دراسة لحساب سماكة الطبقة المتأثرة بالإشعاع لمواد حاوية على عنصر الروديوم في التطبيقات النووية

ملك العلي[1]

الملخص

إن هذه الدراسة تتناول تطبيق دراسة لتقدير التضرر الإشعاعي لعنصر الروديوم عند تعرّضه لتدفق نيوتروني حراري، في ظروف تماثل بيئة التشغيل داخل المفاعلات النووية. ينطلق النموذج من فكرة بسيطة لكنها فعّالة: تتبّع تناقص عدد النوى القابلة للتفاعل مع الزمن، اعتماداً على مقطع التفاعل والتدفق النيوتروني، ثم تحويل هذا التناقص إلى مؤشر فيزيائي ملموس يتمثل في سماكة الطبقة المتأثرة بالإشعاع. هذا الربط بين السلوك النووي والنتيجة يمنح النموذج قيمة تطبيقية واضحة. اعتمد التطبيق على بيانات لعنصر الروديوم، مع حساب سماكة الطبقة المتأثرة بالإشعاع عبر فترات تشغيل مختلفة. هذا الحساب يعكس الطبيعة التراكمية لعمليات التفاعل النووي، حيث تصبح المادة أقل قابلية للتفاعل بمرور الزمن، وهو ما ينعكس مباشرة على معدل التضرر. ومن اللافت أن الروديوم يُظهر معدل تضرر أقل مقارنة بمواد امتصاص شائعة، وهو ما يفتح المجال لاستخدامه في تطبيقات تتطلب استقراراً طويل الأمد، مثل كواشف النيوترونات أو الطلاءات الواقية في البيئات الإشعاعية. كما يبرز النموذج المستخدم كأداة تقدير أولية يمكن البناء عليها في دراسات أكثر تعقيداً.

الكلمات المفتاحية: الروديوم، سماكة الطبقة المتأثرة بالإشعاع، تدفق نيوتروني حراري.

[1] ماجستير في الفيزياء النظرية.

A Study to Calculate the Thickness of the Radiation-Affected Layer in Rhodium-Containing Materials for Nuclear Applications

Malak Al-Ali[2]

Abstract

This study investigates the application of a model to estimate the radiation damage of rhodium under thermal neutron flux conditions, mimicking the operating environment of nuclear reactors. The model is based on a simple yet effective concept: tracking the decrease in the number of reactive nuclei over time, depending on the reaction cross-section and neutron flux, and then converting this decrease into a tangible physical indicator: the thickness of the radiation-affected layer. This correlation between nuclear behavior and outcome gives the model clear practical value. The application relies on rhodium data, calculating the thickness of the radiation-affected layer over different operating periods. This calculation reflects the cumulative nature of nuclear reactions, where the material becomes less reactive over time, which directly impacts the rate of damage. Notably, rhodium exhibits a lower degradation rate compared to common absorbers, opening the door to its use in applications requiring long-term stability, such as neutron detectors or protective coatings in radiation environments. The model also stands out as a preliminary estimation tool that can be built upon in more complex studies.

Keywords: Rhodium, radiation-affected layer thickness, thermal neutron flux.

1. مقدمة

[2] Master in Theoretical Physics.

تُعد بيئة التشغيل الفيزيائية داخل قلب المفاعلات النووية واحدةً من أعقد البيئات الهندسية وأكثرها قسوة في العصر الحديث؛ نظراً لما تفرضه من تحديات جسيمة ناتجة عن التعرّض المستمر والمكثف لتدفقات نيوترونية عالية الكثافة وطاقات إشعاعية كبيرة. هذه الظروف الصارمة لا تكتفي بتهديد الأسطح الخارجية للمواد الإنشائية والوظيفية فحسب، بل تمتلك نفاذية عالية تُمكّنها من التغلغل عميقاً في بنيتها الذرية وشبكتها البلورية. ويؤدي هذا التغلغل إلى تشوهات مجهرية وتغيرات فيزيائية تدريجية قد تبدو غير مرئية أو حرجة في المراحل الأولى من التشغيل، لكنها تتراكم بشكل مطرد ومتسارع مع مرور الزمن التشغيلي للمفاعل [1].

ومع استمرار العمليات وتوالي دورات الوقود، تنعكس هذه التغيرات الذرية الكامنة بشكل مباشر على الخصائص الميكانيكية والفيزيائية الكلية للمادة؛ ويتجلى ذلك بوضوح في الفقدان التدريجي لقيم الصلادة، وانخفاض متانة الكسر، وتراجع قدرة البنية على مقاومة التآكل الإجهادي والكيميائي، مما يضع السلامة الهيكلية للمكونات برمتها على المحك [2].

وفي هذا السياق، يبرز مفهوم "التآكل الإشعاعي" كأحد أخطر التحديات الفيزيائية المرتبطة بهذه البيئة القاسية، حيث يُعتبر نتيجة حتمية ومباشرة للتفاعلات النووية المجهرية المستمرة، لا سيما تفاعلات أسر وامتصاص النيوترونات الحرارية. فعندما تمتص نواة العنصر المكون للمادة نيوتروناً وارداً، تدخل في حالة من عدم الاستقرار الطاقي المؤقت (نواة مركبة مثارة)، والتي تسارع إلى التخلص من طاقة الإثارة الزائدة عبر انبعاث جسيمات أولية أو إطلاق أشعة غاما الكهرومغناطيسية؛ مما يتسبب في تحولات نظيرية تؤدي بدورها إلى فقدان تدريجي في كتلة المادة الفعالة واستقرارها البنيوي.

