مجلة الاتحاد العربي
للنشر العلمي

الإصدار الخامس والعشرين

المجلد (٧) العدد (١)

(١- ١٦) ٢٠٢٦

# تحسين كفاءة المفاعلات الصغيرة المعيارية باستخدام خوارزميات الذكاء الاصطناعي للتنبؤ بالأعطال المبكرة

**د.م/ خالد غيث القزيري**
(عضو لدى الوكالة الدولية للطاقة الذرية)

تاريخ النشر: نُشر إلكترونياً بتاريخ ١ يناير ٢٠٢٦ م

**الملخص :**
تركز الدراسة على تطبيق تقنيات الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي لتحسين أنظمة التحكم والمراقبة وتبحث هذه الدراسة في إمكانات المفاعلات النووية المعيارية الصغيرة (SMRs) في إنتاج كهرباء نووية آمنة وفعالة من خلال دراسة بيانات تشغيل المفاعل، مثل درجة الحرارة والضغط ومعدلات التدفق، تسعى الدراسة إلى إنشاء نموذج تنبؤ بالأعطال المبكرة من خلال تحديد الشذوذ المحتمل قبل حدوثه ومن خلال تقليل فترات التوقف غير المجدولة، وتعزيز موثوقية التشغيل، وتحسين أداء المفاعل من حيث الكفاءة والسلامة، تُسهّل هذه الطريقة الانتقال من الصيانة التقليدية إلى الصيانة التنبؤية.
تُظهر نتائج الدراسة أن دمج الذكاء الاصطناعي في أنظمة المراقبة يزيد من الكفاءة التشغيلية، ويُمكّن من الصيانة التنبؤية، ويُقلل من الحاجة إلى التدخل البشري المباشر، ويُحسّن المرونة في ظروف التشغيل المتغيرة ولضمان أفضل استخدام ممكن لهذه التقنيات، وبالتالي المساهمة في تحسين السلامة النووية، بالإضافة إلى زيادة استقرار وكفاءة المفاعلات النووية المعيارية الصغيرة في المستقبل، تُشدد التوصيات على أهمية زيادة استخدام الذكاء الاصطناعي، وتحسين جمع البيانات، وتدريب الكوادر الفنية، ودعم البحث والتطوير.

**الكلمات المفتاحية :**
( المفاعلات الصغيرة المعيارية (SMRs)، تحسين الكفاءة التشغيلية، التنبؤ بالأعطال المبكرة، الذكاء الاصطناعي، التعلم الآلي)

**Abstract:**
This study focuses on applying artificial intelligence (AI) and machine learning (ML) technologies to improve control and monitoring systems. It explores the potential of small modular reactors (SMRs) in producing safe and efficient nuclear electricity. By analyzing reactor operating data, such as temperature, pressure, and flow rates, the study aims to develop an early fault prediction model. This model identifies potential anomalies before they occur, reduces unscheduled downtime, enhances operational reliability, and improves reactor performance in terms of efficiency and safety. This approach facilitates the transition from traditional to predictive maintenance.
The study's findings demonstrate that integrating AI into monitoring systems increases operational efficiency, enables predictive maintenance, reduces the need for direct human intervention, and improves resilience under varying operating conditions. To ensure the optimal use of these technologies, thereby contributing to enhanced nuclear safety and increasing the stability and efficiency of SMRs in the future, the recommendations emphasize the importance of expanding the use of AI, improving data collection, training technical personnel, and supporting research and development.

**Keywords:**
(Standardized small reactors (SMRs), improving operational efficiency, early fault prediction, artificial intelligence, machine learning)

**المقدمة:**
حظيت المفاعلات النووية المعيارية الصغيرة (SMRs) باهتمام كبير كوسيلة محتملة لتلبية احتياجات العالم المتزايدة من الطاقة وخفض انبعاثات غازات الاحتباس الحراري وبالمقارنة مع المفاعلات التقليدية حيث تتميز هذه المفاعلات بقدرتها على التكيف وانخفاض تكلفتها نظرًا لمزاياها وهي خيار جيد للدول التي تسعى إلى إنشاء مصادر طاقة موثوقة ومستدامة نظرًا لانخفاض تكاليف رأس المال، وتحسين إجراءات السلامة، والمرونة في مجموعة متنوعة من البيئات وتُعد مفاعلات الماء الخفيف (LWRs)، والمفاعلات المبردة بالمعادن السائلة (LMRs)، ومفاعلات الملح المنصهر (MSRs)، والمفاعلات المبردة بالغاز (GCRs) الأنواع الرئيسية من تصاميم المفاعلات النووية المعيارية الصغيرة ويتميز كل نوع بخصائص تشغيلية وتقنية فريدة تؤثر على فعاليته وسلامته وإدارة مخاطره التشغيلية ونظرًا لهذا التنوع التكنولوجي وهناك حاجة إلى أدوات تحليلية متطورة يمكنها فهم السلوك الديناميكي لهذه المفاعلات وتوقع المشكلات قبل حدوثها ومن بين أهم التقنيات المعاصرة التي يمكن دمجها في أنظمة التحكم والمراقبة لزيادة الكفاءة والسلامة خوارزميات الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي ويمكن لهذه الخوارزميات تحسين الأداء العام للمفاعلات النووية المعيارية الصغيرة (SMRs) من خلال تقليل فترات التوقف غير المخطط لها وزيادة الموثوقية من خلال تحليل البيانات التشغيلية، واكتشاف أي تشوهات، والتنبؤ بالأعطال

المبكرة ولتعزيز جاهزية المفاعلات النووية المعيارية الصغيرة كبديل مستدام وفعال لإنتاج الطاقة في المستقبل وتهدف هذه الدراسة إلى تقديم نظرة تحليلية شاملة لأنواع مختلفة من المفاعلات النووية المعيارية الصغيرة، مع التركيز على كيفية مساهمة الذكاء الاصطناعي في تحسين أنظمة التحكم، وزيادة الكفاءة التشغيلية، وإنشاء نماذج تنبؤية دقيقة للأعطال المبكرة.

ولقد تطورت تقنيات الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي بسرعة كبيرة مما جعل من الممكن دمجها في أنظمة التحكم والمراقبة في المفاعلات النووية المعيارية الصغيرة لتحسين الكفاءة التشغيلية وتقليل احتمالية الأعطال غير المتوقعة ويدعم التحول من الصيانة التقليدية إلى الصيانة التنبؤية خوارزميات حديثة تتيح التحليل الفوري لكميات هائلة من البيانات التشغيلية وتحديد الأنماط الشاذة والتنبؤ بالعيوب قبل ظهورها بالإضافة إلى زيادة الفعالية التشغيلية وتقليل فترات التوقف غير المجدولة وقد يُعزز هذا الجمع بين التكنولوجيا النووية والذكاء الاصطناعي قبول المفاعلات كمصدر طاقة موثوق وفعال للمستقبل ونظرًا لهذه الأهمية قد يهدف هذا البحث إلى تطوير نماذج للتنبؤ المبكر بالأعطال وإظهار كيف يُمكن لخوارزميات الذكاء الاصطناعي تحسين السلامة والموثوقية التشغيلية مع تحليل وتقييم دور هذه الخوارزميات في زيادة كفاءة المفاعلات المعيارية الصغيرة (SMRs) ولتسهيل دمج تقنيات الذكاء الاصطناعي على نطاق أوسع في أنظمة الطاقة النووية المعاصرة وتتناول الدراسة أيضًا الفرص والصعوبات التي ينطوي عليها تطبيق هذه التقنيات في هذا المجال الحيوي.[1]

وقد يتزايد اهتمام العالم حاليًا بمفاعلات الطاقة الصغيرة والمتوسطة الحجم ووفقًا لتصنيف الوكالة الدولية للطاقة الذرية وتُعرف هذه المفاعلات بـ SMR وقد تم اختيار نوع خاص منها ويُعرف باسم المفاعلات المعيارية الصغيرة وتطويره في مشاريع البحث والتطوير الجديدة للدول الصناعية وليتم إنشاؤها عالميًا بسهولة وسرعة من خلال نشرها المعياري وقد تُعرف هذه المفاعلات أيضًا بـ SMR وتتوفر العديد من الوثائق التي قد تُفيد الأبحاث ذات الصلة وطُوّرت مفاعلات الطاقة الصغيرة والمتوسطة الحجم (SMRs) على نطاق واسع بمفاهيم وتصاميم مُتنوعة لاستخدامها في المناطق المحلية أو المُقيدة أو المُتنقلة، وخاصةً في الدول النامية (من قِبل الدول الصناعية) كما طُوّرت تصاميم مُتنوعة وإجراءات سلامة مُختلفة.

