الفصل الخامس

عوامل تضاعف النيوترونات في المفاعلات النووية

• مقدمة • عامل التضاعف اللانهائي (K_∞) • عامل التضاعف (K_m) للمفاعلات المتجانسة • عامل التضاعف (K_m) للمفاعلات غير المتجانسة • عامل التضاعف الفعَّال (K_{eff}) • تأثيرات عواكس النيوترونات • تمارين

(٥,١) مقدمة

عندما شرحنا عملية الانشطار النووي المتسلسل وضحنا أن استمرار هذه العملية ذاتياً وبدون تدخل خارجي، ويحتم التوازن بين عدد النيوترونات الانشطارية المنتجة وبين عدد النيوترونات المفقودة عن طريق الامتصاص، أو التسرب؛ ذلك لأن عدم الاتزان يؤدي إلى توقف الانشطار المتسلسل بعد فترة أو تزايد سريع في الانشطارات حتى الانفجار. وبما أن عدد التفاعلات الانشطارية يتناسب مع عدد النيوترونات، يُفضل عادة حساب هذه التفاعلات عن طريق حساب النيوترونات داخل المفاعل. ولهذا الغرض نحتاج حساب ما يسمى بعامل تضاعف النيوترونات الذي يُعرف بمتوسط نسبة أعداد نيوترونات الأجيال المتتالية.

obeikandl.com

إذا اعتبرنا أن أبعاد المفاعل غير منتهية من جميع الاتجاهات جدلاً، أو أن المفاعل كبير جداً، بحيث لا تتسرب منه النيوترونات إلى الخارج نستعمل ما يسمى بعامل التضاعف اللانهائي (K_∞). أما إذا كان الأمر عكس ذلك، أي هناك فقدان للنيوترونات عن طريق الامتصاص والتسرب أيضاً، فنستعمل ما يسمى بعامل التضاعف الفعَّال (K_{eff}). وسنتطرق في هذا الفصل إلى شرح معالم كل من عوامل تضاعف النيوترونات اللانهائي والفعَّال حسب نوعية المفاعل. ثم نتناول أيضاً موضوع عواكس النيوترونات وكيفية الاستفادة منها عند وضعها حول قلب المفاعل لخفض الكتلة الحرجة.

(٥,٢) عامل التضاعف اللانهائي (K_∞)

عند إهمال تسرب النيوترونات من المفاعل سواء لكبر حجمه أو افتراض أن أبعاده غير منتهية جدلاً، تصبح نهاية النيوترونات عن طريق الامتصاص فقط. في هذه الحالة يحدد نمو النيوترونات عامل التضاعف اللانهائي الذي يعبر عن نسبة عدد النيوترونات المنتجة إلى عدد النيوترونات الممتصة وفق المعادلة الآتية:

$$K_\infty = \frac{n_p}{n_a} \qquad (٥,١)$$

حيث إن n_p عدد النيوترونات المنتجة وn_a عدد النيوترونات الممتصة.

لمعرفة مكونات عامل التضاعف (K_∞) يجب تتبع الأحداث التي تحصل لجيل من النيوترونات خلال دورة كاملة مروراً بمرحلتي التهدئة والانشطار حتى الوصول إلى عملية الامتصاص وتوليد الانشطارات الجديدة؛ ولهذا الغرض نفرض أن لدينا جيلاً من النيوترونات يحتوي على n_p نيوترون انشطاري سريع، وعند تتبع الأحداث التي تمر بها النيوترونات نجد أن هنالك أربعة أحداث مهمة نعبر عن كل منها بمعامل خاص كما يلي:

أولاً: معامل الانشطار السريع (ε)

تُسبب بعض النيوترونات انشطارات وهي لا تزال سريعة فيزداد عدد النيوترونات الأصلية، ويعبر عن هذه الظاهرة بمعامل الانشطار السريع.

ثانياً: معامل احتمال الهروب من الامتصاص (p)

أثناء مرحلة التهدئة تمر النيوترونات بمنطقة رنين اليورانيوم التي تتخللها قمم متعددة تمثل مصايد للنيوترونات، حيث يتم أسر بعضها خلال مرورها بتلك القمم. ويُعبر هذا المعامل على احتمال نجاة النيوترون من الأسر في هذه المصايد.

ثالثاً: معامل الاستعمال الحراري (f)

تمتص المواد غير الانشطارية المكونة للمفاعل كمية من النيوترونات التي وصلت بسلام للمرحلة الحرارية. ويُعبر هذا المعامل على فقدان هذه الكمية من النيوترونات.

