حساب بعض البارامترات النترونية لسدس قلب المفاعل VVER-1000 المحمل ب 30% وقود مختلط باستخدام الكود Mcnp-5beta

الدكتور محمد صالح الأيوبي[1]

الملخص

استعمل الكود MCNP-5beta في هذا البحث لنمذجة سدس قلب المفاعل VVER-1000 الذي يحوي على وقوداً مختلطاً (يورانيوم + بلوتونيوم)؛ وذلك لحساب معامل التضاعف الفعال للمفاعل في ست حالات تشغيل مستخدمين عدة نسب تخصيب منخفضة لليورانيوم في سبعين بالمئة من القلب، وفي الباقي استخدمنا وقود مختلط (يورانيوم+بلوتونيوم) بنسب تخصيب أيضاً مختلفة للحفاظ على تجانس إطلاق الطاقة في سدس المفاعل ومن ثم أُجْرِيَتِ بكودات مختلفة بالطريقة والبيانات (MCNP4C,MCU,RADAR) وقد أظهرت المقارنة توافقاً جيداً بالنتائج.ثم حُسِبَت حصة النترونات المتأخرة، والتدفق النتروني الوسطي، ونسبة فعالية قضبان التحكم بوجود الوقود المختلط وبدون وجوده.

كلمات مفتاحية: كودMCNP5-beta،،VVER-1000، معامل التضاعف الفعال،التدفق النيتروني.

[1] **أستاذ مساعد في قسم هندسة الطاقة الكهربائية في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية- جامعة دمشق**

Calculation of some neutronic parameters of one-sixth of the VVER-1000 reactor core loaded with 30% MOX fuel using the Mcnp5-betacode

Dr. Mohammed Saleh Al-Ayoubi[(1)]

Abstract

In this paper 1/6 of VVER-1000 core with MOX fuel was modeled using MCNP5-beta for calculating the reactor effective multiplication factor in six operation cases. The fuel consists 70% of low enriched uranium (UO2) and 30% of MOX fuel (^{235}U and ^{239}Pu). Good agreements have been noticed between our calculation using MCNP5-beta code and another results which were calculated using the MCNP4C, MCU, and RADAR codes. The delayed neutron fraction, average neutron flux and the control rod worth for existing fuel (UO_2) and new fuel (70% UO_2 and 30% MOX) were calculated also in this paper.

Key words: MCNP5-beta , VVER-1000, MOX fuel, the effective multiplication factor, flux.

[(1)]**AssociateProf.ElectricalEng.Dept.Mech.&Elec.Eng.Faculty**

1ــ مقدمة:

على الرغم من الأصوات المتعالية بالحد من استخدام الطاقة النووية لأغراض توليد الطاقة الكهربائية إلّا أنَّ الكثافة الطاقية العالية لوحدة الكتلة، وكذلك تأثيرها المنخفض في البيئة (فيما إذا أخذ بالحسبان موضوع الأمان واحتياطاته بشكل جيد) مقارنة ببدائل عدّة يجعلها من المترادفات الجيدة التي يتم الاعتماد عليها في ميزان الطاقة لدول عدّة كفرنسا وأمريكا واليابان وغيرها على الرغم من بعض الحوادث المؤسفة التي جرت في بعض منها.

وهناك تصنيفات عدّة للمفاعلات منها البحثية ومفاعلات الطاقة وغيرها، والمفاعلات المستخدمة لإنتاج الطاقة الكهربائية لها تصنيفات عدّة أيضاً كالمفاعلات التي تعتمد على النترونات السريعة والحرارية و الماء المضغوط و الماء الغالي، منخفضة نسبة التخصيب أوعالية نسبة التخصيب وغيرهما.

من المفاعلات التي كانت ومازالت تستخدم استخداماً كبيراً خاصة في روسيا الاتحادية وغيرها من البلدان المفاعلات المسماة اختصاراً VVER؛ وهي تعني "مفاعل طاقة نووي يستعمل فيه الماء كمبرد ومهدئ" وباللغة الانكليزية

Water-cooled Water-moderated WWER "Energy Reactor".

هناك العديد من الشركات والمؤسسات المختصة التي عملت وتعمل في مجال النمذجة والمحاكاة، وضمن مجال مفاعلات الماء – ماء نجد أنَّ للشركات الروسية باعاً طويلاً في ذلك.إنَّ الشركة OKB Gidropress هي شركة تصميمات هندسية روسية ذات خبرة أكثر من 70 عاماً في تصميم المفاعلات وتطويرها من نوع VVER؛ وهذا النوع من المفاعلات يماثل المفاعلات الغربية والأمريكية PWR، ولكن هناك جملة من الخصائص التي يتميز بها المفاعل عن بقية مفاعلات الماء المضغوط الأخرى، وهذه الخصائص هي [1]:

- الوضعية الأفقية لمولدات البخار.
- الشكل السداسي لمجموعات قضبان الوقود.
- السعة المائية عالية الضغط 'ما يتيح كمية ماء احتياطية أكبر للتبريد.

يخدم الماء في هذه المفاعلات كمبرد ومهدئ للنترونات، وهذا يعطي خاصية أمان مهمة جداً ، فإذا ما حدث أي خلل في دوران الماء في المفاعل فإنَّ ذلك يعني ارتفاعاً في درجة حرارته ومن ثَمَّ يصبح ذا كثافة أقل ، فيترتب على ذلك انخفاض في معدل تهدئة النترونات ومن ثَمَّ انخفاض في عدد الانشطارات النووية ومن ثَمَّ انخفاض في كمية الحرارة المولدة في القلب وهذا ما يعدّ بالتنظيم الذاتي المرتبط بمعامل درجة حرارة المهدئ وهذه من أهم ميزات المفاعلات VVER[2] .

