

حساب معامل التضاعف الفعال لمفاعلات الجيل الجديد عالية الأمان من النوع VVER-640

حمزة الرفاعي⁽¹⁾ و حمود العرابي⁽¹⁾ و سعدو الظواهره⁽²⁾

⁽¹⁾ قسم الفيزياء – كلية العلوم – جامعة دمشق – سورية

⁽²⁾ قسم الهندسة النووية – هيئة الطاقة الذرية – دمشق – سورية

تاريخ الإيداع 2011/08/14

قبل للنشر في 2012/02/06

الملخص

تعتمد المفاعلات النووية في عملها على ظاهرة الانشطار النووي. يؤدي عدد النترونات الناتجة عن الانشطار النووي عند نهاية الدورة النترونية مقارنة بعددها عند بداية الدورة النترونية دوراً مهماً في تحديد معامل التضاعف الفعال للمفاعل. يجري عادةً التحكم بقيمة معامل التضاعف الفعال من خلال قضبان التحكم. حُسب في هذا البحث معامل التضاعف الفعال لمفاعلات الجيل الجديد عالية الأمان من النوع VVER- 640 باستخدام طريقتين: الطريقة التحليلية باستخدام برنامج Mathcad، والطريقة العددية باستخدام الكود GETERA. كانت قيمة معامل التضاعف الفعال وفق الطريقة التحليلية مساوية لـ 1.3430، في حين كانت قيمة معامل التضاعف الفعال وفق الكود GETERA 1.3477. لُوَظ وجود تقارب جيد بالمقارنة بين الطريقتين.

الكلمات المفتاحية: معامل التضاعف الفعال، معامل الانشطار السريع، احتمالية الهروب من الامتصاص الرنيني، معامل الاستفادة من النترونات الحرارية، معامل المكوث السريع، معامل المكوث الحراري.

Calculation of the effective multiplication factor of the highly safe new generation VVER- 640 type reactor

H. Al-refaei⁽¹⁾; H. Al-ourabi⁽¹⁾
and S. Al-zawahra⁽²⁾

⁽¹⁾Department of Physics, Faculty of Sciences, Damascus University, Syria.

⁽²⁾Nuclear engineering department. Atomic energy commission .Syria

Received 14/08/2011

Accepted 06/02/2012

ABSTRACT

Nuclear reactors depend on nuclear fission phenomenon in their work. The effective multiplication factor depends on the number of neutrons in two successive generations and it usually controlled in the reactor by using control rods. In this paper, calculations of the effective multiplication factor for the highly safe new generation VVER- 640 type reactor is conducted in two methods: analytic method using the Mathcad program and the GETERA code. The effective multiplication factor for the first method was 1.3430 and it was 1.3477 using the GETERA code. Good agreement was noticed between the two methods.

Key words: Effective multiplication factor, Fast fission factor, Probability escaping from resonance absorption, Utilization factor of thermal neutrons, Fast remaining factor, Thermal staying factor.

المقدمة العامة وهدف البحث

يعدُّ مفاعل VVER- 640 من مفاعلات الماء المضغوط والرقم 640 يدل على الاستطاعة الكهربائية بوحدة الميغا واط. تُستخدم في المفاعل مواد مهدئة ومبردة لتهدئة نواتج الانشطار ذات الطاقة الحركية المرتفعة [1]. يجري التحكم بالمفاعل باستخدام قضبان التحكم التي تمتص النيوترونات الفائضة. يدخل الماء عند خروجه من قلب المفاعل في مبادل حراري حيث يُسخن ويُحرك في عنفة مولدة الطاقة الكهربائية [1]. اختير مفاعل VVER- 640 (هدفاً للبحث) للأسباب الآتية:

- الاستفادة من الخبرة المكتسبة من بناء واستثمار المفاعلات من النوع VVER- 440، VVER-1000 في تصميمه [2].
- توافر نظام التبريد الطبيعي الذي يساعد على تأمين توقف المفاعل وتبريده وتصريف الحرارة المتبقية دون استخدام أية أجهزة إضافية أو طاقة خارجية؛ وذلك في حال حدوث أي تسرب للمبرد [2].
- تعويض التفاعلية لحالات التشغيل كلها حتى درجة حرارة مساوية لـ 1000 درجة مئوية [2].
- استخدام نظام التدريع الثنائي [3].
- استخدامه الماء الخفيف كمهدئ ومبرد في المفاعل.