رابعاً: معامل الانشطار الحراري (η)

يمتص الوقود بعد ذلك النيوترونات الحرارية المتبقية لكن لا يؤدي كل امتصاص إلى انشطارات مولدة إلى نيوترونات سريعة وجيل جديد. ويُعبر هذا المعامل على فقدان النيوترونات بالأسر في الوقود.

ولهذا عادة ما يُعبر عن عامل التضاعف اللانهائي بالمعادلة ذات المعاملات الأربع الآتية:

$$K_{\infty} = \frac{n_p}{n_a} = \eta \varepsilon p f \qquad (٥,٢)$$

تجدر الإشارة إلى أن المعامل η يعتمد على مكونات الوقود فقط، ولهذا فهو يميز نوع الوقود المستعمل. أما المعاملات الأخرى فهي تعتمد على نوع الوقود وشبكة توزيعه داخل المفاعل. وسنتطرق الآن إلى دراسة كل العوامل حسب أنواع المفاعلات النووية.

(٥,٣) عامل التضاعف (K_∞) للمفاعلات المتجانسة

إذا كانت كثافة المفاعل ثابتة في كل المناطق وتوزيع المواد متساوياً، بحيث يكون الوقود ذائباً مثلاً في سائل التبريد والتهدئة، يعدُّ المفاعل متجانساً في هذه الحالة. وبما أن توزيع الوقود داخل المفاعل له تأثير على جل المعالم الأربعة الخاصة بعامل التضاعف اللانهائي سندرس الآن أسباب هذه التأثيرات.

(٥,٣,١) معامل الانشطار الحراري (η)

يمثل معامل الانشطار الحراري معدل النيوترونات الانشطارية الناتجة عن امتصاص الوقود لنيوترون حراري واحد؛ ولهذا يُعبر عنه بالمعادلة الآتية:

$$\eta = \frac{n_p}{n_{aF}} = \upsilon.\left(\frac{\sum_f}{\sum_a}\right)_{fuel} \qquad (٥,٣)$$

حيث إن:

n_p: عدد النيوترونات المنتجة وn_{aF} عدد النيوترونات الممتصة بالوقود.

υ: عدد النيوترونات الناتجة عن كل انشطار، وهذا العدد يساوي 2.42 بالنسبة لليورانيوم ^{235}U و2.87 بالنسبة للبلتونيوم ^{239}Pu.

Σ_f: مقطع الانشطار المجهاري للمادة الانشطارية.

Σ_a: مقطع الامتصاص المجهاري للوقود.

تجدر الإشارة إلى أن هذا المعامل مرتبط بنوع الوقود فقط ولا يتأثر بمكونات المفاعل الأخرى، وتزداد قيمته كلما زادت نسبة تخصيب الوقود كما هو موضح في الجدول رقم (٥,١) الآتي.

الجدول رقم (٥,١). تغير معامل الانشطار الحراري η مع النسبة المئوية لخصوبة وقود اليورانيوم (r).

$r(\%) \approx \frac{^{235}N}{^{235}N+^{238}N}$	0.71	1.0	1.2	1.5	2.0	100
المعامل: η	1.32	1.48	1.56	1.65	1.73	2.07

(٥,٣,٢) معامل الانشطار السريع (ε)

يُعبر معامل الانشطار السريع عن كمية النيوترونات الانشطارية الإضافية الناتجة عن امتصاص الوقود لبعض النيوترونات السريعة قبل تهدئتها، ولهذا المعامل المعادلة الآتية:

$$\varepsilon = \frac{n_{pT} + n_{pF}}{n_{pT}} \qquad (٥,٤)$$

حيث إن:

n_{pT}: عدد النيوترونات الانشطارية الناتجة عن الانشطارات بالنيوترونات الحرارية.

n_{pF}: عدد النيوترونات الانشطارية الناتجة عن الانشطارات بالنيوترونات السريعة.

تجدر الإشارة إلى أن قيمة هذا المعامل تعتمد على انشطارات اليورانيوم ^{238}U بالنيوترونات السريعة خاصة، وتزداد هذه القيمة كلما قلت نسبة تخصيب الوقود. لكن بالنسبة للمفاعلات المتجانسة، فإن هذا المعامل يساوي الواحد الصحيح تقريباً ($\varepsilon \approx 1$) لقلة وجود النيوترونات السريعة في المفاعل؛ ذلك لأن المهدئ موجود في كل المناطق ويعمل على تهدئة النيوترونات الانشطارية إبان إنتاجها مما يحد كثيراً عدد الانشطارات بالنيوترونات السريعة في المفاعلات المتجانسة.

