزوكروني من أهم التطورات في تكنولوجيا السايكلوترونات، ويعتمد على مبدأ الحفاظ على زمن دورة ثابت للجسيم حتى عند الطاقات العالية. ويتم تحقيق ذلك من خلال:

- تشكيل خاص للمجال المغناطيسي.
- زيادة شدة المجال مع ازدياد نصف قطر المدار.

يسمح هذا التصميم باستخدام مجال كهربائي بتردد ثابت دون فقدان التزامن، مما يؤدي إلى حزمة جسيمية مستقرة وتشغيل مستمر عالي الكفاءة. ولهذه الأسباب، يُعد السايكلوترون الإيزوكروني الخيار الأكثر شيوعاً في الطب النووي، ولا سيما في إنتاج النظائر المشعة المستخدمة في تقنيات PET

٤- السايكلوترون متعدد القطاعات (Sector-Focused Cyclotron)

في هذا النوع، يتم تقسيم المغناطيس إلى قطاعات متناوبة ذات مجالات قوية وضعيفة، مما يؤدي إلى تحسين تركيز الحزمة الجسيمية باستخدام مبدأ التركيز القوي (**Strong Focusing**) ويؤدي هذا التصميم إلى:

- زيادة استقرار الحزمة.
- تقليل فقدان الجيمي.
- تحسين الكفاءة التشغيلية.

تُستخدم السايكلوترونات متعددة القطاعات على نطاق واسع في التطبيقات الطبية والبحثية المتقدمة، حيث تتطلب العمليات إنتاجاً مستقرًا ودقيقًا للجسيمات المسرّعة. ثانياً: أنظمة التسريع الخطية أو شبه الخطية (**Linear or Hybrid Systems**)

على الرغم من أن السايكلوترون بطبيعته جهاز دائري، إلا أن بعض الأنظمة الحديثة تجمع بين خصائص السايكلوترونات والمسرّعات الخطية. في هذه الأنظمة، تكون حركة الجسيمات:

- أقرب إلى المسار الخطي أو المنحني جزئياً.
- مصحوبة بأنظمة مغناطيسية وكهربائية معقدة لتحقيق تسريع عالٍ.

تُستخدم هذه الأنظمة غالباً في التطبيقات البحثية المتقدمة التي تتطلب طاقات عالية جداً، إلا أن تعقيدها الهندسي وكلفتها المرتفعة يجعلان استخدامها محدوداً في المجال الطبي مقارنة بالسايكلوترونات الدائرية.

٤.١. خلاصة تصنيف السايكلوترونات يمكن تلخيص تصنيف السايكلوترونات على النحو الآتي:

- السايكلوترونات الكلاسيكية والمتزامنة: مناسبة للأبحاث الفيزيائية والتعليمية.
- السايكلوترونات الإيزوكرونية ومتعددة القطاعات: العمود الفقري للتطبيقات الطبية الحديثة.
- الأنظمة الخطية أو الهجينة: مخصصة للأبحاث المتقدمة ذات الطاقات العالية.

ويمثل هذا التصنيف خطوة أساسية لفهم أسباب اختيار نوع معين من السايكلوترونات لتطبيق محدد، كما يمهد للانتقال في الأقسام اللاحقة إلى المقارنة التفصيلية بين الأنواع وربطها بالمتطلبات الطبية والهندسية من خلال العرض السابق لأنواع السايكلوترونات المختلفة، يتضح أن هذا التنوع لم يكن وليد الصدفة، بل جاء استجابة مباشرة لمتطلبات فيزيائية وتطبيقية متباينة.

إذ يمكن القول إن السايكلوترونات الدائرية، ولا سيما الإيزوكرونية ومتعددة القطاعات، تشكل العمود الفقري للتطبيقات الطبية والصناعية في العصر الحديث، نظراً لقدرتها على توفير حزم جسيمية مستقرة، وتشغيل مستمر، وكفاءة عالية في إنتاج النظائر المشعة. وهذه الخصائص تجعلها مناسبة بشكل خاص للاستخدام في الطب النووي، حيث تتطلب التطبيقات السريرية موثوقية عالية وإنتاجاً منتظماً للنظائر قصيرة العمر. في المقابل، تُستخدم الأنظمة الخطية أو شبه الخطية، وكذلك بعض النماذج الهجينة، في التطبيقات البحثية المتقدمة التي تتطلب طاقات عالية جداً أو خصائص خاصة للحزمة الجسيمية. وعلى الرغم من قدراتها الكبيرة، فإن تعقيدها الهندسي وكلفتها التشغيلية المرتفعة يحدان من انتشارها في التطبيقات الطبية الروتينية، مقارنة بالسايكلوترونات الدائرية المدمجة. وبناءً على ذلك، يعتمد اختيار نوع السايكلوترون اعتماداً مباشراً على مجموعة من العوامل الأساسية، من أهمها:

- نوع الجسيمات (بروتونات، ديوترونات، أو أيونات خفيفة أخرى)،
 - استقرار الحزمة الجسيمية واستمراريتها،
 - وطبيعة التطبيق، سواء كان بحثياً، صناعياً، أو طبياً سريرياً.
- وفي هذا السياق، يُمكن النظر إلى السايكلوترون بوصفه تحفة علمية وهندسية تجسد حصيلة جهود تراكمية لعلماء ومهندسين على مدى أكثر من نصف قرن. فقد أدى تضافر الخبرات في مجالات الفيزياء، والهندسة الكهربائية، وهندسة المواد، والكيمياء النووية، إلى تطوير أجيال متعاقبة من السايكلوترونات، كل جيل منها أكثر كفاءة وأماناً ودقة من سابقه.

الطاقة المطلوبة للجسيمات المسرعة،

ومن أبرز ثمار هذا التطور التكنولوجي ظهور السايكلوترونات الطبية الحديثة، مثل PETtrace 800، التي تمثل نموذجاً متقدماً لمعجلات الجسيمات النووية المخصصة للتطبيقات الطبية.

ويتميز هذا النوع بتصميم هندسي خاص، حيث يكون قلب السايكلوترون في وضع عمودي، مع تكامل محكم لبقيّة الملحقات، مثل ملضات المجال المغناطيسي، وصفائح المجال الكهربائي (الديات Dees)، ومنظومات التبريد الغازي والمائي، إضافة إلى أنظمة التحكم والحماية الإشعاعية. ويختلف هذا التصميم عن تصاميم أخرى تعتمد الوضع الأفقي لقلب السايكلوترون، وهو اختلاف هندسي ينعكس على توزيع المجالات، وكفاءة التبريد، وسهولة الصيانة، وأداء الجهاز بشكل عام. وتجدر الإشارة إلى أن اختيار التصميم العمودي أو الأفقي لا يُعدّ تفضيلاً شكلياً فحسب، بل يمثل قراراً هندسياً له تأثير مباشر في استقرار التشغيل، وإدارة الحرارة، واستغلال المساحة، وهو ما يفسر اختلاف توجهات الشركات المصنعة في هذا المجال. وبهذا، تتجسد السايكلوترونات الحديثة كنظم متكاملة تجمع بين الدقة الفيزيائية، والكفاءة الهندسية، والمتطلبات الطبية الصارمة.

5.1. مقارنة بين أنواع السايكلوترونات.

تختلف أنواع السايكلوترونات فيما بينها من حيث تصميم الجهاز ومسار حركة الجسيمات وآلية التسريع، وهو اختلاف ينعكس بشكل مباشر على كفاءة الجهاز ومجالات استخدامه. فالسايكلوترون الكلاسيكي يعتمد على مسار دائري وتردد كهربائي ثابت، مما يجعله محدود الطاقة بسبب التأثيرات النسبية وعدم قدرة الجسيمات على المحافظة على التزامن مع الحقل الكهربائي عند السرعات العالية. لذلك يقتصر استخدامه غالباً على الأبحاث الفيزيائية الأساسية ولا يُعدّ مناسباً للتطبيقات الطبية الحديثة.

أما السايكلوترون المتزامن، فيمثل تطوراً مهماً مقارنة بالأنواع الكلاسيكي، إذ يتم فيه تعديل تردد الحقل الكهربائي بما يتوافق مع زيادة الكتلة النسبية للجسيمات أثناء التسريع. هذا الأسلوب يسمح بالوصول إلى طاقات أعلى، لكنه يكون عادة على حساب استمرارية الحزمة الجسيمية، حيث يعمل غالباً بنمط نبضي، مما يقلل من كفاءته الإنتاجية في التطبيقات التي تتطلب تشغيلاً مستمراً.

في المقابل، يتميز السايكلوترون الإيزوكروني بقدرته على الحفاظ على زمن دورة ثابت للجسيمات من خلال تشكيل خاص للحقل المغناطيسي، الأمر الذي يسمح باستخدام تردد كهربائي ثابت حتى عند الطاقات العالية. هذه الميزة تمنحه استقراراً عالياً للحزمة الجسيمية وكفاءة تشغيلية مرتفعة، مما يجعله الخيار الأمثل لإنتاج النظائر المشعة المستخدمة في الطب النووي، ولا سيما في تطبيقات التصوير المقطعي بالإصدار البوزيتروني (PET).

من جهة أخرى، تختلف السايكلوترونات الخطية أو شبه الخطية عن الأنواع الدائرية في أن حركة الجسيمات فيها تكون أقرب إلى المسار الخطي، مع استخدام أنظمة تسريع متقدمة لتحقيق طاقات عالية جداً. ورغم قدرتها على الوصول إلى طاقات كبيرة، إلا أن تعقيدها الهندسي وكلفتها العالية يجعلان استخدامها محدوداً في المراكز البحثية المتخصصة، مع ندرة اعتمادها في التطبيقات الطبية الروتينية.

وبذلك يتضح أن اختيار نوع السايكلوترون يعتمد بشكل أساسي على متطلبات الطاقة، نوع الجسيمات المسرعة، واستقرار الحزمة، فضلاً عن طبيعة التطبيق المطلوب. ففي حين تُستخدم السايكلوترونات الكلاسيكية والمتزامنة في الأبحاث الفيزيائية، تُعد السايكلوترونات الإليكترونية العمود الفقري للتطبيقات الطبية الحديثة، بينما تبقى السايكلوترونات الخطية خياراً بحثياً متقدماً.

٦.١. أنواع السايكلوترونات حسب شركات التصنيع والتطبيق الطبي.

إضافةً إلى التصنيف الفيزيائي للسايكلوترونات اعتماداً على مسار الحركة وآلية التزامن بين الحقول الكهربائية والمغناطيسية، يُعتمد في المجال الطبي والسريري على تصنيف عملي آخر يركز على شركة التصنيع والغرض الطبي. ويُعد هذا التصنيف شائعاً في مراكز الطب النووي؛ لأنه يعكس بصورة مباشرة الفروقات في القدرة الإنتاجية، والحجم، ومتطلبات البنية التحتية، وعدد ونوع النظائر المشعة التي يمكن إنتاجها.

لقد أدى الانتقال من الاستخدامات البحثية إلى التطبيقات السريرية إلى تغيير جوهري في فلسفة تصميم السايكلوترونات.

فالأجهزة الطبية الحديثة لم تُصمم لتحقيق طاقات قصوى فقط، بل لتحقيق استقرار تشغيلي، أمان إشعاعي عالٍ، سهولة تشغيل وصيانة، وتكامل مع أنظمة التحضير والسيطرة النوعية.

ونتيجة لذلك، طورت الشركات العالمية نماذج متخصصة تلبى احتياجات المستشفيات والمراكز البحثية بدرجات مختلفة.

٧.١ . السايكلوترونات الصغيرة (Mini Cyclotrons)

تمثل السايكلوترونات الصغيرة جيلاً من الأجهزة المدمجة ذات المتطلبات المحدودة من حيث المساحة والطاقة الكهربائية.

صُممت هذه الأجهزة أساساً لإنتاج كميات محدودة من النظائر المشعة، وغالباً ما تُستخدم في:

- المستشفيات الصغيرة.
- المراكز البحثية.
- أو لأغراض التعليم والتدريب.

تتميز هذه السايكلوترونات بسهولة التشغيل وانخفاض تكاليف الصيانة، إلا أن قدرتها الإنتاجية وطاقاتها القصوى تكون محدودة، مما يقيد عدد النظائر التي يمكن إنتاجها وكمياتها. وعلى الرغم من ذلك، فإنها تمثل خياراً عملياً في البيئات التي لا تتطلب إنتاجاً واسع النطاق.

٨.١ . السايكلوترونات الطبية المتوسطة (PET Cyclotrons)

تُعد السايكلوترونات المخصصة لتقنيات التصوير المقطعي بالإصدار البوزيتروني (PET) العمود الفقري للطب النووي الحديث. وقد صُممت هذه الأجهزة خصيصاً لإنتاج نظائر باعثة للبوزيترونات، وعلى رأسها الفلور-١٨، بكميات كافية للاستخدام السريري اليومي.

من الأمثلة البارزة على هذا النوع سايكلوترونات PETtrace التي تعتمد تصميمًا إيزوكرونياً يضمن تشغيلاً مستمراً واستقراراً عالياً للحزمة الجسيمية. ويتميز هذا النوع بتصميم هندسي خاص يكون فيه قلب السايكلوترون بوضع عمودي، مع تكامل محكم لبقية الأنظمة، مثل:

- ملفات المجال المغناطيسي،
- صفائح المجال الكهربائي (الديبات Dees)،
- منظومات التبريد الغازي والمائي،
- وأنظمة الحماية والسيطرة.

يسهم هذا التصميم في تحسين إدارة الحرارة، وتقليل المساحة المطلوبة، وتسهيل عمليات الصيانة، وهي عوامل ذات أهمية كبيرة في البيئات الطبية.

٩.١ . السايكلوترونات الأفقية المتكاملة.

بعض الشركات، وإلى جانب التصاميم العمودية، طوّرت نماذج تعتمد الوضع الأفقي لقلب السايكلوترون، مع تركيز كبير على التكامل مع أنظمة التحضير الكيميائي الإشعاعي الآلي. ويهدف هذا التوجه إلى:

- تقليل التدخل البشري،
- رفع مستويات الأمان الإشعاعي،
- تحسين كفاءة الإنتاج وضبط الجودة.

تُستخدم هذه الأجهزة غالباً في المراكز الطبية الكبيرة التي تعتمد التشغيل الآلي بشكل واسع، حيث يشكل التكامل بين السايكلوترون وأنظمة التحضير والسيطرة النوعية عنصراً أساسياً في العمل اليومي.

١٠.١ . اختيار السايكلوترون وفق التطبيق الطبي.

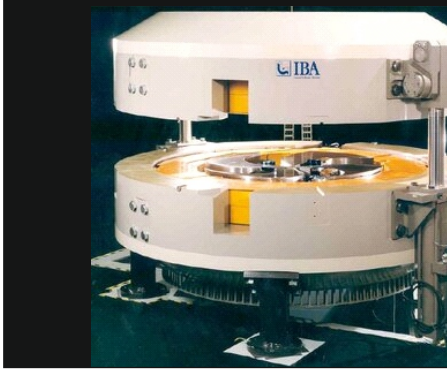
يعتمد اختيار نوع السايكلوترون في أي مؤسسة طبية أو بحثية على مجموعة من العوامل المتداخلة، من أهمها:

- عدد المرضى المتوقع يومياً،
- نوع الفحوصات الطبية المطلوبة،
- عدد النظائر المشعة المراد إنتاجها،
- البنية التحتية المتوفرة،
- ومستوى التشغيل الآلي المرغوب.

وبناءً على هذه العوامل، قد تفضل بعض المؤسسات الأجهزة الصغيرة منخفضة التكلفة، بينما تختار أخرى سايكلوترونات متوسطة أو عالية القدرة لتغطية احتياجات سريرية واسعة.

١١.١ . خلاصة تطبيقية.

يُظهر هذا التصنيف حسب شركات التصنيع والتطبيق الطبي كيف تطورت تكنولوجيا السايكلوترون من جهاز بحثي فيزيائي إلى منظومة طبية متكاملة تُخدم التشخيص والعلاج الحديث. ولم يعد السايكلوترون مجرد مسرّع جسيمات، بل أصبح جزءاً أساسياً من سلسلة طبية تشمل الإنتاج، والتحضير، والسيطرة النوعية، والحماية الإشعاعية، مما يعكس الدور المحوري للفيزياء التطبيقية في خدمة الطب المعاصر.