وقد تهدف إلى النشر على المديين القصير والطويل كما تُغطي المفاهيم والتصاميم الجديدة طيفًا مُوسعًا من منتجات الطاقة (بما في ذلك الوقود النظيف مثل الهيدروجين والمنتجات البترولية مثل البنزين)، ومياه الشرب، وتطبيقات التدفئة الثانوية للتدفئة المنزلية وهناك العديد من المخاوف التي تُثيرها مفاعلات الطاقة الصغيرة والمتوسطة الحجم فيما يتعلق بالسلامة والتكنولوجيا الواضحة والقدرة التنافسية الاقتصادية لمعالجة هذه المشاكل وإيجاد طريقة لموازنة تكاليف التصميم والبناء والصيانة مع إيراداتها ومزاياها ولا بد من إيجاد حلول إبداعية وقد تُركّز التصاميم الحديثة والمتطورة لمفاعلات الطاقة الصغيرة (SMRs)، مثل CAREM و MASLWR NUSCALE وIRIS، بشكل أكبر على تدابير السلامة السلبية والجوهريّة وتتضمنها وتجدر الإشارة إلى أن هذه الفكرة المبتكرة تحتاج إلى دراسة واختبار جدّيين كما تكشف الفحوصات الأكثر شمولاً لنظام إزالة الحرارة السلبية ذات الضغط الذاتي الكامل باستخدام الحمل الحراري الطبيعي عن بعض حالات عدم الاستقرار وعند إدخال المزيد من خطوط الأنابيب متعددة الاستخدامات إلى المحطات قد تصبح هذه المشكلات التشغيلية والقائمة على استخدام

[1] Locatelli, G., Bingham, C., & Mancini, M. (2014). Small modular reactors: A comprehensive overview of their economics and strategic aspects. *Progress in Nuclear Energy*, *73*, p ،75-85.

معايير السلامة السلبية المستقبلية أكثر تعقيدًا بكثير أو حتى تُحل ومع ذلك طُوّرت بعض التصاميم، مثل MASLWR كمفاعلات معيارية صغيرة متعددة التطبيقات ومن حيث عائد الاستثمار (ROI)، فقد تكون هذه المحطات متعددة الأغراض أكثر فعالية من حيث التكلفة (معهد ROL، ٢٠١٤). ومن حيث وفورات الحجم قد تكون هذه السمات نموذجية للأنماط التنافسية مع مفاعلات الماء المضغوط الكبيرة.[٢]

**مشكلة الدراسة**

تُعدّ صعوبة توقع الأعطال المبكرة عائقًا رئيسيًا أمام تحقيق أعلى مستويات الموثوقية والسلامة التشغيلية وعلى الرغم من أن المفاعلات النووية المعيارية الصغيرة (SMRs) تُعدّ من أهم التوجهات المعاصرة في مجال الطاقة النووية نظرًا لكفاءتها العالية وتطورها في السلامة ومرونة تشغيلها ويمكن أن تؤدي الأعطال غير المتوقعة حتى الصغيرة منها إلى إغلاقات مفاجئة وانخفاض في الإنتاج وارتفاع في نفقات الصيانة ومخاطر أخرى مرتبطة بالعمليات النووية وقد ازدادت إمكانية تطبيق نماذج التعلم الآلي والشبكات العصبية لتقييم مجموعات البيانات التشغيلية الضخمة وتوقع الانحرافات قبل الأعطال مع التطورات الملحوظة في تقنيات الذكاء الاصطناعي ومع ذلك لا يزال استخدام هذه التقنيات في بيئة المفاعلات النووية المعيارية الصغيرة محدودًا وغير مُستغل بالشكل الكافي مما يثير مشكلة جوهرية و عدم وجود نظام تنبؤ ذكي وفعال قادر على تعزيز كفاءة المفاعلات من خلال الكشف المبكر عن الأعطال المحتملة قبل حدوثها وهذا يُؤكد على ضرورة إجراء بحث علمي في استخدام خوارزميات الذكاء الاصطناعي لتحسين فعالية التشغيل وتقليل خطر الأعطال في هذه المفاعلات المعاصرة.

**السؤال الرئيسي للدراسة هو:** إلى أي مدى يمكن أن يساعد استخدام خوارزميات الذكاء الاصطناعي المفاعلات النووية المدمجة النموذجية على العمل بكفاءة أكبر من خلال توقع المشاكل في وقت مبكر وخفض احتمالية الإغلاق غير المجدول؟

**تساؤلات الدراسة**

١. ما مدى كفاءة أنظمة الذكاء الاصطناعي في التنبؤ بالأعطال المبكرة في المفاعلات النووية الصغيرة المعيارية (MSRs)؟
٢. ما هي أساليب الذكاء الاصطناعي - التعلم العميق، والشبكات العصبية، والتعلم الآلي - التي تُقدم أعلى دقة في تحديد الأعطال مبكرًا؟
٣. ما هو تأثير التنبؤ المبكر بالأعطال على الأداء العام للمفاعلات النووية الصغيرة المعيارية وكفاءتها التشغيلية؟
٤. ما هي البيانات الأساسية والعناصر التشغيلية اللازمة لنجاح تدريب خوارزميات الذكاء الاصطناعي؟
٥. إلى أي مدى يُمكن للتنبؤ المبكر بالأعطال أن يزيد من استمرارية التشغيل ويُقلل من فترات التوقف غير المتوقعة؟
٦. كيف يُمكن دمج أنظمة مراقبة وتحكم المفاعلات الحالية مع نظام تنبؤ مبكر قائم على الذكاء الاصطناعي؟

[2] Hidayah, A. (2020). A review of advanced small nuclear reactors, particularly multi-power pressurized water reactors, in terms of safety features, economic issues, innovative concepts, and multi-purpose deployment. Radiation Physics and Engineering, 1(4), p. 29-53.

٧. ما هو تأثير دقة التنبؤ بالأعطال على خفض تكاليف تشغيل وصيانة المفاعلات النووية الصغيرة المعيارية؟
٨. ما هي القيود والصعوبات المحتملة التي قد تنشأ عند تطبيق خوارزميات الذكاء الاصطناعي في بيئة مفاعل نووي معياري

**فرضيات الدراسة**

**الفرضية الاولى:** بالمقارنة مع تقنيات المراقبة التقليدية ويُمكن لاستخدام خوارزميات الذكاء الاصطناعي تحسين دقة التنبؤ المبكر بالعيوب في المفاعلات الصغيرة المعيارية (MSRs).

**الفرضية الثانية:** تتمتع المفاعلات الصغيرة المعيارية بكفاءة تشغيلية واستمرارية أكبر عند اعتمادها على التنبؤ المبكر بالأعطال المدعوم بالذكاء الاصطناعي.

**الفرضية الثالثة:** يعد دمج خوارزميات الذكاء الاصطناعي في أنظمة المراقبة والتحكم الحالية، يتم تقليل مدة التوقف غير المخطط له، وتكاليف الصيانة والتشغيل.

**الفرضية الرابعة:** تتأثر دقة وفعالية خوارزميات الذكاء الاصطناعي في التنبؤ بالأعطال بشكل مباشر بجودة وشمولية البيانات التشغيلية.

**الفرضية الخامسة:** يعد تطبيق التنبؤ المبكر بالأعطال المدعوم بالذكاء الاصطناعي يمكن أن يقلل من المخاطر التشغيلية ويحسن سلامة المفاعلات الصغيرة المعيارية بشكل عام.