1.1. المفاعل VVER-1000 المدروس:

هو أحد المفاعلات الروسية الذي يولد (1000MW) طاقة كهربائية، وهو من مفاعلات الجيل الثالث، والطراز VVER-1200 هو النسخة المعروضة للبناء لأنّه تطوير للنموذج المدروس، وذلك من ناحية زيادة الاستطاعة الكهربائية، وبميزات أمان إضافية في حالة غياب للطاقة الكهربائية المغذية للمفاعل.

2.البلوتونيـوم Pu^{239}:البلوتونيـوم -239 هـو أحـد نظـائر البلوتونيـوم يسـتخدم فـي الأغـراض السـلمية كوقـود نـووي فـي المفـاعلات النوويـة لإنتـاج الطاقـة الكهربائيـة إذْ يرجع السبب في استخدامه إلى خواصه الانشطارية إذْ عند امتصاصـه نتـرون ينشـطر مثلمـا يحـدث تمامـاً لليورانيـوم -235 ينـتج البلوتونيـوم – 239 فـي المفـاعلات النوويـة بواسـطة امتصـاص اليورانيـوم -238 نتـرون حـراري، وفـي مفـاعلات المـاء الخفيـف يعـود ثلـث الطاقـة الناتجـة عـن الانشطار إلى البلوتونيوم –239؛ وذلك لأنَّ قضبان الوقود النووي تحتوي على أكسيد اليورانيوم المخصب الذي يحتوي على 97% يورانيوم–238، وعلى 3% يورانيوم –235, ومن بين أنواع الوقود النووي جميعها يختص Pu^{239} بمايأتي:

–بأصـغر كتلـة حرجـة، وهـي كـرة يبلـغ وزنهـا نحـو (11) كيلـــو غـــرام، ويبلـــغ قطرهـــا cm(10.2). بامتصـاص أعلـى للنترونـات مـنU^{235}، كمـا ينـتج عنـد انشطاره عدد من النترونات أعلى ممَّا يصدره اليورانيوم 235 –

– **3. وقـود MOX:** هـو الوقـود النـووي الـذي يحتوي على أكسيد أكثر من واحدة من المواد الانشطارية، وعـادة مـا يتـألف مـن البلوتونيـوم المخلـوط مـع اليورانيـوم الطبيعـــي واليورانيـــوم المعـــاد تصـــنيعه، أو (اليورانيـــوم المنضـب). وقـود مـوكس هـو بـديل لليورانيـوم مـنخفض التخصيب الذي يستخدم في مفاعلات الماء الخفيف التي تستعمل لتوليدالطاقة النووية. أهم عنصر جذب لاستخدام وقود الموكس هو أنَّه وسيلة لاستخدام البلوتونيوم الفائض من الاستخدام العسكري بدلاً من تخزين فائض البلوتونيوم، وهذا الأمر يحتاج إلى تأمين البلوتونيوم من مخاطر السرقة خوفاً من استخدامه في الأسلحة النووية. ولكن من ناحية أخرى، حذرت بعض الدراسات من أنَّ الاستخدام التجاري العـالمي مـن الوقـود مـوكس، وتوسـيع هـذا الاسـتخدام مـن إعادة المعالجة النووية سوف يزيد مخزون البلوتونيوم بدلاً من أن ينقصه، ومن ثَمَّ فإنَّ خطر الانتشار النووي سوف يزيد أيضاً، من خلال التشجيع على زيادة فصل البلوتونيوم من الوقود المستنفد في المفاعلات النووية الناتج عن دورة الوقود إذْ إنَّه في شتَّى أنحاء العالم، ما يقرب من 100 طن من البلوتونيوم في الوقود المستنفد تنشأ كل عام.

-إن إدخال وقود الموكس لاستخدامه كوقود نووي في المفاعلات يمكن أن يغيّر الخصائص التشغيلية للمفاعل، ويجب في بعض الأحيان تعديل تصميم المفاعل أو تكييفه قليلاً ليصبح جاهزاً لكي يستخدم الوقود المختلط، على سبيل المثال هناك حاجة لزيادة قضبان التحكم كما أنَّ نظائر البلوتونيوم تمتص النترونات أكثر من اليورانيوم ^{235}U ويميل الوقود المختلط إلى تشغيل أكثر سخونة بسبب انخفاض التوصيل الحراري الذي يمكن أن يسبّب مشكلة في تصميم المفاعلات . في كثير من الأحيان يمكن استخدام ثلاثين بالمئة من الوقود النووي على شكل وقود مختلط و(ممكن أن تصل النسبة إلى خمسين بالمئة)، غير أنّه عند استخدام أكثر من خمسين بالمئة من وقود موكس ،سوف يحدث تغييرات كبيرة ضرورية، ويحتاج المفاعل عندها إلى أن يصمم وفقاً لذلك. و وفقاً للطاقة الذرية الكندية المحدودة (AECL)، يمكن للمفاعلات CANDU استخدام 100٪ وقود موكس دون تعديل في المفاعل.