ومع تكرار هذه الآليات النووية تحت التدفق الإشعاعي المستمر، يكتسب هذا التدمير طبيعة تراكمية حادة يظهر أثرها الفيزيائي الأكبر بوضوح في الطبقات السطحية القريبة من مجرى التدفق النيوتروني، مشكلاً طبقة متآكلة إشعاعياً تفقد خواصها الأصلية بمرور الوقت. بناءً على ذلك، فإن استدامة تشغيل الأنظمة النووية الحديثة تفرض على الباحثين ومصممي المفاعلات استكشاف واجهات

فيزيائية ومواد متقدمة تجمع بين الكفاءة النووية العالية (من حيث المقاطع العرضية للتفاعل) والاستقرار البنيوي طويل الأمد ضد التآكل الإشعاعي [3].

من هذا المنطلق، يبرز عنصر الروديوم كعنصر يستحق الدراسة والتحليل المعمق لعدة أسباب جوهرية؛ فهو يتمتع بكثافة فيزيائية مرتفعة، واستقرار كيميائي ملحوظ يقاوم الأكسدة، بالإضافة إلى خواص ميكانيكية جيدة تمنحه صلادة بنيوية في مواجهة الإجهادات [4]. وعلى الرغم من هذه المقومات التي ترشحه كخيار مثالي للاستخدام في البيئات الإشعاعية الخطرة—سواء في أنظمة التحكم أو الطلاءات الواقية—فإن سلوكه الكمي وآليات مقاومته للتآكل الإشعاعي تحت التدفق النيوتروني لم تُدرس بعد بشكل كافٍ من منظور تطبيقي تحليلي يربط سماكة التآكل بزمن التشغيل. وهو الفراغ البحثي والعملي الذي تسعى هذه الدراسة التطبيقية إلى معالجته وسده كمياً [5].

2. مشكلة البحث

تتبلور المشكلة البحثية في غياب العلاقات والروابط التحليلية الدقيقة التي تصف وتتنبأ بسلوك التضرر الإشعاعي في المواد المتقدمة المستخدمة داخل المفاعلات النووية—كعنصر الروديوم—تحديداً عند محاولة ربط سماكة الطبقة المتأثرة بالإشعاع بزمن التشغيل الفعلي ومعدل التدفق النيوتروني. علاوة على ذلك، فإن معظم الجهود البحثية السابقة قد صبّت تركيزها على تقييم المواد الشائعة والمستهلكة في المفاعلات (مثل البورون والكادميوم)، دون التوسع الكافي في دراسة العناصر التي تمتلك خصائص بنيوية ونووية واعدة. هذا التركيز المحدود خلق فجوة معرفية وتطبيقية واضحة حول مدى استقرار الروديوم وعمره التشغيلي الحقيقي تحت ظروف التشعيع النيوتروني الحراري المكثف.

3. هدف البحث

يهدف هذا البحث بشكل رئيسي إلى تطبيق نموذج تحليلي رياضي لتقدير وحساب سماكة الطبقة المتأثرة بالإشعاع لعنصر الروديوم عند تعرّضه لتدفق نيوتروني حراري يحاكي بيئة التشغيل الحقيقية داخل قلب المفاعلات النووية. ويتفرع من هذا الهدف:

1. تتبّع ديناميكية تناقص النوى القابلة للتفاعل مع الزمن كتابع للمقطع العرضي للتفاعل والتدفق النيوتروني.
2. تحويل هذا التناقص النووي المجهري إلى مؤشر فيزيائي هندسي ملموس (سماكة الطبقة المتأثرة بالإشعاع Δx).
3. تقييم الكفاءة والاستقرار البنيوي للروديوم مقارنة بالمواد الماصة الشائعة لبيان مدى جدوى اعتماده في الأنظمة النووية المتقدمة.

4. أهمية البحث

تنبع أهمية البحث من الجوانب العلمية والتطبيقية، يقدّم البحث أداة تقدير أولية ونموذجاً تحليلياً مبسطاً وفعالاً يربط مباشرة بين السلوك النووي المجهري (تغير عدد النوى) والنتيجة الفيزيائية المادية المباشرة (سماكة الطبقة المتأثرة بالإشعاع)، مما يشكل أساساً يمكن البناء عليه في دراسات نمذجة أكثر تعقيداً. كما يفتح البحث آفاقاً تكنولوجية جديدة لاستخدام الروديوم في تطبيقات نووية حرجة تتطلب استقراراً طويلاً الأمد ومقاومة عالية للتدهور البنيوي مقارنة بالمواد التقليدية سريعة التآكل.

