

## Calculate of the amounts of radioactive gases ( $^{85}\text{Kr}$ , $^{135}\text{Xe}$ ) in PWR

### حساب كميات الغازات المشعة ( $^{135}\text{Xe}$ , $^{85}\text{Kr}$ ) في مفاعلات الماء المضغوط

حيدر محمد طالب  
جامعة الكوفة-كلية التربية للبنات  
abuteba\_80@yahoo.com

أ.م.د. نجم عبد عسكوري  
جامعة الكوفة-كلية التربية للبنات  
na\_phys@yahoo.com

أ.د. علي خلف حسن  
جامعة الكوفة-كلية التربية للبنات  
alikh\_hasan@yahoo.com  
بحث مسجل

#### الخلاصة

إن عملية انشطار نواة اليورانيوم  $^{235}\text{U}$  تولد نواتج الانشطار. تعد الغازات المشعة ( $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{135}\text{Xe}$ )، نواتج انشطار مهمة، بسبب مخاطرها على سلامة المفاعل والبيئة. إن كميات الغازات المشعة المتولدة تعتمد على حصيلية انشطار نواة ( $^{235}\text{U}$ )، ومعدل الانشطار داخل الوقود النووي، ويعد ثاني أكسيد اليورانيوم السيراميكي  $\text{UO}_2$  الوقود الأوسع استخداماً في مفاعلات الماء المضغوط (PWR). تمت الحسابات باستخدام برنامج (MATLAB R2011b)، إذ تم حساب تأثير القدرة الحرارية، فيض النيوترونات، ودرجة حرارة المبرد. وقد وجد أن كميات غازات الانشطار المشعة المتولدة تزداد بزيادة القدرة الحرارية وفيض النيوترونات، لكن ما يخص درجة حرارة المبرد فقد وجد أن زيادتها يؤدي إلى تناقص الكميات المتولدة بسبب تناقص معدل الانشطار.

#### Abstract

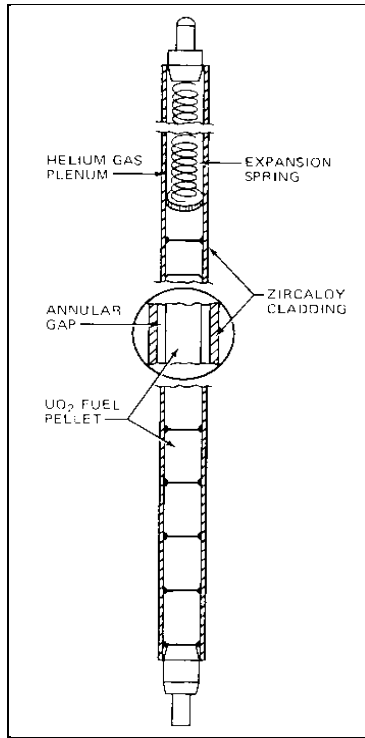
The fission process of uranium-235 nucleus, produce radioactive fission gases such as ( $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{135}\text{Xe}$ ) as the most important products. The risks of these products on the reactor safety and the environment are important the quantities of these radioactive gases depend on the fission rate inside the nuclear fuel; ie, on their yields in fission products. Uranium dioxide ceramics  $\text{UO}_2$  are widely used in pressurized water reactors (PWR). The calculations were obtained need by using (MATLAB R2011b), through calculating the effects of thermal power, neutrons flux, cooling water temperature. It was found that the quantities of radioactive gases produced increased with thermal power and neutrons flux. With the increase of coolant temperature led to decrease of the amounts of radioactive gases .