3.1.استخدام الوقودMOX في المفاعلات الحرارية:

نحو 30% من المفاعلات الحرارية في أوروبا (بلجيكا وهولندا وسويسرا وألمانيا وفرنسا) تستخدم وقود موكس. معظم المفاعلات تستخدم نحو ثلث الوقود الأساسي ، ولكن بعضها يقبل ما يصل إلى 50٪ من وقود الموكس.، وافقت اليابان على بناء مفاعل جديد مع تحميل وقود كامل من الموكس. يوفر الوقود موكس 2% من إجمالي الوقود النووي المستخدم اليوم في المفاعلات النووية.

3.2.طريقة تصنيع الوقود المختلط MOX Fuel:

نحو 1٪ من الوقود النووي المستنفد من المفاعلات التي تعمل بالماء الخفيف الحالية هي البلوتونيوم، مع تركيبة النظائرالمختلفة. الخطوة الأولى هي فصل البلوتونيوم من اليورانيوم المتبقي (نحو 96٪ من الوقود المستنفد) ونواتج الانشطار مع النفايات الأخرى (معا نحو 3٪). ويتم ذلك في محطة لإعادة المعالجة النووية. ويمكن إجراء وقود موكس عن طريق طحن أكسيد اليورانيوم (UO2) وأكسيد البلوتونيوم (PuO2) قبل الضغط على شكل أكسيد مختلط في الكريات، ولكن هذه العملية لها مساوئ تشكيل كثير من الغبار المشع. وقود موكس بشكل عام الذي يتألف من 7٪ من البلوتونيوم مخلوطاً مع اليورانيوم المنضب يعادل تقريباً وقود أكسيد اليورانيوم المخصب إلى نحو 4.5%

3.3.ميزات استخدام الوقود المختلط MOX Fuel:

1- إنتاج وقود الموكس لحرقه في المفاعلات النووية سوف يؤدي إلى استهلاك المخزون المتنامي من البلوتونيوم

2- إعادة تدوير الوقود النووي هو شيء جيد.

3- إنتاج وقود الموكس سوف يؤدي إلى توفير تكاليف تخزين النفايات النووية.

4 - إنتاج وقود الموكس سيكون أرخص من اليورانيوم المخصب المناسب للمفاعلات النووية.

5- لا توجد مخاطر إضافية تتعلق بالسلامة بالنسبة إلى وقود الموكس.

6-البلوتونيوم موكس هو أفضل تطبيق سلمي فعال للتخلص من البلوتونيوم الفائض إذْ يعدُّ مع مساوئ هذا الخيار جميعها أفضل من تخزينه الذي سوف يحتاج لكلفة كبيرة ومخاطر أمنية جسيمة، أو استخدامه في برامج التسليح العسكرية في بعض الدول مثل أمريكا وبريطانيا التي قامت بتصنيع قنبلة نووية بالاعتماد على البلوتونيوم في الستينيات من القرن الماضي.

3.4. الفروق التصميمة بين نوعي الوقود المختلط والتقليدي[3] :

جرى في هذا البحث التصميم الهندسي لسدس قلب المفاعل VVER-1000، ومن ثم تحميله بوقود مختلط بدلاً من استخدام الوقود التقليدي المنخفض التخصيب (2-4%)، إذْ إنَّ هناك فروقاً جوهريةً بين حالتي التصميم تتخلص بالنقاط الرئيسة الآتية عند استخدام الوقود المختلط (MOX):

1-خفض نسبة فعالية قضبان التحكم، وحمض البور، والقدرة على حرق السموم.

2-خفض النسبة الفعالة من النترونات المتأخرة.

3-خفض معاملات التفاعلية لدرجة الحرارة بالنسبة إلى المهدئ في نهاية دورة الوقود.

4-زيادة معامل ذروة الاستطاعةعلى الحد بين MOX وUOX الذي يجعل من الضرورة استخدام قضبان الوقود المصنوعة من البلوتونيوم فتكون بنسب تخصيب مختلفة في داخل عنصر الوقود الواحد .

5-زيادة كمية نترونات الانشطار.

6-زيادة حساسية التدفق النتروني للتغيرات الطفيفة في نسبة مهدئ \ وقود .

7-يبيّن الجدول رقم (1) المواد المستعملة في المفاعل VVER-1000.

الجدول (1)المواد المستخدمة في المفاعل VVER-1000[1]

الوقود المستخدم	UOX-PUOX
العاكس	الماء العادي مع إضافة نسبة من حمض البور
المهدئ	الماء العادي مع إضافة نسبة من حمض البور
المواد التركيبية	خليطة من الزركونيوم تتألف من المواد الآتية: (زركونيوم +نيتونيوم +هافنيوم)
قضبان التحكم	كربيد البور(B4C)

4.عناصر الوقود المستخدمة في المفاعل VVER-1000 MOX Core :[5]

صُمِّمَ في هذا العمل سدس قلب المفاعل VVER-1000 ثم حُمِّلَ بنوعي وقود مختلفين هما :

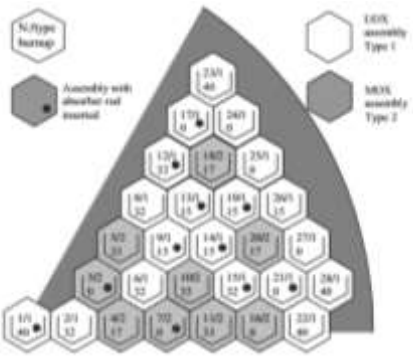
- 30% وقود MOX (مختلط) محمل بشكل طازج ومتدرج التخصيب مضافاً إليه قضبان من U-Gd (BA Rods)
- باقي سدس القلب محمل بوقود UOX متدرج التخصيب مضافاً إليه قضبان من U-Gd (BA Rods) أيضاً .

