

حساب المعاملات الحرارية التفاعلية للمفاعل VVER-1000 محمل بوقود مختلط باستخدام الكود Mcnp5-beta

د. م. نصر ياسين*

الملخص

استعمل كود مونتني كارلو MCNP5-beta في هذا البحث لحساب المعاملات الحرارية للتفاعلية لمفاعل الطاقة VVER-1000 لنوع وقود مختلط متدرج التخصيب.

بينت نتائج الحساب أن المعاملات الحرارية للتفاعلية للقيم:

$-2.390 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ و $-3.24 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ و $-4.148 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ على الترتيب لدرجة حرارة الوقود، ودرجة حرارة المهدئ، ولكثافة المهدئ. أظهرت النتائج توافقاً جيداً مع نتائج أجريت للمفاعل VVER-1000.

الكلمات المفتاحية: كود MCNP5-beta، مفاعل الطاقة VVER-1000، تفاعلية، معاملات حرارية.

* أستاذ مساعد، قسم الميكانيك العام، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة دمشق.

**Calculation of the temperature coefficients of reactivity
for VVER-1000 reactor
with Mox fuel using MCNP5-beta code**

Dr. Eng. Naser Yasein *

Abstract

The MCNP5-beta Monte Carlo code was used to calculate the reactivity thermal coefficients of the VVER-1000 reactor.

The calculated value of the reactivity thermal coefficients of the fuel and coolant temperature and coolant density were $-2.39.10^{-5} \text{ K}^{-1}$, $-3.24.10^{-5} \text{ K}^{-1}$, $-4.148.10^{-4} \text{ K}^{-1}$ respectively .

The results showed good agreements with presently published results previous about VVER-1000 reactor.

Keywords: MCNP5-beta Code, VVER-1000 reactor, Reactivity, Thermal coefficient.

*Ass Professor, Department of Mechanics, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Damascus University, Syria.

1- المقدمة:

مفاعلات الطاقة من النوع VVER:

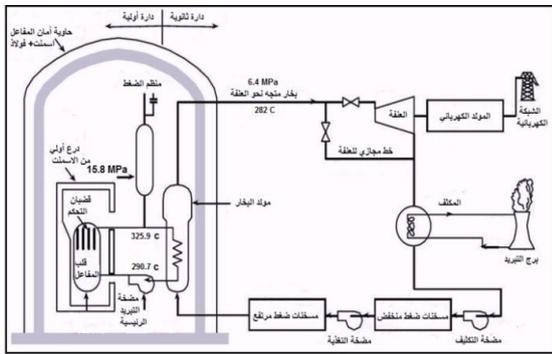
يعدّ المفاعل VVER أو WWER (Water Water Energy Reactor) من أكثر أنواع مفاعلات الطاقة الروسية الصنع انتشاراً في العالم، ويعمل عند استطاعات مختلفة منها 440 MW و 640 MW و 1000 MW [2]. والمفاعل VVER-1000 هو من مفاعلات الجيل الجديد عالية الأمان، ويدل الرقم 1000 MW على استطاعته الكهربائية، وقد تبلغ استطاعته الحرارية القيمة 3000 MW.

2- أجزاء المفاعل VVER-1000:

تتكون محطة الطاقة النووية للمفاعل VVER-1000 بشكل رئيسي من الأجزاء الآتية:
المفاعل والدائرة الأولية والدائرة الثانوية ومنظم الضغط وأنظمة التحكم والتشغيل، وأنظمة الأمان.
ويتكون المفاعل VVER-1000 من الأجزاء الرئيسية الآتية:

- 1- قلب المفاعل وهو الجزء الرئيسي من المفاعل الذي تتحرر فيه الطاقة إذ أنه يحتوي الوقود النووي والمهدئ والمبرد.
- 2- يستعمل الماء كعاكس للنيوترونات يعمل على خفض تسرب النيوترونات إلى خارج حدود المفاعل.
- 3- قضبان التحكم: تستعمل قضبان التحكم كعناصر أمان وتحكم في المفاعل بهدف إبقاء المفاعل تحت السيطرة، وتعمل هذه القضبان آلياً عند الحاجة لخفض استطاعة المفاعل أو رفعها أو لإيقافه بأقصى سرعة عند حالات الطوارئ، وتصنع قضبان التحكم من كربيد البور B_4C .

- 4- وعاء المفاعل: يحتوي على مكونات المفاعل جميعها ويصنع من خليطه من الفولاذ غير القابل للصدأ.
 - 5- حاوية المفاعل: بناء حصين من الخرسانة يحوي وعاء المفاعل والأجزاء الأخرى كالعنفات ومولدات البخار وغيرها.
- ويوضّح الشكل (1) رسماً تخطيطياً لمحطة المفاعل VVER-1000، ويعطي الجدول (1) المواصفات الهندسية لمكونات قلب المفاعل VVER-1000.



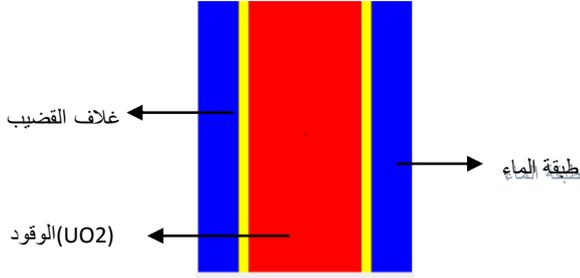
الشكل (1) رسم تخطيطي لمحطة المفاعل VVER-1000

الجدول (1) المواصفات الهندسية لمكونات عنصر الوقود في المفاعل VVER-1000.

