دراسة تحليلية لحساب سماكة الطبقة المتآكلة إشعاعياً من قضبان التحكم في المفاعل النووي

د. علي الدود[1]

الملخص

تعدّ قضبان التحكم أحد العناصر المحورية في بنية المفاعلات النووية، إذ يعتمد عليها لضبط معدل التفاعل الانشطاري والحفاظ على استقرار المنظومة النووية وأمانها التشغيلي.

وفي إطار هذا البحث، تم تطوير صياغة تحليلية تصف بدقة سلوك الطبقة المتآكلة إشعاعياً على سطح قضبان التحكم نتيجة تدفق النيوترونات داخل قلب المفاعل. وقد جرى استخدام هذه العلاقة لتقدير مقدار التآكل تحت تأثير النيوترونات الحرارية على مجموعة من المواد الشائعة الاستخدام في صناعة هذه القضبان. وقد أظهرت النتائج أن الفاناديوم يتمتع بمقاومة أعلى للتآكل بسبب الإشعاع مقارنة بمواد أخرى تعتمدها الصناعات النووية عادةً، وكلفته الاقتصادية مقبولة مقارنة بباقي المواد، مما يجعله مرشحاً مناسباً لزيادة عمر الخدمة لقضبان التحكم. كما يتضمن البحث مقترحات عملية تهدف إلى الحد من ظاهرة التآكل دون الحاجة إلى استبدال القضيب بالكامل، وذلك عبر إجراءات هندسية أو تصميمية تساعد على إطالة عمر المكوّن وتحسين كفاءته التشغيلية داخل المفاعل.

الكلمات المفتاحية: سماكة الطبقة المتآكلة، تدفق نيوتروني حراري، قضبان التحكم.

[1] دكتوراه في الفيزياء النظرية.

An Analytical Study to Calculate the Thickness of the Radioactively Corroded Layer of Control Rods in Nuclear Reactors

Ali Al-Doud[2]

Abstract

Control rods are among the pivotal components in the structure of nuclear reactors, as they are relied upon to regulate the rate of the fission reaction and to maintain the stability and operational safety of the nuclear system**.**

Within the scope of this study, an analytical formulation was induced -developed to accurately describe the behavior of the radiation eroded layer formed on the surface of control rods as a result of neutron s employed to estimate flux within the reactor core. This formulation wa the extent of erosion caused by thermal neutrons for a range of materials commonly used in the manufacture of control rods**.** The results indicate induced erosion -that vanadium exhibits greater resistance to radiation er materials typically adopted in the nuclear industry. compared with oth In addition, its economic cost is considered reasonable relative to alternative materials, making it a promising candidate for extending the ical proposals service life of control rods. The study also presents pract aimed at mitigating erosion without the need to replace the entire rod, based measures that contribute to -through engineering or design prolonging component lifetime and enhancing its operational efficiency within the reactor**.**

Keywords: Corroded Layer Thickness, Thermal Neutron Flux, Control Rods.

[2] PhD in Theoretical Physics.

1. مقدمة

إن قضبان التحكم في المفاعل النووي يمكن أن تتآكل إشعاعيًا نتيجة للتأثيرات الناجمة عن الإشعاع والحرارة والتآكل الكيميائي. يمكن أن يؤدي التآكل الإشعاعي إلى تغييرات في تركيب المواد وفقدان الكفاءة وزيادة خطر الحوادث. لذلك، من المهم اتخاذ إجراءات للحد من التآكل الإشعاعي وضمان سلامة المفاعل. وفقًا لتقرير للوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA)، يعد التآكل الإشعاعي لقضبان التحكم أحد التحديات المهمة التي يجب مواجهتها في تصميم وتشغيل المفاعلات النووية.

2. هدف ومشكلة البحث

يهدف هذا البحث إلى تطوير نموذج تحليلي دقيق يصف عملية التآكل بسبب الإشعاع في قضبان التحكم داخل المفاعلات النووية، وذلك من خلال حساب سماكة الطبقة المتآكلة نتيجة امتصاص النيوترونات.

تتمثل المشكلة الرئيسية في علاقات كمية مباشرة تمكن من تقدير مقدار التآكل مع الزمن وارتباطه بخواص المواد المستخدمة، مما يعيق تحديد العمر التشغيلي الأمثل للقضبان. لذلك، يسعى البحث إلى سد هذه الفجوة من خلال اشتقاق علاقة وتطبيقها عملياً، إضافة إلى اقتراح حلول هندسية تقلل الحاجة إلى استبدال قضبان التحكم بالكامل.