(٥,٣,٣) معامل احتمال الهروب من الامتصاص (p)

لحساب معامل احتمال الهروب من الامتصاص في مصايد رنين اليورانيوم يجب الرجوع إلى تتبع أحداث عملية تهدئة النيوترونات. ولهذا نذكر أولاً أن كثافة التهدئة $q(E)$ تمثل عدد النيوترونات في وحدة الحجم (cm^3)، التي تقطع مستوى الطاقة E في الثانية. ثانياً إذا كان الوسط المادي للمهدئ لا يحتوي على مواد ماصة للنيوترونات، فإن كثافة التهدئة تكون ثابتة ($q(E)=Q_0$)؛ ذلك لأن عملية التشتت لا تفقدنا النيوترون. في هذه الحالة يمكن استنتاج عدد النيوترونات المتشتتة داخل فترة الطاقة dE على النحو الآتي:

$$\phi(E)\sum_s dE = \frac{Q}{\xi E}dE \qquad (٥,٥)$$

حيث إن:

$\Phi(E)$: فيض النيوترونات التي لها الطاقة E.

Σ_s: مقطع التشتت المجهاري.

Q: كثافة التهدئة.

ξ: معدل الطاقة المفقود في كل تصادم (تشتت).

أما إذا كان الوسط المادي للمهدئ يحتوي على مواد ماصة للنيوترونات، فإن المعادلة السابقة تصبح كما يلي:

$$\phi(E)(\sum_s + \sum_a)dE = \frac{qdE}{\xi E} \qquad (٥,٦)$$

وبمعنى آخر، فإن كمية النيوترونات التي تُفقد بالامتصاص في فترة الطاقة dE لها المعادلة الآتية:

$$dq = \phi(E)\sum_a dE \qquad (٥,٧)$$

وعند قسمة المعادلتين السابقتين على بعضهما نحصل على ما يلي:

$$\frac{q}{\xi E}.\frac{dE}{dq} = \frac{\sum_s + \sum_a}{\sum_a} \qquad (٥,٨)$$

وبعد القليل من الترتيب لهذه المعادلة وتكاملها نحصل على كثافة التهدئة بين الطاقة الأصلية والنهائية على النحو الآتي:

$$\int_q^{\infty}\frac{dq}{q} = \int_E^{E_0}\frac{\sum_a}{\sum_s + \sum_a}\frac{dE}{\xi E} = -L_n(\frac{q}{Q_0}) \qquad (٥,٩)$$

obeikandl.com

يمثل الكسر (q/Q_0) النسبة المئوية للنيوترونات التي تصل إلى الحالة الحرارية وهذا ما يسمى أيضاً بمعامل احتمال الهروب من الامتصاص في مصايد رنين اليورانيوم، الذي يُعرف بالمعادلة الآتية:

$$p = \exp[-\int_{E_{th}}^{E_0} \frac{\Sigma_a}{(\Sigma_s + \Sigma_a)\xi} . \frac{dE}{E}]$$

$$= \exp[-\frac{N_{u8}}{\xi \Sigma_s} \int_{E_{th}}^{E_0} (\sigma_{au})_{eff} \frac{dE}{E}] \qquad (٥,١٠)$$

$$= \exp[-\frac{N_{u8}}{\xi \Sigma_s} . I_{eff}]$$

حيث إن:

σ_a: المقطع المجهري لليورانيوم.

N_a: الكثافة الذرية لليورانيوم.

$N_m\sigma_{sm}=\Sigma_s$: المقطع المجهاري للمهدئ.

I_{eff}: التكامل الفعَّال للرنين، أما المقطع المجهري الفعَّال لليورانيوم فله المعادلة الآتية:

$$(\sigma_{au})eff = \sigma_{au} . \frac{1}{1 + \Sigma_{au} / \Sigma_s} \qquad (٥,١١)$$