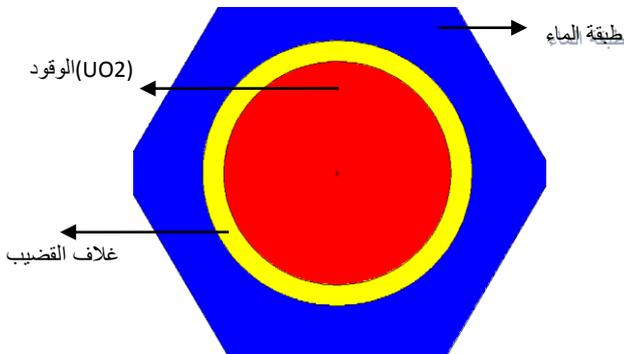
اسم الخلية	أجزاء الخلية	نصف القطر (cm)
قضيب الوقود	نصف قطر قضيب الوقود	0.386
	نصف القطر الخارجي للواقية	0.455
العنصر المركزي	نصف القطر الداخلي	0.55
	نصف القطر الخارجي	0.63
قضيب التحكم	نصف قطر قضيب التحكم	0.35
	نصف القطر الخارجي للواقية	0.41
	نصف القطر الداخلي	0.55
	نصف القطر الخارجي	0.63

3. الكود MCNP: [3]

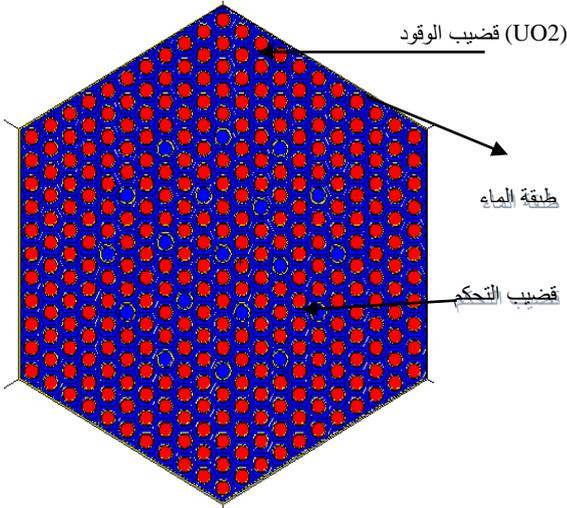
الكود MCNP هو من إحدى طرائق مونت كارلو (Monte Carlo N-Particle) التي تدرس تفاعل الجسيمات مع المادة بأنواعها المختلفة عند الطاقات جميعها، ويجري تطوير هذا الكود في مختبرات لوس ألاموس الوطنية في الولايات المتحدة الأمريكية. ويعتمد



الشكل (2-a) مقطع طولي لقضيب الوقود المستعمل في المفاعل VVER-1000 وفق المحورين XZ باستعمال رسام الكود MCNP5



الشكل (2-b) مقطع عرضي لقضيب الوقود المستعمل في المفاعل VVER-1000 باستعمال رسام الكود MCNP5 وفق المحورين XY



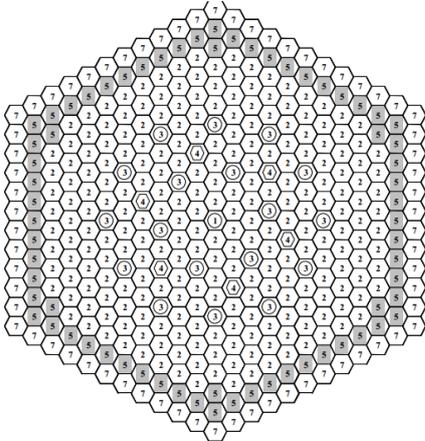
الشكل (3) مقطع عرضي لعنصر الوقود المستعمل في المفاعل VVER-1000 وفق المحورين XY باستعمال رسام الكود MCNP5

هذا الكود الذي أعد أصلاً للنترونات طرائق مونتني كارلو لتتبع الحركة الفردية للجسيمات في الأوساط المادية. وقد عدّل ليشمل محاكاة مصادر أخرى كمصادر الأشعة غاما والإلكترونات. ويشمل الكود MCNP عددًا من مكتبات المقاطع العرضية حيث تتوفر معلومات كافية للعناصر جميعها من $Z=1$ إلى $Z=98$ ، ويحاكي الكود MCNP انتقال النوترونات في مجال الطاقة 10^{-11} - 20 MeV والفوتونات في مجال الطاقة 10^{-3} - 100 MeV، ويتميز النسخة MCNP5-beta بإمكانية التعامل مع الكود من خلال نافذة مزودة بواجهة لإدخال المعطيات وللرسم البياني.

4- نمذجة المفاعل VVER-1000 باستعمال الكود MCNP5:

استعمل الكود MCNP5 لنمذجة قلب المفاعل VVER-1000، إذ جرى أولاً نمذجة الخلية الواحدة لهذا المفاعل التي تتكون من قضيب الوقود (Fuel pin) وغلافه وقناة الماء المحيطة به، وللحصول على عنصر الوقود (Fuel element) كُريت الخلية الواحدة باستعمال التعليمة (fill) 312 مرة، وللحصول على تشكيلة القلب كاملة كُرت عنصر الوقود 163 مرة. نفذت الحسابات بمراعاة أن المفاعل VVER-1000 مكون من بنية متجانسة (توضع منتظم للوقود والمهدئ) ومحاطة بطبقة عاكسة من الماء موزعة على جوانب القلب.

