

تطور مستوى الفاعلية أثناء تشغيل المفاعل

- مقدمة • تأثير الفاعلية بتغير درجة الحرارة • تأثير الفاعلية بتراكم المواد السامة للتفاعل • تسمم التفاعل بعنصر الزينون (Xe) • تسمم المفاعل بعنصر السيريوم (Sm) • تغير خصائص مكونات المفاعل مع الزمن • تمارين

(٨, ١) مقدمة

أثناء تشغيل المفاعل تحصل تغيرات فيزيائية وهندسية لقلب المفاعل ، لها تأثير على مستوى الفاعلية ؛ ولهذا يجب دراسة كل العوامل الطبيعية والطارئة المؤثرة في التشغيل السليم للمفاعل ، والتحكم فيه في كل الحالات. ومن بين العوامل الطبيعية الناتجة عن تشغيل المفاعل ارتفاع درجة حرارته التي تؤدي بدورها إلى تغير كثافة المواد المكونة للمفاعل ، ومن ثم تغير الخصائص النووية للوقود والمهدئ والمبرد. ولهذه التغيرات تأثير مباشر في عامل التضاعف الفعّال للمفاعل الذي يؤدي إلى تطور مستوى الفاعلية. تساعد دراسة هذا التطور في التحكم السليم في المفاعل في كل الأحوال لإنتاج القدرة الكهربائية المطلوبة والحفاظة على سلامة المحطة. كذلك تؤدي عملية الانشطار

داخل قلب المفاعل إلى توليد عناصر جديدة كثيرة منها ما يصبح عائقاً أو ساماً لعملية الانشطار، حيث إن لبعض هذه العناصر لها قدرة كبيرة على امتصاص النيوترونات. ويؤثر تراكم هذه العناصر من خلال امتصاصها للنيوترونات في مستوى الفاعلية أيضاً؛ ولهذا يجب أيضاً دراسة تأثير تراكم هذه العناصر السامة وأخذها في الحسبان حتى بعد توقيف المفاعل. كذلك يحصل تغير طبيعي مع الزمن في نسبة العناصر الانشطارية أثناء تشغيل المفاعل، فمنها ما يستهلك، ومنها ما يتم توليده مع عناصر جديدة، منها المفيد، ومنها السام للتفاعل؛ ولهذا يجب الأخذ بعين الاعتبار بكل هذه التغيرات مع الزمن للحصول على توزيع أمثل للوقود في قلب المفاعل من بداية التصميم لإطالة عمر المفاعل.

(٨,٢) تأثير الفاعلية بتغير درجة الحرارة

ترتفع درجة حرارة قلب المفاعل تدريجياً منذ بداية التشغيل إلى مستوى محدد، كما تحصل أيضاً تغيرات في درجة حرارة الوقود أثناء تغير قيمة القدرة المنتجة، أو توقيف المفاعل. وتؤدي هذه التغيرات في درجة الحرارة إلى التأثير في الكثير من العوامل المرتبطة بعامل التضاعف الفعّال، ومن ثم تطور مستوى الفاعلية. تأثر الفاعلية بتغير درجة حرارة قلب المفاعل مرتبط بما يحدث من تغيرات فيزيائية ونووية وهندسية لمكونات المفاعل. ومن التغيرات الفيزيائية المؤثرة نجد تغير الكثافة التي تؤدي بدورها إلى تغيرات نووية خاصة بالمقاطع العرضية للوقود والمهدئ إلى آخره. كذلك تغير درجة الحرارة يؤثر في الفاعلية من خلال تغير الأبعاد الهندسية لقلب المفاعل وكميات المواد المكونة له من خلال التمدد والتقلص.

(٨,٢,١) معامل الفاعلية لتغير درجة الحرارة

يُعبّر معامل الفاعلية لتغير درجة الحرارة، α_T على تطور الفاعلية الذي يمكن كتابته بشكل عام على النحو الآتي:

$$\begin{aligned} \alpha_T &= \frac{\partial \rho}{\partial T} = \frac{\partial}{\partial T} \cdot \frac{(K-1)}{K} \\ (٨, ١) \quad &= \frac{1}{K^2} \cdot \frac{\partial K}{\partial T} \approx \frac{1}{K} \frac{\partial K}{\partial T} \end{aligned}$$

حيث إن :

$$\frac{K-1}{K} = \rho \text{ : الفاعلية.}$$

K : عامل التضاعف الفعّال للمفاعل.

نلاحظ تعويض مربع قيمة عامل التضاعف الفعّال، K^2 في المعادلة الأخيرة بقيمة K فقط ، حيث إن هذا العامل قريب جداً ، أو يساوي الواحد الصحيح في معظم الأحيان.

يحتوي عامل التضاعف الفعّال على مجموعة من العوامل المستقلة ربما من المقيد التذكير بها في ما يلي :

$$(٨, ٢) \quad K = K_{\infty} \times f = \eta \epsilon p f \times f$$

حيث إن :

η : معامل الانشطار الحراري.

ϵ : معامل الانشطار السريع.

p : معامل احتمال الهروب من الامتصاص.

f : معامل الاستعمال الحراري.

f : معامل احتمال عدم تسرب النيوترونات السريعة والحرارية.

يُمكن الآن حساب تأثير درجة الحرارة لكل معامل لوحده ، وذلك عند أخذ اللوغاريتم لطرفي معادلة عامل التضاعف الفعّال السابقة ثم تفاضلها وفق درجة الحرارة ، وعلى سبيل المثال :

$$\ln(K) = \ln(\varepsilon \eta f \xi) + \ln(p) \quad (٨,٣)$$

$$\frac{d}{dT}[\ln(K)] = \frac{1}{K} \frac{dK}{dT}[\ln(p)] = \frac{1}{p} \frac{dp}{dT}$$

يؤدي استعمال الطريقة الحسابية نفسها إلى الحصول على المعادلة النهائية لمعامل الفاعلية لتغير درجة الحرارة الآتية :

$$\alpha_T = \frac{1}{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial T} + \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial T} + \frac{1}{p} \frac{\partial p}{\partial T} + \frac{1}{f} \frac{\partial f}{\partial T} + \frac{1}{\xi} \frac{\partial \xi}{\partial T} \quad (٨,٤)$$

تجدر الإشارة إلى أن ارتفاع أو انخفاض درجة الحرارة يحصل أولاً في الوقود نتيجة التفاعلات النووية، ثم ينتقل بعد ذلك إلى المهدئ والمبرد. ولهذا، فإن التأثير الفوري لتغير درجة الحرارة يكون مصدره الوقود، أما التأثير المتأخر فيكون مصدره المهدئ والمبرد والمكونات الأخرى لقلب المفاعل؛ ولذلك سندرس تأثير تغير درجة الحرارة في الفاعلية وفق هذا الترتيب.

(٨,٢,٢) عوامل الفاعلية لتغير درجة حرارة الوقود

تتلخص عوامل الفاعلية لتغير درجة حرارة الوقود في التأثيرات التي تحصل لمعامل احتمال الهروب من الامتصاص p ، ولمعامل الاستعمال الحراري، f ؛ وذلك لأن تغير درجة حرارة الوقود ليس له تأثير يُذكر على معامل احتمال عدم التسرب ξ . أما تأثير هذا التغير على المعامل ε ، والمعامل η ، فهو صغير جداً وفي بعض الحالات فقط؛ ولهذا يمكن إهماله مقارنة بتأثير العاملين الأولين. وهكذا تصبح عوامل الفاعلية لتغير درجة حرارة الوقود كما يلي:

$$\alpha_{TF} = \frac{1}{p} \frac{\partial p}{\partial T_F} + \frac{1}{f} \frac{\partial f}{\partial T_F} \quad (٨,٥)$$

حيث إن:

T_F : درجة حرارة الوقود.

(١, ٢, ٢, ٨) نأثر معامل احتمال الهروب من الامتصاص

يؤدي تغير درجة حرارة الوقود إلى تأثير فوري لمعامل احتمال الهروب من الامتصاص عن طريق مفعول ظاهرة "دوبلر" المعروفة، حيث تتسع قواعد قسم المقاطع العرضية للامتصاص وفق مفعول هذه ظاهرة، فيزداد امتصاص النيوترونات. ويؤدي تغير درجة حرارة الوقود أيضا إلى تغير الكثافة. ومن ثم إلى زيادة أو نقصان في امتصاص النيوترونات، إلا أن هذا التأثير أقل من السابق.

أولاً: تأثير مفعول ظاهرة دوبلر

يتمثل مفعول ظاهرة دوبلر بالنسبة للمفاعلات الحرارية في اتساع المقطع العرضي لامتصاص النيوترونات المتوسطة في منطقة الرنين من طرف الذرات الثقيلة غير الانشطارية في الوقود، مثل اليورانيوم ^{238}U . ويمكن حساب هذا التأثير عن طريق معامل احتمال الهروب من الامتصاص الذي يكتب وفق المعادلة الآتية:

$$p = \exp\left[-\frac{N_F}{\xi \sum_p} I\right] \quad (٨, ٦)$$

حيث إن:

$$\frac{N_F}{\xi \sum_p} : \text{قدرة التهذئة حسب كثافة ذرات الوقود } N_F.$$

$$\text{علما أن: } \frac{V_F}{\sum_M V_M} = \sum_p \text{ حيث إن } V_F, V_M, \sum_M \text{ المقطع العرضي}$$

المجهاري، حجم المهدي، حجم الوقود تالياً.

$$\xi = \frac{\phi_M}{\phi_F} \text{ الذي يعرف بعامل الضرر الحراري لأفياض النيوترونات.}$$

I: التكامل الفعّال للرنين.

وهكذا يمكن كتابة المعامل الحراري لمفعول ظاهرة دوبلر على النحو الآتي:

$$\begin{aligned}
 \alpha_{TF}^D &= \frac{\partial \rho}{\partial T_F} \approx \frac{1}{K} \cdot \frac{\partial K}{\partial T_F} \\
 (\lambda, 7) \quad &= \frac{1}{p} \frac{\partial p}{\partial T_F} = \text{Ln}(p) \left(\frac{1}{I} \frac{\partial I}{\partial T_F} \right)
 \end{aligned}$$

ولقد أدت العديد من البحوث النظرية والتجارب العملية إلى استنتاج المعادلة الآتية الخاصة بتغير التكامل الفعال للرنين حسب درجة الحرارة ونوع الوقود على النحو الآتي:

$$\begin{aligned}
 I(T_F) &= I(300^\circ K) [1 + \beta \sqrt{T(^{\circ}K)} - \sqrt{300^\circ K}] \\
 (\lambda, 8) \quad I(300^\circ K) &= 11.6 + 22.8 \left(\frac{S_F}{M_F} \right)
 \end{aligned}$$

حيث إن:

S_F : مساحة قلم الوقود.