#### 1- المقدمة Introduction

يعد وقود ( $\text{UO}_2$ ) الوقود النووي (nuclear fuel) الأكثر استخداماً في المفاعلات النووية. إذ يتميز باستقرارية جيدة، مقاومة كبيرة للإشعاع، نقطة انصهار عالية، كما يعد وقوداً خاملاً عند تفاعله مع الماء الساخن، لذا يستخدم في المفاعلات المبردة بالماء كمفاعل (PWR) [1]. يتم تصنيع وقود ( $\text{UO}_2$ ) بمعاملة سادس فلوريد اليورانيوم  $\text{UF}_6$  لإنتاج مسحوق  $\text{UO}_2$ ، ثم يتم كبسه بالضغط البارد (cold pressing) على شكل أقراص (pellets) اسطوانية تلبد (sintered) في جو من غاز خامل عند (1700) °C [2]. تغلف الأقراص بغلاف (cladding) من سبيكة الزركانيوم (Zircaloy-4) المعروف بمقاومته للتآكل، وقدرته على حبس نواتج الانشطار الغازية. يترك بين أقراص الوقود والغلاف فجوة يتم مملأها بغاز الهيليوم. عندئذ يكون لدينا قضيب الوقود (fuel rod) المبين في الشكل (1) [3,4]. في الانشطار النووي يصطدم نيوترون حراري بنواة اليورانيوم ( $^{235}\text{U}$ ) لتتكون نواة مركبة (compound nucleus). تنتشر النواة المركبة إلى نوى أصغر هي نواتج الانشطار (fission products)، مع الإفراج عن طاقة (200 MeV)، و(2-3) من النيوترونات [5]. لقد قام العديد من الباحثين بدراسة تولد نواتج الانشطار الغازية المشعة، بسبب تأثيرها الكبير على سلامة المفاعل النووي والبيئة. فقام الباحثان Noboru و Jinzaburo بحساب توزيع نواتج الانشطار المشعة في وقود ( $\text{UO}_2$ ) [6]. كما قام الباحث Takeshi ومجموعته بدراسة انطلاق غاز الانشطار ( $\text{Xe}$ ) بواسطة انحلال اليود بعد حوالي (20 min) على تشيع وقود ( $\text{UO}_2$ ) [7]. أما Koo و Sohn فقد قاما بحساب كمية نواتج الانشطار الغازية الغير مستقرة المتحررة من قضبان الوقود إلى مبرد مفاعل (PWR) [8]. الباحث Shanshoury أعد دراسة حول تأثير شظايا الانشطار على خصائص وقود ( $\text{UO}_2$ ) في مفاعل (PWR) [9]. كما أجرى Son دراسة لحساب كمية النواتج المتراكمة بعد عملية الانشطار نتيجة الإنتاج والانحلال [10]. وفي البحث الحالي تم حساب كميات الغازات ( $^{135}\text{Xe}$ ,  $^{85}\text{Kr}$ ) المشعة المتولدة في مفاعلات القدرة نوع الماء المضغوط خلال عملية انشطار وقود  $\text{UO}_2$ ، من خلال حساب تأثير القدرة الحرارية، الفيض النيوتروني، ودرجة حرارة المبرد، على معدل الانشطار. كذلك حساب معدل تغير تركيز غاز ( $^{135}\text{Xe}$ ) بسبب عملية الانحلال التي يمر بها.

## 2- الجزء النظري Theoretical part

إن الوحدة الأساسية لقلب مفاعل (PWR) هي قلم الوقود  $UO_2$ ، الذي أدرجت بعض خصائصه في الجدول (2). تجمع أقلام الوقود بشكل حزم لتشكل ما يعرف بأعمدة التحكم (control rods)، التي تكون بشكل مصفوفات  $(17 \times 17)$ ، يحتوي القلب ما يقارب (200) من الحزم [11]. إن وظيفة أعمدة التحكم هي السيطرة على التفاعل المتسلسل، إذ تصنع من مادة ماصة للنيوترونات. ويحاط قلب المفاعل و أعمدة التحكم وأجهزة السيطرة بوعاء الضغط [12]. إن عملية انشطار الوقود النووي داخل المفاعل تنتج (2-3) من النيوترونات ونواتج الانشطار (fission products)، بعض نواتج الانشطار يكون مشع مما يسبب مشاكل للعاملين والبيئة المحيطة بالمفاعل، كما أن بعضها يعمل على امتصاص النيوترونات مما يؤثر على استمرارية التفاعل الانشطاري المتسلسل، لذا للمحافظة على دوام التفاعل المتسلسل يجب أن يكون هناك نيوترون واحد محفوظ يعمل على الاصطدام بنواة جديدة ناتجة [13]. خلال عمل المفاعل تتولد حرارة كبيرة يتم التعامل معها من خلال منظومة التبريد التي تتألف من دائرتين، يتدفق الماء في دائرة التبريد الابتدائية عبر وعاء الضغط إلى قلب المفاعل بدرجة حرارة تساوي تقريباً  $(315^\circ C)$ ، لكنه لا يتحول إلى بخار بسبب الضغط العالي الذي يصل إلى (15 MPa). ينتقل الماء الساخن من القلب إلى دائرة التبريد الثانوية لإنتاج البخار عند ضغط (6.2 MPa) فتنتقل حرارة ماء الدائرة الابتدائية إلى ماء التبريد في الدائرة الثانوية [14]. إن إنتاج القدرة الحرارية وارتفاع معدل الفيض النيوتروني ودرجة حرارة المبرد أثناء عمل المفاعل يؤدي إلى تغيير كمية نواتج الانشطار المتولدة.



الشكل (1) قضيب الوقود [2]

## 3- الحسابات والنتائج Calculation and Results

### 1-3 معدل الانشطار Fission Rate

إن معدل الانشطار  $F$  (fission rate) يمثل عدد الإنشطارات التي تحدث للوقود النووي ( $UO_2$ ) داخل المفاعل [1]. وهناك ثلاث مؤثرات أساسية تؤثر على حساب معدل الانشطار هي: قدرة المفاعل ( $P$ )، الفيض النيوتروني ( $\Phi$ )، ودرجة حرارة المبرد ( $T_b$ ). لذا سيتم حساب معدل الانشطار بالاعتماد على هذه المؤثرات.