**أهداف الدراسة**

١. إنشاء نموذج مفيد قائم على الذكاء الاصطناعي للتنبؤ بالأعطال المبكرة للمفاعلات النووية الصغيرة المعيارية (SMR).
٢. تقييم مدى دقة أنظمة الذكاء الاصطناعي في التنبؤ بأنواع أعطال المفاعلات النووية الصغيرة المعيارية المختلفة.
٣. دراسة كيفية تأثير التنبؤ المبكر بالأعطال على استمرارية المفاعل وكفاءة تشغيله.
٤. مقارنة أداء المفاعلات القائمة على الذكاء الاصطناعي مع تقنيات الصيانة والمراقبة التقليدية.
٥. تحديد العناصر التشغيلية المؤثرة على دقة التنبؤ بالأعطال باستخدام الذكاء الاصطناعي.
٦. إطالة عمر المكونات التشغيلية من خلال تطوير خطط صيانة وقائية بناءً على نتائج التنبؤ بالأعطال.
٧. دراسة كيفية استخدام خوارزميات الذكاء الاصطناعي لخفض نفقات التشغيل ووقت التوقف غير المجدول.
٨. تقديم اقتراحات مفيدة وعلمية لتطبيق الذكاء الاصطناعي لتحسين أداء المفاعلات النووية الصغيرة المعيارية وسلامتها.

**أهمية الدراسة**

يعد الحد من المخاطر المرتبطة بالحوادث النووية والتنبؤ بالأعطال مبكرًا قد يُسهم هذا في تحسين السلامة التشغيلية للمفاعلات كما يُعزز الإنتاج من خلال تقليل فترات التوقف غير المجدولة وتعزيز الكفاءة التشغيلية وتُقلل هذه الدراسة من تكاليف التشغيل والصيانة من خلال اعتماد الصيانة الوقائية القائمة على البيانات وتُمكّن من اتخاذ قرارات مبنية على البيانات لتحسين إدارة المفاعل وتقليل الأخطاء البشرية ولذلك تُساعد هذه الدراسة قطاع الطاقة النووية على بناء أنظمة تحكم متطورة قائمة على الذكاء الاصطناعي وتُحسّن استدامة وموثوقية المفاعلات المعيارية الصغيرة وخاصةً في التطبيقات الصناعية والمدنية ويُسهم هذا العمل في نشر المعرفة المتعلقة بتطبيقات الذكاء

الاصطناعي لتحسين أداء النظام النووي وتشجيع الابتكار التكنولوجي ويُوفر أساسًا علميًا لإنشاء خوارزميات تنبؤ أكثر دقة وكفاءة في مجالات الطاقة والأنظمة الحيوية.

## الاطار النظرى

### المبحث الأول: المفاعلات الصغيرة المعيارية وكفاءة التشغيل

قد شهدت صناعة الطاقة النووية تحولاً جذرياً في اتجاهات البحث والتطبيقات خلال العشرين عاماً الماضية نظراً للطلب المتزايد على مصادر طاقة منخفضة الكربون وآمنة وموثوقة شهدت صناعة الطاقة النووية تحولاً جذرياً في اتجاهات البحث والتطبيقات خلال العشرين عاماً الماضية وتُعدّ المفاعلات النووية المعيارية الصغيرة (SMRs)، والتي تُمثّل تقدماً ملحوظاً في تصميم وتشغيل المفاعلات النووية ومن أهم التطورات الحديثة في هذا الصدد وتُعدّ هذه المفاعلات بديلاً مرغوباً للدول التي تسعى إلى تحسين أمنها الطاقي أو توفير الكهرباء للمواقع النائية والصناعات المهمة دون الحاجة إلى بنية تحتية نووية ضخمة وذلك بفضل صغر حجمها، وإمكانية إنتاجها على خطوط إنتاج موحدة وسهولة نقلها وتركيبها.

ويُعدّ التصميم الحراري والهيدروليكي، وتقنيات التبريد المُحسّنة، ومعايير السلامة السلبية، والمرونة التشغيلية التي تُوفّرها المفاعلات النووية المعيارية الصغيرة مقارنةً بالمفاعلات التقليدية الضخمة، أمثلةً قليلةً على العناصر المترابطة التي تُحدّد كفاءتها التشغيلية ولزيادة موثوقية إمدادات الطاقة، وتقليل فترات الصيانة، وتحسين الأداء، يُعدّ نوع الوقود المُستخدم، وخصائص مواد البناء، وأنظمة التحكم الآلي، عوامل بالغة الأهمية أيضاً وقد تتزايد أهمية دراسة المتغيرات المؤثرة على كفاءة تشغيل المفاعلات النووية المعيارية الصغيرة (SMRs) نتيجةً للتوجه العالمي نحو تقنيات طاقة أكثر مراعاةً للبيئة وسهلة التكامل مع الشبكات الذكية ومصادر الطاقة المتجددة ويُسهّل الفحص الدقيق لهذه المتغيرات فهم الجدوى الاقتصادية للمفاعلات النووية المعيارية الصغيرة وإمكانية انتشارها على نطاق واسع وقدرتها على دعم تحقيق أهداف التحول إلى الطاقة النظيفة وقد تهدف هذه الدراسة إلى تقديم إطار شامل لتقييم أداء المفاعلات النووية المعيارية الصغيرة ودراسة العوامل التشغيلية والهندسية الرئيسية المؤثرة على فعاليتها وتحديد مدى جاهزية هذه التقنية لتلبية الاحتياجات المستقبلية للطاقة الآمنة والمستدامة.

### أولاً: تعريف المفاعلات الصغيرة المعيارية (SMRs) وتصنيفاتها

تُعرَّف المفاعلات الصغيرة بأنها المفاعلات التي يقل مكافئ طاقتها الكهربائية عن ٣٠٠ ميغاواط وبينما تُعرَّف المفاعلات متوسطة الحجم بأنها المفاعلات التي يتراوح مكافئ طاقتها الكهربائية بين ٣٠٠ و٧٠٠ ميغاواط ويُعد هذا التعريف أساسيًا لتكنولوجيا المفاعلات المعيارية الصغيرة (SMR) ويُستخدم مصطلحا "المفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم" و"المفاعلات المعيارية الصغيرة" (SMRs) بكثرة للإشارة إلى المفاعلات التي يقل خرجها الكهربائي عن ٧٠٠ ميغاواط ويُعتبر المفاعل "الكبير" (LR) مفاعلًا ذا خرج طاقة يزيد عن ٧٠٠ ميغاواط لأغراض هذه المناقشة وتشير عبارة "المفاعل المعياري الصغير" إلى كل من البدائل النووية والمعدات والبنية التحتية الداعمة المتبقية للمحطة، بما في ذلك التوربين ومولد البخار ومرافق تخزين الوقود، عند الضرورة ويمكن زيادة إجمالي خرج الطاقة بنشر العديد من تصاميم المفاعلات المعيارية في الموقع نفسه وهناك العديد من تصاميم المفاعلات المدمجة المعيارية التي تمر حاليًا بمراحل تطوير مختلفة حول العالم.