5. دراسة مرجعية

تشير الدراسات في علم المواد النووية إلى أن التآكل الإشعاعي لا يحدث بمعزل عن بقية الظواهر المجهرية، بل يرتبط بشكل وثيق بإنتاج العيوب البلورية. فعند اصطدام النيوترونات بالنوى، تنتقل طاقة حركية تؤدي إلى إزاحة الذرات من مواقعها الشبكية، مما يخلق عيوباً في الشبكة البلورية تتمثل في الفراغات النقطية والتشوهات الخطية. ومع تراكم هذه العيوب، تبدأ البنية المادية بفقدان انتظامها، وهو ما ينعكس في النهاية على السطح [4].

ولفهم هذا السلوك بشكل كمي، تعتمد النماذج التحليلية على معادلات معدل التفاعل النووي، حيث يُعبّر عن تناقص عدد النوى بدلالة مقطع التفاعل والتدفق النيوتروني. وقد أثبت هذا النهج فعاليته في توصيف مواد معروفة مثل البورون والكادميوم، خاصة في تطبيقات التحكم بالمفاعلات [6]. ومع

ذلك، فإن هذه المواد تعاني من معدلات تضرر مرتفعة نسبياً، وهو ما يحد من عمرها التشغيلي. هذا التحدي دفع الباحثين إلى البحث عن مواد بديلة تحقق توازناً أفضل بين الأداء النووي والاستقرار البنيوي [7]. في هذا الإطار، تبرز المعادن النبيلة، مثل الروديوم[3]، كخيار واعد. فاستقرارها الإلكتروني وقوة روابطها المعدنية يقللان من قابلية حدوث تغيرات بنيوية حادة، حتى في ظروف إشعاعية قاسية نسبياً [8]. على الرغم من استخدام الروديوم في بعض التطبيقات النووية—خصوصاً في كواشف النيوترونات والطلاءات الواقية—فإن الربط الكمي بين خصائصه النووية وسلوكه تحت الإشعاع لا يزال محدوداً، وهو ما يبرز أهمية هذه الدراسة [9]. كما تؤكد الدراسات الحديثة في مجال المواد المتقدمة ضرورة تطوير مواد تجمع بين الكفاءة النووية والاستقرار طويل الأمد، وهو ما يعزز من أهمية استكشاف خصائص الروديوم بشكل أعمق [4].

6. آلية حدوث التغيير في بنية المواد الحاوية على الروديوم

لندرس تفاعل نواة ${}^{103}_{45}\mathrm{Rh}_{58}$ مثلاً في أجزاء المفاعل النووي نتيجة سقوط حزمة من النيوترونات الحرارية عليها، إما أن يكون تشتتاً مرناً من النوع (n,n)؛ أي:

$$\mathrm{n} + {}^{103}_{45}\mathrm{Rh}_{58} \rightarrow {}^{103}_{45}\mathrm{Rh}_{58} + \mathrm{n}$$

أو غير مرنٍ من النوع $(\mathrm{n},\mathrm{n})^{*}$؛ أي:

$$\mathrm{n} + {}^{103}_{45}\mathrm{Rh}_{58} \rightarrow {}^{103}_{45}\mathrm{Rh}^{*}_{58} + \mathrm{n}\ ; {}^{103}_{45}\mathrm{Rh}^{*}_{58} \rightarrow {}^{103}_{45}\mathrm{Rh}_{58} + \gamma$$

أو أن يكون تفاعل امتصاص أو أسر للنيوترون من قبل النواة، فينتج عن ذلك نواة مركبة مثارة $({}^{104}_{45}\mathrm{Rh}^{**}_{59})^{*}$، والتي تتخلص مباشرة من خلال عملية التفاعل من جزء من طاقة الإثارة على شكل إشعاع غاما بعمر نصف من رتبة $10^{-12}\mathrm{sec}$، الذي يسمى بإشعاع غاما الفوري، انظر **الشكل (1)**، ونعبر عن ذلك بالمعادلة الآتية:

$$\mathrm{n} + {}^{103}_{45}\mathrm{Rh}_{58} \rightarrow ({}^{104}_{45}\mathrm{Rh}^{**}_{59})^{*} \rightarrow {}^{104}_{45}\mathrm{Rh}^{**}_{59} + \gamma_1 \qquad (a)$$

[3] من فصيلة البلاتين.

حيث إن النواة $^{104}_{45}Rh^{**}_{59}$ الناتجة عن تفكك النواة المركبة على الأغلب لا تتخلص من كامل طاقة الإثارة؛ أي أنها ما تزال نشيطة إشعاعياً. تنتقل هذه النواة إلى حالة أكثر استقراراً بفصل أحد مكوناتها، فتتخلص من جزء ثانٍ من طاقة الإثارة، ثم ما تبقى من طاقة الإثارة تصدره على شكل إشعاع غاما مرافق كما هو مبيّن في المعادلات الآتية:

$$^{104}_{45}Rh^{**}_{59} \rightarrow {}^{1}_{0}n + {}^{103}_{45}Rh^{*}_{58} \rightarrow {}^{1}_{0}n + {}^{103}_{45}Rh_{58} + \gamma_2 \qquad (b)$$

$$^{104}_{45}Rh^{**}_{59} \rightarrow 2{}^{1}_{0}n + {}^{102}_{45}Rh^{*}_{57} \rightarrow 2{}^{1}_{0}n + {}^{102}_{45}Rh_{57} + \gamma_3 \qquad (c)$$

$$^{104}_{45}Rh^{**}_{59} \rightarrow \beta^- + {}^{104}_{46}Pd^{*}_{58} \rightarrow \beta^- + {}^{104}_{46}Pd_{58} + \gamma_4 \qquad (d)$$