### 1-1-3 تأثير القدرة الحرارية Effect of Thermal Power

إن كل عملية انشطار لوقود ( $UO_2$ ) تنتج طاقة مقدارها (200 MeV)، و عند قدرة حرارية تساوي (1 W) يمكن حساب معدل الانشطار بتطبيق العلاقة الآتية [15،2]:

$$F = \frac{P}{E} \dots\dots\dots(1)$$

$F$  (fission/sec) معدل الانشطار خلال الثانية الواحدة،  $P$  (W) القدرة الحرارية المتولدة في المفاعل،  $E$  طاقة الانشطار الناتجة والتي تساوي (200 MeV). خلال قدرة (1 W) فإن قيمة  $F$  ستكون كالآتي [16].

$$F = \frac{1 \text{ (J/sec)}}{1.6022 \times 10^{-13} \text{ (J/MeV)} \times 200 \text{ (MeV/fission)}} \dots\dots\dots(2)$$

إن عدد الانشطارات المتولدة يساوي  $(3.12 \times 10^{10} \text{ fission/s})$  وهو معدل الانشطار المطلوب لإنتاج (1 watt) من القدرة الحرارية. ولحساب معدل الانشطار عند تغير القدرة توضع المعادلة (1-3) بالصورة الآتية [2،15]:

$$F = 3.12 \times 10^{10} \times P \dots\dots\dots(3)$$

### 2-1-3 تأثير فيض النيوترونات Effect of Neutrons Flux

لحساب معدل الانشطار بتغير فيض النيوترونات داخل مفاعل حجمه  $V \text{ (m}^3\text{)}$ ، بثبات المقطع العرضي للانشطار  $\sigma_f \text{ (cm}^2\text{)}$ ، وعدد النوى خلال وحدة الحجم  $NV \text{ (nuclei)}$ ، نطبق العلاقة الآتية [5،1]:

$$F = NV \sigma_f \emptyset \dots\dots\dots(4)$$

و في قلب مفاعل يعمل بقدرة  $P \text{ (W)}$ ، يمكن حساب الفيض النيوتروني من العلاقة الآتية [2]:

$$\emptyset = \frac{P}{NV E \sigma_f} \dots\dots\dots(5)$$

إن  $P \text{ (W)}$  تمثل قدرة المفاعل، و  $NV \text{ (nuclei)}$  عدد نوى الوقود المنشطرة وتحسب من العلاقة الآتية [2،1]:

$$NV = \frac{w N_A}{235 \times 10^{-3}} \dots\dots\dots(6)$$

إذ يمثل  $N_A$  عدد أفوكادرو  $(6.023 \times 10^{23})$ ، و  $w$  كتلة  $^{235}\text{U}$  في قلب المفاعل وتساوي

$$w = m (UO_2) (235/267) y \dots\dots\dots(7)$$

إن  $m \text{ (} UO_2\text{)}$  هي كتلة الوقود في قلب المفاعل وتبلغ  $(100 \text{ ton})$ ، و  $y$  نسبة تخصيب الوقود وتبلغ عند قلب المفاعل  $(0.03)$ ، وبذلك تكون قيمة  $NV$  هي  $(6.767 \times 10^{27} \text{ nuclei})$ . إن الفيض النيوتروني عند أقصى قدرة يعمل بها المفاعل  $(3000 \text{ MW})$  يتغير بتغير نسبة التخصيب لـ  $^{235}\text{U}$  [2].

### 3-1-3 تأثير حرارة المبرد Effect of Coolant Temperature

إن تغير درجة حرارة المبرد يؤثر على كثافة المبرد والمقطع العرضي المجهري للانشطار. إذ أن زيادتها يؤدي إلى تناقص المقطع العرضي للانشطار بسبب زيادة طاقة النيوترونات الحرارية. لذا فإن قيمته المصححة عند درجة الحرارة الجديدة تحسب من العلاقة الآتية [17]:

$$\sigma_f = \sigma_0 \left(\frac{t_0}{T_b}\right)^{1/2} \dots\dots\dots(8)$$

إن  $\sigma_f$  المقطع العرضي للانشطار،  $\sigma_0$  المقطع العرضي المجهري عند درجة حرارة الغرفة،  $t_0$  درجة حرارة الغرفة  $(20^\circ\text{C})$  أي  $(293 \text{ K})$ ، أما  $T_b$  فتتمثل درجة حرارة المبرد والتي تساوي  $(310^\circ\text{C})$   $(583 \text{ K})$ . إن معدل الانشطار سيتغير بتغير درجة حرارة المبرد أيضاً. وكما هو موضح في العلاقة الآتية:

$$F = NV \sigma_0 \left(\frac{t_0}{T_b}\right)^{1/2} \emptyset \dots\dots\dots(9)$$