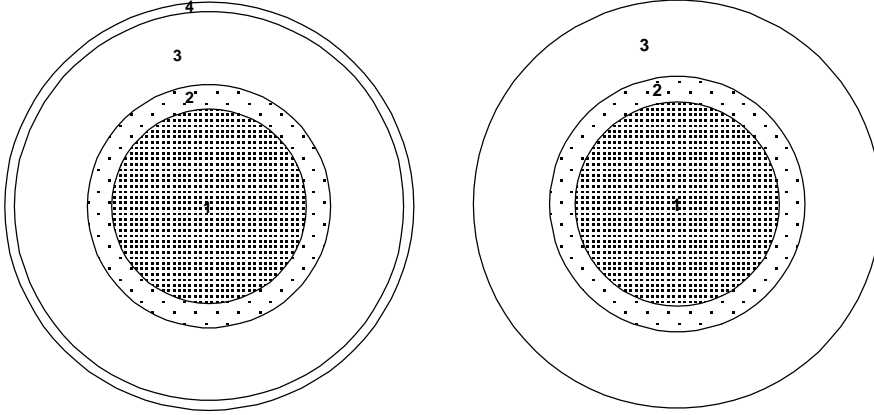
في أثناء عمل المفاعل النووي تطرأ تغييرات مختلفة على النيوترونات ضمن قلب المفاعل منها الامتصاص أو التوالد أو التسرب إلى خارج المفاعل. هذه التغييرات تؤثر في أمان المفاعل وزمن تشغيله. يقوم معامل التضاعف الفعال بضبط عمل المفاعل. إنه يُعرف بنسبة عدد النيوترونات عند نهاية جيل ما إلى عدد النيوترونات في الجيل السابق. إذا كان عدد النيوترونات عند كل جيل ثابتاً كان المفاعل في الحالة الحرجة. وإذا كان عدد النيوترونات في جيل ما أكبر من عدد النيوترونات في الجيل السابق كان المفاعل تحت حرج [1]. لبيان أن المفاعل VVER- 640 في الحالة الحرجة أو فوق الحرجة أو تحت الحرجة وللتحقق من أمانه ولتحديد التغييرات التي تطرأ على النيوترونات ضمن قلب المفاعل VVER- 640 قمنا بحساب معامل التضاعف الفعال وفق الطريقة التحليلية باستخدام برنامج Mathcad. نظراً إلى أن المفاعل المدروس هو عبارة عن مشروع تصميمي لمفاعلات الجيل الجديد ولا توجد دراسات منشورة في هذا الموضوع كان لا بد من حساب معامل التضاعف الفعال باستخدام الكود GETERA لمقارنته بالنتائج المحسوبة وفق الطريقة التحليلية.

مراحل العمل:

عدنا أن المفاعل يتألف من خلية واحدة (شكل 1) ومن خلية عملاقة (شكل 2). تتألف الخلية الواحدة من:

- الوقود: وهو عبارة عن أكسيد اليورانيوم UO_2 .
- الغلاف: وهو من الزركونيوم.
- الماء في عنصر الوقود.

تتألف الخلية العملاقة من الخلية الواحدة مضافاً إليها الماء بين عناصر الوقود.



الشكل (1) الخلية الواحدة للمفاعل الشكل (2) الخلية العملاقة للمفاعل

1- الوقود؛ 2- الغلاف؛ 3- طبقة الماء المحيطة بفضيب الوقود؛ 4- طبقة الماء بين عناصر الوقود.

حُسب معامل التضاعف الفعال لمفاعل VVER-640 باستخدام الطريقتين الآتيتين:

A- الطريقة التحليلية:

سنرمز للخلية الواحدة بالرمز (c)، وللخلية العملاقة بالرمز (b). وأتبع الخطوات الآتية:

- تحديد التركيب الحجمي للمفاعل:

حُدِّد التركيب الحجمي لكل من الوقود وغلاف الوقود والماء [4،3،1]. انطلاقاً من العلاقة (1) حُسب حجم الوقود:

$$V_{UO_2} = \frac{\pi d^2}{4} \cdot n_{rod} \cdot H \quad (1)$$

لا تأثير للارتفاع (H) في الحسابات النثرونية التي سنجرىها لذلك سنعدّه مساوياً لـ:
 $H=1(cm)$

حُسبَ حجم غلاف الوقود من خلال العلاقة الآتية:

$$V_{clad} = \frac{\pi(d_{out}^2 - d_{in}^2)}{4} n_{rod} \cdot H \quad (2)$$

وأخيراً حُسبَ حجم الماء وفق المرحلتين الآتيتين:

1- حجم الماء في عنصر الوقود:

حُسبَ حجم الماء في عنصر الوقود من العلاقة (3):

$$V_1^{H_2O} = \left((h_{as})^2 \frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{\pi \cdot d_{out}^2}{4} \cdot n_{rod} \right) \cdot H \quad (3)$$

2- حجم الماء بين عناصر الوقود:

حُسبَ حجم الماء بين عناصر الوقود من خلال العلاقة (4):

$$V_2^{H_2O} = \left[(h')^2 - h_{as}^2 \right] \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot H \quad (4)$$

فيكون حجم الماء الكلي:

$$V = V_1^{H_2O} + V_2^{H_2O} \quad (5)$$

يوضح الجدول (1) قيم ودلالات الرموز الواردة في حساب الحجم.

الجدول (1) قيم الرموز الواردة في حساب الحجم ودلالاتها

القيمة	الرمز	المصطلح
7.57 (mm)	d	قطر قضيب الوقود
9.1 (mm)	d_{out}	القطر الخارجي للغلاف
7.72 (mm)	d_{in}	القطر الداخلي للغلاف
293	n_{rod}	عدد قضبان الوقود في عنصر الوقود
234 (mm)	h_{as}	طول عنصر الوقود
136 (mm)	h'	الخطوة بين عناصر الوقود

- حساب التراكيز الذرية لمكونات قلب المفاعل:

حُسبت التراكيز الذرية لكل من الماء والوقود والغلاف في المفاعل. بُدئَ بحساب التركيز الذري للماء انطلاقاً من العلاقة الآتية [2،3،4]:

$$n_{H_2O} = \frac{\rho_{H_2O} \cdot X_{Na}}{M_{H_2O}} \quad (6)$$

حيث (N_a) عدد أفوكادرو، يُساوي 6.023×10^{23}

ويُحسب التركيز الذري للهيدروجين باستخدام العلاقة الآتية [4،3،1]:

$$n_{H_2} = 2 \times n_{H_2O} \quad (7)$$

أما حساب التركيز الذري للأوكسجين في الماء فأجري بالعلاقة الآتية [4،3،2]:

$$n_O = n_{H_2O} \quad (8)$$

بالاعتماد على العلاقة (9) حُسبَ التركيز الذري للوقود [4،3،2]:

$$n_{UO_2} = \frac{\rho_{UO_2} \times N_a}{M_{UO_2}} \quad (9)$$

وبالاعتماد على العلاقة (10) حُسبَ التركيز الذري للأوكسجين في الوقود [4،3،2]:

$$n_{O_2} = 2 \times n_{UO_2} \quad (10)$$

كما حُسبَ التركيز الذري لـ U^{238} بالعلاقة الآتية [4،3،2]:

$$n(U^{238}) = n_{UO_2} \times \left(1 - \frac{x}{100}\right) \quad (11)$$

حيث (X) نسبة إغناء الوقود، تُساوي 3.6%.

وحُسبَ التركيز الذري لـ U^{235} باستخدام العلاقة الآتية [4،3،2]:

$$n(U^{235}) = n_{UO_2} \times \left(\frac{x}{100}\right) \quad (12)$$

وأخيراً حُسبَ التركيز الذري للغلاف بالعلاقة الآتية [4،3،2]:

$$n_{Zr} = \frac{\rho_{Zr} \times N_a}{M_{Zr}} \quad (13)$$

يُبين الجدول (2) قيم الكثافة الحجمية (ρ) والعدد الكتلي (M) للمواد المستخدمة في المفاعل.

الجدول (2) قيم الكثافة الحجمية (ρ) والعدد الكتلي (M) للمواد المستخدمة في المفاعل.

M_i	$\rho_i (g \cdot cm^{-3})$	i
18	0.714	H_2O
270	10.2	UO_2
91	6.44	Zr

وُضعت نتائج حساب الحجوم والتراكيز الذرية في الجدول (3)

الجدول (3) الحجوم والتراكيز الذرية.

$n \times 10^{24} (atom/cm^3)$	$V (cm^3)$	المادة
0.000819	131.87	U^{235}
0.02913	131.87	U^{238}
0.0455	131.87	O_2
0.04262	53.41	Zr
0.02389	291.77	H_2O

- تحديد المقاطع المجهرية:

تعتمد المقاطع المجهرية على درجة الحرارة التي تقاس فيها هذه المقاطع، لذلك سوف نقوم بحساب درجة حرارة الغاز النتروني باستخدام العلاقة الآتية [3]:

$$T_n = \bar{T} \left[\frac{1+1.4 \sum a_{\bar{T}}}{\xi \sum s_{o}} \right] \quad (14)$$

حيث (\bar{T}) درجة الحرارة الوسطية للماء تساوي $(310^\circ C)$

$$\xi \sum s_{o} = \frac{1}{V_b} [\sum_i \xi_i \cdot n_i \cdot \sigma_{s,i} \cdot V_i] \quad (15)$$

$$V_b = 0.866(h')^2 \quad (16)$$

$$\sum a_{\bar{T}} = \sum a_{o} \cdot \sqrt{T_o / \bar{T}} \quad (17)$$

حيث (T_o) درجة حرارة الغرفة تساوي $(20^\circ C)$

$$\sum a_{o} = \frac{1}{V_b} \sum_i V_i \cdot n_i \cdot \sigma_{a,i} \quad (18)$$

يوضح الجدول (4) دلالات الرموز الواردة في تحديد المقاطع المجهرية

الجدول (4) دلالات الرموز الواردة في تحديد المقاطع المجهرية

الرمز	الدلالة
V_b	حجم الخلية الكبيرة
ξ	التناقص اللوغاريتمي للطاقة
$\xi \sum s_{o}$	قدرة التهدئة عند درجة حرارة الغرفة
$\sigma_{a,i}$	مقطع الامتصاص المجهرى لمادة i
$\sigma_{s,i}$	مقطع التبعثر المجهرى لمادة i
$\sum a_{o}$	مقطع الامتصاص الجهرى عند درجة حرارة الغرفة
i	مادة

يمثل الجدول (5) قيم المقاطع المجهرية والتناقص اللوغاريتمي للطاقة عند درجة حرارة الغرفة من أجل طاقة (0.025 eV).

الجدول (5) المقاطع المجهرية والتناقص اللوغاريتمي للطاقة عند درجة حرارة الغرفة من أجل طاقة (0.025 eV).