(b)



(a)



(c)

الشكل (١) أنواع السايكلترونات

١٢.١. نظام الهدف (Target System) والتفاعل النووي داخل السايكلترون،

يُعد نظام الهدف المرحلة النهائية والحاسمة في عمل السايكلترون، إذ عنده تتحول الحزمة الجسيمية المسرعة من مجرد مسار فيزيائي منظم إلى تفاعل نووي فعلي يؤدي إلى إنتاج النظير المشع المطلوب.

ويشكل هذا النظام حلقة الوصل بين فيزياء تسريع الجسيمات والتطبيقات الطبية، ولا سيّما إنتاج نظائر التصوير المقطعي بالإصدار البوزيتروني (PET).

١٢.١ . الغاية الفيزيائية من نظام الهدف

الهدف الأساسي لنظام الهدف هو:

- استقبال الحزمة البروتونية بطاقة محددة بدقة ،
 - إيقاف البروتونات داخل مادة الهدف بطريقة مسيطر عليها ،
 - تعظيم احتمال حدوث التفاعل النووي المرغوب ،
 - تبديد الحرارة الناتجة عن ترسيب الطاقة دون إتلاف مادة الهدف.
- في حالة إنتاج الفلور-١٨ ، يتم توجيه البروتونات بطاقة تقارب ١٦.٥ MeV نحو هدف يحتوي على ماء غني بنظير الأوكسجين - ١٨ ($O^1 H$)

١٤.١ . البنية العامة لنظام الهدف

يتكوّن نظام الهدف عادة من:

- حجرة الهدف (Target Chamber) المصممة لتحمل الضغط والحرارة ،
 - مادة الهدف (سائلة أو غازية بحسب التفاعل) ،
 - نافذة الهدف (Target Window) التي تسمح بمرور الحزمة الجسيمية ،
 - نظام تبريد فعال (مائي أو غازي) ،
 - خطوط إدخال وإخراج المادة المشعّة.
- ويُصمّم هذا النظام بعناية فائقة ، لأن أي خلل فيه قد يؤدي إلى:
- انخفاض مردود الإنتاج ،
 - تلوث المادة المشعّة ،
 - أو تلف دائم للهدف.

١٥.١ . نافذة الهدف ودورها الفيزيائي

تمثّل نافذة الهدف الحدّ الفاصل بين بيئة الفراغ داخل السيلولوترون ومادة الهدف المضغوطة. وتُصنع عادة من مواد رقيقة عالية المتانة مثل:

- النيكل
- التيتانيوم
- أو سبائك خاصة منخفضة الامتصاص.

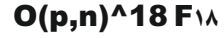
وتؤدي نافذة الهدف وظائف متعددة:

- السماح بمرور البروتونات بأقل فقد طاقي ممكن ،
- تحمّل فروق الضّغط العالية ،
- تقليل التشتت الزاوي للحزمة الجسيمية ،
- المساهمة في تبديد جزء من الحرارة.

١٦.١ . التفاعل النووي داخل الهدف.

عند دخول البروتونات إلى مادة الهدف، تبدأ بفقدان طاقتها تدريجياً عبر التفاعلات الكهرومغناطيسية مع إلكترونات الوسط، إلى أن تصل إلى عمق مناسب يحدث فيه التفاعل النووي.

في حالة إنتاج الفلور-١٨، يتم التفاعل وفق المسار النووي:



حيث:

- يصطدم البروتون بنواة الأوكسجين-١٨،
- يُطرد نيوترون،

وتتحول النواة إلى فلور-١٨ مشع باعث للبروتونات.
ويعتمد معدل هذا التفاعل على:

- طاقة البروتونات،
- شدة الحزمة الجسيمية،
- كثافة مادة الهدف،
- وزمن التشعيع.

١٧.١ . ترسيب الطاقة والتحديات الحرارية.

يؤدي اصطدام البروتونات بمادة الهدف إلى ترسيب كثيف للطاقة داخل حجم صغير نسبياً، مما يوكد حرارة عالية قد تؤدي إلى:

- غليان مادة الهدف،
 - تلف نافذة الهدف،
 - أو تغيير الخواص الفيزيائية للمادة.
- ولهذا السبب، يُزود نظام الهدف بـ:
- تبريد مائي مباشر،
 - أو تبريد غازي عالي الكفاءة،
 - وأنظمة مراقبة حرارية مستمرة.

ويُعد التحكم الحراري أحد أهم عوامل استقرار الإنتاج وسلامة التشغيل.

١٨.١. نقل المادة المشعة بعد الإنتاج

بعد انتهاء عملية التشعيع، يتم نقل المادة التي تحتوي على النظير المشع (مثل محلول F^1) إلى وحدة تحضير كيميائي إشعاعي، مثل **FastLab** عبر خطوط نقل محمية. ويُراعى في هذه المرحلة:

- تقليل الفقد الإشعاعي،
- منع التلوث،
- والحفاظ على نقاوة المنتج.

تمثل هذه المرحلة الانتقال من الفيزياء النووية إلى الكيمياء الإشعاعية التطبيقية، وهي خطوة أساسية في سلسلة إنتاج المستحضرات الصيدلانية الإشعاعية.

١٩.١. الأثر المباشر لنظام الهدف على مردود الإنتاج يمكن تلخيص دور نظام الهدف كما يلي:

- يحدد مردود النظير المشع،
- يؤثر في نقاوة المنتج،
- يتحكم في الاستقرار التشغيلي،
- ويؤثر في العمر الافتراضي للمعدة.

ولهذا يُعد نظام الهدف أحد أكثر أجزاء السايكلوترون حساسية وتعقيداً من الناحية الفيزيائية والهندسية.

النموذج الرياضي لحركة الجسيم المشحون داخل السايكلترون

١.٢. مقدمة

يُعدّ فهم المبدأ الفيزيائي لحركة الجسيمات المشحونة داخل السايكلترون خطوة أساسية لا غنى عنها لفهم كيفية عمل هذا الجهاز، سواء في التطبيقات البحثية أو الطبية. ففي حين قد يبدو السايكلترون من الخارج جهازاً هندسياً معقداً، إلا أن جوهر عمله يقوم على مجموعة من القوانين الفيزيائية الأساسية التي يدرسها الطالب في مقررات الفيزياء الكلاسيكية والكهرومغناطيسية.

في هذا الفصل، يتم التركيز على الأسس الفيزيائية الحاكمة لحركة الجسيمات المشحونة داخل الحقول الكهربائية والمغناطيسية، بدءاً من توصيف القوة المؤثرة على الجسيم المشحون، والمعروفة بقوة لورنتز، مروراً بتحليل الحركة الدائرية والحلزونية الناتجة عن وجود المجال المغناطيسي، وصولاً إلى آلية التسريع التدريجي التي يوقرها المجال الكهربائي المتناوب داخل السايكلترون.

ويهدف هذا العرض إلى توضيح كيف يمكن لجهاز واحد أن يجمع بين التوجيه المغناطيسي والتسريع الكهربائي بطريقة متزامنة ودقيقة.

كما يتناول هذا الفصل العلاقة بين سرعة الجسيم المشحون ونصف قطر مداره داخل المجال المغناطيسي، وكيف يؤدي ازدياد طاقة الجسيم إلى تغيير مسار حركته، وهي فكرة محورية لفهم البنية الهندسية للسايكلترون وآلية استخلاص الحزمة الجسيمية. وسيتم تقديم هذه المفاهيم بأسلوب تدريجي، يبدأ من الحالة غير النسبية البسيطة، ثم ينتقل إلى الحالات الأكثر تعقيداً.

ومع ازدياد طاقات الجسيمات المسرّعة، تظهر التأثيرات النسبية التي تؤدي إلى تغيير الكتلة النسبية للجسيم وفقدان التزامن مع المجال الكهربائي المتناوب.

لذلك يتطرق هذا الفصل أيضاً إلى شرح هذه التأثيرات وبيان تأثيرها في كفاءة السايكلترون، مع توضيح كيفية التي دفعت المهندسين والفيزيائيين إلى تطوير تصاميم خاصة، مثل السايكلترونات المتزامنة والإيزوكرونية، للتغلب على هذه القيود الفيزيائية.

ويهدف هذا الفصل في مجمله إلى بناء فهم فيزيائي متكامل يربط بين القوانين النظرية الأساسية والتطبيقات العملية للسايكوترون، ولا سيما في مجالات الطب النووي وإنتاج النظائر المشعة. ومن خلال هذا الربط، يتمكن الطالب من الانتقال بسلاسة من المفاهيم المجردة إلى فهم كيفية توظيفها في أجهزة حقيقية تُستخدم يوميًا في البحث العلمي والتشخيص الطبي.

٢.٢. النموذج الرياضي لحركة الجسيم المشحون داخل السايكوترون

يُعدّ السايكوترون جهازًا يعتمد في جوهره على حركة الجسيمات المشحونة داخل حقول كهرومغناطيسية منتظمة، ولذلك فإن فهم سلوك الجسيم داخله يتطلب بناء نموذج رياضي دقيق يستند إلى القوانين الأساسية للحركة في الفيزياء الكلاسيكية. ويهدف هذا النموذج إلى توصيف مسار الجسيم، وسرعته، وتسارعه، والطاقة التي يكتسبها أثناء عملية التسريع، ومن ثم ربط هذه الكميات الفيزيائية بتصميم السايكوترون وآلية عمله.

يعتمد النموذج الرياضي لحركة الجسيم المشحون داخل السايكوترون على قوانين نيوتن للحركة، ولا سيما القانون الثاني الذي ينص على أن القوة المؤثرة على جسم تساوي حاصل ضرب كتلته في تسارعه. وفي حالة الجسيمات المشحونة، لا تكون القوة ميكانيكية فقط، بل تكون في الغالب قوة كهرومغناطيسية ناتجة عن تفاعل شحنة الجسيم مع الحقول الكهربائية والمغناطيسية المحيطة به. وتُعطى هذه القوة بقانون لورنتز، الذي يشكل الأساس الفيزيائي لتحليل حركة الجسيم داخل السايكوترون.

يُفترض في النموذج الأولي أن الجسيم يتحرك داخل مجال مغناطيسي منتظم موجه عموديًا على مستوى حركة الجسيم، بينما يكون تأثير المجال الكهربائي محصورًا في مناطق محددة من الجهاز، ولا سيما الفجوة بين نصفي المسرع (الديات). وبهذا الافتراض، يمكن تبسيط تحليل الحركة ودراسة تأثير كل مجال على حدة، قبل الانتقال إلى النموذج الكامل الذي يجمع بين المجالين معًا. عند وجود المجال المغناطيسي فقط، يخضع الجسيم المشحون لقوة مغناطيسية تكون دائمًا عمودية على متجه سرعته. ونتيجة لذلك، لا تؤدي هذه القوة إلى تغيير مقدار سرعة الجسيم، وإنما تغير اتجاهها فقط، مما ينتج عنه حركة دائرية منتظمة. ويُعد هذا السلوك أساس فهم المسار الحلزوني الذي تتبعه الجسيمات داخل السايكوترون عند إضافة التسريع الكهربائي لاحقًا.

أما عند إدخال المجال الكهربائي المتناوب في الفجوة بين نصفي المسرع، فإن الجسيم يكتسب طاقة إضافية في كل مرة يعبر فيها هذه الفجوة. تؤدي هذه الزيادة في الطاقة إلى زيادة سرعة الجسيم، وبالتالي إلى زيادة نصف قطر مداره داخل المجال المغناطيسي. وبهذا، تتحول الحركة من دائرة ثابتة إلى مسار حلزوني متزايد نصف القطر، وهو السلوك المميز للجسيمات المسرعة داخل السايكوترون.

يتيح هذا النموذج الرياضي توصيف حركة الجسيم في بعدين ضمن المستوى العمودي على المجال المغناطيسي، كما يمكن توسيعه إلى ثلاثة أبعاد عند دراسة الانحرافات الصغيرة أو تأثيرات عدم الانتظام في الحقول. ومن خلال هذا التوصيف، يصبح بالإمكان حساب:

- نصف قطر المدار،
- التردد الزاوي للحركة،
- سرعة الجسيم وطاقة حركته،

وعدد الدورات التي ينجزها الجسيم قبل استخلاصه من الجهاز.

ويمثل هذا التحليل الرياضي الأساس الذي تُبنى عليه جميع التصاميم الهندسية للسايكلوترون، كما يفسر القيود الفيزيائية التي تظهر عند الطاقات العالية، مثل التأثيرات النسبية وفقدان التزامن. لذلك، فإن استيعاب هذا النموذج لا يُعد مجرد تمرين رياضي، بل خطوة جوهرية لفهم كيفية عمل السايكلوترون فعلياً ولماذا تم تطوير أنواعه المختلفة. في الأقسام اللاحقة من هذا الفصل، سيتم اشتقاق المعادلات الأساسية لحركة الجسيم المشحون داخل المجال المغناطيسي، ثم إدخال تأثير المجال الكهربائي، وصولاً إلى مناقشة حدود النموذج الكلاسيكي وظهور التأثيرات النسبية عند الطاقات العالية.

٣.٢. القوة المؤثرة على الجسيم المشحون.

عند تحرك الجسيم المشحون في حقول كهربائية **E** ومغناطيسية **B** يتعرض لقوة لورنتز، والتي تُعطى بالعلاقة التالية:

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \dots\dots\dots (1)$$

حيث:

- (**q**) شحنة الجسيم (كولوم)
- (**v**) سرعة الجسيم (م / ث)
- (**E**) المجال الكهربائي (فولت / متر)
- (**B**) المجال المغناطيسي (تسلا)

المجال الكهربائي يتواجد في السايكلوترون بشكل متقطع بين أذرع الصفائح المعدنية (الديز **D**) لتسريع الجسيم، بينما يكون المجال المغناطيسي عامودياً على مستوى الحركة لتوجيه الجسيم في مسار دائري.

٤.٢. معادلات الحركة في وجود المجال المغناطيسي فقط

إذا افترضنا عدم وجود مجال كهربائي داخل الديز، فإن القوة الوحيدة المؤثرة هي القوة المغناطيسية:

$$(2) \dots\dots\dots \times \mathbf{B} \mathbf{v} (=q (\mathbf{F}_B))$$

إذا اعتبرنا حركة الجسيم في مستوى (xy) والمجال المغناطيسي \mathbf{B} في اتجاه (z) أي ان $\mathbf{B} = k \mathbf{B}$ ، فإن:

$$, \dots\dots\dots (3) \mathbf{v}_y \mathbf{B} \mathbf{v}_x = q \mathbf{v} \mathbf{F}$$

$$\dots\dots\dots (4) \mathbf{F}_y = -q \mathbf{v}_x \mathbf{B}$$

باستخدام قانون نيوتن: $\mathbf{F} = m \mathbf{a}$ (نحصل على معادلات الحركة

$$\dots\dots\dots (5) \mathbf{v}_y \mathbf{B} dt = q \mathbf{v}_x dv_x (m$$

$$(6) \dots\dots\dots \mathbf{v}_x \mathbf{B} dt = -q \mathbf{v}_y dv_y (m$$

حل هذه المعادلات ينجم عنه حركة دورانية للجسيم:

$$(7) \dots\dots\dots \mathbf{v}_0 \mathbf{c} t + (x(t) = R \sin$$

$$(8) \dots\dots\dots \mathbf{v}_0 \mathbf{c} t + (y(t) = R \cos$$

حيث:

(R) : نصف قطر المدار

(Wc=dB \ m) : التردد الدوري (تردد السايكلوترون)

(0) : زاوية ابتدائية تحدد موضع الجسيم عند (t=0)

٥.٢. نصف قطر المدار ودوران الجسيم

نصف قطر المدار الدائري مرتبط بالسرعة وكمية الحركة:

$$(9) \dots\dots\dots) qB (l) m \mathbf{v} (= R$$

عندما تزداد سرعة الجسيم بعد كل عبور بين الصفيحتين (الديز)، يزداد نصف القطر، مما يعني أن الجسيم يتحرك تدريجياً في مدارات متسعة.

التردد الدوري لا يعتمد على نصف القطر أو السرعة (للسرعات غير النسبية):

$$\mathbf{c} / 2\pi = qB / 2\pi m \dots\dots\dots (10) f =$$

٦.٢. تأثير المجال الكهربائي.

