

## حساب معامل التضاعف الفعال وتوزيع التدفق النتروني في مفاعل الطاقة VVER-640 باستعمال الكود MCNP5-beta

محمد رامي العلي<sup>(1)</sup> و ماجدة نحيلي<sup>(2)</sup> و سعدو الظواهرة<sup>(3)</sup>

تاريخ الإيداع 2014/05/20

قبل للنشر في 2014/09/25

### الملخص

استعمل الكود MCNP5-beta في هذا البحث لنمذجة قلب مفاعل الطاقة VVER-640 وحساب معامل التضاعف الفعال، وحصّة النترونات المتأخرة، وتوزيع التدفق النتروني الحراري والسريع في قلب المفاعل.

بيّنت نتائج الحساب أن معامل التضاعف الفعال يساوي القيمة 1.34311، وحصّة النترونات المتأخرة تساوي 0.007893 وأن التدفق النتروني الحراري في قلب المفاعل يساوي  $3.37.10^{13}$  (n/cm<sup>2</sup>.s)، والتدفق النتروني السريع  $1.76.10^{14}$  (n/cm<sup>2</sup>.s)، كما أظهرت النتائج توافقاً جيداً مع نتائج بعض الدراسات التحليلية (أو باستخدام كودات أخرى) أجريت محلياً للمفاعل VVER-640. إذ إن المفاعل المدروس مازال قيد الإنشاء ولا توجد دراسات نترونية متوافرة للمقارنة.

الكلمات المفتاحية: كود MCNP5-beta، معامل تضاعف، نترونات متأخرة، تدفق نتروني حراري، تدفق نتروني سريع.

(1) طالب ماجستير، (2) أستاذة، قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة دمشق، سورية.  
(3) قسم الفيزياء، هيئة الطاقة الذرية، سورية.

## Calculation of the effective multiplication factor, neutron flux distributions for VVER- 640 energy reactor using MCNP5-beta code

M.Rami.AL-Ali<sup>(1)</sup>, M. Nahili<sup>(2)</sup>  
and S. AL-Zawahera<sup>(3)</sup>

Received 20/05/2014

Accepted 25/09/2014

### Abstract

The MCNP5-beta Monte Carlo code was used in this paper to model the VVER-640 nuclear power reactor, and to calculate the effective multiplication factor, delayed neutrons, and thermal and fast neutron fluxes distribution.

The values of the effective multiplication factor was 1.34311, and the value of delayed neutrons fraction was 0.007893. The thermal flux in reactor core was  $3.37.10^{13}$  (n/cm<sup>2</sup>.s) and the fast flux  $1.76.10^{14}$  (n/cm<sup>2</sup>.s). The results showed good agreements with the presently available results about VVER-640 reactor.

**Key word:** MCNP5-beta code, Effective multiplication factor, Delayed neutrons fraction, Thermal, Fast neutron flux.

---

<sup>(1)</sup> MCS., Student, <sup>(2)</sup> Professor, Department of Physics, Faculty of Sciences, Damascus University, Syria.

<sup>(3)</sup> Department of Physics, Atomic Energy Commission, Syria.

**1- مقدمة:**

يعدُّ حساب معامل التضاعف الفعّال  $k_{eff}$  وتوزيع التدفقِ النُتروني في قلب المفاعل من الحسابات المهمة في التصميم النُتروني لقلب المفاعل نظراً إلى أهميتها الكبيرة في إدارة الوقود وأمان المفاعل. وتجرى عادة حسابات التصميم النُتروني لمفاعلات البحث والطاقة باستعمال كودات نُترونية تعتمد طريقة الانتثار مثل (WIMSD4 and CITAION) [1] التي تعتمد على الحل المباشر لمعادلة الانتقال في حساب المقاطع العرضية للنترونات بالنسبة إلى المكونات الداخلية للمفاعل جميعها، كما تستعمل أيضاً بعض الكودات التي تعتمد على طرائق مونتّي كارلو مثل الكود MCNP.

**2- مفاعلات الطاقة من النوع VVER:**

يعدُّ 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-640 هو من مفاعلات الجيل الجديد عالية الأمان، ويدل الرقم 640 MW على استطاعته الكهربائية، إذ تبلغ استطاعته الحرارية القيمة 1800 MW، واختير المفاعل VVER-640 موضوعاً لهذا البحث وذلك لتميزه بما يأتي:

- 1- انخفاض استجابة هذا المفاعل لأخطاء التشغيل (كتأمين توقف المفاعل مثلاً وتبريده وتصريف الحرارة المتبقية في حالة العمل الطبيعية وفي حالة الحوادث باستخدام نظام التبريد الطبيعي دون استخدام أي أجهزة إضافية أو طاقة خارجية).
- 2- استعمال نظام التبريد الطبيعي عند الحوادث في هذا المفاعل.
- 3- استعمال الماء الخفيف مهدئاً للنترونات ومبرداً لهذا المفاعل.
- 4- إمكان تعويض التفاعلية لحالات تشغيل هذا المفاعل كلها حتى إلى درجة حرارة الماء 1000 درجة مئوية.
- 5- إمكان الاستفادة من الخبرات الروسية المكتسبة في بناء المفاعلات من النوع VVER-440 و VVER-1000 واستثمارها في تصميم المفاعل VVER-640 [2].