### 2-3 حساب كميات الغازات المشعة Calculate of the Gases Radioactive Amounts

إن عدد ذرات  $N_i \text{ (atoms/sec)}$  الغازات المشعة الناتجة من انشطار الوقود في المفاعل النووي تعتمد على معدل الانشطار  $F \text{ (fission/sec)}$  للثانية الواحدة داخل الوقود، والحصيلة الانشطارية  $Y_i \text{ (atom/fission)}$  لنواة اليورانيوم  $(^{235}\text{U})$  والمدرجة في الجدول (1)، وكما في العلاقة الآتية [15]:

$$N_i = F \times Y_i \dots\dots\dots(10)$$

لذا فإن عملية حساب عدد ذرات غازات الانشطار المشعة المتولدة في الوقود النووي يمكن حسابها من خلال التأثيرات الثلاث أعلاه وكما يأتي:

i. حساب عدد ذرات غازات الانشطار المشعة بدلالة تأثير القدرة الحرارية، عند زمن  $t$  (sec) من تشغيل المفاعل، كما في العلاقة الآتية [18،16،15]:

$$N_i = 3.12 \times 10^{10} \times P \times Y_i \times t \dots\dots\dots(11)$$

ii. حساب عدد ذرات غازات الانشطار المشعة بدلالة تأثير فيض النيوترونات الحرارية، عند زمن  $t$  (sec) من تشغيل المفاعل، كما في العلاقة الآتية [20،19]:

$$N_i = NV \sigma_f \phi Y_i t \dots\dots\dots(12)$$

iii. حساب عدد ذرات غازات الانشطار المشعة بدلالة تأثير درجة حرارة المبرد، عند زمن  $t$  (sec) من تشغيل المفاعل، كما في العلاقة الآتية:

$$N_i = NV \sigma_0 \left(\frac{t_0}{T_b}\right)^{1/2} \phi Y_i t \dots\dots\dots(13)$$

ولحساب عدد المولات لغازات الانشطار المشعة ولفترات تشغيلية مختلفة من عمل المفاعل نطبق العلاقة الآتية [16]:

$$M_i = N_i / N_A \dots\dots\dots(14)$$

إذ تمثل  $M_i$  عدد مولات الغازات الناتجة، و  $N_A$  عدد أفوكادرو (Avogadro Number).

### 3-3 تغيير تركيز غازات الانشطار Change in the Concentration of Fission Gases

إن الحسابات السابقة كانت على أساس حساب كميات غازات الانشطار المشعة المتراكمة التي تتولد خلال زمن تشغيل المفاعل. لكن، كما هو معلوم فإن بعد فترة من تشغيل المفاعل بعض نواتج الانشطار ستبدأ بالانحلال بسبب عمر النصف القصير، لذا فإن تركيزها سيتغير، ويمكن حساب معدل تغير عدد ذرات الغازات المشعة بعد فترة من تشغيل المفاعل عند تغير القدرة الحرارية من العلاقة الآتية [15]:

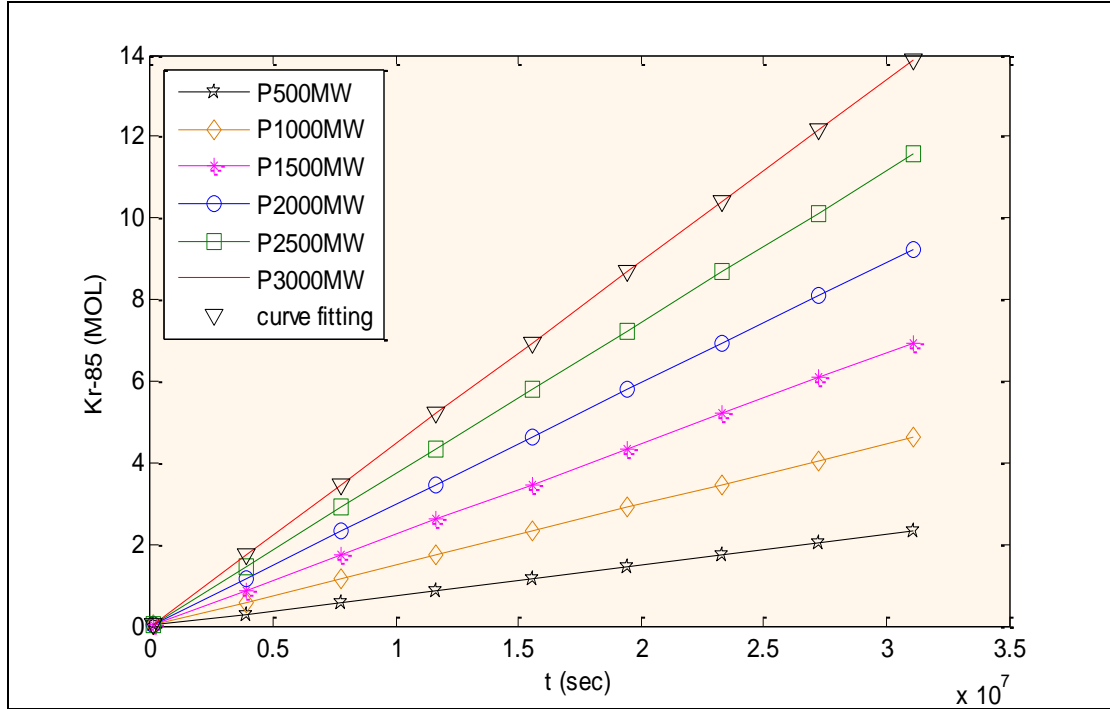
$$N_i(t) = \frac{3.12 \times 10^{10} \times P \times Y_i}{\lambda_i} (1 - e^{-\lambda_i t}) \dots\dots\dots(15)$$