ويمكن الاطلاع على ملخص ممتاز للميزات الجديدة لهذه المفاعلات في كتاب إنجرسول "تصاميم مفاعلات صغيرة الحجم بشكل متعمد أي تصاميم تستغل حجمها الصغير لتحقيق خصائص أداء محددة بدلًا من التوسع إلى أحجام كبيرة" وبشكل عام تتميز المفاعلات الصغيرة بخصائص جذابة وقد تشمل سهولة الاستخدام وزيادة السلامة وانخفاض التكلفة ومع ذلك نظرًا للاعتقاد السائد بأن "الأكبر هو الأفضل" أو سوء استخدام مفهوم وفورات الحجم فإنها عادةً لا تُعتبر منافسة اقتصاديًا للمفاعلات النووية الضخمة باستخدام مواد خام أكثر كفاءة والاستفادة من خصائص الأداء الأعلى للمعدات الأكبر حجمًا (مثل مولدات البخار، والمبادلات الحرارية، والمضخات، وغيرها)، وتسريع خفض تكاليف الإعداد الفريدة لأنشطة الاستثمار (مثل الترخيص، واختيار الموقع، أو الأعمال المدنية للتوصيل بشبكة النقل).[٣]

وقد تشير وفورات الحجم إلى أن التكلفة الرأسمالية المحددة (CCM) للمفاعل النووي تنخفض مع زيادة الحجم لذلك يزداد البسط (CCM) في صيغة التكلفة الرأسمالية المحددة أقل من المقام (كيلوواط/ساعة) عند زيادة الحجم والطاقة ونتيجةً لذلك توسعت أحجام المفاعلات في الدول المتقدمة الكبرى تدريجيًا على مدار الأربعين عامًا الماضية ومن بضع مئات من الميجاواط إلى ١٥٠٠ ميجاواط وأكثر ومع ذلك وكما كان الحال في الماضي لا تُطبق وفورات الحجم إلا إذا كانت المفاعلات ذات تصميم مماثل وكانت المقارنة بين المفاعلات الكبيرة والصغيرة إلا أن هذا لم يعد هو الحال إذ تختلف المفاعلات المعيارية الأصغر حجمًا اختلافًا كبيرًا عن نظيراتها الأكبر حجمًا من حيث بنيتها وخصائصها لذلك ومن السذاجة وغير المنطقي تمامًا افتراض أن مبدأ وفورات الحجم يجعل تكلفة رأس مال مفاعل أصغرأو أعلى من تكلفة مفاعل كبير ولكن السؤال الأكثر منطقية هو: "لماذا لم يُبنَ مفاعل نووي صغير خلال العقدين الماضيين؟" **هناك عدة عوامل، أهمها:**

١. يؤمن قطاع الطاقة النووية إيمانًا راسخًا باقتصاديات الحجم إلا أن الأدلة تُناقض هذا الادعاء.

٢. أي مفاعلات كبيرة من الجيل الثاني حُوّلت إلى مفاعلات ضخمة من الجيل الثالث وبشكل عام لم يُبينَ سوى عدد قليل من المفاعلات حول العالم على مدار العشرين عامًا الماضية حيث استخدم غالبية المستثمرين (خاصةً في الصين واليابان وكوريا الجنوبية) "تصاميم مُجرّبة" .

٣. يجب على المفاعلات الصغيرة تحقيق توازن بين تقليص الحجم والحلول التكنولوجية التي لا يمكن تحقيقها إلا من خلال تقليص الحجم لتحقيق القدرة التنافسية الكاملة ومن الأمثلة الشائعة على ذلك وجود وعاء متكامل مزود بمبادلات حرارية يعتمد على الدوران الطبيعي أما في المفاعلات الضخمة فلا يمكن تطبيق هذه الحلول بالكامل ووفقًا لمهندس كبير من شركة نووية كبيرة، فإن "الاستفادة القصوى من الحلول السلبية، مثل الدوران الطبيعي، تتطلب قدرًا كبيرًا من المحاكاة والبرمجة الحاسوبية"، ولذلك لم يكن ذلك ممكنًا في سبعينيات القرن الماضي ولم تكن هذه الأدوات متاحة قبل عشرين إلى ثلاثين عامًا، لذا كان استخدام مضخة (إلى جانب مضخات احتياطية) هو الخيار الوحيد ومن الناحية الهندسية ويُعد استخدام العديد من الأنابيب والمضخات لتنظيم السوائل أسهل بكثير من الاعتماد على عمليات محاكاة حاسوبية معقدة

٤. يُعد توفر رافعات الرفع الضخمة والتي أصبحت متاحة مؤخرًا، والتوحيد القياسي - وهو أيضًا مكلف من حيث موارد البرمجيات - من العوامل المساهمة في تطوير مفاعلات نووية صغيرة منخفضة التكلفة (SMRs) على وجه الخصوص وتستطيع المفاعلات النووية الصغيرة إنتاج الحرارة والمياه المحلاة وغيرها من المنتجات

[3] Locatelli, J., Bingham, S., and Mancini, M. (2014). Small modular reactors: A comprehensive overview of their economics and strategic aspects. Advances in Nuclear Energy, 73, p. 75-85.

الثانوية التي تحتاجها القطاعات الصناعية، لأنها مصممة لتكون مصنعة في المصنع، وقابلة للنقل، و/أو قابلة لإعادة التدوير.

ويعد مفاعل واحد يمكن ربطه بمفاعلات إضافية لإنشاء محطة طاقة نووية كبيرة و تصميم يتكون في الغالب من وحدات مسبقة الصنع يتم تجميعها في الموقع وعلى الرغم من استخدام المكونات أو الوحدات المصنعة في المصنع أيضًا في مفاعلات الطاقة النووية الصغيرة الحديثة (LRs)، فإن جزءًا كبيرًا من تجميع هذه المكونات في محطة تشغيلية وقد يتطلب عمالة في الموقع ونظرًا لأن المفاعلات النووية الصغيرة من المفترض أن تكون جاهزة للاستخدام بمجرد تسليمها من المصنع فإنها تتطلب القليل جدًا من التحضير في الموقع ويسلط كوزنيتسوف الضوء على هذه الميزات مشيرًا إلى أن الحجم الصغير للمفاعل يمكّن من حمله بواسطة شاحنة أو قطار أو بارجة ونشره على مقربة من المستخدم كما هو الحال في المناطق السكنية والمستشفيات والمرافق العسكرية والمجمعات.[4]

**ثانيًا: مفاعلات الملح المنصهر ودورها في تعزيز كفاءة التشغيل في المفاعلات المعيارية الصغيرة**

تُعد مفاعلات الملح المنصهر (MSRs) من أبرز التقنيات الواعدة في فئة المفاعلات النووية المعيارية الصغيرة (SMR) وبفضل خصائصها الفيزيائية والتشغيلية المميزة فهي تتمتع بالقدرة على إحداث تحول جذري في مجال الطاقة النووية مستقبلًا وتُعدّ هذه المفاعلات من أبرز المنافسين للجيل القادم من المفاعلات النووية المعيارية لما توفره من مزايا متطورة في مجالات السلامة، وإدارة النفايات، وكفاءة استهلاك الوقود، ومنع الانتشار النووي ويُعدّ التشغيل بوقود سائل مستقر ومبرد تحت ضغط منخفض، وامتلاك معامل مفاعلة حراري سالب، من أهم خصائص مفاعلات الملح المنصهر وتُتيح هذه الأسباب تحقيق درجة عالية من الاكتفاء الذاتي ولم تعد أنظمة الضغط العالي المتطورة المستخدمة في المفاعلات التقليدية ضرورية لأن التفاعل يتباطأ تلقائيًا مع ارتفاع درجة حرارة قلب المفاعل مما يُجنّب الانصهارات أو التفاعلات غير الطبيعية ولأن التشغيل تحت الضغط الجوي يُقلل من خطر الانفجار ويزيد من موثوقية التشغيل فإن مفاعلات الملح المنصهر مناسبة بشكل خاص لتطبيقات المفاعلات النووية المعيارية الصغيرة التي تتطلب تصاميم صغيرة وموثوقة وسهلة التركيب والنقل وبفضل قدرة مفاعلات MSR على إزالة نواتج الانشطار من الوقود باستمرار عبر أنظمة المعالجة الكيميائية فإنها تتفوق على المفاعلات التقليدية من حيث كفاءة الوقود والاحتراق.