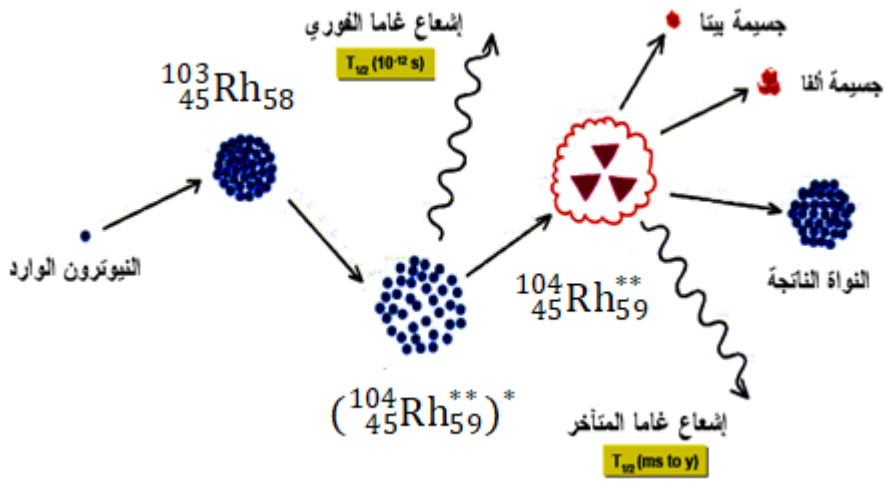
$$^{104}_{45}Rh^{**}_{59} \rightarrow \beta^+ + {}^{104}_{44}Ru^{*}_{60} \rightarrow \beta^+ + {}^{104}_{44}Ru_{60} + \gamma_5 \qquad (e)$$

$$^{104}_{45}Rh^{**}_{59} \rightarrow {}^{1}_{1}P + {}^{103}_{44}Ru^{*}_{59} \rightarrow {}^{1}_{1}P + {}^{103}_{44}Ru_{59} + \gamma_6 \qquad (f)$$

$$^{104}_{45}Rh^{**}_{59} \rightarrow \alpha + {}^{100}_{43}Tc^{*}_{57} \rightarrow \alpha + {}^{100}_{43}Tc_{57} + \gamma_7 \qquad (g)$$

إن إشـــعاع غاما $\gamma_i (i = 2,3, \dots)$ المرافق هذا يكون له طاقة محددة مميزة للنواة المصـــدرة له. يسمى عادة هذا الإشعاع بإشعاع غاما المتأخر، لأنه ينتج بعد زمن طويل من صدور إشعاع غاما الفوري. إن عمر النصف لإشعاع غاما المتأخر يتراوح بين الميلي ثانية وآلاف السنين، انظر **الشكل (1)**.

ما يهمنا من كافة تفاعلات النيوترونات الحرارية السابقة، الممكنة فقط تلك التي تساهم في تغيير بنية النوى الأصلية؛ وتحولها إلى نوى أخرى، أي تؤدي إلى تخريبها في أجزاء المفاعل النووي.



الشكل (1): رسم تمثيلي لعملية تشكل النواة المركبة $(^{104}_{45}Rh^{**}_{59})^{*}$ التي تصدر إشعاع غاما الفوري. فينتج عن ذلك نواة نشيطة إشعاعياً تصدر إشعاعاً مثل ألفا أو بيتا وغيرها يرافقها عادةً إشعاع غاما المتأخر، وتتحول النواة أخيراً إلى نواة مستقرة.

7. الدراسة النظرية

جرى الافتراض، في هذه الدراسة هذه أن النيوترونات تتفاعل بشكل عشوائي مع المواد التي تصنع منها المفاعلات النووية، ولا يوجد تفضيل لاتجاه معين. وأن كثافة هذه المواد متجانسة، عندئذٍ، إن عدد النوى في واحدة الحجم يعطى بالعلاقة التالية:

$$n = \frac{\rho N_A \theta}{A} \qquad (1)$$

حيث: ρ: الكثافة، N_A: عدد أفوغادرو، θ: الوفرة، و A: العدد الكتلي.

يُعرف مقطع التفاعل للامتصاص من أجل المواد النووية σ_a، وهو مقطع التفاعل الذي يصف احتمال امتصاص النيوترونات من قبل الذرات.

بفرض أن تدفق النيوترونات التي ترد على قضيب التحكم في المفاعل النووي Φ ثابتاً[4]، وهو عدد النيوترونات التي تمر عبر وحدة المساحة في وحدة الزمن.

إن تغير عدد النوى في واحدة الحجم بتغير الزمن يعطى بالعلاقة:

$$\frac{dn}{dt} = -\Phi\sigma_a n \qquad (2)$$

إن هذه المعادلة تصف كيفية تناقص النوى بسبب التفاعل مع النيوترونات.