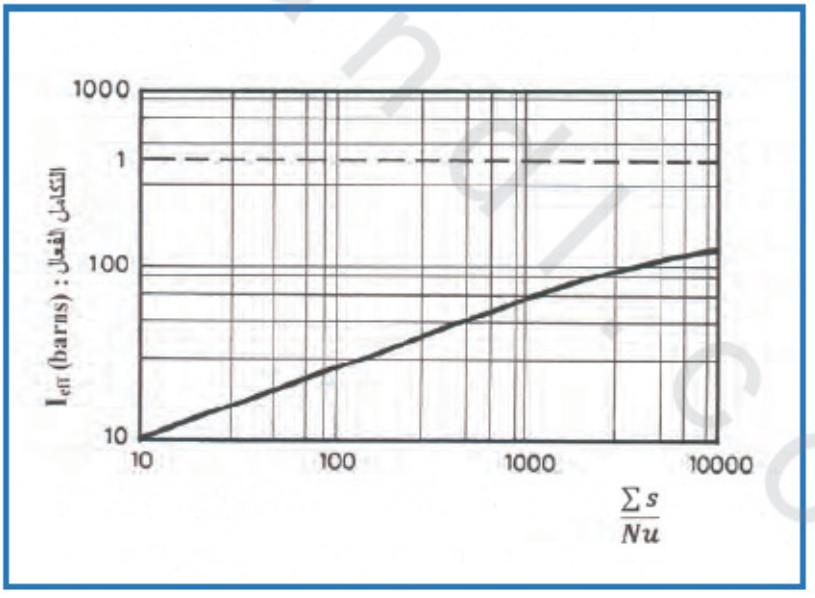
يظهر الشكل رقم (٥,١) تغيير I_{eff} لليورانيوم الطبيعي حسب المتغير $\frac{\Sigma_s}{N_u}$ الذي يتناسب مع نسبة ذرات المهدئ لذرات اليورانيوم. ونلاحظ أن قيم I_{eff} تقترب من القيمة القصوى I_{eff}=240 barns كلما زادت قيمة المتغير $\frac{\Sigma_s}{N_u}$، أي كلما قل تركيز اليورانيوم في المهدئ.

تجدر الإشارة إلى أن الصيغة التجريبية لمعادلة معامل احتمال الهروب من الامتصاص يمكن كتابتها على النحو الآتي:

$$p = \exp[-A(\frac{N_m}{N_u})^{-0.585}] \qquad (٥,١٢)$$

حيث إن: A ثابت و $\frac{N_m}{N_u}$ عكس تركيز اليورانيوم أو ما يسمى بالتخفيف.

يُلاحظ من خلال هذه المعادلة أنه كلما زادت قيمة التخفيف $\frac{N_m}{N_u}$ زادت قيمة معامل احتمال الهروب من الامتصاص p؛ وتجدر الإشارة إلى أن ارتفاع درجة حرارة الوسط المادي تؤدي إلى ارتفاع I_{eff} بنسبة 0.01 % لكل درجة حرارة، الأمر الذي يساعد على خفض قيمة معامل احتمال الهروب p، وذلك بسبب ظاهرة مفعول "دوبلر" المعروفة.



الشكل رقم (٥,١). تغير التكامل الفعّال I_{eff} مع المتغير $\frac{\sum_s}{N_u}$.

(٥,٣,٤) معامل الاستعمال الحراري (f)

يمثل معامل الاستعمال الحراري النسبة بين عدد النيوترونات الحرارية الممتصة من طرف الوقود وعدد النيوترونات الحرارية الممتصة من طرف كل المواد المكونة للمفاعل بما في ذلك من وقود أيضاً. وبمعنى آخر يحدد هذا المعامل كمية النيوترونات الحرارية التي يمتصها الوقود، التي يمكنها إحداث انشطارات وتوليد أجيال جديدة من النيوترونات. أما النيوترونات التي تمتصها المواد الأخرى فتعدُّ مفقودة؛ لأنها لا تولد نيوترونات جديدة. وهكذا فإن لمعامل الاستعمال الحراري المعادلة الآتية:

$$f = \frac{n_{aR}}{n_{aR}} = \frac{(\Sigma_a)_F . \phi_F}{(\Sigma_a)_R . \phi_R} = \frac{(\Sigma_a)_F}{(\Sigma_a)_R} = \frac{\sigma_{au}}{\sigma_{au} + \sigma_{am}(N_m / N_u)} \qquad (٥,١٣)$$

حيث إن:

n_{aF}: عدد النيوترونات الممتصة من طرائق الوقود.

n_{aR}: عدد النيوترونات الممتصة من طرف كل مواد المفاعل.

$(\Sigma a)_F$: المقطع المجهاري لامتصاص الوقود للنيوترونات الحرارية.

$(\Sigma a)_R$: المقطع المجهاري لامتصاص كل مواد المفاعل للنيوترونات الحرارية.

Φ_F: معدل فيض النيوترونات الحرارية في الوقود.

Φ_R: معدل فيض النيوترونات الحرارية في المفاعل.