ويوضّح الشكلان (2-a,b) مقطعاً طويلاً وعرضياً لبنية قضيب الوقود المكون من أكسيد اليورانيوم (UO2) والغلاف (الزركونيوم) وطبقة الماء، كما يوضّح الشكل (2) مقطعاً عرضياً لعنصر الوقود وعليه أماكن توضع قضبان التحكم وقضبان الوقود، ويوضح الشكل (3) مقطعاً عرضياً لسدس قلب المفاعل VVER-1000.



الشكل (5) عنصر الوقود القياسي للمفاعل VVER-1000 المحمل بوقود UOX

الجدول (3) أنواع قضبان الوقود الموجودة في عنصر الوقود [5]UOX

رقم الخلية	نمط الخلية
1	قضيب الوقود المركزي
2	قضيب الوقود U-4.2
3	قضيب التحكم
4	قضيب وقود TVEG-5
5	قضيب وقود U-3.7
7	المهدئ

5.2. النوع الثاني MOX:

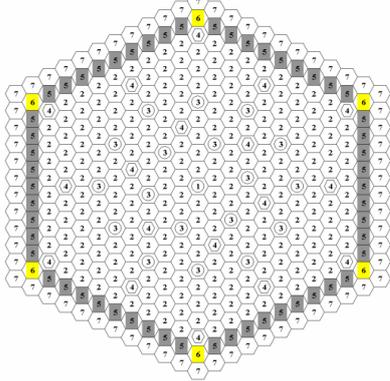
يوضح الشكل (6) عنصر الوقود الـ MOX يتألف

الوقود المختلط من أربعة أنواع وقود، هي:

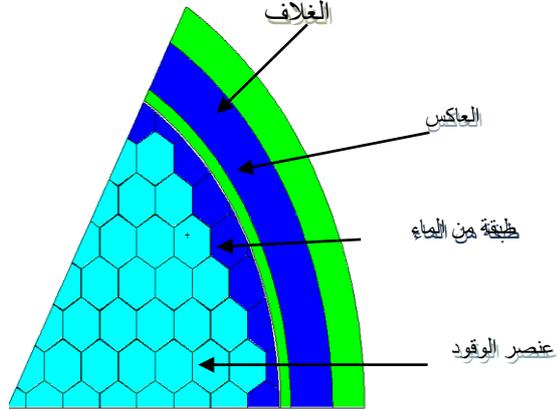
PU-2.4, PU-2.7, TVEG-4, PU-3.6 موضحة

في الجدول (5) إذ إن باقي المعلومات المتعلقة بمواد

الوقود موجودة في الجدول (4).



الشكل (6) عنصر الوقود للمفاعل VVER-1000 المحمل بوقود MOX



الشكل (4) مقطع عرضي لسدس قلب المفاعل VVER-1000 باستخدام رسام الكود MCNP5

5. نوعا الوقود المستخدم في المفاعل VVER-1000: النوع الأول UOX:

يوضح الشكل (5) عنصر الوقود الـ UOX إذ يوجد ثلاثة أنواع لقضبان الوقود موجودة في الجدول (3) وهي U-4.2, TVEG-5, U-3.7 إذ إن الرمز U-4.2 مثلاً يعني UO₂ بنسبة تخصيب 4.2% حيث يوضح الجدول (2) مكونات كل نوع من أنواع الوقود والكثافات الذرية الموافقة لها.

الجدول (2) الكثافات الذرية لمواد قضبان الوقود في نوع

الوقود الـ [5]UOX

الكثافات الذرية للمواد atom/barn*cm	اسم المادة	الكثافات الذرية للمواد atom/barn*cm
9.0411e-4	U235	U-4.2
2.0362e-2	U238	
4.2532e-2	O	
6.6163e-4	U235	TVEG-5
1.9143e-2	U238	
4.1938e-2	O	
3.2142e-6	Gd52	
3.4579e-5	Gd54	
2.3321e-4	Gd55	
3.2053e-4	Gd56	
2.446e-4	Gd57	
3.8403e-4	Gd58	
3.3373e-4	Gd60	
7.9649e-4	U235	U-3.7
2.0469e-2	U238	
4.253e-2	O	

6. المواد التركيبية والمهدئ والعاكس:

المواد التركيبية المستخدمة في المفاعل هي عبارة عن واقيات عناصر الوقود وواقية قضبان الوقود، والقضيب المركزي، وأغلفة القضبان الماصة، وهي في المفاعل VVER مكونة من خليطة الزركونيوم (زركونيوم+هافلنيوم+نيوم) لواقيات الوقود وواقية القضيب المركزي أما واقيات عناصر التحكم والغلاف الخارجي للمفاعل (vessel, barrel, buffer), فمصنوعة من خليطة الستيل أما قضبان التحكم فمصنوعة من كربيد البور، كما يوضح الجدول (6) الكثافات الذرية للمواد التركيبية المستخدمة في المفاعل VVER-1000.