المجال الكهربائي (E) يتواجد فقط بين أذرع الديدز (الصفحتين) ، ويساهم في زيادة طاقة الجسيم. القوة الكهربائية تُعطى بالعلاقة:
$$F = qE \quad (11) \dots\dots\dots$$

العمل الذي تقوم به القوة الكهربائية على الجسيم ينتج عنه:
$$K = qV \dots\dots\dots (12)$$

حيث (V) هو فرق الجهد بين الديدز. وبالتالي، بعد كل مرور بين الديدز، تزداد سرعة الجسيم:

$$v_{(n+1)} = \sqrt{v_n^2 + 2qV/m} \dots\dots\dots (13)$$

٧.٢. لنموذج الرياضي المتكامل.

عند دمج تأثير المجال المغناطيسي والمجال الكهربائي بين الديات (الديدز)، يمكن تمثيل حركة الجسيم باستخدام المعادلات التفاضلية:

$$m \frac{dv}{dt} = q(E + v \times B) \dots\dots\dots (14)$$

يمكن حل هذه المعادلات رقمياً للحصول على المسار الدقيق ($x(t), y(t)$) وسرعة الجسيم ($v(t)$) عند كل دورة.

٨.٢. الحركة في السايكلترون النسبوي.

عند سرعات قريبة من سرعة الضوء، يجب تصحيح الكتلة للسرعة وفق النسبية:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \dots\dots\dots (15)$$

ويصبح نصف القطر:

$$R = \frac{m_0 v}{qB \sqrt{1 - (v/c)^2}} \dots\dots\dots (16)$$

وهذا يفسر الحاجة لتصميم سايكلترونات متزامنة للحفاظ على التزامن بين المجال الكهربائي ودوران الجسيم.

٩.٢ . الخلاصة..

- يتحرك الجسيم المشحون داخل السايكلترون في مسار دائري بسبب المجال المغناطيسي.
- يساهم المجال الكهربائي بين الدير في تسريع الجسيم وزيادة طاقته.
- يزداد نصف قطر المدار مع زيادة السرعة، بينما يبقى تردد الدوران ثابتاً للسرعات غير النسبية.
- يعتمد النموذج الرياضي على معادلات نيوتن وقوة لورنتز، ويمكن تعديله لمراعاة تأثيرات نسبية عند السرعات العالية.

١٠.٢ . الحلول الهندسية لمواجهة التأثيرات النسبية.

كما تبين في الأقسام السابقة، يعتمد مبدأ عمل السايكلترون الكلاسيكي على ثبات التردد الزاوي لحركة الجسيم المشحون داخل المجال المغناطيسي، وهو افتراض صحيح فقط في الحالة غير النسبية عندما تكون سرعة الجسيم أقل بكثير من سرعة الضوء. إلا أنه مع ازدياد طاقة الجسيم وتسارعه إلى سرعات عالية، تبدأ التأثيرات النسبية بالظهور، حيث تزداد الكتلة النسبية للجسيم، ويؤدي ذلك إلى تغيير زمن دورته وفقدان التزامنه مع المجال الكهربائي المتناوب.

تمثل هذه الظاهرة أحد أهم القيود الفيزيائية للسايكلترون الكلاسيكي، إذ تؤدي إلى انخفاض كفاءة التسريع وتحديد الطاقة القصوى التي يمكن الوصول إليها. ولمواجهة هذه المشكلة، طوّر الفيزيائيون والمهندسون حلولاً هندسية مبتكرة أدت إلى ظهور نوعين رئيسيين من السايكلترونات الحديثة، ضمّما خصيصاً للتعامل مع التأثيرات النسبية بطرائق مختلفة.

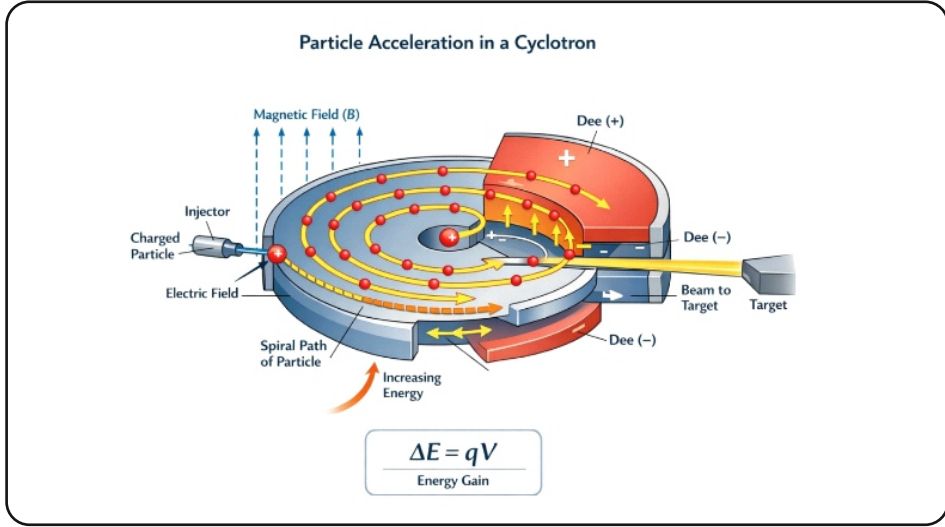
١١.٢ . السايكلترون المتزامن (Synchrocyclotron)

يعتمد السايكلترون المتزامن على مبدأ تعديل تردد المجال الكهربائي أثناء عملية التسريع، بحيث يتناقص تدريجياً ليتلاءم مع الزيادة في الكتلة النسبية للجسيم. وبهذا الأسلوب، يتم الحفاظ على التزامن بين حركة الجسيم والمجال الكهربائي المتناوب، حتى عند الطاقات العالية.

١٢.٢ . الدلالة الفيزيائية والهندسية للحلول النسبية.

توضح الحلول السابقة العلاقة الوثيقة بين الفيزياء النسبية والتصميم الهندسي للسايكلترون.

فبدل اعتبار التأثيرات النسبية عائقاً غير قابل للتجاوز، تم التعامل معها بوصفها تحدياً فيزيائياً يمكن حله عبر التحكم في تردد المجال الكهربائي (في السايكلترون المتزامن)، أو التحكم في توزيع المجال المغناطيسي (في السايكلترون الإيزوكروني).



الشكل (٢) مخطط يوضح تسارع الجسيمات داخل السايكلترون

وقد أتاح هذا الضم العميق للفيزياء الأساسية تطوير أجهزة سايكلترون عالية الكفاءة قادرة على تلبية متطلبات التطبيقات الطبية الحديثة. وتعد الأجهزة الطبية المتقدمة، مثل سايكلوترونات **PETtrace** و **Synthera** أمثلة عملية على نجاح هذه الحلول الهندسية في تحقيق تسريع مستقر وموثوق للجسيمات المشحونة.

ويبين الشكل (٢) بصورة تخطيطية آلية تسارع الجسيمات داخل قلب السايكلترون، موضّحاً كيف يتم الحفاظ على التزامن بين حركة الجسيم والحقول الكهرومغناطيسية في التصميم الحديثة، على الرغم من ظهور التأثيرات النسبية عند الطاقات العالية.

١٤.٢. المسارات التفصيلية للجسيمات داخل السايكلترون.

تتسم حركة الجسيمات المشحونة داخل السايكلترون بدرجة عالية من الدقة والانتظام، إذ لا تتحقق عملية التسريع بصورة عشوائية، بل ضمن مسارات محسوبة بدقة ناتجة عن التفاعل المنظم بين المجال المغناطيسي والمجال الكهربائي المتناوب.

ويُعد فهم هذه المسارات خطوة أساسية لفهم كيفية انتقال الجسيم من طاقة ابتدائية منخفضة إلى طاقة عالية كافية لإحداث التفاعل النووي داخل الهدف.

من الناحية الفيزيائية، تبدأ حركة الجسيم داخل السايكلوترون من مركز الجهاز تقريباً، حيث يتم حقنه بطاقة منخفضة.

وتحت تأثير المجال المغناطيسي المنتظم، يتخذ الجسيم مساراً دائرياً، بينما يعمل المجال الكهربائي المتناوب على زيادة طاقته الحركية في كل مرة يعبر فيها الفجوة بين نصفي المسرع (الديات). ومع كل زيادة في الطاقة، يزداد نصف قطر المدار، مما يؤدي إلى تشكل مسار حلزوني متسع تدريجياً يتجه من مركز السايكلوترون نحو أطرافه الخارجية. ولا بد من التأكيد على أن هذا المسار الحلزوني ليس مجرد نتيجة هندسية، بل هو انعكاس مباشر للعلاقات الفيزيائية التي تحكم حركة الجسيم المشحون داخل المجال المغناطيسي، حيث يرتبط نصف قطر المدار طردياً بسرعة الجسيم. وبذلك، يمكن تتبع تطور طاقة الجسيم من خلال مراقبة تغير نصف قطر مساره داخل السايكلوترون. غير أن تحقيق هذه الحركة المنتظمة يتطلب أكثر من مجرد وجود حقول كهربائية ومغناطيسية، إذ يحتاج السايكلوترون إلى منظومة متكاملة من الأنظمة الثانوية والمعدات المساندة التي تضمن:

- توليد الجسيمات المشحونة،
- الحفاظ على استقرار مسارها،
- منع فقدانها أثناء التسريع،
- وضمان وصولها إلى الهدف بطاقة مناسبة.

وفيما يلي عرضٌ تدريسي لأهم هذه الأنظمة ودورها في تحديد المسارات التفصيلية للجسيمات داخل السايكلوترون.

١٥.٢. مصدر الجسيمات المشحونة (Ion Source)

يُعد مصدر الجسيمات المشحونة نقطة البداية لمسار الجسيم داخل السايكلوترون. ففي هذا الجزء، يتم توليد البروتونات أو الأيونات الخفيفة من غاز مناسب (مثل الهيدروجين)، ثم تُستخلص هذه الجسيمات بطاقة ابتدائية منخفضة. وتؤثر خصائص مصدر الأيونات، مثل الاستقرار والتيار المستخرج، بشكل مباشر في جودة الحزمة الجسيمية والمسار الذي ستتبعه داخل الجهاز.

١٦.٢. نظام الحقن (Injection System)

بعد توليد الجسيمات، يتم توجيهها إلى داخل منطقة التسريع باستخدام نظام الحقن. يهدف هذا النظام إلى إدخال الجسيمات في المسار الصحيح وبالزاوية المناسبة، بحيث تتوافق حركتها الابتدائية مع شروط التزامن داخل المجال المغناطيسي. ويُعد الضبط الدقيق لنظام الحقن أمراً حاسماً، إذ إن أي انحراف صغير في هذه المرحلة قد يؤدي إلى فقدان الجسيمات أو اصطدامها بجدران غرفة التسريع.

١٧.٢ . الديات والفجوة الكهربائية (Dees and Acceleration Gap)

تشكل الديات القلب الضعلي لعملية التسريع. فعند عبور الجسيم الفجوة بين نصفي المسرع، يتعرض لمجال كهربائي متناوب يزيد من طاقته الحركية. ويتم ضبط تردد هذا المجال بحيث يتوافق مع زمن دورة الجسيم داخل المجال المغناطيسي، مما يضمن تسريعاً متزامناً ومنتظماً. وتؤدي هذه العملية المتكررة إلى انتقال الجسيم عبر مسارات دائرية متزايدة نصف القطر.

يعمل المجال المغناطيسي على توجيه الجسيمات وإبقائها ضمن مسارات محددة داخل السايكلوترون. ويجب أن يكون هذا المجال منتظماً وموزعاً بدقة، إذ إن أي عدم انتظام يؤدي إلى تشويه المسار الحلزوني وفقدان الاستقرار. وفي السايكلوترونات الحديثة، يتم تشكيل المجال المغناطيسي بعناية لضمان تركيز الحزمة الجسيمية والحفاظ على استقرارها حتى عند الطاقات العالية.

١٩.٢ . نظام الاستخلاص (Extraction System)

عندما يصل الجسيم إلى الطاقة المطلوبة، يتم استخراجه من السايكلوترون وتوجيهه نحو الهدف باستخدام نظام استخلاص خاص. يعتمد هذا النظام عادة على عناصر كهربائية أو مغناطيسية تحدث انحرافاً محكوماً في مسار الجسيم، بحيث يغادر المدار الحلزوني الداخلي ويتجه نحو خط الشعاع.

وتعد هذه المرحلة حساسة للغاية، لأن كفاءة الاستخلاص تؤثر مباشرة في شدة الحزمة الجسيمية المستخدمة في التفاعل النووي.

٢٠.٢ . دور الأنظمة الثانوية في استقرار المسار.

إلى جانب الأنظمة الرئيسية السابقة، يضم السايكلوترون عدداً من الأنظمة الثانوية مثل:

- أنظمة الفراغ للحفاظ على ضغط منخفض جداً داخل غرفة التسريع،
- أنظمة التبريد لتقليل التأثيرات الحرارية،
- أنظمة التحكم والمراقبة لضبط الحقول والتيارات بدقة.

وتعمل هذه الأنظمة مجتمعة على ضمان أن تبقى مسارات الجسيمات مستقرة وقابلة للتكرار، وهو شرط أساسي للتشغيل الآمن والفعال للسايكلوترون، ولا سيما في التطبيقات الطبية.

أولاً: قناني الغازات ووظائفها في السايكلوترون.

تُعد منظومة الغازات من الركائز الأساسية لتشغيل السايكلوترون، إذ تؤدي أدواراً محورية في توليد الحزمة الأيونية، وضمان استقرار التسريع، والتحكم في التفاعلات النووية، إضافة إلى وظائف التبريد والمعايرة.

وتُستخدم جميع الغازات في السايكلوترون بنقاوة عالية جداً (عادةً 99.9999%)، وذلك لتجنب التلوث، والحفاظ على استقرار مصدر الأيونات، ومنع تشكل شوائب قد تؤثر في جودة الحزمة الجسيمية أو تؤدي إلى تلف المكونات الداخلية للجهاز.

١- غاز الهيدروجين (H)

يُعد غاز الهيدروجين الغاز الأساسي في معظم السايكلوترونات الطبية، ويُستخدم بشكل رئيسي داخل مصدر الأيونات لتوليد أيونات الهيدروجين السالبة (H^-). وتكمن أهمية هذه الأيونات في كونها تسمح بألية استخلاص فعالة ومرنة باستخدام رقائق نزع الإلكترونات (Stripping Foils)، مما يتيح الحصول على حزم بروتونية مستقرة ذات شدة مناسبة للتفاعلات النووية الطبية.

المرحلة الأولى: توليد وحقن الجسيم المشحون.

في هذه المرحلة يدخل غاز الهيدروجين إلى مصدر الأيونات، حيث يتعرض لتفريغ كهربائي يؤدي إلى تأينه وتكوين أيونات (H^-). بعد ذلك يتم حقن هذه الأيونات بطاقة ابتدائية منخفضة جداً إلى مركز السايكلوترون عبر نظام حقن دقيق. يبدأ الجسيم المشحون حركته داخل مجال مغناطيسي منتظم، تكون سرعته في هذه المرحلة صغيرة نسبياً، ويكون مساره دائرياً قريباً من مركز الجهاز.

المرحلة الثانية: التسريع الحلزوني داخل السايكلوترون.

عند عبور الجسيم المشحون الفجوة بين نصفي الصفائح المعدنية (الديات)، يتعرض لمجال كهربائي متناوب يؤدي إلى زيادة طاقته الحركية. ووفقاً لمبدأ التسريع الكهربائي، تزداد سرعة الجسيم في كل عبور للفجوة، مما يؤدي إلى زيادة نصف قطر مداره داخل المجال المغناطيسي.

تؤدي هذه الزيادة التدريجية في نصف القطر إلى تكوّن مسار حلزوني متسع، وهو المسار المميز لحركة الجسيمات داخل السايكلوترون. وتتميز هذه الألية بقدرتها على تحقيق طاقات عالية داخل مساحة محدودة، مقارنة بالمسرعات الخطية التي تتطلب أطوالاً كبيرة لتحقيق طاقات مماثلة.