المادة	$\sigma_s(\text{barn})$	$\sigma_a(\text{barn})$	$\sigma_f(\text{barn})$	ξ
U^{235}	10	683	582	0.0084
U^{238}	8.35	2.71	-	0.0084
O	4.2	0.0002	-	0.12
Zr	8	0.189	-	0.0218
H_2O	69	0.664	-	0.948

بالتعويض في العلاقة (14) نجد درجة حرارة الغاز النتروني:

$$T_n = 694.146 \quad (\text{كلفن})$$

يمكن تحديد المقاطع المجهرية للامتصاص مع الأخذ بالحسبان تأثير حرارة الغاز النتروني باستخدام العلاقة الآتية [3]:

$$\sigma_{a,T} = \sigma_a \cdot \sqrt{(293/T_n)} \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot f_{1/\theta} \quad (19)$$

حيث $(f_{1/\theta})$: عامل يأخذ بالحسبان الانحراف عن القانون $1/\theta$

وحساب المقطع المجهرى لانشطار اليورانيوم (235) بالعلاقة الآتية [3]:

$$\sigma_{f,T}(U^{235}) = \sigma_f(U^{235}) \cdot \sqrt{(293/T_n)} \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot f_{1/\theta} \quad (20)$$

وُضعت نتائج حساب المقاطع المجهرية من أجل الطاقة (0.025 eV) في الجدول (6).
الجدول (6) المقاطع المجهرية من أجل الطاقة (0.025 eV).

المادة	U^{235}	U^{238}	O_2	Zr	H_2O	H_2
$\sigma_{a,T}(\text{barn})$	359.435	1.56	0.155	0.107	0.382	0.191
$\sigma_{f,T}(\text{barn})$	304.607	-	-	-	-	-

- تحديد المقاطع الجهرية:

تضمنت دراسة المقاطع الجهرية كلاً من المقاطع الجهرية للامتصاص والانتشار والانتقال [4,3].

1- تحديد مقاطع الامتصاص:

حُدِّدَت مقاطع الامتصاص لكل من الوقود والأوكسجين والهيدروجين والماء بالإضافة إلى الغلاف وإلى الخلية الواحدية. يُحدد مقطع الامتصاص للوقود من العلاقة الآتية:

$$\sum_{a.T}^{UO_2} = n\sigma_{a.T}(U^{235}) + n\sigma_{a.T}(U^{238}) + n_{O_2}\sigma_{a.T}^O \quad (21)$$

كما حُسب مقطع الامتصاص الجهري للأوكسجين بالعلاقة الآتية:

$$\sum_{a.T}^O = n_O \cdot \sigma_{a.T}^O \quad (22)$$

وحُسب مقطع الامتصاص الجهري للهيدروجين بالعلاقة:

$$\sum_{a.T}^{H_2} = n_{H_2} \cdot \sigma_{a.T}^H \quad (23)$$

يُحسب مقطع الامتصاص الجهري للماء بالعلاقة الآتية:

$$\sum_{a.T}^{H_2O} = n_{H_2O} \cdot \sigma_{a.T}^{H_2O} \quad (24)$$

ثم حددنا مقطع الامتصاص للغلاف بالعلاقة الآتية:

$$\sum_{a.T}^{Zr} = n_{Zr} \cdot \sigma_{a.T}^{Zr} \quad (25)$$

وأخيراً حُسب مقطع الامتصاص للخلية الواحدية بالعلاقة الآتية :

$$\sum_{a.T}^C = \sum_{a.T}^{UO_2} \cdot \frac{V_{UO_2}}{V_C} + \sum_{a.T}^{H_2O} \cdot \frac{V_1^{H_2O}}{V_C} + \sum_{a.T}^{Zr} \cdot \frac{V_{Zr}}{V_C} \quad (26)$$

حيث:

$$V_C = V_1^{H_2O} + V_{clad} + V_{UO_2} \quad (27)$$

2- المقاطع الجهرية للانتثار:

كذلك حُدِّدَت مقاطع الانتثار لكل من الوقود والأوكسجين والهيدروجين والماء بالإضافة إلى الغلاف وإلى الخلية الواحدية. حُدِّد مقطع الانتثار للوقود من العلاقة الآتية:

$$\sum_S^{UO_2} = n\sigma_S(U^{235}) + n\sigma_S(U^{238}) + n_{O_2}\sigma_S^O \quad (28)$$

كما حُدِّد مقطع الانتثار للأوكسجين والهيدروجين والماء من العلاقات (29) و(30) و(31):

$$\sum_S^O = n_{O_2} \cdot \sigma_S^O \quad (29)$$

$$\sum_S^{H_2} = n_H \cdot \sigma_S^H \quad (30)$$

$$\sum_S^{H_2O} = n_{H_2O} \cdot \sigma_S^{H_2O} \quad (31)$$

يُحسب مقطع الانتثار للغلاف من العلاقة (32):

$$\sum_S^{Zr} = n_{Zr} \cdot \sigma_S^{Zr} \quad (32)$$

وأخيراً حُسب مقطع الانتثار للخلية الواحدة من العلاقة (33):

$$\sum_S^C = \sum_S^{VO_2} \cdot \frac{V_{VO_2}}{V_C} + \sum_S^{H_2O} \cdot \frac{V_{H_2O}}{V_C} + \sum_S^{Zr} \cdot \frac{V_{Zr}}{V_C} \quad (33)$$

3- المقطع الجهري للانتقال:

هو عبارة عن مقلوب طول المسار الحر للنترون حتى التصادم. حُسب المقطع الجهري للانتقال في كل من الماء والغلاف والوقود والخلية الواحدة لحساب المقطع الجهري للانتقال في الماء قمنا بحساب المقطع الجهري للانتقال في كل من الأوكسجين والهيدروجين.