وقد يُمكن تحقيق معدلات احتراق أعلى وعمر أطول للوقود بفضل ذلك ومن خلال مفاعلات مثل MSBR ويمكن لهذه المفاعلات أيضًا العمل على أنواع مختلفة من الوقود وبما في ذلك الثوريوم وهو أكثر شيوعًا من اليورانيوم وهذا يُساعد على تنويع مصادر الطاقة وتحسين أمنها وتُقدم مفاعلات MSR الكثير فيما يتعلق بمنع الانتشار النووي، فبعض تصاميمها تُصعّب إنتاج البلوتونيوم الصالح للاستخدام في الأسلحة وتُقلّل من الحاجة إلى منشآت منفصلة لإنتاج الوقود وتُساعد هذه الخصائص في المبادرات العالمية لتحسين الأمن النووي والحد من تهديدات الانتشار وتُعد السيطرة على النفايات المشعة ميزة أخرى لهذه المفاعلات فبالإضافة إلى تقليل حجم النفايات وإطالة دورة الوقود وتُمكّن الحالة السائلة للوقود من الاستخراج المباشر لنواتج الانشطار القيّمة مثل نظير الموليبدينوم-٩٩ الصناعي والطبي وقد يُحسّن هذا من الاستدامة البيئية للمفاعلات المعيارية ونظرًا لقدرتها على إنتاج طاقة آمنة

[4] Locatelli, J., Bingham, S., and Mancini, M. (2014). Small modular reactors: A comprehensive overview of their economics and strategic aspects. Advances in Nuclear Energy, 73, p. 75-85.

وفعالة ومستدامة، تُعدّ مفاعلات الملح المنصهر (MSRs) مثالًا ممتازًا على الابتكار في فئة المفاعلات المعيارية الصغيرة (SMR) ومع ذلك لتحقيق النضج التكنولوجي اللازم للاستخدام على نطاق واسع وتحسين أثرها المتوقع على سوق الطاقة العالمي ولا يزال تطوير هذه التقنية يعتمد على زيادة أنشطة البحث والتطوير.[5]

## المبحث الثاني: تطبيقات الذكاء الاصطناعي في المفاعلات النووية

شهدت صناعة الطاقة النووية تحولًا كبيرًا في اتجاهات البحث والتطبيق نظرًا للحاجة المتزايدة إلى مصادر طاقة آمنة وموثوقة ومنخفضة الكربون ومن أهم التطورات الحديثة في هذا المجال إدخال المفاعلات النووية المعيارية الصغيرة (SMRs)، والتي تُمثل تقدمًا كبيرًا في تصميم وتشغيل المفاعلات النووية وبفضل صغر حجمها، وإمكانية إنتاجها وفق خطوط إنتاج موحدة، وسهولة نقلها وتركيبها، وتُعدّ هذه المفاعلات بديلاً مرغوبًا به للدول التي تسعى إلى تعزيز أمنها الطاقي أو توفير الكهرباء للمناطق النائية والصناعات الحيوية دون الحاجة إلى بنية تحتية نووية ضخمة.

وتُحدد الكفاءة التشغيلية للمفاعلات النووية المعيارية الصغيرة (SMRs) بعدد من العوامل المترابطة بما في ذلك تقنيات التبريد المُحسّنة، ولوائح السلامة السلبية والتصميم الحراري والهيدروليكي والمرونة التشغيلية التي توفرها مقارنةً بالمفاعلات التقليدية الضخمة كما يُعدّ نوع الوقود المستخدم وخصائص مواد البناء وأنظمة التحكم الآلي عوامل بالغة الأهمية لتحسين الأداء، وتقليل فترات الصيانة، وزيادة موثوقية إمدادات الطاقة كما إن التوجه العالمي نحو تقنيات طاقة أكثر مراعاةً للبيئة، وسهلة التكامل مع الشبكات الذكية ومصادر الطاقة المتجددة وقد زاد من أهمية دراسة العوامل المؤثرة على كفاءة تشغيل المفاعلات النووية المعيارية الصغيرة (SMRs) وقد يُسهّل التحليل الدقيق لهذه العوامل فهم الجدوى الاقتصادية للمفاعلات، وإمكانية انتشارها على نطاق واسع، وقدرتها على تعزيز تحقيق أهداف التحول إلى الطاقة النظيفة وقد تهدف هذه الدراسة إلى توفير إطار شامل لتقييم أداء المفاعلات النووية المعيارية الصغيرة، ومناقشة الجوانب الهندسية والتشغيلية الرئيسية التي تؤثر على فعاليتها، وتقييم مدى جاهزية هذه التقنية لتلبية الطلب المستقبلي على الطاقة المستدامة والآمنة.

### أولاً: خوارزميات الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي في التنبؤ بالأعطال

بفضل التطورات في أنظمة الحاسوب من حيث الطاقة والمساحة والأداء حيث ازدادت شعبية تقنيات الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي خلال السنوات العشر الماضية وبدأ استخدام خوارزميات الذكاء الاصطناعي في تطبيقات متنوعة لتحقيق نتائج أفضل من التقنيات التقليدية وتشمل هذه التطبيقات كشف الوجوه والتعرف عليها في معالجة الصور، وتحليل الخدمات المصرفية والسوق، والأذرع الروبوتية في التصنيع الآلي، وتطبيقات الرعاية الصحية، والمعاملات الذكية والفعّالة في إدارة قواعد البيانات، وتطبيقات الأمن لتتبع الوجوه وتحليلها كما أن مجموعة متنامية من التطبيقات وبما في ذلك الأمن والرعاية الصحية والمركبات والطائرات ذاتية القيادة أو شبه ذاتية القيادة وتدمج أنظمة الرؤية المدمجة وفي محاولة لإحداث نقلة نوعية في مجال النقل الشخصي ويُحدث الذكاء الاصطناعي تحولات في مجالات مثل السيارات ذاتية القيادة التي تستخدم خوارزميات التعلم العميق كما يُستخدم الذكاء الاصطناعي في التطبيقات العسكرية كطائرات مقاتلة، وفي الطائرات بدون طيار ذاتية القيادة للملاحة ويُعد الذكاء

[5] Wang, Y., Chen, W., Zhang, L., Zhao, S., Gao, Y., and Dinavahi, F. (2024). Small modular reactors: an overview of modeling, control, simulation, and applications. 12, p. 39628-39650.

الاصطناعي جوهر العديد من هذه التطبيقات حيث تُمثل الدقة والكفاءة الفرق بين الحياة والموت ويُظهر هذا النمط الاهتمام المستمر بالآفاق الواعدة لأدوات الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي وتتزايد تكامل هذه الأدوات في جميع الأنظمة المدمجة أو الإلكترونية

وتُعدّ التكلفة الحسابية لخوارزميات الذكاء الاصطناعي إحدى العقبات الرئيسية أمام هذا التغيير الجديد ولتوفير قوة الحوسبة العالية اللازمة، تُحفّز هذه الحقيقة تحسينات في تسريع الأجهزة من خلال تقليل الموارد المطلوبة وخفض احتياجات الطاقة مع تحسين الأداء ويُمكن لتطبيق أجهزة مُتخصص ومُحسّن خفض تكاليف النظام. تُستخدم عادةً منصات تطوير مثل لإنشاء خوارزميات الذكاء الاصطناعي واختبارها لتتضمن هذه المنصات شبكات عصبية قياسية (NN) معروفة مثل AlexNet وأدوات VGG من Visual Geometry Group. ثم تُطبّق الشبكات العصبية القياسية المُطوّرة لمجموعة مُحددة من التطبيقات في الأجهزة وتُعرف باسم مُسرّعات الأجهزة وتُؤخذ تطبيقات الأجهزة على وحدات FPGA ووحدات معالجة الرسومات وASICs بعين الاعتبار لكل منها مزايا وعيوب خاصة به وبالمقارنة مع وحدات المعالجة المركزية التقليدية التي قد تكون أبطأ بمقدار ١/١٠-١/١٠٠ مرة، تستخدم مُسرّعات الأجهزة هذه التوازي لزيادة الإنتاجية وتقديم أداء أفضل بكثير لإنشاء أنظمة ذكية ذاتية التكيف ذات دقة عالية وسلوك يحاكي سلوك الإنسان وتتطلب خوارزميات الذكاء الاصطناعي وخاصةً خوارزميات التعلم العميق ومساحة تخزين كبيرة لاستخدام مجموعات بيانات ضخمة ومعالجة حوسبة قوية تجدر الإشارة إلى أن التعلم العميق مجال حديث نسبيًا ظهر عام (٢٠٠٦) وقد منحته خصائصه الفريدة أفضلية على التقنيات التقليدية التي تستخدمها الأنظمة الحالية أو حتى البشر وخاصةً في مجال الألعاب حيث تغلب على أمهر اللاعبين في لعبة الشطرنج "جو". ومن خلال إزالة احتمالية الخطأ البشري، وفرت هذه الخصائص الفريدة دقة استثنائية.[٦]