3. دراسة مرجعية

تلعب قضبان التحكم دوراً هاماً في المفاعلات النووية. يتم استخدامها للتحكم في التفاعل النووي وضمان سلامة المفاعل. تتكون قضبان التحكم عادةً من مواد تمتص النيوترونات، مما يساعد في تنظيم معدل التفاعل النووي. في هذا السياق، يُثار سؤال حول ما إذا كانت قضبان التحكم تتآكل إشعاعياً في المفاعل النووي أم لا؟

وفقًا للوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA)، يعد تآكل قضبان التحكم أحد العوامل المهمة التي يجب مراعاتها في تصميم وتشغيل المفاعلات النووية [1]. يحدث التآكل الإشعاعي نتيجة

للتأثيرات الناجمة عن الإشعاع على المواد، مما يؤدي إلى تغييرات في تركيبها الكيميائي والفيزيائي. هذه الظاهرة يمكن أن تؤثر بشكل كبير على أداء وسلامة المفاعل. كما ذكر تقرير للجنة الدولية لسلامة المفاعلات النووية (ICRS)، فإن التآكل الإشعاعي لقضبان التحكم يمكن أن يكون له تأثيرات خطيرة على سلامة المفاعل [2].

يحدث التآكل الإشعاعي لقضبان التحكم نتيجة لعدة أسباب:

1. التأثيرات الناجمة عن الإشعاع: تتعرض قضبان التحكم لحزمة نيوترونية شديدة، مما يؤدي إلى تغييرات في تركيبها الكيميائي والفيزيائي.

2. تأثيرات الحرارة: يتعرض قضبان التحكم لتأثيرات الحرارة الناجمة عن التفاعل النووي، مما يؤدي إلى تغييرات في تركيبها.

3. تأثيرات التآكل الكيميائي: يتعرض قضبان التحكم لتأثيرات التآكل الكيميائي الناجمة عن التفاعل مع المواد الأخرى في المفاعل، مما يؤدي إلى تغييرات في تركيبها. وفقًا لدراسة نشرها مركز الأبحاث النووية الأوروبي (ENEA)، فإن تأثيرات الحرارة والإشعاع تؤدي إلى تآكل قضبان التحكم [3].

هذا وتختلف أحجام قضبان التحكم باختلاف أنواع المفاعلات وتصميماتها. عادةً ما تكون قضبان التحكم على شكل أسطواني أو متوازي مستطيلات، وتتراوح أقطارها $1 - 10\ cm$، وأطولها $100 - 500\ cm$. على سبيل المثال، في مفاعلات الماء المضغوط PWR، تكون قضبان التحكم عادةً بقطر $1 - 2\ cm$ وطول $400 - 500\ cm$ [4].

يختلف عدد قضبان التحكم باختلاف حجم المفاعل وتصميمه. عادةً ما يكون عدد قضبان التحكم في المفاعل النووي بين $50 - 200$ قضيب. على سبيل المثال، في مفاعل نووي من نوع PWR، يكون عدد قضبان التحكم عادةً حوالي 100 قضيب.

تُصنع قضبان التحكم من مواد لها قدرة عالية على امتصاص النيوترونات. كما أوضحت الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA) في تقريرها لعام 1974، فإن تصميم وتشغيل المفاعلات النووية يتطلبان اهتماماً دقيقاً بمواد قضبان التحكم وتصميمها [5].

إن أحجام قضبان التحكم وعددها والمواد المصنوعة منها تعتمد على نوع المفاعل وتصميمه. المواد الشائعة المستخدمة في تصنيع قضبان التحكم هي الكادميوم، البورون، الزركونيوم، والهافنيوم والفولاذ. هذه المواد لها قدرة عالية على امتصاص النيوترونات ومقاومة التآكل، مما يساهم في تحسين أداء المفاعل وزيادة سلامته [6].