**3- الكود MCNP: [3]**

الكود MCNP هو إحدى طرائق مونتّي 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 هذا الكود الذي أعد أصلاً للنترونات طرائق مونتّي كارلو لتتبع الحركة الفردية للجسيمات في الأوساط المادية. وقد عدل ليُشمل محاكاة مصادر أخرى كمصادر الأشعة غاما

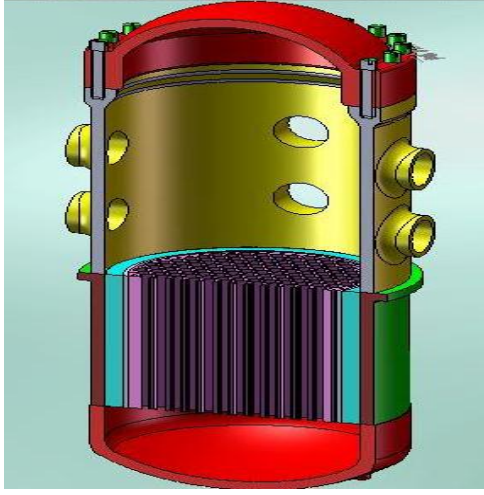
والإلكترونات كما في النسخة MCNP5-beta. ويشمل الكود MCNP عدداً من مكتبات المقاطع العرضية حيث تتوفر معلومات كافية للعناصر جميعها من  $Z=1$  إلى  $Z=98$ . ويحاكي الكود MCNP5-beta انتقال النيوترونات في مجال الطاقة من  $(10^{-11}-20)$  MeV والفوتونات والإلكترونات في مجال الطاقة من  $(10^{-3}-100)$  MeV، وتتميز النسخة MCNP5-beta بإمكانية التعامل مع الكود من خلال نافذة Visual Editor version 12N-Vised22 المزودة بواجهة لإدخال المعطيات ولرسم البياني مما يسهل التعامل معه.

#### 4- أجزاء المفاعل VVER-640:

تتكون محطة الطاقة النووية للمفاعل VVER-640 بشكل رئيس من الأجزاء الآتية: المفاعل والدارة الأولية والدارة الثانوية ومنظم الضغط وأنظمة التحكم والتشغيل وأنظمة الأمان.

ويتكون المفاعل VVER-640 من الأجزاء الرئيسية الآتية:

- 1- قلب المفاعل وهو الجزء الرئيس من المفاعل الذي تتحرر فيه الطاقة إذ إنه يحتوي الوقود النووي والمهدئ والمبرد. وفي المفاعل VVER-640 يستعمل أكسيد اليورانيوم كوقود نووي بنسبة إغناء تساوي 3.6% وتصنع عناصر وقوده على شكل قضبان أسطوانية توجد ضمن أغلفة من خليطه الزركونيوم، كما يستعمل الماء الخفيف كمهدئ للنيوترونات ومبرد لقلب المفاعل؛ وذلك لميزاته المهمة من حيث الناقلية والسعة الحرارية ومقطع الامتصاص واللزوجة والكثافة.
  - 2- يستعمل الماء كعاكس 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 بشكل آلي عند الحاجة لخفض استطاعة المفاعل أو رفعها أو إيقافه 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.
- ويوضح الشكل (1) رسماً تخطيطياً للمفاعل VVER-640، ويعطي الجدول (1) المواصفات الهندسية لمكونات قلب المفاعل VVER-640.



الشكل (1) رسم تخطيطي للمفاعل VVER-640

الجدول (1) المواصفات الهندسية لمكونات قلب المفاعل VVER-640 [4]