الجدول (1) عمر النصف للغازات المشعة و الحصيلة الانشطارية لنواة  $^{235}\text{U}$  [21].

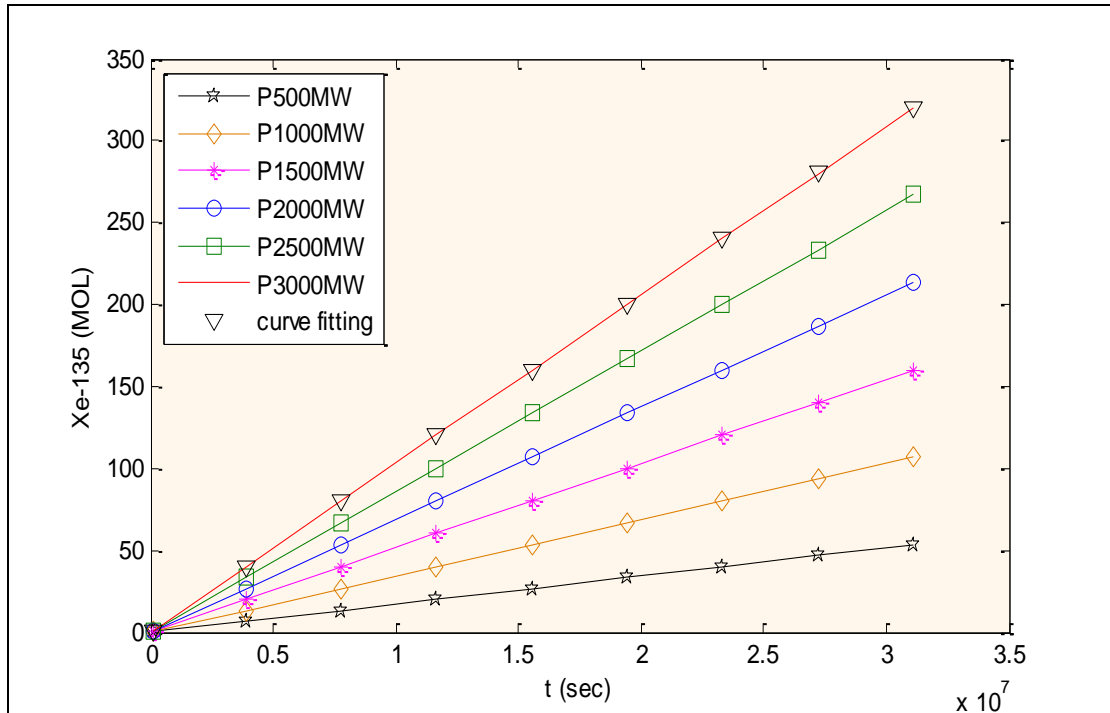
Nuclide	Half-life	Units	Cumulative fission yields (%)
36-Kr-85	10.752	year	0.286
54-Xe-135	9.14	hour	6.61

الجدول (2) بعض أهم خصائص وقود  $(\text{UO}_2)$  الفيزيائية عند  $25^\circ\text{C}$  [2].