إن تبديل قضبان التحكم في المفاعل النووي يعتمد على عدة عوامل، منها تصميم المفاعل ونوع الوقود المستخدم وظروف التشغيل. عادةً ما يتم استبدال قضبان التحكم بشكل دوري كجزء من برنامج الصيانة الروتينية للمفاعل. ويختلف الجدول الزمني لاستبدال قضبان التحكم من مفاعل إلى آخر. في بعض المفاعلات، قد يتم استبدال قضبان التحكم كل 5 إلى 10 سنوات، بينما في مفاعلات أخرى قد يكون الجدول الزمني أطول أو أقصر. ومن المهم الإشارة إلى أن عملية استبدال قضبان التحكم تتطلب توقف المفاعل عن العمل واتباع إجراءات السلامة اللازمة. فمثلاً قضبان التحكم في مفاعل PWR المصنوعة من سبائك البورون والستانلس ستيل تبدل كل 10 سنوات، بينما قضبان التحكم في مفاعل CABR مصنوعة من الهافنيوم تبدل بعد 5 سنوات من التشغيل [7-9].

4. آلية حدوث التغيير في بنية المواد

لندرس تفاعل نواة الكادميوم $^{114}_{48}\mathrm{Cd}_{66}$ مثلاً في قضـــبان التحكم في المفاعل النووي نتيجة سـقوط حزمة من النيوترونات الحرارية عليها، إما أن يكون تشـتتاً مرناً من النوع (n,n)؛ أي:

$$\mathrm{n} + {}^{114}_{48}\mathrm{Cd}_{66} \rightarrow {}^{114}_{48}\mathrm{Cd}_{66} + \mathrm{n}$$

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

$$\mathrm{n} + {}^{114}_{48}\mathrm{Cd}_{66} \rightarrow {}^{114}_{48}\mathrm{Cd}^{*}_{66} + \mathrm{n} \; ; {}^{114}_{48}\mathrm{Cd}^{*}_{66} \rightarrow {}^{114}_{48}\mathrm{Cd}_{66} + \gamma$$

أو أن يكون تفاعل امتصاص أو أسر للنيوترون من قبل النواة، فينتج عن ذلك نواة مركبة مثارة $^{*}({}^{115}_{48}\mathrm{Cd}^{**}_{67})$، 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 (1.2)**، ونعبر عن ذلك بالمعادلة الآتية:

$$\mathrm{n} + {}^{114}_{48}\mathrm{Cd}_{66} \rightarrow ({}^{115}_{48}\mathrm{Cd}^{**}_{67})^{*} \rightarrow {}^{115}_{48}\mathrm{Cd}^{**}_{67} + \gamma_1 \qquad (a)$$

حيث إن النواة ${}^{115}_{48}\mathrm{Cd}^{**}_{67}$ 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:

$$(b) \quad {}^{115}_{48}\mathrm{Cd}^{**}_{67} \rightarrow {}^{1}_{0}\mathrm{n} + {}^{114}_{48}\mathrm{Cd}^{*}_{66} \rightarrow {}^{1}_{0}\mathrm{n} + {}^{114}_{48}\mathrm{Cd}_{66} + \gamma_2$$

$$(c) \quad {}^{115}_{48}\mathrm{Cd}^{**}_{67} \rightarrow 2{}^{1}_{0}\mathrm{n} + {}^{113}_{48}\mathrm{Cd}^{*}_{65} \rightarrow 2{}^{1}_{0}\mathrm{n} + {}^{113}_{48}\mathrm{Cd}_{65} + \gamma_3$$

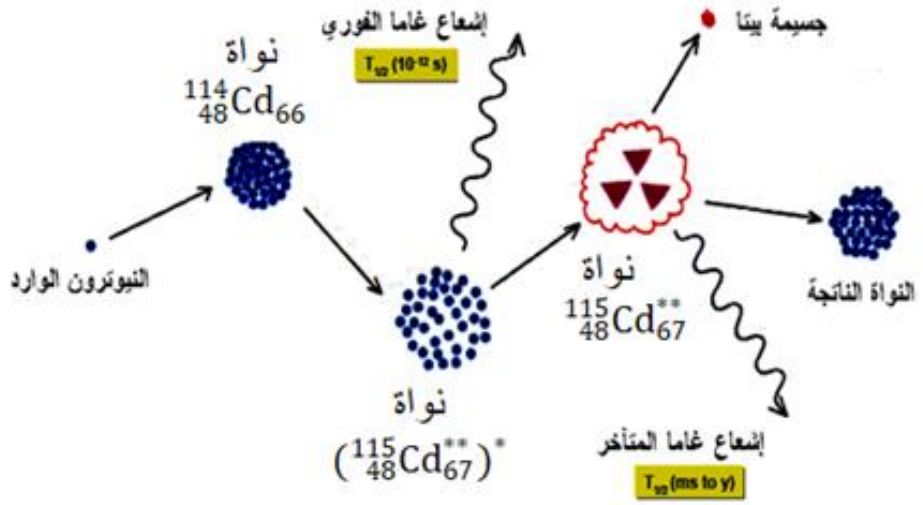
$$(d) \quad {}^{115}_{48}\mathrm{Cd}^{**}_{67} \rightarrow \beta^{-} + {}^{115}_{49}\mathrm{In}^{*}_{67} \rightarrow \beta^{-} + {}^{115}_{49}\mathrm{In}_{67} + \gamma_4$$