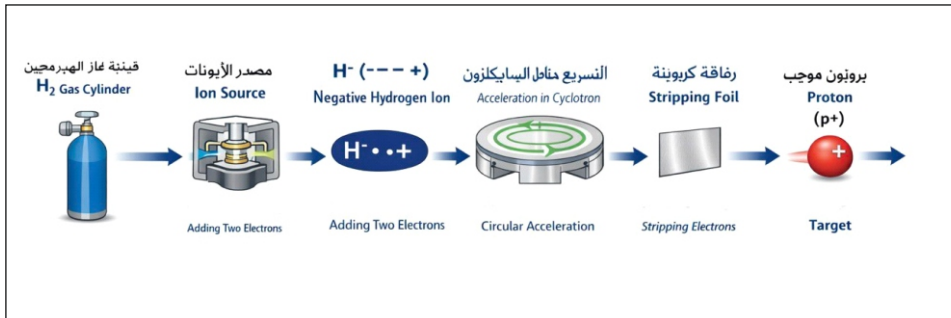
المرحلة الثالثة: الوصول إلى الطاقة النهائية.

يستمر الجسيم في الحركة الحلزونية إلى أن يصل إلى الطاقة النهائية المطلوبة، والتي تُحدّد وفق التطبيق المقصود من السايكلوترون. ففي السايكلوترونات الطبية المستخدمة لإنتاج نظائر التصوير المقطعي بالإصدار البوزيتروني (PET)، مثل الفلور-١٨، تصل طاقة البروتونات عادةً إلى نحو ١٦.٥ MeV عند هذه المرحلة، يكون نصف قطر المدار في أقصى قيمه داخل الجهاز، ويصبح الجسيم جاهزاً للاستخلاص والتوجيه نحو نظام الهدف. المرحلة الرابعة: الاستخلاص والتفاعل النووي داخل الهدف.

بعد الوصول إلى الطاقة المطلوبة، تمر أيونات (H^-) عبر رقائق نزع الإلكترونات (Stripping Foils)، حيث تفقد إلكترونيها وتتحول إلى بروتونات موجبة. يؤدي هذا التحول إلى تغيير فوري في مسار الجسيم، مما يسمح باستخلاصه من السايكلوترون وتوجيهه نحو الهدف. في حالة إنتاج الفلور-١٨، يتم توجيه الحزمة البروتونية إلى هدف يحتوي على ماء غني بنظير الأوكسجين-١٨ (^{18}O). عند حدوث التصادم النووي، تتحول نواة الأوكسجين-١٨ إلى نواة الفلور-١٨، وهو النظير المشع المطلوب للتطبيقات الطبية. بعد ذلك، ينتقل النظير الناتج إلى منظومة أخرى، مثل جهاز Fast Lab، حيث يخضع لسلسلة من التفاعلات الكيميائية الإشعاعية لتحويله إلى مركب دوائي إشعاعي (Pharmaceutical Radiotracer) جاهز للاستخدام البشري، مثل مركب FDG

، خلاصة ،

- غاز الهيدروجين هو الأساس في توليد الحزمة البروتونية
- المسار الحلزوني نتيجة مباشرة للتسريع المتدرج
- طاقة ١٦.٥ MeV تمثل شرطاً فيزيائياً للتفاعل النووي المطلوب
- السايكلوترون ليس جهازاً منفصلاً، بل جزء من سلسلة إنتاج دوائي متكاملة
- السايكلوترون ليس جهازاً منفصلاً، بل جزء من سلسلة إنتاج دوائي متكاملة >



الشكل (٣) يوضح التسلسل العملي لدخول الهيدروجين للسايكلوترون

2) غاز النيتروجين (N)

يُعد غاز النيتروجين (N) من الغازات الثانوية الأساسية في منظومة تشغيل السايكلوترون، على الرغم من كونه غير مشارك مباشرة في التفاعلات النووية لإنتاج النظائر، إلا أن دوره محوري في ضمان الاستقرار التشغيلي، والسلامة، وكفاءة الإنتاج.

أولاً: توفير بيئة خاملة (Inert Atmosphere)

يُسْتخدَم غاز النيتروجين لتكوين بيئة خاملة داخل عدد من الوحدات الملحقة بالسايكلوترون، وذلك بهدف:

- ١- منع وجود الأوكسجين وبخار الماء
- ٢- تقليل مخاطر الأكسدة والتآكل
- ٣- حماية المكونات الحساسة، خصوصاً في:

• وحدات الـ RF

• خطوط النقل

• بعض أجزاء نظام الهدف (Target System)

الطبيعة الخاملة للنيتروجين تمنع حدوث تفاعلات كيميائية غير مرغوبة قد تؤثر في أداء الجهاز أو سلامته.

ثانياً: تجفيف الأنظمة (Purging & Drying)

يُستخدَم النيتروجين الجاف عالي النقاوة في عمليات:

- تجفيف خطوط الغاز
- تنظيف الأنابيب والممرات قبل التشغيل
- منع تكاثف الرطوبة داخل الأنظمة المغلقة لان وجود الرطوبة قد يؤدي إلى:
- فقدان العزل الكهربائي
- تلف المكونات
- اضطراب في الجهد العالي

ولهذا فإن عملية الـ **Nitrogen Purge** تُعد خطوة أساسية قبل التشغيل وأثناء الصيانة.

ثالثاً: حماية أنظمة الجهد العالي

في مناطق الجهد العالي داخل السايكلوترون:

- يُستخدَم النيتروجين كغاز عازل
- يقلل من احتمالية التفريغ الكهربائي (Electrical Breakdown)
- يحافظ على استقرار المجال الكهربائي

وهذا مهم بشكل خاص لضمان تشغيل مستقر لحزمة البروتونات دون فقد أو انحراف.

رابعاً: دور النتروجين في نظام الهدف (Target System)

في نظام الأهداف الخاصة بإنتاج النظائر المشعة (مثل F^1)

• يُستخدم النتروجين لتطهير (Purge) خطوط الهدف.

• إزالة بقايا الغازات أو الرطوبة بعد كل دورة إنتاج.

• المحافظة على نقاوة الوسط داخل الهدف.

هذا ينعكس مباشرة على:

• جودة النظير المنتج.

• تقليل الشوائب.

• إطالة عمر الهدف.

خامساً: السلامة التشغيلية

يساهم غاز النتروجين في:

• تقليل مخاطر الاشتعال أو الانفجار

• توفير وسط آمن أثناء التشغيل المستمر

• دعم أنظمة الإيقاف الآمن (Safe Shutdown)

رغم كونه غير سام، إلا أن التسرب الكبير قد يسبب نقص الأوكسجين، لذا تُراعى أنظمة

التهوية والمراقبة.

خلاصة علمية

يمكن القول إن غاز النتروجين في السايكلوترون عنصر تشغيلي داعم لا غنى عنه، إذ

يضمن:

• استقرار الأنظمة

• حماية المكونات

• جودة الإنتاج

• السلامة العامة

ورغم عدم مشاركته المباشرة في التفاعلات النووية، إلا أن غيابه يجعل تشغيل

السايلوترون غير آمن وغير مستقر وكذلك له المساهمة في بعض عمليات الضغط والتحكم

الهوائي داخل الأنظمة المساندة.

3 غاز الهيليوم (He)

غاز الهيليوم له دوره في تبريد الـ Foils وحوامل الأهداف في السايكلوترون، إذ يُعد غاز

الهيليوم (He) من الغازات التشغيلية الأساسية في منظومة السايكلوترون، ويُستخدم على

وجه الخصوص في أنظمة التبريد المرتبطة بالأهداف (Targets)، وذلك لما يمتلكه من

خصائص فيزيائية فريدة تجعله مثالياً لإزالة الحرارة الناتجة عن اصطدام الحزمة

البروتونية عالية الطاقة بالهدف، ويستخدم الهيليوم للأسباب التالية: -

أولاً: مميزات الهيليوم.

يتميز غاز الهيليوم بعدة خصائص تجعله الخيار الأمثل للتبريد في بيئات السايكلوترون، من أهمها: -

- ١- انه خامل كيميائياً: لا يتفاعل مع المواد المعدنية أو مع مواد الهدف.
 - ٢- له موصلية حرارية عالية مقارنة بمعظم الغازات.
 - ٣- كتلة ذرية صغيرة تسمح له بالانتشار السريع داخل القنوات الضيقة.
 - ٤- غير قابل للاشتعال وآمن نسبياً عند الاستخدام الصحيح.
- ثانياً: مصدر الحرارة في نظام الهدف.

عند تسليط الحزمة البروتونية المسرّعة على الهدف تتحول نسبة كبيرة من طاقة البروتونات إلى حرارة تتركز هذه الحرارة على الرقائق المعدنية الرقيقة الـ (Foil) وحوامل الأهداف وواجهات دخول الحزمة، في حال عدم إزالة هذه الحرارة بكفاءة، قد يؤدي ذلك إلى:

١- تشوه الـ Foils أو تمزقها

٢- فقدان استقرار الهدف.

٣- انخفاض كفاءة إنتاج النظير.

٤- تلف دائم في نظام الهدف.

ثالثاً: دور الهيليوم في تبريد الـ Foils

تُعد الـ Foils من أكثر أجزاء نظام الهدف حساسية للحرارة، إذ تعمل كحواجز رقيقة تفصل بين:

• فراغ الحزمة داخل السايكلوترون

• وسط الهدف (غازي أو سائل)

يقوم الهيليوم هنا بـ:

• الجريان المستمر حول الـ Foil

• امتصاص الحرارة المتراكمة بسرعة

• نقلها بعيداً عن سطح الـ Foil

وبسبب صغر حجم ذرات الهيليوم، فإنه:

• يصل إلى المناطق الضيقة جداً

• يوقر تبريداً متجانساً

• يقلل من الإجهاد الحراري المضاجئ

رابعاً: تبريد حوامل الأهداف (Target Holders)

حوامل الأهداف تتعرض إلى:

• حرارة مباشرة من الحزمة

• حرارة منتقلة من الـ Foils

يساعد الهيليوم على:
• تثبيت درجة حرارة الحوامل
• منع التمدد الحراري غير المتكافئ
• الحفاظ على المحاذاة الدقيقة للحزمة مع الهدف
وهذا الأمر ضروري لضمان:

• توزيع متجانس للحزمة
• استقرار ميكانيكي طويل الأمد
خامساً: الهيليوم مقابل وسائط تبريد أخرى.
رغم استخدام الماء أو السوائل في تبريد بعض الأجزاء، إلا أن الهيليوم يتميز في:
• المناطق القريبة جداً من الحزمة
• البيئات ذات الإشعاع العالي
• الأجزاء التي لا تتحمل السوائل
كما أن الهيليوم:
• لا يسبب تآكلاً.
• لا يخلف رواسب.
• لا يؤثر على نقاوة الهدف.

سادساً: الأثر المباشر على جودة الإنتاج يساهم التبريد الفعال بالهيليوم في:

• إطالة عمر الـ **Foils**
• تقليل الأعطال المفاجئة
• الحفاظ على ثبات ظروف التفاعل
• رفع كفاءة إنتاج النظائر (مثل F^{18})
خلاصة علمية مبسطة

يمكن تلخيص دور غاز الهيليوم في السايكلوترون بأنه وسيط تبريد حامل وعالي الكفاءة، مصمم خصيصاً لحماية الأجزاء الحرجة في نظام الهدف من التأثيرات الحرارية الشديدة، وضمان استمرارية الإنتاج واستقراره.

٤- غاز الأوكسجين (**O**)

يستخدم غاز الأوكسجين بشكل رئيسي في تحضير الأهداف الغازية، ولا سيما في إنتاج نظير الفلور F^{18} من خلال تفاعل:

O18(p,n)F18

حيث يستخدم الأوكسجين ضمن منظومة الهدف المحتوي على ماء مُخصَّب بالأوكسجين-١٨، وكذلك يستخدم في دعم بعض عمليات المعايرة والتحكم الكيميائي في منظومة الإنتاج الإشعاعي.

خلاصة فنية

إن الاستخدام الدقيق والمنضبط لهذه الغازات ذات النقاوة العالية يضمن:

- استقرار الحزمة المعجلة.
- كفاءة إنتاج النظائر المشعة.
- سلامة الأنظمة التشغيلية.
- إطالة العمر التشغيلي لمكونات السايكلترون.

ويُعد الاستخدام المنظم والدقيق لهذه الغازات عنصراً أساسياً في تحقيق تشغيل آمن ومستقر وفق المعايير المعتمدة.

٢.٦ تأثيرات التصميم الهندسي للحقل المغناطيسي.

تصميم الحقل المغناطيسي داخل السايكلترون له دور رئيسي في استقرار الحزمة الجسيمية وكفاءة التسريع:

١. الحقل المغناطيسي المنتظم

- موجود في السايكلترونات الكلاسيكية.
- يحافظ على مسار دائري ثابت للجسيمات ذات الطاقة المنخفضة.

٢. الحقل المغناطيسي متعدد القطاعات (Sector-Focused Field)

- يستخدم في السايكلترونات الحديثة، مثل الإيزوكرونية.
- يسمح بتركيز الحزمة الجسيمية وتحسين استقرارها أثناء التسارع الحلزوني.
- يزيد من كفاءة الإنتاج ويقلل فقد الجسيمات أثناء الحركة.
- ٣. تعديل الحقل لمواجهة التأثيرات النسبية
- عند الطاقات العالية، يتم تشكيل الحقل المغناطيسي بحيث يتغير تدريجياً مع نصف قطر المسار، مع الحفاظ على تزامن الجسيمات مع الحقل الكهربائي.
- هذا هو أساس تصميم السايكلترونات الإيزوكرونية المستخدمة في الطب النووي.

٢.٧ التحكم بالحزمة الجسيمية

- يعتمد على التصميم الهندسي للحقل + نظام التوجيه الكهربائي.
- يضمن وصول الجسيمات إلى الهدف بدقة لتوليد النظائر المطلوبة دون فقد كبير.
- تشمل تقنيات التحكم:

١. ضبط شكل وشدة الحقل المغناطيسي.

٢. تعديل فرق الجهد الكهربائي للفجوة بين نصفي الدير.

٣. استخدام مرايا مغناطيسية أو أجهزة توجيه إضافية لتصحيح المسار.

٢١.٢. منظومة التفريغ (Vacuum System) ومراحل حدوث التفريغ داخل السايكلوترون

تعد منظومة التفريغ من أكثر الأنظمة حساسية وأهمية في السايكلوترون، إذ إن نجاح عملية تسريع الجسيمات المشحونة يعتمد بصورة مباشرة على توفير بيئة شبه خالية من الغاز داخل غرفة التسريع. فوجود جزيئات الغاز يؤدي إلى تصادمات غير مرنة مع الجسيمات المسرعة، مما يسبب فقدان الطاقة، وتشتيت الحزمة، وزيادة احتمالية التفريغ الكهربائي غير المرغوب فيه.

الغاية الفيزيائية من التفريغ والهدف الأساسي من التفريغ هو:

- زيادة المسار الحر المتوسط للجسيمات المشحونة،
 - تقليل احتمالية التصادمات العشوائية،
 - منع تكوّن بلازما غير مسيطر عليها داخل غرفة التسريع،
 - الحفاظ على استقرار الحقول الكهربائية والمغناطيسية.
- ولهذا السبب، يُحافظ داخل السايكلوترون على ضغط منخفض جداً يصل عادة إلى 10^{-6} - 10^{-7} mbar.

مراحل حدوث التفريغ داخل السايكلوترون لا يتم الوصول إلى الفراغ العالي دفعة واحدة، بل يمر التفريغ بعدة مراحل متتابعة، لكل مرحلة دور فيزيائي محدد.