M_F : وزن قلم الوقود.

β : ثابت مرتبط بنوع الوقود، فمثلاً:

$$(\lambda, 9) \quad {}^{238}\text{UO}_2 \rightarrow \beta = 61 \times 15^{-4} + 47 \times 10^{-4} \left(\frac{S_F}{M_F} \right)$$

$$(\lambda, 10) \quad {}^{232}\text{ThO}_2 \rightarrow \beta = 97 \times 10^{-4} + 120 \times 10^{-4} \left(\frac{S_F}{M_F} \right)$$

باستعمال ما سبق نستنتج معادلة عامل الحرارة لمفعول ظاهرة دوپلر الفورية

للوقود الآتية:

$$(\lambda, 11) \quad \alpha_{TF}^D = -\ln \left[\frac{1}{p(300^\circ K)} \right] \cdot \frac{\beta}{2\sqrt{T_F(^{\circ}K)}}$$

ثانياً: تأثير تغير كثافة الوقود

عندما ترتفع درجة حرارة الوقود يتمدد وتقل كثافته فيقل الامتصاص الريني للنيوترونات، ويتأثر المعامل p لتناقص هذا الامتصاص في الوقود. أما المعادلة التي تُعبر عن هذه الظاهرة فتكون على النحو الآتي:

$$\begin{aligned} \alpha_{TF}^d &= \frac{1}{p} \frac{\partial p}{\partial N_F} \cdot \frac{\partial N_F}{\partial T_F} \\ (٨, ١٢) \quad &= \ln(p) \left(\frac{1}{N_F} \cdot \frac{\partial N_F}{\partial T_F} \right) = -3 \theta_F \ln(p) \end{aligned}$$

حيث إن:

N_F : الكثافة الذرية للوقود.

θ_F : العامل الخطي لتمدد مادة الوقود.

وهكذا يصبح عامل الفاعلية الإجمالي لتغير درجة حرارة الوقود الناتج عن تغير معامل احتمال الهروب من الامتصاص الذي له تأثير فوري في مستوى الفاعلية كما يلي:

$$(٨, ١٣) \quad \alpha_{TF}^P = \alpha_{TF}^D + \alpha_{TF}^d$$

تجدر الإشارة إلى أن العامل α_{TF}^P يعدُّ من أكبر العوامل المؤثرة في مستوى الفاعلية، ويكون عادة سالباً عند ارتفاع درجة حرارة الوقود.

(٨, ٢, ٢, ٢) تأثر معامل الاستعمال الحراري

تُكتب معادلة معامل الاستعمال الحراري وفق معدل المقاطع المجهرية الفعالة لخلية الوقود والمهدئ على النحو الآتي:

$$(٨, ١٤) \quad f = \frac{\sum_{aF}^{eff}}{\sum_{aF}^{eff} + \sum_{aM}^{eff}} = \frac{\sum_a^F}{\sum_a^F + \sum_a^M}$$

حيث إن :

\sum_a^M و \sum_a^F : معدل المقطع العرضي المجهازي الفعّال لكل من الوقود والمهدئ

تتالياً.

وهكذا يكون عامل الفاعلية الخاص بمعامل الاستعمال الحراري f القوري سالباً

عند ارتفاع درجة حرارة الوقود وفق المعادلة الآتية :

$$(٨, ١٥) \quad \alpha_{TF}^f = \frac{1}{f} \frac{\partial f}{\partial T_F} \approx (1-f) \left[\frac{1}{2T_F} - \frac{1}{\sum_a^F} \frac{\partial \sum_a^F}{\partial \xi} \frac{\partial \xi}{\partial T_F} + 3\theta_F \right]$$

حيث إن :

$\xi = \frac{\phi_M}{\phi_F}$: عامل الضرر الحراري لأفياض النيوترونات الذي يتأثر أيضاً بتغير

درجة الحرارة. أما θ_F فيمثل العامل الخطي لتمدد مادة الوقود.

(٨, ٢, ٣) عوامل الفاعلية لتغير درجة حرارة المهدئ والمبرد

تؤثر تغيرات درجة حرارة المهدئ والمبرد على عامل التضاعف الفعّال من خلال

تغير المقاطع العرضية الحرارية، وتغير كثافة هذه المواد. ويعدُّ تأثير تغير المقاطع العرضية في

الفاعلية بسيطاً مقارنةً بتغير كثافة المهدئ والمبرد، خاصةً عندما يكونان سائلين. وبالعودة

إلى المعادلة الأساسية (٨, ٤) نرى أن العوامل التي تتأثر بتغير درجة حرارة المهدئ والمبرد

هي فقط ثلاثة عوامل، علماً أن العاملين η و ϵ لا يتأثران تقريباً بهذه التغيرات وهكذا

تصبح عوامل الفاعلية المتأخرة والخاصة بالمهدئ والمبرد على النحو الآتي :

$$(٨, ١٦) \quad \alpha_{TM} = \alpha_{TM}(p) + \alpha_{TM}(f) + \alpha_{TM}(\epsilon)$$

(٨, ٢, ٣, ١) تأثير معامل احتمال الهروب من الامتصاص

تؤدي تغيرات درجة حرارة المهدئ والمبرد إلى تغيرات كبيرة للكثافة خاصة

عندما يكونان سائلين، كما هو الحال في مفاعلات الماء (BWR) و (PWR). عند ارتفاع

درجة الحرارة مثلاً يتمدد السائل فيفقد قلب المفاعل كمية من المهدئ، ويكون فقدان السائل أكبر في مفاعلات الماء المغلي (BWR) من خلال التبخر وخلق فراغات (فقاعات) داخلية نتيجة هذه العملية. تناقص كمية ذرات المهدئ والمبرد وفراغات التبخر في قلب المفاعل تجعل المعامل p يتناقص، ومن ثم يصبح عامل الفاعلية α_{TF}^P سالباً، كما هو واضح من خلال المعادلة الآتية:

$$(٨, ١٧) \quad \alpha_{TM}^P = \frac{1}{P} \cdot \frac{\partial P}{\partial T_M} \cdot \frac{\partial N_M}{\partial T_M} = -Ln(p) \left(\frac{1}{N_M} \cdot \frac{\partial N_M}{\partial T_M} \right) \\ = 3\theta_M \cdot Ln(p)$$

حيث إن:

N_M : الكثافة الذرية للمهدئ.

θ_M : العامل الخطي لتمدد مادة المهدئ.

(٨, ٢, ٣, ٢) تأثير معامل الاستعمال الحراري

لا يتأثر معامل الاستعمال الحراري كثيراً عندما يكون المهدئ صلباً والمبرد على شكل غاز له قدرة امتصاص صغيرة للنيوترونات. لكن عندما يكون المهدئ والمبرد سائلين، فإن فقدان قلب المفاعل كميات منهما نتيجة ارتفاع درجة حرارتهما كما سبق شرحه، يؤدي إلى زيادة قيمة المعامل f ، ومن ثم يصبح عامل الفاعلية α_{TM}^f موجباً، كما هو واضح من خلال المعادلة الآتية:

$$(٨, ١٨) \quad \alpha_{TM}^f = \frac{1}{f} \frac{\partial f}{\partial T_M} \approx (1-f) \left[\frac{1}{\sum_a^M} \frac{\partial \sum_a^M}{\partial \xi} \frac{\partial \xi}{\partial T_M} + 3\theta_M \right]$$

حيث إن:

\sum_a^M : المقطع العرضي المجهاري الفعال للمهدئ.

ξ : عامل الضرر الحراري لأفياض النيوترونات.

θ_M : عامل التمدد الخطي للمهدئ.

(٨, ٢, ٣, ٣) تأثير معامل احتمال عدم تسرب النيوترونات

يؤدي ارتفاع درجة حرارة المهدئ والمبرد إلى تغير قيمة معامل احتمال عدم تسرب النيوترونات من خلال تغير طول هجرة النيوترونات وأبعاد قلب المفاعل نتيجة التمدد. وعند كتابة معادلة معامل احتمال عدم تسرب النيوترونات بدلالة مساحة الهجرة، M^2 والانحناء الهندسي B_g^2 نحصل على ما يلي:

$$(٨, ١٩) \quad \epsilon = \frac{1}{1 + M^2 B_g^2}$$

أما عامل الفاعلية الناتج عن تأثير العامل ϵ ، فيُحسب بتفاضل المعادلة السابقة وفق درجة حرارة المهدئ على النحو الآتي:

$$(٨, ٢٠) \quad \alpha_{TM}^{\epsilon} = \frac{1}{\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial T_M} = -\frac{M^2 B_g^2}{1 + M^2 B_g^2} \left(\frac{1}{M^2} \frac{\partial M^2}{\partial T_M} + \frac{1}{B_g^2} \frac{\partial B_g^2}{\partial T_M} \right)$$

$$= \frac{M^2 B_g^2}{1 + M^2 B_g^2} \left(\frac{2}{l_R} \frac{\partial l_R}{\partial T_M} - 6\theta_M - \frac{1}{2T_F} + \frac{1}{1-f} \frac{\partial f}{\partial T} \right)$$

حيث إن:

$$\frac{G}{B_g^2} = l_R$$

قيمة مرتبطة بأبعاد المفاعل، و G ثابت مرتبط بالشكل الهندسي للمفاعل.

يُلاحظ أن عامل الفاعلية α_{TM}^{ϵ} يحتوي على جزء سالب ناتج عن زيادة تسرب النيوترونات عند انخفاض الكثافة، وعلى جزء موجب ناتج عن تمدد بسيط لأبعاد المفاعل، مما يجعل عادة هذا الجزء صغيراً؛ ولهذا فإن مجموع هذين الجزئين يكون سالباً بالنسبة لمفاعلات الماء الحرارية.

(٨, ٢, ٣, ٤) ملاحظات عامة

يوضح الجدول رقم (٨, ١) قيم مختلف عوامل الفاعلية الناتجة عن تغير درجة الحرارة لبعض المفاعلات الحرارية. ويُلاحظ أن معظم هذه القيم سالبة.