$$(e) \quad {}^{115}_{48}\mathrm{Cd}^{**}_{67} \rightarrow \beta^{+} + {}^{115}_{47}\mathrm{Ag}^{*}_{67} \rightarrow \beta^{+} + {}^{115}_{47}\mathrm{Ag}_{67} + \gamma_5$$

$$(f) \quad {}^{115}_{48}\mathrm{Cd}^{**}_{67} \rightarrow {}^{1}_{1}\mathrm{P} + {}^{114}_{47}\mathrm{Ag}^{*}_{68} \rightarrow {}^{1}_{1}\mathrm{P} + {}^{114}_{47}\mathrm{Ag}_{68} + \gamma_6$$

إن إشعاع غاما $\gamma_{\mathrm{i}}(\mathrm{i} = 2,3,\dots)$ المرافق هذا يكون له طاقة محددة مميزة للنواة المصدرة 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 قضبان التحكم.



الشكل (1): رسم تمثيلي لعملية تشكل النواة المركبة $^{*}(^{115}_{48}Cd^{**}_{67})$ 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.

5. الدراسة التحليلية

سنفترض في دراستنا هذه أن النيوترونات تتفاعل مع المواد التي تصنع منها قضبان التحكم في المفاعلات النووية بشكل عشوائي، 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.

نعرف 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[3]، 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.

نحصل بمكاملة العلاقة (2) على:

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

وبالتالي نجد:

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

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:

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

[3] تم أخذ تدفق النيوترونات الحرارية في دراستنا هذه.

نعرف سماكة الطبقة المتآكلة بسبب التفكك الإشعاعي 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:

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

ولدينا:

$$\sigma_t = \sigma_a + \sigma_s$$

وبفرض أن المواد التي تصنع منها قضبان التحكم شديدة الامتصاص للنيوترونات، وبالتالي:

$$\sigma_a \gg \sigma_s$$

يمكن اعتبار أن:

$$\sigma_t \approx \sigma s_a$$

وبالتالي يكون:

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

بالتعويض في العلاقة (7) نجد:

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

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

وهي علاقة سماكة الطبقة المتآكلة في قضبان التحكم في المفاعل النووي بإهمال تأثير التشتت.

6. 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 مجموعة من النظائر والعناصر التي توافق قيماً للمقاطع العرضية الموضحة في الجدول (1)، والتي تصنع منها عادة قضبان التحكم في المفاعلات النووية وبعضها تم اختيارها على أساس المقطع العرضي للأسر كبيراً والتي تتوفر لدينا بيانات عنها.

يوضح الجدول (1) قيم المقاطع العرضية الموافقة للنظائر والعناصر التي سيتم إجراء التطبيق عليها في الدراسة، بالإضافة إلى تركيزها المحسوب من العلاقة (1).

الجدول (1): قيم المقاطع العرضية الموافقة للنظائر والعناصر التي سيتم إجراء التطبيق عليها في الدراسة[4].

العنصر أو النظير	$n \times 10^{37}$ $(1/mm^3)$	$\sigma_c \times 10^{-22}$ (mm^2)	$\sigma_s \times 10^{-22}$ (mm^2)
B^{10}	2.58	3840	0.385
Cd	4.59	2460	7.41
Hf	4.40	104	7.58
Ag^{107}	3.06	36.9	5.65
V	7.08	5100	5.00
Ta^{181}	5.46	21.2	6.18

[4] تم أخذ العناصر والنظائر التي تتوفر بيانات تجريبية عنها.