المرحلة الأولى: التفريغ الأولي (Rough Vacuum Stage)
في هذه المرحلة يتم خفض الضغط من الضغط الجوي ($\sim 10^0$ mbar) إلى حدود 10^{-2} - 10^{-3} mbar

الأجهزة المستخدمة:

مضخات ميكانيكية (Rotary Vane Pumps)
صمامات عزل وتحكم

الوظيفة الفيزيائية

- إزالة معظم الهواء (النيتروجين، الأوكسجين، بخار الماء)
- تهيئة النظام للانتقال إلى التفريغ العالي
- منع تحميل مضط على المضخات المتقدمة

هذه المرحلة ضرورية لأن المضخات عالية الفراغ لا تعمل بكفاءة عند الضغط الجوي.
المرحلة الثانية: التفريغ المتوسط (**Medium Vacuum Stage**)
بعد الوصول إلى التفريغ الأولي، يتم الانتقال إلى التفريغ المتوسط، حيث يُخفّض الضغط إلى حدود ١٠-٤ mbar

- الأجهزة المستخدمة
- مضخات توربينية (**Turbo Molecular Pumps**)
- أحياناً مضخات **Roots** كمساندة

- الوظيفة الفيزيائية
- إزالة الجزيئات الخفيفة المتبقية
- تقليل كثافة الغاز بما يسمح ببدء استقرار الحقول الكهربائية
- تقليل احتمالية التفريغ الكهربائي العشوائي

المرحلة الثالثة: التفريغ العالي (**High Vacuum Stage**)
في هذه المرحلة يتم الوصول إلى ضغط تشغيل السايكلوترون، والذي يكون عادة بين ١٠-٦-١٠٠-٧ mbar

- الأجهزة المستخدمة
- مضخات توربينية عالية الكفاءة
- مضخات أيونية (**Ion Pumps**)
- مضخات **Getter** في بعض الأنظمة
- الوظيفة الفيزيائية
- ضمان مسار حر طويل للجسيمات المسرّعة
- منع فقدان الحزمة بسبب التصادمات
- تقليل الخلفية الغازية التي قد تؤدي إلى عدم استقرار البلازما في مصدر الأيونات
- في هذه المرحلة يصبح النظام مؤهلاً لبدء تشغيل السايكلوترون.
- المرحلة الرابعة: التفريغ أثناء التشغيل (**Operational Vacuum Stability**)
حتى بعد الوصول إلى الفراغ العالي، لا يُعد النظام مستقرًا تلقائيًا. إذ إن التشغيل الفعلي للسايكلوترون يولد:

- حرارة،
- انبعاث غازات من الجدران (**Outgassing**)،
- تأثيرات إشعاعية.

- ولهذا السبب:
- تُراقب قيم الضغط باستمرار،
- تُستخدم حساسات تفريغ دقيقة (**Ion Gauges**)،
- ويتم التحكم بالصمامات والمضخات آلياً للحفاظ على ثبات الفراغ.

الأثر المباشر لمنظومة التفريغ على الحزمة الجسيمية
يمكن تلخيص العلاقة بين التفريغ والحزمة كما يأتي:

- كلما انخفض الضغط زاد استقرار الحزمة
- كلما تحسّن الفراغ قلت الفواقد الجسيمية
- أي تدهور في الفراغ يؤدي فوراً إلى تشوّه المسار الحلزوني

ولهذا تُعد منظومة التفريغ شرطاً فيزيائياً سابقاً لأي عملية تسريع ناجحة.
٢٢.٢. خاتمة الفصل الثاني..

في هذا الفصل، تم استعراض المبادئ الفيزيائية الأساسية للسايكلترون بدءاً من حركة الجسيمات المشحونة داخل الحقول المغناطيسية والكهربائية، مروراً بالتأثيرات النسبية عند الطاقات العالية، ووصولاً إلى تصميم الحقول وحركة المسار الحلزوني للجسيمات.

لقد تبين أن الفيزياء الأساسية والتصميم الهندسي مترابطان ارتباطاً وثيقاً، بحيث يضمن كل منهما استقرار الحزمة الجسيمية، فعالية التسريع، ودقة توجيه الجسيمات نحو الهدف لإنتاج النظائر المشعة المطلوبة. كما تم توضيح التطبيق العملي في الطب النووي من خلال أجهزة مثل **PETtrace**، **Synthera**، و **MiniTrace** والتي توضح كيف تُستخدم هذه المبادئ لإنتاج نظائر مشعة عالية النقاء والكفاءة، تستخدم في التشخيص والعلاج النووي.

يُظهر هذا الفصل أن فهم المبادئ الفيزيائية لا يقتصر على الجانب النظري فقط، بل هو الأساس لتصميم وتشغيل أجهزة السايكلترون بكفاءة عالية، وهو ما يمهد للقارئ لفهم الفصل التالي الذي سيركز على التقنيات العملية لتوليد النظائر والتحضير الكيميائي الآلي داخل المراكز الطبية.

تصميم المنشأة (كتلة السايكلوترون)

١.٣. المقدمة

تُعدّ كتلة السايكلترون (**Cyclotron Block**) الجزء الأكثر أهمية وحساسية في منشآت إنتاج النظائر المشعة باستخدام السايكلترونات الطبية، إذ تضم المعجل الجسيمي النووي نفسه، وجميع الأنظمة المرتبطة به. ويجب أن يُصمّم هذا الجزء من المنشأة وفق اعتبارات إنشائية وإشعاعية صارمة، تضمن حماية العاملين والبيئة المحيطة، فضلاً عن ضمان التشغيل الآمن والمستقر للسايكلترون. تتكوّن كتلة السايكلترون عادةً من قاعة أو غرفة محاطة بجدران وسقف أرضية ذات أسماك كبيرة، غالباً من الخرسانة المسلحة عالية الكثافة. ويعتمد سمك الجدران على:

- طاقة البروتونات القصوى للسايكلترون.
- التيار الأقصى للشعاع.
- طبيعة التشغيل (روتيني أو بحثي).
- المسافات إلى المناطق المجاورة المأهولة.

ويُراعى في التصميم الإنشائي أن تكون كتلة السايكلترون مستقلة نسبياً عن بقية أجزاء المنشأة، مع تقليل عدد الفتحات والاختراقات إلى الحد الأدنى، لتقليل احتمالية تسرب الإشعاع.

٢.٣. اعتبارات التدريع الإشعاعي في غرفة السايكلوترون.

يُعد التدريع الإشعاعي من أهم الاعتبارات التصميمية في غرفة السايكلوترون، إذ يهدف إلى الحد من تعرض العاملين والجمهور للإشعاع المؤين الناتج عن تشغيل الجهاز. وتنبع هذه الإشعاعات أساساً من عدة مصادر، من أبرزها تفاعلات البروتونات داخل الهدف أثناء إنتاج النظائر المشعة، إضافة إلى النيوترونات الثانوية المتولدة من التفاعلات النووية، فضلاً عن أشعة غاما المصاحبة لعمليات التشغيل المختلفة.

ويُحقق التدريع الإشعاعي الفعّال لغرفة السايكلوترون من خلال اعتماد حلول هندسية مدروسة، تشمل استخدام جدران خرسانية سميكة ذات كثافة وأبعاد محسوبة لامتصاص الإشعاع وتقليل انتشاره، فضلاً عن تزويد الغرفة بأبواب محمية تمتلك قدرة تدريع إشعاعي مكافئة لتدريع الجدران المحيطة. كما يُفضّل، كلما أمكن ذلك، تصميم مداخل الغرفة على شكل متاهات (Mazes) بدلاً من الأبواب المباشرة، لما لذلك من دور فعّال في تقليل تسرب الإشعاع دون الحاجة إلى تدريع إضافي معقد.

ويجب أن يُصمّم نظام التدريع الإشعاعي لغرفة السايكلوترون بما يضمن الالتزام الصارم بحدود الجرعات الإشعاعية المسموح بها لكل من العاملين والجمهور، وذلك وفق اللوائح الوطنية المعتمدة أو توصيات الوكالة الدولية للطاقة الذرية، وبما ينسجم مع مبادئ السلامة الإشعاعية المعتمدة عالمياً.

٢.٣. اختراقات الجدران. (Penetrations)

يُقصد باختراقات الجدران الفتحات أو الممرات المصمّمة عمداً ضمن جدران التدريع الخرسانية لغرفة السايكلوترون، والتي تُستخدم لتمرير مختلف الأنظمة التشغيلية والخدمات الضرورية لعمل الجهاز. وعلى الرغم من أهميتها الوظيفية، تُعد هذه الاختراقات من أكثر العناصر حساسية في تصميم التدريع الإشعاعي، لكونها تمثل نقاط ضعف محتملة قد تسمح بتسرب الإشعاع خارج المنطقة المحمية إذا لم تُصمّم وفق أسس هندسية دقيقة.

تشمل اختراقات الجدران عادةً ممرات خطوط الشعاع، وخطوط نقل السوائل والغازات، والكابلات الكهربائية وكابلات أنظمة التحكم، إضافةً إلى قنوات وأنظمة التهوية. ونظراً لأن الإشعاع المؤين، ولا سيما أشعة غاما والنيوترونات، يمكن أن ينتقل على طول المسارات المباشرة، فإن أي اختراق مستقيم أو ذي خط رؤية مباشر قد يؤدي إلى تقليل فعالية التدريع بشكل ملحوظ.

ولتقليل هذا الأثر، تُصمّم اختراقات الجدران عادةً بأسلوب متعرج أو مكسور، يُعرف بالاختراقات ذات النمط المتاهاتي (Labyrinth-type penetrations) بحيث يُمنع انتقال الإشعاع بخط مستقيم وتُفرض عليه مسارات متعددة الانعطاف، ما يؤدي إلى خفض شدته نتيجة التبعثر والامتصاص. كما قد يُستخدم داخل هذه الممرات مواد ماصة للإشعاع، تُختار تبعاً لنوع الإشعاع وطاقته، بهدف تعزيز كفاءة التدريع وضمان الالتزام بحدود الجرعات الإشعاعية المسموح بها.

ويُعد التصميم السليم لاختراقات الجدران عنصراً أساسياً في تحقيق التكامل بين المتطلبات التشغيلية للسايكوترون ومعايير السلامة الإشعاعية، بما ينسجم مع اللوائح الوطنية والتوصيات الصادرة عن الوكالة الدولية للطاقة الذرية.

لا يقتصر تصميم اختراقات الجدران في غرفة السايكوترون على الجوانب الهندسية والإنشائية فحسب، بل يرتبط ارتباطاً مباشراً بحسابات التدرّج الإشعاعي المعتمدة لتحديد مستويات الجرعات خارج منطقة التشغيل.

إذ تُؤخذ هذه الاختراقات بالحسبان بوصفها مسارات محتملة لتسرب الإشعاع، لا سيما أشعة غاما والنيوترونات، مما يستوجب تقييم تأثيرها بدقة ضمن نماذج الحسابات الإشعاعية.

في حسابات التدرّج، تُعامل اختراقات الجدران على أنها مناطق ذات فعالية تدرّج أقل مقارنة بالجدران الخرسانية المصمتة، ويُجرى تقدير مساهمتها في الجرعة الكلية اعتماداً على عدة عوامل، من بينها:

- نوع الإشعاع وطاقته.
- شدة المصدر الإشعاعي داخل غرفة السايكوترون.
- أبعاد الاختراق وطوله وشكله الهندسي.
- عدد الانعطافات في المسار المتعرج للاختراق.
- طبيعة المواد المستخدمة داخل الممر، إن وجدت.

٤.٣. أنظمة التهوية والتحكم البيئي في غرفة السايكوترون

تُعد أنظمة التهوية والتحكم البيئي أحد العناصر الأساسية في تصميم غرفة السايكوترون، نظراً لدورها الحيوي في الحفاظ على السلامة الإشعاعية وكفاءة التشغيل. ويجب أن يحقق نظام التهوية عدة أهداف رئيسية، من أبرزها:

- توفير ضغط سلبي داخل الغرفة مقارنة بالمناطق المجاورة، لضمان عدم تسرب الغازات المشعة إلى المناطق غير الخاضعة للرقابة.
- التحكم بانتشار الغازات المشعة المحتملة، الناتجة عن التفاعلات النووية داخل الهدف أو عن المواد المشعة المستخدمة أثناء التشغيل.
- إزالة الحرارة المتولدة نتيجة تشغيل السايكوترون والمعدات المرتبطة به، بما يضمن استقرار الظروف البيئية داخل الغرفة.

ويجب أن يكون النظام مزوداً بمرشحات مناسبة لإزالة الجسيمات المشعة من الهواء قبل إطلاقه إلى الخارج، كما ينبغي تصميمه بما يتوافق مع متطلبات السلامة الإشعاعية العالمية، مثل توصيات الوكالة الدولية للطاقة الذرية، إضافة إلى الالتزام بالمعايير الهندسية للتهوية والصيانة لضمان الأداء المستمر والفعال. تُجهز كتلة السايكلترون بأنظمة أمان متعددة، تشمل:

• أنظمة إقفال بيني (Interlock Systems) تمنع الدخول أثناء التشغيل،

• أنظمة إيقاف طارئ،

• أجهزة مراقبة الإشعاع المستمرة،

• أنظمة إنذار صوتية وضوئية.

ويجب أن تكون جميع هذه الأنظمة مترابطة مع نظام التحكم المركزي للسايكلترون، لضمان الاستجابة الفورية لأي حالة غير طبيعية.

٥.٣ الكتلة الخرسانية والتدريع الإشعاعي

تصمم الكتلة الخرسانية المحيطة بالسايكلترون لتوفير تدريع كافٍ ضد الإشعاعات المؤينة الناتجة عن عمليات التسريع والتشعيع، ولا سيما أشعة غاما والنيوترونات. ويعتمد سمك الجدران والسقف على عدة عوامل، من بينها:

١- طاقة الحزمة البروتونية القصوى

٢- شدة التيار.

٣- نوع الأهداف المستخدمة.

٤- عدد ساعات التشغيل اليومية.

٥- الحدود التنظيمية المسموح بها للتعرض الإشعاعي خارج الكتلة الخرسانية.

غالباً ما تتراوح سماكة الجدران الخرسانية بين ١.٥ إلى ٢.٥ متر من الخرسانة عالية الكثافة، مع استخدام مواد إضافية لامتصاص النيوترونات مثل البولي إيثيلين أو الخرسانة المدعمة بالبورات في مناطق محددة. كما يُراعى تدريع الفتحات الخاصة بمرور الكابلات وخطوط نقل النظائر باستخدام متاهات خرسانية (Labyrinths) لمنع التسرب الإشعاعي المباشر.

٦.٣. الأبواب المحمية إشعاعياً وأنظمة الأمان

يجب تجهيز مدخل غرفة السايكلترون بباب ثقيل محمي إشعاعياً، غالباً ما يكون منزلقاً أو دواراً، ويُصنع من الفولاذ والرصاص أو من الخرسانة المسلحة، حسب التصميم. ويربط هذا الباب بنظام أمان متكامل يمنع تشغيل السايكلترون في حال عدم إغلاق الباب بصورة محكمة.

تشمل أنظمة الأمان: أنظمة إقفال متبادل (Interlocks) مجسات إشعاعية داخلية وخارجية، أنظمة إنذار صوتية وضوئية مفاتيح أمان للطوارئ (Emergency Stop).. وتعد هذه الأنظمة جزءاً لا يتجزأ من منظومة الحماية الإشعاعية. ويجب اختبارها والتحقق من فعاليتها بصورة دورية.

٧.٣. البنية التحتية المساندة للسايكلترون

يتطلب تشغيل السايكلترون بنية تحتية تقنية معقدة تشمل:

- ١- أنظمة القدرة الكهربائية العالية والاستقرار الكهربائي.
- ٢- أنظمة التبريد بالماء (Chillers) لازالة الحرارة الناتجة عن التسريع والتشعيع.
- ٣- أنظمة التهوية الخاصة بغرفة السايكلترون.
- ٤- أنظمة إمداد الغازات (مثل الهيدروجين أو الديوتيريوم حسب نوع الأهداف).
- ٥- مضخة توليد الضغط العكسي (الفرغ vacuum)

ويجب أن تصمم هذه الأنظمة بحيث تكون معزولة قدر الامكان عن المناطق الإنتاجية، مع توفير سهولة الوصول لأغراض الصيانة دون التأثير على بيئة GMP أنظمة التهوية والضغط والتصنيف البيئي (HVAC and Environmental Classification)

تعد أنظمة التهوية والتدفئة والتكييف (HVAC) من العناصر المحورية في تصميم مرفق إنتاج الـ FDG، إذ تؤدي دوراً أساسياً في تحقيق متطلبات ممارسات التصنيع الجيد (GMP)، وضمان حماية المنتج من التلوث، إضافة إلى دعم متطلبات الحماية الإشعاعية ومنع انتشار الملوثات المشعة داخل المرفق أو خارجه.