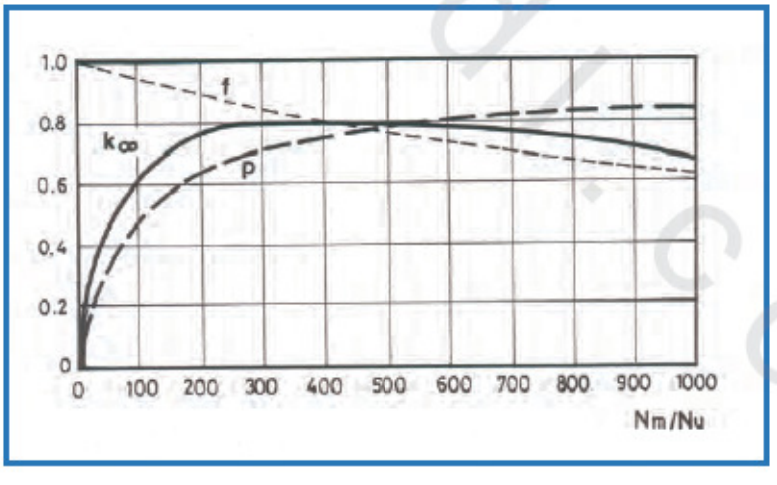
وبما أن المفاعل متجانس، فإن $\Phi_R = \Phi_F$، الأمر الذي سمح بالتخلص منهما في المعادلة السابقة.

تجدر الإشارة إلى أن المعادلة السابقة تظهر بوضوح أن قيمة المعامل f تساوي الواحد الصحيح عندما يكون الوقود ثريا بنسبة ١٠٠٪ (أي من ^{235}U فقط)، وتتناقص

قيمته كلما قلت نسبة التخصيب. ويلاحظ أيضاً من خلال هذه المعادلة أن قيمة المعامل f تتناقص أيضاً كلما زادت نسبة التخفيف ($\frac{N_m}{N_u}$)، أي قلت نسبة تركيز اليورانيوم.

(٥,٣,٥) عامل التضاعف اللانهائي

يظهر الشكل رقم (٥,٢) تغير كل من المعاملين p وf وأيضاً تغير عامل التضاعف اللانهائي K_∞ بدلالة نسبة التخفيف ($\frac{N_m}{N_u}$) لمفاعل متجانس من اليورانيوم الطبيعي والجرافيت. ويُلاحظ أن منحنى كل من المعامل p وf في تجاه معاكس للثاني بشكل عام، ولا يمكن تحسينهما معاً في وقت واحد. أما أفضل قيمة ضرب هذين العاملين فهي توجد عند النقطة $\frac{N_m}{N_u} \approx 500$ تقريباً، حيث إن $pf \approx 2x0.8 = 0.64$ مما يجعل من المستحيل الحصول على $K_\infty > 1$ ومن ثم تصميم مفاعل يعمل بوقود اليورانيوم الطبيعي ($\eta = 1.32$) ومهدئ الجرافيت مثلا.



الشكل رقم (٥,٢). تغير معامل f وp وعامل التضاعف اللانهائي K_∞ مع نسبة التخفيف ($\frac{N_m}{N_u}$).

تجدر الإشارة إلى إمكانية إهمال العاملين ε و p بالنسبة للمفاعلات الكبيرة والمتجانسة، التي تستعمل الوقود المخصب والتخفيف العالي؛ ذلك لأن ضرب هذين العاملين يساوي واحداً تقريباً ($\varepsilon p \approx 1$) في هذه الحالة. وهكذا يصبح عامل التضاعف اللانهائي على النحو الآتي:

$$K_{\infty} = \eta . f \qquad (٥,١٤)$$

وللحصول على قيمة عالية لعامل التضاعف في هذه الحالة يُختار أفضل تأليفة بين نسبة تخصيب الوقود ونوع مادة المهدئ ونسبة التخفيف المثالية.

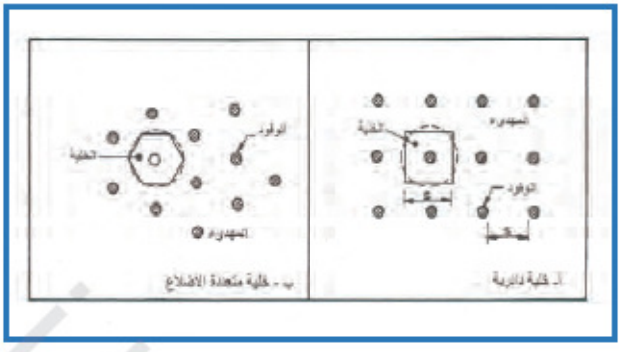
(٥,٤) عامل التضاعف (K_{∞}) للمفاعلات غير المتجانسة

تتميز المفاعلات غير المتجانسة باختلاف كثافة مناطقها بسبب عدم تساوي وجود الوقود في كل الأماكن، حيث توضع أقلام حزم الوقود في أماكن محددة. ويُظهر الشكل رقم (٥,٣) مقطعاً عرضياً لنموذجين لشبكة خلايا توزيع قضبان الوقود داخل قلب المفاعلات. ويؤدي هذا التوزيع إلى تعقيد شكل فيض النيوترونات وحسابات عامل التضاعف اللانهائي (K_{∞}). ولتسهيل هذه الحسابات وتعميمها على مختلف أشكال خلايا الشبكة يعوَّض الشكل الحقيقي للخلية بشكل أسطواني افتراضي لنصف قطر قاعدته المعادلة الآتية:

$$R = a\sqrt{\pi} \qquad (٥,١٥)$$

حيث إن: a تمثل طول ضلع مربع الخلية.

