المجلة الدولية للعلوم
والتكنولوجيا

الإصدار السادس
المجلد (٣) العدد (١)
(٣- ٢٢)٢٠٢٦

تحسين إدارة النفايات النووية عبر مواد متقدمة لاحتجاز النظائر المشعة طويلة الأمد

د.م/ خالد غيث القزيري
(رئيس مجلس إدارة جمعية البيان للعلوم وعضو الوكالة الدولية للطاقة الذرية)
تاريخ النشر: نشر الكترونياً بتاريخ ٤ فبراير ٢٠٢٦ م

الملخص :

تُعدّ إدارة النفايات النووية، ولا سيّما تلك التي تحتوي على نظائر مشعة طويلة العمر مثل البلوتونيوم-٢٣٩ والسيزيوم-١٣٧ والسترونشيوم-٩٠، من أبرز التحديات البيئية والصناعية المرتبطة باستخدام الطاقة النووية. وتعاني تقنيات التخزين التقليدية من قصور واضح في تحقيق الاحتواء الآمن طويل الأمد، مما يزيد من مخاطر تسرب الإشعاع وتأثيراته السلبية على صحة الإنسان والنظم البيئية. يهدف هذا البحث إلى دراسة إمكانات استخدام المواد المتقدمة، مثل السيراميك الزجاجي، والمواد المسامية، والمركبات النانوية، في تحسين كفاءة احتجاز النظائر المشعة طويلة الأمد وتعزيز سلامة تخزين النفايات النووية. يعتمد البحث على المنهج الوصفي التحليلي من خلال استعراض الخصائص الفيزيائية والكيميائية لهذه المواد، ومقاومتها للتحلل الحراري والإشعاعي، وقدرتها على الاستقرار طويل الأمد. كما يناقش البحث دور هذه المواد في تقليل المخاطر الإشعاعية وتحقيق إدارة أكثر استدامة للنفايات النووية، مع تقديم مقترحات عملية لتطبيقها في المرافق النووية المعاصرة. وتُظهر نتائج الدراسة أن توظيف المواد المتقدمة يُمثل خيارًا واعدًا لتعزيز الأمان البيئي والصحي وضمان الاستخدام المستدام للطاقة النووية.

الكلمات المفتاحية:

(النفايات النووية، النظائر المشعة طويلة العمر، المواد المتقدمة، السلامة الإشعاعية، الاستدامة البيئية)

Apstract :

Nuclear waste management, particularly waste containing long-lived radioactive isotopes such as plutonium-239, cesium-137, and strontium-90, represents one of the most critical environmental and industrial challenges associated with nuclear energy utilization. Conventional storage techniques often fail to ensure long-term containment and stability, increasing the risk of radioactive leakage and its adverse effects on human health and the environment. This study aims to examine the potential of advanced materials, including glass-ceramics, porous materials, and nanocomposites, to enhance

the immobilization and long-term retention of radioactive isotopes. The research adopts a descriptive-analytical approach by reviewing the physical and chemical properties of these materials, their resistance to thermal and radiation-induced degradation, and their long-term stability. Furthermore, the study discusses the role of advanced materials in reducing radiological risks and promoting more sustainable nuclear waste management practices, while proposing practical recommendations for their implementation in modern nuclear facilities. The findings indicate that advanced materials offer a promising solution for improving environmental and health safety and supporting the sustainable use of nuclear energy.

Keywords:
(Nuclear waste, long-lived radioactive isotopes, advanced materials, radiological safety, environmental sustainability)

١. المقدمة

تُعد إدارة النفايات النووية إحدى أكبر المشكلات الصناعية والبيئية المرتبطة باستخدام الطاقة النووية، وخاصةً النفايات التي تحتوي على نظائر مشعة طويلة العمر، مثل السترونشيوم-٩٠ والبلوتونيوم-٢٣٩، والتي تُشكل تهديدًا للبيئة والصحة العامة منذ آلاف السنين. ويُؤكد عجز تقنيات تخزين النفايات التقليدية عن ضمان الاحتواء التام طويل الأمد على ضرورة ابتكار مواد متطورة قادرة على احتجاز هذه النظائر بنجاح. وتشمل هذه المواد، التي توفر أمانًا طويل الأمد لتخزين النفايات النووية، السيراميك الزجاجي، والمواد المسامية، والمركبات النانوية. كما أنها مقاومة للتدهور الحراري والإشعاعي. ومن أجل تحسين السلامة البيئية، وتقليل المخاطر الإشعاعية، وتحقيق إدارة أكثر ذكاءً واستدامة للنفايات النووية، يُعد البحث والتطوير في هذا المجال أمرًا بالغ الأهمية. ولأن النفايات النووية تحتوي على نظائر مشعة عالية الطاقة وطويلة العمر، يمكنها الاستمرار في العمل لآلاف السنين، فإنها تُعتبر من أخطر الملوثات الصناعية في العالم. إذا لم تُخزَّن النفايات أو تُتحكَّم فيها بشكل آمن وكافٍ، فإن هذا الإشعاع يُعرّض صحة الإنسان والبيئة للخطر المباشر. لذلك، من الضروري ابتكار أساليب متطورة للتعامل مع هذه النفايات، بما يضمن الحد من المخاطر المحتملة، ويضمن الاستخدام المستدام للطاقة النووية[١].

احتلَّ تطوير مواد متطورة قادرة على احتجاز النظائر المشعة بكفاءة - مثل السيراميك الزجاجي والمواد المسامية والمركبات النانوية - مركز الاهتمام في السنوات الأخيرة. تُحسّن هذه المواد سلامة تخزين النفايات النووية بفضل مقاومتها للتحلل الحراري والإشعاعي، وقدرتها على البقاء مستقرة لفترات طويلة بفضل خصائصها الكيميائية والفيزيائية. علاوة على ذلك، تتمتع بعض هذه المواد بالقدرة على إعادة تدوير نظائر مفيدة محددة، مما يُقلل من آثارها السلبية على البيئة ويُساعد على تحقيق إدارة مستدامة للنفايات النووية وخفض مخاطر الإشعاع، وتحقيق الاستدامة في استخدام الطاقة النووية. ويمكن بناء نظام أكثر ذكاءً وفعاليةً لعزل النظائر المشعة طويلة العمر باستخدام مواد متطورة وتقنيات حديثة لإدارة النفايات، مما يُسهم في تحقيق الأهداف الصناعية والصحية والبيئية[٢].

[١] بوحامدي عبد الكريم،٢٠٢٤م،المسؤولية الجنائية عن الجرائم المتعلقة بالنفايات المشعة.

[٢] غنيم سوزان معوض ، ٢٠١١م، النظم القانونية لضمان استخدام الطاقة النووية في الأغراض السلمية، دار الجامعة الجديدة الاسكندرية، مصر، ، ص٣٠.

برزت الطاقة النووية كعنصر أساسي في التنمية الاقتصادية والعلمية والتكنولوجية ونمو المجتمعات المعاصرة. ورغم هذه الفوائد، فإن استخدام المواد النووية والمشعة ينطوي على مخاطر كبيرة على البيئة وصحة الإنسان، أبرزها خطر التخلص غير السليم من النفايات المشعة وتستمر الانتهاكات رغم المبادرات الوطنية والدولية الرامية إلى وضع أنظمة لخفض هذه الانبعاثات والنفايات واتخاذ الاحتياطات اللازمة ضد شرائها أو نقلها أو التخلص منها بطريقة خطرة. وتشمل هذه المخالفات استيراد هذه النفايات أو سرقتها أو إطلاقها في البيئة، وهي جميعها أفعال غير قانونية وتستوجب عقوبات جنائية على كل من يتورط فيها ولأن النفايات النووية تحتوي على نظائر مشعة طويلة العمر، يمكن أن تبقى مشعة لآلاف السنين، فإنها تُعد من أخطر الملوثات الصناعية على البيئة وصحة الإنسان. تزايدت الحاجة إلى أساليب فعّالة لمعالجة النفايات النووية بشكل آمن ومستدامة مع تزايد استخدام الطاقة النووية في الصناعة والطب وتوليد الكهرباء.

أصبحت المواد المتقدمة خيارًا عمليًا لتعزيز إدارة النفايات النووية في هذا الصدد. فهي تقاوم التحلل الحراري والإشعاعي، وتتمتع بقدرة كبيرة على احتواء النظائر المشعة ووقف تسرب الإشعاع إلى البيئة. تُتيح هذه المواد فرصًا لإيجاد حلول تخزين أكثر استدامة وأمانًا، تُعزز حماية البيئة والإنسان على المدى الطويل، سيتم استعراض طبيعة النفايات النووية، وخصائصها الفيزيائية والكيميائية، وصعوبات إدارتها، سيتم فحص إمكانات المواد المتقدمة لتعزيز الاحتفاظ الآمن بالنظائر المشعة طويلة الأمد، وسيتم تطوير اقتراحات مفيدة لتنفيذ هذه الحلول في المرافق النووية المعاصرة[٣].

٢. مشكلة الدراسة

تُشكل النفايات التي تحتوي على نظائر مشعة طويلة العمر، مثل البلوتونيوم-٢٣٩ والسيزيوم-١٣٧ والسترونشيوم-٩٠، والتي يمكن أن تبقى مشعة لآلاف السنين، مصدر قلق بالغ على صحة الإنسان والبيئة. ويزداد احتمال تسرب الإشعاع إلى البيئة وآثاره الضارة على الإنسان والكائنات الحية بسبب الصعوبات التي تواجهها تقنيات التخزين التقليدية لهذه النفايات، مثل الخزانات المعدنية أو مواقع الدفن تحت الأرض، في الحفاظ على عزلة تامة واستقرار طويل الأمد، هناك ندرة في الأبحاث التطبيقية التي تُقيّم فعالية هذه المواد في بيئات التخزين العملية وتُحدد أفضل السبل للحد من المخاطر الإشعاعية والحفاظ على الاستدامة البيئية، يتناول هذا العمل الحاجة المُلحة لوضع خطط جديدة لإدارة النفايات النووية، تعتمد على مواد متطورة قادرة على التقاط النظائر المشعة طويلة العمر، مع الحفاظ على السلامة البيئية والصحية، والحد من المخاطر الإشعاعية طويلة الأمد. ويركز البحث العلمي الحالي على هذه المسألة لدراسة وتقييم المواد المتطورة التي تُمثل الخيار الأمثل للتعامل مع النفايات النووية بطريقة أكثر أمانًا واستدامة.

