وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة بابل

كلية التربية للعلوم الصرفة

قسم الفيزياء

الاندماج النووي ودوره في انتاج الطاقة المستدامة

بحث مقدم الى مجلس كلية التربية للعلوم الصرفة- جامعة بابل وهو جزء من متطلبات نيل شهادة البكالوريوس في قسم الفيزياء.

من قبل الطالبة

رجاء احمد محيسن

بإشراف

أ. د. انعام هاني كاظم

٢٠٢٦م ١٤٤٧هـ

الآية القرآنية

قال تعالى:

بسم الله الرحمن الرحيم

﴿وَجَعَلْنَا الشَّمْسَ سِرَاجًا﴾

صدق الله العظيم

[نوح: الآية ١٦]

الإهداء

﴿ وَآخِرُ دَعواهُم أَنِ الحَمدُ لِلَّهِ رَبِّ العالَمينَ ﴾

اهدي هذا النجاح لنفسي اولاً، ابنة ابيها القوية صاحبة الإرادة العظيمة.

الى من ارتوت الارض بدمائهُ(ابي أمان روحي) اهديك هذا البحث محبتاً وامتناناً لما غرسته في قلبي من حب وصبر لأذكرك دوما بكل انجاز احققه.

الى من قامت بالدورين بغيابه ثمرة الحب والتضحية والتي ساندتني في رحلتي (امي ريحانة قلبي).

الى من شد الله به عضدي وكان خير سند (اخي العزيز).

الى الداعمين من بعيد الارواح النقية اصحاب الدعوات الخفية.

شكر وتقدير

الحمد لله رب العالمين الذي أنار لنا دروب العلم والمعرفة، ووفقنا لإتمام هذا العمل المتواضع، والصلاة والسلام على أشرف الخلق سيدنا محمد وعلى آله وصحبه أجمعين.

نتقدم بخالص الشكر والتقدير والامتنان إلى عمادة جامعة بابل / كلية التربية للعلوم الصرفة، لما قدمته من دعم علمي ومعنوي، وتهيئة البيئة الأكاديمية المناسبة التي أسهمت في إنجاز هذا البحث، كما نتقدم بجزيل الشكر إلى قسم الفيزياء لما وفره من إمكانات علمية وإرشادات أكاديمية كان لها الأثر الكبير في إتمام هذا العمل.

كما نتقدم بخالص الشكر والامتنان إلى الأستاذة المشرفة (د. إنعام هاني كاظم)**، لما قدمته من توجيهات علمية قيّمة، ومتابعة مستمرة، ونصائح بنّاءة أسهمت في تطوير البحث وإظهاره بالصورة المطلوبة. فقد كان لتوجيهاتها العلمية الدقيقة وصبرها في الإشراف الدور الكبير في إنجاز هذا العمل. ولا يفوتنا أن نعبر عن شكرنا وتقديرنا لكل أساتذة قسم الفيزياء، لما قدموه من علم ومعرفة طوال سنوات الدراسة، ولكل من ساهم من قريب أو بعيد في إنجاز هذا البحث، سائلين الله أن يجزي الجميع خير الجزاء.**

قائمة المحتويات

العنوان	رقم الصفحة
الآية القرآنية	أ
الإهداء	ب
شكر وتقدير	ت
قائمة المحتويات	ث
قائمة الأشكال	ج
الخلاصة	ح
الفصل الأول	١-١١
١-١ المقدمة	٢
١-٢ مفهوم الاندماج النووي	٣-٤
انواع تفاعلات الاندماج النووي	٥-٦
الفرق بين الاندماج النووي والانشطار النووي	٦
نقص الكتلة وطاقة الربط النووي	٧
منحني طاقة الربط النووي	٨
آلية حدوث الاندماج النووي	٨-٩
تفاعل الديوتيريوم – التريتيوم	١٠
الفصل الثاني	١٢-٢٠
مدخل فيزيائي لتحقيق الاندماج	١٣
الاندماج بالحصر المغناطيسي	١٤-١٦
الاندماج بالحصر القصوري	١٧-١٨
الاندماج الطبيعي في النجوم	١٩
مقارنة فيزيائية بين الحصر المغناطيسي والحصر القصوري والاندماج النووي في النجوم	٢٠
الفصل الثالث	٢١-٢٧
تطبيقات الاندماج النووي في الطاقة المستدامة	٢٢-٢٧
الاستنتاج	٢٨
المصادر	٢٩-٣١

قائمة الأشكال

رقم الشكل	عنوان الشكل	رقم الصفحة
(١-١)	**الاندماج النووي**	٤
(١-٢)	**مقارنة هندسية بين تصميم مفاعل "التوكاماك" (يسار) وجهاز "الستيلاريتور" (يمين) لبيان طبيعة تشكيل المجالات المغناطيسية**	١٦
(٢-٢)	**يوضح رحلة الاندماج بالحصر القصور من نبضة الليزر إلى الاشتعال النووي.**	١٨
(٢-٣)	**مخطط "سلسلة بروتون-بروتون" (Proton-Proton Chain)، التي توضح كيفية اندماج أنوية الهيدروجين لإنتاج الهيليوم وانطلاق الطاقة والنيوترينو داخل باطن النجوم.**	١٩
(٣-١)	**مخطط لجهاز التوكاماك يوضح مراحل تحويل الطاقة في مفاعل الاندماج النووي**	٢٣

الخلاصة

يتناول هذا البحث دراسة الاندماج النووي كأحد أهم مصادر الطاقة المستقبلية المستدامة، من خلال التركيز على المبادئ الفيزيائية التي تحكم تفاعلاته، مثل تفاعل الديوتيريوم والتريتيوم، ومعادلة تكافؤ الكتلة والطاقة $E = \Delta m\, c^2$، إضافةً إلى تحليل الشروط اللازمة لحدوث الاندماج، وعلى رأسها درجات الحرارة العالية ومعيار لاوسون لضمان استمرارية التفاعل.

كما يستعرض البحث أهم الطرق المستخدمة لتحقيق الاندماج النووي، مثل الحصر المغناطيسي باستخدام مفاعلات التوكاماك، والحصر بالقصور الذاتي باستخدام الليزر، مع الإشارة إلى أبرز المشاريع العالمية في هذا المجال. ويتناول كذلك التطبيقات العملية للاندماج النووي، خاصة في إنتاج الطاقة الكهربائية، وتحلية المياه، والتطبيقات الطبية والفضائية، مع توضيح الأسس الفيزيائية التي تجعله خيارًا مناسبًا لهذه الاستخدامات.

تشير النتائج إلى أن تفاعل D-T يُعد الأكثر كفاءة لإنتاج الطاقة، وأن الاندماج النووي يتميز بكونه مصدرًا نظيفًا وآمنًا نسبيًا مقارنة بالانشطار النووي، رغم التحديات التقنية المرتبطة بالتحكم بالبلازما وتحقيق درجات الحرارة العالية. ويخلص البحث إلى أن الاندماج النووي يمثل خيارًا واعدًا لتحقيق الاستدامة في مجال الطاقة، ومن المتوقع أن يلعب دورًا مهمًا في تلبية الطلب العالمي على الطاقة مستقبلاً.

الفصل الاول

المبادئ الفيزيائية للاندماج النووي

١-١ المقدمة

تعد الطاقة أحد أهم العوامل الأساسية التي يعتمد عليها تطور المجتمعات البشرية، إذ ترتبط ارتباطًا وثيقًا بالتقدم الصناعي والتكنولوجي والاقتصادي [١]. ومع الزيادة المستمرة في عدد السكان والتوسع في استخدام التقنيات الحديثة، ازداد الطلب العالمي على مصادر الطاقة بشكل كبير، مما أدى إلى استنزاف الموارد التقليدية مثل النفط والغاز الطبيعي والفحم، فضلاً عن التأثيرات البيئية السلبية الناتجة عن استخدامها، كالتلوث وانبعاث الغازات الدفيئة التي تسهم في ظاهرة الاحتباس الحراري والتغير المناخي [٢].

