

## حساب معامل التضاعف الفعّال وتوزع التدفق النتروني والاستطاعة في مفاعل البحث المصري الثاني ETRR-2 باستخدام الكود MCNP4C2

جمال الجهماني<sup>(1)</sup> وماجدة نحيلي<sup>(2)</sup> وسعدو الظواهره<sup>(3)</sup>\*\*

<sup>(\*)</sup> قسم الفيزياء - كلية العلوم - جامعة دمشق - سورية

<sup>(\*\*)</sup> هيئة الطاقة الذرية، دمشق، سورية، ص.ب. 6091

تاريخ الإيداع 2012/02/01

قبل للنشر في 2012/05/28

### الملخص

استخدم الكود MCNP4C2 في هذا البحث لنمذجة قلب مفاعل البحث المصري ETRR-2 وحساب كل من معامل التضاعف الفعّال  $k_{eff}$  وتوزع التدفق النتروني الحراري والسريع، والاستطاعة في قلب المفاعل لنوعين من الوقود النظامي والمختلط. وبلغت قيمة  $k_{eff}$  1.21842 و 1.05272 للوقود النظامي والمختلط على الترتيب. وكان التدفق النتروني الحراري الأعظمي  $2.975 \times 10^{14}$  و  $3.352 \times 10^{14}$  n/cm<sup>2</sup>s للوقود النظامي والمختلط على الترتيب. وكان التدفق النتروني السريع الأعظمي  $2.950 \times 10^{14}$  و  $2.389 \times 10^{14}$  n/cm<sup>2</sup>s للوقود النظامي والمختلط على الترتيب. وأظهرت النتائج توافقاً جيداً مع نتائج بعض الدراسات الخاصة بالمفاعل المصري ETRR-2.

الكلمات المفتاحية: MCNP4C2، معامل التضاعف الفعّال، الوقود النظامي، الوقود المختلط، التدفق النتروني الحراري، التدفق النتروني السريع، توزع الاستطاعة.

<sup>(1)</sup> طالب، <sup>(2)</sup> الأستاذ المشرف، <sup>(3)</sup> الأستاذ المشرف المشارك.

# Calculation of the effective multiplication factor, neutron flux and power distribution for ETRR-2 Egyptian Second research reactor using MCNP4C2 code

J. AL-Jahmany<sup>\*(1)</sup>, M. Nahili<sup>\*(2)</sup> and S. AL-Zawahera<sup>\*\*\*(3)</sup>

<sup>(\*)</sup> Department of Physics, Faculty of Sciences, Damascus University, Syria

<sup>(\*\*)</sup> Atomic Energy Commission, P.O.Box 6091, Damascus, Syria

Received 01/02/2012

Accepted 28/05/2012

## ABSTRACT

The MCNP4C2 Monte Carlo code was used to model the Egyptian Second research reactor in this paper, to calculate the effective multiplication factor  $k_{\text{eff}}$ , distribution of the thermal and fast neutron fluxes and power in reactor core with two type of fuels: standard and mixed. The values of the  $k_{\text{eff}}$  were 1.21842 and 1.05272, the maximum thermal flux were  $2.975 \times 10^{14}$  and  $3.352 \times 10^{14}$  n/cm<sup>2</sup>s, and the maximum fast flux was  $2.950 \times 10^{14}$  and  $2.389 \times 10^{14}$  n/cm<sup>2</sup>s for standard and mixed fuels respectively. The results showed good agreements with previous results available in the literature.

**Keyword:** MCNP4C2, Effective multiplication factor, Standard fuel, Mixed fuel, Thermal neutron flux, Fast neutron flux, Power distribution.

---

<sup>(1)</sup>Student, <sup>(2)</sup> Supervisor, <sup>(3)</sup> Associated supervisor.

## 1- مقدمة:

يعدُّ حساب معامل التضاعف الفعّال  $k_{eff}$  وتوزيع التدفق النيوتروني والاستطاعة في قلب المفاعل من الحسابات المهمة في التصميم النيوتروني لقلب المفاعل نظراً إلى أهميتها الكبيرة في إدارة الوقود وتحليل أمان المفاعل. وتجرى عادة حسابات التصميم النيوتروني لمفاعلات البحث بالاعتماد على كودات نيوترونية تعتمد طريقة الانتشار مثل (WIMSD4 and CITAION) التي تعتمد على الحل المباشر لمعادلة الانتقال في حساب المقاطع العرضية للنيوترونات لجميع المكونات الداخلية للمفاعل. وقد زادت السرعة الكبيرة للحواسيب المتوافرة في إمكانية استخدام وإنفاص الزمن الطويل نسبياً الذي تحتاج إليه بعض الكودات التي تعتمد الحسابات الشاملة مثل طريقة مونتني كارلو (الكود MCMP).

## 2- مفاعلات البحث من النوع MTR

يعد المفاعل MTR (material test reactor) من أكثر أنواع مفاعلات البحث انتشاراً، وتشكل الاختلافات الكثيرة في تصميم هذا المفاعل عقبة أمام وصف تصميم قياسي له. ويصمم الوقود في مفاعلات MTR على شكل صفائح مستطيلة تشكل معاً عناصر الوقود ويمكن أن يُبرّد MTR بالحمل الحراري الطبيعي للماء الخفيف، أما عاكس النيوترونات فيمكن أن يكون الماء أو البيريليوم أو الغرافيت (وهو الأغلب) أو خزانات من الماء الثقيل التي توضع في جانب واحد من قلب المفاعل أو أكثر. وتتغير استطاعة هذا النوع من المفاعلات من عدة واطات إلى عدة عشرات الميغواط. تتميز مفاعلات البركة بإمكانية الحصول على عدة تشكيلات مختلفة للقلب؛ وذلك بتحريك عنصر وقود واحد أو أكثر، أو بتغيير العناصر العاكسة.<sup>[1]</sup>

## 3- الكود MCNP

يشير الرمز المختصر MCNP إلى "Monte Carlo N-Particles" ويجري تطوير هذا الكود في مختبرات لوس ألاموس الوطنية في الولايات المتحدة الأمريكية. ويعتمد هذا الكود الذي أعد أصلاً للنيوترونات، طرائق مونتني كارلو لتتبع حركة جسيمات فردية في الأوساط المادية. وقد جرى تعديله ليشمل محاكاة منابع أخرى كمنابع غاما والإلكترونات كما في النسخة MCNP4C2 التي جرى استخدامها في هذه الدراسة. ويشمل الكود MCNP عدداً من مكتبات المقاطع العرضية حيث تتوافر معلومات كافية للعناصر جميعها من  $Z=1$  إلى  $Z=98$ . ويحاكي الكود MCNP4C2 انتقال النيوترونات في مجال الطاقة من  $10^{-11}$  MeV إلى 20 MeV ومحاكاة الفوتونات والإلكترونات في المجال من  $10^{-3}$  إلى 100 MeV.<sup>[2]</sup>