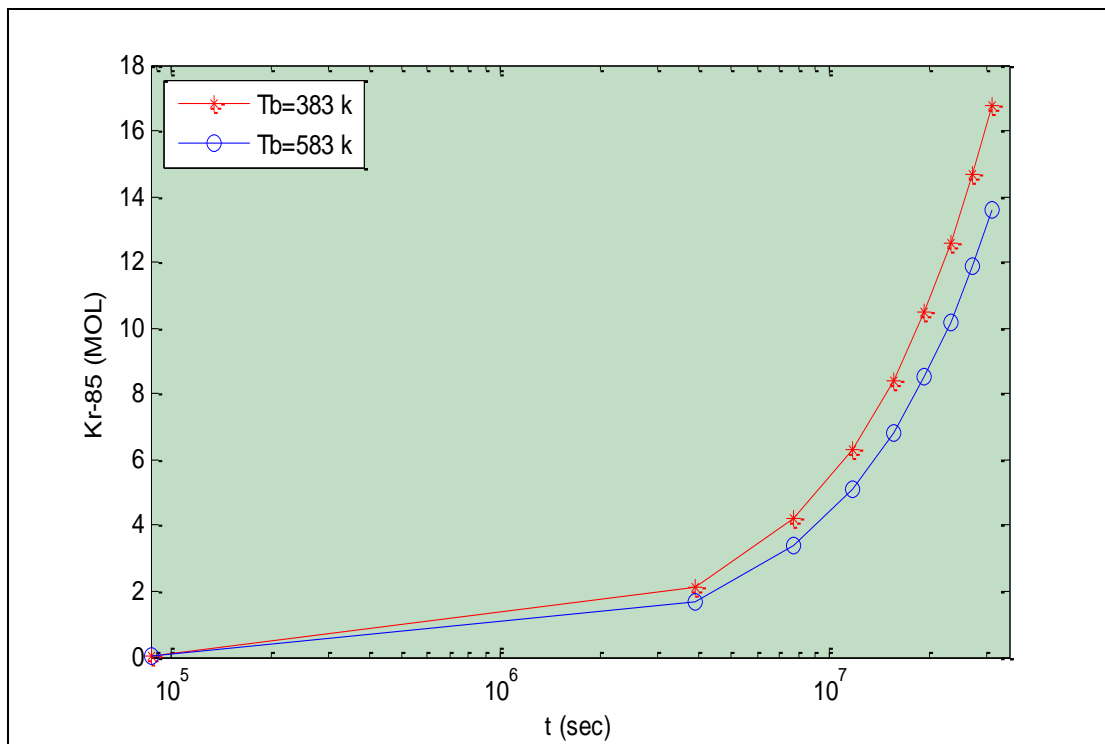
Property	Value
Crystal structure	FCC
Theoretical Density ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	10970
Melting point $^\circ\text{C}$	2865
Thermal Conductivity ( $\text{W}/\text{m}\cdot^\circ\text{K}$ )	8.68
Molecular mass (amu)	270.3



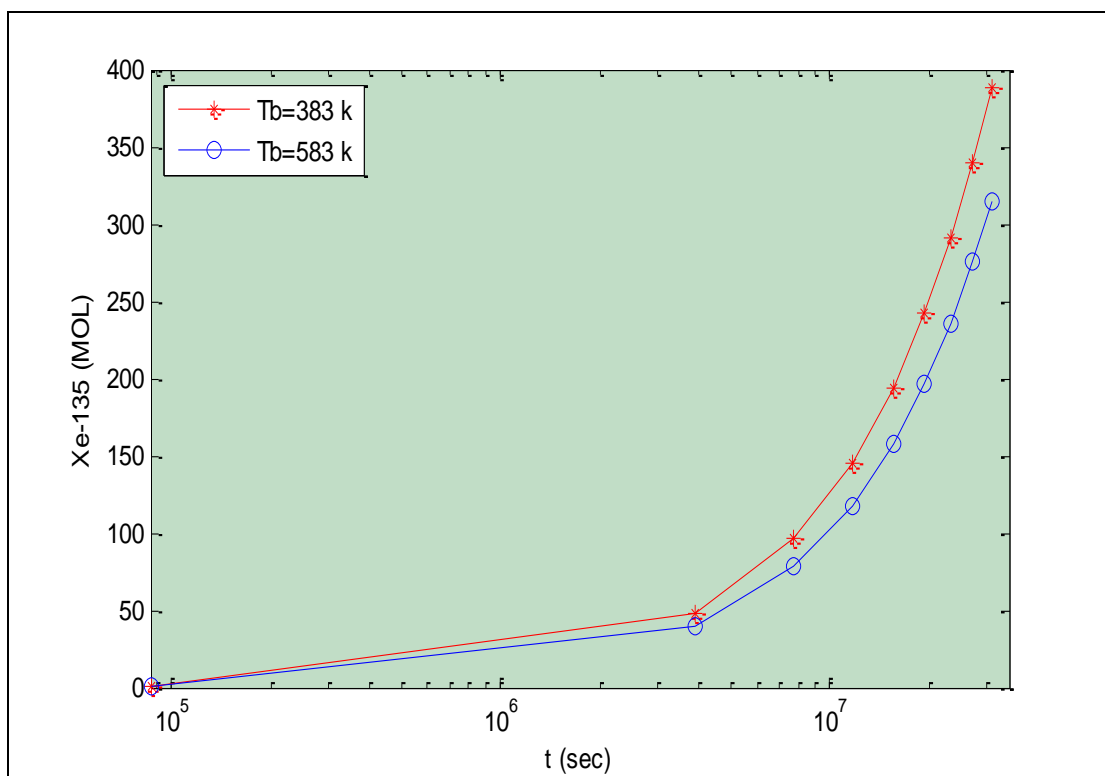
الشكل (2) كميات ( $^{85}\text{Kr}$ ) المتولدة من عملية انشطار الوقود عند تغير قدرة المفاعل، وفيض النيوترونات.