يتألف سدس المفاعل من (28) عنصر وقود سداسي الشكل إذْ إنَّ الخطوة بين عناصر الوقود 23.6cm، كما يوضّح الشكل (1)، وذلك باعتبار أنَّ قلب المفاعل ككل يحوي 163 عنصر وقود،إذْ يوجد ثلاثة أرقام في كل عنصر وقود :

1-الرقم الأول يدل على رقم عنصر الوقود.

2-الرقم الثاني يدلُّ على نوع عنصر الوقود إذْ إنَّ الرقم (1) يدلُّ على UOX، والرقم (2) يدلُّ على MOX الوقود المختلط .

3-الرقم الثالث يدلُّ على معدل الاحتراق.



شكل (1) سدس المفاعل VVER-1000محمل ب30% وقوداً مختلطاً

5.الخلايا الواحدية للقضبان (Elementary cells) المستخدمة في نوعي الوقود :

عنصر الوقود يتألف من 331 قضيباً سداسي الشكل إذْ إنَّ هنالك ثلاثة أنواع من القضبان الموجودة في عنصر الوقود:

- القضيب المركزي عدده (1).
- قضبان الوقود عددها (312).
- قضبان التحكم عددها (18).

يبيّن الجدول (2) الأبعاد الهندسية لأنواع القضبان المستخدمة في المفاعل VVER-1000.

الجدول (2) أبعاد القضبان المستخدمة في المفاعل VVER-1000[4]

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

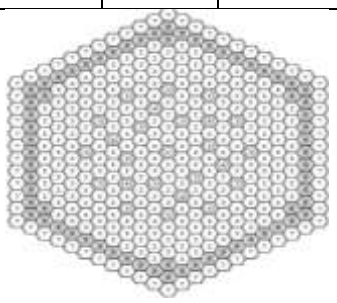
والخطوة بين قضيبين تساوي (1.275 cm)،قضبان الوقود تختلف باختلاف عنصري الوقود؛ لذلك نميز بين نوعين:

1.النوع الأول UOX:

يوضّح الشكل (2) عنصر الوقود ال UOX إذْ توجد ثلاثة أنواع لقضبان الوقود موجودة في الجدول (4)، وهي U-4.2 ,TVEG-5, U-3.7 ويعني الرمز U-4.2 مثلاً UO2 بنسبة تخصيب 4.2% ويوضّح الجدول (3) مكونات كل نوع من أنواع الوقود والكثافات الذرية الموافقة لها .

الجدول (3) الكثافات الذرية لمواد قضبان الوقود في نوع الوقود ال[5]UOX

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



شكل (2) عنصر الوقود القياسي للمفاعل VVER-1000المحمل بوقود UOX

جدول (4) أنواع قضبان الوقود المتواجدة في عنصر الوقود UOX[5]

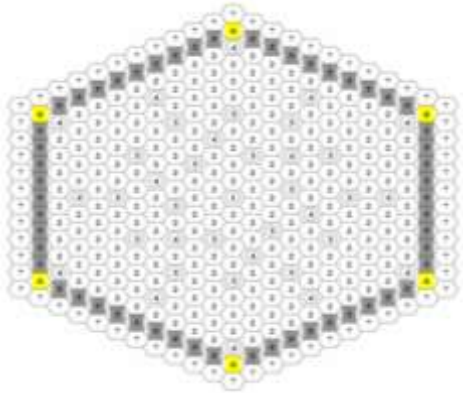
رقم الخلية	نمط الخلية
1	قضيب الوقود المركزي
2	قضيب الوقود U-4.2
3	قضيب التحكم
4	قضيب وقود TVEG-5
5	قضيب وقود U-3.7
7	المهدئ

2. النوع الثاني MOX :

يوضّح الشكل (3) عنصر الوقود الMOX يتألف الوقود المختلط من أربعة أنواع وقود، هي : PU-3.6,TVEG-4,PU-2.7,PU-2.4 موضّحة في الجدول (6)، وباقي المعلومات المتعلقة بمواد الوقود موجودة في الجدول (5)

الجدول(5) 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



شكل (3) عنصر الوقود للمفاعل VVER-1000المحمل بوقود MOX

جدول (6) أنواع قضبان الوقود المتواجدة 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**

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+ نبيوم) لواقيات الوقود وواقية القضيب المركزي. أمَّا واقيات عناصر التحكم والغلاف الخارجي للمفاعل (vessel,barrel,buffer), فمصنوعة من خليطة الستيل. أمَّا قضبان التحكم فمصنوعة من كربيد البور، كما يوضّح الجدول (7) الكثافات الذرية للمواد التركيبية المستخدمة في المفاعل VVER-1000