#### 4- توصيف المفاعل ETRR-2

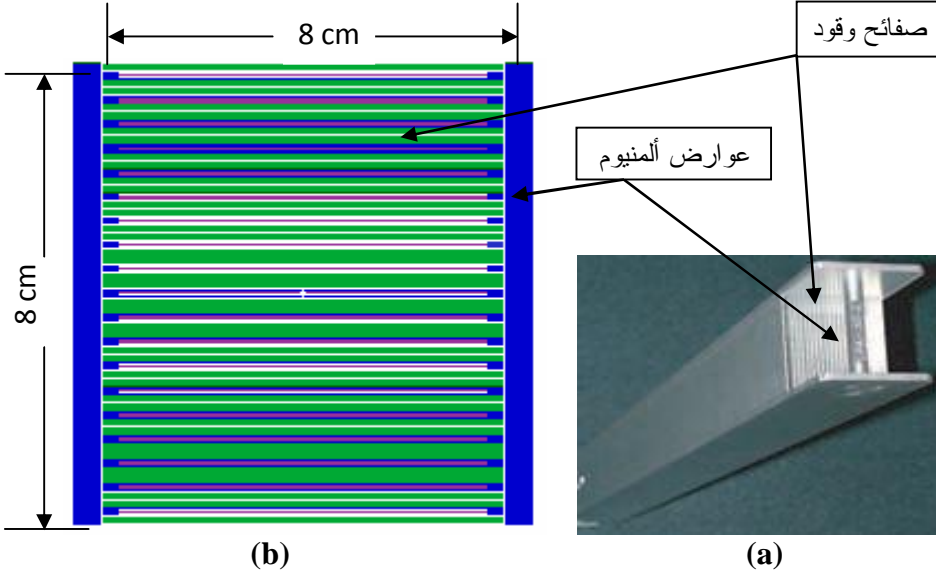
يصنف مفاعل البحث ETRR-2 في عداد مفاعلات البركة، وتبلغ استطاعته MW 22 ويُستخدم فيه الماء الخفيف كمبرد ومهدئ، والبريليوم كعكاس للنيوترونات. ويتألف القلب من 30 موقعاً منها 29 لعناصر الوقود وموقع مركزي للمصيدة النيوترونية. وتتوزع عناصر الوقود في قلب هذا المفاعل وفق الترتيب 6x5 وتحيط بها مدخنة من خليطة الزركونيوم المقاوم للتآكل التي ترتفع فوق القلب لتوجيه مياه التبريد في قلب المفاعل. تستخدم الخليطة (U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>-Al) المنخفضة الإغناء باليورانيوم (19.75%) كوقود مغلف بسبيكة الألمنيوم (Al-6061). يتألف عنصر الوقود الواحد من 19 صفيحة وقود. ويمكن التحكم باستطاعة المفاعل بواسطة 6 صفائح تحكم ماصة تتكون من الخليطة (فضة-كادميوم-إندسيوم). ويبين الجدول (1) مواصفات عنصر الوقود وأبعاده.<sup>[3]</sup>

الجدول (1) مواصفات عنصر الوقود وأبعاده.

الارتفاع الفعال	80.00 cm
المقطع العرضي لعنصر الوقود	8.00 x 8.00 cm <sup>2</sup>
سماكة صفيحة الوقود مع الغلاف	0.15 cm
سماكة صفيحة الوقود دون الغلاف	0.07 cm
عرض صفيحة الوقود	6.40 cm
سماكة العارضة الجانبية	0.50 cm
عرض العارضة الجانبية	8.00 cm
سماكة الماء بين صفائح الوقود	0.27 cm
المسافة بين كل عنصر وقود	0.39 cm

#### 5- نمذجة المفاعل ETRR-2 بواسطة الكود MCNP4C2

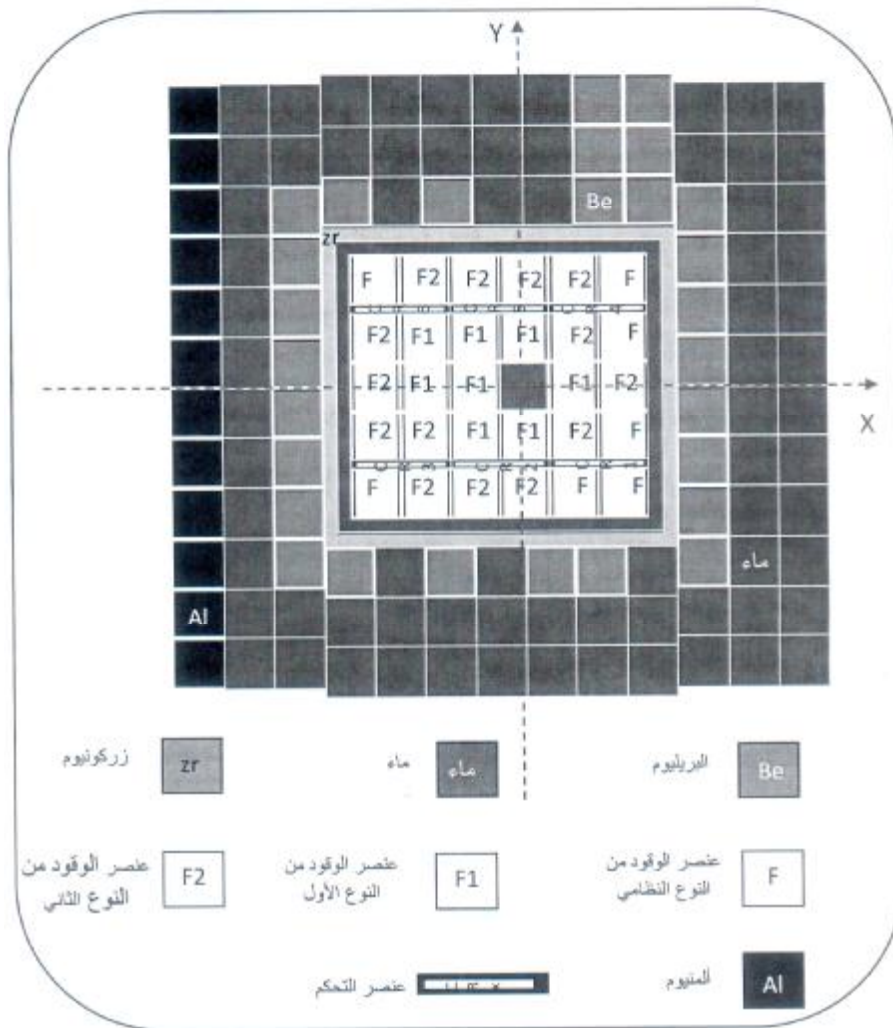
جرت نمذجة للخلية الواحديّة للمفاعل ETRR-2 التي تمثل صفيحة الوقود وغلافها وقناة الماء المحيطة بها. وللحصول على عنصر الوقود المبين في الشكل (1) كُبرت الخلية الواحديّة باستخدام التعليمة (fill) 19 مرة، ومنه للحصول على تشكيلة القلب كمر عنصر الوقود 29 مرة. كما جرت نمذجة للمصيدة النيوترونية (وهي ماء محاط بالألمنيوم)، ولعنصر البيريليوم العاكس الذي وزّع على جوانب القلب (كما ورد في المرجع [3]). يوضح الشكل (2) مقطعاً عرضياً لقلب المفاعل ETRR-2 وتوزع الوقود المختلط الذي يتكون من النوع النظامي والنوعين الأول والثاني، كما يعطي الجدول (2) النسب الوزنية لمكونات الوقود المستخدم بأنواعه الثلاثة.