بمكاملة العلاقة (2):

$$\int_0^n \frac{dn}{n} = -\int_0^t \Phi\sigma_a dt \qquad (3)$$

وبالتالي يكون:

$$n(t) = n_0 e^{-\Phi\sigma_a t} \qquad (4)$$

إن تغيير عدد النوى بعد مرور زمن t يعطى بالعلاقة:

$$\Delta n = n_0 - n(t)$$

$$\Delta n = n_0 - n_0 e^{-\Phi\sigma_a t}$$

$$\Delta n = n_0(1 - e^{-\Phi\sigma_a t}) \qquad (5)$$

باستخدام التقريب:

$$1 - e^{-\Phi\sigma_a t} \approx \Phi\sigma_a t$$

نجد:

$$\Delta n = n_0\Phi\sigma_a t \qquad (6)$$

[4] تم أخذ تدفق النيوترونات الحرارية في هذه الدراسة.

تُعرف سماكة الطبقة المتأثرة بالإشعاع بالشكل:

$$\Delta x = \frac{\Delta n}{n_0}\lambda_t = \Phi\sigma_a t\lambda_t \qquad (7)$$

حيث λ_t المسار الحر الوسطي للعبور، ويعطى بالشكل:

$$\lambda_t = \frac{1}{n\sigma_t}$$

حيث: $\sigma_t = \sigma_a + \sigma_s$، σ_t المقطع العرضي الكلي، σ_s المقطع العرضي للتشتت.

وبفرض أن المواد التي تتم دراستها شديدة الامتصاص للنيوترونات، وبالتالي:

$$\sigma_a \gg \sigma_s$$

يمكن اعتبار أن:

$$\sigma_t \approx \sigma_a$$

وبالتالي يكون:

$$\lambda_t = \frac{1}{n\sigma_a}$$

بالتعويض في العلاقة (7) نجد:

$$\Delta x = \Phi\sigma_a t\frac{1}{n\sigma_a}$$

$$\Rightarrow \Delta x = \frac{\Phi}{n}t \qquad (8)$$

وهي علاقة سماكة الطبقة المتأثرة بالإشعاع في مواد المفاعل النووي بإهمال تأثير التشتت [3].

تصطدم النيوترونات عالية الطاقة بنوى المادة، مما يؤدي إلى إزاحة الذرات من مواقعها الأصلية في الشبكة البلورية. هذا الاصطدام يخلق عيوباً مجهرية، ومع تراكمها تفقد المادة انتظامها البنيوي. كما

تمتص النوى النيوترونات وتدخل في حالة إثارة، ثم تتخلص من طاقتها بإصدار أشعة غاما وجسيمات مشعة (مثل ألفا وبيتا). هذا التفاعل يغير الهوية الكيميائية للذرات الأصلية ويحولها إلى عناصر أخرى، مما يتسبب في تآكل مادي وفقدان تدريجي لخصائص المادة الأساسية. ويؤدي تراكم العيوب البلورية والتحولات الكيميائية مع مرور الزمن إلى إضعاف البنية الميكانيكية للمادة، فيظهر ذلك على شكل نقص في المتانة والصلابة، وزيادة في الهشاشة والتآكل السطحي.

8. الدراسة التطبيقية

سنقوم بتطبيق العلاقة (8) من أجل تدفق نيوتروني حراري قدره $\Phi(0) = 1 \times 10^{18}\ \frac{\text{neut}}{\text{sec.m}^2}$، من أجل عنصر الروديوم.

يوضح الجدول (1) قيم المقاطع العرضية الموافقة لنظير الروديوم التي سيتم إجراء التطبيق عليها في الدراسة، بالإضافة إلى تركيزه المحسوب من العلاقة (1).

الجدول (1): قيم المقاطع العرضية الموافقة للروديوم [10].

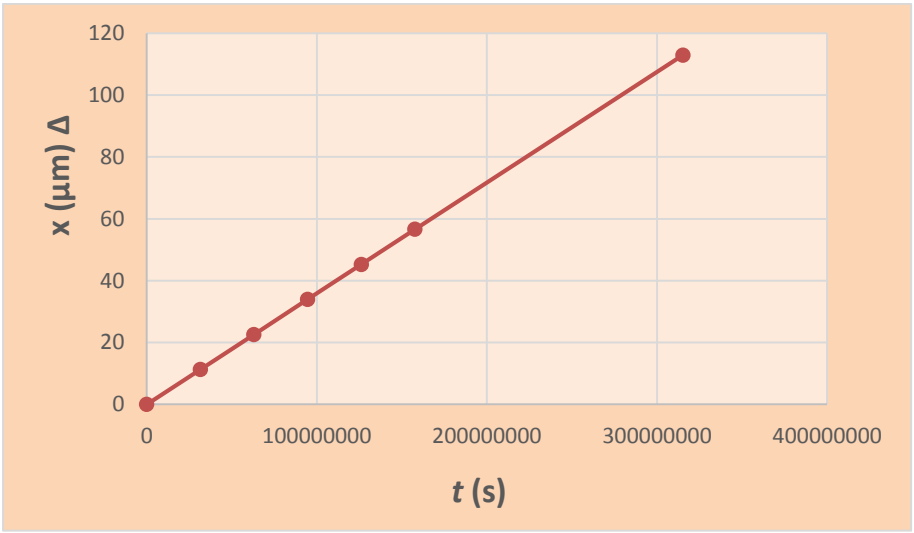
العنصر	$n \times 10^{37}$ $(1/mm^3)$	$\sigma_c \times 10^{-22}$ (mm^2)	$\sigma_s \times 10^{-22}$ (mm^2)
Rh	7.25	147	4.68

يوضح الجدول (2)، قيم سماكة الطبقة المتأثرة بالإشعاع في المفاعل النووي الموافقة للروديوم من أجل أزمنة تشغيل مختلفة.