1- المقطع الجهري للانتقال في الأوكسجين:

حُسب المقطع الجهري للانتقال في الأوكسجين بالعلاقة الآتية:

$$\sum_{tr}^O = \sum_{a.T}^O + \sum_S^O \cdot (1 - \overline{\beta}_O) \quad (34)$$

حيث:

$$\overline{\beta}_O = \frac{2}{3 \cdot M_O} \quad (35)$$

2- المقطع الجهري للانتقال في الهيدروجين:

أمكن حساب المقطع الجهري للانتقال في الهيدروجين من العلاقة الآتية:

$$\sum_{tr}^{H_2} = \sum_{a.T}^{H_2} + \sum_S^{H_2} \cdot (1 - \overline{\beta}_H) \quad (36)$$

حيث:

$$\overline{\beta}_H = \frac{2}{3 \cdot M_H} \quad (37)$$

فيكون المقطع الجهري للانتقال في الماء:

$$\sum_{tr}^{H_2O} = \sum_{tr}^{H_2} + \sum_{tr}^O \quad (38)$$

ثم حددنا مقطع الانتقال للغلاف بالعلاقة الآتية:

$$\sum_{tr}^{Zr} = \sum_{a.T}^{Zr} + \sum_S^{Zr} \cdot (1 - \overline{\beta}_{Zr}) \quad (39)$$

حيث:

$$\overline{\beta}_{Zr} = \frac{2}{M_{Zr}} \quad (40)$$

فيما يتعلق بمقطع الانتقال للوقود يُحدد من العلاقة (41) الآتية:

$$\sum_{tr} u_{O_2} = n\sigma_{a,T}(U^{235}) + n\sigma_S(U^{235}) \cdot (1 - \bar{\beta}_S) + n\sigma_{a,T}(U^{238}) + n\sigma_S(U^{238}) \cdot (1 - \bar{\beta}_S) + \rho_{O_2} \cdot \sigma_{a,T}^O + \rho_{O_2} \cdot \sigma_S^O \cdot (1 - \bar{\beta}_O)$$

حيث:

$$\bar{\beta}_O = \frac{2}{3M_O} \quad (42)$$

$$\bar{\beta}_S = \frac{2}{3M_S} \quad (43)$$

وُضعت دلالات الرموز الواردة في حساب المقطع الجهري للانتقال في الجدول (7).

الجدول (7) دلالات الرموز الواردة في حساب المقطع الجهري للانتقال

الرمز	الدلالة
M_O	العدد الكتلّي للأوكسجين
M_H	العدد الكتلّي للهيدروجين
M_S	العدد الكتلّي لـ (U^{238})
M_S	العدد الكتلّي لـ (U^{235})
$\bar{\beta}_O$	متوسط التجب في الأوكسجين
$\bar{\beta}_H$	متوسط التجب في الهيدروجين
$\bar{\beta}_{Zr}$	متوسط التجب في الزركونيوم
$\bar{\beta}_S$	متوسط التجب في (U^{238})
$\bar{\beta}_S$	متوسط التجب في (U^{235})

وأخيراً حُسبَ مقطع الانتقال للخلية الواحدة من خلال العلاقة الآتية:

$$\sum_{tr}^C = \sum_{tr} u_{O_2} \cdot \frac{V_{UO_2}}{V_C} + \sum_{tr} H_2O \cdot \frac{V_1 H_2O}{V_C} + \sum_{tr} Zr \cdot \frac{V_{Zr}}{V_C} \quad (44)$$

يوضح الجدول (8) المقاطع الجهرية.

الجدول (8) المقاطع الجهرية

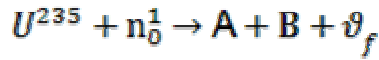
المصطلح	الوقود	الغلاف	الماء	الخلية الواحدة
مقطع الامتصاص (cm^{-1})	0.336	0.00454	0.009134	0.101
مقطع الانتثار (cm^{-1})	0.382	0.341	1.648	1.172
مقطع الانتقال (cm^{-1})	0.71	0.343	0.524	0.565

- معامل التضاعف الفعال K_{eff} :

لتحقيق شرط استمرارية التفاعل الذاتي المتسلسل ليس من الضروري أن يحدث كل نوترون ناتج عن عملية الانشطار عملية انشطار أخرى. الشرط الأصغري هو أن كل نواة منشطرة عليها أن تطلق نوترونات على الأقل يحدث عملية انشطار أخرى في نواة أخرى [1]. يُعبّر عن هذا الشرط بما يُسمى معامل التضاعف الفعال. وهو يتعلق بالمعاملات الآتية:

- 1- متوسط عدد نوترونات الانشطار
 - 2- معامل الانشطار السريع
 - 3- احتمالية الهروب من الامتصاص الرنيني
 - 4- معامل الإفادة من النوترونات الحرارية
 - 5- معامل المكوث الحراري والسريع
- A- متوسط عدد نوترونات الانشطار ϑ :

إنّ انشطار نواة U^{235} يُعطى بالمعادلة الآتية:



حيث:

A, B تمثل شظايا الانشطار. يُؤسر جزء من النوترونات من قبل U^{238} و U^{235} والجزء الباقي يحدث في U^{235} تفاعلات تنتج نوترونات جديدة. يُعرف متوسط عدد النوترونات الناتجة عن امتصاص نوترون من قبل U^{235} بالعلاقة الآتية [1,4]:

$$\vartheta = \vartheta_f \sum_f^{U^{235}} / \sum_{a,T}^{U^{235}} \quad (45)$$

حيث (ϑ_f) عدد النوترونات الثانوية الناتجة عن انشطار واحد لـ U^{235} ويساوي 2.43

$$\sum_f^{U^{235}} = \rho \cdot \sigma_{f,T}(U^{235}) \quad (46)$$

$\sum_f^{U^{235}}$: المقطع الجهري للانشطار (U^{235}) مع الأخذ بالحسبان درجة حرارة الغاز النوتروني.