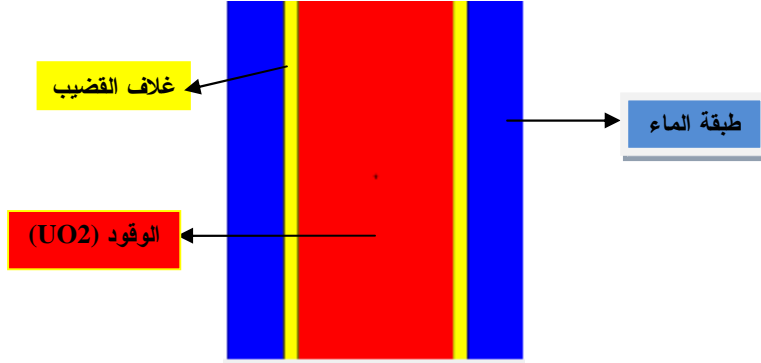
0.386 cm	نصف قطر قضيب الوقود
0.458 cm	نصف قطر قضيب الوقود مع الغلاف
0.680 cm	نصف قطر أنبوب الماء الذي يحيط بقضيب الوقود
300.000 cm	الارتفاع الفعال لقضيب الوقود
346.000 cm	ارتفاع القلب
9.600 cm	السلك الإضافي
158.500 cm	نصف قطر قلب المفاعل
163.000	عدد عناصر الوقود
293.000	عدد قضبان الوقود في عنصر الوقود
23.600 cm	الخطوة بين عناصر الوقود
23.400 cm	طول عنصر الوقود
18.000	عدد قضبان التحكم في عنصر الوقود
1.275 cm	المسافة بين قضبان الوقود
312.000	العدد الكلي للقضبان في عنصر الوقود

##### 5- نمذجة المفاعل VVER-640 باستعمال الكود MCNP5-beta:

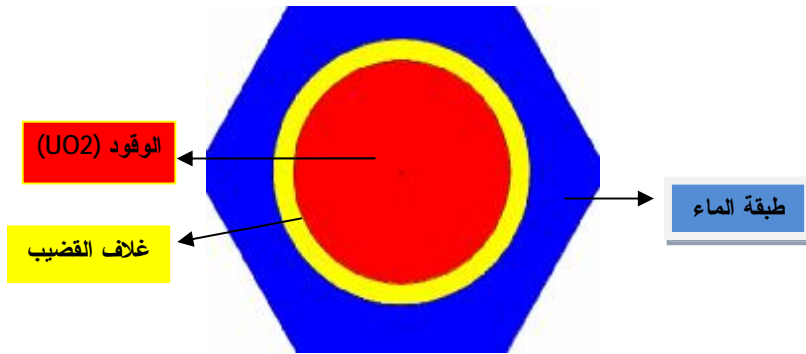
استعمل الكود MCNP5-beta لنمذجة قلب المفاعل VVER-640، إذ جرى أولاً نمذجة الخلية الواحدة لهذا المفاعل التي تتكون من قضيب الوقود (Fuel pin) وغلافه وقناة الماء المحيطة به. وللحصول على عنصر الوقود (assembly) Fuel element

كُررت الخلية الواحديّة باستعمال التعلّيمَة (fill) 312 مرة، وللحصول على تشكيلة القلب كاملة كُرر عنصر الوقود 163 مرة. ونفّذت الحسابات على سدس المفاعل وذلك بمراعاة أن المفاعل VVER-640 مكون من بنية متجانسة (توضع منتظم للوقود والمهدئ) ومحاطة بطبقة عاكسة من الماء موزعة على جوانب القلب.

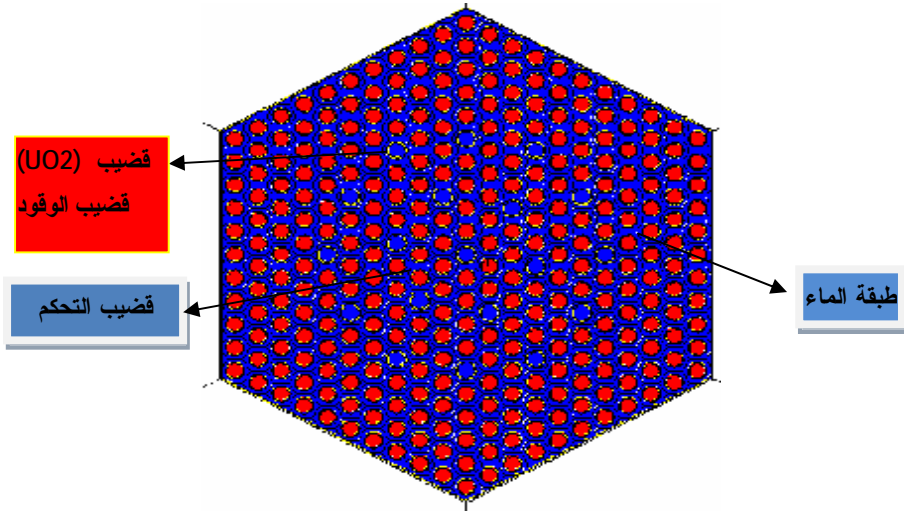
ويوضح الشكلان (2-a,b) مقطعاً طويلاً وعرضياً لبنية قضيب الوقود المكون من أكسيد اليورانيوم (UO<sub>2</sub>) والغلاف (الزركونيوم) وطبقة الماء، كما يوضح الشكل (3) مقطعاً عرضياً لعنصر الوقود وعليه أماكن توضع قضبان التحكم وقضبان الوقود، ويوضح الشكل (4) مقطعاً عرضياً لسدس قلب المفاعل VVER-640.