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

يوضح الجدول (2)، قيم سماكات الطبقة المتآكلة في المفاعل النووي الموافقة للنظائر والعناصر من أجل أزمنة تشغيل مختلفة.

الجدول (2): قيم سماكات الطبقة المتآكلة في المفاعل النووي الموافقة للنظائر والعناصر من أجل أزمنة تشغيل مختلفة[6].

$t(s)$	Δx_{Ta} (mm)	Δx_{V} (mm)	Δx_{Ag} (mm)	Δx_{Hf} (mm)	Δx_{Cd} (mm)	Δx_{B} (mm)
0	0	0	0	0	0	0
31536000	0.577	0.445	1.03	0.716	0.687	1.22
63072000	1.15	0.889	2.06	1.43	1.37	2.44
94608000	1.73	1.33	3.08	2.15	2.06	3.66
126144000	2.31	1.78	4.11	2.86	2.75	4.88
157680000	2.89	2.22	5.14	3.58	3.44	6.10
315360000	5.77	4.45	10.3	7.16	6.87	12.2

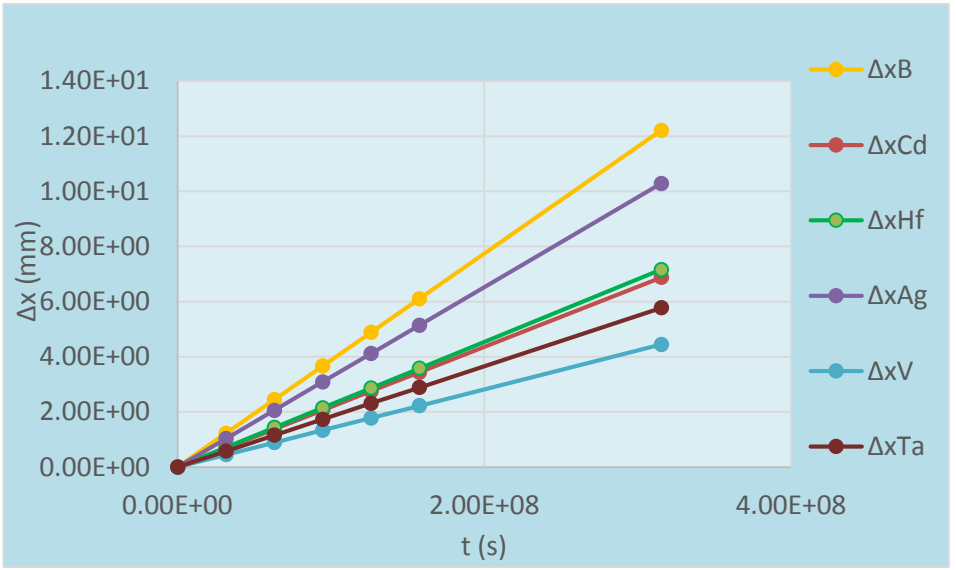
يوضح الشكل (2)، قيم سماكة الطبقة المتآكلة Δx كتابع للزمن t. نلاحظ من الشكل (2) أن سماكة الطبقة المتآكلة Δx من قضبان التحكم في المفاعل النووي تزداد مع زيادة زمن التشغيل، كما نلاحظ أن سماكة الطبقة المتآكلة من القضيب المصنوع من الفاناديوم V تكون أقل، يليه نظير التاليوم Ta^{181}، الكادميوم Cd، الهافنيوم Hf، نظير الفضة Ag^{107}، ومن ثم نظير البورون B^{10}. يرجع ذلك إلى أن تركيز الفاناديوم يكون أكبر ما يمكن من بين المواد المدروسة، وتركيز نظير البورون B^{10} يكون الأصغر.

يوضح الجدول (3)، قيم سماكة الطبقة المتآكلة Δx كتابع للتركيز n من أجل زمن قدره $t = 31536000$ (s). كما يوضح الشكل (2)، قيم سماكة الطبقة المتآكلة Δx كتابع للتركيز n من أجل زمن قدره $t = 31536000$ (s).