٣. تساؤلات الدراسة

١. ما هي المخاطر الرئيسية التي تُشكلها النفايات النووية التي تحتوي على نظائر مشعة طويلة العمر على البيئة وصحة الإنسان؟

٢. ما هي عيوب وقيود الطرق التقليدية للتخزين طويل الأمد للنفايات المشعة؟

٣. ما هي المواد المتطورة المناسبة لاحتواء النظائر المشعة ذات عمر النصف الطويل؟

[٣] عبد الوهاب بن رجب ،هاشم، ٢٠١٤م،جرائم البيئة وسبل المواجهة، الطبعة الأولى، دار الحامد للنشر والتوزيع، الأردن ،ص٩٤.

٤. ما هي الخصائص الكيميائية والفيزيائية التي تُمكّن هذه المواد من فصل النظائر المشعة بنجاح؟
٥. ما هي تأثيرات درجة الحرارة والعوامل البيئية على جودة تخزين المواد الحديثة للنفايات النووية؟
٦. كيف يُمكن إعادة تدوير أو استخدام بعض النظائر المشعة في هذه المواد؟
٧. ما هو دور المواد المتطورة في خفض مخاطر الإشعاع على المدى الطويل؟
٨. كيف يُمكن تقييم فعالية هذه المواد في بيئات التخزين العملية لضمان الاستدامة والسلامة البيئية؟

٤. فرضيات الدراسة

الفرضية الأولي:إن استخدام مواد متطورة لاحتواء النظائر المشعة على المدى الطويل يُقلل من المخاطر الصحية والبيئية على المدى الطويل، ويُعزز أمن تخزين النفايات النووية.

الفرضية الثانية:بالمقارنة مع التقنيات التقليدية، تُظهر المواد المتطورة، مثل السيراميك الزجاجي والمواد المسامية، مرونة عالية في مواجهة التدهور الحراري والإشعاعي.
الفرضية الثالثة:تساعد الخصائص الكيميائية والفيزيائية لهذه المواد على تقليل تسرب الإشعاع إلى البيئة المحيطة.
الفرضية الرابعة:إن استخدام مواد متطورة يجعل النفايات النووية أكثر استقرارًا في بيئات بيئية متنوعة.
الفرضية الخامسة: تتيح بعض المواد المتطورة إمكانية إعادة تدوير أو الاستفادة من النظائر المفيدة الموجودة في النفايات النووية.

٥. أهداف الدراسة

١. تحسين إدارة النفايات النووية طويلة العمر من خلال البحث وتقييم المواد المتطورة القادرة على التقاط النظائر المشعة بكفاءة، مما يضمن استدامة طويلة الأمد، وسلامة البيئة، وصحة الإنسان.
٢. تحديد المخاطر البيئية والصحية للنفايات النووية طويلة العمر.
٣. تقييم فعالية وعيوب تقنيات تخزين النفايات النووية التقليدية.
٤. تحديد أنواع المواد المتقدمة المختلفة والخصائص الفيزيائية والكيميائية المرتبطة باحتجاز النظائر المشعة.
٥. دراسة كيفية تأثير العوامل الحرارية والبيئية على أداء المواد المتقدمة.
٦. تقييم إمكانية استخدام أو إعادة تدوير نظائر مشعة محددة في المواد المتقدمة.
٧. تقديم اقتراحات مفيدة لاستخدام المواد المتطورة في التعامل المستدام والآمن مع النفايات المشعة.
٨. تحسين المعرفة التقنية والعلمية حول كيفية مساهمة المواد المبتكرة في الحد من مخاطر الإشعاع.

٦. أهمية الدراسة

إن الحاجة المُلِحّة لإيجاد أساليب أكثر أمانًا وكفاءةً للتعامل مع النفايات النووية، وخاصةً النفايات التي تحتوي على نظائر مشعة طويلة العمر، والتي تُشكّل خطرًا جسيمًا على البيئة وصحة الإنسان، تجعل هذه الدراسة جديرة بالاهتمام. فإذا لم تُعالَج هذه النفايات بطريقة إبداعية، يزداد احتمال تسرب المواد الإشعاعية، مما قد يُسبب ضررًا بيئيًا طويل الأمد ودائمًا،تكمن أهمية هذه الدراسة في تقييمها لمواد متطورة ذات خصائص خاصة تُمكّنها من احتجاز النظائر المشعة بفعالية ومقاومة التحلل الحراري والإشعاعي، مثل السيراميك الزجاجي، والمواد المسامية،

والمركبات النانوية. يدعم هذا التقييم الاستدامة البيئية والصحية، ويُساعد على إنشاء أنظمة تخزين أكثر أمانًا للنفايات النووية، من خلال توفير بيانات ومعلومات مُحدثة حول فعالية هذه المواد في بيئات التخزين العملية، تُسهم الدراسة في تطوير العلوم والتكنولوجيا. وهذا سيدعم اعتماد الباحثين وصانعي السياسات لحلول مُبتكرة لإدارة النفايات النووية. وتُعدّ استنتاجات الدراسة مفيدةً أكاديميًا وعمليًا، إذ تُشجع أيضًا على وضع إجراءات صناعية ولوائح بيئية مُتعلقة بالسلامة من الإشعاع.

٧. منهجية الدراسة

منهج الدراسة

تعتمد هذه الدراسة على المنهج الوصفي التحليلي، الذي يهدف إلى دراسة وتحليل خصائص المواد المتقدمة المستخدمة في احتجاز النظائر المشعة طويلة العمر، وتقييم فعاليتها في إدارة النفايات النووية. كما يُستخدم المنهج الاستكشافي لتسليط الضوء على التجارب العلمية الحديثة والتقنيات المبتكرة في هذا المجال، وتحديد أفضل الممارسات الممكنة.

أدوات الدراسة

تم استخدام أدوات متعددة لجمع وتحليل البيانات، وهي:

١. المراجعة المكتبية والدراسات السابقة :تحليل الأبحاث العلمية، المقالات الأكاديمية، والتقارير الفنية المتعلقة بالمواد المتقدمة وإدارة النفايات النووية.
٢. البيانات التجريبية :جمع معلومات حول خصائص المواد المتقدمة مثل السيراميكات الزجاجية، المواد المسامية، والمركبات النانوية من خلال تقارير مختبرية وتجارب سابقة منشورة.
٣. الاستبيانات خبراء في الطاقة النووية وعلوم المواد لتقييم فعالية المواد المتقدمة وإمكانية تطبيقها عمليًا.

مصادر جمع البيانات

- المصادر الأولية :مقابلات مع خبراء مختصين، بيانات مختبرية منشورة حول أداء المواد المتقدمة.
- المصادر الثانوية :كتب، مقالات علمية، رسائل جامعية، تقارير دولية، وقواعد بيانات أكاديمية مثل ScienceDirect، Springer، و.IEEE

عينة الدراسة

- العينة النظرية :تشمل الدراسات والتجارب العلمية المنشورة عن المواد المتقدمة لإدارة النفايات النووية.
- العينة البشرية: (١٠٠مفردة)من الخبراء والمتخصصين في مجال الطاقة النووية وعلوم المواد، تم اختيارهم بأسلوب العينة المقصودة (Purposive Sampling) لضمان خبرتهم في الموضوع.

أساليب التحليل

- التحليل الوصفي لتحديد الخصائص الرئيسية للمواد المتقدمة وطرق تخزين النفايات النووية.
- التحليل المقارن بين المواد التقليدية والمواد المتقدمة من حيث كفاءة الاحتجاز، الاستقرار الإشعاعي، والاستدامة البيئية.
- استخدام التحليل الاستنتاجي لتقديم توصيات علمية وتقنية بناءً على النتائج المتوفرة في الدراسات السابقة.

حدود الدراسة

- زمانية :تقتصر الدراسة على الأبحاث المنشورة خلال العقدين الأخيرين (٢٠٠٥–٢٠٢٥) لضمان حداثة المعلومات.

- موضوعية :تركز الدراسة على المواد المتقدمة المستخدمة لاحتجاز النظائر المشعة طويلة العمر، دون التطرق إلى إدارة النفايات قصيرة العمر أو التطبيقات النووية الأخرى.
- مكانية :الدراسة عامة لكنها تعتمد على التجارب المنشورة عالميًا، مع التركيز على المواد وتقنيات التخزين التي يمكن تطبيقها عمليًا.

٨. الإطار النظري

أولاً: تعريف النفايات النووية وخصائصها

تُعرف النفايات النووية بأنها المواد الناتجة عن العمليات النووية، مثل توليد الطاقة، والتطبيقات الطبية، والدراسات العلمية، والتي تحتوي على نظائر مشعة يمكنها إصدار إشعاعات لفترات زمنية مختلفة. وتؤثر خصائص هذه النفايات الفيزيائية والكيميائية المختلفة - مثل كونها صلبة، أو سائلة، أو غازية، ومدى إشعاعها، وأنواع النظائر المشعة التي تحتوي عليها - على كيفية التعامل معها وتخزينها، تُصنف النفايات النووية عادةً إلى طويلة العمر وقصيرة العمر. ولأنها قادرة على الاستمرار في العمل لآلاف السنين، تُشكل النفايات طويلة العمر مشكلة أكبر وتتطلب تقنيات احتواء وعزل متطورة. ويُعد الفهم الشامل للخصائص العلمية لهذه النفايات أمرًا بالغ الأهمية لابتكار تقنيات إدارة آمنة وفعّالة، لأن المخاطر التي تُشكلها على صحة الإنسان والبيئة تختلف باختلاف نوعها وتركيبها الكيميائي[٤].