[5] إن المقطع العرضي للامتصاص هو نفسه المقطع العرضي للأسر بغياب وجود الانشطار هنا.

الجدول (2): سماكة الطبقة المتأثرة بالإشعاع للروديوم في المفاعل النووي كتابع للزمن[6].

$t(s)$	Δx (µm)
0	0
31536000	11.3
63072000	22.6
94608000	34
126144000	45.3
157680000	56.6
315360000	113



الشكل (2): قيم سماكة الطبقة المتأثرة بالإشعاع Δx كتابع للزمن t.

يوضح الشكل (2) تزايد قيم سماكة الطبقة المتأثرة بالإشعاع بتزايد زمن التشغيل، تشير القيم الفيزيائية المستخدمة في النموذج إلى أن مقطع امتصاص الروديوم يقع ضمن نطاق متوسط، وهو ما

[6] تم أخذ الزمن حتى 10 سنوات وحسابه بالثواني.

ينعكس على معدل التفاعل النووي. هذا التوازن النسبي يفسر لماذا لا يكون التضرر سريعاً جداً، ولا بطيئاً بشكل مهمل، بل ضمن نطاق يمكن التحكم فيه هندسياً. أما من حيث تطور التضرر مع الزمن، فيظهر بوضوح أن السلوك خطي. يرجع هذا السلوك الخطي نتيجة اعتبار تدفق النيوترونات ثابتاً وتركيز النوى أيضاً، وبإهمال تأثير التشتت، حيث يكون ميل الخط البياني يساوي إلى $\frac{\Phi}{n}$، وهو مقدار ثابت.

9. تطبيقات الروديوم

1. الروديوم في كواشف النيوترونات داخل المفاعلات النووية

يُعد استخدام الروديوم في أجهزة قياس التدفق النيوتروني من التطبيقات الدقيقة والمهمة في الأنظمة النووية، خصوصاً في المفاعلات التي تتطلب مراقبة مستمرة لتوزيع التدفق النيوتروني داخل القلب. يعتمد هذا الاستخدام على خاصية الامتصاص النيوتروني وتحول النوى إلى نظائر مشعة يمكن قياس نشاطها لاحقاً. ما يميز الروديوم هنا ليس فقط قدرته على أسر النيوترونات، بل استقراره النسبي تحت التشعيع مقارنة بمواد تقليدية أخرى. فعلى عكس بعض العناصر التي تتدهور خصائصها بسرعة نتيجة تراكم العيوب البلورية، يحافظ الروديوم على استجابة إشعاعية يمكن التنبؤ بها على مدى زمني أطول. وهذا ينعكس مباشرة على دقة القياس، حيث تصبح الإشارة الناتجة أكثر استقراراً وأقل تأثراً بالتغيرات البنيوية في المادة نفسها. لذلك يُستخدم الروديوم في بعض التصاميم كعنصر معايرة داخلي أو كجزء من مجسات مدمجة داخل المفاعل، خصوصاً في البيئات التي يصعب فيها استبدال الحساسات بشكل دوري [9].

2. استخدام الروديوم كطبقة طلاء واقية داخل المفاعلات النووية

من التطبيقات المهمة للروديوم أيضاً استخدامه كطبقة طلاء رقيقة (Coating Layer) على الأسطح المعدنية المعرضة لتدفقات نيوترونية عالية. الفكرة الأساسية هنا ليست فقط الحماية الكيميائية، بل الحماية الإشعاعية والبنيوية في آن واحد. فعند تعرّض المواد الأساسية مثل الفولاذ أو سبائك النيكل للإشعاع، تبدأ العيوب البلورية بالتراكم تدريجياً مما يؤدي إلى ضعف في البنية الميكانيكية. إضافة طبقة

من الروديوم يمكن أن تعمل كحاجز أولي يقلل من معدل وصول النيوترونات إلى المادة الأساسية، وبالتالي يخفف من معدل التضرر الإشعاعي الفعلي. كما أن الروديوم يمتاز بمقاومة عالية للأكسدة والتفاعلات الكيميائية، ما يجعله مستقراً حتى في ظروف تشغيل قاسية تجمع بين الإشعاع والحرارة العالية. عملياً، هذا الاستخدام لا يُلغي التضرر، لكنه يؤخره بشكل ملحوظ ويزيد من العمر التشغيلي للمكونات الحساسة داخل المفاعل [5].