الشكل (1) (a) صورة لعنصر الوقود المستخدم في المفاعل ETRR-2 (b) مقطع عرضي لعنصر الوقود باستخدام ميزة الرسم في الكود MCNP4C2.

الجدول (2) النسب الوزنية للأنواع الثلاثة لمكونات الوقود

النوع الثاني		النوع الأول		النوع النظامي	
النسبة الوزنية	المادة	النسبة الوزنية	المادة	النسبة الوزنية	المادة
8.398 %	$^{235}\text{U}$	6.598 %	$^{235}\text{U}$	12.377 %	$^{235}\text{U}$
34.230 %	$^{238}\text{U}$	26.894 %	$^{238}\text{U}$	50.450 %	$^{238}\text{U}$
7.642 %	O	6.004 %	O	11.263 %	O
49.730 %	Al	60.504 %	Al	25.910 %	Al
3.655	الكثافة g/cm <sup>3</sup>	3.299	الكثافة g/cm <sup>3</sup>	4.802	الكثافة g/cm <sup>3</sup>



الشكل (2) مقطع عرضي لقلب المفاعل ETRR-2 بالوقود المختلط باستخدام ميزة الرسم في الكود MCNP4C2

## 6- النتائج والمناقشة

1.6 حساب معامل التضاعف الفعال  $k_{eff}$  :

استخدم الكود MCNP4C2 لحساب معامل التضاعف الفعال للنترونات  $k_{eff}$  بواسطة البطاقة kcode، وروعي الحجم الاسمي للمنبع في كل دورة وكان 10000 نترون، وأخذت القيمة 1.2 كقيمة ابتدائية للمعامل  $k_{eff}$ ، وبلغ عدد الدورات الاختبارية والكلية 30 و230 دورة على الترتيب. يظهر الجدول (3) قيم معامل التضاعف الفعال  $k_{eff}$  المحسوب في هذا البحث وفي عدة دراسات لهذا المفاعل للوقود النظامي والمختلط، ويلاحظ التقارب الجيد بين هذه النتائج. وقد يُعزى السبب في الاختلاف بين النتائج المحسوبة في هذه الورقة والمرجع [3] إلى اختلاف في بعض معطيات المفاعل المدروس، وهي كالآتي:

- 1- عدم توافر أبعاد الماء المحيط بالقلب. وقدرت في هذه الورقة بـ 2.5cm.
- 2- عدم توافر أبعاد مدخنة الزركونيوم المحيطة بالقلب، وقدرت في هذه الورقة بـ 2.5cm.
- 3- عدم توافر تركيب خليطة البيريليوم العاكس، الذي عُدَّ في المرجع [3] مماثلاً لتركيب خليطة البيريليوم العاكس في مفاعل منسر، في حين أخذ في هذه الورقة البيريليوم الصافي.

4- الاختلاف في الحجم الاسمي للمنبع في كل دورة وعدد الدورات الاختبارية والكلية المأخوذة في المرجع، التي اتضحت من خلال الانحراف المعياري.

الجدول (3) قيم معامل التضاعف والانحراف المعياري المحسوبة في هذه الورقة

الفرق النسبي (%)	$k_{eff}$					نوع الوقود
	[4]	الانحراف المعياري	[3]	الانحراف المعياري	هذا البحث	
2.5 -1.5	1.18775	0.00073	1.23698	0.00049	1.21842	نظامي
-0.3 -3.8	1.05595	0.00014	1.09224	0.00047	1.05272	مختلط

## 2.6 التدفق النتروني

حسب التدفق النتروني وفق المحورين (ox, oy) كما في الشكل (2)، وحسب أيضاً وفق المحور (oz) الذي يوافق ارتفاع قلب المفاعل الفعال وهو (80 cm)، وذلك للمجموعتين الطاقيتين الحرارية والسريعة كما في الجدول (4). واستخدمت البطاقة (F4) لحساب التدفق النتروني مقدراً بالوحدة  $(cm^{-2})$ .

الجدول (4) المجموعات الطاقية المستخدمة

رقم المجموعة	مجال الطاقة	المجموعة الطاقية
1	0.000 eV- 0.625 eV	الحرارية
2	5.530 keV- 20.000 MeV	السريعة

ومن المعلوم أن الكود MCNP يحسب التدفق النتروني بالنسبة إلى جسيم واحد فقط من المصدر، لذا وللحصول على التدفق القطري والمحوري للنترونات لابد من مراعاة قيمة نشاط قلب المفاعل في حساب التدفق.