وفي ظل هذه التحديات، أصبح من الضروري البحث عن مصادر طاقة بديلة تكون نظيفة، آمنة، ومستدامة على المدى الطويل. ومن بين هذه المصادر، يبرز الاندماج النووي كأحد أهم الحلول العلمية الواعدة، نظراً لقدرته على إنتاج كميات هائلة من الطاقة من خلال تفاعلات نووية بسيطة تعتمد على اتحاد نوى خفيفة لتكوين نوى أثقل، مصحوبًا بتحرير طاقة كبيرة نتيجة فقدان جزء من الكتلة، وذلك وفقًا لمعادلة تكافؤ الكتلة والطاقة التي وضعها العالم ألبرت أينشتاين [٣]:

$$E = \Delta m\, c^2$$

ويُعد الاندماج النووي المصدر الأساسي للطاقة في الشمس والنجوم، حيث تحدث هذه التفاعلات بشكل طبيعي تحت تأثير درجات حرارة وضغوط هائلة [٤]. وقد سعى العلماء منذ عقود إلى محاكاة هذه الظاهرة الطبيعية على الأرض، إلا أن تحقيق ذلك يواجه تحديات معقدة تتعلق بضرورة الوصول إلى درجات حرارة تتجاوز ١٠٠ مليون كلفن، والتحكم في حالة البلازما [٥].

تعتمد تفاعلات الاندماج العملي بشكل رئيسي على نظيري الهيدروجين (الديوتيريوم والتريتيوم)، حيث يتطلب نجاح التفاعل تحقيق شروط "معيار لاوسون" لضمان استمرارية التفاعل بشكل ذاتي [٦، ٧]. وقد شهدت العقود الأخيرة تطوراً في تقنيات الحصر المغناطيسي (التوكاماك) والحصر بالقصور الذاتي (الليزر) [٨]، مما يعكس الأهمية المتزايدة لهذا المجال [٩].

يهدف هذا البحث إلى دراسة الاندماج النووي من جوانبه الفيزيائية والتقنية، وتحليل تطبيقاته وتحدياته، لتقديم رؤية واضحة حول هذا البديل الذي قد يصبح الركيزة الأساسية لمنظومة الطاقة العالمية المستدامة.

١-٢ مفهوم الاندماج النووي

الاندماج النووي (Nuclear Fusion) هو تفاعل نووي تتحد فيه نواتان خفيفتان لتكوين نواة أثقل ذات طاقة ربط أعلى لكل نوكليون، ويصاحب ذلك تحرر طاقة نتيجة نقص الكتلة وتحولها إلى طاقة وفق علاقة تكافؤ الكتلة والطاقة التي وضعها Albert Einstein [1] .

لفهم العملية فيزيائياً، يجب تحليل القوى المؤثرة بين النوى. بما أن النوى تحتوي على بروتونات موجبة الشحنة، فإنها تتنافر بفعل قوة كولوم الكهروستاتيكية. يُعرَّف حاجز كولوم بأنه مقدار الطاقة اللازمة لتقريب نواتين إلى مسافة تقارب 10^{-15}م، وهي المسافة التي تصبح عندها القوة النووية الشديدة قوة تجاذب مسيطرة [٢]. وعند تجاوز هذا الحاجز، ترتبط النواتان بفعل القوة النووية الشديدة مكوّنتين نواة جديدة أكثر استقراراً.

يتطلب تجاوز حاجز كولوم طاقة حركية عالية للجسيمات، لذلك يحدث الاندماج عند درجات حرارة مرتفعة جداً من رتبة 10^{8}_10^{7}كلفن، حيث تكون المادة في حالة البلازما، أي وسط مؤين تتكون فيه النوى والإلكترونات الحرة [٣]. في هذه الحالة تزداد احتمالية التصادمات ذات الطاقة الكافية لإحداث الاندماج.

يرتبط انبعاث الطاقة في الاندماج بزيادة طاقة الربط النووي للنواة الناتجة مقارنة بالنوى المتفاعلة. يبيّن منحني طاقة الربط أن النوى الخفيفة (مثل نظائر الهيدروجين) تطلق طاقة عند اندماجها باتجاه عناصر متوسطة الكتلة، لأن طاقة الربط لكل نوكليون تزداد في هذا الاتجاه [٤].

يمكن التعبير عن الطاقة المتحررة بالعلاقة:

$$E=\Delta mc^2 \ldots\ldots\ldots (1\text{-}1)$$

حيث تمثل Δm الفرق بين مجموع كتل النوى قبل التفاعل وبعده، وc سرعة الضوء في الفراغ [٥].

لفهم هذه المعادلة فيزيائيًا، يجب إدراك أن الكتلة ليست مقدارًا ثابتًا، بل تمثل شكلًا من أشكال الطاقة. فعند حدوث تفاعل اندماج نووي، تكون كتلة النواة الناتجة أقل من مجموع كتل النوى المتفاعلة، ويُعرف هذا الفرق بـ نقص الكتلة.

هذا النقص لا يختفي، بل يتحول إلى طاقة وفق العلاقة أعلاه. وبما أن سرعة الضوء c كبيرة جدًا ($\approx 3\times10^{8}$ m/s)، فإن كمية صغيرة جدًا من الكتلة تتحول إلى طاقة هائلة.

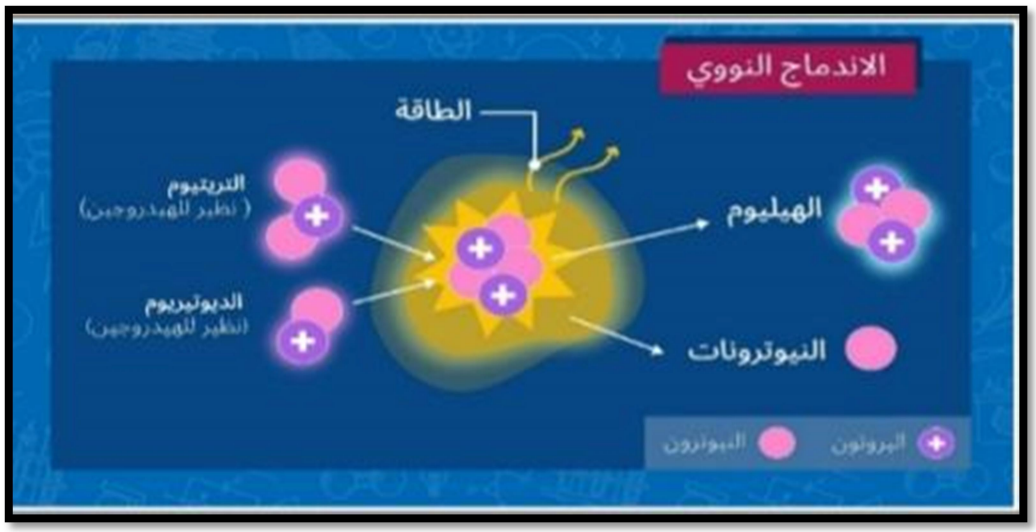
مثال توضيحي:

في تفاعل الديوتيريوم–التريتيوم، فإن نقص كتلة صغير جدًا (جزء من الألف من وحدة الكتلة الذرية) يؤدي إلى تحرير طاقة قدرها 17.6 MeV، وهي طاقة كبيرة مقارنة بالتفاعلات الكيميائية.

$$^{2}_{1}H + ^{3}_{1}H \rightarrow {}_{2}He^{4} + {}^{1}_{0}n + 17.6\ Me \ldots\ldots\ldots (2-1)$$

ينتج عن هذا التفاعل نواة هيليوم-٤ ونيوترون سريع، وتبلغ الطاقة الكلية المنطلقة ١٧.٦ ميغا إلكترون فولت، وهي ناتجة عن نقص الكتلة بين المتفاعلات والنواتج كما في الشكل (١-١) [٦].

وبناءً على ما سبق، يُعرَّف الاندماج النووي علمياً بوصفه عملية تعتمد على توازن دقيق بين القوى النووية الأساسية، وطاقة الربط، ونقص الكتلة، وشروط حرارية محددة، وهو الأساس الفيزيائي لتوليد الطاقة في النجوم والتطبيقات الاندماجية الأرضية.



الشكل (١-١)، الاندماج النووي.[٦]

١-٣ انواع تفاعلات الاندماج النووي

تُعد التفاعلات النووية المصدر الأساسي للطاقة المختزنة في نوى الذرات، وتنقسم بصورة رئيسية إلى نوعين هما: الاندماج النووي والانشطار النووي، ويختلف كل منهما في آلية التفاعل وشروط حدوثه وكمية الطاقة الناتجة عنه [٤]، [٥].