الجدول (7) الكثافات الذرية للمواد التركيبية المستخدمة في المفاعل [5]VVER-1000

اسم المادة	مكونات المادة	الكثافات الذرية للمواد atom/barn*cm	
واقية الزركونيوم	واقية الوقود الثقب المركزي	ZR NB HF	4.257E-2 4.223E-4 6.594E-6
الستيل	واقيات قضبان التحكم Steel buffer Steel barrel Steel vessel	Fe Cr Ni Ti C	5.933E-2 1.687E-2 8.477E-3 9.904E-4 4.737E-4
B4C 80% enrichment of B1	قضبان التحكم	B101 B11 C	6.571E-2 1.643E-2 2.053E-2

يستخدم الماء الخفيف كمهدئ وعاكس في المفاعلVVER-1000 إذْ إنَّ لكل حالة تشغيل من حالات المفاعل شروطاً خاصةً من حيث درجة الحرارة، ونسبة البور المضافة، ويرمز لكل مادة برمز خاص مثلاً (M575B1.3) أي ماء خفيف درجة حرارته 575K مضافاً إليه بور 1300ppm، و يوضّح الجدول (8) الكثافات الذرية لمادة المهدئ والعاكس في المفاعل VVER-1000

الجدول (8) الكثافات الذرية للمهدئ والعاكس المستخدمة في المفاعل [5]VVER-1000

اسم المادة	ملاحظات	الكثافات الذرية للمواد atom/barn*cm	
M575B1.3	مهدئ مضاف إليه البور بنسبة 1300ppm T=575K ρ =0.7241g/cm3	H O16 B10 B11	4.841e-2 2.4205e-2 1.0381e-5 4.2049e-5
M575B0	مهدئ غيرمضاف إليه البور T=575K ρ = 0.7421g/cm3	H O16 B10 B11	4.8410e-2 2.4205e-2 0 0
M560B1.3	مهدئ مضاف إليه البور بنسبة 1300ppm T=560K ρ =0.7533g/cm3	H O16 B10 B11	5.0362e-2 2.5181e-2 4.9845e-6 2.0190e-5
M560B0	مهدئ غيرمضاف إليه البورون T=560K ρ =0.7533g/cm3	H O16 B10 B11	5.0362e-2 2.5181e-2 0 0
M553B0	مهدئ غير مضاف إليه البورون T=553K ρ =0.7657g/cm3	H O16 B10 B11	5.1192e-2 2.5596e-2 0 0
M300B2.8	مهدئ مضاف إليه البورون بنسبة 2800ppm T=300K ρ =1.0033g/cm3	H O16 B10 B11	6.7076e-2 3.3538e-2 3.0981e-5 1.2549e-4

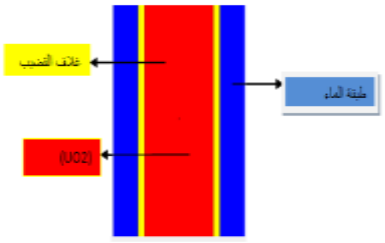
7 الكـود MCNP:[6] الكـود MCNP هـو مـن

إحدى طرائق مونتي كارلو (Monte Carlo N-Particle) التي تدرس تفاعل الجسيمات مع المادة بأنواعها المختلفة عند الطاقات جميعها، ويجري تطوير هذا الكود في مختبرات لوس آلاموس الوطنية في الولايات المتحدة الأمريكية. ويعتمد هذا الكود الذي أُعِدَّ أصلاً للنترونات طرائق مونتي كارلو لتتبع الحركة الفردية للجسيمات في الأوساط المادية. وقد عُدِّلَ ليشمل محاكاة مصادر أخرى كمصادر الأشعة غاما والإلكترونات. ويشمل الكود MCNP عدداً من مكتبات المقاطع العرضية إذْ تتوفر معلومات كافية للعناصر جميعها من Z=1 إلى Z=98. ويحاكي الكود MCNP انتقال النترونات في مجال الطاقة MeV (20-10^{-11}) والفوتونات في مجال الطاقة (10^{-3}- 100) MeV، وتتميز النسخة MCNP5-beta بإمكانية التعامل مع الكود من خلال نافذة مزودة بواجهة لإدخال المعطيات وللرسم البياني.

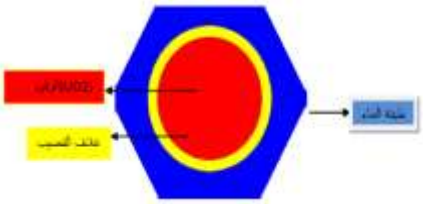
8-. نمذجـــة المفاعـــل VVER-1000 باستعمال الكود MCNP5-beta:

استعمل الكود MCNP5-beta لنمذجة قلب المفاعل VVER-1000، إذْ جرى أولاً نمذجة الخلية الواحدية لهذا المفاعل التي تتكون من قضيب الوقود (Fuel pin) وغلافه وقناة الماء المحيطة به. وللحصول على عنصر الوقود Fuel element (assembly) كُررت الخلية الواحدية باستعمال التعليمة (fill) 312 مرة، وللحصول على تشكيلة القلب كاملة كُرر عنصر الوقود 163 مرة. ونُفِّذَتِ الحسابات على سدس المفاعل، وذلك بمراعاة أنَّ المفاعل، VVER-1000 مكون من بنية متجانسة (توضع منتظم للوقود والمهدئ) ومحاطة بطبقة عاكسة من الماء موزعة على جوانب القلب إذْ يؤدي استخدام طريقة السدس إلى إنقاص زمن التشغيل وتسهيل عملية الحساب و النمذجة دون أن يؤدي إلى أي تأثير سلبي في دقة الحسابات والتصميم النتروني.