يمكن حساب نشاط القلب من العلاقة الآتية<sup>[2]</sup>:

$$A = (P \times v) / E_f \quad (1)$$

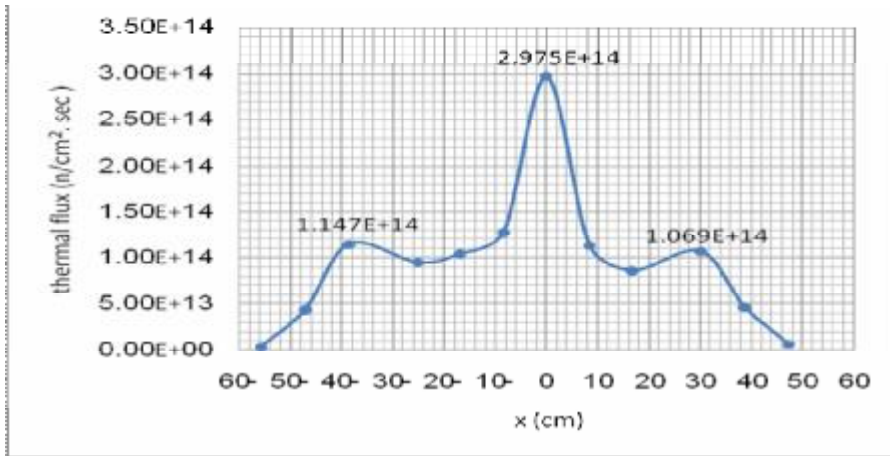
حيث:  $A(n/s)$  هو نشاط القلب، و  $P(W)$  استطاعة المفاعل، و  $v$  عدد النترونات المتولدة في الانشطار الواحد، و  $E_f(J)$  طاقة الانشطار النوعية.

بعد حساب قيمة  $v$  في هذا العمل التي كانت 2.43 للمفاعل المدرس ETRR-2، وبالتعويض في العلاقة (1) حصلنا على القيمة  $16.706 \times 10^{17} n/s$  لنشاط القلب.

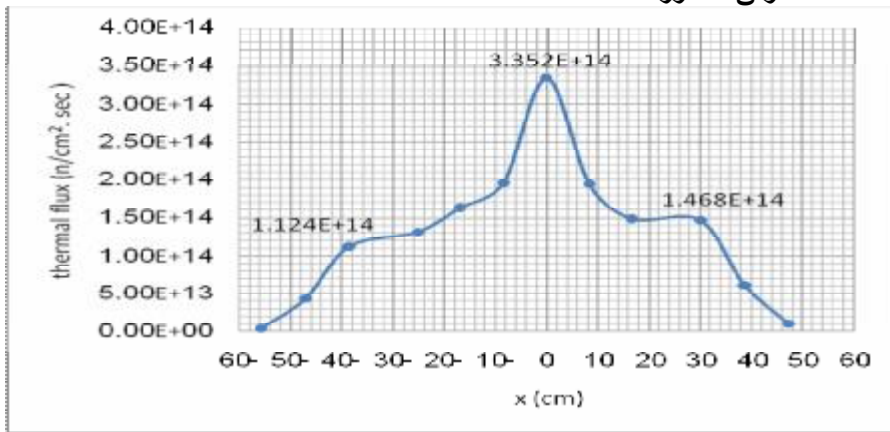
### 1.2.6 توزع التدفق النتروني الحراري

حسب توزع التدفق النتروني الحراري وفق المحور  $ox$  وعند  $y=0$  و  $z=0$  لنوعي الوقود النظامي والمختلط، ويوضح الشكلان (3-a) و (3-b) نتيجتي هذين الحسابين. إذ يلاحظ وجود قمتين للتدفق في العاكس وأخرى في المصيدة النترونية المائبة المتوضعة في منتصف المفاعل تقريباً، وقد بلغت قيمة التدفق النتروني الحراري الأعظمي في المصيدة النترونية في القلب المختلط  $3.352 \times 10^{14} (n/cm^2s)$  في حين هي  $3.5 \times 10^{14}$  و  $3.44 \times 10^{14} n/cm^2s$  في المرجعين [3] و [5] على الترتيب. كما يلاحظ أن قيمة التدفق النتروني الحراري الأعظمي في المصيدة المائبة تكون في حالة الوقود المختلط أكبر بوضوح من مثيلتها للوقود النظامي، ويمكن تفسير ذلك بعدم تجانس كمية الوقود في الحالتين، حيث ترتفع نسبة اليورانيوم  $^{235}U$  و  $^{238}U$  في الوقود النظامي عن مثيله في الوقود من النوع الأول والثاني (الجدول 2). علماً أن النسبة هذه هي 62.83% و 33.49% و 42.63% على الترتيب بالنسبة إلى الأنواع الثلاثة للوقود المذكور، وهذا يزيد من نسبة الماء إلى الوقود في القلب ذي الوقود المختلط أي تهدئة للنترونات أكثر، وقيمة للتدفق النتروني الحراري أكبر. ونلاحظ في حالة الوقود النظامي أن قيمة التدفق الحراري في القمة اليسرى للعاكس أكبر مما هي عليه في القمة اليمنى، وهذا طبيعي بسبب وجود ثلاثة عناصر ووقود على يمين العاكس اليساري، في حين يوجد عنصراً ووقود على يسار العاكس اليميني. أمّا في حالة الوقود المختلط فالعكس صحيح إذ يلاحظ ارتفاع قيمة التدفق الحراري في القمة اليمنى عن مثيلتها اليسرى في العاكس، ويعود ذلك إلى توزيع الوقود بشكل غير متناظر حول المحور  $(ox)$  الذي حسب وفقه التدفق النتروني الحراري كما نلاحظ في الشكل (2). ونشير هنا إلى أن الخطأ النسبي في قيم التدفق النتروني جميعها كانت أقل من 3%.