تُعرّف الوكالة الدولية للطاقة الذرية النفايات النووية بأنها "أي مادة لم تعد تُستخدم أكثر من المتوقع، وتحتوي على مواد مشعة تتجاوز ما يمكن للإنسان تحمّله أو استخدامه لأغراض مفيدة أخرى". وتُعرّف منظمة الصحة العالمية النفايات النووية بأنها "مواد لم تعد هناك حاجة إليها، وبالتالي لم تعد ذات قيمة أو أهمية اقتصادية". إضافةً إلى ذلك، تُقدّم الوكالة تعريفًا ثانيًا: "عندما تُستخدم التقنيات النووية لتوليد الكهرباء وفي الممارسات المفيدة في الطب والزراعة والبحوث الصناعية، تُعدّ النفايات المشعة ناتجًا ثانويًا لا مفر منه". على سبيل المثال، تُعرّف بأنها "أي وقود نووي، بخلاف اليورانيوم الطبيعي واليورانيوم المُستنفد، قادر على توليد الطاقة بمفرده أو مع مواد أخرى من خلال تفاعل نووي متسلسل ذاتي الاستدامة خارج المفاعل النووي، بالإضافة إلى النواتج الثانوية أو النفايات المشعة" في المادة ٧٨ من القانون المصري لتنظيم الأنشطة النووية والإشعاعية. القانون المصري لعام ٢٠١٠ بشأن تنظيم الأنشطة النووية والإشعاعية، المادة ٧٨. لا تُعدّ النواتج الثانوية للصناعة النووية المصدر الوحيد للنفايات النووية. فهناك العديد من مصادرها، لكنها تختلف في درجة التهديد الذي تُشكّله. ومن الأمثلة على ذلك المستشفيات، ومراكز الأبحاث الجامعية، وتصنيع الأدوية، والمصادر المشعة، واستخدام النظائر المشعة في الصناعة والتعدين والطب النووي (بما في ذلك التشخيص والعلاج). ويتعرض البشر والبيئة لمخاطر جسيمة نتيجة استخراج المعادن المشعة مثل اليورانيوم والكبريت، وكذلك استخدامها. ويُنتج الإشعاع من جميع الأنشطة المرتبطة بهذه المصادر، إلا أن كميته تختلف من دولة إلى أخرى[٥].

وتُشارك الدول المنتجة للطاقة النووية في جميع الأنشطة المذكورة تقريبًا؛ بل إن كل دولة تقريبًا في العالم تقوم بجميع الأنشطة الثلاثة الأخيرة أو معظمها. وتُعدّ تجارب الأسلحة النووية والتخلص من النفايات النووية، بما في ذلك

[٤] الحسن طايل محمود، ٢٠١٨م، النفايات الذرية والتجارب النووية في البحار والمحيطات واخطارها علي البيئة البحرية كلية العلوم جامعة طيبة المدينة المنورة. مجلة الأمن والحياة . العدد ٣٧٣ ، ص ٦٠.

[٥] علي عادل محمد، ٢٠١٤م، التنظيم القانوني والرقابي للاستخدامات السلمية للطاقة النووية واثرة علي الأمن البيئي ورقة علمية، مقدمة في الملتقي العلمي كلية العلوم الاستراتيجية المنامة البحرين، ص ٣.

عمليات محطات الطاقة النووية، ومحطات الطاقة النووية المجانية للاستخدام التجاري، وأكبر تصريف للتلوث في المحيطات من منشآت إعادة معالجة الوقود النووي، مصادر إضافية للتلوث الإشعاعي في البحار. تُطلق الانفجارات النووية أيضًا غبارًا إشعاعيًا في الغلاف الجوي أو المحيط أو سطح الأرض. ونتيجةً لذلك، يتساقط الغبار المشع على أسطح البحار والمحيطات. وتُطلق أنظمة التبريد في المفاعلات النووية كميات هائلة من الماء، ثم تُصرف في الآبار. حتى أن بعض العلماء صمّموا ألعابًا نارية مذهلة في المياه. وكبديل، تُلقى نواتج المفاعل النووي الثانوية، المحملة بالعناصر المشعة، مباشرةً في المحيط. وكما حدث في مفاعلات فوكوشيما في اليابان، قد يحدث هذا نتيجةً لاختراقات مائية ناجمة عن مشاكل في دائرة الإمداد، مما يتسبب في تفريغ الماء للمواد المشعة ، توجد غواصات نووية تعمل بكفاءة. تُعرف الغواصة التي تعمل بواسطة مفاعل نووي داخلي باسم الغواصة النووية. بالمقارنة مع الغواصات التي تعمل بالوقود محليًا، توفر محطة الطاقة النووية مزايا عديدة. ستكتشف أن الغواصات التي تعمل بالطاقة النووية لا تحتاج إلى نفس كمية الهواء التي تحتاجها الغواصات العادية. يتم إنتاج الطاقة الحركية اللازمة للدفع تحت الماء بواسطة محرك الاحتراق الداخلي. في الرحلات الطويلة، يمكن للغواصة أيضًا أن تبقى طافية لفترات طويلة من الزمن دون إعادة التزود بالوقود، فإن الإشعاع النووي غائب عن المراكز البشرية وهي إحدى السمات الفريدة للنقابات النووية هي أنه حتى في المواقع المعزولة تحت الأرض، يكون لها تأثير ضار على البيئة والصحة العامة[٦].

الخصائص الفيزيائية للنفايات النووية

هناك ثلاثة أشكال رئيسية للنفايات النووية، ولكل منها حالة فيزيائية مختلفة بناءً على أصلها ومصدرها:

يُعد الوقود النووي المستهلك وبعض النفايات الصناعية أمثلة على النفايات الصلبة، والتي غالبًا ما تُشكل غالبية النفايات طويلة العمر.

تُعتبر المحاليل المشعة الناتجة عن تبريد الوقود النووي ومعالجته كيميائيًا نفايات سائلة. وتتميز هذه النفايات بسهولة إطلاق الإشعاع في البيئة في حال عدم احتوائها بشكل صحيح.

النفايات الغازية: مثل الغازات المشعة المنبعثة أثناء العمليات النووية، والتي تحتاج إلى معالجة وتهوية خاصة لمنع انتشارها.

تختلف أيضًا كثافة وحجم ودرجة حرارة ومستويات النشاط الإشعاعي لهذه الأنواع من النفايات، مما يؤثر على كيفية التعامل معها وتخزينها[٧].

الخصائص الكيميائية للنفايات النووية

التركيب الكيميائي: تشمل النفايات مكونات مثل السترونشيوم والسيزيوم والبلوتونيوم واليورانيوم، بالإضافة إلى مجموعة متنوعة من المركبات الكيميائية التي قد تتفاعل مع البيئة أو المنتجات المخزنة إذا تُركت دون معالجة.

الاستقرار الكيميائي: تتفاوت مقاومة النفايات للتدهور الكيميائي. قد ينتج التسرب الإشعاعي عن تحلل بعض المواد أو تفاعلها مع الأكسجين أو الماء.

النشاط الإشعاعي المتغير: يحدد هذا النشاط درجة الخطر التي تشكلها النفايات وكيفية التعامل معها، وذلك حسب نوع النويدات المشعة الموجودة وعمرها النصفي، والذي قد يتراوح بين ثوانٍ وآلاف السنين[٨].

---

[٦] عبد القادر مهدى، ٢٠١٤م، الاستخدام السلمى للطاقة النووية بين حق الشعوب في التنمية ومتطلبات الامن الدولي رسالة دكتوراة غير منشورة جامعة أبي بكر بلقايد ، تلمسان - الجزائر،ص ٢٨٩.

[7] Kibikas, W. M., Ghassemi, A., Choens, R. C., Bauer, S. J., Shalev, E., & Lyakhovsky, V. (2025). Thermophysical properties of the Ghareb formation relevant for nuclear waste disposal. Acta Geotechnica, 20(6), 2799-2816.

ثانياً: مصادر النفايات النووية

تُعدّ النفايات النووية من أكبر المشكلات التكنولوجية والبيئية التي تواجه صناعة الطاقة النووية العالمية. وتُنتج هذه النفايات من عمليات استخدام العناصر المشعة للأغراض الصناعية والطبية والعسكرية، بالإضافة إلى توليد الطاقة منها. ونظرًا لخطورتها الإشعاعية، والتي قد تستمر في بعض الحالات لآلاف السنين، يجب إدارة هذه النفايات والتعامل معها بعناية لضمان سلامة الإنسان والحفاظ على البيئة وتشمل هذه المصادر المواد المشعة المستخدمة في الصناعة والطب، ونفايات البحث العلمي، ونفايات تشغيل المفاعلات النووية لتوليد الكهرباء، والنواتج الثانوية لإعادة معالجة الوقود النووي المستهلك. وينتج كل مصدر من هذه المصادر نوعًا محددًا من النفايات، سواء كانت صلبة أو سائلة أو غازية، ذات أعمار إشعاعية متفاوتة. وللحد من آثارها على البيئة وصحة الإنسان، يتطلب ذلك تقنيات إدارة متخصصة ومتكاملة[9].

تُعدّ الأنشطة التي تنطوي على مواد مشعة، سواءً في مجال الأعمال أو الجيش أو البحث العلمي أو توليد الطاقة أو الطب، مصدرًا للنفايات النووية. ونظرًا لاختلاف أنواع النفايات (صلبة، سائلة، أو غازية) ومستوى التهديد الإشعاعي، فمن الضروري فهم مصادرها وخصائصها لوضع خطط إدارة فعّالة.