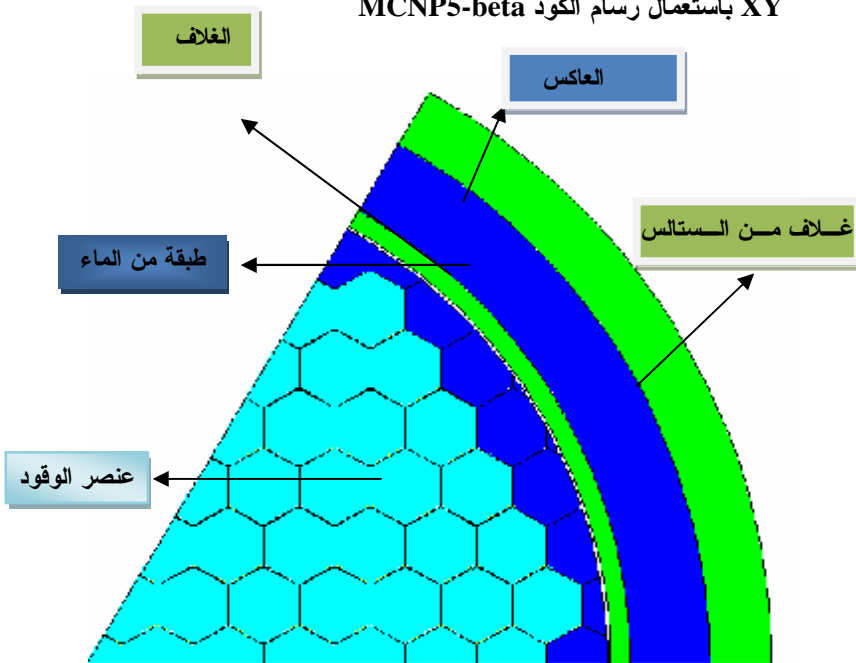
الشكل (2-a) مقطع طولي لقضيب الوقود المستعمل في المفاعل VVER-640 وفق المحورين XZ باستعمال رسام الكود MCNP5-beta



الشكل (2-b) مقطع عرضي لقضيب الوقود المستعمل في المفاعل VVER-640 باستعمال رسام الكود MCNP5-beta وفق المحورين XY



الشكل (3) مقطع عرضي لعنصر الوقود المستعمل في المفاعل VVER-640 وفق المحورين XY باستخدام رسام الكود MCNP5-beta



الشكل (4) مقطع عرضي لسدس قلب المفاعل VVER-640 باستخدام رسام الكود MCNP5-beta

## النتائج والمناقشة

### 1. حساب معامل التضاعف الفعال $k_{eff}$ :

استعملت البطاقة kcode المتاحة في الكود MCNP5-beta لحساب معامل التضاعف الفعال للنيوترونات  $k_{eff}$  وروعي الحجم الاسمي للمصدر في كل دورة وكان 20000 نيوترون وأخذت القيمة 1.00 كقيمة ابتدائية للمعامل  $k_{eff}$ ، وبلغ عدد الدورات الاختبارية والكلية 25 و225 دورة على الترتيب، وأعطى الحساب القيمة 1.34311 لمعامل التضاعف الفعال، وقورنت هذه القيمة مع بمثليتها  $k_{eff}$  المحسوبة للمفاعل VVER-640 باستعمال الكود GETERA والطرائق التحليلية في العمل [4]، ويعطي الجدول (2) هذه القيم، وبمراعاة ذلك نلاحظ أن هناك توافقاً جيداً بين قيم  $k_{eff}$  المحسوبة في هذا البحث وفي العمل [4].

الجدول (2) قيم  $k_{eff}$  المحسوبة في هذا البحث وفي العمل [4] للمفاعل VVER-640

الطريقة التحليلية [4]	GETERA [4]	MCNP5-beta	$k_{eff}$
1.344	1.347	1.34311	

### 2. حساب معامل التضاعف الفعال الناتج عن النيوترونات اللحظية وحساب حصة النيوترونات المتأخرة:

إن كمية النيوترونات الصادرة في حدث انشطار واحد هي مقدار عشوائي ويتوزع حول قيمته الوسطى تقريباً بحسب قانون غاوس، ويرتبط العدد الوسطي للنيوترونات  $\nu_f$  المتشكل في أثناء الانشطار بنوع النواة المنشطرة وبطاقة النيوترون إذ يزداد هذا العدد مع ازدياد طاقة النيوترون، ويعطي الجدول (3) قيم  $\nu_f$  لبعض النوى المختلفة.