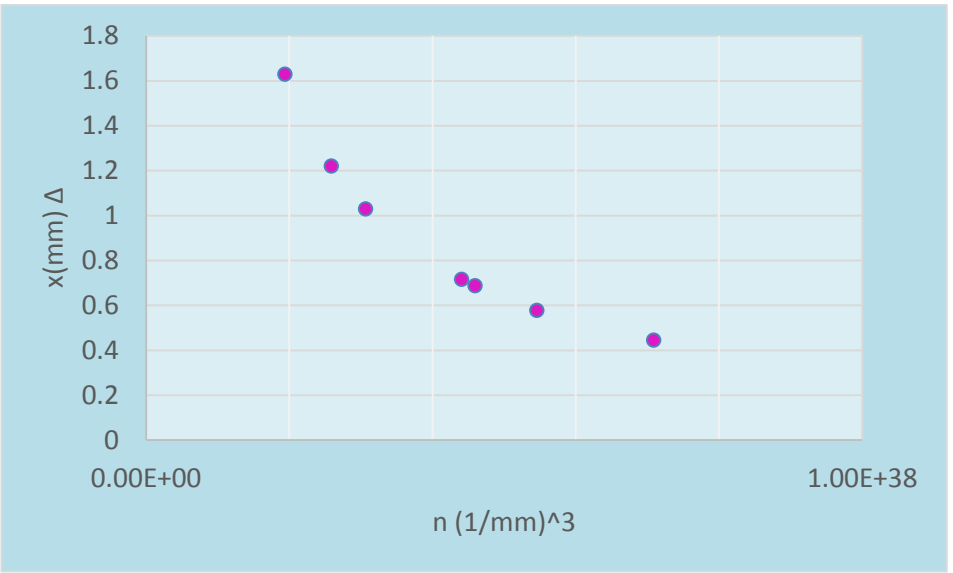
[6] تم أخذ الزمن حتى 10 سنوات وحسابه بالثواني.

الجدول (3): قيم سماكة الطبقة المتآكلة Δx كتابع للتركيز n من أجل زمن قدره $t =$ 31536000 (s).

Δx (mm)	$n \times 10^{37} (1/\text{mm}^3)$
1.220252	2.58
0.686991	4.59
0.716076	4.40
1.029446	3.06
0.445128	7.08
0.578033	5.46



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



الشكل (3): قيم سماكة الطبقة المتآكلة Δx كتابع للتركيز n من أجل زمن قدره $t =$ 31536000 (s).

نلاحظ من الشكل (3) أن قيم سماكة الطبقة المتآكلة Δx تتناقص مع زيادة التركيز n وذلك عند تثبيت الزمن $t = 31536000$ (s).

7. المناقشة والمقارنة مع الدراسات السابقة

1. مقارنة مع تقرير الوكالة الدولية للطاقة الذرية IAEA (1996) [1]

أشارت الوكالة الدولية للطاقة الذرية IAEA إلى أن قضبان التحكم المصنوعة من الكادميوم والهافنيوم تُظهر مقاومة جيدة للتآكل الإشعاعي في ظروف تشغيل معينة، لكن التقرير لم يقدّم قياسات كمية لسماكة الطبقة المتآكلة مع مرور الزمن التشغيل.

الإضافة الجديدة، تؤكد الدراسة الاتجاه نفسه من حيث استقرار الهافنيوم نسبياً، لكنها تضيف بُعداً رقمياً جديداً، حيث أظهر الفانديوم أقل معدل تآكل، وهو ما لم يذكر في التقرير السابق.

2. مقارنة مع دراسة اللجنة الدولية لسلامة المفاعلات ICRS (2000) [2]

ذكرت اللجنة الدولية لسلامة المفاعلات أن المواد ذات المقطع العرضي الكبير لامتصاص النيوترونات (مثل البورون والكادميوم) تتآكل إشعاعياً بمعدل مرتفع نتيجة التحولات النووية. وهذا يتطابق مع نتائج الجدول (2)، حيث أظهر البورون أكبر سماكة متآكلة، بينما الكادميوم أقل نسبياً. وبالتالي، لغة الأرقام في هذه في الدراسة تدعم نتائج ICRS وتقدم تقديراً كمياً لمعدل التآكل لم يكن متاحاً سابقاً.

3. مقارنة مع الدراسة الأوروبية ENEA (2010) [3]

خلصت الدراسة الأوروبية إلى أن الهافنيوم من أفضل المواد مقاومة للتآكل في البيئات النيوترونية عالية التدفق، بمعدل أقل من 0.5 mm/year في الظروف المعتادة. في المقابل، تُظهر نتائج الجدول (2) أن الهافنيوم يتآكل بمعدل 1.03 mm/year.