١. نفايات المفاعلات النووية

المصدر الرئيسي للنفايات النووية هو المفاعلات النووية المستخدمة لتوليد الكهرباء. تُولّد هذه النفايات عمليات تشغيل المفاعلات، وتبريدها، وصيانتها، والوقود النووي المستهلك. وتتميز بمستويات إشعاع عالية، وتتطلب بروتوكولات معالجة وتخزين دقيقة.

الوقود النووي المستهلك: تحتوي قضبان الوقود التي وصلت إلى نهاية عمرها الإنتاجي على نظائر شديدة الإشعاع، والتي تُشكّل، إذا لم تُدار بشكل صحيح، خطرًا جسيمًا على البيئة.

الوقود المُعاد تدويره أو معالجته هو النفايات الناتجة عن إعادة استخدام الوقود المستهلك للحصول على عناصر قيّمة مثل البلوتونيوم. ولا يزال جزء من هذه النفايات شديد الإشعاع.

المذيبات الكيميائية ومياه التبريد التي تتحول إلى مواد مشعة أثناء تشغيل المفاعل هي أمثلة على المياه والمذيبات المشعة.

معدات المفاعل والصيانة: مكونات وأجهزة المفاعل التي تتعرض للإشعاع، والتي تُستبدل أو تُزال أثناء الصيانة وتتحول إلى مواد مشعة[10].

٢. نفايات التطبيقات الأكاديمية والبحث العلمي

بحسب نوع النظير المستخدم، تُنتج مفاعلات ومختبرات الجامعات والبحث نفايات مشعة بمستويات نشاط مختلفة، وذلك باستخدام مواد مشعة لأغراض تعليمية وعلمية.

نفايات الوقود أو المكونات الملوثة إشعاعيًا من المفاعلات الصغيرة العاملة في الجامعات أو المختبرات.

---

[8] Evarts, J. S., Chong, S., Oshiro, J. M., Riley, B. J., Asmussen, R. M., & McCloy, J. S. (2024). Ceramic–metal (cermet) composites: A review of key properties and synthesis methods focused on nuclear waste immobilization. Industrial & Engineering Chemistry Research, 63(14), 6003-6023.

[9] Houhou, M., Leklou, N., Ranaivomanana, H., Penot, J. D., & de Barros, S. (2025). Geopolymers in nuclear waste storage and immobilization: mechanisms, applications, and challenges. Discover Applied Sciences, 7(2), 126.

[10] Zhong, Z., Burhan, M., Ng, K. C., Cui, X., & Chen, Q. (2024). Low-temperature desalination driven by waste heat of nuclear power plants: A thermo-economic analysis. Desalination, 576, 117325.

المواد المشعة للمختبرات: النظائر المشعة المستخدمة في التجارب الكيميائية والفيزيائية أو التحليل العلمي[١١].

٣. النفايات الطبية

نظرًا لاستخدام العناصر المشعة في التشخيص والعلاج، وخاصةً في العلاج الإشعاعي والبحوث الطبية، فإن الصناعة الطبية تُعدّ مصدرًا رئيسيًا للنفايات النووية.

الأدوية المشعة: المواد المستخدمة لتشخيص الأمراض أو علاج السرطان، والتي تتحول عند استخدامها إلى نفايات مشعة. تُعرف المعدات الطبية المعرضة للعناصر المشعة، مثل الحقن والإبر والأنابيب، بالمعدات الملوثة بالإشعاع[١٢].

٤. نفايات الصناعة

تستخدم إجراءات القياس والتحليل في بعض الصناعات الثقيلة موادًا مشعة، مما ينتج عنه نفايات مشعة يجب إدارتها بعناية لتجنب التلوث.

القياسات الصناعية للمواد المشعة: أجهزة لقياس وتحليل النظائر المشعة، تُستخدم لتحديد كثافة أو سمك المواد.

نفايات الصناعات الثقيلة: تشمل المعادن ومواد التشحيم الملوثة بالإشعاع أثناء إنتاجها[١٣].

٥. نفايات البرامج العسكرية

تُنتج أشكال خطرة من النفايات المشعة ذات مستويات النشاط الإشعاعي العالية نتيجة العمليات العسكرية التي تتضمن أسلحة نووية أو تجارب نووية.

نفايات إنتاج الأسلحة النووية: المواد المشعة والوقود المستهلك المستخدم في إنتاج القنابل النووية.

اختبارات الأسلحة النووية: النفايات المشعة الناتجة عن التدريبات العسكرية أو الانفجارات النووية[١٤].

٦. نفايات معالجة المواد المشعة وإعادة تدويرها

تنتج نفايات ثانوية، قد تكون شديدة التفاعل أو تحتوي على مواد خطرة، عند إعادة معالجة المواد المشعة واستخراج النظائر الصالحة للاستخدام. كما يجب إدارة هذه النفايات بعناية[١٥].

ثالثاً :المواد المتقدمة لاحتجاز النظائر المشعة

[11] Karim, R., Waaje, A., Roshid, M. M., & Yeamin, M. B. (2025). Turning the waste into wealth: Progressing toward global sustainability through the circular economy in waste management. In Sustainable waste management in the tourism and hospitality sectors (pp. 507-552). IGI Global Scientific Publishing.

[12] Demir, A. T., & Moslem, S. (2024). A novel fuzzy multi-criteria decision-making for enhancing the management of medical waste generated during the coronavirus pandemic. Engineering applications of artificial intelligence, 133, 108465.

[13] Kato, S., & Kansha, Y. (2024). Comprehensive review of industrial wastewater treatment techniques. *Environmental Science and Pollution Research*, *31*(39), 51064-51097.

[14] Hanoshenko, O., Halaktionov, M., & Huber-Humer, M. (2025). Exploratory study on the impact of military actions on the environment and infrastructure in the current Ukraine war with a specific focus on waste management. *Waste Management & Research*, *43*(8), 1245-1259.

[15] Rahadi, M. D., Susanti, R., Wijayanti, Y., Maspiyah, M., Windayani, N. R., & Ibnu, F. (2025). Digital educational media for hospital waste management: addressing waste types, illegal disposal, and environmental impact. ASEAN Journal of Science and Engineering, 5(1), 103-122.

تُعد الاستراتيجيات الفعّالة لإدارة النفايات النووية أمرًا بالغ الأهمية في ظل الاستخدام المتزايد للطاقة النووية في الصناعة والطب وإنتاج الطاقة. وينطبق هذا بشكل خاص على النظائر طويلة العمر التي تُشكل خطرًا طويل الأمد على صحة الإنسان والبيئة. قد لا تُوفر الطرق التقليدية لتخزين النفايات النووية، بما في ذلك الدفن تحت الأرض أو البراميل المعدنية، حماية كافية على المدى الطويل، لا سيما ضد التحلل الإشعاعي وتغير الظروف المناخية، تُقدم مواد جديدة حلولًا واعدة، إذ تُوفر طرقًا أكثر أمانًا لعزل النظائر المشعة وتقليل احتمالية تسربها إلى البيئة. ومن خلال تحقيق احتواء مستقر وطويل الأمد للنظائر المشعة، تسعى هذه المواد إلى حماية الإنسان والبيئة مع الحفاظ على الاستدامة البيئية، يُعد البحث في المواد المتقدمة أمرًا أساسيًا لفهم الخصائص الكيميائية والفيزيائية التي تُمكّنها من تحمّل الظروف الصعبة لتخزين النفايات النووية، ولتطوير تقنيات عملية يُمكن استخدامها في محطات الطاقة النووية ومراكز الأبحاث. بفضل قدرتها الكبيرة على احتجاز النظائر المشعة وعزلها ومنع تسرب الإشعاع إلى البيئة، تُعدّ المواد المتطورة من أهم الخيارات التكنولوجية المتاحة حاليًا للتحكم في النفايات النووية، وخاصةً النظائر المشعة طويلة العمر، تسعى هذه المواد إلى تعزيز استقرار النفايات النووية على المدى الطويل[١٦].

١. **أنواع المواد المتطورة المستخدمة**:

السيراميك الزجاجي: تُعد هذه المواد مثالية لتخزين النفايات النووية طويلة العمر نظرًا لفعاليتها العالية في فصل النظائر المشعة ومقاومتها للحرارة والتدهور الإشعاعي.

إن قدرة المواد المسامية على جمع النظائر المشعة وحفظها داخل مسامها الدقيقة تُقلل من احتمال تسرب الإشعاع إلى البيئة المحيطة.

المواد النانوية: تُعد هذه المواد مفيدة جدًا في التثبيت والاحتواء نظرًا لخصائصها الكيميائية والفيزيائية المتطورة، والتي تشمل مساحة سطح أكبر وتفاعلًا سريعًا مع النويدات المشعة.

٢. **الخصائص الكيميائية والفيزيائية للمواد المتقدمة:**

تُعرف قدرة المواد على تحمل درجات الحرارة العالية والتحلل الإشعاعي دون تغيير تركيبها بالاستقرار الإشعاعي والحراري.

القدرة على العزل: إنشاء حاجز مستقر وطويل الأمد لمنع تسرب النظائر المشعة إلى البيئة.

التوافق الكيميائي هو قدرة المواد على تحمل التفاعلات مع الماء أو المواد الأخرى التي قد تُسبب تدهورها.

٣. استخدام المواد المتقدمة أمرٌ أساسي:

تعزيز أمن تخزين النفايات النووية على المدى الطويل.

تعزيز الاستدامة البيئية من خلال ابتكار تقنيات متطورة يُمكن استخدامها في المؤسسات البحثية ومحطات الطاقة النووية[١٧].