الجدول (3) قيم  $\nu_f$  لنوى مختلفة [5]

$^{239}\text{Pu}$	$^{235}\text{U}$	$^{233}\text{U}$	E
2.862	2.416	2.479	0.025 eV
3.02	2.55	2.56	1.00 MeV
3.15	2.67	2.67	2.00 MeV
3.27	2.78	2.82	3.00 MeV
3.40	2.95	2.79	4.00 MeV

مع انخفاض نتاج النيوترونات المتأخرة إلا أنها تؤدي دوراً مهماً في المفاعلات النووية. وبفضل التأخر الكبير لهذه النيوترونات فهي تؤثر بشكل واضح في إطالة زمن حياة نيوترونات الجيل الواحد في المفاعل وفي الوقت نفسه تسهم في التدعيم الذاتي لتفاعل الانشطار النووي المتسلسل، ويعطي الجدول (4) حصة النيوترونات المتأخرة لبعض النوى.



الجدول (4) حصة النوترونات المتأخرة [5]

النواة					نوع الانشطار
<sup>238</sup> U	<sup>232</sup> Th	<sup>239</sup> Pu	<sup>235</sup> U	<sup>233</sup> U	
-	-	0.0021	0.0064	0.0026	بالنوترونات الحرارية
0.0155	0.0190	0.0020	0.0060	0.0026	بالنوترونات السريعة

استعمل الكود MCNP5-beta لحساب قيمة معامل التضاعف الفعال الموافق للنوترونات اللحظية  $k_p$ ، وذلك باستعمال التعليمة totnu no في ملف الدخل، ومنه تم الحصول على القيمة  $k_p=1.33251$ ، كما حُسبت حصة النوترونات المتأخرة من العلاقة الآتية [5]:

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

ووجد أنها تساوي القيمة  $B_{eff}=0.007893$ .

### 3. التدفق النوتروني:

قسم الطيف الطاقي للنوترونات في المفاعل إلى مجموعتين طاقتين حرارية وسريعة والمبين مجالهما في الجدول (5) وحُسب التدفق النوتروني الحراري والسريع باستعمال البطاقة F4 المتاحة في الكود MCNP5-beta.

الجدول (5) المجموعتان الطاقتان المستعملتان لحساب التدفق النوتروني [5]

رقم المجموعة	مجال الطاقة	المجموعة الطاقية
1	0.000 eV - 2.500 eV	الحرارية
2	2.500 eV - 14.000 MeV	السريعة

وللحصول على قيم التدفق النوتروني القطري والمحوري في المفاعل روعي نشاط قلب المفاعل بوصفه مصدراً للنوترونات في حساب التدفق. ويعبر عن نشاط قلب المفاعل بالعلاقة الآتية [5]:

$$A = (P \times v) / (E_f \times k_{eff}) \quad (2)$$

إذ:

$A(n/s)$  هو نشاط قلب المفاعل.  $P(W)$  استطاعة المفاعل.

$v$  عدد النوترونات اللحظية المتولدة في الانشطار الواحد.

$E_f(J)$  طاقة الانشطار النوعية (200 MeV).

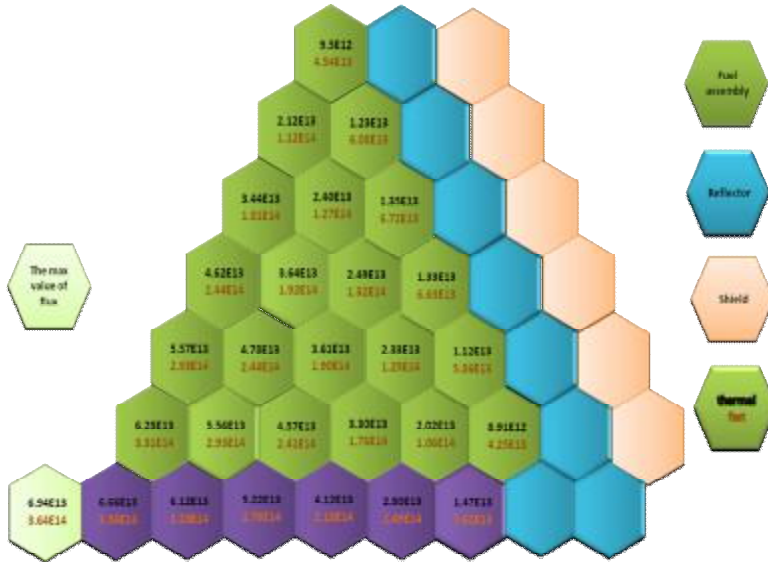
$k_{eff}$  معامل التضاعف الفعال.

وحُسبت أولاً قيمة  $v$  وكانت 2.43 للمفاعل VVER-640، ومن ثم وبالتعويض في العلاقة (2) وجد أن نشاط قلب المفاعل VVER-640 يساوي القيمة  $1.0432 \cdot 10^{20} (n/s)$ .