يرجع الاختلاف إلى أن هذه الدراسة استخدمت نموذجاً تحليلياً يعتمد على التركيز الذري والمقطع العرضي النووي، بينما ركزت دراسة ENEA على التأثيرات الحرارية. لذلك، نتائج دراستنا توسّع دراسة ENEA، بإضافة التأثيرات النووية المباشرة على التآكل.

4. مقارنة مع دراسات NRC وWestinghouse (1988–2020) [6,9]

توصي هذه الدراسات باستبدال قضبان التحكم كل 10–5 سنوات بسبب التدهور الإشعاعي، لكنها لا تحدد سماكة التآكل المتوقعة. بينما نتائجنا في الجدول (2) تُظهر هذه السماكة بعد 5 سنوات، وهذا يعني أن الحد العملي لعمر القضيب يتوافق مع وصول سماكة التآكل إلى 5 – 6 mm، ما يدعم نموذجنا التحليلي كمؤشر لتحديد زمن الاستبدال الأمثل دون اختبارات مكلفة.

يوضح الجدول (4) أسعار المواد التي تم تطبيق علاقتنا عليها مقدرة بالدولار الأمريكي لكل كيلو غرام.

الجدول (4): أسعار المواد التي تم تطبيق علاقتنا عليها مقدرة بالدولار الأمريكي لكل كيلو غرام.

المادة مقدرة بالكيلو غرام	السعر بالدولار الأمريكي
الفاناديوم	10–20
التنتاليوم	450
الفضة	800–1000
البورون	5–10
الكادميوم	6–10
الهافنيوم	1000–2000

من الناحية الاقتصادية إذا ما نظرنا إلى أسعار المواد التي تم تطبيق دراستنا عليها، نجد أن الفاناديوم هو الأفضل من حيث الكلفة والمقاومة للإشعاع وامتصاص النيوترونات.

8. الاستنتاجات

1. تم استنتاج علاقة تحليلية جديدة توصف سماكة الطبقة المتآكلة إشعاعياً في قضبان التحكم في المفاعل النووي.

2. إن الفاناديوم V يعتبر الأفضل في صناعة قضبان التحكم في المفاعل النووي، وذلك بسبب صغر سماكة الطبقة المتآكلة إشعاعياً مقارنة بغيره وكلفته الاقتصادية المنخفضة نسبياً.

3. على الرغم من المقطع العرضي للأسر للبورون B^{10} كبير جداً إلا أنه يتآكل بشكل كبير إشعاعياً وذلك بسبب صغر تركيزه أي كثافته.

9. التوصيات

1. نوصي بصناعة حواف قضبان التحكم على شكل طبقات سهلة الفك والتركيب، ليتم استبدال الطبقة الأخيرة بشكل سنوي، دون الحاجة إلى استبدال قضيب التحكم بشكل كامل.

2. نوصي بصناعة قضبان التحكم في المفاعل النووي من سبائك تجمع بين المواد ذات المقطع العرضي الكبير للأسر والمواد ذات التركيز الكبير.

3. نوصي بإجراء دراسة تأخذ تأثير كل من العوامل درجة الحرارة والضغط والرطوبة على سماكة الطبقة المتآكلة في قضبان التحكم في المفاعل النووي.

10. Reference

[1] International Atomic Energy Agency, Nuclear Reactor Safety, Vienna, 1996.

[2] International Commission on Radiological Safety, Report on Nuclear Reactor Safety, Paris, 2000.

[3] European Nuclear Energy Agency, Study on the Corrosion of Control Rods in Nuclear Reactors, Rome, 2010.

[4] U.S. Atomic Energy Commission, The B Reactor, 1952.

[5] International Atomic Energy Agency (IAEA), Design and Operation of Nuclear Power Plants, 1974.

[6] U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC), Safety Evaluation Report, 1988.

[7] International Atomic Energy Agency (IAEA), Nuclear Safety and Technology, 2018.

[8] (American Society of Mechanical Engineers (ASME, Nuclear Reactor Operation, 2019.

[9] Westinghouse Electric Company, Nuclear Reactor Operation Manual, 2020.