يُؤثر توزيع الوقود داخل قلب المفاعل وكذلك أبعاد الخلايا في جل مكونات عامل التضاعف اللانهائي (K_{∞}). وسندرس الآن تأثير عدم تجانس الكثافة في المعاملات الأربعة.



الشكل رقم (٥,٣). مقطع أفقي لنموذجين من خلايا المفاعلات غير المتجانسة.

(٥,٤,١) معامل الانشطار الحراري

لقد سبق أن شرحنا أن معامل الانشطار الحراري يعتمد فقط على نوع الوقود ونسبة تخصيبه، ولا يتأثر بتوزيع حزم الوقود داخل قلب المفاعل. ويتجلي هذا بوضوح من المعادلة الآتية:

$$\eta = \upsilon.\frac{\Sigma_f}{\Sigma_a} = \upsilon\frac{\sigma_f(U^{235})}{\sigma_a(U^{235}) + (\frac{1-r}{r})\sigma_a(U^{235})} \qquad (٥,١٦)$$

حيث إن:

σ_f: المقطع العرضي الانشطاري وامتصاص الوقود تتالياً.

σ_a: المقطع العرضي الانشطاري وامتصاص الوقود تتالياً.

ν: معدل عدد النيوترونات الانشطارية الصادرة عن انشطارات نواة اليورانيوم ($\nu = 2.47$).

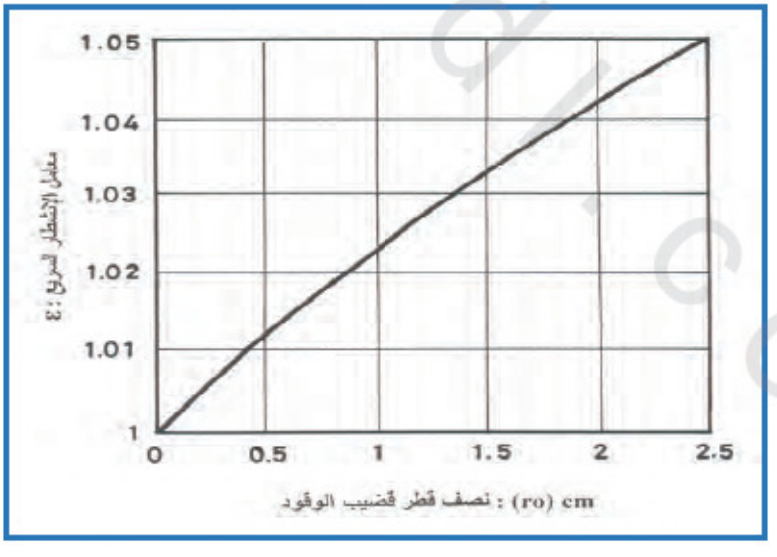
r: نسبة تخصيب وقود خليط اليورانيوم (^{238}U و^{235}U).

تجدر الإشارة إلى إمكانية استبدال قيم اليورانيوم ν وσ_f وσ_a بالقيم الخاصة بالمادة الانشطارية الأخرى (مثل البلوتونيوم ^{239}Pu) عند الحاجة في المعادلة السابقة.

(٥,٤,٢) معامل الانشطار السريع

لقد بيَّنا بالنسبة للمفاعلات المتجانسة أن معامل الانشطار السريع يساوي الواحد الصحيح لعدم وجود انشطارات بالنيوترونات السريعة، وبسبب وجود المهدئ في كل الأماكن. لكن عندما يكون الوقود على شكل أقلام، فإن النيوترونات السريعة الناتجة عن الانشطارات الحرارية تُحدث بعض الانشطارات قبل خروجها من قلم الوقود؛ ذلك لأن عملية تهدئة النيوترونات الانشطارية تحصل في المادة المهدئة التي توجد حول أقلام الوقود. تؤدي هذه الانشطارات الإضافية بالنيوترونات السريعة إلى زيادة في كمية النيوترونات، مما يجعل قيمة معامل الانشطار السريع أكبر من الواحد الصحيح ($\varepsilon > 1$).