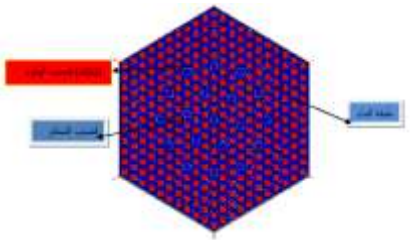
ويوضّح الشكلان (4-a,b) مقطعاً طولياً وعرضياً لبنية قضيب الوقود المكون من أكسيد اليورانيوم (UO2) والغلاف (الزركونيوم) وطبقة الماء، كما يوضّح الشكل (5) مقطعاً عرضياً لعنصر الوقود، وعليه أماكن توضع قضبان التحكم وقضبان الوقود، ويوضّح الشكل (6) مقطعاً عرضياً لسدس قلب المفاعل VVER-1000.



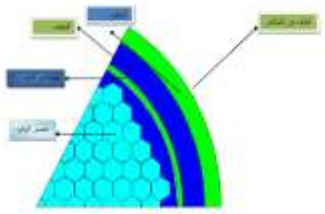
الشكل (4-a) مقطع طولي لقضيب الوقود المستعمل في المفاعل VVER-1000 وفق المحورين XZ باستعمال رسام الكود MCNP5-beta



الشكل (4-b) مقطع عرضي لقضيب الوقود المستعمل في المفاعل VVER-1000 باستعمال رسام الكود MCNP5-beta وفق المحورين XY



الشكل (5) مقطع عرضي لعنصر الوقود المستعمل في المفاعل VVER-1000 وفق المحورين XY باستعمال رسام الكودMCNP5-beta



الشكل (6) مقطع عرضي لسدس قلب المفاعل VVER-1000 باستعمال رسام الكود MCNP5-beta

7. حالات تشغيل المفاعلVVER-1000:

أُنْجِزَتْ ست حالات حساب مختلفة في هذا البحث إذْ إنَّ هذه الحالات مختلفة بالمواد ودرجات الحرارة ونوعية الوقود وهي موضّحة في الجدول (9):

الجدول (9) حالات تشغيل المفاعل [5]

الحالة	اسم الحالة	درجة حرارة الوقود T/k	مهدئ T/k	مادة المهدئ	العاكس T/k	نوع مادة الماء	قضبان الامتصاص
S1	حالة التشغيل	1027	575	M575 b1.3	560	M560 b1.3	
S2	العمل بدرجات حرارة ثابتة	575	575	M575 b1.3	560	M560 B1.3	
S3	الحالة الباردة مع نسبة عالية من البورون	300	300	M300 b2,8	300	M300 B2.8	
S4	حالة العمل من دون بورون	1027	575	M575 b0	560	M560 B0	
S5	حالة العمل بدرجات حرارة ثابتة بدون بورون	575	575	M575 b0	560	M560 B0	
S6	حالة العمل مع إدخال قضبان التحكم	553	553	M553 b0	560	M553 B0	داخلة

نلاحظ من الجدول أنَّ الحالة السادسة فقط التي أُدْخِلَتْ قضبان التحكم فيها إلى المفاعل.

10.الكودات التي تم المقارنة معها

MCNP4C,MCU,RADAR:

هذه الكودات تعتمد طرائق حل مختلفة ومقاطع عرضية مختلفة إذْ يعتمد الكودان MCNP4C, MCU على طريقة مونتي كارلو في حين يعتمد الكود RADAR على طريقة احتمالية التصادم لأنَّ طريقة الحل تخضع لمكاتب عرضية مختلفة.

11.النتائج والمناقشة :

11.1. حساب معامل التضاعف الفعّال k_{eff}:

استعملت البطاقة kcode المتاحة في الكود MCNP5-beta لحساب معامل التضاعف الفعال للنترونات k_{eff} ،وروعي الحجم الاسمي للمصدر في كل دورة، وكان 20000 نترون، وأخذت القيمة 1.00 كقيمة ابتدائية إذْ يبيّن الجدول (10) نتائج حساب معامل التضاعف الفعال ومقارنته بالكودات الثلاثة الموضّحة، وهي الكود MCNP4C,MCU,RADAR

الجدول (10) معامل التضاعف الفعال لحالات التشغيل المختلفة باستخدام الكودات MCNP4C,MCU,RADAR, MCNP5-beta [5]

الحالة	MCNP5-beta	MCNP4C	MCU	RADAR
S1	1.02347	1.03770	1.03341	1.03769
S2	1.02282	1.05132	1.04719	1.05117
S3	1.00295	0.93416	0.93237	0.93204
S4	1.22405	1.13871	1.13390	1.14081
S5	1.22362	1.15400	1.14932	1.15574
S6	1.11627	1.04729	1.04267	N/A

يبيّن الجدول السابق نتائج حساب معامل التضاعف الفعال للمفاعل VVER-1000 في ست حالات تشغيل بالكود MCNP5-beta والمقارنة بالكودات الثلاثة الأخرى، وهي ال MCNP4C,MCU,RADAR مع العلم أنَّ الحالة السادسة التي يتم إدخال قضبان التحكم فيها لم تُحْسَبْ في الكود RADAR لأنَّ هذا الكود لا يستطيع حساب هذه الحالة ،نلاحظ من الجدول (11) الذي يحسب قيم الانحرافات في قيمة معامل التضاعف الفعال أنَّ حالة التوافق هي أفضل ما يمكن قي الحالة الأولى وهي حالة التشغيل، وهي الحالة الأهم، كما نلاحظ من حساب وسطي الانحراف لحالات التشغيل الستة لكل كود على حدة أنَّ الانحراف تقريبا القيمة نفسها.