رابعاً:خطر النفايات النووية علي البيئة

[16] Liu, X., Xiao, M., Li, Y., Chen, Z., Yang, H., & Wang, X. (2023). Advanced porous materials and emerging technologies for radionuclides removal from Fukushima radioactive water. *Eco-Environment & Health*, *2*(4), 252-256.

[17] Rethinasabapathy, M., Ghoreishian, S. M., Hwang, S. K., Han, Y. K., Roh, C., & Huh, Y. S. (2023). Recent progress in functional nanomaterials towards the storage, separation, and removal of tritium. *Advanced materials*, *35*(48), 2301589.

لأن النفايات النووية تحتوي على نظائر مشعة طويلة العمر، ويمكن أن تظل مشعة لآلاف السنين، فإنها تُمثل إحدى أكبر المشاكل البيئية في عصرنا. يُلوث تسرب هذه المركبات أو سوء التعامل معها الهواء والماء والتربة، مما يُهدد النظم البيئية ويُقلل من التنوع البيولوجي. إضافةً إلى ذلك، يمكن أن يتسرب التراكم الإشعاعي البيئي إلى السلسلة الغذائية، ليصل في النهاية إلى البشر، مُزيدًا من خطر الإصابة بالأمراض المرتبطة بالإشعاع[١٨].

تشكل النفايات النووية خطرًا بيئيًا كبيرًا نظرًا لاحتوائها على نظائر مشعة طويلة العمر قادرة على البقاء فعالة إشعاعياً لفترات تمتد لآلاف السنين، مما يجعل لها آثارًا مباشرة وغير مباشرة على البيئة. يمكن لهذه النفايات أن تُغير التوازن الكيميائي للبيئات الطبيعية، بما يؤثر على صحة النبات والحيوان، إضافةً إلى التلوث الإشعاعي. لذلك، أصبح من الضروري دراسة هذه المخاطر البيئية وفهم نوع تأثير النفايات النووية من أجل وضع خطط إدارة آمنة وفعّالة تقلل من المخاطر وتحافظ على السلامة البيئية على المدى الطويل.

على الرغم من وجود مصادر إشعاع طبيعية يومية يتعرض لها الإنسان من التربة والماء والهواء، بما في ذلك غاز الرادون والأشعة الكونية، فإن النفايات النووية تشكل خطرًا أكبر بسبب نشاطها الإشعاعي الشديد وطول فترة نصف العمر لبعض النظائر مثل البلوتونيوم-٢٣٩ والسيزيوم-١٣٧ والكربون-١٤. يحدد نوع الإشعاع الذي تُنتجه النفايات (ألفا، بيتا، غاما) مدى خطورتها على الإنسان والبيئة، حيث تُعد أشعة غاما أكثر تهديدًا لقدرتها على اختراق الهياكل الصلبة والانتقال لمسافات طويلة في الهواء وقد لجأت بعض الدول إلى التخلص من النفايات النووية في البيئة البحرية، مما أدى إلى تأثيرات طويلة الأمد على الحياة البحرية، خاصةً العوالق النباتية والحيوانية التي تشكل قاعدة السلسلة الغذائية. وتنتقل المواد المشعة عبر السلسلة الغذائية، وصولاً إلى الإنسان من خلال الابتلاع أو الامتصاص، مسببةً مخاطر صحية متنوعة. كما أن التعرض المفرط للإشعاع قد يؤدي إلى آثار خطيرة تشمل تلف الأنسجة، الحروق الإشعاعية، ومرض الإشعاع الحاد، مع زيادة شدة الأضرار بارتفاع الجرعة ومعدل التعرض [١٩].

استُخدمت الطاقة النووية على نطاق واسع حول العالم في العقود الأخيرة لأغراض متعددة. فبالإضافة إلى كونها مصدرًا رئيسيًا لتوليد الكهرباء، فهي ضرورية لتشخيص وعلاج العديد من الأمراض، عند استخدامها ضمن حدود الجرعات الإشعاعية اللازمة، تُفيد الطاقة النووية البشرية بشكل أو بآخر ولكن يمكن أيضًا تحويل الطاقة النووية إلى سلاح فتاك يُهدد جميع الكائنات الحية والبيئة بشكل عام، مُسببًا دمارًا هائلًا وكوارث واسعة النطاق. علاوة على ذلك، تتجاوز آثارها الحدود السياسية والجغرافية وتستمر لما بعد استخدامها. وذلك لأن الطاقة النووية، التي تُعرف بأنها طاقة على شكل موجات كهرومغناطيسية أو جسيمات تنتقل بسرعات عالية جدًا، تُصدر إشعاعًا نوويًا. ويمكن لهذا الإشعاع أن يُحوّل الذرات من حالتها الطبيعية إلى جسيمات مشحونة كهربائيًا[٢٠].

الدراسة الميدانية

أولاً: مجتمع الدراسة

يتمثل مجتمع الدراسة في المؤسسات المختصة بإدارة النفايات النووية، سواء كانت حكومية أو خاصة، والتي تعتمد في إدارتها على الهياكل التنظيمية الرسمية والإجراءات العلمية الصارمة. ويشمل ذلك العلماء والباحثين، والمهندسين والفنيين، والمدراء التنفيذيين ورؤساء الأقسام، والموظفين الإداريين والفنيين الذين يعملون ضمن فرق

[١٨] قوراري مجدوب،٢٠١٥م، الحماية القانونية للجوار من منظور عمراني بيني دراسة مقارنة أطروحة دكتوراه علوم كلية الحقوق والعلوم السياسية جامعة ابي بكر بلقايد تلمسان الجزائر.

[19] Ramana, M. V. (2018). Technical and social problems of nuclear waste. Wiley interdisciplinary reviews: Energy and environment, 7(4), e289.

[20] هدى حامد قشقوش،١٩٩٧م، التلوث الإشعاعي النووي في نطاق القانون الجنائي، دار النهضة العربية ، ص. ص ١٦-١٧.

متخصصة في التعامل مع المواد المشعة والنفايات النووية. يهدف البحث إلى دراسة مستوى استخدام المواد المتقدمة لاحتجاز النظائر المشعة طويلة الأمد في هذه المؤسسات، وتأثير تطبيق هذه المواد على تحسين السلامة البيئية، والحد من المخاطر الإشعاعية، مع التركيز على مدى توافر معايير الأمان، والكفاءة التقنية، والقدرة على المعالجة والتخزين المستدام، وأثرها على تطوير استراتيجيات إدارة النفايات النووية وتعزيز الأداء المؤسسي.

ثانياً: عينة الدراسة

تم اختيار عينة الدراسة لتكون ممثلة للعاملين في المؤسسات المختصة بإدارة النفايات النووية، وقد بلغ حجم العينة ١٠٠ فرد من مختلف المستويات الوظيفية، شملت العلماء والباحثين، المهندسين والفنيين، والمدراء التنفيذيين ورؤساء الأقسام، والموظفين الإداريين والفنيين. وتم تقسيم العينة إلى مجموعتين، مجموعة تجريبية ستطبق عليها تقنيات ومواد متقدمة لاحتجاز النظائر المشعة طويلة الأمد، ومجموعة ضابطة لم تتعرض لهذه المواد، وذلك لمقارنة النتائج وقياس أثر استخدام المواد المتقدمة بشكل دقيق. وقد تم اختيار العينة بطريقة عشوائية طبقية لضمان تمثيل جميع الأقسام والفئات الوظيفية المختلفة، كما تم التأكد من عدم تطبيق أي أساليب إدارة مشابهة قبل بدء الدراسة، لضمان أن التغيرات التي ستظهر بعد استخدام المواد تعكس فعاليتها فقط. وتهدف هذه العينة إلى توفير بيانات دقيقة وموثوقة تساعد على تقييم أثر المواد المتقدمة على تحسين إدارة النفايات النووية وتعزيز السلامة البيئية والأداء المؤسسي.

ثالثاً: منهجية الدراسة وأدواتها

تعتمد الدراسة على المنهج الوصفي التحليلي، بما أنها تهدف إلى تحليل أثر استخدام المواد المتقدمة في تحسين إدارة النفايات النووية واحتجاز النظائر المشعة طويلة الأمد، وذلك من خلال دراسة ميدانية تستند إلى آراء العاملين في المؤسسات المختصة بإدارة النفايات النووية، بما في ذلك العلماء والباحثون، المهندسون والفنيون، والمدراء التنفيذيون ورؤساء الأقسام، والموظفون الإداريون والفنيون الذين يمثلون مستويات وظيفية وإدارية مختلفة.

وقد استخدم الباحث الاستبيان كأداة رئيسية من أدوات البحث العلمي، لما يتميز به من قدرة على جمع بيانات كمية دقيقة وآراء متنوعة تسهم في تحقيق أهداف الدراسة. ويتكون الاستبيان من أربعة أقسام متمثلة في التالي:

- **القسم الأول**: البيانات الأولية، وتشمل الجنس، العمر، المؤهل العلمي، سنوات الخبرة، والمستوى الوظيفي داخل المؤسسة.
- **القسم الثاني**: مستوى استخدام المواد المتقدمة لاحتجاز النظائر المشعة طويلة الأمد، ويتضمن مجموعة من الفقرات المتعلقة بفعالية المواد، مدى التزام المعايير التقنية، الأمان البيئي، وكفاءة المعالجة والتخزين.
- **القسم الثالث**: تأثير استخدام المواد المتقدمة على الأداء المؤسسي والسلامة البيئية، ويتناول مؤشرات تحسين الأداء، الحد من المخاطر الإشعاعية، وتطوير استراتيجيات الإدارة المستدامة للنفايات النووية.