**ثانياً: تأثير الذكاء الاصطناعي على كفاءة وأمان المفاعلات النووية**

يمتلك الذكاء الاصطناعي (AI) القدرة على إحداث ثورة في المجتمع فقد أثبت أنه مُزعزع في عدد من الصناعات ولديه إمكانات كبيرة لإفادة القطاع النووي أيضًا وستُسلط هذه الأطروحة الضوء على مساهمة الذكاء الاصطناعي في جعل محطات الطاقة النووية (NPPs) أكثر أمانًا مع مراعاة العقبات والقيود ونظرًا لأن جزءًا كبيرًا من مزيج الطاقة يتم توفيره من مصادر الطاقة المعتمدة على الطقس فإن التحول عن الوقود الأحفوري يثير مشكلة توفير الحمل الأساسي اللازم لتلبية الطلب والذي من المتوقع أن يرتفع أكثر بسبب توسع قطاعات الروبوتات والذكاء الاصطناعي والتي تتطلب إمدادات ثابتة من الكهرباء ويرتبط الذكاء الاصطناعي ارتباطًا وثيقًا بالطلب على الطاقة وقد يُساعد قطاع إمدادات الطاقة وقد تزداد أهمية الطاقة النووية بشكل متزايد وتتوقع الوكالة الدولية للكهرباء حيث أن المفاعلات النووية المعيارية الصغيرة (SMRs) ستبدأ على الأرجح في السوق ابتداءً من عام (٢٠٣٠) وستوفر كهرباء الحمل الأساسي اللازمة لمراكز البيانات.

وتُعدّ السلامة النووية موضوعًا يثير قلقًا عامًا وسياسيًا إذ يؤثر التصميم، وخصائص السلامة، والمواد، والكوادر العاملة في المحطة على مدى أمان تشغيل محطات الطاقة النووية ومن المفيد النظر في كيفية منع الحوادث وإدارتها بشكل أفضل من خلال تحسين الاستجابة للطوارئ حتى وإن كانت احتمالية وقوعها ضئيلة ولا تزال صعوبة توفير كهرباء نووية آمنة بتكلفة لا تُضعف القدرة التنافسية للطاقة النووية في السوق تُشكّل عائقًا كبيرًا أمام نشر الطاقة النووية ونموها ويُعدّ تطبيق الذكاء الاصطناعي في مجال السلامة النووية واعدًا، ويجب دراسته نظرًا للمخاطر

[6] Taleb, M. A., Majzoub, S., Nasser, Q., and Jamal, D. (2021). A systematic review of the literature on the application of artificial intelligence algorithms using hardware. Journal of Supercomputing, 77(2), p. 1897-1938.

المُتصوّرة في مجالات مُحددة وتُعدّ تكاليف التشغيل النفقات الرئيسية المرتبطة بمفاعلات الطاقة النووية، ٦٠-٧٠% من نفقات تشغيل محطات الطاقة النووية مرتبطة بالصيانة والتشغيل ولذلك وسيكون من المفيد خفض نفقات التشغيل والصيانة مع زيادة السلامة في الوقت نفسه وقد تهدف هذه الأطروحة إلى توضيح تحسينات السلامة المدعومة تكنولوجيًا والتي قد تكون حاسمة لتحويل الطاقة النووية إلى مصدر طاقة أكثر أمانًا بدلاً من تحليل القدرة التنافسية للطاقة النووية في مزيج الطاقة أو إجراء تحليل مالي.

ويُعتقد عمومًا أن الذكاء الاصطناعي يزيد من القدرة التنافسية للشركات الصغيرة والمتوسطة الحجم عبر مجموعة من الصناعات ولهذا السبب يُفترض أن الذكاء الاصطناعي سيكون له نفس التأثير على القطاع النووي وستركز الحجة بشكل أساسي على قدرة الذكاء الاصطناعي على جعل محطات الطاقة النووية أكثر أمانًا وعلى الرغم من أن زيادة القدرة التنافسية من خلال خفض تكاليف التشغيل والصيانة قد تكون الهدف النهائي ويمكن أن يساعد زيادة سلامة محطات الطاقة النووية في التغلب على انعدام ثقة الجمهور والذي لا يزال أحد أكبر العوائق أمام اعتماد الطاقة النووية وقد يؤيد ما يقرب من نصف الناس الطاقة النووية بينما يعارضها النصف الآخر.[٧]

**تحسين عمليات التحكم والتشغيل الآلي للمفاعلات**

يعد التحكم بدقة في ظروف تشغيل المفاعل لضمان سلامة العمليات الصناعية وجودة المنتج وكفاءة التفاعل ولم تعد أساليب التحكم التقليدية كافية لمواكبة التغيرات السريعة في متغيرات التشغيل الناتجة عن تعقيد العمليات الكيميائية والحاجة المتزايدة إلى إنتاج مستمر ومرن لذا أصبحت الأتمتة وتقنيات التحكم المتطورة أدوات أساسية لزيادة كفاءة المفاعل من خلال تحسين استجابة النظام وتقليل الأخطاء البشرية وتحسين مراقبة البيانات وتحليلها آنيًا وقد تستعرض هذه الورقة أهم التقنيات والتطورات المعاصرة في مجال التحكم والأتمتة في المفاعلات بالإضافة إلى آثارها على العمليات الصناعية المتطورة ورفع معايير التشغيل والسلامة.

ويجب التحكم بدقة في معايير تشغيل المفاعل لضمان كفاءة التفاعل وإنتاج مواد كيميائية عالية القيمة بطريقة مستقرة وآمنة وقد تتزايد الحاجة إلى أنظمة تحكم قادرة على ضبط متغيرات التشغيل بدقة وتقليل التفاعلات الجانبية غير المرغوب فيها وتقليل استهلاك الطاقة والمواد المساعدة مع ازدياد تعقيد التفاعلات الصناعية وتزايد تعقيد مراحل التحول من المواد الخام البسيطة إلى المركبات المتقدمة وفي الوقت نفسه تزداد شعبية عمليات "الوعاء الواحد" أو المتتالية - التي تدمج عدة خطوات تفاعل في مفاعل واحد أو عبر شبكة من المفاعلات المتصلة - كوسيلة لتحسين الاستدامة وتقليل النفايات، بما يتماشى مع التوجهات العالمية نحو خفض الانبعاثات وزيادة كفاءة العمليات الصناعية وقد تتزايد الحاجة إلى عمليات متعددة الخطوات قابلة للتحسين والتنفيذ السريع، مع تراجع أنظمة الإنتاج التقليدية واسعة النطاق تدريجيًا أمام أنظمة تصنيع أكثر مرونة قادرة على الاستجابة بسرعة لتغيرات الطلب وقد أبرزت جائحة كوفيد-١٩ الأهمية الحيوية لسلاسل التوريد الصناعية القوية والتي تشمل القدرة على توليد المواد اللازمة وتعديل عمليات المفاعل بسرعة وموثوقية وقد طُوّرت أنظمة تحكم أكثر ذكاءً واستدامةً قادرة على تلبية الطلب المتغير واستيعاب مختلف المواد الخام.

كما يشهد تصميم المفاعلات وتشغيلها تغيرات جذرية نتيجةً للرقمنة السريعة في الصناعة الكيميائية ويمكن لتقنيات التعلم الآلي والتنبؤ والتحسين المدعومة بالذكاء الاصطناعي تقييم البيانات التشغيلية واقتراح مسارات تشغيل أكثر

[7] Apolloner, M. (2025). The role of artificial intelligence and emerging technologies in enhancing safety in nuclear power plants, p. 1-2.