٨.٣. أهداف نظام HVAC

يهدف نظام HVAC في مرفق إنتاج الـ FDG إلى:

- ١- التحكم بدرجات الحرارة والرطوبة النسبية ضمن الحدود المحددة.
- ٢- المحافظة على مستويات الجسيمات الدقيقة ضمن التصنيفات البيئية المطلوبة،
- ٣- تحقيق فروق ضغط مناسبة بين الغرف لضمان اتجاه تدفق الهواء من المناطق النظيفة إلى المناطق الأقل نظافة.
- ٤- احتواء ومنع انتشار الغازات أو الأبخرة المشعة،
- ٥- توفير بيئة عمل مريحة وآمنة للعاملين.

٩.٣. التصنيف البيئي للغرف.

تُصنّف الغرف داخل مرفق إنتاج الـ **FDG** وفق متطلبات **WHO GMP** إلى درجات بيئية مختلفة (Grade A، B، C، D)، اعتماداً على حساسية العمليات المنفذة داخل كل غرفة.

صنف أ

تمثل أعلى مستوى من النظافة، وتُخصّص للعمليات الحرجة مثل التعبئة العقيمة والترشيح النهائي. ويتم تحقيق هذا المستوى عادةً داخل الخلايا الحارة باستخدام أنظمة التدفق الصفحي المزودة بمرشحات **HEPA**

صنف ب

البيئة المحيطة مباشرة بمنطقة **Grade A** وتُستخدم لدعم العمليات العقيمة.

صنف ج

تُخصّص للخطوات الأقل حساسية من عمليات التحضير والمعالجة.

صنف د

تُستخدم للعمليات الأولية أو غير الحرجة، مثل التحضير الأولي للمواد. ويجب تحديد التصنيف البيئي لكل غرفة منذ مرحلة التصميم، مع توثيق ذلك ضمن مخططات المرفق وإجراءات التشغيل.

١٠.٣. فروق الضغط واتجاه تدفق الهواء.

يُعد التحكم بفروق الضغط بين الغرف عاملاً أساسياً في منع انتقال التلوث. ويُعتمد مبدأ التدرج في الضغط، بحيث يكون الضغط الأعلى في المناطق الأنظف (**Grade A**) ويتناقص تدريجياً باتجاه المناطق الأقل نظافة. عادةً ما تتراوح فروق الضغط بين الغرف المتجاورة بين ٥ إلى ١٥ باسكال، ويجب مراقبة هذه الفروق باستمرار باستخدام مجسات ضغط مرتبطة بأنظمة إنذار في حال حدوث أي خلل. كما يُصمم اتجاه تدفق الهواء بحيث يكون من المناطق النظيفة إلى المناطق الأقل نظافة، وبعيداً عن مناطق التخزين أو النفايات المشعة.

١١.٣. الترشيح ومعدلات تبديل الهواء.

يجب أن يُزوّد نظام **HVAC** بمرشحات متعددة المراحل، تشمل:

- مرشحات أولية (**Pre-filters**).
- مرشحات متوسطة الكفاءة،
- مرشحات عالية الكفاءة (**HEPA**) في المناطق الحرجة.

وتختلف معدلات تبديل الهواء (**ACH-Air Changes per Hour**) حسب التصنيف البيئي، حيث تكون أعلى في غرف **Grade A** و **B** لضمان الحفاظ على النظافة المطلوبة.

١٢.٣. احتواء الغازات المشعة ومعالجتها.

ينبغي أن يُصمم نظام التهوية بطريقة تمنع إطلاق الغازات المشعة مباشرة إلى البيئة الخارجية.

وفي بعض الدول، يُشترط استخدام أنظمة خزن مؤقتة لغازات العادم (Delay Tanks) تسمح باحتجاز الغازات إلى حين اضمحلال النشاط الإشعاعي قبل إطلاقها. كما يجب أن تكون جميع قنوات الهواء محكمة الإغلاق، وأن يُجرى فحص دوري للتأكد من عدم وجود تسريبات، مع تسجيل نتائج الفحص ضمن سجلات الصيانة.

١٢.٣. التحقق والتأهيل (Qualification and Validation)

يُعد التأهيل والتحقق من نظام HVAC جزءاً أساسياً من إدارة الجودة في منشآت إنتاج النظائر المشعة، لضمان أن النظام يعمل بكفاءة ووفق المعايير التصميمية والبيئية المطلوبة.

وتشمل مراحل التأهيل والتحقق ما يلي:

١. التأهيل التصميمي (DQ-Design Qualification):

يتم خلال هذه المرحلة التأكد من أن التصميم الهندسي للنظام يلبي المتطلبات التشغيلية والبيئية المحددة مسبقاً، بما في ذلك قدرة النظام على الحفاظ على درجات الحرارة، الرطوبة، وضغط الهواء وفق التصنيفات البيئية المطلوبة.

٢. التأهيل التركيبي (IQ-Installation Qualification):

تتضمن هذه المرحلة التحقق من تركيب جميع مكونات النظام بشكل صحيح وفق المخططات والمواصفات، بما يشمل المرشحات، مجاري الهواء، أجهزة القياس، وأنظمة الأمان المتصلة بالنظام.

٣. التأهيل التشغيلي (OQ-Operational Qualification):

تهدف هذه المرحلة إلى اختبار النظام تحت ظروف التشغيل الفعلية لضمان أداء جميع مكوناته ووظائفه كما هو محدد في التصميم، بما في ذلك التحكم بفرق الضغط، معدلات تدفق الهواء، وكفاءة الترشيح.

٤. التأهيل الأدائي (PQ-Performance Qualification):

يتم خلال هذه المرحلة التحقق من قدرة النظام على الحفاظ على الأداء المطلوب على مدى فترة زمنية محددة، مع مراقبة استمرارية التحكم البيئي في الظروف التشغيلية الحقيقية، وضمان أن النظام يفي بمعايير السلامة والجودة خلال الاستخدام الفعلي.

١٤.٣. خلاصة الفصل الثالث.

يمثل تصميم كتلة السايكلوترون حجر الأساس في تشغيل منشآت إنتاج النظائر المشعة بأمان وكفاءة. ويعكس هذا الفصل التكامل بين الفيزياء النووية، والهندسة المدنية، والحماية الإشعاعية، ومتطلبات GMP ما يجعل المنشأة بيئة آمنة ومستقرة لإنتاج المستحضرات الصيدلانية الإشعاعية.

إنتاج مركب (FDG) فلوروديوكسي غلوكوز من (F^1) داخل منظومة ال Fast lab

١.٤ . مقدمة عامة.

يُعدّ (F^1) فلوروديوكسي غلوكوز ($[F^1]FDG$) الركيزة الأساسية في المستحضرات الصيدلانية المشعة المستخدمة في تقنيات التصوير بالانبعاث البوزيتروني (PET)، لما يمتلكه من كفاءة عالية في تمثيل الاستقلاب الغلوكوزي داخل الأنسجة الطبيعية والمرضية على السواء، وما يتيح ذلك من إمكانات تشخيصية دقيقة على المستويين الوظيفي والجزيئي.

ويقوم تحضير هذا المستحضر الإشعاعي على منظومة تكاملية محكمة تتقاطع فيها الفيزياء النووية مع الكيمياء الإشعاعية والهندسة التشغيلية، عبر ثلاث مراحل رئيسية مترابطة، تبدأ بإنتاج نظير الفلور-١٨ داخل السايكلوترون، تليها مرحلة التخليق الكيميائي الموجّه لإدماجه في البنية الجزيئية للغلوكوز، وتُختتم بتقييم شامل لكفاءة المستحضر واستقراره ونقاوته الإشعاعية والكيميائية قبل اعتماده للاستخدام السريري.

٢٠٤ . إنتاج الفلور-١٨ في السيكلوترون.
يُنْتَج الفلور-١٨ داخل السايبكلترون عادةً من خلال تفاعل النوي التالي :-



حيث يُشعّ ماء غني بالأكسجين-١٨ بحزمة من البروتونات داخل السيكلوترون. عند نهاية التشعيع، تُسمّى هذه اللحظة نهاية التشعيع (**End of Bombardment, EOB**)، ويكون عندها النشاط الإشعاعي للفلور-١٨ محددًا فيزيائيًا.

٢٠٤ . تأثير تيار الحزمة.

يزداد إنتاج F^1 طردياً مع تيار الحزمة وزمن التشعيع، إلا أن التشغيل عند تيارات عالية يتطلب:

- تصميمًا مناسباً للأهداف (**Targets**)
- تحكماً دقيقاً بمصدر الأيونات
- ضبطاً جيداً لنظام التردد الراديوي (**RF**)
- وقد أثبتت الدراسات الحديثة أن التشغيل عند تيارات عالية تصل إلى (١٦٠ A) ممكن دون فقدان في المردود الفيزيائي، شريطة تحسين هذه الأنظمة.

٤٠٤ . تحضير $[F^1] FDG$ كيميائياً

٥٠٤ . خطوات التحضير الأساسية.

تمر عملية تحضير $[F^1] FDG$ بالمراحل التالية:

- استخراج الفلور-١٨ من الهدف.
- تفعيل الفلور-١٨ وتجفيفه.
- إجراء تفاعل الاستبدال النووي لإدخال F^1 في جزيء الغلوكوز المحمي.
- إزالة مجموعات الحماية (**Hydrolysis**).
- التنقية باستخدام المرشحات والكروماتوغرافيا.
- التعقيم والتعبئة النهائية.

تنتهي هذه المراحل عند ما يُعرف بنهاية التحضير (**End of Synthesis, EOS**).

٦٠٤ . تعريف مردود تحضير $[F^1] FDG$ (**FDG Yield**)

٧٠٤ . الصياغة الرياضية.

لتقييم كفاءة تحويل الفلور-١٨ المنتج في السيكلوترون إلى $[F^1] FDG$ صالح للاستخدام السريري، يُعرف مردود التحضير بالعلاقة:

$$FDG Yield (\%) = \frac{[F^1] FDG \text{ نشاط عند EOS}}{[F^1] FDG \text{ المقدّر عند نشاط EOB}} \times 100$$

ويمثل هذا المردود النسبة المئوية من F^1 الذي نجا من جميع مراحل النقل والتفاعل والتنقية.

٨.٤ . التفسير الفيزيائي والكيميائي للمردود (الناتج النهائي)

هناك ملاحظتان ينبغي الالتفات اليهما فيما يخص انتاج الفلور ١٨ داخل السايكلترون وهي ان ليس كل الماء المقصوف يتحول الى فلور وذلك لعدة أسباب فيزيائية منها عدم تسارع جميع جسيمات الهيدروجين داخل السايكلترون او عدم حصول تناغم لتلك الجسيمات مع تبدلات المجال الكهربائي وبالتالي تبقى ملتصقة بالصفائح المعدنية. والملاحظة الثانية وهي انه لا تتحول كامل كمية F^1 المنتجة في داخل السايكلترون إلى $[F^1]FDG$ بصورة كاملة داخل الفاست وانما يتحول جزء منها فقط للأسباب التالية:

- خسائر النقل من الهدف إلى وحدة التحضير.
- عدم اكتمال التفاعل الكيميائي.
- الامتزاز على المرشحات (Sep-Pak).
- التحلل الإشعاعي أثناء زمن التحضير.
- الفاقد الناتج عن عمليات الغسل والتنقية.
- عمر النصف والذي يبلغ ١٠٩ دقيقة للفلور.

وبالتالي، فإن مردود **FDG** يعكس كفاءة النظام المتكامل وليس كفاءة خطوة واحدة فقط. ٩.٤. تأثير الإنتاج عالي النشاط على مردود **FDG**

عند رفع تيار السيكلترون وزيادة النشاط الداخل إلى وحدة التحضير قد يبقى مردود **FDG** ثابتاً، مما يدل على كفاءة النظام الكيميائي. أو قد ينخفض المردود نتيجة التحلل الإشعاعي (Radiolysis)، خصوصاً عند النشاطات والتركيزات العالية.

وقد أظهرت التجارب أن استخدام وحدات تحضير متطورة (مثل **FAST lab**) وتحسين ظروف التحضير يمكن أن يحافظ على مردود مرتفع حتى عند النشاطات العالية.

١٠.٤. استقرار $[F^1]FDG$ والتحلل الإشعاعي.

يُعد التحلل الإشعاعي أحد التحديات الرئيسية في إنتاج $[F^1]FDG$ عالي النشاط. إذ قد يؤدي إلى انخفاض النقاوة الإشعاعية **h** فشمل اختبارات الجودة بعد عدة ساعات من التحضير أو قد يؤدي إلى كليهما. ولتغلب على ذلك، تُستخدم مثبتات كيميائية مثل ثيوسلفات الصوديوم (**Na S O**) أو الإيثانول بتركيزات مدروسة.

وقد ثبت أن إضافة هذه المثبتات تحافظ على النقاوة الإشعاعية ضمن الحدود الدستورية ($\leq 95\%$) طوال فترة الصلاحية.

١١.٤ الأهمية العملية لمفهوم مردود **FDG**

يمثل مردود **FDG** أداة أساسية لتقييم أداء وحدات التحضير الكيميائي ومقارنة كفاءة التشغيل عند تيارات مختلفة وكذلك اتخاذ قرارات تشغيلية في مراكز الإنتاج عالية السعة وأيضاً تحقيق التوازن بين زيادة الإنتاج والحفاظ على الجودة. إن إنتاج **[F¹⁸ FDG]** عملية متعددة التخصصات تجمع بين الفيزياء النووية والكيمياء الإشعاعية والهندسة التشغيلية.

ويُعد مردود **FDG** مؤشراً شاملاً يربط بين هذه الجوانب جميعاً، ويُستخدم لتقييم كفاءة الإنتاج، خصوصاً في أنظمة التشغيل عالي التيار. إن التحكم الجيد بظروف السايكلوترون، وتحسين وحدات التحضير، والحد من التحلل الإشعاعي، جميعها عوامل تضمن إنتاج **[F¹⁸ FDG]** عالي الجودة وبكفاءة عالية تلبى المتطلبات السريرية المتزايدة.

١٢.٤ منظومة **FASTlab™** في مراكز السايكلوترون.

تهدف هذه الفقرة إلى تقديم عرضٍ علمي منظم لمنظومة **FASTlab™** بوصفها وحدة التخليق الكيميائي الآلي الرئيسية في مراكز السايكلوترون الحديثة.

وقد رُتب محتوى الفصل وفق منطق بنيوي - وظيفي - سياقي (**Structure Function Context**)، بما ينسجم مع الأسلوب المعتمد في هذا الكتاب، ويتيح للقارئ العزيز الانتقال المنهجي من توصيف التركيب الفيزيائي للجهاز، إلى فهم وظائفه التشغيلية، ثم إدراك موقعه ضمن المنظومة الكاملة لإنتاج **F18-FDG**

١٢.٤ القسم الأول: البنية (**Structure**)

١٤.٤ الموقع البنيوي لمنظومة **FASTlab** داخل مركز السايكلوترون

تُعد **FASTlab™** وحدة مستقلة تُركب داخل خلية ساخنة محمية إشعاعياً، وتقع بنيوياً بين نظام السايكلوترون من جهة، ووحدة ضبط الجودة من جهة أخرى. ويُراعى في تصميمها أن تكون قريبة مكانياً من خطوط نقل النشاط الإشعاعي القادمة من الهدف المشع، بما يقلل الفقد الإشعاعي ويحد من التعقيد الهندسي للبنية التحتية.

١٥.٤ الهيكل الميكانيكي الخارجي.

يتكوّن الهيكل الخارجي لمنظومة **FASTlab** من إطار معدني مدمج صمم خصيصاً للعمل داخل الخلايا الساخنة.

ويتميز هذا الهيكل بامكانية تكديس وحدتين فوق بعضهما داخل خلية واحدة، مع توفير تدريب إضافي لحماية المكونات الإلكترونية الحساسة. ويؤدي الهيكل الوظائف البنيوية الآتية:

- تثبيت الوحدات الداخلية بدقة هندسية عالية.
- عزل المكونات الإلكترونية عن مصادر الإشعاع.
- ضمان الاستقرار الحراري أثناء التشغيل المتواصل.

١٦.٤. نظام الكاسيت أحادي الاستعمال.

يمثل نظام الكاسيت البنية المركزية في **FASTlab** والكاسيت عبارة عن وحدة بلاستيكية مُشكلة مسبقًا، تحتوي على جميع العناصر اللازمة لتنفيذ عملية التخليق الكيميائي ضمن مسارات موانع مغلقة، كما في الشكل (١) يتكوّن الكاسيت بنيويًا من:

- شبكة أنابيب سيليكونية
- مجموعة صمامات دوّارة
- محاقن دقيقة القياس
- خراطيش تنقية
- مفاعل كيميائي مدمج
- قوارير الكواشف والمواد الأولية

ويُصمّم الكاسيت ليُستخدم في دورة إنتاج واحدة، ثم يُزال بالكامل.