الجدول (11) الانحراف في قيمة معامل التضاعف الفعال مقارنة بالكودات الثلاثة

الحالة	الانحراف مع الكود MCNP4C	الانحراف مع الكود MCU	الانحراف مع الكود RADAR	وسطي الانحراف
S1	0.01423	0.00994	0.01422	0.01280
S2	0.0285	0.02437	0.02835	0.02707
S3	0.06879	0.07058	0.07091	0.07009
S4	0.08534	0.09015	0.08324	0.08624
S5	0.06962	0.07430	0.06788	0.07060
S6	0.06898	0.07360	---	0.06436
وسطي الانحراف	0.05591	0.05716	0.05292	0.05519

نلاحظ من الجدول أعلاه أن هناك توافقاً جيداً نوعاً ما بين العمل المنجز والكودات الثلاثة السابقة، وسبب الاختلاف يعود إلى اختلاف في المقاطع العرضية للكودات إذْ إنَّ المقاطع العرضية المستخدمة في الكودات الثلاثة غير متوفرة حالياً .

11.2.مقارنة بعض البارمترات النترونية لسدس قلب المفاعل في حالة وجود وقود مختلط بنسبة ثلاثين بالمئة وفي حالة عدم وجوده:

1.معامل التضاعف الفعال:

يبيّن الجدول (12) قيم معامل التضاعف الفعال في حالات المفاعل الثلاث الرئيسة في حالتين مختلفتين ، في الحالة الأولى عندما حملنا ثلث المفاعل بوقود مختلط وفي الحالة الثانية دون وجود وقود مختلط؛ أي بوجود وقود اليورانيوم التقليدي منخفض التخصيب ، إذْ نلاحظ من الجدول وجود تقارب في القيم بحيث يمكن استخدام الوقود المختلط بثلاثين بالمئة دون إجراء تعديل كبيرعلى تصميم المفاعل.

الجدول (12) قيم معامل التضاعف الفعال بوجود الوقود المختلط ودون وجوده

الحالة	تحميل بوقود مختلط بنسبة ثلاثين بالمئة	تحميل بوقود يورانيوم مخصب U235 (2-4)%
حالة التشغيل S1	1.02347	1.04050
الحالة الباردة مع نسبة عالية من البور S3	1.00295	0.95022
حالة العمل مع إدخال قضبان التحكم S6	1.10934	1.12592

2.حصة النترونات المتأخرة Beff :

استعمل الكود MCNP5-beta لحساب قيمة معامل التضاعف الفعال الموافق للنترونات اللحظية k_p وذلك بكتابة التعليمة totnu no في ملف الدخل، ، ثم حُسِبَتْ حصة النترونات المتأخرة من العلاقة الآتية:

$$B_{eff}=(1-k_p/k_{eff}) \qquad (1)$$

يبيّن الجدول (13) نسبة النترونات المتأخرة بوجود الوقود المختلط ودون وجوده، إذْ نلاحظ من القيم الموجودة انخفاض قيمة نسبة النترونات المتأخرة في حالة وجود البلوتونيوم انخفاضاً ملحوظاً، والاعتماد على النترونات اللحظية بشكل أكبر، وذلك لأنَّ خصائص البلوتونيوم النترونية تختلف عن اليورانيوم من إذْ امتصاص أكبر للنترونات؛ ممَّا يؤدي إلى انخفاض دور النترونات المتأخرة

الجدول (13) نسبة النترونات المتأخرة بوجود الوقود المختلط ودون وجوده

الحالة	تحميل بوقود مختلط بنسبة ثلاثين بالمئة	تحميل بوقود يورانيوم مخصب (2-4)% U235
حالة التشغيل S1	0.004358	0.00786
حالة الباردة مع نسبة عالية من البورون S3	0.005194	0.00606
حالة العمل مع إدخال قضبان التحكم S6	0.00621	0.00797

3. التدفق النتروني في سدس قلب المفاعل :

قسم الطيف الطاقي للنترونات في المفاعل إلى مجموعتين طاقتين حرارية وسريعة والمبيّن مجاليهما في الجدول (14) وحُسِبَ التدفق النتروني الحراري والسريع باستعمال البطاقة F4 المتاحة في الكود MCNP5-beta.

الجدول (14) المجموعات الطاقية المستعملة لحساب التدفق النتروني

رقم المجموعة	مجال الطاقة	المجموعة الطاقية
1	2.5 – 0.000 eV eV	الحرارية
2	14.000 – 2.5 eV MeV	السريعة

يبيّن الجدول (15) التدفق النتروني الوسطي في سدس قلب المفاعل بوجود الوقود المختلط ودون وجوده، إذْ نلاحظ من مقارنة القيم في الجدول (15) أنَّ التدفق الحراري بوجود الوقود المختلط؛ أي بوجود البلوتونيوم سوف يتناقص؛ وذلك بسبب ازدياد امتصاص النترونات من قبل البلوتونيوم. أمَّا التدفق النتروني السريع بوجود البلوتونيوم فسوف يزداد ازدياداً طفيفاً بسبب زيادة عدد النترونات السريعة المتولدة عن الانشطارات؛ وذلك لأنَّ البلوتونيوم بنظائره المختلفة يولد عدداً من النترونات عند انشطاره أكثر من اليورانيوم، ومن ثَمَّ فإن التدفق النتروني الكلي في هذه الحالة والذي ينتج عن جمع التدفق النتروني الكلي والحراري سوف يكون متقارباً بشكل كبير لأنَّ النقص في التدفق النتروني الحراري تعوضه الزيادة في التدفق النتروني السريع