— حساب التدفق النيوتروني في عناصر الوقود لسدس قلب المفاعل:

حُسب التدفق النيوتروني (الحراري والسريع) في عناصر الوقود التي تقع في سدس قلب المفاعل كل على حده ودونت النتائج في مكان كل عنصر كما هو موضح في الشكل (5)، ويلاحظ من هذا الشكل أن قيمة التدفق النيوتروني السريع تبلغ قيمة عظمى في عنصر الوقود المركزي ثم تتناقص بالابتعاد عنه باتجاه العاكس، وذلك بسبب زيادة الهروب النيوتروني عند حافة المفاعل، كما يلاحظ السلوك نفسه بالنسبة إلى التدفق النيوتروني الحراري، إلا أن قيمته تزداد في العاكس بسبب عملية تهديئة النيوترونات في الماء، علماً أن نسبة التخصيب واحدة لعناصر الوقود كلها في المفاعل.

وحُسبت قيم التدفق النيوتروني الحراري والسريع لعنصر الوقود الذي يقع في مركز المفاعل، وذلك في كل من مادة الوقود والغلاف والمهدأ (الماء) ومتوسط التدفق النيوتروني في العنصر ككل (وقود غلاف ماء) إذ يعدُّ هذا العنصر هو الأخطر لامتلاكه أكبر تدفق نيوتروني في قلب المفاعل ويعطي الجدول (6) هذه القيم، ومنه تلاحظ زيادة التدفق النيوتروني الحراري في الماء على مثيله في الوقود، وبالعكس زيادة التدفق النيوتروني السريع في الوقود على ما هو عليه في الماء.



الشكل (5) قيم التدفقات النيوترونية الحرارية والسريعة لعناصر الوقود في سدس المفاعل

VVER-640

Thermal neutron flux  $n/(cm^2.s)$

Fast neutron flux  $n/(cm^2.s)$

## الجدول (6) التدفق النتروني في عنصر الوقود المركزي في المفاعل VVER-640

السرّيع	الحراري	التدفق النتروني في عنصر الوقود المركزي $n/(cm^2.s)$
$3.700.10^{14}$	$6.51.10^{13}$	الوقود
$3.710.10^{14}$	$7.04.10^{13}$	الغلاف
$3.400.10^{14}$	$9.21.10^{13}$	الماء
$3.648.10^{14}$	$6.95.10^{13}$	الوسطي في الوقود والغلاف والماء

— حساب التدفق النتروني الوسيط في سدس قلب المفاعل VVER-640:

حُسبَ التدفق النتروني الوسيط الحراري والسرّيع لسدس قلب المفاعل VVER-640 كما هو معطى في الجدول (7).

## الجدول (7) التدفق النتروني الوسيط لسدس قلب المفاعل VVER-640

السرّيع	الحراري	التدفق النتروني لسدس قلب المفاعل $n/(cm^2.s)$
$1.79.10^{14}$	$3.15.10^{13}$	الوقود
$1.73.10^{14}$	$3.49.10^{13}$	الماء
$1.76.10^{14}$	$3.37.10^{13}$	في الوقود والغلاف والماء

— التوزيع المحوري للتدفق النتروني:

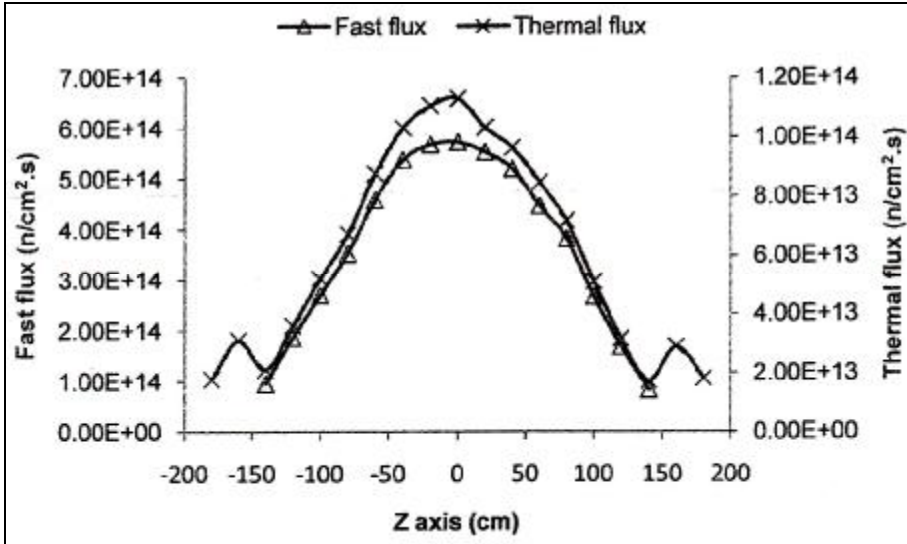
استعملت البطاقة FS المتاحة في الكود MCNP5-beta لتقسيم الارتفاع الفعال لقلب المفاعل VVER-640 إلى عدة مستويات وفق المحور OZ، ولحساب التدفق النتروني (الحراري والسرّيع) في عنصر الوقود عند كل من هذه المستويات.