3. الروديوم في قضبان التحكم طويلة العمر

تقليدياً، تعتمد قضبان التحكم في المفاعلات على مواد ذات قدرة امتصاص عالية جداً للنيوترونات مثل الكادميوم أو البورون. لكن هذه المواد تواجه مشكلة أساسية وهي التدهور السريع مع الزمن نتيجة التفاعلات النووية المستمرة. في هذا السياق، يظهر الروديوم كخيار مختلف من حيث الفلسفة التصميمية؛ فهو لا ينافس في أعلى كفاءة امتصاص، لكنه يقدم توازناً بين الامتصاص والاستقرار البنيوي. هذا التوازن مهم جداً في المفاعلات التي تعمل لفترات طويلة دون توقف، حيث يصبح تغيير قضبان التحكم مكلفاً ومعقداً تقنياً. ميزة الروديوم الأساسية هنا هي أنه يحافظ على خصائصه الفيزيائية والنووية بشكل أبطأ في التغير، مما يقلل من فقدان الكفاءة التشغيلية مع الزمن. وبالتالي يمكن تصميم قضبان تحكم هجينة تحتوي على طبقات أو نسب من الروديوم لتحقيق أداء مستقر على المدى الطويل [6].

4. استخدام الروديوم في مفاعلات الانشطار والاندماج

في المفاعلات الحديثة والمتقدمة، خاصة تلك المصممة لتقنيات الجيل الرابع أو المفاعلات التجريبية للاندماج النووي، تصبح البيئة الإشعاعية أكثر قسوة بكثير من المفاعلات التقليدية. هنا لا يكفي أن تكون المادة فعالة نووياً فقط، بل يجب أن تمتلك قدرة عالية على تحمل الضرر الإشعاعي طويل الأمد. الروديوم في هذا السياق لا يُستخدم كمادة رئيسية، بل كمادة مساعدة أو طبقة وظيفية في المناطق الحساسة، مثل مناطق القياس أو الحماية الموضعية. السبب في ذلك يعود إلى قدرته على

مقاومة التشوهات البنيوية الناتجة عن التشعيع، مما يجعله مناسباً في البيئات التي تتطلب استقراراً زمنياً عالي الدقة. بعض الدراسات تشير إلى أن المعادن النبيلة بشكل عام قد تلعب دوراً مهماً في تصميم هذه المفاعلات المستقبلية، خصوصاً عندما يكون الهدف هو تقليل الصيانة وزيادة الاعتمادية التشغيلية [4].

5. استخدامه في أنظمة القياس والمعايرة داخل المفاعلات

تلعب أنظمة القياس داخل المفاعلات النووية دوراً محورياً في ضمان السلامة التشغيلية، حيث تعتمد قرارات التحكم على دقة قراءة التدفق النيوتروني ومستويات الإشعاع. في هذا السياق، يُستخدم الروديوم في بعض المجسات كعنصر نشط أو مرجعي. تكمن أهمية الروديوم هنا في أن استجابته للإشعاع تكون مستقرة نسبياً مقارنة بمواد أخرى، مما يقلل من الانجراف (Drift) في القياسات مع الزمن. وهذا مهم جداً لأن أي تغير غير محسوب في استجابة الحساس قد يؤدي إلى قرارات تشغيلية خاطئة داخل المفاعل. بمعنى آخر، الروديوم لا يضيف فقط حساسية للكشف، بل يضيف أيضاً نوعاً من "الثبات المرجعي" الذي يجعل القياسات أكثر موثوقية على المدى الطويل [2].

10. المناقشة والمقارنة مع الدراسات السابقة

إن مقارنة سلوك الروديوم بمواد مثل الكادميوم، يظهر فرق واضح في طبيعة الأداء. فالكادميوم يتميز بمقطع امتصاص كبير، ما يجعله فعالاً جداً في التحكم بالنيوترونات، لكنه في المقابل يتعرض لتضرر أسرع، وهو ما يقلل من عمره التشغيلي [6].

يظهر الجدول (3) سماكة الطبقة المتأثرة بالإشعاع من الروديوم مع سماكة الطبقة المتأثرة بالإشعاع من الكادميوم والهافنيوم التي تصنع منها قضبان التحكم في المفاعل النووي عند نفس الشروط من أجل زمن تشغيل مقداره سنة واحدة [3].

الجدول (3): قيم سماكة الطبقة المتأثرة بالإشعاع في المفاعل النووي الموافقة للعناصر الكادميوم، الهافنيوم، الروبيديوم من أجل زمن تشغيل مقداره سنة واحدة.

$t(\text{year})$	Δx_{Rh} (μm)	Δx_{Hf} (mm)	Δx_{Cd} (mm)
1	11.3	0.716	0.687

نلاحظ من الجدول (3) أن سماكة الطبقة المتأثرة بالإشعاع في الروديوم من مرتبة الميكرو متر، بينما سماكة الطبقة المتأثرة بالإشعاع في الهافنيوم والكادميوم من مرتبة الميلي متر، ويرجع ذلك لأن كثافة الروديوم أعلى من كثافة الهافنيوم والكادميوم، مما يجعله صلداً وتضرره يكاد يكون مهملاً.

في المقابل، يبدو أن الروديوم يحقق توازناً أفضل بين الامتصاص والاستقرار، وهو ما يجعله خياراً مناسباً في التطبيقات التي تتطلب موثوقية على المدى الطويل، حتى وإن لم يكن الأكثر كفاءة في الامتصاص [9].