الجدول (6) الكثافات الذرية للمواد التركيبية المستخدمة في المفاعل VVER-1000[5]

اسم المادة	مكونات المادة	الكثافات الذرية للمواد atom/barn*cm
واقية الزركونيوم	واقية الوقود الثقب المركزي	ZR 4.257E-2
		NB 4.223E-4
		HF 6.594E-6
الستيل	واقيات قضبان التحكم Steel buffer Steel barrel Steel vessel	Fe 5.933E-2
		Cr 1.687E-2
		Ni 8.477E-3
		Ti 9.904E-4
		C 4.737E-4
B4C 80% enrichment of B ¹⁰	قضبان التحكم	B ¹⁰ 6.571E-2
		B ¹¹ 1.643E-2
		C 2.053E-2

يستخدم الماء الخفيف كمهدئ وعاكس في المفاعل VVER-1000 إذ إن لكل حالة تشغيل من حالات المفاعل شروطاً خاصة من حيث درجة الحرارة ونسبة البور المضافة إذ يرمز لكل مادة برموز خاص مثلاً (M575B1.3) أي ماء خفيف درجة حرارته 575K مضافاً إليه بور 1300ppm، حيث يوضح الجدول (7) الكثافات الذرية لمادة المهدئ والعاكس في المفاعل VVER-1000.

الجدول (4) الكثافات الذرية لمواد قضبان الوقود المستعملة في الوقود من نوع MOX[5]

اسم المادة	الكثافات الذرية للمواد atom/barn*cm
Pu-3.6	U235 4.3057e-5
	U238 2.0386e-2
	Pu38 1.0841e-6e-2
	Pu39 7.5661e-4
	Pu40 5.3794e-5
	Pu41 9.5720e-6
	Pu42 3.5119e-6
	O 4.2506e-2
TVEG-4	U235 7.3225e-4
	U238 1.936e-2
	O 4.2056e-2
	Gd52 2.5815e-6
	Gd54 2.7772e-5
	Gd55 1.8730e-4
	Gd56 2.5743e-4
	Gd57 1.9553e-4
	Gd58 3.0843e-4
	Gd60 2.6804e-4
Pu-2.7	U235 4.3057e-5
	U238 2.0598e-2
	Pu38 8.0774e-7
	Pu39 5.6222e-4
	Pu40 3.9987e-5
	Pu41 7.116e-6
	Pu42 2.6131e-6
	O 4.2508e-2
Pu-2.4	U235 4.3057e-5
	U238 2.066e-2
	Pu38 7.2271e-7
	Pu39 5.0579e-4
	Pu40 3.5961e-5
	Pu41 6.4023e-6
	Pu42 2.3413e-6
	O 4.2508e-2

الجدول (5) أنواع قضبان الوقود الموجودة في عنصر الوقود MOX.

رقم الخلية	نمط الخلية
1	قضيب الوقود المركزي
2	قضيب الوقود PU-3.6
3	قضيب التحكم
4	قضيب وقود TVEG-4
5	قضيب وقود PU-2.7
6	قضيب وقود PU-2.4
7	المهدئ

الحرارة التي تجعل المفاعل آمناً ومستقراً. وتشمل المعاملات الحرارية للتفاعلية:

7.1 معامل درجة حرارة المهدئ:

يسمى تغير التفاعلية بتغير درجة حرارة المهدئ المعامل الحراري للتفاعلية. ونتيجة لامتلاك المواد المختلفة في المفاعل لتغيرات مختلفة للتفاعلية مع درجة الحرارة، وكذلك أيضاً لوجود هذه المواد عند درجات حرارة مختلفة في أثناء تشغيل المفاعل، لذا تستعمل عدة معاملات حرارية مختلفة.

إن المعاملين الحراريين المسيطران هما المعامل الحراري للمهدئ، والمعامل الحراري للوقود. والتغير في التفاعلية لكل تغير في درجة حرارة المهدئ يسمى معامل درجة حرارة المهدئ للتفاعلية. وتتبع قيمة وإشارة (+ أو -) معامل درجة حرارة المهدئ لنسبة المهدئ إلى الوقود. إذا كان المفاعل تحت مهدأ فإنه سيملك قيمة سالبة لمعامل درجة حرارة المهدئ. وإذا كان المفاعل فوق مهدأ فإنه سيملك قيمة موجبة لمعامل درجة حرارة المهدئ. علماً أن القيمة السالبة لمعامل درجة حرارة المهدئ هي المرغوب فيها بسبب مفعول تعديلها الذاتي (self-regulating effect). مثلاً تؤدي الزيادة في التفاعلية إلى إنتاج استطاعة أكثر في المفاعل، وهذه الزيادة في درجة حرارة القلب تسبب بإضافة تفاعلية سالبة تعمل على إبطاء أو إيقاف الزيادة في الاستطاعة.