التوزيع المحوري للتدفق النتروني في عنصر الوقود المركزي وفق المحور OZ:

حُسبَ التوزيع المحوري للتدفق النتروني في عنصر الوقود المركزي وفق المحور OZ كما هو موضح في الشكل (6)، ويلاحظ منه أن التدفق النتروني الأعظمي الحراري والسرّيع وفق المحور OZ يقع في مركز المفاعل، وأن هناك ارتفاعاً طفيفاً للتدفق النتروني الحراري على شكل قمتين عند حافتي العاكس بسبب تهدئة النترونات. ويعطى الجدول (8) قيم التدفق النتروني الأعظمي الحراري والسرّيع وفق المحور OZ لعنصر الوقود المركزي الذي يمتلك التدفق الأعظمي بين عناصر الوقود في المفاعل.

الجدول (8) التدفق النتروني الحراري والسرّيع وفق المحور OZ لعنصر الوقود مركز سدس المفاعل.

التدفق النتروني الأعظمي $n/(cm^2.s)$	
$1.13.10^{14}$	الحراري
$5.73.10^{14}$	السرّيع



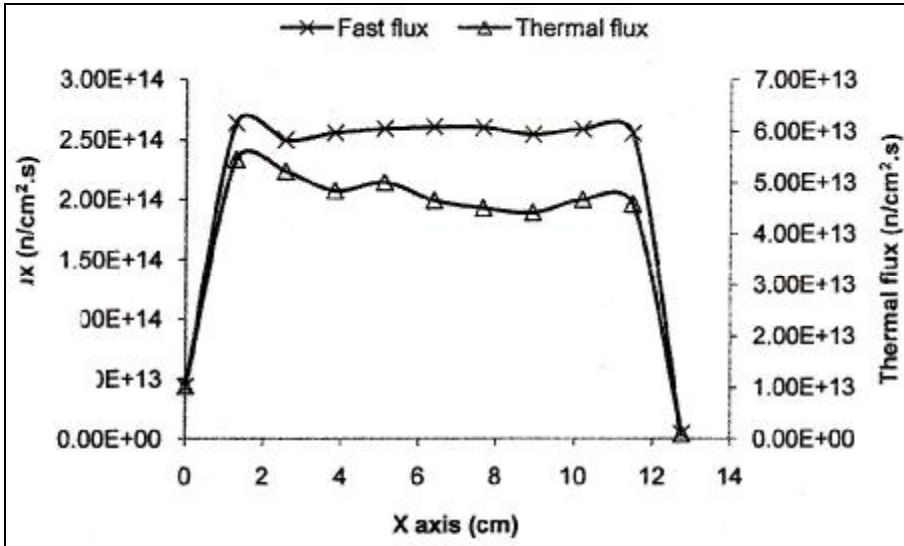
الشكل (6) توزع التدفق النتروني الحراري والسريع في عنصر الوقود المركزي وفق المحور OX

#### 4. التوزيع القطري للتدفق النتروني:

حسب التوزيع القطري للتدفق النتروني الحراري والسريع في كل من عنصر الوقود وفي سدس المفاعل VVER-640 وفق المحور OX.

#### - التوزيع القطري للتدفق النتروني في عنصر الوقود المركزي وفق المحور OX :

يوضح الشكل (7) التوزيع القطري للتدفق النتروني الحراري والسريع وفق المحور OX لعنصر الوقود المركزي، ويلاحظ من هذا الشكل أن هناك تذبذباً في قيم التدفق النتروني الذي يعزى أولاً لوجود قضبان التحكم المتوضعة على قطر عنصر الوقود، وثانياً لوجود القضيب المركزي الذي يحوي الماء، وثالثاً لتأثير طبقة الماء الرقيقة التي توجد بين عناصر الوقود؛ مما أدى إلى نشوء عدة قمم في التدفق الحراري عند هذه القضبان وبالمقابل قيم منخفضة في التدفق السريع.