١-٣-١ الاندماج النووي (Nuclear Fusion)

الاندماج النووي هو عملية اتحاد نواتين خفيفتين لتكوين نواة أثقل نسبيًا، مع انطلاق كمية كبيرة من الطاقة نتيجة نقص الكتلة وتحولها إلى طاقة وفق معادلة أينشتاين:

$$E = mc^2 \ldots\ldots (3-1)$$

كما أوضحها أينشتاين في نظريته للنسبية الخاصة [١].

يحدث الاندماج بصورة طبيعية في النجوم، حيث تندمج نوى الهيدروجين لتكوين الهيليوم تحت تأثير درجات حرارة وضغوط هائلة، ويُعد تفاعل الديوتيريوم–التريتيوم من أكثر التفاعلات ملاءمة للتطبيقات العملية بسبب مقطعه العرضي العالي عند درجات الحرارة المرتفعة [٤].

ولتحقيق الاندماج على الأرض، يجب تلبية ما يُعرف بشرط لوسون، والذي يتطلب تحقيق قيمة مناسبة لحاصل ضرب الكثافة وزمن الاحتواء ودرجة الحرارة. وتُستخدم تقنيتان رئيسيتان لذلك، هما الحصر المغناطيسي والحصر القصوري [٦].

يمتاز الاندماج بإنتاج طاقة كبيرة مع مخلفات إشعاعية أقل مقارنة بالانشطار، إضافة إلى وفرة الوقود النسبي في الطبيعة [٥].

١-٣-٢ الانشطار النووي (Nuclear Fission)

الانشطار النووي هو عملية انقسام نواة ثقيلة – مثل اليورانيوم-٢٣٥ – إلى نواتين أخف، مصحوبة بانبعاث نيوترونات وطاقة كبيرة [٤].

يحدث الانشطار عادةً عند امتصاص النواة نيوترونًا بطيئًا، مما يؤدي إلى عدم استقرارها وانقسامها إلى شظايا نووية مختلفة مع تحرير نيوترونات إضافية قد تُسبب تفاعلًا متسلسلًا، تُستخدم

هذه العملية في المفاعلات النووية لإنتاج الطاقة الكهربائية، حيث يتم التحكم في التفاعل المتسلسل بواسطة قضبان التحكم وأنظمة التبريد، يمتاز الانشطار بسهولة تحقيقه تقنيًا مقارنة بالاندماج، إلا أنه ينتج نفايات مشعة طويلة العمر ويطرح تحديات تتعلق بالأمان النووي [٥].

١-٤ الفرق بين الاندماج النووي والانشطار النووي

يختلف الاندماج النووي عن الانشطار النووي في طبيعة التفاعل والنتائج:[١]

١. **الاندماج النووي:** يعتمد على اتحاد نوى خفيفة لتكوين نواة اثقل، لأنتاج طاقة اكبر نسبياً وانبعاثات اشعاعية اقل
٢. **الانشطار النووي:** يعتمد على انقسام نواة ثقيلة مثل اليورانيوم، الى نوى اصغر لإنتاج الطاقة.

فيزيائيًا، يعود الفرق الجوهري بين الاندماج والانشطار إلى التوازن بين قوتين أساسيتين:

١. **القوة النووية الشديدة:**

قوة تجاذب قصيرة المدى ($\sim 10^{-15} m$) لكنها قوية جدًا، تربط النيوكليونات داخل النواة.

٢. **قوة كولوم (التنافر الكهروستاتيكي):**

قوة تنافر طويلة المدى بين البروتونات الموجبة.

- **في الاندماج النووي:**

يجب التغلب أولاً على التنافر الكولومي لإجبار النوى على الاقتراب، وبعدها تسيطر القوة النووية الشديدة وتؤدي إلى الاندماج.

- **في الانشطار النووي:**

النواة الثقيلة تكون أصلًا غير مستقرة بسبب زيادة التنافر الكولومي بين البروتونات، مما يجعلها قابلة للانقسام عند إثارتها.

يتميز الاندماج النووي بالأمان النسبي، اذا يتوقف التفاعل تلقائياً عند اي خلل في ظروف التشغيل.

١-٥ نقص الكتلة وطاقة الربط النووي

١-٥-١ نقص الكتلة

عند تكوين نواة من بروتونات ونيوترونات حرة، تكون كتلة النواة الناتجة أقل من مجموع كتل مكوناتها المنفصلة. يُعرف الفرق بين الكتلتين بنقص الكتلة (Mass Defect)، ويُعطى بالعلاقة:

حيث:

$$\Delta m = Zmp + Nmn - mnucleus \ldots\ldots\ldots (4\text{-}1)$$

Z=عدد البروتونات

N =عدد النيوترونات

يرتبط نقص الكتلة بطاقة الربط النووي وفق معادلة تكافؤ الكتلة والطاقة التي صاغها (Albert) Einstein:

$$E = \Delta m c^2 \ldots\ldots\ldots\ldots (5\text{-}1)$$

حيث:

c=سرعة الضوء في الفراغ

E=الطاقة المنبعثة عند تكوين النواة أو اللازمة لتفكيكها

١-٥-٢ طاقة الربط النووي

طاقة الربط النووي هي الطاقة اللازمة لتفكيك النواة إلى نيوكليونات منفصلة. ويُعد متوسط طاقة الربط لكل نيوكليون معيارًا لقياس استقرارية النواة [٣].

لفهم إنتاج الطاقة في التفاعلات النووية بصورة أدق، يجب مقارنة طاقة الربط قبل التفاعل وبعده. فإذا كانت طاقة الربط للنواتج أكبر من المتفاعلات، فإن الفرق يظهر كطاقة محررة.

١-٦ منحني طاقة الربط النووي

يبين منحني طاقة الربط لكل نيوكليون بدلالة العدد الكتلي أن القيم تزداد تدريجيًا للنوى الخفيفة حتى تصل إلى قيمة عظمى قرب الحديد (Fe-56)، ثم تبدأ بالانخفاض للنوى الأثقل [٤].

بناءً على هذا المنحني:

- النوى الأخف من الحديد يمكنها تحرير طاقة عبر الاندماج.
- النوى الأثقل من الحديد تحرر طاقة عبر الانشطار.

إذن، الأساس الفيزيائي للاندماج النووي هو الانتقال من منطقة طاقة ربط منخفضة إلى منطقة طاقة ربط أعلى.

١-٧ آلية حدوث الاندماج النووي

١-7-١ التنافر الكهروستاتيكي (حاجز كولوم)

تحمل النوى شحنة موجبة، لذلك تخضع لقوة تنافر كهربائي تُعطى بقانون كولوم:

$$F = k.\frac{Z1.Z2e^2}{r^2} \dots\dots\dots (6-1)$$

حيث:

- $Z1,Z2$ العددان الذريان للنواتين
- r المسافة بينهما

يشكل هذا التنافر حاجز طاقة يُعرف بحاجز كولوم، ويجب تجاوزه لكي تقترب النوى لمسافة تسمح بتأثير القوة النووية الشديدة [٥].

١-٧-٢ القوة النووية الشديدة

عند مسافات تقارب $١٠^{-١٥}$ متر، تصبح القوة النووية الشديدة قوة تجاذب كبيرة تفوق التنافر الكهروستاتيكي. هذه القوة قصيرة المدى لكنها شديدة التأثير، وهي المسؤولة عن ترابط النيوكليونات داخل النواة [٦].

إذن، يتطلب الاندماج وصول النواتين إلى مسافة ضمن مجال تأثير هذه القوة.

١-٧-٣ دور درجة الحرارة

ترتبط درجة الحرارة بمتوسط الطاقة الحركية للجسيمات وفق العلاقة:

$$Ek = \frac{3}{2} kBT \dots\dots\dots (7-1)$$

حيث:

$\boldsymbol{kB}$ = ثابت بولتزمان

$\boldsymbol{T}$ = درجة الحرارة المطلقة

توضح هذه العلاقة أن درجة الحرارة ليست سوى مقياس لمتوسط الطاقة الحركية للجسيمات. فكلما ارتفعت درجة الحرارة، زادت سرعة النوى، وبالتالي زادت طاقتها الحركية.