يوضح الشكل رقم (٥,٤) تغير معامل الانشطار السريع مع نصف قطر الوقود. ويلاحظ أن قيمة هذا المعامل تزداد كلما زاد نصف قطر القلم؛ وذلك لأنه كلما كانت المسافة التي يقطعها النيوترون داخل قلم الوقود أطول، زاد عدد الانشطارات السريعة التي تزيد من قيمة معامل الانشطار السريع.



الشكل رقم (٥,٤). تغير معامل الانشطار السريع مع نصف قطر قلم الوقود.

(٥,٤,٣) معامل احتمال الهروب من الامتصاص

يُؤدي تفريق أقلام الوقود أثناء توزيعها داخل قلب المفاعلات غير المتجانسة إلى زيادة قيمة معامل احتمال الهروب من الامتصاص الرنيني لليورانيوم ^{238}U الذي هو بمثابة مصايد للنيوترونات. ويوجد بالطبع توزيع مثالي لكل حالة، إلا أن توزيع الوقود بشكل عام سواء كانت الأقلام متباعدة عن بعضها، أو متقاربة، فهي تعمل في صالح زيادة معامل احتمال الهروب في كل الحالات. إذا كانت الأقلام متباعدة مثلاً، فإن النيوترونات التي تصل إلى الوقود تكون قد قطعت مسافة كبيرة نسبياً في المهدئ وأصبحت حرارية وتجاوزت منطقة الرنين مما يحد من امتصاصها وفقدانها في مصايد رنين اليورانيوم. لكن عندما تكون أقلام الوقود متقاربة نسبياً، فإن النيوترونات التي تصل إلى الوقود لا تزال تحتوي على نيوترونات متوسطة الطاقة. هذه النيترونات يتم امتصاصها عادةً في الطبقة الخارجية فقط لقلم الوقود، الأمر الذي يعمل أيضاً على تحسين قيمة معامل احتمال الهروب p، حيث إن نسبة التخفيف ($\frac{N_m}{N_u}$) تكون كبيرة؛ لأن الطبقات الداخلية لأقلام الوقود لا تؤخذ في الحسبان في هذه الحالة.

تجدر الإشارة إلى أن أشكال أفياض النيوترونات داخل أقلام الوقود تختلف عن التي تكون في المهدئ، بحيث تزداد أعداد النيوترونات السريعة في الوقود، وتقل في المهدئ، والعكس صحيح بالنسبة للنيوترونات الحرارية. ولهذا عندما نأخذ بعين الاعتبار هذه التأثيرات الناتجة عن توزيع الوقود داخل قلب المفاعلات غير المتجانسة، فيجب إجراء التعديلات اللازمة لمعادلة معامل احتمال الهروب من الامتصاص لتصبح كما يلي.

$$p = \exp[-\frac{N_u}{\xi \Sigma_s}.\frac{V_u}{V_m}(\frac{\phi_u}{\phi_m}).I_{eff}] \qquad (٥,١٧)$$

حيث إن:

$N_U \frac{V_U}{V_m}$: معدل عدد ذرات اليورانيوم في وحدة الحجم (cm^3).

$\frac{\phi_U}{\phi_m}$: نسبة أفياض النيوترونات في الوقود والمهدئ.

I_{eff} : التكامل الفعَّال للرنين الذي سبق شرحه.

يُلاحظ أن قيم I_{eff} للمفاعلات غير المتجانسة تكون دائماً أصغر من مثيلاتها للمفاعلات المتجانسة. ولقد استنتج فرمي معادلة ذات صيغة تجريبية لحساب التكامل الفعَّال للرنين عند استخدام الجرافيت كمهدئ على سبيل المثال، فحصل على ما يلي.

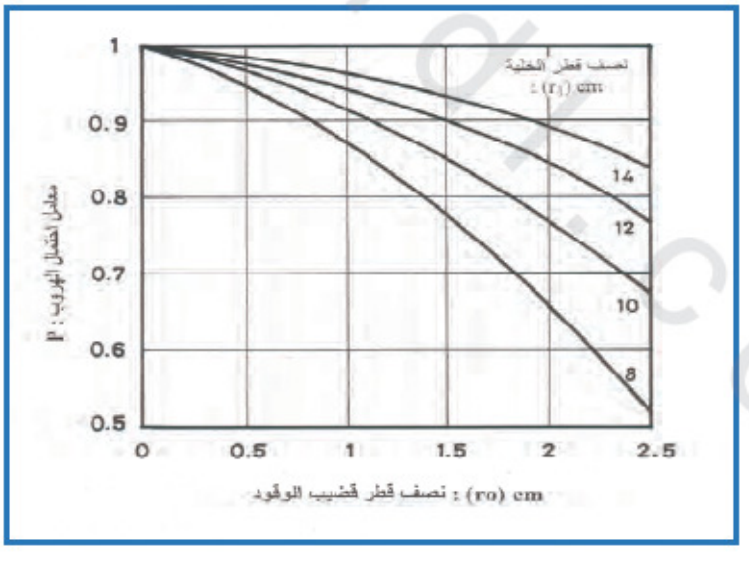
$$I_{eff} = 9.25 + 24.7\frac{S}{M} \qquad (٥,١٨)$$

حيث إن :

S : مساحة قلم الوقود بوحدة سم^2.