B- معامل الانشطار السريع (Fast fission factor):

إنّ جزءاً من النوترونات السريعة يستطيع إحداث الانشطار في U^{238} كما يمكن للنوترونات السريعة أن تشطر U^{235} ولكن بنسبة قليلة. إنّ الانشطار السريع يحدث في مجال طاقي أكبر من 1MeV. كما أنّ النوترونات السريعة تحاول الهروب من مجال طاقي إلى آخر، وذلك لتفادي احتمالية أسرها ضمن المجال الرنيني لـ U^{238} . أو تبعثرها. يمكن تحديد معامل الانشطار السريع من العلاقة الآتية [3,4]:

$$\mu = 1 + \chi \cdot \frac{\theta_f^8 \cdot \Sigma_f^{U^{238}} - \Sigma_{a,T}^{U^{238}}}{\Sigma_t - (\chi \cdot \theta_f^8 \cdot \Sigma_f^{U^{238}} + \Sigma_s)} \quad (47)$$

حُسبت المقاطع الجهرية في مجال طاقي أكبر من 1MeV.

$$\Sigma_t = \Sigma_{a,T}^{U^{238}} + \Sigma_f^{U^{238}} + \Sigma_R^{U^{238}} + \Sigma_s + \Sigma_{a,T}^{U^{235}} + \Sigma_f^{U^{235}} + \Sigma_R^{U^{235}} \quad (48)$$

$$\Sigma_s = \Sigma_s^{U^{238}} + \Sigma_s^{U^{235}}$$

$$\theta_f^8 = 2.73$$

وقيمة الثابت χ تساوي: $\chi = 0.5$

$$p = \frac{d \cdot \Sigma_t}{d \cdot \Sigma_t + 1.16} \quad (49)$$

يبين الجدول (9) دلالات الرموز المستخدمة في حساب معامل الانتشار السريع

الجدول (9) دلالات الرموز المستخدمة في حساب معامل الانتشار السريع

الرمز	الدلالة
σ_R	مقطع الهروب من مجال طاقي إلى آخر
θ_f^8	عدد النترونات الثانوية الناتجة عن انشطار واحد لـ U^{238}
Σ_t	المقطع الجهري الكلي
p	احتمال بقاء النترون ضمن القضيب
Σ_s	مقطع التبعثر الكلي

C- احتمالية الهروب من الامتصاص الرنيني:

إذا لم تُحدث النترونات السريعة انشطارات سريعة، فإنها سوف تصطدم بذرّات المهديّ والمواد التركيبية مما يؤدي إلى فقدانها جزءاً من الطاقة في كل تصادم؛ مما يزيد من احتمالية أسرها ضمن المجال الرنيني لـ U^{238} . حُسبت احتمالية تجاوز الامتصاص الرنيني بالعلاقة الآتية [3،4]:

$$\phi = \exp\left(-\frac{p \nu \sigma_{O_2} \times V_{UO_2} \times I_{eff}}{(\xi \Sigma_s)_{H_2O} \times V_{H_2O}}\right) \quad (50)$$

حيث:

$$I_{eff} = 5.55 + 26.6 \sqrt{\frac{F}{M_{UO_2}}} \quad (51)$$

$$F = \pi \times d \times H_0 \quad (52)$$

$$M_{UO_2} = \gamma_{UO_2} \times H_0 \times \frac{\pi d^2}{4} \quad (53)$$

يُوضح الجدول (10) دلالات الرموز ووحداتها الواردة في حساب احتمالية الهروب من الامتصاص الرنيني

الجدول (10) دلالات الرموز ووحداتها الواردة في حساب احتمالية الهروب من الامتصاص الرنيني

الرمز	الوحدة	الدلالة
I_{eff}	(barn)	التكامل الرنيني
F	(cm^2)	مساحة السطح الجانبي لقضيب الوقود
M_{UO_2}	(gr)	كتلة الوقود في قضيب الوقود
$(\xi \Sigma_s)^{H_2O}$	(cm^{-1})	قدرة التهذئة في الماء

D - معامل الاستفادة من النيوترونات الحرارية (Utilization factor of thermal neutrons)

يكون مصير النيوترونات الحرارية التي لم تنفلت من قبل مواد المفاعل الامتصاص من قبل الوقود والمهدئ وعناصر التحكم، يُحسب معامل الاستفادة الحراري بالعلاقة الآتية [3،4]:

$$\theta = \frac{1}{1 + \frac{\Sigma_{aT}^{H_2O} v_{H_2O} \phi_{H_2O}}{\Sigma_{aT}^c v_c} \cdot \frac{\phi_{H_2O}}{\phi_{rod}}} \times \frac{\Sigma_{aT}^{UO_2} v_{UO_2}}{\Sigma_{aT}^c v_c} \quad (54)$$