7.2 معامل درجة حرارة الوقود:

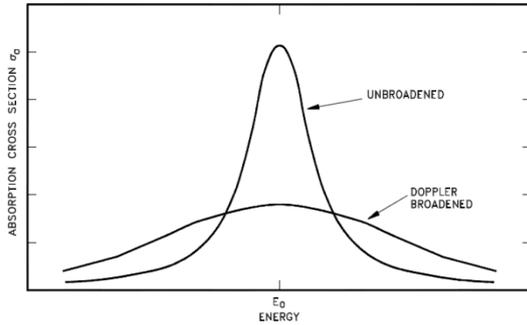
المعامل الحراري الآخر للتفاعلية هو المعامل الحراري للوقود، وتأثيره يكون كبيراً مقارنة بمعامل التفاعلية الحراري للمهدئ من أجل بعض المفاعلات. ويعرف المعامل الحراري للوقود بأنه التغير في التفاعلية الموافق لتغير درجة حرارة الوقود. وهذا المعامل يسمى أيضاً المعامل

الجدول (7) الكثافات الذرية للمهدئ والعاكس المستخدمة في المفاعل VVER-1000[5]

اسم المادة	ملاحظات	الكثافات الذرية للمواد atom/barn*cm
M575B1.3	مهدئ مضاف إليه البور بنسبة 1300ppm T=575K $\rho = 0.7241 \text{g/cm}^3$	4.841e-2 H 2.4205e-2 O16 1.0381e-5 B10 4.2049e-5 B11
M575B0	مهدئ غير مضاف إليه البور T=575K $\rho = 0.7421 \text{g/cm}^3$	4.8410e-2 H 2.4205e-2 O16 0 B10 0 B11
M560B1.3	مهدئ مضاف إليه البور بنسبة 1300ppm T=560K $\rho = 0.7533 \text{g/cm}^3$	5.0362e-2 H 2.5181e-2 O16 4.9845e-6 B10 2.0190e-5 B11
M560B0	مهدئ غير مضاف إليه البورون T=560K $\rho = 0.7533 \text{g/cm}^3$	5.0362e-2 H 2.5181e-2 O16 0 B10 0 B11
M553B0	مهدئ غير مضاف اليهالبورون T=553K $\rho = 0.7657 \text{g/cm}^3$	5.1192e-2 H 2.5596e-2 O16 0 B10 0 B11
M300B2.8	مهدئ مضاف إليه البورون بنسبة 2800ppm T=300K $\rho = 1.0033 \text{g/cm}^3$	6.7076e-2 H 3.3538e-2 O16 3.0981e-5 B10 1.2549e-4 B11

7- تأثير درجة الحرارة في التفاعلية:

ترتبط معاملات كل من تفاعلية المفاعل، والانتفاع الحراري، واحتمال تجاوز الامتصاص التجاوبي، وعدم التسرب الحراري والسريع..... الخ بدرجات حرارة الوقود والمهدئ والمبرد، إذ تؤدي الزيادة في درجات الحرارة إلى انخفاض كثافة المواد مما يؤثر في التفاعلية التي تؤدي دوراً مهماً في التحكم في المفاعل. ومن وجهة نظر الأمان تعدّ المعاملات الحرارية للتفاعلية هي الأكثر أهمية. فإذا كانت هذه المعاملات موجبة فإن المفاعل يكون غير مستقر، وأمانه يعتمد على أدوات التحكم الخارجية، وإذا كانت سالبة فإن معامل التضاعف ينخفض بارتفاع درجة



الشكل (7) تأثير توسع دوبلر في المقطع العرضي للامتصاص التجاوبي

7.3. معامل الفراغ:

في النظم التي تتوفر فيها ظروف الغليان مثل مفاعل الماء المغلي (BWR) يصبح معامل الضغط ذا أهمية بالغة تبعاً للتغيرات الكبيرة في الكثافة التي تحدث عندما يخضع الطور البخاري للماء إلى تغير الضغط. ويكتسب معامل الفراغ أهمية بالغة عند تشغيل المفاعل (BWR) وغيره من المفاعلات المهدئة بالماء. وينجم معامل الفراغ عن تشكل فراغات البخار في المهدئ. يعرف معامل الفراغ للضغط بأنه التغير في التفاعلية لكل تغير مئوي لحجم الفراغ. ومع زيادة استطاعة المفاعل إلى النقطة التي يبدأ عندها البخار بالتشكل فإن الفراغات تستبدل المهدئ في قنوات التبريد في القلب. وهذا الاستبدال يخفض نسبة المهدئ-وقود، وكذلك أيضاً القلب تحت المهدأ مما يؤدي إلى تفاعلية إضافية سالبة تقيد الزيادة في استطاعة المفاعل. ولمعامل الفراغ أهمية في المفاعلات التي تهدأ بالماء والتي تشغل عند ظروف الإشباع أو بالقرب منها.

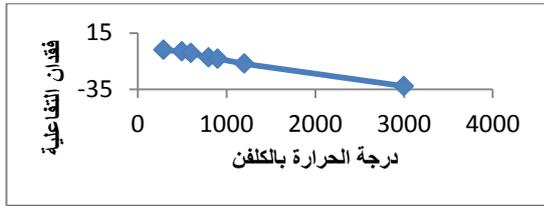
8. النتائج والمناقشة:

جرى التأكد أولاً من صحة بناء النموذج ثلاثي الأبعاد للمفاعل VVER-1000 باستعمال رسام الكود MCNP5-beta، ومن ثم جرى تشغيل الكود وحساب المعاملات الحرارية للتفاعلية، وفي أثناء الحساب أخذ بالحسبان ما يأتي:

- الحجم الاسمي (النظري) للمصدر في كل دورة: 20000 نوتروناً.