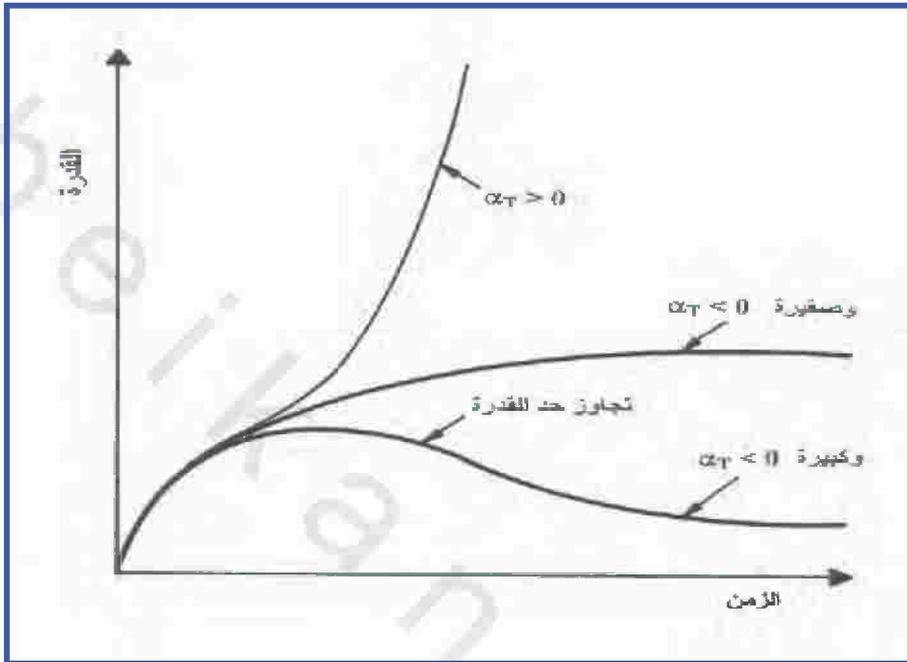
الجدول رقم (٨, ١). قيم عوامل الفاعلية الناتجة عن تغير درجة الحرارة (الوحدة).

المفاعل	HTGR	PWR	BWR
عامل مفعول دويلر	7-	4- إلى 1-	1- إلى 4-
المهدئ	1+	8- إلى 50-	8- إلى 50-
المبرد	-	-	800- إلى 100-
تمدد قلب المفاعل	0 ≈	0 ≈	0 ≈

تجدر الإشارة إلى أن سلامة المفاعل تقتضي أن يكون مجموع عوامل الفاعلية الناتجة عن تغير درجة الحرارة سالباً لكي يكون المفاعل متزاناً؛ ذلك لأنه عندما يكون عامل الفاعلية α_T موجباً يصبح المفاعل غير متزن، ويصعب التحكم فيه، حيث يؤدي ارتفاع الحرارة إلى ارتفاع القدرة بسرعة، مما يرفع درجة الحرارة من جديد، وهكذا حتى ذوبان قلب المفاعل، وربما أدى إلى كارثة إن لم يتم التدخل خارجياً. لكن عندما يكون هذا العامل سالباً، فإن ارتفاع درجة الحرارة لسبب أو لآخر يُولد فاعلية سالبة تُحد من قدرة المفاعل وتعيده تلقائياً إلى المستوى السابق بدون تدخل خارجي. ويوضح الشكل رقم (٨, ١) تغير قدرة المفاعل مع الزمن حسب إشارة عامل الفاعلية الناتج عن تغيرات درجة حرارة قلب المفاعل.

(٨, ٣) تأثير الفاعلية بتراكم المواد السامة للتفاعل

أثناء عملية الانشطار تُولد عناصر جديدة كثيرة لكل منها قدرة معينة لامتنصاص النيوترونات؛ مما يجعل عامل التضاعف الفعال يتناقص تدريجياً بسبب تراكم هذه العناصر في قلب المفاعل. ونخص بالذكر عنصري الزينون (Xe) والسمريوم (Sm) اللذين لهما قدرة كبيرة على امتصاص النيوترونات، مما يجعلهما على رأس قائمة العناصر السامة للتفاعل؛ ولهذا سندرس تأثير كل منهما على الفاعلية في مراحل تشغيل المفاعلات الحرارية.



الشكل رقم (٨, ١). تغير القدرة مع الزمن حسب إشارة عامل الفاعلية الناتج عن تغير درجة الحرارة.

(٨, ٣, ١) تأثير عامل التضاعف بالعناصر السامة

يتأثر عامل التضاعف الفعّال بتركيز العناصر السامة من خلال معامل الاستعمال الحراري f خاصة ، أما تغير قيم بقية المعامل الأخرى فهي محدودة جداً ولا تذكر. وهكذا يمكن كتابة الفاعلية الناتجة عن تراكم العناصر السامة لمفاعل حراري حرج على النحو الآتي :

$$(٨, ٢١) \quad \rho_p = \frac{K - K_0}{K} = \frac{f - f_0}{f}$$

حيث إن :

K_0 : عامل التضاعف الفعّال.

f_0 : معامل الاستعمال الحراري عند الحالة الحرجة للمفاعل في بداية التشغيل.

K و f : يمثلان العوامل نفسها لكن عند وجود عناصر سامة في قلب المفاعل أي بعد تشغيله بفترة.

علماً أن معامل الاستعمال f_0 له المعادلة الآتية :

$$(٨, ٢٢) \quad f_0 = \frac{\overline{\Sigma}_a^F}{\overline{\Sigma}_a^F + \overline{\Sigma}_a^M}$$

أما عند وجود العناصر السامة ، فإن معامل الاستعمال الحراري f له المعادلة الآتية :

$$(٨, ٢٣) \quad f = \frac{\overline{\Sigma}_a^F}{\overline{\Sigma}_a^F + \overline{\Sigma}_a^M + \overline{\Sigma}_a^P}$$

حيث إن :

$\overline{\Sigma}_a^F$: معدل المقطع العرضي المجهاري لامتصاص النيوترونات بالوقود.

$\overline{\Sigma}_a^M$: معدل المقطع العرضي المجهاري لامتصاص النيوترونات بالمهدئ.

$\overline{\Sigma}_a^P$: معدل المقطع العرضي المجهاري لامتصاص النيوترونات بالعناصر السامة.

يمكن الآن اشتقاق معادلة الفاعلية الناتجة عن تراكم العناصر السامة في قلب

المفاعل من المعادلات السابقة على النحو الآتي :

$$(٨, ٢٤) \quad \rho_p = \frac{f - f_0}{f} = -\frac{\overline{\Sigma}_a^P}{\overline{\Sigma}_a^F + \overline{\Sigma}_a^M}$$

(٨, ٣, ٢) فاعلية العناصر السامة

يُفضل عادة صياغة المعادلة (٨, ٢٤) على شكل عملي لحساب فاعلية العناصر

السامة ، وذلك بتعويض المقام بقيمته المشتقة من معادلة عامل التضاعف الفعّال لمفاعل

حرج وبدون العناصر السامة مع إهمال معامل التسرب النيوترونات k الذي لا يتأثر بوجود هذه العناصر في قلب المفاعل.

$$K = \epsilon p \eta f \times k \approx \epsilon p \frac{\nu \Sigma_f}{\Sigma_a} \cdot \frac{\bar{\Sigma}_a^F}{\bar{\Sigma}_a^F + \bar{\Sigma}_a^M} = 1 \quad (٨, ٢٥)$$

$$\Rightarrow \bar{\Sigma}_a^F + \bar{\Sigma}_a^M = \nu \epsilon p \Sigma_f$$

حيث إن :

$\bar{\Sigma}_a^F$: المقطع العرضي المجهري للوقود.

وأخيراً تصبح معادلة فاعلية العناصر السامة عند تعويض المقام على الشكل الآتي :

$$\rho_p = -\frac{\bar{\Sigma}_a^P}{\nu p \epsilon \Sigma_f} \quad (٨, ٢٦)$$

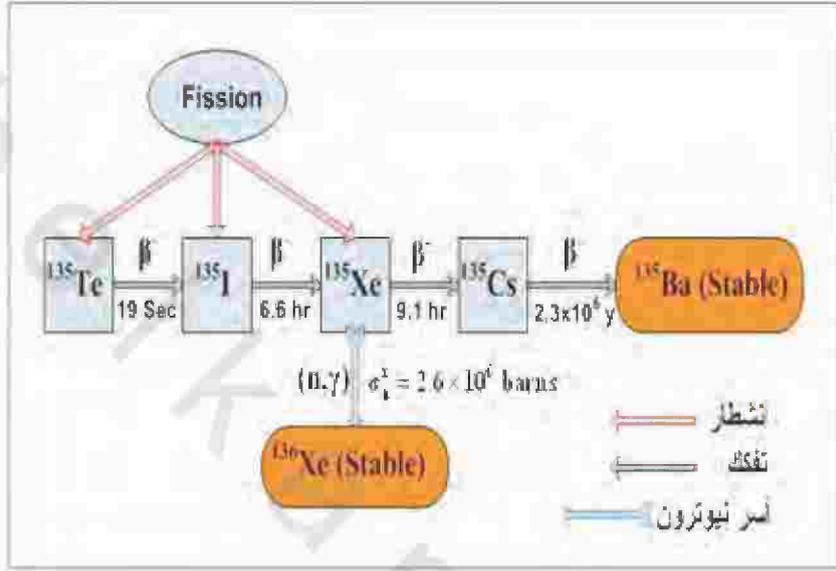
(٨, ٤) تسمم التفاعل بعنصر الزينون

يُعدُّ الزينون ^{135}Xe من أكثر العناصر الماصة للنيوترونات والسامة للتفاعل ، حيث يتمتع بمقطع مجهري لامتناهات النيوترونات الحرارية كبير جداً ، ويساوي 2.6×10^6 بارن ، بالإضافة إلى أن نسبة إنتاجية عالية أثناء انشطار المواد الثقيلة ، كما هو موضح في الجدول رقم (٨, ٢) الآتي :

الجدول رقم (٨, ٢). نسبة إنتاج بعض العناصر السامة للتفاعل عند انشطار المواد الثقيلة.

المادة الانشطارية	^{235}U	^{238}U	^{239}Pu
γ_{Te}^{135}	0.061	0.051	0.055
γ_{Xe}^{135}	0.003	0.003	0.011

يُنتج الزينون ^{135}Xe عن طريق تفكك عنصر الأيودين ^{135}I وانشطار المواد الثقيلة كما هو موضح في الشكل رقم (٨, ٢) الآتي :



الشكل رقم (٨.٢). إنتاج عنصر ^{135}Xe السام في قلب المفاعل.