11. حساب الارتياب

جرى في هذا البحث إهمال مقطع التشتت $(\sigma_s = 4.68 \times 10^{-22}\ (\text{mm}^2))$ واعتبار أن المادة تقوم بالامتصاص فقط $(\sigma_c = 147 \times 10^{-22}\ (\text{mm}^2))$.

لحساب هذا الخطأ، نقسم قيمة التشتت المُهملة على المقطع الكلي الحقيقي:

$$\text{Uncertainty} = \frac{\sigma_s}{\sigma_s + \sigma_c} \times 100\%$$

$$= \frac{4.68 \times 10^{-22}}{4.68 \times 10^{-22} + 147 \times 10^{-22}} \times 100\% \approx 3\%$$

هذا يعني أن إهمال التشتت تسبب في خطأ ثابت مقداره 3% تقريباً في كل الحسابات، وهي نسبة أمان مقبولة هندسياً في الحسابات التقديرية الأولية للمفاعلات.

12. الاستنتاجات

1. كفاءة وموثوقية النموذج: أثبت النموذج التحليلي المستخدم قدرته على تقديم توصيف كمّي مقبول وقابل للتنبؤ لسلوك التضرر الإشعاعي في الروديوم تحت تأثير التدفق النيوتروني الحراري، حيث أظهرت النتائج توافقاً مع البيانات المرجعية القياسية.

2. خطية السلوك وتراكمية الضرر: يتبع التضرر الإشعاعي في عنصر الروديوم سلوكاً تراكمياً زمنياً ذا طبيعة خطية واضحة، وهو ما يعكس التناقص التدريجي المنتظم في عدد النوى الأصلية القابلة للتفاعل نتيجة عمليات الأسر والتحول النووي.

3. التفوق البنيوي ومقاومة التلف: يمتلك الروديوم معدل تضرر إشعاعي منخفض جداً وبفارق رتب شعاعية شاسعة مقارنة بمواد الامتصاص التقليدية؛ حيث بلغ سماكة الطبقة المتأثرة بالإشعاع في الروديوم بعد سنة تشغيل كاملة حوالي (11.3 µm)، في حين قفز في الكادميوم والهافنيوم إلى مرتبة المليمترات (0.687 mm) و (0.617 mm) على التوالي تحت نفس الظروف. ويُعزى هذا الاستقرار إلى ارتفاع كثافة الروديوم ومقطعه العرضي المتوسط للأسر، مما يمنحه صلادة بنيوية تجعل تضرره السطحي فائق الصغر وضمن نطاق يمكن التحكم فيه هندسياً.

4. الجدوى التطبيقية التوازنية: يحقق الروديوم توازناً مثلياً فريداً بين الكفاءة النووية (امتصاص النيوترونات) والاستقرار الميكانيكي والفيزيائي بعيد المدى، مما يجعله مادة استراتيجية واعدة لرفع الموثوقية التشغيلية وتقليل عمليات الصيانة في البيئات الإشعاعية عالية القسوة.

13. التوصيات

1. إجراء دراسات تجريبية للتحقق من دقة النموذج التحليلي ومقارنة النتائج النظرية مع الواقع العملي.
2. توسيع نطاق الدراسة ليشمل مواد وعناصر أخرى (مثل السبائك) لإجراء مقارنات شاملة في الأداء الإشعاعي.
3. إدخال تأثيرات إضافية في النماذج المستقبلية مثل: درجة الحرارة، الإجهادات الميكانيكية، التشعيع طويل الأمد.
4. تطوير نماذج عددية متقدمة (محاكاة حاسوبية) يمكن استخدامها مباشرة في تصميم مكونات المفاعلات النووية.
5. دراسة إمكانية استخدام الروديوم في تطبيقات عملية مثل: كواشف النيوترونات، الطلاءات الواقية في البيئات الإشعاعية، طلاء قضبان التحكم.

14. Reference

[1] Was, Gary S. Fundamentals of Radiation Materials Science: Metals and Alloys. 2nd ed., Springer, 2017.

[2] Olander, Donald R. Nuclear Fuels and Materials. Cambridge University Press, 2021.

[3] Al-Doud, Ali., An Analytical Study to Calculate the Thickness of the Radioactively Corroded Layer of Control Rods in Nuclear Reactors, Homs University Journal, vol 47, 2025.

[4] Zinkle, Steven J., and Jeremy T. Busby. "Structural Materials for Fission & Fusion Energy." Materials Today, vol. 12, no. 11, 2009, pp. 12–19.

[5] ASM International. ASM Handbook, Volume 2: Properties and Selection of Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. ASM International, 2018.

[6] Lamarsh, John R., and Anthony J. Baratta. Introduction to Nuclear Engineering. 4th ed., Pearson, 2018.

[7] Konings, Rudy J.M., editor. Comprehensive Nuclear Materials. 2nd ed., Elsevier, 2020.

[8] Reed-Hill, Robert E., and Reza Abbaschian. Physical Metallurgy Principles. 4th ed., Cengage Learning, 2009.

[9] Knoll, Glenn F. Radiation Detection and Measurement. 4th ed., Wiley, 2010.

[10] Harl'O M. Fisher, A Nuclear Cross Section Data Handbook, Los Alamos, New Mexico, Jan 1991.