في سياق الاندماج النووي، هذا يعني أن رفع درجة الحرارة يزيد من احتمال تصادم النوى بطاقة كافية لتجاوز حاجز كولوم. لذلك تتطلب مفاعلات الاندماج درجات حرارة تصل إلى ملايين الدرجات، لأن احتمال الاندماج يعتمد بشكل أساسي على طاقة الجسيمات.

كلما زادت درجة الحرارة زادت الطاقة الحركية للنوى، مما يزيد احتمال تجاوز حاجز كولوم. عند درجات حرارة مرتفعة جدًا، تتحول المادة إلى حالة البلازما، حيث تتحرر الإلكترونات وتصبح النوى حرة الحركة [٧].

١-٨ تفاعل الديوتيريوم – التريتيوم

يُعد تفاعل الديوتيريوم–التريتيوم أكثر التفاعلات ملاءمة من حيث مقطع التفاعل ومتطلبات درجة الحرارة. ويُكتب كما يلي:

$$^{2}_{1}H + ^{3}_{1}H \rightarrow ^{4}_{2}H + ^{1}_{0}n + 17.6\ MeV \dots\dots\dots (8-1)$$

تتحرر الطاقة نتيجة فرق الكتلة بين المتفاعلات والنواتج:

$$Q = (\ minitial - mfainl\ c^2 \dots\dots\dots (9-1)$$

حيث $\boldsymbol{Q}$ الطاقة المتحررة [٨].

١-٩ شروط حدوث الاندماج النووي (معيار لوسون)

١-٩-١ لتحقيق اندماج منتج للطاقة، يجب تحقيق شرط يُعرف بمعيار لوسون، الذي يربط بين:

ويُعبّر عنه تقريبيًا: $nT\tau_E \geq$ حرجة قيمة $\dots\dots\dots (10-1)$

يمثل معيار لاوسون شرطًا أساسيًا لتحقيق اندماج نووي منتج للطاقة، حيث يوازن بين:

- معدل إنتاج الطاقة من التفاعل النووي
- معدل فقدان الطاقة من البلازما
  - إذا كانت القيمة $nT\tau_E$ صغيرة ← تفقد البلازما طاقتها بسرعة ولا يحدث اندماج فعال
  - إذا تجاوزت القيمة الحد الحرج ← يصبح التفاعل ذاتي الاستمرار (Ignition)

وهذا يعني أن تحقيق الاندماج لا يعتمد فقط على درجة الحرارة، بل على تحقيق توازن بين:

- كثافة الجسيمات
- زمن الاحتواء
- الطاقة الحرارية

وبناءً على ما سبق من تحليل للمبادئ الفيزيائية للاندماج النووي، يتضح أن تحقيق هذا التفاعل على الأرض يتطلب تقنيات متقدمة قادرة على توفير شروط فيزيائية قاسية. لذلك، سيتم في الفصل التالي استعراض أهم الطرق والتقنيات المستخدمة لتحقيق الاندماج النووي عمليًا، مع تحليل الأسس الفيزيائية لكل منها.

الفصل الثاني

طرق تحقيق الاندماج النووي

٢-١ مدخل فيزيائي لتحقيق الاندماج

يتطلب تحقيق اندماج نووي منتج للطاقة تحقق شرط لاوسون الذي يربط بين كثافة البلازما n، ودرجة الحرارة T، وزمن الاحتواء الطاقي τ_E بحيث يتحقق الحد الأدنى للقيمة اللازمة للوصول إلى الاشتعال النووي [١٠].

وبما أن درجات الحرارة المطلوبة تتجاوز 10^8 كلفن، فإن المادة تكون في حالة البلازما. لذلك فإن التحدي الفيزيائي لا يقتصر على بدء التفاعل، بل يتمثل في احتواء البلازما زمناً كافياً بحيث لا يفوق معدل فقدان الطاقة معدل إنتاجها [١١].

وبناءً على آلية الاحتواء، تُصنَّف طرق تحقيق الاندماج إلى:

- الحصر المغناطيسي
- الحصر القصوري
- الاندماج الطبيعي في النجوم (كنموذج مرجعي فيزيائي)

٢-٢ الاندماج بالحصر المغناطيسي

٢-٢-١ الأساس الفيزيائي للحصر المغناطيسي

تتكون البلازما من جسيمات مشحونة، لذا تخضع لقوة لورنتز:

$$\vec{F} = q\left(\vec{v} \times \vec{B}\right) \ldots\ldots (1-2)$$

حيث أن :

q = شحنة الجسيم،

$\vec{B}$ =المجال المغناطيسي.

عند إهمال المجال الكهربائي، تتحرك الجسيمات في مسارات حلزونية حول خطوط المجال المغناطيسي بنصف قطر يُعرف بـ نصف قطر لارمور:

$$r_L = \frac{mv\perp}{|q|B} \ldots\ldots\ldots (2-2)$$

كلما زادت شدة المجال المغناطيسي B ، صغر نصف القطر الحلزوني وتحسن الاحتواء المغناطيسي [١٢].

٢-٢-٢ توازن البلازما ومعادلات MHD

يوصف سلوك البلازما في مفاعلات الاندماج بمعادلات الديناميكا المغناطيسية (MHD). شرط الاتزان الأساسي يُعطى بالعلاقة:

$$\nabla P = \vec{j} \times \vec{B} \ldots\ldots\ldots (3-2)$$

حيث:

p= ضغط البلازما

$\vec{j}$ = كثافة التيار.

يمثل هذا الشرط تعادل ضغط البلازما الداخلي مع القوة المغناطيسية الحابسة [١٣].

ولفهم الاستقرار بصورة أدق، يُعرَّف معامل بيتا:

$$\beta = \frac{\frac{p}{B^2}}{2\mu_0} \dots\dots\dots\dots (4-2)$$

وهو نسبة ضغط البلازما إلى الضغط المغناطيسي. ارتفاع قيمة $\boldsymbol{\beta}$ يحسن كفاءة استخدام المجال المغناطيسي، لكنه يزيد من احتمالية عدم الاستقرارات المغناطيسية [١٤].

٢-٢-٣ جهاز التوكاماك

يُعد التوكاماك التصميم الأكثر تطوراً للحصر المغناطيسي. يعتمد على:

- مجال مغناطيسي حلقي (Toroidal Field)
- مجال قطبي (Poloidal Field) ناتج عن تيار البلازما

ينتج عن الجمع بين المجالين خطوط مغناطيسية لولبية مغلقة تحسن استقرار البلازما [١٥].

أكبر مشروع حالي يعتمد هذا المبدأ هو ITER Organization، ويهدف إلى تحقيق كسب طاقي $\boldsymbol{Q>10}$، أي إنتاج طاقة اندماجية تعادل عشرة أضعاف طاقة التسخين المسلطة [١٦].

٢-٢-٤ الستيلاريتور

يعتمد الستيلاريتور على تشكيل هندسي معقد للمجالات المغناطيسية دون الحاجة إلى تيار بلازما داخلي، مما يقلل من عدم الاستقرارات الناتجة عن التيار.