الشكل (١) كاسيت فاست لاب احادي الاستعمال

١٧.٤. وحدات المفاعل الكيميائي

تحتوي منظومة **FAST lab 2** على مفاعلين كيميائيين مستقلين، مصنوعين من مواد بوليمرية متقدمة مثل البولييمر الحلقي (COC) وقد صُممت أوعية التفاعل بشكل هندسي يقلل الحجم الميت ويحد من فقدان النشاط الإشعاعي.

يُجهّز كل مفاعل بأنظمة تسخين وتبريد قسري، ما يسمح بالتحكم الدقيق بدرجات الحرارة أثناء مراحل التخليق المختلفة.

١٨.٤ . نظام نقل الموائع والتحكم بالصمامات.

يتألف نظام نقل الموائع من شبكة مترابطة من الصمامات والمحاقن والأنابيب، ويبلغ عدد الصمامات في الكاسيت الواحد ما يقارب ٢٥ صماماً. ويُدار هذا النظام آلياً لضمان التحكم الدقيق باتجاه التدفق، وحجوم السوائل، وتسلسل الخطوات.

١٩.٤ . وحدة التحكم الإلكتروني والبرمجيات

تتضمن **FAST lab** وحدة تحكم إلكترونية مدمجة مسؤولة عن إدارة جميع العناصر البنيوية السابقة. وتُعد هذه الوحدة الواجهة التي تربط بين البنية الفيزيائية للجهاز وبين الوظائف التشغيلية التي يؤديها.

٢٠.٤ . القسم الثاني: الوظيفة (Function)

٢١.٤ . الوظيفة التشغيلية العامة لمنظومة **FAST lab**.

تتمثل الوظيفة الأساسية لمنظومة **FAST lab** في تحويل أيون الفلوريد المشع (**F18**) الناتج من السايكلوترون إلى مستحضر صيدلاني مشع جاهز للاستخدام السريري، وذلك عبر سلسلة من العمليات الكيميائية الآلية والمضبوطة.

٢٢.٤ . الوظائف الكيميائية الرئيسية داخل **FAST lab**

تشمل الوظائف الكيميائية التي تؤديها المنظومة المراحل الآتية:

- احتجاز (**F18**) واسترجاع ماء ١٨ O
 - تحضيف الفلوريد المشع كيميائياً
 - تنفيذ تفاعل الإحلال النيوكليوفيلي
 - إجراء التحلل الكيميائي للمركبات الوسيطة
 - تنقية المنتج النهائي وتعقيمه
- ويُنصَد كل ذلك ضمن مسارات مغلقة دون تدخل بشري مباشر.

٢٣.٤ . الوظائف التنظيمية وضبط الجودة.

تضطلع منظومة **FAST lab** بوظيفة تنظيمية لا تقل أهمية عن وظيفتها الكيميائية، إذ تقوم بتسجيل جميع المعلمات التشغيلية، وتوليد سجل دفعة إنتاج كامل يُستخدم لاحقاً في إجراءات ضبط الجودة والتتبع التنظيمي.

٢٤.٤ . القسم الثالث: سلسلة إنتاج **F-FDG ١٨**

تعمل **FAST lab** ضمن سياق تشغيلي متكامل يبدأ بإنتاج النظير **F ١٨** داخل السايكلوترون، ثم نقله إلى وحدة التخليق، وانتهاءً بإجراء اختبارات ضبط الجودة قبل الاستخدام السريري. ويُعد فهم هذا السياق ضرورياً لإدراك الدور المحوري الذي تؤديه **FAST lab** في استمرارية العمل اليومي لمراكز الطب النووي.

٢٥.٤. الأهمية العلمية والعملية في مراكز السايكلوترون.
إن اعتماد منظومة **FAST lab** يتيح لمراكز السايكلوترون تحقيق مستوى عالٍ من الاعتمادية التشغيلية، وتقليل التعرض الإشعاعي للعاملين، وضمان ثبات جودة المنتج النهائي، الأمر الذي يجعلها عنصراً أساسياً في البنية التحتية للطب النووي الحديث.

٢٦.٤. مدخل عام إلى التخليق الكيميائي الآلي داخل **FAST lab**
تمثل منظومة **FAST lab™** نموذجاً متقدماً للتكامل بين الأتمتة الهندسية والكيمياء الإشعاعية، حيث صُممت لتنفيذ تخليق **F18-FDG** وفق مسار كيميائي محكم يبدأ من استلام النظير المشع المنتج في السايكلوترون وينتهي بالحصول على مستحضر صيدلاني إشعاعي مطابق للمعايير الدوائية. ويُبنى هذا المسار على مبدأ تحويل أيون الفلوريد المشع من حالة مائية ضعيفة التفاعل إلى نيوكليوفيل فعال، ثم توجيهه عبر سلسلة من التفاعلات والتنقيتات داخل بيئة مغلقة ومنحكم بها آلياً.

٢٧.٤. استقبال **F18** واحتجازه على عمود التبادل الأيوني (**QMA**)
تستقبل **FAST lab** محلول الهدف الخارج من السايكلوترون، والذي يحتوي على **F18** مذاباً في ماء **HO18** الناتج عن التفاعل النووي $^{18}\text{F}(\text{p},\text{n})$ يُمرَّر هذا المحلول مباشرة عبر عمود تبادل أيوني من النوع الرباعي الأمونيوم (**QMA**)، حيث يُحتجز أيون الفلوريد المشع على الراتنج الموجب، في حين يُفصل ماء ^{18}O ويوجَّه إلى وعاء الاسترجاع لإعادة استخدامه لاحقاً. وتُعد هذه المرحلة خطوة فصل أولية تربط بين فيزياء الإنتاج النووي والكيمياء الإشعاعية داخل المنظومة.

٢٨.٤. تفعيل أيون الفلوريد المشع داخل **FASTlab**
نظراً لأن ^{18}F الخارج من عمود **QMA** يكون مميَّهاً (مائي) وضعيف النيوكليوفيلية، تعتمد **FAST lab** على خطوة تفعيل كيميائي أساسية باستخدام مزيج من كربونات البوتاسيوم (**KCO**) ومعدن التاج $^{202}\text{Kryptofix}$ يقوم **Kryptofix** بعزل أيون البوتاسيوم، مما يقلل من التأثير الأيوني مع ^{18}F يزيد من نشاطه النيوكليوفيلي. وينتج عن ذلك تكوين المعقد النشط $[\text{K}(\text{K}^{202})]$ ، وهو الشكل الكيميائي القادر على الدخول بكفاءة في تفاعلات الإحلال النيوكليوفيلي. تعقب هذه الخطوة مرحلة تجفيف أزيوتروبي باستخدام الأستونتريل داخل المضاعل، حيث تُزال آثار الماء على عدة دورات تسخين وتبخير، إذ إن وجود الماء يُعد العامل الأكثر سلبية على مردود تفاعل الوسوم اللاحق.

٢٤.٤. القسم الثالث: سلسلة إنتاج $^{18}\text{F-FDG}$
تعمل **FAST lab** ضمن سياق تشغيلي متكامل يبدأ بإنتاج النظير ^{18}F داخل السايكلوترون، ثم نقله إلى وحدة التخليق، وانتهاءً بإجراء اختبارات ضبط الجودة قبل الاستخدام السريري. ويُعد فهم هذا السياق ضرورياً لإدراك الدور المحوري الذي تؤديه **FAST lab** في استمرارية العمل اليومي لمراكز الطب النووي.

٢٥.٤. الأهمية العلمية والعملية في مراكز السايكلوترون.

إن اعتماد منظومة **FAST lab** يتيح لمراكز السايكلوترون تحقيق مستوى عالٍ من الاعتمادية التشغيلية، وتقليل التعرض الإشعاعي للعاملين، وضمان ثبات جودة المنتج النهائي، الأمر الذي يجعلها عنصراً أساسياً في البنية التحتية للطب النووي الحديث.

٢٦.٤. مدخل عام إلى التخليق الكيميائي الآلي داخل **FAST lab**

تمثل منظومة **FAST lab™** نموذجاً متقدماً للتكامل بين الأتمتة الهندسية والكيمياء الإشعاعية، حيث صُممت لتنفيذ تخليق **F18-FDG** وفق مسار كيميائي محكم يبدأ من استلام النظير المشع المنتج في السايكلوترون وينتهي بالحصول على مستحضر صيدلاني إشعاعي مطابق للمعايير الدوائية. ويبنى هذا المسار على مبدأ تحويل أيون الفلوريد المشع من حالة مائية ضعيفة التفاعل إلى نيوكليوفيل فعال، ثم توجيهه عبر سلسلة من التفاعلات والتنقيتات داخل بيئة مغلقة ومتحكم بها آلياً.

٢٧.٤. استقبال **F18** واحتجازه على عمود التبادل الأيوني (**QMA**)

تستقبل **FAST lab** محلول الهدف الخارج من السايكلوترون، والذي يحتوي على **F18** مذاباً في ماء **Ho18** الناتج عن التفاعل النووي $^{18}\text{F}(\text{p},\text{n})$ يمرر هذا المحلول مباشرة عبر عمود تبادل أيوني من النوع الرباعي الأمونيوم (**QMA**)، حيث يُحتجز أيون الفلوريد المشع على الراتنج الموجب، في حين يُفصل ماء ^{18}O ويوجه إلى وعاء الاسترجاع لإعادة استخدامه لاحقاً. وتعد هذه المرحلة خطوة فصل أولية تربط بين فيزياء الإنتاج النووي والكيمياء الإشعاعية داخل المنظومة.

٢٨.٤. تفعيل أيون الفلوريد المشع داخل **FASTlab**

نظراً لأن ^{18}F الخارج من عمود **QMA** يكون مميهاً (مائي) وضعيف النيوكليوفيلية، تعتمد **FAST lab** على خطوة تفعيل كيميائي أساسية باستخدام مزيج من كربونات البوتاسيوم (**KCO**) ومعدن التاج **Kryptofix 2.2.2** يقوم **Kryptofix** بعزل أيون البوتاسيوم، مما يقلل من التأثير الأيوني مع **F18** يزيد من نشاطه النيوكليوفيلي. وينتج عن ذلك تكوين المعقد النشط **[K(K222)]**، وهو الشكل الكيميائي القادر على الدخول بكفاءة في تفاعلات الإحلال النيوكليوفيلي. تعقب هذه الخطوة مرحلة تجفيف أزيوتروبي باستخدام الأستونتريل داخل المضاعل، حيث تُزال آثار الماء على عدة دورات تسخين وتبخير، إذ إن وجود الماء يُعد العامل الأكثر سلبية على مردود تفاعل التوسم اللاحق.

٢٩.٤. تفاعل الوسم بالإحلال النيوكليوفيلي داخل مفاعل **FAST lab** يُوجّه **F18** المفضل إلى مفاعل **FAST lab** حيث يتفاعل مع الطليعة السكرية المحمية، وهي مانوز ثلاثي التريصلات.

يحدث التفاعل وفق آلية إحلال نيوكليوفيلي من النمط **SN2**، يهاجم فيها أيون **F18** ذرة الكربون الثانية في الحلقة السكرية مع استبدال مجموعة التريصلات ذات القابلية العالية للمغادرة.

ينتج عن هذه المرحلة المركب الوسيط **Tetra-acetyl-F18-FDG TAcF18**، وهو مركب مستقر كيميائياً لكنه غير نشط حيوياً بسبب وجود مجموعات الحماية الأسيتيلية. تُنمذ هذه الخطوة داخل **FAST lab** عند درجات حرارة مرتفعة نسبياً وفي وسط لا مائي مضبوط بدقة، بما يضمن تحقيق مردود إشعاعي وكيميائي عالٍ مع حد أدنى من النواتج الجانبية.

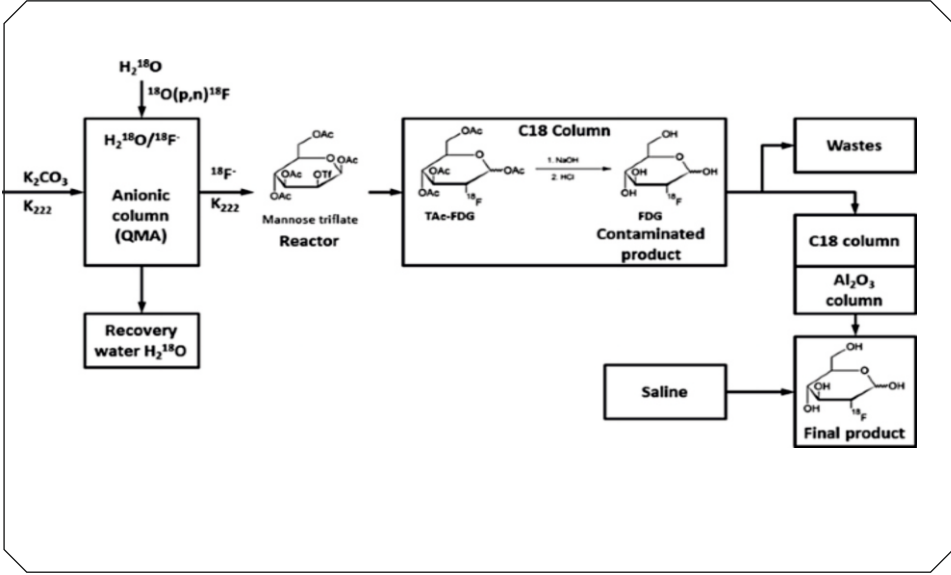
٣٠.٤. إزالة مجموعات الحماية والتحلل الكيميائي. بعد اكتمال الوسم، يُنقل المركب الوسيط إلى مرحلة إزالة مجموعات الحماية، حيث تُجرى عملية تحلل قاعدي باستخدام محلول هيدروكسيد الصوديوم لإزالة مجموعات الأستيل المرتبطة بالحلقة السكرية. يعقب ذلك تحييد حمضي باستخدام حمض الهيدروكلوريك لضبط قيمة الأس الهيدروجيني وإيقاف التفاعل. تؤدي هذه المرحلة إلى الحصول على **F18FDG** بصيغته الحرة القابلة للتفاعل الحيوي، وإن كان لا يزال يحتوي على شوائب كيميائية وإشعاعية.

٣١.٤. منظومة التنقية المتسلسلة داخل **FAST lab** تتضمن سلسلة متكاملة من أعمدة التنقية تهدف إلى إزالة الشوائب الناتجة عن مراحل التخليق المختلفة. يُمرّر الناتج أولاً عبر عمود **C18** لإزالة المركبات العضوية غير القطبية وبقايا الطليعة، ثم عبر عمود الألومينا (**AIO**) لإزالة أي فلوريد مشع غير متفاعل. وتُصَرَّف الكواشف والمُضَلَّات الكيميائية إلى حاويات النفايات المخصصة ضمن المنظومة.

٣٢.٤. الصياغة النهائية للمستحضر الصيدلاني الإشعاعي

في المرحلة الأخيرة، يُعاد إذابة **F18-FDG** المنقى في محلول ملحي معقم داخل **FAST lab**، ثم يُرشح عبر مرشح تعقيم بقطر مسام ٠.٢٢ مايكرومتر، ليُجمع في قارورة معقمة جاهزة للخضوع لاختبارات ضبط الجودة. وبهذا تكتمل دورة التخليق الكيميائي الألي داخل **FAST lab** منتجاً مستحضر **F-FDG** مطابقاً لمتطلبات الاستخدام السريري. الشكل (٢) يمثل سير التفاعل الكيميائي داخل منظومة الفاست لاب.

أخيراً يُظهر هذا التحليل أن منظومة **FAST lab** لا تمثل مجرد جهاز تخليق آلي، بل إطاراً تكاملياً يجمع بين التحكم الهندسي الدقيق والمسار الكيميائي المعقد لتخليق $F-^{18}A$ **FDG**. ويُعد فهم هذا الترابط بين البنية الوظيفية للجهاز وآليات التفاعل الكيميائي أساساً علمياً ضرورياً لضمان جودة الإنتاج، وتحسين المردود الإشعاعي، ودعم التطوير المستقبلي للمتبعات المشعة في مراكز السايكلوترون.