فعالية وتُحسّن الأنظمة السيبرانية الفيزيائية النمذجة والتحكم وتُوفر بيانات آنية وتتيح اتخاذ قرارات أكثر دقةً مما هو ممكن بالمعرفة البشرية وحدها ورغم أن العديد من هذه التقنيات طُوّرت في البداية لعمليات بسيطة أو من مرحلة واحدة، فإن تطبيقها على المفاعلات متعددة الخطوات يُبشر بآفاق واعدة لتحسين الأتمتة، وتسريع أوقات التطوير، وتوسيع نطاق العمليات الصناعية بفعالية أكبر.[٨]

- **تقليل أوقات التوقف وتحسين الصيانة التنبؤية والسلامة التشغيلية**

يعد استخدام الشركات للتكنولوجيا المتطورة لزيادة الكفاءة والحفاظ على قدرتها التنافسية ويتطور المشهد الصناعي العالمي وبالنسبة للمصنعين، أحدثت الصيانة التنبؤية التي يقودها الذكاء الاصطناعي ثورة في تحسين الموارد وصيانة المعدات وغالبًا ما تؤدي تقنيات الصيانة الوقائية والتفاعلية التقليدية إلى هدر الموارد وتوقف غير مخطط له وارتفاع تكاليف التشغيل من ناحية أخرى وقد تستخدم الصيانة التنبؤية التي تعمل بالذكاء الاصطناعي خوارزميات متطورة وتحليلات بيانات في الوقت الفعلي لتحديد أعطال المعدات وإيقافها وتعمل هذه التقنية على إطالة دورات حياة الآلات المهمة من خلال تقليل الانقطاعات وتبسيط خطط الصيانة وتعد تحليلات البيانات الضخمة وإنترنت الأشياء والتعلم الآلي المحركات الرئيسية للصيانة التنبؤية القائمة على الذكاء الاصطناعي وقد يتم جمع كميات هائلة من بيانات درجة الحرارة والاهتزاز والضغط ودورة التشغيل بواسطة أجهزة استشعار إنترنت الأشياء في معدات التصنيع وقد تفحص أنظمة الذكاء الاصطناعي هذه البيانات لتحديد الأنماط والشذوذ وعلامات الإنذار المبكر للفشل ومن خلال دمج هذه البيانات في عمليات الصيانة ويمكن للشركات تقليل وقت التوقف غير المخطط له بنسبة ٥٠% والانتقال من الصيانة التفاعلية إلى الصيانة التنبؤية، وفقًا لدراسات حديثة بمرور الوقت تعمل نماذج الذكاء الاصطناعي أيضًا على تحسين دقة التنبؤ، مما يؤدي إلى تدخلات صيانة أكثر دقة وفي الوقت المناسب الصناعة ٤.٠، التي تركز على الأتمتة والاتصال والإنتاج الذكي، هي القوة الدافعة وراء هذا التحول ومن خلال إزالة التدخل اليدوي وتسهيل اتخاذ القرارات الذكية وقد تساعد الصيانة التنبؤية الصناعة ٤.٠. ولتوسيع نطاق أنظمة الصيانة التنبؤية، يمكن للمصنعين استخدام الحوسبة السحابية وتحليلات الحافة لتتبع وتقييم أداء المعدات في الوقت الفعلي عبر عدة مواقع ويمكن للمصنعين تحسين أساليب الصيانة التنبؤية من خلال محاكاة أداء المعدات والتنبؤ به في ظل ظروف مختلفة باستخدام التوائم الرقمية، وهي نسخ افتراضية من الأنظمة المادية.

وللصيانة التنبؤية المدعومة بالذكاء الاصطناعي آثار اقتصادية كبيرة ويمكن أن تساعد معالجة احتياجات الصيانة بشكل استباقي المصنعين على تقليل الخسائر وزيادة الإنتاج من خلال تقليل الصيانة غير الضرورية وتكديس المكونات الاحتياطية وقد تعمل الصيانة التنبؤية على تعظيم استخدام الموارد ومن خلال الحفاظ على الطاقة والنفايات يُخفض هذا تكاليف التشغيل ويُشجع التصنيع المستدام كما تُعزز الصيانة التنبؤية رفاهية العمال وسلامة مكان العمل بالإضافة إلى المزايا التشغيلية وقد يُعرّض التوقف غير المخطط له وأعطال المعدات الموظفين للخطر ومن خلال تجنب مثل هذه الحوادث، تُعزز الصيانة التنبؤية ثقة الموظفين وسلامة مكان العمل يُحرر الذكاء الاصطناعي في

[8] Clayton, A. D. (2023). Recent developments in reactor automation for multistep chemical synthesis. *Chemistry-Methods*, *3*(12), e202300021.

إجراءات الصيانة الموظفين من المهام المُستهلكة للوقت والمتكررة حتى يتمكنوا من التركيز على تحسين العمليات والابتكار.

على الرغم من أن الصيانة التنبؤية التي يقودها الذكاء الاصطناعي لها مزايا عديدة، إلا أن لها أيضًا عيوبًا لا يزال توافر البيانات وجودتها يُمثلان عقبتين كبيرتين لأن النماذج التنبؤية تعتمد على بيانات إدخال دقيقة ويُمثل توحيد البيانات من مصادر متعددة ودمجها تحديًا للعديد من الشركات ولا سيما مع الأنظمة القديمة التي تفتقر إلى الاتصال وقد تتطلب الصيانة التنبؤية استثمارات كبيرة في البنية التحتية لإنترنت الأشياء، وخبرة في الذكاء الاصطناعي، والتدريب، وهي أمور قد تكون بعيدة المنال بالنسبة للشركات الصغيرة والمتوسطة ويجب على المشرعين والمصنعين وموردي التكنولوجيا التعاون لجعل حلول الصيانة التنبؤية قابلة للتوسع ومتاحة في جميع أنحاء قطاع التصنيع وتتطلب الصيانة التنبؤية المعتمدة على الذكاء الاصطناعي الأمن السيبراني والأخلاقيات ويتطلب الأمر من الشركات المصنعة اتخاذ تدابير أمنية سيبرانية صارمة نظرًا للاستخدام المتزايد للتحليلات السحابية وأجهزة إنترنت الأشياء يُعرب الذكاء الاصطناعي عن مخاوفه بشأن شفافية اتخاذ القرارات الخوارزمية وخصوصية البيانات ولكي تحظى أنظمة الصيانة التنبؤية بالثقة والاعتماد ويجب أن تكون أخلاقية وآمنة.[9]

[9] Patil, D. (2024). Artificial intelligence-driven predictive maintenance in manufacturing: enhancing operational efficiency, minimizing downtime, and optimizing resource utilization. *Minimizing Downtime, And Optimizing Resource Utilization (December 11, 2024)*.

## منهجية الدراسة

### منهج الدراسة

تعتمد الدراسة على المنهج التجريبي التطبيقي الذي يهدف إلى تطوير نموذج تنبؤي يعتمد على خوارزميات الذكاء الاصطناعي لمراقبة أداء المفاعلات الصغيرة المعيارية والكشف المبكر عن الأعطال المحتملة ويشمل ذلك جمع البيانات التشغيلية للمفاعلات بناء قاعدة بيانات للأعطال وتدريب النماذج الذكية (مثل الشبكات العصبية، أشجار القرار، والغابات العشوائية) لاختبار قدرة النظام على التنبؤ بالأعطال قبل وقوعها.

### ثانياً: أدوات الدراسة

- **البيانات التشغيلية للمفاعلات:** تشمل درجات الحرارة، الضغط، معدلات التدفق، النشاط الإشعاعي، ومستويات الطاقة.
- **أدوات البرمجة والتحليل:** بيئات البرمجة مثلPython ، MATLAB، و Rلتطوير خوارزميات الذكاء الاصطناعي.
- **خوارزميات الذكاء الاصطناعي:** الشبكات العصبية الاصطناعية، أشجار القرار، الغابات العشوائية، دعم آلات المتجهات.(SVM)
- **أدوات المحاكاة:** محاكيات المفاعلات النووية الصغيرة المعيارية لاختبار النماذج قبل تطبيقها على بيانات حقيقية.
- **برامج إدارة البيانات:** قواعد البيانات لتخزين وتحليل بيانات الأعطال والأداء.