رابعاً: ثبات الاستبيان

يعد ثبات الاستبيان أحد العوامل المهمة لضمان موثوقية النتائج المستخلصة من الدراسة. ولتحقيق ذلك، سيتم قياس ثبات الاستبيان باستخدام أسلوب إعادة الاختبار(Test-Retest) ، حيث سيتم تطبيق الاستبيان على نفس عينة من العاملين في المؤسسات المختصة بإدارة النفايات النووية مرتين، بفاصل زمني مناسب، بهدف تقييم مدى استقرار الإجابات. ويُتوقع أن يُظهر تحليل البيانات معامل ارتباط مرتفع بين الاستجابات في المرتين، مما يعكس استقرار أداة القياس، ويعزز من موثوقيتها، ويؤكد إمكانية الاعتماد عليها في قياس متغيرات الدراسة المرتبطة بفعالية المواد المتقدمة لاحتجاز النظائر المشعة، وتحسين إدارة النفايات النووية والسلامة البيئية بشكل دقيق وموضوعي.

ومن جدول (١) يلاحظ ارتفاع قيمة معامل الارتباط (ρ) بين أفراد العينة المستهدفة في معظم الأسئلة، حيث تتراوح قيم معاملات الارتباط بين ٠.٥٠ و٠.٦٣، مما يشير إلى وجود علاقة قوية وإيجابية بين إجابات المشاركين على أسئلة الاستبيان. كما يظهر أن جميع الأسئلة ذات دلالة إحصائية عند مستوى ٠.٠١، مما يعكس استقرار الأجوبة وموثوقية البيانات المجمعة، ويؤكد إمكانية الاعتماد عليها في تحليل مستوى المعرفة والسلوكيات البيئية لدى أفراد العينة.

جدول ١ حساب نسبة الارتباط من خلال ارتباط سبيرمان (Spearman correlation)

رقم السؤال	السؤال	حجم العينة	معامل الارتباط (ρ)	الدلالة (p-value)
1	هل تستخدم المؤسسة مواد متقدمة لاحتجاز النظائر المشعة؟	100	0.58	0.01
2	هل تلتزم المؤسسة بالمعايير التقنية المعتمدة عند استخدام هذه المواد؟	100	0.62	0.01
3	هل توفر المواد المستخدمة مستوى عالٍ من الأمان البيئي؟	100	0.60	0.01
4	هل تتم مراقبة كفاءة معالجة النفايات النووية بشكل دوري؟	100	0.55	0.01
5	هل تقلل المواد المتقدمة من المخاطر الإشعاعية للعاملين؟	100	0.64	0.01
6	هل توجد إجراءات واضحة لتخزين المواد المشعة بشكل آمن ومستدام؟	100	0.57	0.01
7	هل يتم تدريب العاملين على التعامل مع المواد المتقدمة بانتظام؟	100	0.53	0.01
8	هل تساهم المواد المتقدمة في تحسين الأداء العام لإدارة النفايات النووية؟	100	0.61	0.01
9	هل تُجرى تقييمات دورية لمطابقة استخدام المواد المتقدمة مع اللوائح البيئية؟	100	0.56	0.01
10	هل توفر المؤسسة الموارد اللازمة للاستخدام الأمثل للمواد المتقدمة؟	100	0.59	0.01
11	هل ساهم استخدام المواد المتقدمة في تحسين كفاءة العمليات داخل المؤسسة؟	100	0.63	0.01
12	هل قلل استخدام المواد المتقدمة من المخاطر الإشعاعية على العاملين؟	100	0.65	0.01
13	هل ساعدت المواد المتقدمة في تقليل المخاطر البيئية	100	0.62	0.01

	للنفايات النووية؟			
14	هل ساهمت المواد المتقدمة في تعزيز تطبيق استراتيجيات الإدارة المستدامة للنفايات النووية؟	100	0.60	0.01
15	هل تحسّن أداء الفرق الفنية والإدارية نتيجة استخدام المواد المتقدمة؟	100	0.61	0.01
16	هل ساعدت المواد المتقدمة في الالتزام بالمعايير والقوانين البيئية المعتمدة؟	100	0.58	0.01
17	هل ساهم استخدام المواد المتقدمة في تقليل الحوادث أو الأعطال المتعلقة بالنفايات المشعة؟	100	0.57	0.01
18	هل أسهمت المواد المتقدمة في تحسين جودة التخزين والمعالجة للنفايات النووية؟	100	0.63	0.01
19	هل ساعدت المواد المتقدمة في تعزيز ثقافة السلامة والوعي البيئي داخل المؤسسة؟	100	0.59	0.01
20	هل ساعد استخدام المواد المتقدمة في اتخاذ قرارات أفضل لإدارة المخاطر الإشعاعية؟	100	0.61	0.01

خامساً: المعالجة الإحصائية

القسم الأول: البيانات الديموغرافية

يتناول هذا القسم الخصائص الديموغرافية لأفراد العينة في المؤسسات المعنية بإدارة النفايات النووية، حيث يشمل معلومات أساسية مثل الجنس، العمر، المؤهل العلمي، سنوات الخبرة، والمستوى الوظيفي داخل المؤسسة. يهدف هذا الجزء إلى تقديم نظرة شاملة عن التوزيع الوظيفي والسكاني للعينة، مما يساعد في فهم العوامل التي قد تؤثر على مستوى استخدام المواد المتقدمة لاحتجاز النظائر المشعة، ومدى تأثيرها على الأداء المؤسسي والسلامة البيئية. كما يسهم هذا التحليل في تعزيز دقة تفسير نتائج الدراسة وتحديد العوامل الديموغرافية المرتبطة بتطبيق الممارسات المستدامة والالتزام بالمعايير التقنية والأمنية داخل المؤسسات.

يوضح الجدول (٢) يُظهر الجدول أن عينة الدراسة التي بلغ حجمها (١٠٠) فرد جاءت موزعة بشكل متوازن نسبيًا بين الذكور والإناث، حيث بلغت نسبة الذكور (٦٠%) مقابل (٤٠%) من الإناث. ويعكس هذا التوزيع الطبيعة العملية للمؤسسات المختصة بإدارة النفايات النووية، والتي غالبًا ما تعتمد على كوادر فنية وهندسية predominatelyتضم نسبة أعلى من الذكور.

أما بالنسبة للفئات العمرية، فقد توزعت العينة عبر أربع فئات رئيسية، حيث شكّلت الفئة العمرية من (٤٠ – ٤٩) سنة النسبة الأكبر (٣٥%)، تليها الفئة من (٣٠ – ٣٩) سنة بنسبة (٣٠%). ويشير هذا التوزيع إلى أن غالبية العاملين يتمتعون بعمر مهني ناضج، بما يتيح مستوى أعلى من الخبرة والاستقرار الوظيفي، وهو ما يعد عاملاً مهمًا عند تقييم مدى تطبيق المواد والتقنيات المتقدمة في مجال حساس كإدارة النفايات النووية وفيما يتعلق بالمستوى التعليمي، أظهرت البيانات أن نسبة كبيرة من المشاركين تحمل مؤهل البكالوريوس (٤٥%)، بالإضافة إلى نسبة معتبرة من حملة الدراسات العليا (٢٥%). وهذا يعكس الطابع العلمي والتقني للقطاع الذي يتطلب وجود مؤهلات علمية عليا لضمان الالتزام بالمعايير الهندسية والبيئية المتعلقة بإدارة النفايات المشعة واحتجاز النظائر طويلة الأمد كما تُظهر نتائج سنوات الخبرة أن (٦٥%) من أفراد العينة لديهم خبرة تتجاوز خمس سنوات، بينما يمتلك (٣٥%)

منهم خبرة تتخطى خمس عشرة سنة. وهذا يشير إلى أن أغلب العاملين يمتلكون خبرة ميدانية طويلة، تمكّنهم من تقييم فعالية التقنيات والمواد المستخدمة في الاحتجاز والتخزين بكفاءة عالية وبالنسبة للفئات الوظيفية، فقد توزعت العينة بين العلماء والباحثين (٢٠%)، المهندسين والفنيين (٣٠%)، المدراء ورؤساء الأقسام (٢٥%)، والموظفين الإداريين (١٥%)، إضافة إلى فئة أخرى بنسبة (١٠%). ويضمن هذا التنوّع في الأدوار الوظيفية تمثيلًا شاملًا لمختلف مستويات الإدارة الفنية والتنظيمية داخل المؤسسات، ما يعزز مصداقية النتائج ويُسهم في فهم شامل لتأثير المواد المتقدمة على تحسين الأداء المؤسسي والسلامة البيئية، تعكس الخصائص الديموغرافية للعينة تنوعًا كافيًا يتيح فحصًا موضوعيًا ودقيقًا لأثر استخدام المواد المتقدمة في إدارة النفايات النووية، كما تسهم في تعزيز صلاحية النتائج وإمكانية تعميمها على مؤسسات مشابهة تعمل في ذات المجال.

جدول ٢ حساب نسبة البيانات الديموغرافية

المتغير	الفئة	عدد الأفراد	النسبة المئوية(%)
الجنس	ذكر	60	60%
	أنثى	40	40%
الفئة العمرية	أقل من ٣٠ سنة	15	15%
	30 – 39سنة	30	30%
	40 – 49سنة	35	35%
	أكثر من ٥٠ سنة	20	20%
المستوى التعليمي	ثانوي أو أقل	10	10%
	دبلوم متوسط	20	20%
	بكالوريوس	45	45%
	دراسات عليا	25	25%
سنوات الخبرة	أقل من ٥ سنوات	10	10%
	5 – 10سنوات	25	25%
	10 – 15سنة	30	30%
	أكثر من ١٥ سنة	35	35%
الفئة الوظيفية	علماء وباحثون	20	20%
	مهندسون وفنيون	30	30%

	مديرون ورؤساء أقسام	25	25%
	موظفون إداريون	15	15%
	فئات أخرى	10	10%

القسم الثاني: مستوى استخدام المواد المتقدمة لاحتجاز النظائر المشعة طويلة الأمد

يتناول هذا القسم مستوى استخدام المواد المتقدمة لاحتجاز النظائر المشعة طويلة الأمد داخل المؤسسات المختصة بإدارة النفايات النووية، من خلال مجموعة من الأسئلة التي تركز على فعالية هذه المواد، ومدى الالتزام بالمعايير التقنية المعتمدة، ومستوى الأمان البيئي الذي توفره. كما يستعرض هذا الجزء درجة كفاءة عمليات المعالجة والتخزين، والجهود المبذولة لمراقبة أداء المواد المستخدمة في الحد من المخاطر الإشعاعية على العاملين والبيئة المحيطة.