نلاحظ أن عمر نصف تفكك التكنيسيوم ^{135}Te ($T_{1/2} = 19 \text{ sec}$) قصير جداً؛ ولهذا يمكن اعتبار أن الأيودين ^{135}I يُنتج مباشرة بالانشطار وبالنسبة نفسها؛ ولهذا يمكن كتابة نظام معادلات إنتاج الزينون وتفككه على النحو الآتي:

$$(٨, ٢٧) \quad \begin{aligned} \frac{dI(t)}{dt} &= \gamma_{Te} \sum_f \phi - \lambda_I I \\ \frac{dX(t)}{dt} &= \gamma_{Xe} \sum_f \phi + \lambda_I I - (\lambda_X + \sigma_a^X \phi) X \end{aligned}$$

حيث إن:

X : عدد ذرات الزينون.

I : عدد ذرات الأيودين.

σ_a^X : المقطع العرضي المجهري للزنون.

γ : نسبة الإنتاج عند كل انشطار.

λ : ثابت التفكك للعناصر المذكورة.

الحل الرياضي لنظام المعادلات (٨, ٢٦) يعطي كمية تركيز ذرات الأيودين والزينون مع الزمن، ويكون ذلك على النحو الآتي:

$$(٨, ٢٨) \quad \begin{aligned} I(t) &= \frac{\gamma_{Te} \sum_f \phi}{\lambda_I} (1 - e^{-\lambda_I t}) + I(0)e^{-\lambda_I t} \\ X(t) &= \frac{(\gamma_{Te} + \lambda_{Xe}) \sum_f \phi}{\lambda_x + \sigma_a^X \phi} [1 - e^{-(\lambda_x + \sigma_a^X \phi)t}] \\ &+ \frac{\gamma_{Te} \sum_f \phi - \lambda_I I(0)}{\lambda_x - \lambda_I + \sigma_a^X \phi} [e^{-(\lambda_x + \sigma_a^X \phi)t} - e^{-\lambda_I t}] \\ &+ X(0)e^{-(\lambda_x + \sigma_a^X \phi)t} \end{aligned}$$

(٨, ٤, ١) فاعلية الزينون عند الاتزان

نلاحظ أن عمر نصف الأيودين ^{135}I والزينون ^{135}Xe قصيران جداً، والمقطع العرضي المجهري للزنون كبير جداً؛ لذلك فإن تركيز هذين العنصرين يصل بسرعة إلى أكبر قيمة لهما، أو ما يسمى بقيمة الاتزان بين الإنتاج والتفكك. ويمكن حساب قيم تركيز الاتزان باعتبار أن الزمن يساوي ما لا نهاية ($t = \infty$) في معادلات حل النظام (٨, ٢٨)، أو جعل نظام تطور تركيز ذرات الأيودين (٨, ٢٧) يساوي الصفر. وفي كلتا الحالتين نحصل على قيم الاتزان الآتية:

$$(٨, ٢٩) \quad \begin{aligned} I_{eq}(\infty) &= \frac{\gamma_I \sum_f \phi}{\lambda_I} \\ X_{eq}(\infty) &= \frac{(\gamma_{Te} + \gamma_{Xe}) \sum_f \phi}{\lambda_x + \sigma_a^X \phi} \end{aligned}$$

يمكن الآن حساب فاعلية الزينون بالرجوع إلى المعادلة (٨,٢٦) الخاصة بفاعلية العناصر السامة، وذلك باستعمال كمية الزينون عند الاتزان.

$$(٨,٣٠) \quad \rho_{xe} = -\frac{\sum_a^p}{\nu p \epsilon \sum_f} = -\frac{\sigma_a^x X_{eq}}{\nu p \epsilon \sum_f}$$

وعند تعويض تركيز الزينون بقيمتها السابقة عند الاتزان، واعتبار أن المفاعل خرج وعامل الضرب ($\epsilon = 1$)، مع القليل من الترتيب نحصل على معادلة فاعلية الزينون الآتية:

$$(٨,٣١) \quad \rho_{ex} = -\frac{(\gamma_{Te} + \gamma_{Xe})\phi}{\nu \left(\frac{\lambda_X}{\sigma_a^X} + \phi \right)} = -\frac{(\gamma_{Te} + \gamma_{Xe})\phi}{\nu} \frac{\phi}{\phi_X + \phi}$$

حيث إن:

$$T = 20^0 ; \quad (cm^{-2} / sec) \quad 0.756 \times 10^{13} = \frac{\lambda_X}{\sigma_a^X} = \phi_X$$

واستناداً إلى الجزء الأخير من المعادلة (٨,٣١) لفاعلية الزينون، يُمكن استنتاج حالتين مهمتين:

الأولى: إذا كان فيض النيوترونات صغيراً، $\phi_X \gg \phi$ ، فإن فاعلية الزينون تتغير خطياً مع الفيض.

$$(٨,٣٢) \quad \rho_{xe} = -\frac{(\lambda_{Te} + \gamma_{xe})\phi}{\nu \phi_X}$$

الثانية: إذا كان فيض النيوترونات كبيراً $\phi_X \ll \phi$ كما هو الحال في مفاعلات القدرة الكهربائية، فإن فاعلية الزينون تأخذ أكبر قيمة، وذلك عند اتزان إنتاج الزينون (X_{eq}).

$$(٨,٣٣) \quad \rho_{xe} = -\frac{(\lambda_{Te} + \gamma_{xe})}{\nu}$$

وبالنسبة لوقود اليورانيوم ^{235}U فإن هذه القيمة تساوي :

$$\rho_{xe} = -\frac{0.063}{2.42} = -0.026$$

(٨, ٤, ٢) تطور فاعلية الزينون عند توقف المفاعل

عند توقف المفاعل ، ينتهي إنتاج الزينون عن طريق الانشطارات ، وكذلك استهلاكه عن طريق امتصاصه للنيوترونات ، لكن يبقى إنتاجه متواصلًا عن طريق تفكك الأيودين. ولهذا ؛ فإن تركيزه يتزايد عند توقف المفاعل حتى يصل بعد فترة من الزمن إلى قمة ثم يتناقص من جديد وفق قانون التفكك الإشعاعي الخاص به.

تعمل حسابات فاعلية تطور الزينون لمفاعل تم توقيفه بعد الوصول إلى مرحلة اتزان إنتاج الزينون على إعادة كتابة حل نظام المعادلات (٨, ٢٨) لتركيز ذرات الأيودين والزينون مع الأخذ في الحسبان بالشروط الحدودية الآتية :

$$X(0) = X_{eq} \quad , \quad I(0) = I_{eq} \quad , \quad 0 = \phi$$

ونحصل في هذه الحالة على تطور تركيز ذرات الأيودين والزينون وفق المعادلات

الآتية :

$$(٨, ٣٤) \quad \begin{aligned} I(t) &= I_{eq} e^{-\lambda I t} \\ X(t) &= X_{eq} e^{-\lambda X t} + I_{eq} \frac{\lambda I}{\lambda I + \lambda X} (e^{-\lambda X t} - e^{-\lambda I t}) \end{aligned}$$

وبالعودة إلى معادلة الفاعلية (٨, ٣٠) نحسب فاعلية الزينون عند توقف المفاعل

على النحو الآتي :

$$(٨, ٣٥) \quad \rho_{xe} = -\frac{1}{\nu p \epsilon} \left[\frac{(\gamma_{Te} + \gamma_X) \phi}{\phi_X + \phi} e^{-\lambda X t} + \frac{\gamma_{Te} \phi}{\phi_I - \phi_X} (e^{-\lambda X t} - e^{-\lambda I t}) \right]$$

حيث إن:

$$T = 20^0 \quad , \quad (cm^{-2} / sec) \quad 1.055 \times 10^{13} = \frac{\lambda_I}{\sigma_a^X} = \phi_I$$

يُلاحظ أن مستوى فاعلية الزينون مرتبط بقيمة فيض النيوترونات قبل توقف المفاعل.

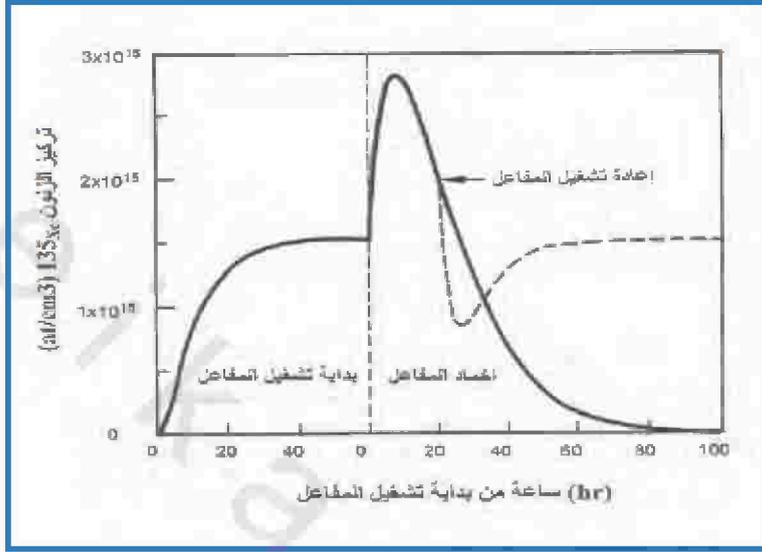
يمكن الآن حساب الزمن الذي تصل فيه فاعلية الزينون إلى القمة بعد توقف المفاعل، وذلك بجعل تفاضل المعادلة السابقة يساوي الصفر، فنحصل أخيراً على ما يلي:

$$(٨,٣٦) \quad t_{\max} = \frac{1}{\lambda_I - \lambda_x} \left[\frac{\lambda_I / \lambda_x}{1 + \frac{\lambda_x}{\lambda_I} \left(\frac{\lambda_I}{\lambda_x} - 1 \right) \frac{X_{eq}}{I_{eq}}} \right]$$

$$(٨,٣٧) \quad t_{\max} \rightarrow \frac{1}{\lambda_I + \lambda_x} \ln \left(\frac{\lambda_I}{\lambda_x} \right) = 11.6 \text{ hours}$$

$\phi \gg \phi_x$

يُوضح الشكل رقم (٨,٣) تطور تركيز الزينون في مختلف مراحل تشغيل المفاعل، الذي له ارتباط وثيق بالفاعلية. ويُلاحظ أن تشغيل المفاعل من جديد قبل انتهاء تفكك الزينون يحتاج إلى مخزون إضافي من الفاعلية الموجبة (وذلك برفع قطبان التحكم مثلاً)، للتخلص من فاعلية الزينون السالبة، وتشغيل المفاعل. لكن عندما يكون مخزون الفاعلية غير كافٍ، فلا يمكن تشغيل المفاعل لفترة محددة تسمى بـ زمن موت المفاعل. وتنتهي هذه الفترة الزمنية عندما يتناقص تركيز الزينون بقدر كافٍ عن طريق التفكك.