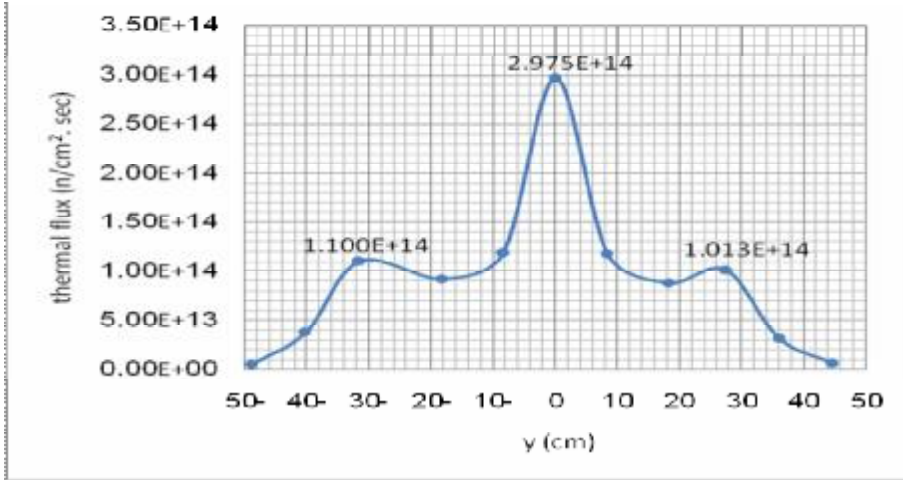


الشكل (3-a) التدفق النيوتروني الحراري في قلب المفاعل ETRR-2 محسوباً للوقود النظامي وفق المحور 0x

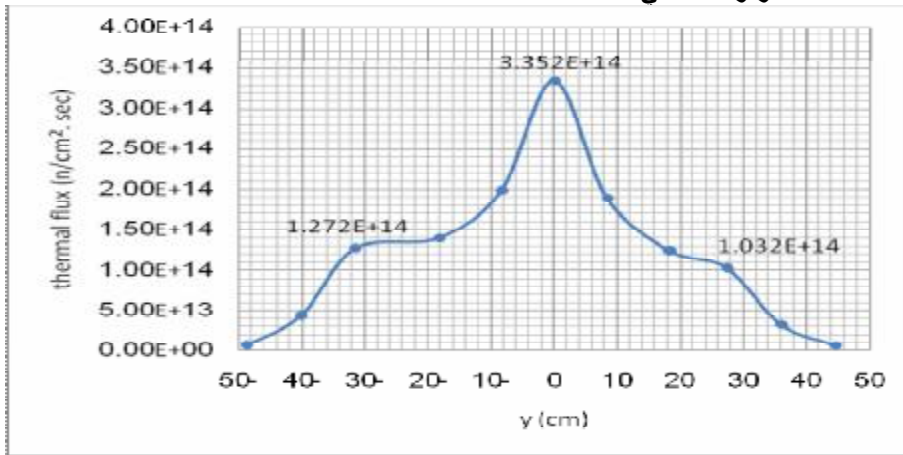


الشكل (3-b) التدفق النيوتروني الحراري في قلب المفاعل ETRR-2 محسوباً للوقود المختلط وفق المحور 0x.

بيّنت نتيجة حساب توزيع التدفق النيوتروني الحراري وفق المحور oy عند  $x=0$  و  $z=0$  لنوعي الوقود النظامي والمختلط وجود ثلاث قمم كما في الشكلين (4-a) و (4-b)، ومنهما يمكن ملاحظة ارتفاع قيم قمم توزيع التدفق النيوتروني وفق المحور oy في حالة الوقود المختلط عن مثيلاتها للوقود النظامي كما في السابق، ويلاحظ ارتفاع قيمة التدفق الحراري في القمة اليسرى للعاكس بالنسبة إلى اليمنى لحالتي الوقود النظامي والمختلط، ويمكن تفسير ذلك بوجود الماء عوضاً عن البريليوم في المفاعل ETRR-2.

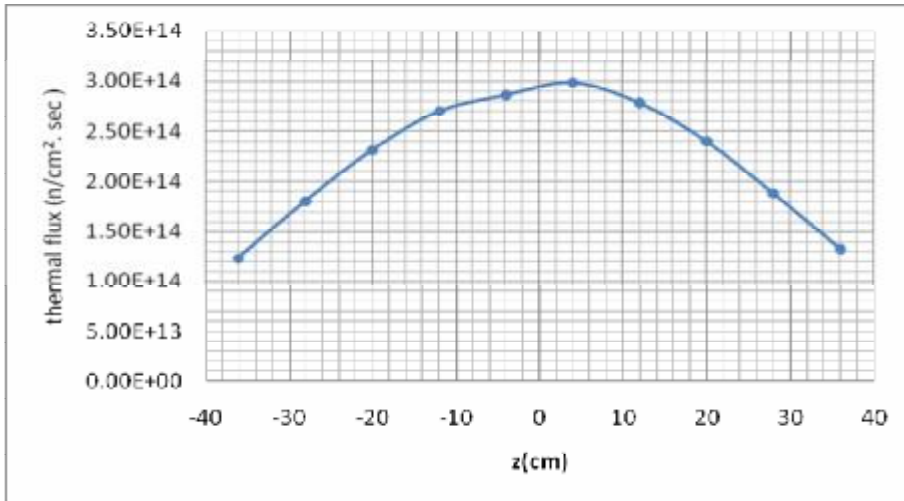


الشكل (4-a) التدفق النيوتروني الحراري في قلب المفاعل ETRR-2 محسوباً وفق المحور oy للوقود النظامي.

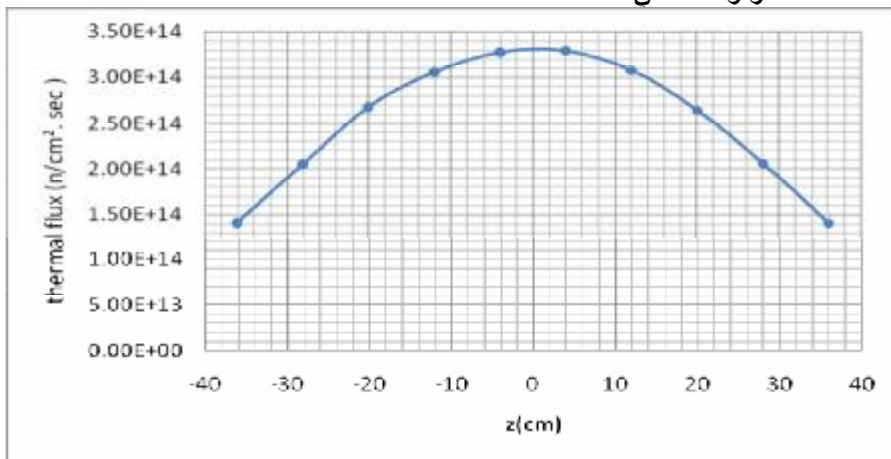


الشكل (4-b) التدفق النيوتروني الحراري في قلب المفاعل ETRR-2 محسوباً وفق المحور oy للوقود المختلط.