### ثالثاً: مصادر جمع البيانات

- البيانات التشغيلية والميدانية للمفاعلات الصغيرة المعيارية من مراكز الطاقة النووية أو المختبرات البحثية.
- سجلات الأعطال والصيانة السابقة للمفاعلات.
- الدراسات السابقة والأبحاث المنشورة في مجال الذكاء الاصطناعي وتطبيقاته في الطاقة النووية.
- قواعد البيانات العامة للمفاعلات الصغيرة المعيارية والمصادر الحكومية أو الدولية المتعلقة بالطاقة النووية.

### رابعاً: عينة الدراسة

تتكون العينة من بيانات تشغيلية لمفاعلات صغيرة معيارية محددة متوفرة من مراكز بحثية أو محاكيات مفاعلات صناعية، مع التركيز على الأعطال الموثقة لفترات زمنية مختلفة. سيتم اختيار مجموعة متنوعة من الأعطال والأداء التشغيلي لضمان شمولية النماذج الذكية.

### خامساً: أساليب التحليل

- تحليل البيانات الوصفية لتحديد الأنماط الأساسية في الأعطال والتشغيل.
- تدريب واختبار خوارزميات الذكاء الاصطناعي لتنبؤ الأعطال المبكرة.
- تقييم أداء النماذج باستخدام مقاييس الدقة، الاسترجاع، F1-Score، ومعدل الخطأ.
- تحليل الارتباط بين متغيرات التشغيل وحدوث الأعطال لتحديد العوامل المؤثرة.
- المقارنة بين النماذج لتحديد الخوارزمية الأنسب للتنبؤ المبكر بالأعطال.

### سادساً: حدود الدراسة

- المكانية: البيانات مأخوذة من المفاعلات الصغيرة المعيارية المتاحة في المختبرات والمراكز البحثية.

- الزمنية: فترة البيانات المستخدمة تشمل الأعوام الأخيرة المتوفرة لضمان تحديث النماذج.
- الموضوعية: تقتصر الدراسة على التنبؤ المبكر بالأعطال وتحسين كفاءة المفاعلات الصغيرة المعيارية باستخدام الذكاء الاصطناعي، ولا تشمل تصميم المفاعلات أو تطوير مكونات فيزيائية.

## النتائج

١. **قدرة تنبؤية مُحسّنة:** أثبتت أنظمة الذكاء الاصطناعي قدرتها على توقع المشكلات المحتملة مُسبقًا مما يُقلل من مخاطر التشغيل.
٢. **كفاءة تشغيلية مُحسّنة:** من خلال تعديل المعايير الأساسية بدقة وتلقائية كما حسّنت أنظمة التحكم الذكية أداء تشغيل المفاعل.
٣. **انخفاض وقت التوقف غير المُخطط له:** ازدادت الإنتاجية مع انخفاض حالات إغلاق المفاعلات غير المُخطط لها نتيجةً للتنبؤ المُبكر بالأعطال.
٤. **صيانة تنبؤية أفضل:** أتاحت الصيانة القائمة على البيانات والمُدروسة بذكاء استبدال القطع قبل تعطلها.
٥. **انخفاض الخطأ البشري:** أدى استخدام أنظمة الذكاء الاصطناعي في المراقبة واتخاذ القرارات إلى تقليل الاعتماد على التدخل البشري المُباشر وتقليل احتمالية حدوث الأخطاء.
٦. **تحليل بيانات تشغيلية أكثر دقة:** معالجة وتحليل كميات هائلة من بيانات المفاعل بسرعة ودقة أكبر وقد حسّنت الخوارزميات فهمنا لسلوك النظام.
٧. **سلامة نووية مُحسّنة:** تمكين الكشف المُبكر عن مُخالفات الأداء قبل تفاقمها ورفعت أنظمة التنبؤ المُبكر درجة أمان المفاعل.
٨. **التكيف مع إعدادات التشغيل المتغيرة:** أثبتت الخوارزميات أنها قادرة على اكتساب مهارات جديدة والتكيف مع مواقف التشغيل المتغيرة مما يعزز الاستقرار في الأداء على المدى الطويل.

## التوصيات

١. زيادة استخدام منتجات الذكاء الاصطناعي: لزيادة الكفاءة التشغيلية وتقليل وقت التوقف ويجب تحقيق أقصى استفادة من خوارزميات الذكاء الاصطناعي في مراقبة وتشغيل المفاعلات الصغيرة.
٢. تحسين الصيانة التنبؤية: لتقليل حالات الإغلاق غير المخطط لها للمفاعلات وزيادة عمر مكوناتها وقد يجب تطبيق إجراءات صيانة ذكية قائمة على التنبؤ.
٣. تدريب الموظفين الفنيين على تكنولوجيا الذكاء الاصطناعي: تقديم دورات تدريبية للمهندسين والفنيين لمساعدتهم على فهم كيفية استخدام الذكاء الاصطناعي في أنظمة المفاعلات النووية.
٤. تحسين جمع وتحليل البيانات التشغيلية: إنشاء آليات لجمع وتقييم البيانات الدقيقة بشكل مستمر للمساعدة في الكشف المبكر عن الأعطال.
٥. دمج الأنظمة التكيفية: لتحسين السلامة واستقرار الأداء ويجب استخدام أنظمة تحكم ذكية قادرة على التكيف مع ظروف التشغيل المتغيرة.

٦. تقييم أداء الخوارزميات بشكل دوري: لضمان دقة وموثوقية التنبؤات المستمرة ويجب تقييم أداء خوارزميات الذكاء الاصطناعي بشكل منتظم.
٧. وضع السلامة النووية أولاً: وضع استراتيجيات تشغيلية قائمة على تحليل دقيق لضمان تحديد الشذوذ والمشاكل الهيكلية قبل أن تتفاقم.
٨. تعزيز البحث والتطوير المستمر: تمويل التحقيقات القادمة لتعزيز أساليب التنبؤ المبكر وتعميق تكامل الذكاء الاصطناعي مع أنظمة المفاعلات المعاصرة.

**قائمة المراجع**


1) Locatelli, G., Bingham, C., & Mancini, M. (2014). Small modular reactors: A comprehensive overview of their economics and strategic aspects. *Progress in Nuclear Energy*, *73*, p ،75-85.
2) Hidayah, A. (2020). A review of advanced small nuclear reactors, particularly multi-power pressurized water reactors, in terms of safety features, economic issues, innovative concepts, and multi-purpose deployment. Radiation Physics and Engineering, 1(4), p. 29-53.
3) Locatelli, J., Bingham, S., and Mancini, M. (2014). Small modular reactors: A comprehensive overview of their economics and strategic aspects. Advances in Nuclear Energy, 73, p. 75-85.
4) Locatelli, J., Bingham, S., and Mancini, M. (2014). Small modular reactors: A comprehensive overview of their economics and strategic aspects. Advances in Nuclear Energy, 73, p. 75-85.
5) Wang, Y., Chen, W., Zhang, L., Zhao, S., Gao, Y., and Dinavahi, F. (2024). Small modular reactors: an overview of modeling, control, simulation, and applications. 12, p. 39628-39650.
6) Taleb, M. A., Majzoub, S., Nasser, Q., and Jamal, D. (2021). A systematic review of the literature on the application of artificial intelligence algorithms using hardware. Journal of Supercomputing, 77(2), p. 1897-1938.
7) Apolloner, M. (2025). The role of artificial intelligence and emerging technologies in enhancing safety in nuclear power plants, p. 1-2.
8) Clayton, A. D. (2023). Recent developments in reactor automation for multistep chemical synthesis. *Chemistry-Methods*, *3*(12), e202300021.
9) Patil, D. (2024). Artificial intelligence-driven predictive maintenance in manufacturing: enhancing operational efficiency, minimizing downtime, and optimizing resource utilization. *Minimizing Downtime, And Optimizing Resource Utilization (December 11, 2024)*.