الشكل رقم (٨,٣). تركيز ذرات الزينون في مختلف مراحل تشغيل المفاعل [١٦].

(٨,٤,٣) علاقة فاعلية الزينون بقدرة المفاعل

يؤدي تغير قدرة المفاعل أثناء التشغيل إلى تغير في تركيز الأيودين والزينون في قلب المفاعل، ومن ثم تغير في مستوى فاعلية الزينون أيضاً. فعند تغير مستوى فيض النيوترونات مع الزمن من Φ_0 إلى Φ_1 وبحساب أن المفاعل وصل قبل هذا التغير إلى مرحلة الاتزان، فإن الشروط الحدودية لحل معادلات التركيز (٨,٢٨) تصبح كما يلي:

$$X(0) = X_{eq} \quad , \quad I(0) = I_{eq} \quad \Leftarrow \quad \phi_1 = \phi_0$$

وهكذا تصبح معادلات تركيز ذرات الأيودين والزينون عند تغير قدرة المفاعل،

أي عند تغير فيض النيوترونات من Φ_0 إلى Φ_1 على النحو الآتي:

$$I(t) = I_{eq}(\phi_1) \left[1 - \frac{\phi_1 - \phi_0}{\phi_1} e^{-\lambda_I t} \right]$$

$$(٨, ٣٨) \quad X(t) = X_{eq}(\phi_1) \left[1 - \frac{\phi_1 - \phi_0}{\phi_1} \left(\frac{\lambda_x}{\lambda_x + \sigma_a^x \phi_0} e^{-(\lambda_x + \sigma_a^x \phi_1)t} \right) \right. \\ \left. + \frac{\gamma_{Te}}{\gamma_{Te} + \gamma_{xe}} \frac{\lambda_x + \sigma_a^x \phi_1}{\lambda_x - \lambda_I + \sigma_a^x \phi} (e^{-\lambda_I t} - e^{-(\lambda_x + \sigma_a^x \phi_1)t}) \right]$$

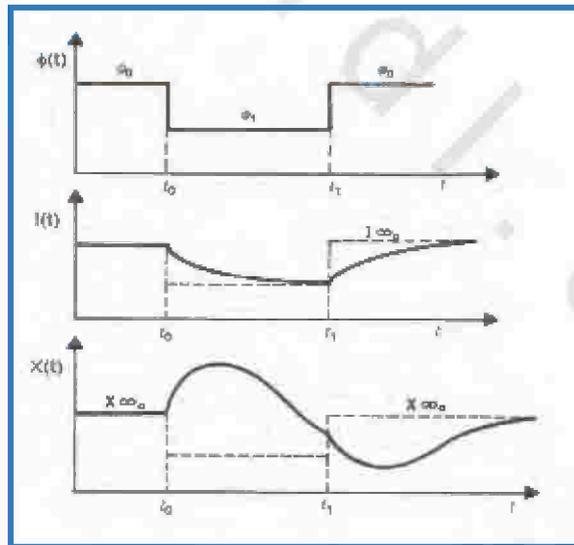
أما تغير فاعلية الزينون مع الزمن أثناء تغير قدرة المفاعل فتكون بشكل عام على

النحو التالي :

$$(٨, ٣٩) \quad \rho_{xe}(t) = - \frac{\sigma_a^x X(t)}{\Sigma_a} \approx \frac{\sigma_a^x X(t)}{\nu \Sigma_f}$$

يُوضح الشكل رقم (٨, ٤) تغير فيض النيوترونات، وتركيز الأيودين والزينون

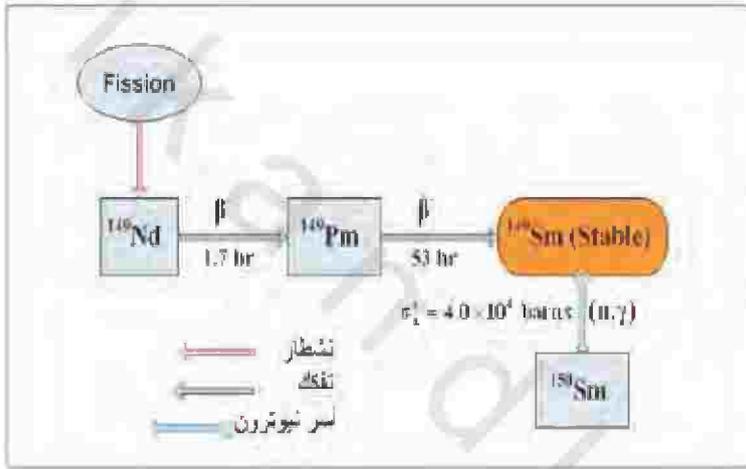
عند تغير قدرة المفاعل.



الشكل رقم (٨, ٤). تغير تركيز الأيودين والزينون عند تغير قدرة المفاعل [١٧].

(٨,٥) تسمم المفاعل بعنصر السميوم (Sm)

يُعدُّ السميوم أهم ثاني العناصر السامة للمفاعل، حيث يتمتع بمقطع عرضي مجهري كبير لامتصاص النيوترونات الحرارية، الذي يُساوي 4×10^4 بارن. ويُنتج هذا العنصر المستقر عن طريق سلسلة التفكك الإشعاعي لعنصر النيودينيوم، ^{149}Nd الناتج عن انشطار المواد الثقيلة الانشطارية، كما هو موضح في الشكل رقم (٨,٥).



الشكل رقم (٨,٥). إنتاج عنصر السميوم في قلب المفاعل.

يظهر الجدول رقم (٨,٣) نسبة إنتاج اليودينيوم ^{149}Nd لكل انشطار وأهم المواد الثقيلة الانشطارية.

الجدول رقم (٨,٣). نسبة إنتاج عنصر ^{149}Nd لكل انشطار.

^{239}Pu	^{235}U	^{233}U	المادة الانشطارية
0.0190	0.0113	0.0066	γ_{Nd149}

نلاحظ في الشكل رقم (٨, ٥) أن عمر نصف تفكك ^{149}Nd ($T_{1/2} = 1.7 \text{ hr.}$) قصير مقارنةً بعمر نصف البروميثيوم ^{149}Pr ولهذا يمكن اعتبار أن ^{149}Pm يُنتج مباشرةً بالانشطار، مما يجعل معادلات إنتاج عنصر السميوم واستهلاكه على النحو الآتي:

$$\begin{aligned} \frac{dP}{dt} &= \gamma_{Nd} \sum_f \phi - \lambda_p P \\ \frac{dS}{dt} &= \lambda_p P - \sigma_a^S \phi S \end{aligned} \quad (٨, ٤٠)$$

حيث إن:

P: عدد ذرات البروميثيوم.

S: السميوم.

أما حل هذا النظام من المعادلات فيكون على النحو الآتي:

$$\begin{aligned} P(t) &= \frac{\gamma_{Nd} \sum_f \phi}{\lambda_p} (1 - e^{-\lambda_p t}) + P(0) e^{-\lambda_p t} \\ S(t) &= S(0) e^{-\sigma_a^S \phi t} + \frac{\gamma_{Nd} \sum_f \phi}{\sigma_a^S} (1 - e^{-\sigma_a^S \phi t}) \\ &\quad - \frac{\gamma_{Nd} \sum_f \phi - \lambda_p P(0)}{\lambda_p - \sigma_a^S \phi} (e^{-\sigma_a^S \phi t} - e^{-\lambda_p t}) \end{aligned} \quad (٨, ٤١)$$

(٨, ٥, ١) فاعلية السميوم عند الاتزان

يساوي تركيز البروميثيوم والسمييوم الصفر ($P(0) = S(0) = 0$) في بداية تشغيل مفاعل جديد، ثم أثناء التشغيل يتراكم السميوم تدريجياً حتى يصل إلى قمة محددة عند الاتزان، أي عند تساوي الإنتاج والاستهلاك، وذلك بعد فترة معينة. ولحساب كمية السميوم عند الاتزان يمكن حساب $t = \infty$ في معادلات الحل (٨, ٤١)، أو جعل معادلات الإنتاج والاستهلاك (٨, ٤٠) تساوي الصفر. وهكذا تصبح كميات البروميثيوم والسميوم عند الاتزان كما يلي:

(٨, ٤٢)

$$P_{eq(\infty)} = \frac{\gamma_{Nd} \sum_f \phi}{\lambda_p}$$

$$S_{eq(\infty)} = \frac{\gamma_{Nd} \sum_f}{\sigma_a^S}$$

نلاحظ أن ائزان البروميثيوم مرتبط بمستوى فيض النيوترونات لكن ائزان السمريوم ليس له ارتباط مباشر بذلك إلا أنه تحت تأثير المقطع المجهري σ_a^S . أما الفترة الزمنية التي يتحقق بعدها ائزان السمريوم فهي مرتبطة بفيض النيوترونات Φ و λ_p . وتصل هذه الفترة إلى حوالي أسبوع بالنسبة للمفاعلات الحرارية ذات فيض للنيوترونات يقارب ($\Phi = 5 \times 10^{13}$ n/cm².sec).

تُحسب فاعلية السمريوم عند الاتزان وفق معادلة الفاعلية (٨, ٢١) الخاصة بالعناصر السامة للتفاعل المذكورة سابقاً.

(٨, ٤٣)

$$\rho_{Sm}^{eq} = -\frac{\sum_a^S}{\nu p \epsilon \sum_f} = -\frac{\gamma_{Nd} \sum_f}{\nu p \epsilon \sum_f}$$

$$= -\frac{\gamma_{Nd}}{\nu p \epsilon}$$

وبالنسبة للمفاعلات الحرارية الكبيرة ($\beta \approx 1$) التي تحتوي على وقود اليورانيوم ²³⁵U، فإن فاعلية السمريوم عند الاتزان لها القيمة الآتية:

$$\rho_{Sm}^{eq} = -\frac{0.0113}{2.42} = -0.0046$$

(٨, ٥, ٢) تطور فاعلية السمريوم عند توقف المفاعل

عند إخماد مفاعل وصل إلى مرحلة ائزان، يتوقف إنتاج السمريوم واستهلاكه بسبب توقف إنتاج النيوترونات وامتصاصها من طرف هذا العنصر، لكن يتواصل إنتاجه عن طريق تفكك البروميثيوم. وبعد فترة طويلة نسبياً يقترب تركيز السمريوم من مجموع قيم ائزان العنصرين P و S، كما هو موضح في معادلات حل نظام تركيز ذرات البروميثيوم والسمريوم.