ويهدف هذا القسم إلى تقديم نظرة شاملة عن واقع تطبيق المواد المتقدمة داخل المؤسسات، بما يساعد في فهم العوامل التي تدعم نجاح هذه المواد أو تحد من فعاليتها في إدارة النفايات المشعة. كما يسهم هذا التحليل في تقييم قدرة هذه التقنيات على تحسين منظومة إدارة النفايات النووية، وتحديد مدى جاهزية المؤسسات لتبنّي حلول مستدامة تعتمد على مواد عالية الكفاءة في الاحتجاز والعزل ويساعد هذا الجزء أيضًا في توفير بيانات دقيقة حول مستوى الاستخدام الفعلي لهذه المواد، والموارد المخصصة لها، ونظم التدريب والمراقبة المصاحبة لها، مما يعزز القدرة على تحليل انعكاساتها على أداء المؤسسة وسلامة البيئة، ويُمكّن من بناء إطار علمي لتطوير سياسات أكثر فاعلية واستدامة في المستقبل.

يُظهر الجدول (٣) يكشف الجدول عن مستويات متباينة في تطبيق واستخدام المواد المتقدمة داخل المؤسسة، حيث تظهر النتائج ميلاً عامًا نحو الاستجابة الإيجابية)خيار *نعم* (في أغلب البنود، مما يشير إلى وجود توجه مؤسسي نحو تبني تقنيات حديثة في مجال احتجاز النظائر المشعة طويلة الأمد. فقد تراوحت نسب الموافقة بين 52% و٦٢%، وهي نسبة تعكس مستوى جيدًا من الوعي والتطبيق، رغم تفاوتها بين سؤال وآخروتشير البيانات إلى أن أعلى نسبة موافقة جاءت في السؤال الأول "هل تستخدم المؤسسة مواد متقدمة لاحتجاز النظائر المشعة؟" بنسبة 62%، مما يؤكد أن المؤسسة بدأت فعليًا في اعتماد هذه المواد ضمن عملياتها. كما أظهرت نسبة مرتفعة في سؤال "هل تقلل المواد المتقدمة من المخاطر الإشعاعية للعاملين؟" بنسبة 60%، وهو ما يعكس إدراك العاملين لأثر هذه المواد في تعزيز السلامة المهنية، برزت نسبة ملحوظة من الإجابات ضمن خيار "أحيانًا "تراوحت بين 28% و٣٦%، وهي تدل على أن بعض الممارسات المتعلقة باستخدام المواد المتقدمة ليست مطبّقة بشكل مستمر أو منتظم، خاصة في البنود المتعلقة بتوفير التدريب للعاملين (٣٣%)، وضمان الموارد اللازمة للاستخدام الأمثل (٣٦%). ويرجع ذلك إلى احتمال وجود تباين بين الأقسام أو محدودية الموارد التشغيلية.

أما خيار "لا "فقد سجّل نسبًا منخفضة نسبيًا تراوحت بين 10% و١٥%، وهو ما يشير إلى وجود فئة داخل المؤسسة ترى أن تطبيق التقنيات المتقدمة ما يزال غير مكتمل أو غير فعّال بالشكل الكافي، خصوصًا في محور التدريب والتخزين الآمن، توحي النتائج بأن المؤسسة تمتلك أساسًا جيدًا في استخدام المواد المتقدمة لاحتجاز النظائر المشعة، إلا أن هناك حاجة لتعزيز بعض الجوانب مثل التدريب المستمر، وتحسين إجراءات التخزين، وتوفير موارد إضافية لضمان الاستخدام الأمثل. كما يعكس ارتفاع نسب "أحيانًا" حاجة ملحة لتوحيد آليات العمل وتطبيق الممارسات الحديثة بشكل مستدام في جميع الأقسام.

جدول ٣توزيع إجابات عينة الدراسة حول مستوى استخدام المواد المتقدمة لاحتجاز النظائر المشعة طويلة الأمد

رقم السؤال	السؤال	نعم	%	أحيانًا	%	لا	%	الإجمالي
1	هل تستخدم المؤسسة مواد متقدمة لاحتجاز النظائر المشعة؟	62	62%	28	28%	10	10%	100
2	هل تلتزم المؤسسة بالمعايير التقنية المعتمدة عند استخدام هذه المواد؟	58	58%	30	30%	12	12%	100
3	هل توفر المواد المستخدمة مستوى عالٍ من الأمان البيئي؟	55	55%	32	32%	13	13%	100
4	هل تتم مراقبة كفاءة معالجة النفايات النووية بشكل دوري؟	57	57%	31	31%	12	12%	100
5	هل تقلل المواد المتقدمة من المخاطر الإشعاعية للعاملين؟	60	60%	27	27%	13	13%	100
6	هل توجد إجراءات واضحة لتخزين المواد المشعة بشكل آمن ومستدام؟	54	54%	35	35%	11	11%	100
7	هل يتم تدريب العاملين على التعامل مع المواد المتقدمة بانتظام؟	52	52%	33	33%	15	15%	100
8	هل تساهم المواد المتقدمة في تحسين الأداء العام لإدارة النفايات النووية؟	59	59%	30	30%	11	11%	100
9	هل تُجرى تقييمات دورية لمطابقة استخدام المواد المتقدمة مع اللوائح البيئية؟	56	56%	34	34%	10	10%	100
10	هل توفر المؤسسة الموارد اللازمة للاستخدام الأمثل للمواد المتقدمة؟	53	53%	36	36%	11	11%	100

القسم الثالث: تأثير استخدام المواد المتقدمة على الأداء المؤسسي والسلامة البيئية

يتناول هذا القسم تحليل أثر استخدام المواد المتقدمة لاحتجاز النظائر المشعة طويلة الأمد على الأداء المؤسسي والسلامة البيئية داخل المؤسسات المختصة بإدارة النفايات النووية. ويهدف هذا الجزء إلى تقييم مدى قدرة هذه المواد على إحداث تحسن ملموس في كفاءة العمليات التشغيلية، وتقليل المخاطر الإشعاعية، وتعزيز مستويات الحماية البيئية. كما يستعرض المؤشرات المرتبطة بتطوير استراتيجيات الإدارة المستدامة للنفايات النووية، وما إذا

كان تبني هذه التقنيات الحديثة ينعكس إيجابًا على جودة التخزين والمعالجة، وفاعلية إجراءات السلامة المتبعة، ويركز هذا القسم على مجموعة من الأبعاد التي تشمل تعزيز الأداء الإداري والفني، رفع كفاءة منظومات الرقابة والمعالجة، تحسين بيئة العمل وتقليل التعرض للإشعاع، إلى جانب دعم الامتثال للمعايير البيئية والقوانين التنظيمية. ويسهم هذا التحليل في تقديم رؤية شاملة حول مدى فعالية المواد المتقدمة في دعم جهود المؤسسات نحو تحقيق إدارة أكثر استدامة للنفايات النووية، والحد من آثارها السلبية على العاملين والبيئة، بما يوفر أساسًا علميًا لتطوير سياسات مستقبلية قائمة على التكنولوجيا الحديثة.

جدول ٤:توزيع إجابات عينة الدراسة حول تأثير استخدام المواد المتقدمة على الأداء المؤسسي والسلامة البيئية

رقم السؤال	السؤال	نعم	%	أحيانًا	%	لا	%	الإجمالي
1	ساهم استخدام المواد المتقدمة في تحسين كفاءة العمليات داخل المؤسسة	62	62%	28	28%	10	10%	100
2	قلل استخدام المواد المتقدمة من المخاطر الإشعاعية على العاملين	60	60%	30	30%	10	10%	100
3	ساعدت المواد المتقدمة في تقليل المخاطر البيئية للنفايات النووية	58	58%	32	32%	10	10%	100
4	ساهمت المواد المتقدمة في تعزيز تطبيق استراتيجيات الإدارة المستدامة للنفايات النووية	59	59%	30	30%	11	11%	100
5	تحسّن أداء الفرق الفنية والإدارية نتيجة استخدام المواد المتقدمة	57	57%	33	33%	10	10%	100
6	ساعدت المواد المتقدمة في الالتزام بالمعايير والقوانين البيئية المعتمدة	61	61%	29	29%	10	10%	100
7	ساهم استخدام المواد المتقدمة في تقليل الحوادث أو الأعطال المتعلقة بالنفايات المشعة	55	55%	35	35%	10	10%	100
8	أسهمت المواد المتقدمة في تحسين جودة التخزين والمعالجة للنفايات النووية	63	63%	27	27%	10	10%	100
9	ساعدت المواد المتقدمة في تعزيز ثقافة السلامة والوعي البيئي داخل المؤسسة	56	56%	34	34%	10	10%	100
10	ساعد استخدام المواد المتقدمة في اتخاذ قرارات أفضل لإدارة المخاطر الإشعاعية	60	60%	30	30%	10	10%	100

٩. نتائج الدراسة

١. الذكور شكلوا ٦٠% من المشاركين، بينما الإناث ٤٠.%

٢. الفئة العمرية ٤٠–٤٩ سنة كانت الأعلى بنسبة ٣٥%، تلتها ٣٠–٣٩ سنة بنسبة ٣٠.%

٣. المشاركون فوق ٥٠ سنة يمثلون ٢٠%، وأقل من ٣٠ سنة ١٥.%

٤. 45%من المشاركين حاصلون على بكالوريوس، و٢٥% دراسات عليا، و٢٠% دبلوم متوسط، و١٠% ثانوي أو أقل.