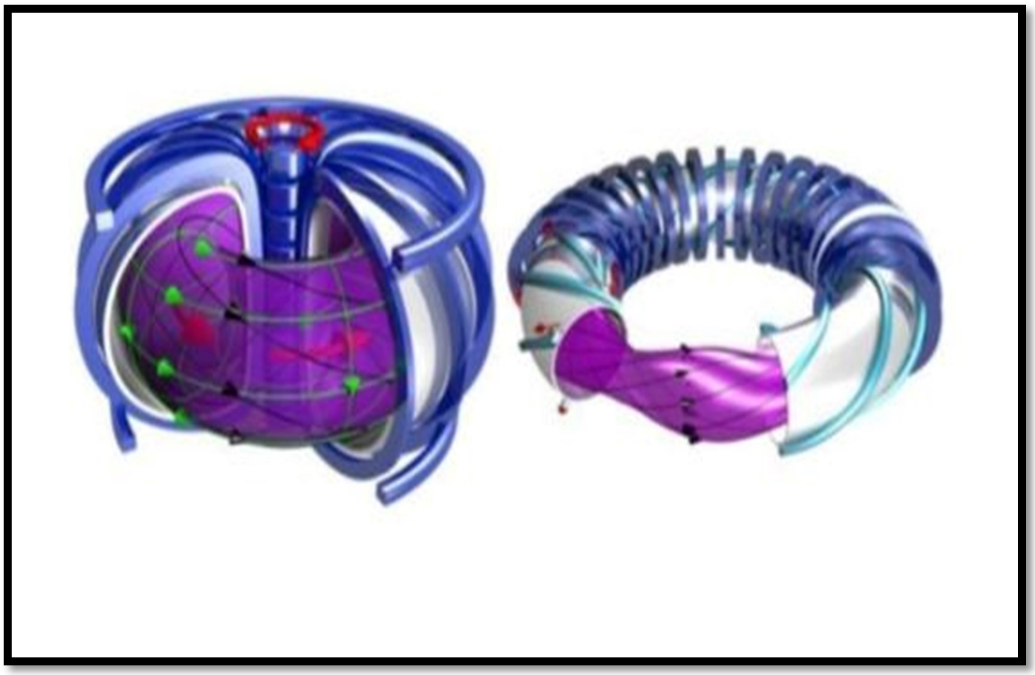
أبرز مثال حديث هو Wendelstein 7-X في ألمانيا، والذي أثبت إمكانية تشغيل البلازما لفترات زمنية أطول مقارنة بتصاميم سابقة [١٧]. وهناك فرق بين تصميم مفاعل جهاز التوكاماك وجهاز الستيلاريتور كما في الشكل (٢-١):

٢-٢-٥ تحديات الحصر المغناطيسي

من أبرز التحديات الفيزيائية:

- عدم استقرارات البلازما (Kink, Tearing Modes)
- النقل المضطرب وفقدان الطاقة (Turbulent Transport)
- تأثير النيوترونات عالية الطاقة على الجدران

تعالج هذه المشكلات عبر تحسين تصميم الملفات المغناطيسية وتطوير مواد مقاومة للإشعاع [١٦].



الشكل (٢-١): مقارنة هندسية بين تصميم مفاعل "التوكاماك" (يسار) وجهاز "الستيلاريتور" (يمين) لبيان طبيعة تشكيل المجالات المغناطيسية.[١٧]

٢-٣ الاندماج بالحصر القصوري

٢-٣-١ المبدأ الفيزيائي

يعتمد الحصر القصوري على ضغط كبسولة صغيرة من وقود D–T باستخدام نبضة طاقة عالية جداً خلال زمن قصير.

يُقارب معدل التفاعل بالعلاقة:

$$R \propto n^2 \langle \sigma v \rangle \dots\dots\dots (5-2)$$

حيث زيادة الكثافة $\boldsymbol{n}$ ترفع معدل التفاعل حتى مع زمن احتواء قصير جداً (نانوثانية) [١٨].

٢-٣-٢ آلية الانضغاط

عند تسليط نبضة ليزر عالية الطاقة على سطح الكبسولة:

- تتبخر الطبقة الخارجية.
- ينشأ رد فعل عكسي يؤدي إلى انهيار داخلي (Implosion).
- ترتفع الكثافة إلى مئات أضعاف الكثافة الصلبة.
- يتحقق الاشتعال النووي في المركز.

معدل التفاعل يُعطى تقريبياً بـ:

$$R = n^2 \langle \sigma v \rangle \dots\dots\dots (6-2)$$

حيث $\boldsymbol{\sigma}$ مقطع التفاعل، $\boldsymbol{v}$ متوسط السرعة الحرارية وفق توزيع ماكسويل [١٩]. كما في الشكل (٢-٢).

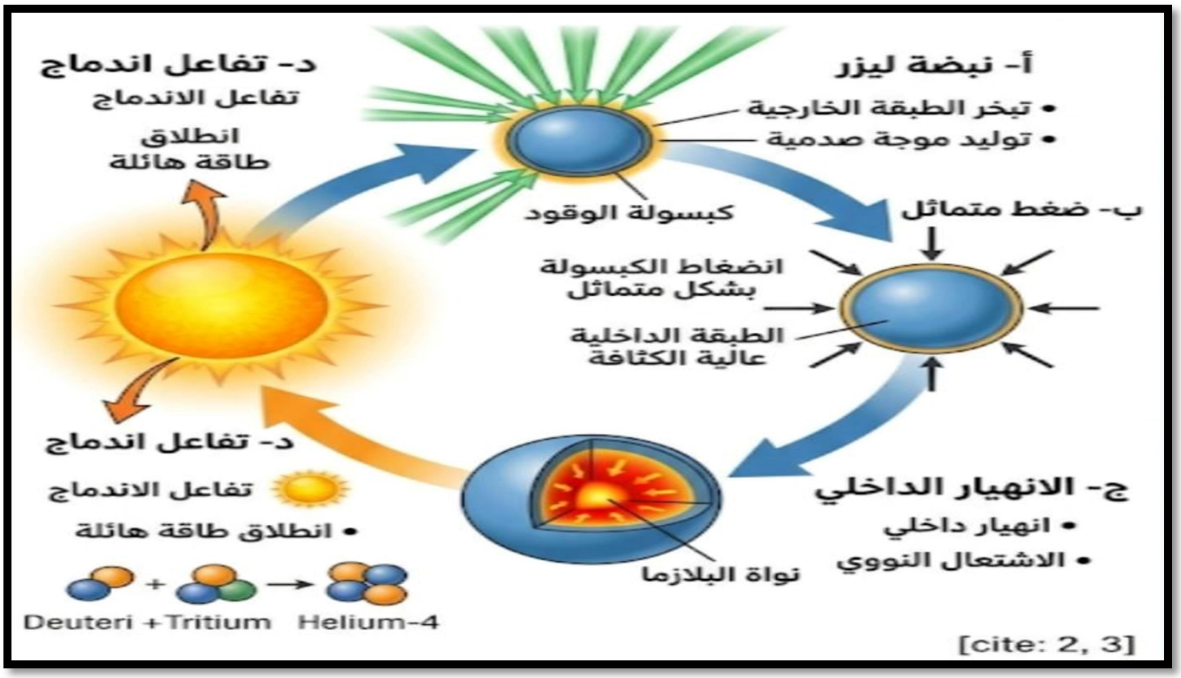
٢-٣-٣ مرفق الإشعال الوطني

أبرز مشروع في هذا المجال هو National Ignition Facility، الذي أعلن عام ٢٠٢٢ تحقيق كسب طاقي لحظي أكبر من الواحد في تجارب الليزر [٢٠].

٢-٣-٤ التحديات الفيزيائية

١. صعوبة تحقيق ضغط متماثل بالكامل
٢. عدم استقرار رايلي–تايلور
٣. انخفاض كفاءة تحويل طاقة الليزر إلى طاقة ضغط

رغم تحقيق اشتعال تجريبي، لا تزال كفاءة الدورة الكلية منخفضة [١٨].



الشكل (٢-٢)، يوضح رحلة الاندماج بالحصر القصور من نبضة الليزر إلى الاشتعال النووي (Ignition).[١٤]