حيث:

$\left(\frac{\phi_{H_2O}}{\phi_{rod}}\right)$: متوسط التدفقات النيوترونية يُعطى بالعلاقة الآتية [3،4]:

$$\frac{\phi_{H_2O}}{\phi_{rod}} = \frac{\left[\left(\frac{1}{\Sigma_{aT}^{H_2O} - 2C_1 b R_C} \right) / (x_{H_2O}) (R_b^2 - R_C^2) \right]}{2A_1 \sqrt{R_C} x_C L_1 (R_C x_C) + \frac{(\xi \Sigma_s^c)}{(\xi \Sigma_s)^{H_2O}} \cdot \frac{1}{\Sigma_{aT}^c}} \quad (55)$$

: ثوابت تُعطى بالعلاقات الآتية [3،4]: C_1, A_1, b, a_0

$$C_1 = \frac{\left(\frac{1}{\Sigma a_T H_2 O} - \frac{(\xi \Sigma S^C)}{(\xi \Sigma S) H_2 O} \cdot \frac{1}{\Sigma a_T^C} \right)}{\frac{D_{H_2 O} x_{H_2 O} - I_0 (R_C x_C) b}{D_C x_C} - \frac{I_1 (x_C R_C) a_0}{I_1 (x_C R_C)}} \quad (56)$$

$$b = I_1 (x_{H_2 O} \cdot R_C) - \frac{I_1 (x_{H_2 O} \cdot R_b)}{K_1 (x_{H_2 O} \cdot R_b)} \cdot K_1 (x_{H_2 O} \cdot R_C) \quad (57)$$

$$a_0 = I_0 (x_{H_2 O} \cdot R_C) + \frac{I_1 (x_{H_2 O} \cdot R_b)}{K_1 (x_{H_2 O} \cdot R_b)} \cdot K_0 (x_{H_2 O} \cdot R_C) \quad (58)$$

$$A_1 = \frac{\frac{1}{\Sigma a_T H_2 O} - \frac{(\xi \Sigma S^C)}{(\xi \Sigma S) H_2 O} \cdot \frac{1}{\Sigma a_T^C}}{\frac{D_C x_C}{I_0 (R_C x_C) - \frac{D_{H_2 O} x_{H_2 O} - I_1 (R_C x_C) a_0}{I_1 (R_C x_C)}}} \quad (59)$$

يُبين الجدول (11) دلالات الرموز الواردة في حساب الثوابت C_1, A_1, b, a_0

الجدول (11) دلالات الرموز الواردة في حساب الثوابت C_1, A_1, b, a_0

الرمز	الدلالة
I_0	تابع ببسل من النوع I
I_1	تابع ببسل من النوع I
K_0	تابع ببسل من النوع K
K_1	تابع ببسل من النوع K

أما قيمة نصف القطر المكافئ للخلية الواحدية (R_C) فيُعطى بالعلاقة الآتية [3,4]:

$$R_C = \sqrt{\frac{v_C}{\pi}} \quad (60)$$

ونصف القطر المكافئ للخلية الكبيرة (R_b) يُعطى بالعلاقة الآتية [3,4]:

$$R_b = \sqrt{\frac{v_b}{\pi}} \quad (61)$$

بينما مقلوب طول الانتثار في الماء (x_{H_2O}) والخلية الواحديّة (x^c) يعطيان بالعلاقتين الآتيتين [3، 4]:

$$x_{H_2O} = \frac{1}{L_{H_2O}} \quad (62)$$

$$x^c = \frac{1}{L^c} \quad (63)$$

ومعاملا الانتثار في الماء (D_{H_2O}) والخلية الواحديّة (D^c) يعطيان بالعلاقتين الآتيتين [3، 4]:

$$D_{H_2O} = \frac{1}{3\Sigma_{tr}^{H_2O}} \quad (64)$$

$$D^c = \frac{1}{\Sigma_{tr}^c} \quad (65)$$

إن طول الانتثار في الماء (L_{H_2O}) وطول الانتثار في الخلية الواحديّة (L^c) يعطيان بالعلاقتين الآتيتين [3، 4]:

$$L_{H_2O} = \frac{1}{\sqrt{3\Sigma_{tr}^{H_2O} \cdot \Sigma_{aT}^{H_2O}}} \quad (66)$$

$$L^c = \frac{1}{\sqrt{3\Sigma_{tr}^c \cdot \Sigma_{aT}^c}} \quad (67)$$

E - معامل المكوث الحراري والسريع:

يهرب جزء من النترونات السريعة من المفاعل في أثناء التهدئة. إن عدد النترونات المتبقي في المفاعل - بالطبع - هو أقل من عدد نترونات الانشطار السريعة، كما أن النترونات الحرارية تتبعثر غالباً في المفاعل، وجزء منها يتسرب خارج المفاعل ويعدّ بذلك فقداً بالنسبة إلى التفاعل المتسلسل. يُعطى معامل المكوث الحراري والسريع بالعلاقة الآتية [1،3،4]:

$$P = \left(\frac{e^{-x^2 \times Z}}{1+x^2 \times L^c{}^2} \right) \quad (68)$$

حيث (Z): عمر جيل النترونات في القلب ويُعطى بالعلاقة الآتية [1،3،4]:

$$Z = \frac{Z_{H_2O} \times \left(1 + \sum \frac{s_k}{s_{H_2O}}\right)}{\left(\rho_{H_2O} + \sum x_k \times \frac{s_k}{s_{H_2O}}\right)^2} \quad (69)$$