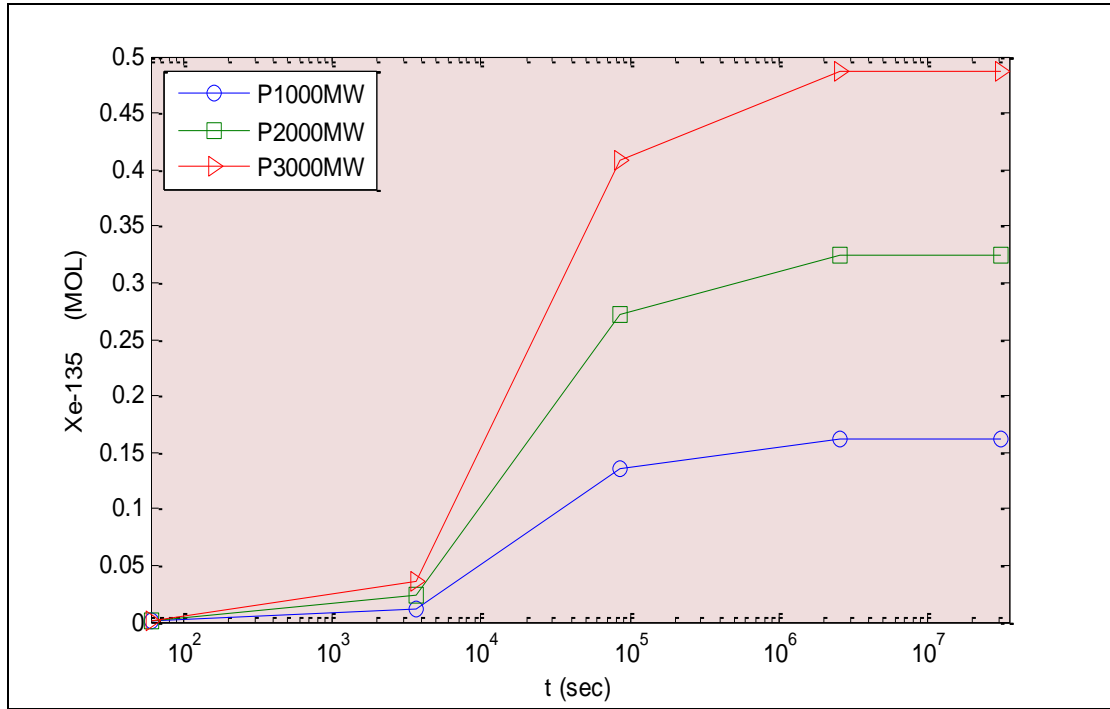
الشكل (3) كميات ( $^{135}\text{Xe}$ ) المتولدة من عملية انشطار الوقود عند تغير قدرة المفاعل، وفيض النيوترونات.



الشكل (4) تأثير درجة حرارة المبرد على كميات ( $^{85}\text{Kr}$ ) المتولدة من عملية الانشطار.



الشكل (5) تأثير درجة حرارة المبرد على كميات ( $^{135}\text{Xe}$ ) المتولدة من عملية الانشطار.