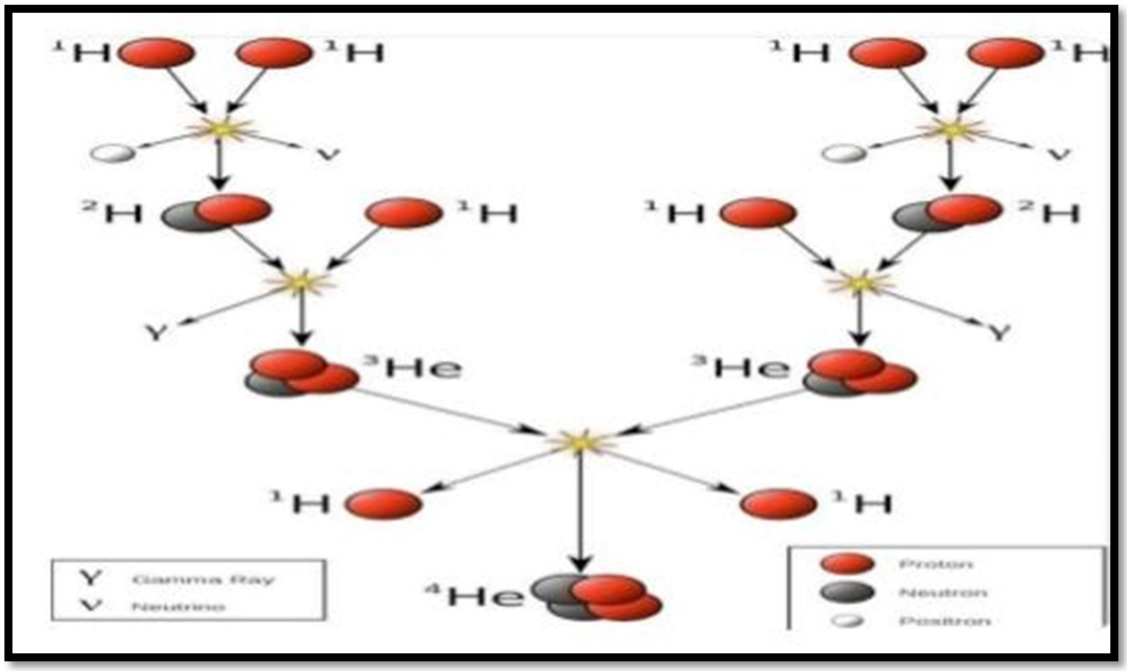
٢-٤ الاندماج الطبيعي في النجوم

في النجوم يتحقق الاندماج بفعل ضغط الجاذبية الهائل. في مركز الشمس تصل درجة الحرارة إلى نحو 1.5×10^7 كلفن [١٠].

التفاعل السائد هو سلسلة البروتون–بروتون، التي تنتهي بتكوين الهيليوم-٤ وتحرير طاقة كلية تقارب $26.7\ MeV$. لكل دورة اندماجية. كما في الشكل (٢-٣).

الفرق الفيزيائي الأساسي يتمثل في:

١. النجوم تعتمد على الاحتواء الثقالي.
٢. المفاعلات الأرضية تعتمد على الاحتواء المغناطيسي أو القصوري.



الشكل (٢-٣): مخطط "سلسلة بروتون-بروتون" (Proton-Proton Chain)، التي توضح كيفية اندماج أنوية الهيدروجين لإنتاج الهيليوم وانطلاق الطاقة والنيوترينو داخل باطن النجوم.[١٠]

٢-٥ مقارنة فيزيائية بين الحصر المغناطيسي والحصر القصوري والاندماج النووي في النجوم:

الجدول (٢-١): مقارنة خصائص الحصر المغناطيسي والحصر القصوري والاندماج النجمي.[

العامل	الحصر المغناطيسي	الحصر القصوري	الاندماج النووي في النجوم
الكثافة	منخفضة نسبياً [٦].	عالية جداً نتيجة الانضغاط [١٤].	عالية بفعل الضغط الجذبي [٢٠].
زمن الاحتواء	طويل نسبياً (s)[٦].	قصير جداً (ns) [١٤].	طول جداً (زمن نجمي)[٢١].
درجة الحرارة	$10^8\ K \approx$ [٦].	$10^8 K \geq$ [14].	في الشمس K≈ [٢٢].
آلية الحصر	مجال مغناطيسي [٦].	ضغط قصوري لحظي[١٤].	الجاذبية الذاتية [٢١].
نمط التشغيل	مستمر/شبه مستمر [٦].	لحظي [١٤].	مستمر ذاتي التنظيم [٢٢].
الاستقرار	تحديات عدم الاستقرار MHD [٣].	يعتمد على تماثل الانضغاط [٤].	توازن هيدروستاتيكي [٢١].

الفصل الثالث

تطبيقات الاندماج النووي في الطاقة المستدامة

٣-١ تطبيقات الاندماج النووي في الطاقة المستدامة

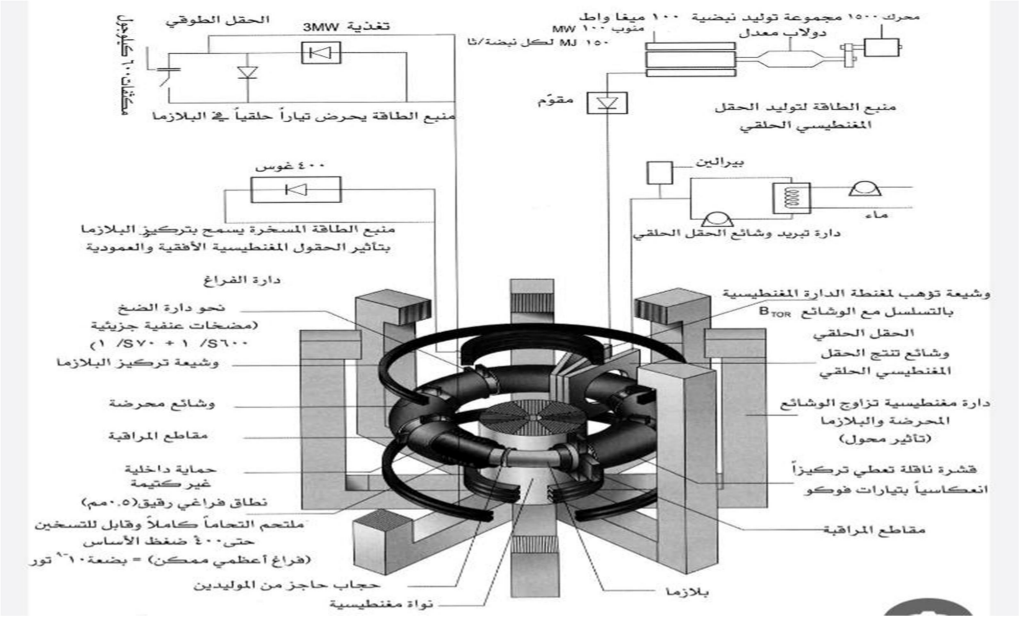
على الرغم من تنوع تطبيقات الاندماج النووي، إلا أنها تشترك جميعاً في اعتمادها على الطاقة العالية الناتجة عن التفاعلات النووية، والتي يمكن تحويلها إلى أشكال مختلفة مثل الطاقة الحرارية أو الحركية أو الإشعاعية، مما يعكس مرونة هذا المصدر الطاقي وإمكانية توظيفه في مجالات متعددة.

٣-١-١ أنتاج الكهرباء القطبية

يُستخدم الاندماج النووي لإنتاج الطاقة الكهربائية عن طريق تحويل الطاقة الناتجة تمر عملية تحويل الطاقة في مفاعل الاندماج بعدة مراحل فيزيائية مترابطة، إذ تبدأ بطاقة الاندماج النووي الناتجة عن تفاعل الديوتيريوم–التريتيوم، والتي تتحول إلى طاقة حركية للنيوترونات عالية السرعة. تنتقل هذه الطاقة إلى جدران المفاعل فتتحول إلى طاقة حرارية، تُستخدم لتسخين وسيط ناقل للحرارة مثل الماء أو الهيليوم. بعد ذلك يتحول الماء إلى بخار عالي الضغط يقوم بتدوير التوربينات، التي تُشغّل المولدات الكهربائية لإنتاج الطاقة الكهربائية. من اندماج نوى الهيدروجين إلى حرارة، ثم تحويل هذه الحرارة إلى كهرباء عبر توربينات، مثل المحطات الحرارية التقليدية، ولكن دون إنتاج نفايات إشعاعية طويلة الأمد [٢٣].

١- مفاعلات التوكاماك والستيلاريتور:

تعتمد هذه المفاعلات على الحصر المغناطيسي للبلازما عند درجات حرارة عالية جدًا، حيث تُدمج نوى الديوتيريوم والتريتيوم لإنتاج طاقة حرارية ضخمة. تُحوّل هذه الطاقة إلى بخار يدير التوربينات لتوليد الكهرباء، بينما يضمن تصميم التوكاماك مجالًا مغناطيسيًا حلقيًا ومجالًا قطبيًا ناجمًا عن تيار البلازما لتثبيت البلازما، ويعتمد الستيلاراتور على تشكيل هندسي معقد للمجالات المغناطيسية دون الحاجة إلى تيار بلازما داخلي، مما يقلل عدم الاستقرار ويتيح تشغيل البلازما لفترات أطول [٢٣].



الشكل (٣-١)، مخطط لجهاز التوكاماك يوضح مراحل تحويل الطاقة في مفاعل الاندماج النووي.