إنَّ قيمة X_k تساوي 0.3

$$\sum \frac{s_k}{s_{H_2O}} = \frac{V_{UO_2}}{V_{H_2O}} + \frac{V_{Zr}}{V_{H_2O}} \quad (70)$$

$$X^2 = \left[\frac{\pi}{H_0 + 2 \times \delta}\right]^2 + \left[\frac{2.405}{R_{core} + \delta}\right]^2 \quad (71)$$

يوضح الجدول (12) قيم الرموز ودلالاتها الواردة في حساب معامل المكوث الحراري والسريع.

الجدول (12) قيم الرموز ودلالاتها الواردة في حساب معامل المكوث الحراري والسريع

القيمة	الرمز	المصطلح
367.9 (cm)	H_0	ارتفاع القلب
12.3 (cm)	δ	السماكة الإضافية لقطر المفاعل
31 (cm ²)	Z_{H_2O}	عمر جيل النيوترونات في المهدئ
158.5 (cm)	R_{core}	نصف قطر قلب المفاعل

وبالنهاية يمكن حساب معامل التضاعف الفعال بالعلاقة الآتية [1,3,4]:

$$K_{eff} = K_{\infty} \times P \quad (72)$$

حيث يُعطى معامل التضاعف اللانهائي بالعلاقة الآتية [1,3,4]:

$$K_{\infty} = \theta \varphi \mu \quad (73)$$

B- الكود GETERA:

يُستخدم الكود الروسي [5] GETERA لإجراء الحسابات النيوترونية للخلايا الأحادية أو مجموعة الخلايا المكونة للمفاعل. يجب وصف أنصاف أقطار الخلايا والمواد المكونة لها كماً ونوعاً ودرجات الحرارة أعدّ ملف دخل للكود تضمن أنصاف أقطار الخلايا. يوضح الجدول (13) أنصاف أقطار مكونات المفاعل.

الجدول (13) أنصاف أقطار مكونات المفاعل

القيمة	الرمز	المصطلح
3.86(mm)	r_1	نصف قطر الوقود
4.58 (mm)	r_2	نصف قطر الغلاف
6.8 (mm)	r_3	نصف قطر الماء

كما يتضمن ملف الدخل التراكيز الذرية ودرجة حرارة الغاز النتروني، ثم نقوم بتشغيل الكود فنحصل على ملف الخرج الذي يتضمن معامل التضاعف الفعال ومعاملاته.

مقارنة النتائج:

قُورنت نتائج البحث وفق الطريقتين من خلال الجدول (14).

الجدول (14) مقارنة نتائج البحث وفق الطريقتين

المعامل	الطريقة التحليلية	الكود GETERA
β	1.806	1.840
μ	1.006	1.237
φ	0.85	0.94
θ	0.886	0.629
P	0.982	1
K_{eff}	1.3440	1.3477

من الجدول (14) نستنتج أن المفاعل في الحالة فوق الحرجة، وهذا يتوافق مع مستوى الأمان العالي للمفاعل VVER-640، كما نلاحظ وجود تقارب كبير في النتائج بين الطريقتين، والاختلاف البسيط يعود إلى طريقة نمذجة الخلية الواحدة للمفاعل، إذ اعتمد وفق الطريقة التحليلية على النموذج غير المتجانس مع الأخذ بالحسبان الماء بين عناصر الوقود وهروب النترونات من المفاعل، في حين يعتبر الكود GETERA أن الخلية الواحدة المؤلفة للمفاعل متجانسة كلياً والمفاعل لانهائي الأبعاد ولم يأخذ بالحسبان التسرب النتروني من المفاعل لأنه مخصص لحساب الخلايا الواحدة. من هذه المقارنة يمكن القول: إن النتائج التي تم التوصل إليها وفق الطريقة التحليلية دقيقة. ويمكن حساب معامل التضاعف الفعال لهذا المفاعل باستخدام كودات ثلاثية الأبعاد التي تتطلب جهداً ووقتاً كبيراً.

المراجع REFERENCES

- 1- الأشهب، مطاوع. (1991). هندسة المفاعلات (1+2). جامعة دمشق.
- 2- الظواهرة، سعدو. (2006). استخدام المواد الماصة للنترونات في المفاعلات من النوع VVER. موسكو.
- 3- Dementev.V.A.Book.. (1990). Nuclear power reactors. Moscow.
- 4- بات .غ. أ. (1982). أساسيات نظرية وطرق حساب مفاعلات الطاقة النووية. (مرجع روسي).
- 5- Belousov N, Bichkov S, Marchuk Y. *at al.* Models and Capabilities. (1992). The code GETERA for cell and poly cell calculation. In: Proceedings of the 1992. Topical Meeting on Advances in Reactor physics. Charleston, SC, USA, 8-11March, 1992, v.2, p.516-523.