الحراري اللحظي (prompt)، وذلك لأن الزيادة في استطاعة المفاعل تؤدي إلى ارتفاع مباشر لدرجة حرارة الوقود. ويعدّ المعامل الحراري السلبى للوقود أكثر أهمية من المعامل الحراري السلبى للمهدئ، وذلك لأن درجة حرارة الوقود تزداد مباشرة تبعاً لزيادة استطاعة المفاعل. ويقدر زمن انتقال الحرارة إلى المهدئ بالثواني. وفي حالة إدخال تفاعلية موجبة فإن درجة حرارة المهدئ لا يمكنها تحويل زيادة الاستطاعة عدة ثوان، في حين يبدأ المعامل الحراري للوقود بإضافة مباشرة لتفاعلية موجبة.

الاسم العملي الآخر لمعامل التفاعلية الحراري للوقود هو معامل التفاعلية لمفعول دوبلر للوقود. وتطبق هذه التسمية لأنه في حالة الفعالية المنخفضة، كما في حالة مفاعلات الماء الخفيف والمفاعلات الحرارية يكون معامل التفاعلية الحراري للوقود سالباً، وهو نتيجة لمفعول دوبلر، ويسمى أيضاً توسع دوبلر. وتنتج ظاهرة توسع دوبلر عن التوسع الواضح للتجاوب للعائد للحركة الحرارية للنوى كما بالشكل (7). وتمتص النوى الساكنة فقط النيوترونات ذات الطاقة E_0 . وإذا تحركت النوى مبتعدة عن النيوترون فإن سرعة النيوترون (وطاقته) ينبغي أن تكون أكبر من E_0 لكي يخضع النيوترون للامتصاص التجاوبي. وبطريقة مشابهة إذا تحركت النوى نحو النيوترون فإن النيوترون يحتاج إلى طاقة أقل من E_0 كي تحدث عملية امتصاصه. ويؤدي ارتفاع درجة الحرارة إلى اهتزاز أكبر للنوى في شبكتها البلورية، ومنه توسع فعال لمجال الطاقة للنيوترونات التي يمكن أن تمتص تجاوبياً في الوقود. ويسود مفعول دوبلر في المفاعلات التي يحوي وقودها كمية كبيرة من اليورانيوم 238- والبلوتونيوم 240- لامتلاكهما لقمم تجاوبية كبيرة (كما في المفاعل VVER-1000 إذ تزيد نسبة اليورانيوم 238 الذي يمتص النيوترونات تجاوبياً).



الشكل (8) التفاعلية كتابع لدرجة حرارة الوقود للمفاعل VVER-1000

حسب معامل التفاعلية لدرجة حرارة الوقود بأخذ القيمة الوسطية ($\alpha_f = -2.39 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$) إذ نلاحظ أنها تملك قيمة سالبة.

8.2 معامل التفاعلية لدرجة حرارة المهدئ للمفاعل VVER-1000:

لدراسة تأثير تغير درجة حرارة المهدئ في تفاعلية المفاعل قمنا بتثبيت درجة حرارة الوقود وكثافة المهدئ عند القيمتين (1 g/cm^3) و ($293 \text{ K} = 20 \text{ C}^0$) على الترتيب، وقمنا بزيادة درجة حرارة المهدئ. لحساب معامل التفاعلية لدرجة حرارة الماء α_t استخدمت العلاقة الآتية [9]:

$$\alpha_t = \frac{\Delta K_{\text{eff}}}{\Delta T_w} \quad (3)$$

إذ: ΔK_{eff} - التغير في معامل التضاعف الفعال، ΔT_w - التغير في درجة حرارة المهدئ.

نقوم بتغيير درجة حرارة الخلية بشكل مباشر بإدخال درجة الحرارة التي نختارها الموافقة لدرجة حرارة مكتبة المقاطع العرضية تدخل درجة الحرارة بواسطة التعليمات tmp إذ تحول درجة الحرارة من واحدة الكلفن إلى واحدة Mev عن طريق عامل تحويل مناسب موافق للكود MCNP5-beta، وقد أخذنا ثلاث قيم فقط توافق درجة حرارة تشغيل المفاعل، ثم حسب الوسطي لهذه القيم، ويعطي الجدول (9) نتائج هذا الحساب.

- القيمة المتوقعة لمعامل التضاعف الفعال: 1.0 .
 - عدد الدورات الاختبارية (غير الفعالة): 25 دورة.
 - العدد الكلي للدورات: 200 دورة.
- واختيرت نقاط المصدر كمصادر ابتدائية في مركز كل عنصر ووقود في البطاقة (ksrc).

8.1 معامل التفاعلية لدرجة حرارة الوقود:

لدراسة تأثير تغير درجة حرارة الوقود في تفاعلية المفاعل VVER-1000 ثبتنا درجة حرارة المهدئ وكثافته عند القيم ($\rho = 1.0033 \text{ g/cm}^3$ و $T = 293 \text{ K}$) وقمنا بتغيير درجة حرارة الوقود فقط. لحساب معامل التفاعلية لدرجة حرارة الوقود استخدمت العلاقة الآتية [8]:

$$\alpha_f = \frac{\Delta K_{\text{eff}}}{\Delta T} \quad (2)$$

إذ: ΔK_{eff} - التغير في معامل التضاعف الفعال، ΔT - التغير في درجة الحرارة.

يعطي الجدول (8) معاملات التفاعلية لدرجة حرارة الوقود للمفاعل VVER-1000 ويوضح الشكل (8) تناقص تفاعلية قلب المفاعل VVER-1000 كتابع لدرجة حرارة الوقود.