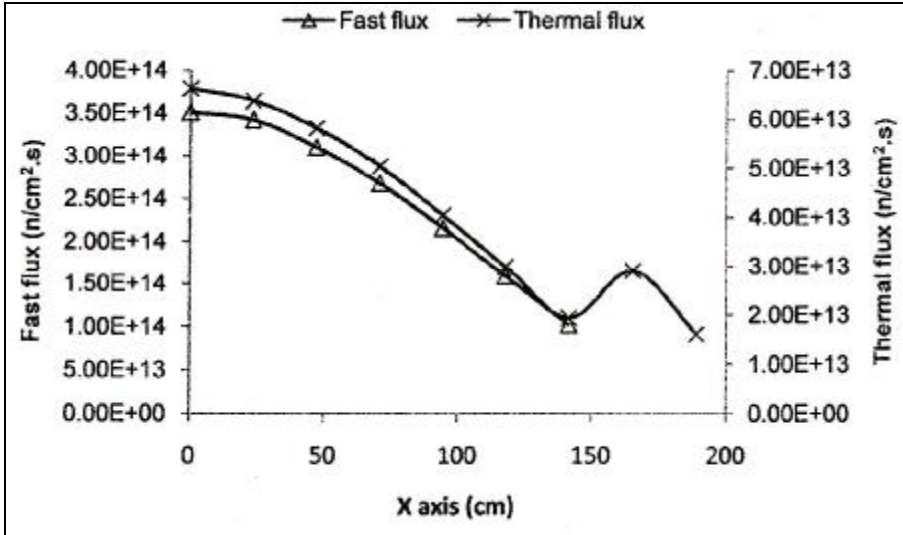
الشكل (7) التوزيع القطري للتدفق النيوتروني الحراري والسريع في عنصر الوقود المركزي وفق المحور OX.

التوزيع القطري للتدفق النيوتروني في سدس المفاعل وفق المحور OX :

حُسب التوزيع القطري للتدفق النيوتروني الحراري والسريع وفق المحور OX لسدس المفاعل، ويوضح الشكل (8) قيم هذا التوزيع وشكله. ويلاحظ من الشكل (8) أن التدفق النيوتروني الأعظمي الحراري والسريع وفق المحور OX يقع في مركز المفاعل، وأن هناك قمة للتدفق النيوتروني الحراري عند العاكس ناجمة عن تهيئة النيوترونات. ويعطي الجدول (9) قيم التدفق النيوتروني الأعظمي الحراري والسريع وفق المحور OX لسدس المفاعل.

الجدول (9) قيم التدفق النيوتروني القطري الأعظمي لسدس المفاعل VVER-640

التدفق النيوتروني القطري الأعظمي n/cm <sup>2</sup> .s	
6.63.10 <sup>13</sup>	الحراري
3.51.10 <sup>14</sup>	السريع



الشكل (8) التوزيع القطري للتدفق النيوتروني الحراري والسريع في سدس المفاعل وفق المحور OX

### الاستنتاجات

استعمل في هذه الدراسة الكود MCNP5-beta لنمذجة قلب المفاعل VVER-640 وحساب معامل التضاعف الفعال  $k_{eff}$  والتوزيع المحوري والقطري للتدفق النيوتروني الحراري والسريع في قلب هذا المفاعل.

دلت مقارنة قيمة معامل التضاعف الفعال ( $k_{eff}$ ) المحسوبة في هذا البحث بتلك المحسوبة في العمل [3] على مدى كفاءة النموذج ثلاثي الأبعاد الذي صُمم باستعمال الكود MCNP5-beta للمفاعل VVER-640، إذ بلغت قيمة معامل التضاعف الفعال 1.34311 وبخطأ نسبي أقل من 1%. وقيمة التدفق النيوتروني الحراري الوسطي في القلب  $3.37.10^{13}$  (n/cm<sup>2</sup>.s) وبخطأ نسبي أقل من 1%. وقيمة التدفق النيوتروني السريع الوسطي في القلب  $3.648.10^{14}$  (n/cm<sup>2</sup>.s) وبخطأ نسبي أقل من 2%.

## References

- [1] Kulikowska, T. (1991). Lattice Cell Calculation, Slowing Down Theory and Computer Code WIMS; VVER Type Reactors, workshop on Reactor Physics Calculation for Application in Nuclear Technology, editor: Cullen D. E. Muranaka, R. Schmidt, J. pp.251-304, (World Scientific Publishing).
- [2] Ovichinikov, F. A. and Semenov. V. V. (1989). "Exploration regime of VVER" book: Moscow.
- [3] Oak Ridge National Laboratory, (2000). "Rsic Computer Code Collection MCNP4C".
- [4] . الرفاعي حمزة.العرايبي، حمود.الظواهره، سعدو (2012). حساب معامل التضاعف الفعال لمفاعلات الجيل الجديد عالية الأمان من النوع VVER-640 جامعة دمشق مجلة العلوم الأساسية.
- [5] Bartalamaue G. G., Baubakov, V.V. Alchotov, C.V. Ovichinikov, F.A. and Semenov, V. V., (1989). "Fundamental theory and methods calculation nuclear power reactors" book: Moscow.