الشكل (٢) خارطة سير التفاعل الكيميائي داخل الفاست لاب

يُبيّن المخطط التسلسلي لعملية إنتاج $F-^{18}A$ **FDG** المسار الكيميائي الكامل ابتداءً من الحصول على أيون الفلوريد المشع وحتى الصيغة الصيدلانية النهائية. تبدأ العملية بتشيع ماء الأكسجين - ١٨ داخل السايكلوترون، حيث يتكون نظير الفلور - ١٨ على هيئة أيون فلوريد مميّه في وسط مائي، يكون ضعيف الفعالية التفاعلية بسبب الإماهة القوية.

يُمرّر هذا المحلول على عمود تبادل أنيوني من نوع **QMA** فتحتجز أيونات F^{1-} كهروستاتيكيّاً على الراتنج بينما يُسترجع ماء H^1O لإعادة استخدامه.

يُحرَّر الفلوريد لاحقًا باستخدام كربونات البوتاسيوم وعامل التعقيد، **Kryptofix-222**، حيث يؤدي تعقيد أيون البوتاسيوم إلى كسر الإماهة المحيطة بالفلوريد وتحويله إلى نيوكليوفيل نشط كيميائيًا. يدخل هذا الفلوريد المنشط إلى مفاعل يحتوي على مركب **Mannose triphate** فتتم تفاعل إحلال نووي من نوع **SN2** تُستبدل فيه مجموعة **triphate** بذرة ^1F ، مع تكوين رابطة تساهمية جديدة **F-C**، وينتج مركب F^{-1} **FDG** المحمي رباعي الأسيتيل. تلي ذلك مرحلة إزالة الحماية داخل عمود **C18** حيث تُحلل روابط الإستر قاعديًا باستخدام **NaOH** لإزالة مجموعات الأسيتيل، ثم يُعاد ضبط الوسط حمضيًا بإضافة **HCl** للحصول على البنية السكرية الحرة لمركب **F-FDG**، والذي يكون في هذه المرحلة منتجًا خامًا يحتوي على شوائب كيميائية وإشعاعية. يُنقى هذا المنتج عبر سلسلة من الأعمدة الكروماتوغرافية، إذ يزيل عمود **C18** المركبات العضوية غير المرغوبة، بينما يعمل عمود أكسيد الألمنيوم على امتزاز أي فلوريد حر متبقي، وذلك اعتمادًا على تفاعلات امتزاز سطحية من نوع لويس. وفي المرحلة النهائية، يُحضَّر المركب النقي بإذابته في محلول ملحي معقم، دون حدوث أي تفاعل كيميائي إضافي، ليُحصل في النهاية على F^{-1} **F-FDG** بصيغته الصيدلانية الجاهزة للاستخدام السريري.

٣٣.٤- لماذا 'يبقى' بعض F^{-1} ويُفقد بعضه؟

تحليل فيزيائي قائم على الأنظمة غير المتوازنة

(Non-Equilibrium Condensed Matter Framework)

من الملاحظ تجريبيًا في جميع منظومات إنتاج وتحضير F^{-1} —**FDG** أن جزءًا من النشاط الإشعاعي المنتج لا يصل إلى المركب النهائي، على الرغم من ثبات شروط التشغيل النووي والكيميائي. وغالبًا ما يُفسَّر هذا الفقد ضمن الأطر التقليدية على أنه ناتج عن كفاءة كيميائية غير كاملة أو خسائر تشغيلية. إلا أن هذا التفسير يبقى قاصرًا عن توصيف الظاهرة توصيفًا فيزيائيًا دقيقًا، ولا يفسَّر لماذا يبقى جزء من F^{-1} ويُدمج بنجاح، بينما يُفقد جزء آخر تحت شروط متطابقة.

F^{-1} 34.4. كنظام ذري غير متوازن بعد التفاعل النووي

ينشأ F^{-1} داخل الهدف نتيجة تفاعل نووي عالي الطاقة، ويخرج مباشرة في حالة:

- استثارة إلكترونية عالية،
 - عدم توازن شعني،
 - ووسط كثيف من الإلكترونات الثانوية والاستقطاب العازل.
- في هذه المرحلة، لا يمكن اعتبار F^{-1} كأيون فلوريد "جاهز للتفاعل"، بل ككيان ذري ديناميكي يخضع لمسارات تطور متعددة، تحددها سرعة تبيد الطاقة وآليات الاستقرار الإلكتروني داخل الوسط المكثف.

٤.٣٥ - تعددية المسارات (Pathway Competition) في الوسط المكثف بعد إنتاجه، يواجه F^1 عدة مسارات محتملة، تتنافس فيما بينها خلال نافذة زمنية قصيرة جداً، من أهمها:

١. مسار الاستقرار الإلكتروني السريع حيث يلتقط F^1 إلكترونات ويستقر كأيون F^1 قابل للاحتجاز والمعالجة.

٢. مسار فقدان الشحنة أو إعادة الذوبان حيث يبقى في حالة شحنية غير ملائمة تؤدي إلى عدم احتجازه على عمود QMA

٣. مسار التبثر أو الارتباط الضعيف المؤقت حيث يتفاعل بشكل عابر مع الوسط دون الوصول إلى حالة مستقرة. الفاصل بين هذه المسارات ليس كيميائياً بحثاً، بل تحكمه ديناميكيات إلكترونية غير متوازنة.

٣.٦.٤ دور عمود QMA كمرشح فيزيائي ديناميكي

لا يعمل عمود QMA كمجرد مبادل أيوني، بل كمرشح شحني ومصيدة حالات إلكترونية مستقرة فقط فالفلور-١٨ الذي يصل إلى حالة شحنيه مستقرة ويملك زمن استقرار كافٍ على السطح ويتوافق مع المجال الكهروستاتيكي للعمود هو الذي يبقى ويتابع المسار نحو التفاعل الجزيئي.

أما F^1 الذي لا يحقق شرط الاستقرار الزمني أو يصل بحالة إلكترونية غير ملائمة فإنه يُفقد في هذه المرحلة المبكرة.

٣.٧.٤ نافذة الزمن غير المتوازن (Non-Equilibrium Time Window)

تمثل كل مرحلة من مراحل Fast Lab نافذة زمنية محدودة خلال هذه النافذة يمكن لـ F^1 أن ينتقل من حالة غير متوازنة إلى حالة مستقرة أو أن يفقد فرصته في الاندماج الجزيئي.

إن طول هذه النافذة يعتمد على:

• خصائص الوسط العازل،

• درجة الحرارة،

• كثافة الشحنة،

• وسرعة نقل المادة بين المراحل.

وبانقضاء هذه النافذة، تُغلق إمكانية الدمج البنيوي، حتى وإن بقي النشاط الإشعاعي موجوداً.

٣.٨.٤ الدمج الجزيئي كعملية انتقائية فيزيائية

عند مرحلة تكوين رابطة C-F، لا يتم دمج جميع أيونات F^1 المتاحة، بل فقط تلك التي:

• ما زالت ضمن حالة إلكترونية ملائمة،

• ولم تفقد توازنها الطاقوي،

• وتستطيع التفاعل ضمن زمن الاسترخاء الإلكتروني.

وبذلك يصبح الدمج الجزيئي عملية انتقائية فيزيائية أكثر منها تفاعلاً كيميائياً مثالياً.

يمكن تلخيص الظاهرة بالصياغة التالية، إن بقاء F^1 أو فقدانه لا تحدده وفرة النظير ولا شروط التفاعل النووي وحدها بل تحكمه قدرة الذرة الناتجة على العبور عبر سلسلة من الحالات غير المتوازنة والوصول إلى حالة استقرار إلكتروني ضمن نافذة زمنية محدودة يفرضها الوسط المكثف والخلاصة هي :-

١- الفقد في F^1 ليس خسارة عشوائية بل نتيجة طبيعية لتنافس مسارات فيزيائية غير متوازنة.

٢- **Fast Lab QAM** يعملان كمنتق فيزيائي للحالات المستقرة

٣- تحسين المردود لا يكون فقط كيميائياً، بل عبر ضبط البيئة الإلكترونية والزمنية

٤٠٤.٤٠ التفسير الكيميائي المتسلسل لآلية إنتاج F^1 -FDG

يبدأ المسار الكيميائي لإنتاج F^1 -FDG بتكون نظير الفلور-١٨ داخل السايكلوترون نتيجة التفاعل النووي $O(p,n)^1F$ حيث يكون الناتج الكيميائي المباشر في الوسط المائي هو أيون الفلوريد المشع في صورة فلوريد مميّه $F^1(HO)$ ، ومن الناحية الكيميائية لا توجد رابطة تساهمية من نوع $F-H$ ، وإنما يكون الأيون محاطاً بغلاف إمامة قوي ناتج عن التجاذب الكهروستاتيكي مع جزيئات الماء، الأمر الذي يؤدي إلى خفض نيوكليوفيلية الفلوريد بشكل كبير ويجعله غير قادر على الدخول مباشرة في تفاعلات الإحلال النووي.

ولغرض فصل الفلوريد المشع عن ماء O^1 وإعداده للمعالجة الكيميائية اللاحقة، يُحتجز الأيون على عمود تبادل أيوني من نوع **QMA** يحتوي على مجموعات أمونيوم رباعية موجبة، حيث يتم الارتباط بين الشحنة الموجبة للعمود وأيون F^1 ارتباطاً كهروستاتيكياً صرفاً دون حدوث أي تفاعل تساهمي، بينما يخرج ماء O^1 من العمود دون أن يطرأ عليه أي تغيير كيميائي.

بعد ذلك تُجرى عملية تحرير وتنشيط الفلوريد باستخدام مزيج من كربونات البوتاسيوم كمصدر لأيونات **K**، ومركب **Kryptofix-222** بوصفه عامل تعقيد وانتقال طور، إذ يقوم **Kryptofix** بتعقيد أيون البوتاسيوم مكوناً معقداً مستقرّاً يقلل من التجاذب الأيوني بين K^1 و F^1 ، ويؤدي في الوقت نفسه إلى تقليل غلاف الإمامة المحيط بالفلوريد، مما يزيد من نيوكليوفيليته ويحوّله إلى فلوريد مُنشط قادر على الدخول في تفاعلات إحلال نووي فعّالة.

في المرحلة التالية يتفاعل الفلوريد المنشط مع Mannose triﬂate عبر تفاعل إحلال نووي من نوع SN_2 حيث تعمل مجموعة (OTf - triﬂate) كمجموعة مغادرة ممتازة، ويهاجم F^1 ذرة كربون مشبعة من نوع sp^3 مؤدياً إلى انقلاب فراغي كامل في الترتيب الفراغي (Walden inversion)، وينتج عن ذلك مركب Tetra-acetyl-F-FDG¹، إذ تؤدي مجموعات الأسيتيل دوراً وقائياً مهماً من خلال حماية مجموعات الهيدروكسيل ومنع حدوث تفاعلات جانبية غير مرغوبة أو فتح للحلقة السكرية أثناء التفاعل. بعد اكتمال الإحلال النووي، تُزال مجموعات الحماية الأسيتيلية بإجراء تحلل قاعدي باستخدام هيدروكسيد الصوديوم، حيث يحدث تفاعل التحلل القاعدي للإسترات (Saponification) يؤدي إلى كسر روابط الإستر وتحرير مجموعات الهيدروكسيل الأصلية، وينتج عن ذلك مركب غير محمي لكنه يوجد في وسط قاعدي. ولتحقيق الاستقرار الكيميائي للجزيء ومنع تحلل السكر أو تكوّن نواتج ثانوية، يُعدّل الوسط بإضافة حمض الهيدروكلوريك لإجراء المعادلة والوصول إلى شروط pH مناسبة، لينتج في هذه المرحلة مركب $F-FDG^1$ الخام. تلي ذلك مرحلة التنقية الكروماتوغرافيا التي تُعد ضرورية لضمان النقاوة الكيميائية والإشعاعية، حيث يُستخدم عمود C18 لإزالة المركبات غير القطبية وبقايا Mannose triﬂate والنواتج الأسيتيلية، ثم يُمرّر الناتج عبر عمود أكسيد الألمنيوم AIO الذي يمتز عليه الفلوريد الحر المتبقي انتقائياً من خلال تفاعلات سطحية من نوع حمض - قاعدة لويس. وأخيراً تُجرى الصياغة النهائية بإذابة المركب المنقى في محلول ملحي معقم، وهي مرحلة لا تتضمن أي تفاعل كيميائي جديد، وإنما تقتصر على التخفيف وضبط الشروط الأيونية وتحقيق الاستقرار الفيزيائي-الكيميائي للمستحضر، ليصبح $F-FDG^1$ جاهزاً للاستخدام السريري في تطبيقات التصوير البوزيتروني، الجدول الآتي يوضح سير العمليات الكيميائية داخل الفاستلاب.

المرحلة	الطبيعة الكيميائية
QMA	تبادل أيوني
K222	تعقيد أيوني
Triflate	إحلال نووي SN_2
NaOH	تحلل الإستر
C18	امتزاز عضوي
Al ₂ O ₃	امتزاز لويس

الجدول (1) يوضح سير العمليات الكيميائية داخل كاسيت الفاستلاب

References

1. Ametamey, S.M., Honer, M. and Schubiger, P.A. (2008) 'Molecular imaging with PET', *Chemical Reviews*, 108(5), pp. 1501–1516.
2. Блохин, М.А. (1982) *Радиохимия [Radiochemistry]*. Москва: Атомиздат.
3. Cherry, S.R., Sorenson, J.A. and Phelps, M.E. (2012) *Physics in Nuclear Medicine*. 4th edn. Philadelphia: Elsevier Saunders.
4. Гончаров, А.В., Иванов, С.П. and Кузнецов, В.М. (2004) 'Производство радионуклидов на медицинских циклотронах' [Production of radionuclides at medical cyclotrons], *Атомная энергия*, 97(4), pp. 289–296.
5. Hamacher, K., Coenen, H.H. and Stöcklin, G. (1986) 'Efficient stereospecific synthesis of no-carrier-added 2-[¹⁸F]fluoro-2-deoxy-D-glucose', *Journal of Nuclear Medicine*, 27(2), pp. 235–238.
6. International Atomic Energy Agency (IAEA) (2008) *Cyclotron Produced Radionuclides: Principles and Practice*. Technical Reports Series No. 465. Vienna: IAEA.
7. International Atomic Energy Agency (IAEA) (2012) *Radiation Safety of Cyclotron Facilities*. Vienna: IAEA.
8. Jacobson, O., Kiesewetter, D.O. and Chen, X. (2015) 'Fluorine-18 radiochemistry, labeling strategies and synthetic routes', *Bioconjugate Chemistry*, 26(1), pp. 1–18.
9. Капица, П.Л. (1977) *Ускорители заряженных частиц [Accelerators of Charged Particles]*. Москва: Наука.
10. Knapp, F.F. and Dash, A. (2016) *Radiopharmaceuticals for Therapy*. New Delhi: Springer.
11. Корсунский, В.М. (1990) *Основы радиационной химии [Fundamentals of Radiation Chemistry]*. Москва: Химия.
12. Phelps, M.E. (2000) *PET: Molecular Imaging and Its Biological Applications*. New York: Springer.
13. Сидоров, А.А. (2009) 'Радиохимические аспекты получения ¹⁸F' [Radiochemical aspects of ¹⁸F production], *Радиохимия*, 51(3), pp. 243–250.
14. Vallabhajosula, S. (2009) *Molecular Imaging: Radiopharmaceuticals for PET and SPECT*. Berlin: Springer.
15. Yu, S. (2006) 'Review of ¹⁸F-FDG synthesis and quality control', *Biomedical Imaging and Intervention Journal*, 2(4), e57.

الفهرست

- ٤ شكر وتقدير
- ٥ تنويه علمي
- ٦ الفصل الاول

السايكلترون ((أو معجل الجسيمات النووية))

- ٢٤ الفصل الثاني

النموذج الرياضي لحركة الجسيم المشحون داخل السايكلترون

- ٤٤ الفصل الثالث

تصميم المنشأة (كتلة السايكلترون)

- ٥٢ الفصل الرابع

اتاج مركب (FDG) فلوروديوكسي غلوكوز من (F¹) داخل منظومة ال Fast lab