الجدول (15) التدفق النتروني الوسطي لسدس المفاعل في حالة وجد وقود مختلط وفي حالة عدم وجوده

		وسطي التدفق النتروني في السدس .secn/(cm2)	
الحالة		تحميل بوقود مختلط بنسبة ثلاثين بالمئة	تحميل بوقود يورانيوم مخصب (2-4)% U235
حالة التشغيل S1	حراري سريع كلي	2.66E13 2.69E14 2.96E14	3.10E+13 2.67E+14 2.98E+14
حالة الباردة مع نسبة عالية من البور S3	حراري سريع كلي	1.894E+13 1.289E+14 1.478E+14	2.27E+13 1.27E+14 1.49E+14
حالة العمل مع إدخال قضبان التحكم S6	حراري سريع كلي	2.94E+13 1.61E+14 1.90E+14	3.562E+13 1.597E+14 1.953E+14

4. نسبة فعالية قضبان التحكم:

يُعبر عن فعالية قضبان التحكم مقدرة بالواحدة S من العلاقة الآتية [7]:

$$\text{Worth Control Rod} = \frac{\rho}{\beta_{\text{eff}} \times 10^5} \ (\text{pcm}) \quad (2)$$

إذْ:

$l_m = 10^{-5}\,s$ هو الزمن الوسطي

لحياة نترونات الانشطار اللحظية (وهو الزمن اللازم لتهدئة نترونات الانشطار إلى الطاقة 0.025 eV)، ρ($)- التفاعلية، β_{eff}– نسبة النترونات المتأخرة مقدرة بالواحدة (pcm).

يعطي الجدول (16) فعالية قضبان التحكم بوجود وقود مختلط ودون وجوده ، إذْ نلاحظ من الجدول أنَّ قيمة فعالية قضبان التحكم تزداد عند استخدام الوقود المختلط؛ وذلك بسبب أنَّ النترونات المتأخرة تتناقص عند استخدام الوقود المختلط.

الجدول (16) فعالية قضبان التحكم بوجود وقود مختلط وفي حالة عدم وجوده

	تحميل بوقود مختلط بنسبة ثلاثين بالمئة	تحميل بوقود يورانيوم مخصب (2-4)% U235
نسبة فعالية قضبان التحكم (pcm)	14.09	11.05

12.الاستنتاجات:

استخدم في هذا البحث الكود MCNP5-beta لنمذجة سدس قلب المفاعل VVER-1000، وحساب معامل التضاعف الفعال في حالات تشغيل مختلفة الذي يعدُّ المعيار الأهم في المفاعل والذي يعطي دليلاً واضحاً على صحة النموذج، ثم قُورنَتْ قيم معامل التضاعف الفعال للمفاعل VVER-1000 في هذا البحث بتلك المحسوبة في المرجع [5] للمفاعل VVER- 1000ودلت المقارنة على وجود توافق جيد نوعاً مابين هذه القيم ، ثم قُورنَتْ بعض البارامترات النترونية المهمة في المفاعل بوجود الوقود المختلط ومن دون وجوده، إوقد دلت المقارنة على أنَّه يمكن استخدام الوقود المختلط بنسبة ثلاثين بالمئة دون إجراء تعديلات كبيرة على بنية المفاعل المدروس .

References:

[1]. LIAQUAT ALIKHAN, (1999)" Study of reactor design parameters " University of the Punjab.Lahore.

[2]. 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)

[3] Alyoshin, S.S., P.A. Bolobov, S.N. Bolshagin, S.A. Bychkov, M.A. Kalugin, L.V. Maiorov, A.M. Pavlovichev, Y.A. Styrine, A.G. Kalashnikov, A.A. Tsyboulia, "Core Benchmarks for Verification of Production Neutronic Codes as Applied to VVER-1000 with MOX Fuel Plutonium from Surplus Russian Nuclear Weapons", PHYSOR 2002, Seoul, Korea, 7-10 October 2002.

[4] Bolobov, P.A., S.N. Bolshagin, S.A. Bychkov, A.G. Kalashnikov, M.A. Kalugin, A.I. Pavlovichev, Y.A. Styrine, Core BenchmarksDescription Report, Prepared by RRC-KI, Published by ORNL, ORNL/SUB/00-85B99398V-6, May 2001.

[5] EugenyGomin, Mikhail Kalugin, Dmitry Oleynik, Russian ResearcCentre, Kurchatov Institute, VVER-1000 MOX Core Computational Benchmark ,Specification and Results, Expert Group on Reactor-based Plutonium Disposition ,© OECD 2006 NEA No. 6088.

[6]. Oak Ridge National Laboratory,(2000),"Rsicc Computer Code Collection MCNP4C"

[7] International Atomic Energy Agency, "Research Reactor Core Conversion guidebook" volume (3) IAEATECDOC-643,(1992).

Received	11/7/2019	إيداع البحث
Accepted for Publ.	30/1/2020	قبول البحث للنشر