وعند حساب توزيع التدفق النيوتروني الحراري وفق المحور oz في المصيدة النيوترونية، تبين وجود مجال عريض للتدفق النيوتروني الحراري متناظر تقريباً (بسبب عدم وجود عاكس سفلي بالنسبة إلى المركز) في حالي الوقود كما في الشكل (5-a-b). هذا فضلاً عن ارتفاع قيمة التدفق النيوتروني الحراري للمجال في حالة الوقود المختلط عن مثيلتها للوقود النظامي، ويعود ذلك إلى ما ذكر سابقاً.



الشكل (5-a) التدفق النيوتروني الحراري في قلب المفاعل ETRR-2 محسوباً وفق المحور oz للوقود النظامي

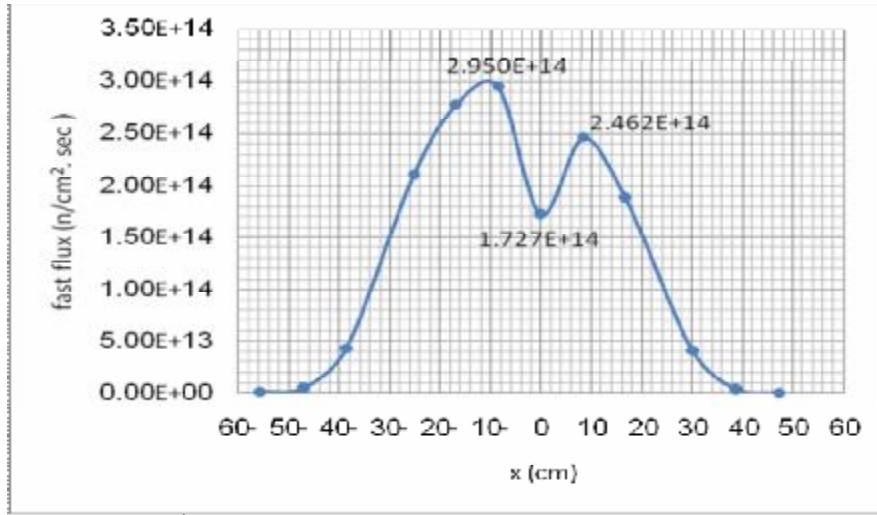


الشكل (5-b) التدفق النيوتروني الحراري في قلب المفاعل ETRR-2 محسوباً وفق المحور oz للوقود المختلط

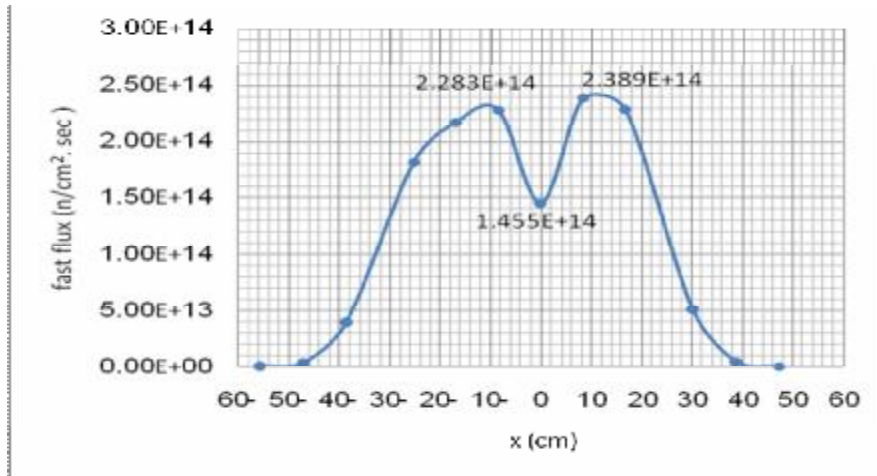
### 2.2.6 توزيع التدفق النيوتروني السريع

حسب توزيع التدفق النيوتروني السريع وفق المحور ox عند  $z=0$  و  $y=0$  لنوعي الوقود النظامي والمختلط وكانت النتيجة كما في الشكلين (6-a) و (6-b). يلاحظ من هذين الشكلين وجود قمتين للتدفق في الوقود منخفض يمثل المصيدة النيوترونية المائتية بالنسبة إلى

نوعي الوقود النظامي والمختلط، وبلغت قمة التدفق السريع في القلب المختلط  $2.389 \times 10^{14}$ ، وهي  $2.2 \times 10^{14}$  في المرجع [6]. ومن جهة أخرى يلاحظ ارتفاع في قيم القمتين المنخفض للوقود النظامي عن مثيلاتها للوقود المختلط، على عكس ما رأينا سابقاً في الفقرة 1.2.6 فإن ازدياد قيمة التدفق النتروني الحراري يكون على حساب التدفق النتروني السريع. ومن ثم هناك تدفق نتروني حراري أكبر في القلب ذي الوقود المختلط منه في القلب ذي الوقود النظامي، رافقه تدفق نتروني سريع أصغر في القلب ذي الوقود المختلط منه في القلب ذي الوقود النظامي. كما يلاحظ ارتفاع القمة اليسرى للتدفق السريع بالنسبة إلى اليمين في حالة الوقود النظامي، ويمكن تفسير ذلك بتوضع حزم الوقود حول المصيدة النترونية المائية، حيث توجد ثلاث حزم للوقود على يسار المصيدة واثنان على يمينها. وبالنسبة إلى الوقود المختلط يلاحظ ارتفاع القمة اليمنى للتدفق السريع بالنسبة إلى اليسرى، وذلك لتوضع الوقود بشكل غير متناظر حول المحور (ox) الذي وفقه حسب التدفق النتروني السريع كما نلاحظ في الشكل (2)، فوجود الوقود النظامي في الجهة اليسرى يعطي ذلك تدفقاً نترونياً سريعاً أكبر منه في نوعي الوقود الأول والثاني اللذين يحتويان على كمية من اليورانيوم أقل من الوقود النظامي.