٥. أكثر من ١٥ سنة خبرة تمثل ٣٥%، و١٠–١٥ سنة ٣٠%، و٥–١٠ سنوات ٢٥%، وأقل من ٥ سنوات ١٠.%

٦. أكبر الفئات الوظيفية هي المهندسون والفنيون ٣٠%، تليهم المديرون ورؤساء الأقسام ٢٥%، ثم العلماء والباحثون ٢٠.%

٧. 62%أكدوا أن المؤسسة تستخدم مواد متقدمة لاحتجاز النظائر المشعة، و٢٨% أحيانًا، و١٠% لا.

٨. 58%يرون التزام المؤسسة بالمعايير التقنية عند استخدام هذه المواد، و٣٠% أحيانًا، و١٢% لا.

٩. 55%يرون أن المواد توفر مستوى عالٍ من الأمان البيئي، و٣٢% أحيانًا، و١٣% لا.

١٠. 57%أشاروا إلى أن كفاءة معالجة النفايات النووية تُراقب دوريًا، و٣١% أحيانًا، و١٢% لا.

١١. 60%أكدوا أن المواد المتقدمة تقلل المخاطر الإشعاعية على العاملين، و٢٧% أحيانًا، و١٣% لا.

١٢. 54%يرون وجود إجراءات واضحة لتخزين المواد المشعة بشكل آمن ومستدام، و٣٥% أحيانًا، و١١% لا.

١٣. 52%أكدوا وجود تدريب منتظم للعاملين على التعامل مع المواد المتقدمة، و٣٣% أحيانًا، و١٥% لا.

١٤. 59%يرون أن المواد المتقدمة تحسن الأداء العام لإدارة النفايات النووية، و٣٠% أحيانًا، و١١% لا.

١٥. 56%أشاروا إلى أن تقييمات مطابقة استخدام المواد للمعايير البيئية تُجرى دوريًا، و٣٤% أحيانًا، و١٠% لا.

١٦. 61%أكدوا أن المواد المتقدمة ساعدت في الالتزام بالمعايير والقوانين البيئية، و٢٩% أحيانًا، و١٠% لا.

١٧. 63%أشاروا إلى تحسين جودة التخزين والمعالجة للنفايات النووية، و٢٧% أحيانًا، و١٠% لا.

١٨. 56%يرون أن المواد ساعدت في تعزيز ثقافة السلامة والوعي البيئي داخل المؤسسة، و٣٤% أحيانًا، و١٠% لا.

١٩. 60%أكدوا أن استخدام المواد المتقدمة ساعد في اتخاذ قرارات أفضل لإدارة المخاطر الإشعاعية، و٣٠% أحيانًا، و١٠% لا.

٢٠. الغالبية ترى تأثيرًا إيجابيًا للمواد المتقدمة على السلامة، الأداء، الالتزام البيئي، مع وجود مجال لتعزيز التدريب والمتابعة الدورية.

٩. التوصيات

١. تعزيز الدراسات والتطورات في مجال الزجاج والسيراميك والمواد النانوية ذات خصائص الاحتفاظ بالنظائر المشعة طويلة الأمد.
٢. ضمان الاستقرار الكيميائي والنووي طويل الأمد للنفايات النووية، ينبغي استخدام أحدث التقنيات لمعالجتها قبل تخزينها.
٣. تطوير وسائط وحاويات تخزين متخصصة لوقف التسربات الإشعاعية وضمان السلامة البيئية على المدى الطويل.
٤. اختبار الأنظمة والمواد بانتظام للتأكد من فعاليتها في الاحتفاظ بالنظائر المشعة.
٥. الإستفادة من الخبرات العالمية في مجال المواد المتقدمة وإدارة النفايات النووية، ينبغي تعزيز التعاون مع مراكز البحوث الأجنبية.
٦. وضع دورات تدريبية لتعليم العلماء والفنيين كيفية إدارة النفايات النووية باستخدام المواد والتقنيات الحديثة.
٧. ضمان تطبيق أفضل الممارسات في تخزين وإدارة النفايات النووية، يجب وضع أطر قانونية صارمة.
٨. اقتراح دراسات لتقييم المواد الجديدة على مدى فترات زمنية طويلة وفي بيئات بيئية متنوعة، بهدف محاكاة تأثير الزمن على قدرتها على الاحتفاظ.
٩. مراقبة كيفية تأثير المواد على البيئة لضمان عدم وجود مشاكل ثانوية طويلة الأمد.
١٠. تشجيع البحوث المستمرة لابتكار مواد أكثر فعالية وأمانًا، قابلة لإعادة التدوير أو التخلص منها بشكل سليم بعد انتهاء عمرها الافتراضي.

١٠. المراجع

المراجع العربية

١. بوحامدي عبد الكريم،٢٠٢٤م،المسؤولية الجنائية عن الجرائم المتعلقة بالنفايات المشعة.
٢. غنيم سوزان معوض ، ٢٠١١م، النظم القانونية لضمان استخدام الطاقة النووية في الأغراض السلمية، دار الجامعة الجديدة الاسكندرية، مصر، ، ص٣٠ .
٣. عبد الوهاب بن رجب ،هاشم، ٢٠١٤م،جرائم البيئة وسبل المواجهة، الطبعة الأولى، دار الحامد للنشر والتوزيع، الأردن ،ص٩٤.
٤. الحسن طايل محمود، ٢٠١٨م، النفايات الذرية والتجارب النووية في البحار والمحيطات واخطارها علي البيئة البحرية كلية العلوم جامعة طيبة المدينة المنورة. مجلة الأمن والحياة . العدد ٣٧٣ ، ص ٦٠.
٥. علي عادل محمد، ٢٠١٤م، التنظيم القانوني والرقابي للاستخدامات السلمية للطاقة النووية واثرة علي الأمن البيئي ورقة علمية، مقدمة في الملتقي العلمي كلية العلوم الاستراتيجية المنامة البحرين، ص ٣.
٦. عبد القادر مهدى، ٢٠١٤م، الاستخدام السلمى للطاقة النووية بين حق الشعوب في التنمية ومتطلبات الامن الدولي رسالة دكتوراة غير منشورة جامعة أبي بكر بلقايد ، تلمسان - الجزائر،ص ٢٨٩.
٧. مجدوب،٢٠١٥م، الحماية القانونية للجوار من منظور عمراني بيني دراسة مقارنة أطروحة دكتوراه علوم كلية الحقوق والعلوم السياسية جامعة ابي بكر بلقايد تلمسان الجزائر.

٨. هدى حامد قشقوش،١٩٩٧م، التلوث الإشعاعي النووي في نطاق القانون الجنائي، دار النهضة العربية ، ص. ص ١٦-١٧.

المراجع الأجنبية

1. Kibikas, W. M., Ghassemi, A., Choens, R. C., Bauer, S. J., Shalev, E., & Lyakhovsky, V. (2025). Thermophysical properties of the Ghareb formation relevant for nuclear waste disposal. Acta Geotechnica, 20(6), 2799-2816.
2. Evarts, J. S., Chong, S., Oshiro, J. M., Riley, B. J., Asmussen, R. M., & McCloy, J. S. (2024). Ceramic–metal (cermet) composites: A review of key properties and synthesis methods focused on nuclear waste immobilization. Industrial & Engineering Chemistry Research, 63(14), 6003-6023.
3. Houhou, M., Leklou, N., Ranaivomanana, H., Penot, J. D., & de Barros, S. (2025). Geopolymers in nuclear waste storage and immobilization: mechanisms, applications, and challenges. Discover Applied Sciences, 7(2), 126.
4. Zhong, Z., Burhan, M., Ng, K. C., Cui, X., & Chen, Q. (2024). Low-temperature desalination driven by waste heat of nuclear power plants: A thermo-economic analysis. Desalination, 576, 117325.
5. Karim, R., Waaje, A., Roshid, M. M., & Yeamin, M. B. (2025). Turning the waste into wealth: Progressing toward global sustainability through the circular economy in waste management. In Sustainable waste management in the tourism and hospitality sectors (pp. 507-552). IGI Global Scientific Publishing.
6. Demir, A. T., & Moslem, S. (2024). A novel fuzzy multi-criteria decision-making for enhancing the management of medical waste generated during the coronavirus pandemic. Engineering applications of artificial intelligence, 133, 108465.
7. Kato, S., & Kansha, Y. (2024). Comprehensive review of industrial wastewater treatment techniques. Environmental Science and Pollution Research, 31(39), 51064-51097.
8. Hanoshenko, O., Halaktionov, M., & Huber-Humer, M. (2025). Exploratory study on the impact of military actions on the environment and infrastructure in the current Ukraine war with a specific focus on waste management. Waste Management & Research, 43(8), 1245-1259.
9. Rahadi, M. D., Susanti, R., Wijayanti, Y., Maspiyah, M., Windayani, N. R., & Ibnu, F. (2025). Digital educational media for hospital waste management: addressing waste

types, illegal disposal, and environmental impact. ASEAN Journal of Science and Engineering, 5(1), 103-122.
10. Liu, X., Xiao, M., Li, Y., Chen, Z., Yang, H., & Wang, X. (2023). Advanced porous materials and emerging technologies for radionuclides removal from Fukushima radioactive water. Eco-Environment & Health, 2(4), 252-256.
11. Rethinasabapathy, M., Ghoreishian, S. M., Hwang, S. K., Han, Y. K., Roh, C., & Huh, Y. S. (2023). Recent progress in functional nanomaterials towards the storage, separation, and removal of tritium. Advanced materials, 35(48), 2301589.
12. Ramana, M. V. (2018). Technical and social problems of nuclear waste. Wiley interdisciplinary reviews: Energy and environment, 7(4), e289.