الجدول (8) معاملات التفاعلية لدرجة حرارة الوقود للمفاعل VVER-1000 بوقود مختلط

معامل التفاعلية لدرجة حرارة الوقود المختلط $\alpha_f (K)^{-1}$	رقم المكتبة العرضية	درجة حرارة الوقود MeV	درجة حرارة الوقود K
-1.29×10 ⁻⁵	60C	2.52×10 ⁻⁸	293
-2.93×10 ⁻⁵	13C	6.66×10 ⁻⁸	500
-3.71×10 ⁻⁵	14C	7.52×10 ⁻⁸	600
-2.13×10 ⁻⁵	15C	8.94×10 ⁻⁸	800
-2.25×10 ⁻⁵	16C	1.01×10 ⁻⁷	900
-2.02×10 ⁻⁵	17C	1.27×10 ⁻⁷	1200
	65c		3000

8.3. معامل التفاعلية لكثافة المهدئ للمفاعل

VVER-1000:

لدراسة تغيّر تفاعلية المفاعل VVER-1000 بتغيير كثافة المهدئ أنقصنا كثافة الماء من

(1 g/cm³) إلى (0.714 g/cm³) مع تثبيت درجة حرارة الوقود والمهدئ عند درجة الحرارة 20 C⁰.

حسب معامل التفاعلية لكثافة الماء من العلاقة الآتية

[10]:

$$\alpha_{\rho} = \frac{\Delta K_{\text{eff}}}{\Delta \rho} \times \frac{\partial \rho}{\partial T} \quad (4)$$

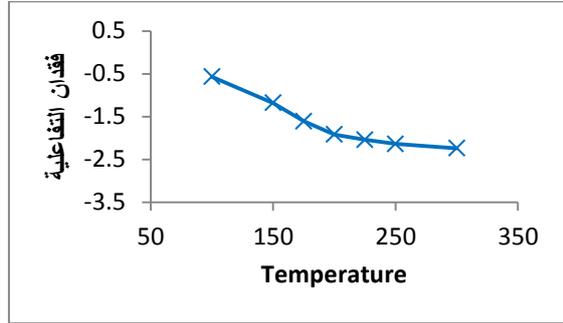
إذ: ΔK_{eff} - التغير في معامل التضاعف الفعال،

$$\frac{\partial \rho}{\partial T}$$

-تغير التفاعلية بتغير درجة الحرارة، علماً

$$\frac{\partial \rho}{\partial T} = -2.1 \times 10^{-3} \quad \text{أن} \quad [10].$$

يعطي الجدول (10) معاملات التفاعلية لكثافة الماء، ويوضح الشكل (10) تغير التفاعلية كتابع لكثافة الماء للمفاعل VVER-1000. إذ يلاحظ من الشكل أنّ قيمة التفاعلية تنقص بنقصان كثافة المهدئ.



الشكل (9) التفاعلية المفقودة جراء زيادة درجة حرارة المهدئ

الجدول (9) تغير التفاعلية جراء ارتفاع درجة حرارة المهدئ بإدخال درجة حرارة المهدئ

معامل التفاعلية بدلالة درجة حرارة الماء α_t	التفاعلية المفقودة (mk)	تفاعلية القلب (mk)	Keff	درجة حرارة الماء (MeV)	درجة حرارة الماء K0	درجة حرارة الماء C0
10-7×-6.67	0	282.04	1.39284	10-8×2.52	293	20
10-5×-4.08	-0.01	282.03	1.39282	10-8×2.78	323	50
10-6×-2.4	-0.53	281.51	1.39180	10-8×3.00	348	75
10-6×4.40	-0.57	281.47	1.39174	10-8×3.21	373	100
10-5×-4.28	-0.47	281.57	1.39163	10-8×3.43	398	125
10-5×-3.56	-1.18	280.86	1.39056	10-8×3.64	423	150
10-5×-2.16	-1.61	280.43	1.38967	10-8×3.86	448	175
10-6×-5.6	-1.92	280.12	1.38913	10-8×4.08	473	200
10-6×-4.4	-2.04	280.00	1.38899	10-8×4.29	498	225
10-5×-1.48	-2.14	279.90	1.38888	10-8×4.51	523	250
	-2.24	279.80	1.38851	10-8×4.94	573	300

الجدول (10) معاملات التفاعلية لكثافة المهدئ للمفاعل VVER-1000

α_{ρ}	Keff	كثافة المهدئ
-4.69×10-4	1.39384	1
-1.07×10-4	1.38269	0.95
-3.27×10-4	1.38014	0.9
-4.17×10-4	1.37235	0.85
-7.69×10-4	1.36243	0.8
	1.34412	0.714

أخذت قيمة معامل التفاعلية بدلالة درجة حرارة الماء عند درجة حرارة تشغيل المفاعل وبأخذ القيمة الوسطية نتجت قيمة $\alpha_t = -3.24 \times 10^{-5}$ k-1 نلاحظ من القيمة التي نتجت من الحساب أن قيمة معامل درجة حرارة المهدئ سالبة عند درجة حرارة تشغيل المفاعل.

الجدول (11) مقارنة بين قيم معاملات التفاعلية للمفاعل VVER-1000 باستعمال الوقود المختلط و VVER-1000 باستعمال الوقود العادي.