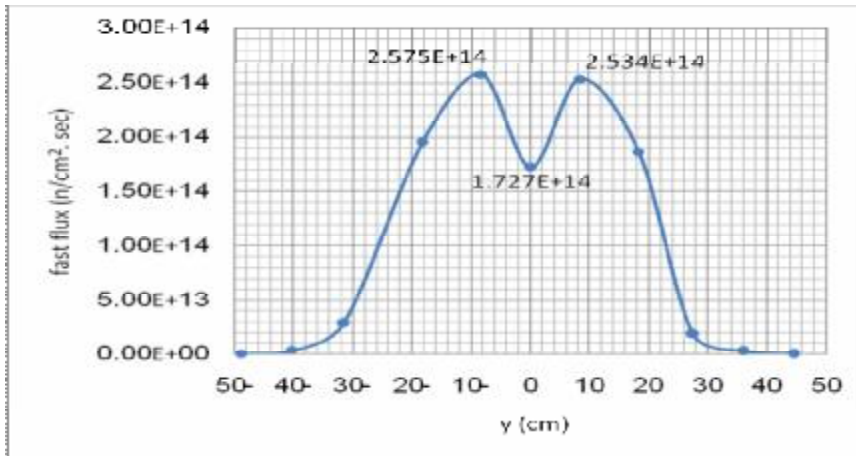


الشكل (6-a) التدفق النتروني السريع في قلب المفاعل ETRR-2 محسوباً وفق المحور ox للوقود النظامي

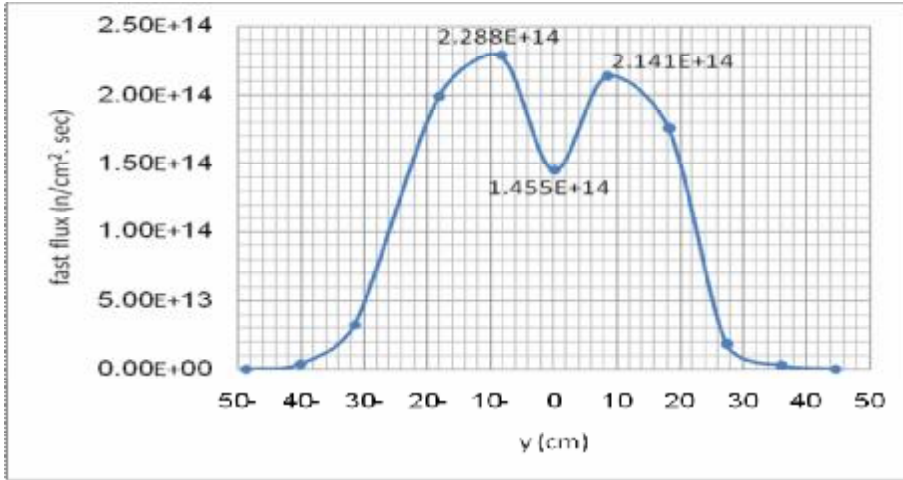


الشكل (6-b) التدفق النيوتروني السريع في قلب المفاعل ETRR-2 محسوباً وفق المحور  $ox$  للوقود المختلط.

حسب توزيع التدفق النيوتروني السريع وفق المحور  $oy$  عند  $x=0$  و  $z=0$  لنوعي الوقود النظامي والمختلط، وكانت النتيجة كما في الشكلين (7-a) و (7-b). يلاحظ من هذين الشكلين وجود قمتين للتدفق في الوقود منخفض يمثل المصبدة النيوترونية المائبة بالنسبة إلى نوعي الوقود النظامي والمختلط، وكما في الحالة السابقة وللسبب نفسه يلاحظ ارتفاع في قيم القمتين المنخفض للوقود النظامي عن مثيلاتها للوقود المختلط.

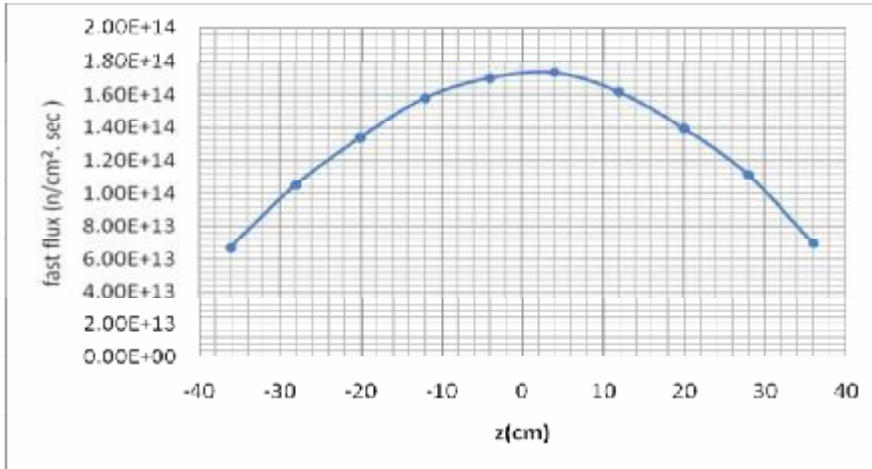


الشكل (7-a) التدفق النيوتروني السريع في قلب المفاعل ETRR-2 محسوباً وفق المحور  $oy$  للوقود النظامي



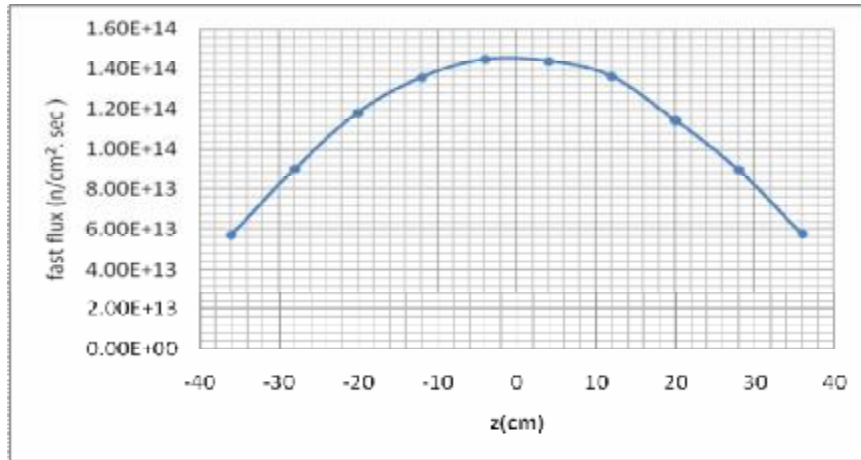
الشكل (7-b) التدفق النيوتروني السريع في قلب المفاعل ETRR-2 محسوباً وفق المحور ox للوقود المختلط.

بيّن حساب توزع التدفق النيوتروني السريع وفق المحور oz وجود هضبة عريضة للتدفق متناظرة بالنسبة إلى المركز لحالتي الوقود النظامي والمختلط كما في الشكلين (8-a) و (8-b). كما يلاحظ ارتفاع قيمة التدفق السريع للهضبة في حالة الوقود النظامي عن مثيلتها للوقود المختلط ويعزى ذلك للسبب نفسه المذكور في الفقرة (2.2.5).