وعند الأخذ بالشروط الحدودية الآتية :

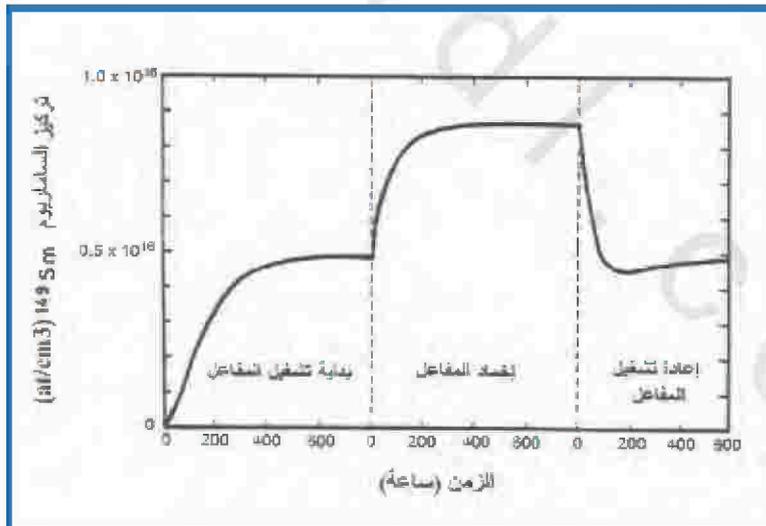
$$S(0) = S_{eq} \quad , \quad P(0) = P_{eq} \quad \Leftarrow \quad 0 = \phi$$

نحصل في هذه الحالة على تركيز ذرات البروميثيوم والسمريوم كما يلي :

$$P(t) = P_{eq} e^{-\lambda p t}$$

$$(٨, ٤٤) \quad S(t) = S_{eq} + P_{eq} (1 - e^{-\lambda p t}) \rightarrow S_{eq} + P_{eq} \\ t \rightarrow \infty$$

عند تشغيل المفاعل من جديد يبدأ استهلاك السمريوم مباشرة فتتناقص كميته في المفاعل حتى تولد كميات كافية من البروميثيوم من جديد فتساهم في إنتاج السمريوم. وهكذا تبدأ تتزايد كميته حتى تصل إلى مرحلة جديدة من الاتزان كما هو موضح في الشكل رقم (٨, ٦).



الشكل رقم (٨, ٦). تغير تركيز السمريوم في مختلف مراحل تشغيل المفاعل [١٦].

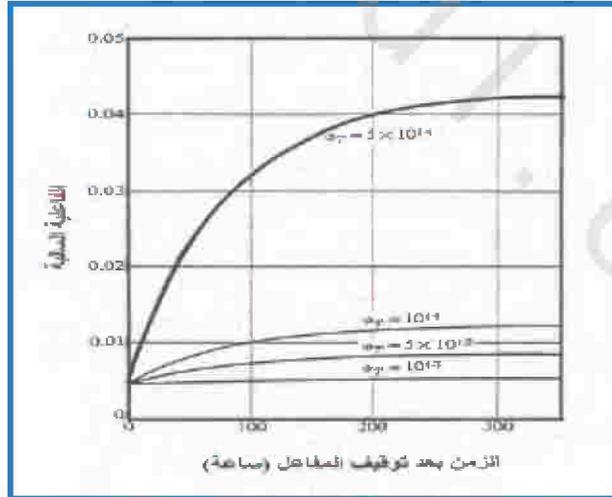
تغير فاعلية السميوم مع الزمن بعد توقف المفاعل أيضاً وفق المعادلة (٨,٣٠) الخاصة بفاعلية العناصر السامة للتفاعل. وعند استعمال هذه المعادلة ومعادلة تركيز السميوم (٨,٤٤) نحصل على ما يلي:

$$\begin{aligned} \rho_{Sm}^{(t)} &= -\frac{\sum_a^p}{\nu p \epsilon \sum_f} = -\frac{\bar{\sigma}_a^S S(t)}{\nu p \epsilon \sum_f} \\ (٨,٤٥) \quad &= -\frac{\gamma Nd}{\nu p \epsilon} \left[1 + \frac{\phi}{\phi_s} (1 - e^{-\lambda p t}) \right] \end{aligned}$$

حيث إن:

$$T = 20^0 \quad ; \quad (cm^{-2}/sec) \quad 6.180 \times 10^{13} = \frac{\lambda p}{\bar{\sigma}_a^S} = \phi_s$$

يُوضح الشكل رقم (٨,٧) تغير فاعلية السميوم مع الزمن للمفاعلات ذات ألياف النيوترونات المختلفة.



الشكل رقم (٨,٧). تطور فاعلية السميوم بعد توقف المفاعل [١٣].

ويُلاحظ أن فاعلية السميوم مرتبطة بمستوى فيض النيوترونات قبل توقف المفاعل، وتتزايد مع تزايد مستوى الفيض. كما يُلاحظ أيضاً أن القمة القصوى لهذه الفاعلية لها المعادلة الآتية:

$$(٨, ٤٦) \quad \rho_{Sm}^{Max} = -\frac{\lambda_p}{\nu p \epsilon} \left(1 + \frac{\phi}{\phi_S}\right)$$

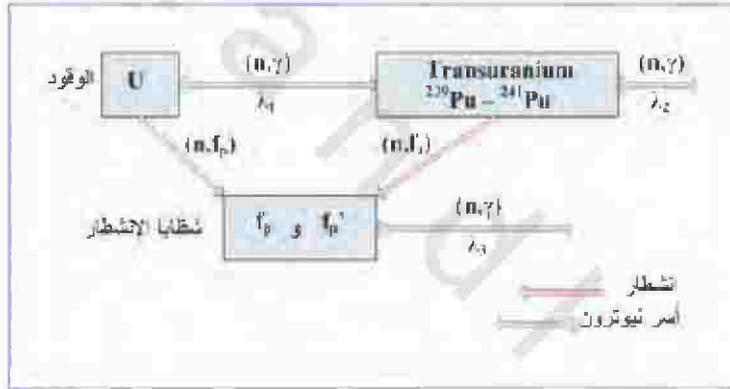
(٨, ٦) تغير خصائص مكونات المفاعل مع الزمن

تبدأ تغيرات خصائص مكونات قلب المفاعل من لحظة بداية تشغيله بسبب الانشطارات وارتفاع درجة الحرارة. وتؤدي الانشطارات إلى استهلاك المواد الانشطارية في الوقود واستنزافه تدريجياً ومن ثم توليد عناصر جديدة يمكن تقسيمها إلى نوعين. ويتمثل النوع الأول في عناصر ما وراء اليورانيوم، أي العناصر الأثقل من اليورانيوم ($Z > 92$)، التي تحتوي على بعض الانشطارية الجديدة مثل البلوتونيوم ^{241}Pu و ^{239}Pu التي تساهم بدورها في الانشطارات. أما النوع الثاني فيتمثل في عناصر شظايا الانشطار الكثيرة التي تساهم في إنتاج الطاقة بإشعاعاتها المؤينة، وكذلك تسمم التفاعل بدرجات متفاوتة كما سبق شرحه.

توزيع هذه الأحداث مرتبط بتوزيع فيض النيوترونات (القدرة)، الذي هو أيضاً مرتبط بتوزيع الوقود في قلب المفاعل. وبما أن فيض النيوترونات غير ثابت حتى في المفاعلات المتجانسة، فيجب العمل على اختيار التوزيع الأمثل للوقود الذي يضمن قدر الإمكان انتظاماً شبه متساو للفيض في كل أنحاء قلب المفاعل؛ ذلك لأن عمر الوقود مرتبط بنسبة استنزافه والقدرة المنتجة منه؛ ولهذا سندرس في هذا الجزء التغيرات الأساسية التي تحصل للوقود وتراكم شظايا الانشطار ونظائرها، ومن ثم العمل على إيجاد التوزيع الأمثل للوقود لإطالة عمره قدر الإمكان.

(٨,٦,١) استهلاك الوقود واستزافه

عندما يتعرض وقود اليورانيوم الذي يحتوي على نظائر ^{235}U و ^{238}U إلى فيض النيوترونات في قلب المفاعل، تولد عناصر ثقيلة ($Z > 92$) نتيجة امتصاص تلك النظائر للنيوترونات، وتولد كذلك عناصر خفيفة نسبياً (شظايا الانشطار) نتيجة انشطار اليورانيوم ^{235}U . وتحتوي على العناصر الثقيلة المنتجة عن مواد انشطارية مثل البلوتونيوم (^{239}Pu و ^{241}Pu)، التي تساهم بدورها في عملية الانشطار. لكن عندما يكون الوقود مصنعاً من الثوريوم (Th)، فإن المادة الانشطارية الجديدة هي اليورانيوم، ^{233}U . ويوضح الشكل رقم (٨,٨) على سبيل المثال أهم الأحداث التي تحصل لوقود اليورانيوم.



الشكل رقم (٨,٨). تعرض وقود اليورانيوم إلى فيض النيوترونات.

يؤدي تعرض الوقود إلى فيض النيوترونات إلى استزاف عناصره عن طريق الانشطار والتفكك وامتصاص النيوترونات وتوليد عناصر جديدة كثيرة. ويمكن حساب تغير ذرات الوقود مع الزمن لكل من اليورانيوم والعناصر الثقيلة عن طريق معادلات الإنتاج والاستهلاك. وبشكل عام فإن معادلة استزاف الوقود التي تعبر عن تغير ذرات النظير زمثلاً تكون على النحو الآتي:

$$(٨, ٤٧) \quad \frac{dN_j}{dt} = (\sum_g \sigma_c^i \phi_g) N_i + \sum_K (\lambda_{K \rightarrow j} N_K) - (\sum_g \sigma_a^j \phi_g N_j) - \lambda_j N_j$$

حيث إن:

$\sum_g \sigma_{cg}^i \phi_g$: تزايد ذرات العنصر i بتحول العنصر i عن طريق أسر النيوترونات.

$\lambda_{k \rightarrow j} N_k$: تزايد ذرات العنصر j عن طريق تفكك العنصر k .

$\sum_g \sigma_a^j \phi_g N_j$: تناقص ذرات العنصر j عن طريق الأسر والانشطار.

$\lambda_j N_j$: تناقص ذرات العنصر j عن طريق التفكك.