المفاعل VVER-1000 وقود عادي [7]	المفاعل VVER-1000 وقود مختلط الكود MCNP5-beta	معامل التفاعلية $(K)^{-1}$
-2.52×10^{-5}	-2.39×10^{-5}	$\bar{\alpha}_f$
-3.23×10^{-5}	-3.24×10^{-5}	$\bar{\alpha}_t$
-4.05×10^{-4}	-4.178×10^{-4}	$\bar{\alpha}_p$
-4.35×10^{-4}	-4.502×10^{-4}	α_w

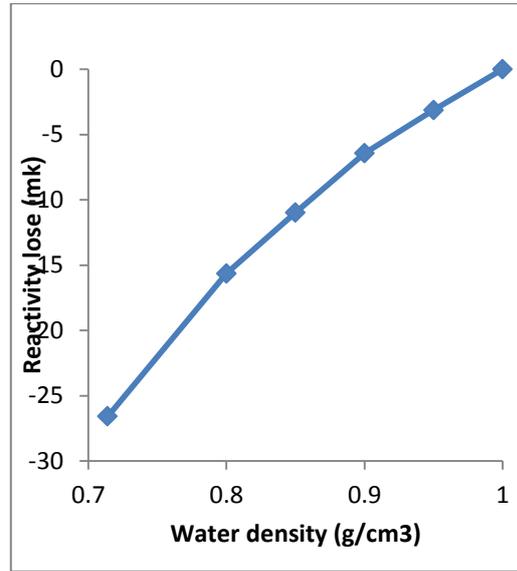
وجدنا من الجدول (11) أن معاملات التفاعلية كانت سالبة، وهي مرغوب فيها في المفاعلات، وذلك لأنها تجعل المفاعل مضبوطاً ذاتياً ومن ثم أكثر أماناً. إذ تؤدي زيادة الاستطاعة إلى زيادة في درجة الحرارة ومن ثم إضافة تفاعلية سالبة، هذه الإضافة ستؤدي إلى تباطئ أو إيقاف زيادة الاستطاعة.

9. الاستنتاجات:

استخدم في هذا البحث الكود MCNP5-beta لنمذجة قلب المفاعل VVER-1000، وحساب المعاملات الحرارية للتفاعلية للمفاعل VVER-1000.

وبلغت المعاملات الحرارية للتفاعلية القيم: $-2.39 \times 10^{-5} K^{-1}$ و $-3.24 \times 10^{-5} K^{-1}$ و $-4.148 \times 10^{-4} K^{-1}$ على الترتيب لدرجة حرارة الوقود، ولدرجة حرارة المهدئ ولكتافة المهدئ.

قورنت قيم المعاملات الحرارية للتفاعلية المحسوبة للمفاعل VVER-1000 بوجود الوقود المختلط في هذا البحث مع تلك المحسوبة في المرجع [7] للمفاعل VVER-1000، وباستعمال الوقود الكلاسيكي على وجود توافق جيد بين هذه القيم.



الشكل (10) نقصان التفاعلية كتابع لكتافة المهدئ للمفاعل VVER-1000

نأخذ القيمة الوسطية لمعامل التفاعلية لكتافة الماء:

$$\bar{\alpha}_p = -4.178 \times 10^{-4} (K^0)^{-1}$$

مما سبق يمكن حساب معامل التفاعلية الكلي لدرجة حرارة الماء (α_w) من العلاقة الآتية:

$$\alpha_w = \bar{\alpha}_p + \bar{\alpha}_t \quad (5)$$

وأعطى الحساب القيمة:

$$\alpha_w = -4.502 \times 10^{-4} (K^0)^{-1}$$

قورنت القيمة المحصول عليها للمفاعل VVER-1000 مع القيمة في المرجع [7]، وبناء عليه يلاحظ أن هناك توافقاً جيداً بين قيم معاملات التفاعلية المحسوبة في هذا البحث وفي المرجع [7].

المراجع REFERENCE

- [1] LIAQUAT ALIKHAN. 1999. "Study of reactor design parameters" University of the Punjab. Lahore.
- [2] A. V. Dementeev and others. 1989. "Exploration regime of VVER" book: Moscow.
- [3] Oak Ridge National Laboratory. 2000. "Rsic Computer Code Collection MCNP4C"
- [4] الأشهب، مطاوع. 1991. هندسة المفاعلات (1,2) جامعة دمشق.
- [5] الظواهره، سعدو. 2006. استخدام المواد الماصة للنترونات في المفاعلات من النوع VVER
- [6] M. Rami. AL-Ali, Dr. M. Nahili and Dr. S. AL-Zawahera, "Calculation of the effective multiplication factor, neutron flux distributions for VVER- 640 energy reactor using MCNP5-beta code, to be in print".
- [7] F. A. Ovichinikov, V. V. Siminov. 1988. "Exploitation Regime VVER "Review Book 259 p. Moscow 1988.
- [8] prof.dr.ir. H. van Dam. prof.dr.ir. T. H. J. J. van der Hagen. dr. ir. J. E. Hoogenboom, "Nuclear Reactor Physics" Delft University of Technology Physics of Nuclear Reactors Mekelweg 15, 2629 JB Delft The Netherlands (April 2005)
- [9] ايفانوف، ف. أ. 1994. استثمار محطات الطاقة النووية سان بطرس بورغ (مرجع روسي)
- [10] كيريلوف، ب. ل. 1990. دليل في الحسابات الحرارية والهيدروليكية (مفاعلات-مبادلات-مولدات بخار) موسكو (مرجع روسي).

Received	2015/10/25	إيداع البحث
Accepted for Publ.	2016/11/26	قبول البحث للنشر