المصدر: الموسوعة العربية

٢- المفاعلات الشمسية الصناعية (Artificial Sun Reactors):

مثل مفاعل "EAST" الصيني، يحاكي اندماج الشمس الطبيعي، حيث يحافظ على البلازما فائقة الكثافة ودرجة الحرارة لفترات طويلة، ما يسمح بتحويل الطاقة الحرارية الناتجة إلى كهرباء بشكل مستمر لشبكات الطاقة، ويعمل بمثابة "شمس صناعية" اصطناعية [٢٤].

٣- استخدام الحرارة الصناعية في التطبيقات الثقيلة:

يمكن استغلال الحرارة الناتجة عن اندماج النوى مباشرة في الصناعات الثقيلة، مثل الزجاج، الأسمنت، الصلب، الأمونيا، والهيدروجين، إلى جانب توليد الكهرباء، مما يزيد من كفاءة استخدام الطاقة [٢٣].

٤- إمكانية توليد الكهرباء في المناطق القطبية:

تشير التقارير إلى أن بعض المفاعلات الحديثة، خاصة المفاعلات الصغيرة باستخدام الموصلات الفائقة، يمكنها العمل في المناطق القطبية لتوليد كهرباء مستقلة دون الحاجة إلى بنية تحتية كبيرة أو وقود أحفوري، ما يفتح آفاقًا جديدة لتوزيع الطاقة الكهربائية في بيئات نائية [٢٣].

٣-١-٢ تحلية المياه

يمكن استخدام الطاقة الناتجة عن الاندماج النووي في تحلية مياه البحر لتوفير مصادر مستدامة للمياه العذبة، إذ تُعد تحلية المياه من التقنيات التي تستهلك كميات كبيرة من الطاقة، لذلك فإن الاعتماد على مصادر طاقة واسعة النطاق وخالية من الكربون مثل الطاقة النووية يمثل خيارًا فعالًا لمواجهة أزمة المياه العالمية. حيث يمكن للمفاعلات النووية أن تؤدي دورًا مزدوجًا يتمثل في إنتاج الكهرباء منخفضة الانبعاثات وتوفير الحرارة اللازمة لعمليات التحلية. وتُستخدم الطاقة الحرارية أو الكهربائية الناتجة عن المفاعلات في إزالة الأملاح والمعادن من مياه البحر عبر تقنيات مختلفة مثل التقطير الحراري أو الفصل بالأغشية كالتناضح العكسي. كما يمكن الاستفادة من هذه التقنية في الدول الساحلية والمناطق القاحلة وشبه القاحلة التي تعاني نقصًا في المياه العذبة، إذ توفر التحلية النووية مصدرًا مستدامًا للمياه مع تقليل الانبعاثات الكربونية وتحقيق تكلفة تنافسية مقارنة بالطرق التقليدية المعتمدة على الوقود الأحفوري [٢٥].

ويعود السبب الفيزيائي في كفاءة الاندماج النووي في هذا المجال إلى قدرته على إنتاج كميات كبيرة من الطاقة الحرارية بشكل مستمر وبدون انبعاثات كربونية، مما يجعله أكثر استدامة مقارنة بالمصادر التقليدية المعتمدة على الوقود الأحفوري، خاصة في المشاريع واسعة النطاق.

٣-١-٣ الرحلات الفضائية

يُعدّ الاندماج النووي من التقنيات الواعدة التي يمكن أن تُحدث تحولًا كبيرًا في مجال استكشاف الفضاء والرحلات الفضائية بعيدة المدى. ويُفسَّر ذلك فيزيائياً بما يُعرف بكثافة الطاقة العالية لتفاعلات الاندماج، إذ يمكن لكمية صغيرة جداً من الوقود أن تنتج طاقة هائلة مقارنة بأنظمة الدفع الكيميائي التقليدية. وهذا يقلل من كتلة الوقود المطلوبة ويزيد من كفاءة الدفع، وهو عامل حاسم في الرحلات الفضائية بعيدة المدى.

إذ تمتلك أنظمة الدفع المعتمدة على الاندماج النووي القدرة على توفير طاقة عالية وكفاءة كبيرة مقارنة بوسائل الدفع التقليدية، مما يتيح للمركبات الفضائية السفر لمسافات طويلة وبسرعات أكبر. كما أن هذه الأنظمة توفر اندفاعًا نوعيًا مرتفعًا وكتلة وقود أقل، الأمر الذي يسهم في تقليل زمن الرحلات إلى الكواكب البعيدة وإتاحة إمكانية حمل حمولات أكبر من المعدات العلمية والموارد الضرورية للمهمات الفضائية الطويلة. وتشير الدراسات إلى أن أنظمة الدفع الاندماجي يمكن أن تجمع بين وظيفتين أساسيتين في المركبة الفضائية، هما توليد الطاقة وتشغيل نظام الدفع في الوقت نفسه، مما يجعلها خيارًا مستدامًا وفعالًا للبعثات الفضائية العميقة. فبفضل الطاقة الكبيرة الناتجة عن تفاعلات الاندماج، يمكن للمركبة الفضائية الاستمرار في العمل لفترات طويلة دون الحاجة إلى كميات كبيرة من الوقود، إضافة إلى أن هذه التقنية تنتج كميات قليلة من النفايات المشعة مقارنة بالتقنيات النووية الأخرى [٢٦].

كما عملت وكالة الفضاء الأمريكية NASA على تطوير مفاهيم لأنظمة دفع فضائية تعتمد على الاندماج النووي، حيث أظهرت الدراسات أن استخدام مفاعلات اندماجية مع فوهات مغناطيسية يمكن أن يوفر مستويات دفع متوسطة إلى عالية ناتجة عن بلازما العادم، مما يسمح بإرسال بعثات مأهولة إلى الكواكب الخارجية خلال فترة زمنية أقل من عام. وقد شملت هذه الدراسات تصميمات مفاهيمية كاملة لمركبات فضائية مزودة بأنظمة طاقة اندماجية قادرة على توفير الطاقة اللازمة للدفع وتشغيل الأنظمة الحيوية للمركبة خلال الرحلات الطويلة في الفضاء السحيق. وبناءً على ذلك، يُنظر إلى الاندماج النووي على أنه أحد الحلول المستقبلية المهمة لتحقيق طاقة مستدامة للرحلات الفضائية، إذ يمكن أن يساهم في توسيع نطاق الاستكشاف الفضائي وتمكين البعثات طويلة الأمد إلى الكواكب والأجرام السماوية البعيدة مع تقليل استهلاك الوقود وزيادة كفاءة أنظمة الدفع الفضائي [٢٧].

٣-١-٤ انتاج النظائر التي تستخدم في الاغراض الطبية

تُعدّ النظائر المشعة من العناصر الأساسية في مجالات الطب النووي، إذ تُستخدم على نطاق واسع في التشخيص الطبي والعلاج الإشعاعي للأورام. ويمكن إنتاج هذه النظائر باستخدام مصادر النيوترونات الناتجة عن تفاعلات الاندماج النووي في مولدات النيوترونات المدمجة. تتم هذه العملية عبر تفاعل النيوترونات الناتجة من الاندماج مع أنوية مستقرة، حيث يؤدي امتصاص النيوترون إلى تحويل النواة إلى حالة غير مستقرة (نظير مشع)، والذي يتحلل لاحقاً بإصدار إشعاعات تُستخدم في التشخيص أو العلاج الطبي.

حيث توفر هذه المولدات تدفقًا عاليًا من النيوترونات بطاقة تتراوح بين النيوترونات الحرارية وحتى نحو ١٤ ميغا إلكترون فولت، مما يسمح بإحداث تفاعلات نووية تؤدي إلى إنتاج نظائر مشعة مفيدة طبيًا. وقد أظهرت الدراسات أن استخدام تفاعل الديوتيريوم مع الليثيوم-٧ يمكن أن ينتج نيوترونات عالية الطاقة بكفاءة جيدة، الأمر الذي يتيح إمكانية إنتاج كميات عملية من النظائر المشعة الطبية باستخدام مولدات نيوترونات صغيرة الحجم.