الشكل (8-a) التدفق النيوتروني السريع في قلب المفاعل ETRR-2 محسوباً وفق المحور oz للوقود النظامي





الشكل (8-b) التدفق النيوتروني السريع في قلب المفاعل ETRR-2 محسوباً وفق المحور oz للوقود المختلط

### 3.2.6 توزيع الاستطاعة

يمكن حساب استطاعة المفاعل من العلاقة الآتية [6]:

$$P = E_f \times f_{th} \times \Sigma_f \times V \quad (2)$$

حيث  $P(W)$  استطاعة المفاعل، و  $E_f(J)$  طاقة الانشطار لنواة واحدة، و  $\theta_{th}(n/cm^2)$  التدفق النيوتروني الحراري، و  $\Sigma_f(cm^{-1})$  المقطع الجهري للانشطار، و  $V(cm^3)$  حجم المفاعل. باستخدام البطاقة Fm في الكود MCNP4C2 والمعادلة (2) حسبت الاستطاعة المتحررة في كل حزمة وقود ولنوعي الوقود النظامي والمختلط كما في الشكلين (a-b-10). يلاحظ من الشكلين (a-b-10) الاختلاف الواضح في توزيع الاستطاعة، حيث تزداد الاستطاعة كلما اقتربنا من المصيدة النيوترونية في الوقود النظامي، وهذا لا يمثل الوقود المختلط الذي تتباين فيه توزيعات الاستطاعة في عناصر الوقود، وذلك طبيعي بسبب اختلاف نسب كمية الوقود المبينة في الجدول (2). وحسبت الاستطاعة الكلية للمفاعل ETRR-2 بالنسبة إلى الوقود النظامي والمختلط كما يبين الجدول (5)، ونلاحظ تقارباً جيداً للاستطاعة الكلية للوقود المختلط بالنسبة إلى الاستطاعة الاسمية للمفاعل المدروس بفرق نسبي قدره 5.25%، ويعزى السبب في هذا الفرق إلى نقص المعطيات عن هذا المفاعل، كما ذكر في الفقرة 6.1.

الجدول (5) المجموع الكلي للاستطاعة المحسوبة لكلتا الحالتين

نوع الوقود	المجموع الكلي للاستطاعة (MW)
نظامي	26.75±0.005
مختلط	23.22±0.005

0.705	0.825	0.895	0.874	0.779	0.671
0.886	1.011	1.104	1.188	0.944	0.808
0.938	1.073	1.272	0.000	1.107	0.850
0.885	1.010	1.116	1.211	0.969	0.814
0.696	0.828	0.915	0.907	0.801	0.671

الشكل (a-10) قيم الاستطاعة في كل عنصر من الوقود النظامي

0.730	0.613	0.697	0.726	0.692	0.895
0.666	0.638	0.720	0.784	0.872	1.211
0.718	0.686	0.686	0.000	0.805	0.837
0.681	0.814	0.736	0.815	0.912	1.161
0.778	0.658	0.764	0.795	1.084	0.956

الشكل (b-10) قيم الاستطاعة في كل عنصر من الوقود المختلط



### الاستنتاجات

استخدم الكود MCNP4C2 لنمذجة قلب مفاعل البحث المصري ETRR-2 (Egyptian Second Research Reactor). وحساب معامل التضاعف الفعال للنترونات  $k_{eff}$  وتوزيع التدفق النيوتروني الحراري والسريع في قلب المفاعل وفق المحاور الإحداثية الثلاثة (ox,oy,oz) ولنوعي الوقود النظامي والمختلط، كما حسبت الاستطاعة الكلية واستطاعة حزم الوقود لنوعي الوقود النظامي والمختلط، وقد قورنت النتائج مع بعض الدراسات التي أجريت على المفاعل نفسه في هيئة الطاقة الذرية السورية [3]، وكذلك التي أجريت على المفاعل نفسه في مصر [5] و [4].

وتبين المقارنة مدى كفاءة نموذج الكود MCNP4C2 ثلاثي الأبعاد للمفاعل ETRR-2 بواسطة، إذ بلغت قيمة معامل التضاعف الفعال 1.21842 و 1.05272 وبخطأ نسبي أقل من 4% لكلتا الحالتين. وبلغت ذروة التدفق الحراري في كلتا الحالتين على التوالي  $2.975 \times 10^{14}$  و  $2.950 \times 10^{14}$  (n/cm<sup>2</sup>s) وبخطأ نسبي أقل من 5%. أما ذروة التدفق السريع فقد بلغت في كلتا الحالتين  $2.950 \times 10^{14}$  و  $2.389 \times 10^{14}$  (n/cm<sup>2</sup>s) على الترتيب، وبخطأ نسبي أقل من 8%. وحسبت استطاعة المفاعل الكلية وتوزعها على عناصر الوقود، وكانت متقاربة مع استطاعة المفاعل الاسمية بخطأ نسبي قدره 5.25%. ويدل التقارب الجيد بين القيم المحسوبة في هذا الورقة وتلك العائدة لبعض المراجع على توافق طريقة النمذجة مع الأعمال الأخرى وإمكانية البناء على النموذج المستخدم لإجراء بعض الحسابات النيوترونية الإضافية.

## References

- [1] H. Böck and M. Villa. (2001). "Survey Of Research Reactors" Prepared for the IAEA course on "safety, Management and utilization of Research Reactors" tislava-vienna. March 5-30-2001.
- [2] Oak Ridge National Laboratory. (2000). "Rsicc Compyter Code Collection MCNP4C" contributed by: Los Alamos National Laboratory Los Alamos, New Mexico.
- [3] Khamis I. Kattaab K. Suleman I. and Ghazi N. (2006). "Neutronic design of a 22 MW MTR type nuclear research reactor" Syrian Atomic Energy Commission.
- [4] Mohamed E. Nagy, Mohamed M. Elafify and Ashraf M. R. Enany. (2004). "Neutronic cell calculations using homogeneous models in ETRR-2" Faculty of Engineering, Alexandria University, Egypt.
- [5] Attya A. Abou-Zaida, M. Nasr. (2004). "Feasibility study of iridium production at ETRR-2". Annals of Nuclear Energy 31(2004) 87-96.
- [6] International Atomic Energy Agency" <http://www.iaea.org>" Copyright 2009
- [7] U.S. Department of Energy. (1993). "Doe Fundamentals Handbook Nuclear Physics And Reactor Theory" January.