تجدر الإشارة إلى أن قيم المقاطع المجهرية التي تظهر في المعادلة السابقة تُحسب وفق طاقة زمرة النيوترونات g المناسبة لها اعتماداً على نظرية انتشار الزمر المتعددة. ويحتاج التحليل الدقيق إلى تركيز العناصر الثقيلة ($Z \geq 92 - 95$) في الوقود إلى حل حوالي عشرين معادلة لكل زمرة g من النيوترونات. وعلى سبيل المثال لو أردنا معرفة تركيز المواد الانشطارية فقط لوقود اليورانيوم وافترضنا أن فيض النيوترونات ثابت لتسهيل الحسابات، لوجب حل المعادلات الثلاث الآتية:

$$(٨, ٤٨) \quad \frac{dU^{235}}{dt} = [\sigma_\gamma U^{235} - \sigma_a U^{235}] \phi$$

$$(٨, ٤٩) \quad \frac{dP_u^{239}}{dt} = \lambda N_p^{239} + [\sigma_\gamma P_u^{238} - \sigma_a P_u^{239}] \phi$$

$$(٨, ٥٠) \quad \frac{dP_u^{241}}{dt} = [\sigma_\gamma P_u^{240} - \sigma_a P_u^{241}] \phi - \lambda P_u^{241}$$

حيث إن:

λN^x : عدد ذرات العنصر.

N^x : ضارب ثابت تفككه.

σN^x : المقطع العرضي المجهرية المناسب للعنصر N^x .

(٨, ٦, ٢) تركيز نظائر شظايا الانشطار:

عند انشطار اليورانيوم ^{235}U تُنتج بعض النيوترونات، وشظيبتان، أو ثلاث مختلفة الكتلة. وتتميز كل شظايا الانشطار بنشاط إشعاعي وقدرة متفاوتة في امتصاص النيوترونات. ويمكن حساب تركيز هذه النظائر أيضاً باستعمال معادلات الإنتاج والاستهلاك المذكورة سابقاً. وعند افتراض فيض النيوترونات ثابتاً لتسهيل الحسابات يصبح تركيز نظائر شظايا الانشطار على النحو الآتي:

$$(٨, ٥١) \quad \frac{dN_j}{dt} = \gamma_j \sum_f \phi + \sum_i (\lambda_{i \rightarrow j} + \sigma^{i \rightarrow j} \phi) N_i - (\lambda_j + \sigma_a^j \phi) N_j$$

حيث إن:

γ_j : تمثل نسبة إنتاج النظير j لكل انشطار.

λ_j : ثابت التفكك.

σ_a^j : المقطع العرضي للامتصاص للنظير j .

$\lambda_{i \rightarrow j}$: ثابت التفكك.

$\sigma_{i \rightarrow j}$: المقطع العرضي للنظير i لإنتاج النظير j .

يُمكن استعمال المعادلة السابقة، على سبيل المثال لحساب تركيز الزينون كما تم

حسابه سابقاً، فنحصل على ما يلي:

$$(٨, ٥٢) \quad \frac{dN_{Xe}}{dt} = \gamma_{Xe} \sum_f \phi + \lambda_I N_I - (\lambda_{Xe} + \sigma_a^{Xe} \phi) N_{Xe}$$

لقد حُسب تأثير العناصر السامة المهمة مثل الزينون والسمريوم، إلا أن في

الواقع كل شظايا الانشطار ونظائرها المشعة تعدُّ سامة للتفاعل، لكن بدرجات تفاوت

كبيرة جداً. فمنها ما ينتهي بسرعة بالنسبة للنظائر ذات عمر نصف قصير، ومنها ما

يصل إلى الاتزان، ومنها ما يتراكم في الوقود لطول عمر نصفه. لهذا فعادةً ما يُقدَّر تأثير

مجموع تراكم هذه النظائر داخل الوقود، واعتبارها مادة مستقرة سامة لها مقطع عرضي يساوي حوالي $\bar{\sigma}_{pp} \approx 50$ بارن لكل انشطار. أما الزينون والسمريوم اللذان يصلان إلى الاتزان بسرعة مقارنة بعمر الوقود، فيُحسب تأثيرهما كما سبق شرحه.

(٨, ٦, ٣) حل معادلات استنزاف الوقود

يؤدي حل معادلات استنزاف الوقود إلى معرفة تركيز مختلف العناصر في قلب المفاعل التي تساعد على أفضل استفادة من الوقود وبرمجة سليمة لتشغيل المفاعل. ارتباط هذه المعادلات التفاضلية بفيض النيوترونات الذي بدوره مرتبط بتوزيع الوقود يزيدا تعقيداً مما يحتم استخدام برامج كود وحاسبات آلية ذات ذاكرة كبيرة. ولحل هذه المعادلات عملياً، فعادةً ما يُستعمل الكود لحساب مكونات قلب المفاعل من فترة إلى أخرى، وذلك باستخدام نتائج حسابات الفترة الزمنية التي تسبقها في كل واحدة. ولهذا الغرض يُحسب فيض النيوترونات في بداية تشغيل المفاعل ($t = 0$) بحكم أن توزيع الوقود ومكوناته معروفة، وكذلك مواقع قضبان التحكم إلى آخره. ثم يُستعمل الفيض الناتج لحل معادلات الاستنزاف خلال الفترة الأولى Δt . بعد ذلك يُحسب الفيض من جديد في بداية الفترة الثانية $t_1 = t_0 + \Delta t$ استناداً إلى نتائج حسابات مكونات المفاعل في نهاية الفترة الأولى. وهكذا تتكرر دورة هذه الحسابات، وتعديل مواقع قضبان التحكم، وتركيز البورون في المبرد إذا دعت الحاجة لذلك للمحافظة على الحالة المرجحة للمفاعل. ونلاحظ أن طريقة الحساب هذه تفترض ثبوت الفيض أثناء الفترة المعتمدة ($t_i < t < t_{i+1}$)؛ وكلما كانت هذه الفترة قصيرة طال وقت الحسابات وتحسنت دقة نتائج. وللقيام بهذه الحسابات تكتب معادلات استنزاف الوقود على شكل مصفوفات على النحو الآتي:

$$(٨, ٥٣) \quad \frac{dN(t)}{dt} = A[\phi(t_i)N(t)] + F[\phi(t_i)] \quad ; \quad t_i < t < t_{i+1}$$

أما حل هذه المعادلات فهو كما يلي :

$$(٨,٥٤) \quad N(t_{i+1}) = \exp[A(t_i)\Delta t]N(t_i) + A^{-1}(t_i)[\exp(A(t_i)\Delta t) - 1]F(t_i)$$

علماً أن دقة النتائج مرتبط بالفترة الزمنية Δt ، فيجب العمل على أن يكون الفيض في هذه الفترة ثابتاً، وذلك لتحقيق الشرط الآتي :

$$(٨,٥٥) \quad (\lambda_i + \sigma_a^i \phi)\Delta t \ll 1$$

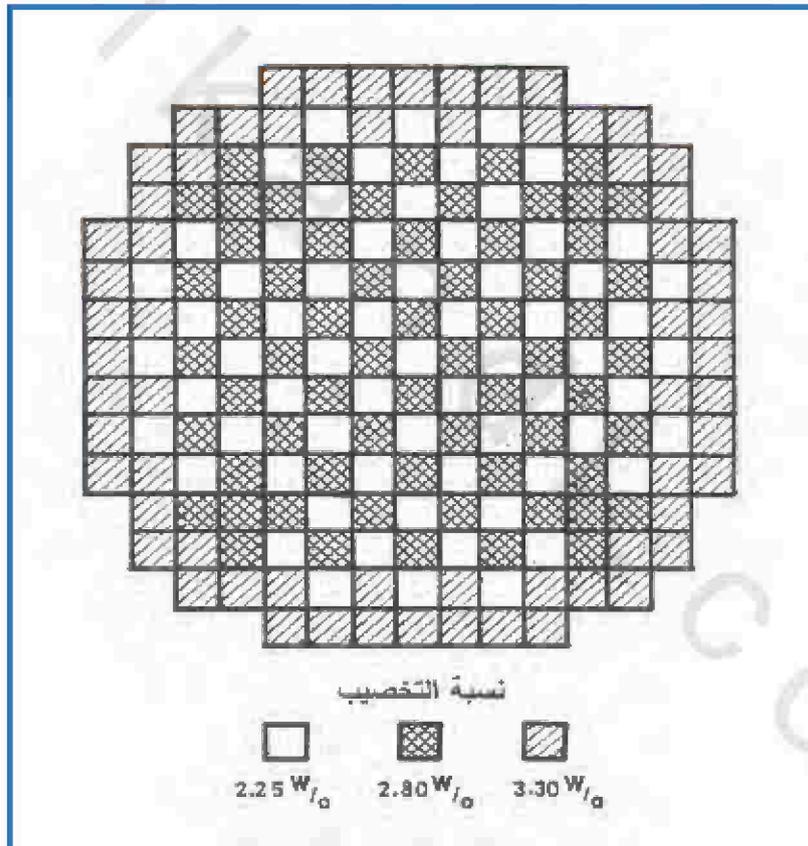
(٨,٦,٤) التوزيع الأمثل للاستفادة من الوقود

توزيع الوقود من البداية في أنحاء قلب المفاعل له تأثير مباشر على عمره، وهو ما يسمى بدورة الوقود. علماً أن استنزافه مرتبط أيضاً بفيض النيوترونات، الذي يكون غير منتظم وثابت حتى في المفاعلات المتجانسة. ولهذا يجب العمل على اختيار تصميم أمثل لتوزيع الوقود؛ وذلك لتفادي استهلاك كبير للوقود في وسط قلب المفاعل وقليل في الأطراف. ويفضل عادة استعمال وقود مختلف نسبة التخصيب فيه وتوزيعه بشكل يؤدي إلى تسطيح فيض النيوترونات وإنتاج قدرة شبه ثابتة في كل أنحاء المفاعل، كما هو موضح في الشكل رقم (٨,٩) بالنسبة لمفاعلات الماء المضغوط (PWR).

عند انتهاء الدورة الأولى للوقود (سنة إلى سنة ونصف) لا يغير كل الوقود، بل تُسحب مجموعات أقلام الوقود الأكثر استهلاكاً التي توجد في الوسط، وتحول مجموعات الأطراف إلى الوسط، وتُضاف مجموعات جديدة من الوقود في الأطراف. وبهذه الطريقة، فإن معدل بقاء مجموعات الوقود في المفاعل تساوي حوالي ثلاث سنوات.

السؤال الآن: كيف تُحسب دورة الوقود؟ ومتى يجب تغيير مجموعات أقلام الوقود؟.. يكمن الجواب عن هذا السؤال من نتائج حسابات استنزاف الوقود السابقة. ذلك، كما سبق شرحه، أن لكل فترة أو مجموعة من الفترات، يجب تخفيض تركيز

البورون في المبرد، أو تعديل مواقع قضبان التحكم ورفعها للتخلص من الفاعلية السالبة الناتجة عن استنزاف الوقود وتراكم النظائر السامة. وتنتهي دورة الوقود عند استنزاف الفاعلية الموجبة الأولية ويصبح المفاعل في المرحلة تحت الحرجة على الرغم من رفع كل قضبان التحكم إلى الحد المسموح به لسلامة المحطة. وهكذا تُحدد مدة دورة الوقود بجمع كل الفترات السابقة التي تؤدي إلى توقف المفاعل ($t_c = \sum \Delta t_i$).