ومن بين أهم النظائر التي يمكن إنتاجها بهذه الطريقة الموليبدينوم-٩٩ (Mo-99) الذي يتحلل ليعطي التكنيتيوم-٩٩m المستخدم على نطاق واسع في إجراءات التصوير الطبي التشخيصي، إضافة إلى الأكتينيوم-٢٢٥ (Ac-225) الذي يُصدر جسيمات ألفا ويُستخدم في العلاج الإشعاعي الموجه للخلايا السرطانية. كما يمكن إنتاج نظائر أخرى مثل النحاس-٦٤ (Cu-64) والنحاس-٦٧ (Cu-67) التي تُستخدم في تقنيات التصوير المقطعي بالإصدار البوزيتروني (PET) وبعض تطبيقات العلاج الإشعاعي. وتشير التقديرات إلى إمكانية إنتاج نشاط إشعاعي يتراوح بين مئات إلى آلاف الميغابيكريل من هذه النظائر باستخدام مولد نيوترونات مدمج عالي التدفق، مما يجعل هذه التقنية خيارًا واعدًا لتوفير النظائر الطبية دون الاعتماد الكامل على مفاعلات الانشطار النووي التقليدية [٢٨].

٣-١-٥ مصادر الوقود الاندماجي (مثل الديوتيريوم و التريتيوم)

تُعد وقود الاندماج في مفاعل ITER من أبسط العناصر الخفيفة، ويشمل نظائري الهيدروجين الديوتيريوم (D) والتريتيوم (T). يُستخلص الديوتيريوم من مياه البحر، حيث يحتوي كل متر مكعب من مياه البحر على حوالي ٣٣ غرامًا منه، وهو متوفر بكثرة وغير ضار بيئيًا، ويُشكل نصف كمية الوقود في تفاعل الاندماج D-T. أما التريتيوم فهو نظير مشع للهيدروجين يوجد بكميات ضئيلة جدًا في الطبيعة، ولكنه يُنتج داخل المفاعل عن طريق تفاعل النيوترونات الناتجة من البلازما مع الليثيوم الموجود في بطانة التوكاماك، وفق المعادلة:

$$6Li + n + 3H + 4H + 4.8\ Mev \dots\dots\dots (1-3)$$

حيث أن:

- Li *يمثل نظير الليثيوم-٦ ، وهو أحد نظائر الليثيوم المستقرة.*
- n *هو النيوترون الحر.*
- *الناتج هو تريتيوم* $3H$ *وذرة هيليوم* $4H$ *مع إطلاق طاقة ~٤.٨ ميغا إلكترون فولت (MeV).*

تتم إدارة الوقود ضمن دورة مغلقة، حيث لا تتجاوز كمية الوقود الفعلي في وعاء التفريغ الواحد ١ غرام. يُدخل الوقود إلى الحجرة على شكل غاز منخفض الكثافة أو ككريات جليدية صغيرة، تساعد على التحكم في كثافة البلازما واستقرارها، بالإضافة إلى التحكم في أنماط الحافة الموضعية (ELMs). كما يتم إعادة تدوير الوقود غير المستهلك وعادم البلازما، الذي يحتوي على رماد الهيليوم وشوائب أخرى، عبر محطة التريتيوم داخل مجمع التوكاماك، حيث يتم استخلاص التريتيوم وإعادة حقنه ضمن دورة الوقود، لضمان استمرارية التشغيل بكفاءة عالية [٢٩].

الاستنتاج

من خلال هذه الدراسة، يتضح أن الاندماج النووي يمثل أحد أهم الحلول المستقبلية لمشكلة الطاقة العالمية، لما يتميز به من كفاءة عالية وقلة التأثيرات البيئية. أظهرت النتائج أن تحقيق هذه التفاعلات يتطلب شروطًا فيزيائية معقدة ومعيار لاوسون لضمان استمرارية التفاعل، كما تبين أن تفاعل الديوتيريوم والتريتيوم هو الأكثر ملاءمة للتطبيقات العملية.

تؤكد الدراسة أن تقنيات الحصر المغناطيسي تعد الأكثر تقدماً حالياً، بينما يظل التحدي الأكبر متمثلاً في استقرار البلازما لفترات كافية وضمان كفاءة الطاقة الناتجة مقارنة بالمستهلكة. وبناءً على ذلك، نوصي بزيادة الاستثمار في أبحاث المواد المتقدمة المقاومة للإشعاع، واستخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي لتحسين التحكم بالبلازما.

وفي الختام، يمثل الاندماج النووي أملاً حقيقياً لتحقيق طاقة نظيفة ومستدامة، وسيكون بلا شك أحد الأعمدة الأساسية لمنظومة الطاقة في العقود القادمة.

المصادر

[1] A. Einstein, “Does the Inertia of a Body Depend Upon Its Energy Content?,” Annalen der Physic, vol. 18, pp. 639–641, 1905.

[2] J. D. Jackson, Classical Electrodynamics, 3rd ed. New York, NY, USA: Wiley, 1999.

[3] F. F. Chen, Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion, 3rd ed. Cham, Switzerland: Springer, 2016.

[4] K. S. Krane, Introductory Nuclear Physics. New York, NY, USA: Wiley, 1987.

[5] B. R. Martin, Nuclear and Particle Physics: An Introduction, 2nd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2009.

[6] J. Wesson, Tokamaks, 4th ed. Oxford, U.K.: Oxford University Press, 2011.

[7] J. P. Freidberg, Plasma Physics and Fusion Energy. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 2007.

[8] R. J. Goldston and P. H. Rutherford, Introduction to Plasma Physics. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 1995.

[9] M. Kikuchi, K. Lackner, and M. Q. Tran, Fusion Physics. Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency (IAEA), 2012.

[10] J. Lawson, “Some Criteria for a Power Producing Thermonuclear Reactor,” Proceedings of the Physical Society B, vol. 70, pp. 6–10, 1957.

[11] M. Shimada et al., “Chapter 1: Overview and Summary,” Nuclear Fusion, vol. 47, S1–S17, 2007.

[12] D. A. Gurnett and A. Bhattacharjee, Introduction to Plasma Physics. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 2005.

[13] P. A. Davidson, An Introduction to Magneto hydrodynamics. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 2001.

[14] F. Troyon et al., “MHD Limits to Plasma Confinement,” Plasma Physics and Controlled Fusion, vol. 26, pp. 209–215, 1984.

[15] JET EFDA Contributors, “Fusion Energy Production from a Deuterium–Tritium Plasma,” Nuclear Fusion, vol. 32, pp. 187–203, 1992.

[16] ITER Organization, “ITER Project Overview,” 2025.

[17] Max Planck Institute for Plasma Physics, “Wendelstein 7-X Stellarator,” Greifswald, Germany, 2024.

[18] O. A. Hurricane et al., “Fuel Gain Exceeding Unity in an Inertially Confined Fusion Implosion,” Nature, vol. 506, pp. 343–348, 2014.

[19] S. Glasstone and R. H. Lovberg, Controlled Thermonuclear Reactions. Princeton, NJ, USA: Van Nostrand, 1960.

[20] U.S. Department of Energy, “National Ignition Facility Achieves Fusion Ignition,” 2022.

[21] D. J. Griffiths and D. F. Schroeter, Introduction to Quantum Mechanics, 3rd ed. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 2018. (لتفسير تأثير النفق الكمي في النجوم)

[22] C. E. Rolfs and W. S. Rodney, Cauldrons in the Cosmos: Nuclear Astrophysics. Chicago, IL, USA: University of Chicago Press, 1988.

[23] M. Abdel sand, “ تقنية الاندماج النووي تمهد لثورة الكهرباء النظيفة التجارية،” الطاقة، ١٥-٠٣-٢٠٢٤.

[٢٤] “ما هو الاندماج النووي؟.. جهود عالمية لتوليد كهرباء لا تنضب،” الطاقة، ٠٨-٠٣-٢٠٢٦.

[25] O. Yusuf, “Harnessing Nuclear Power in Water Desalination to Ensure Fresh Water Resources,” IAEA Bulletin, vol. 64, no. 3, Sep. 2023.

[26] ITER Organization, ITER Technical Reports, Saint-Paul-lès-Durance, France: ITER Organization, 2024–2025.

[27] International Atomic Energy Agency (IAEA), Fusion Energy Progress Report, Vienna, Austria: IAEA, 2023.

[28] Nature Physics, “Recent Advances in Fusion Energy,” London, U.K.: Springer Nature, 2024.

[29] Nuclear Fusion, “Progress in Tokamak Research,” Bristol, U.K.: IOP Publishing, 2025.