الشكل (6) تغير تركيز ( $^{135}\text{Xe}$ ) داخل المفاعل بسبب عملية الانحلال

#### 4- المناقشة Discussion

إن الأشكال البيانية (3،2) تبين تزايد إنتاج كميات الغازات ( $^{135}\text{Xe}$ ،  $^{85}\text{Kr}$ ) المشعة التي تولدت من انشطار الوقود النووي في مفاعل PWR مع زيادة القدرة الحرارية، وفيض النيوترونات الحرارية. فخلال سنة من تشغيل المفاعل عند ارتفاع القدرة من 500 MW إلى 3000 MW، ولمعدل قيم فيض النيوترونات  $3.3 \times 10^{13}$  -  $5.5 \times 10^{12}$  neutron/cm<sup>3</sup>.s تزداد كمية  $^{85}\text{Kr}$  من (2.312 mol) إلى (13.977 mol) و  $^{135}\text{Xe}$  من (53.374 mol) إلى (320.246 mol). إن سبب تزايد الإنتاج هو أن زيادة القدرة الحرارية وفيض النيوترونات يؤدي إلى زيادة عدد الانشطارات داخل الوقود. أما اختلاف كميات الإنتاج بين النظائر فسببه اختلاف الحصة الانشطارية لكل نظير. أما الأشكال البيانية (5،4) تبين تناقص إنتاج كميات التولد للغازات المشعة مع ارتفاع درجة حرارة المبرد  $T_b$ ، والسبب هو تناقص المقطع العرضي لانشطار الوقود النووي عند ارتفاع درجة حرارة المبرد. وأخيراً حسابات تغير تركيز غاز الزينون المشع بسبب عملية الانحلال تم توضيحه في الشكل (6) إذ نلاحظ أن تركيز  $^{135}\text{Xe}$  يبدأ بالتوازن بعد فترة من إنتاجه والسبب هو امتلاكه عمر نصف قصير لذلك هو يضمحل بعد فترة قصيرة، أما الكريبتون  $^{85}\text{Kr}$  فإن انحلاله لا يكون واضح لأن عمر النصف له أكبر بكثير من زمن تشغيل المفاعل. ومن خلال تطبيق خاصية المطابقة (fitting) إحدى خواص البرنامج على نتائج حسابات كميات الغازات المشعة عند قدرة 3000 MW. وجد أن نسبة الخطأ قليلة جداً، وكما موضح في الأشكال البيانية (3،2).

#### 5- الاستنتاجات Conclusions

- 1- النتائج التي حصلنا عليها من خلال الفرضيات والمعادلات النظرية المتعلقة بحساب كميات الغازات المشعة المتولدة في مفاعل PWR تدل على نجاح البرمجيات المستخدمة في إعداد هذا البحث.
- 2- إنتاج الغازات المشعة يتناسب طردياً مع زمن تشغيل المفاعل، القدرة الحرارية، وفيض النيوترونات الحرارية.
- 3- إنتاج الغازات المشعة يتناسب عكسياً مع درجة حرارة المبرد.
- 4- تركيز الغازات المشعة التي لها عمر نصف قصير يتغير بسبب عملية الانحلال لهذه النواتج.

## المصادر References

- [1] M. MA. Benjamin, " Nuclear Reactor Materials and Application", Vannostrad Reienhold, 1982
- [2] S. Glasstone and A. Sesonske, "Nuclear Reactor Engineering", Third Edition, Van Nostrand Reinhold,1981
- [3] IAEA, "Advanced Fuel Pellet Materials and Fuel Rod Design for Water Cooled Reactors", 2010
- [4] A. Strasser, P. Rudling, " Fuel Fabrication Process Handbook", A. N. T. International, Sweden, 2005
- [5] T. Jevremovic, "Nuclear Principles in Engineering", Springer, 2005
- [6] O. Noboru, J. Takagi, J. Nucl. Sci. and Technology, Vol. 2 (4), p.(127-131), 1965
- [7] T. fukuda, S. omori and S. Yamagishi, J. Nucl. Sci. and Technology, Vol. 10 (4), p.(242-249), 1973
- [8] Y Y. Hyun Koo, D. Seong Sohn, J. Nucl. Materials, Vol. 209, p.(248-258), 1994
- [9] A. I. El-Shanshoury, Arab J. Nucl. Sci. and Applications, Vol. 45 (4), p.(257-264), 2012
- [10] P. Ngoc Son, Asian J. Sci. and Technology, Vol. 5 (5), p.(295-298), 2014
- [11] الدجيلي، حمزة خضير و الخفاجي، صالح مجيد، "دليل المفاعلات النووية"، منظمة الطاقة الذرية العراقية، 1987
- [12] L. S. Tong, J. Weisman, "Thermal Analysis of Pressurized Water Reactors", American Nuclear Society, 1996
- [13] عسكوري، نجم عبد و معروف، عبد الكريم حميد، "الفيزياء الذرية والنوية"، الكلية الهندسية العسكرية، 1989
- [14] JNES, " The Pressurized Water Reactor", Japan Nuclear Energy Safety Organization, 2011
- [15] J. E. Martin, " Physics for Radiation Protection", Wiley. Vch. Verlag GmbH & Co. Kгаа, Weinheim 2006
- [16] M. K. AL-Ghitta, "Solved problems in nuclear physics", Iraq Atomic Energy Commission, 1977
- [17] DOE Fundamentals Handbook, "Nuclear Physics and Reactor Theory", U.S.-Department of Energy, Washington,1993
- [18] خليل، منيب عادل ، "الطاقة النووية"، جامعة الموصل، 1987
- [19] R. W. Mills, " Fission product yield evaluation", A thesis submitted to the Faculty of Science of the University of Birmingham for the degree of Doctor of Philosophy, 1995
- [20] Go. Chiba, and All, J. Nucl. Sci. and Technology, Vol. 47 (7), p.(652- 660), 2010
- [21] A. L. Nichols, D. L. Aldama and M. Verpelli, " Nuclear Data for Saffguards : Data Base Extensions", IAEA, 2008