الشكل رقم (٨، ٩). التوزيع الأولي للوقود في قلب المفاعل (PWR) [١٤].

يُمكن تقدير دورة الوقود أيضاً بطريقة أخرى، وذلك باعتماد النموذج المبسط الذي يعتمد على افتراض أن المفاعل كبير ($\epsilon_p \approx 1$) والاهتمام بالتحكم في مستوى الفاعلية فقط لبقاء المفاعل حرجاً. وفي هذه الحالة نحصل على المعادلة الآتية:

$$(٨, ٥٦) \quad K \approx \eta f = \frac{\eta \sum_a^F(t)}{\sum_a^F(t) + \sum_a^M + \sum_a^{fp}(t) + \sum_c(t)} = 1$$

حيث إن:

\sum_a^F و \sum_a^M : المقطع العرضي المجهاري للوقود والمهدئ تتالياً.
 \sum_c و \sum_a^{fp} : المقطع العرضي المجهاري لنظائر شظايا الانشطار وباقي المواد الماصة للنيوترونات، مثل قضبان التحكم، وكميات البورون المضافة إلى سائل التبريد إلى آخره.

وعند افتراض أن معامل الانشطار الحراري η ثابت مع الزمن والمفاعل يُنتج قدرة شبه ثابتة يمكن استنتاج ما يلي:

$$(٨, ٥٧) \quad P(t) = \text{const} \Rightarrow v \sum_f^F(t) \phi(t) = v \sum_f^F(0) \phi(0) \\ \Rightarrow \phi(t) = \frac{\phi(0)}{1 - \epsilon \sigma_a^F \phi(0) t}$$

حيث إن:

$\phi(0)$: فيض النيوترونات.
 $\sum_f^F(0)$: المقطع العرضي المجهاري لانشطار الوقود في البداية.
 $1 < \epsilon$: معامل الانشطارات السريعة.

كذلك يُمكن استنتاج تغير المقاطع العرضية المجهرية الآتية:
 أولاً: المقطع العرضي المجهاري للوقود:

$$(٨, ٥٨) \quad \sum_a^F(t) = N_F(t) \sigma_a^F = \sigma_a^F [N_F(0) - \epsilon \sigma_a^F \int_0^t N_F(t') \phi(t') dt'] \\ = \sum_a^F(0) [1 - \epsilon \phi(0) \sigma_a^F t]$$

ثانياً: المقطع العرضي المجهاري لكل النظائر السامة:

$$(٨, ٥٩) \quad \Sigma_{fp} = \Sigma_{pp} + \Sigma_{f'p}$$

$$(٨, ٦٠) \quad \Sigma_{pp} = \sigma_{pp} \Sigma_f(t) \phi(t) t = \sigma_{pp} \Sigma_f(0) \phi(0) t$$

$$(٨, ٦١) \quad \begin{aligned} \Sigma_{f'p} &= \Sigma_a^x(t) + \Sigma_a^s(t) \\ &= \frac{(\gamma_{Te} + \gamma_x) \Sigma_f(0) \phi(0)}{\frac{\lambda_X}{\sigma_a^x} + \phi(t)} + \gamma_{Nd} \Sigma_f(t) \end{aligned}$$

حيث إن:

Σ_{pp} : المقطع العرضي المجهاري للنظائر السامة المستقرة، علماً بأن متوسط المقطع العرضي $\sigma_{pp} = 50$ بارن لكل انشطار.

Σ_{fp} : مجموع المقاطع المجهرية لعنصري الزينون والسمريوم.

وبالعودة إلى المعادلة (٨, ٥٦) يمكن استنتاج قيمة المقطع العرضي Σ_c التي تساوي الصفر عندما يصل المفاعل إلى المرحلة دون الحرجة. علماً أن مستوى الفاعلية موجب في بداية تشغيل المفاعل ρ_{ex} . ويمكن حساب مدة دورة الوقود على النحو الآتي:

$$(٨, ٦٢) \quad \rho_{ex} = \frac{K(0) - 1}{K(0)}$$

$$(٨, ٦٣) \quad \Sigma_c(t) = (\eta - 1) \Sigma_a^F(t) - \Sigma_a^M - \Sigma_a^{fp}(t) = 0$$

وعند تعويض المقاطع العرضية المجهرية في هذه المعادلة بالقيم السابقة وتعويض قيمة الفيض $\phi(t)$ بقيمة المعادلة (٨, ٥٧)، نحصل على مدة دورة الوقود على النحو الآتي:

$$(٨, ٦٤) \quad t_{FC}(1) = \frac{\eta \rho_{ex}(1-\alpha) - (\gamma_{Tc} + \gamma_x) \phi(0) \frac{\sigma_a^x}{\lambda_x} - \gamma_{Nd}}{[(\eta-1)(1+\alpha)\sigma_a^x - \gamma_{Nd}\sigma_a^F + \sigma_{pp}]\phi(0)}$$

$$\phi(t) \ll \frac{\lambda_x}{\sigma_a^x}$$

$$(٨, ٦٥) \quad t_{FC}(2) = \frac{\eta \rho_{ex}(1-\alpha) - (\gamma_{Te} + \gamma_x + \gamma_{Nd})}{[(\eta-1)(1+\alpha)\sigma_a^F - (\gamma_{Te} + \gamma_x + \gamma_{Nd})\sigma_a^F + \sigma_{pp}]\phi(0)}$$

$$\phi(t) \gg \frac{\lambda_x}{\sigma_a^x}$$

حيث إن :

$$\frac{\sigma_c \cdot N_F}{\sigma_f \cdot N_F} = \alpha$$

تجدر الإشارة إلى أن معادلات مدة دورة الوقود تُظهر بوضوح أن هذه المدة تتناسب عكسياً مع فيض النيوترونات $\phi(0)$ ، أو قدرة تشغيل المفاعل. وتظهر كذلك أن هذه المدة تتناسب مع الفاعلية المخزنة ρ_{ex} في بداية التشغيل ، التي يجب أن تكون كافية لتعويض فقدان الفاعلية بسبب المواد السامة واستنزاف الوقود طيلة مدة دورته.

(٨, ٧) تمارين

- ١- اشرح تأثير الفاعلية بتغير درجة الحرارة.
- ٢- هل تتأثر الفاعلية بتراكم المواد الانشطارية داخل المفاعل؟ ولماذا؟
- ٣- ما أهم النظائر المولدة أثناء تشغيل المفاعل المؤثرة في الفاعلية؟ وما تأثيرها أثناء التشغيل وإعادة تشغيل المفاعل؟
- ٤- اشرح أسباب تغير مكونات المفاعل مع الزمن.

٥- ما هو التوزيع الأمثل للوقود داخل المفاعل لعدم استنزافه بسرعة وإطالة دورة الوقود للمفاعل؟

٦- مفاعل نووي للماء العادي يحتوي على وقود ثاني أكسيد اليورانيوم UO_2 المخضب بنسبة ٣٪ موزع داخل قلب المفاعل على شكل أقلام نصف قطر كل منها يساوي ١٠ سم (كثافة $\rho = 10 \text{ g/cm}^3$). قسم قلب المفاعل إلى خلايا أسطوانية من الماء داخل كل منها قلم وقود، علماً أنه عند درجة الحرارة 300°K والمعطيات الآتية:

$$\frac{\phi_u}{\phi_m} = 0.948 \quad \xi = \frac{\sum p}{N_F} = 100 \quad \text{و} \quad \theta_T(UO_2) = 1.75 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{K}^{-1}$$

احسب ما يلي أثناء تشغيل المفاعل عند درجة الحرارة 600°K

(أ) احتمال الهروب من الامتصاص p عند درجة الحرارة $T=300^\circ\text{K}$.

(ب) معامل الفاعلية لمفعول ظاهرة دويلر الفوري للوقود.

(ج) معامل الفاعلية للاستعمال الحراري f الفوري للوقود.

(د) معامل الفاعلية الإجمالي للوقود.

٧- إذا أخذنا معطيات التمرين السابق نفسها رقم ٦ علماً أن معامل الفاعلية

لتسرب النيوترونات يساوي $\alpha_T^f = -2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{K} \frac{\Delta k}{k}$ و $\theta_m = 1.0 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{K}$

فاحسب ما يلي:

(أ) معامل الاستعمال الحراري f عند درجة الحرارة $(T=300^\circ\text{K})$.

(ب) معامل الفاعلية لمفعول ظاهرة دويلر للمهدئ عند التشغيل.

(ج) معامل الفاعلية للاستعمال الحراري f للمهدئ عند التشغيل.

(د) مفاعل الفاعلية الإجمالي للمهدئ.

٨- لنفرض أن مفاعلاً نووياً للماء يستخدم وقود اليورانيوم U^{235} المخضب

قليلاً وشغّل لمدة طويلة نسبياً، علماً أن هذا المفاعل كبير الحجم مما يسمح

بافتراض $\epsilon p \approx 1$ وفيض النيوترونات يساوي $\Phi = 2.10^{13} \text{ n/cm}^2 \text{ sec}$ ، فاحسب في هذه الحالة ما يلي :

أ) تركيز عنصر الزينون السام عند الاتزان.

ب) كمية الفاعلية الناتجة عن تسمم المفاعل بالزينون.

٩- إذا كان لدينا معطيات تمرين رقم ٨ نفسها ، فاحسب ما يلي :

أ) تركيز عنصر السميوم عند الاتزان.

ب) كمية الفاعلية الناتجة عن تسمم المفاعل بالسميوم.

١٠- لأسباب طارئة تم إخماد مفاعل التمرين ٨ بإدخال قضبان التحكم ، ولم

يبق مخزون فاعليته لديه إلا ٢٪ ، فاحسب في هذه الحالة ما يلي :

أ) الفاعلية الناتجة عن تسمم المفاعل بالزينون والسميوم عند توقف المفاعل.

ب) الفاعلية الناتجة عن عنصري التسمم Xe و Sm عندما يصل الزينون إلى

أعلى قيمة له بعد إيقاف المفاعل.

ج) هل يمكن تشغيل المفاعل مباشرة من جديد بعد إيقافه؟

ثم احسب فترة موت المفاعل عند افتراض عدم وجود مخزون من الفاعلية.