M : كتلة قلم الوقود بوحدة الجرام.

يُظهر الشكل رقم (٥,٥) تغير معامل احتمال الهروب من الامتصاص الرنيني مع تغير نصف قطر أقلام الوقود ونصف قطر خلية التوزيع. ويُلاحظ كما هو متوقع أن هذا المعامل يتزايد كلما كبر قطر الخلية ويتناقص كلما كبر نصف قطر أقلام الوقود.



الشكل رقم (٥,٥). تغير معامل احتمال الهروب p مع نصف قطر أقلام الوقود والخلية.

(٥,٤,٤) معامل الاستعمال الحراري

يُؤثر توزيع الوقود داخل المفاعلات غير المتجانسة أيضاً في معامل الاستعمال الحراري (f) ؛ وذلك لأن هذا التوزيع يسبب اختلافاً كبيراً في أشكال أفياض النيوترونات من مكان إلى آخر، الأمر الذي يؤدي إلى تفاعلات متعددة مع مختلف مواد قلب المفاعل كما سبق شرحه. وعند الأخذ بكل هذه الاعتبارات تصبح معادلة معامل الاستعمال الحراري بالنسبة للمفاعلات غير المتجانسة على النحو الآتي.

$$f = \frac{\Sigma_{au} V_u \phi_u}{\Sigma_{au} V_u \phi_u + \Sigma_{am} V_m \phi_m + \Sigma_{ast} V_{st} \phi_{st}} \qquad (٥,١٩)$$

حيث إن :

Φ : فيض النيوترونات.

V : حجم كل المادة.

Σ : المقطع المجهاري.

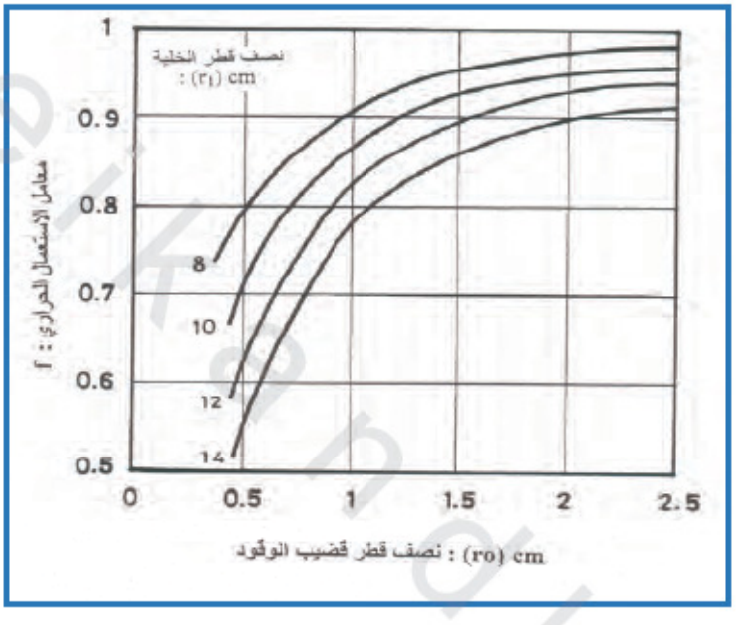
أما الحروف الصغيرة الملحقة لهذه الرموز فتدل على نوعية المادة، مثل اليورانيوم U، والمهدئ m، والمكونات الأخرى للمفاعل St.

وعندما نُهمل المواد St المكونة للمفاعل بسبب قلة كمياتها مقارنة بالوقود أو المهدئ، تصبح معادلة معامل الاستعمال الحراري كما يلي :

$$f = \frac{1}{1 + \frac{\Sigma_{am}}{\Sigma_{au}} \cdot \frac{V_m}{V_u} \cdot \frac{\phi_m}{\phi_u}} \qquad (٥,٢٠)$$

يُظهر الشكل رقم (٥,٦) تغير معامل الاستعمال الحراري (f) مع نصف قطر أقلام الوقود ونصف قطر خلايا التوزيع. ويُلاحظ أن هذا المعامل يتزايد كلما زاد نصف قطر أقلام الوقود، وذلك لارتفاع قيمة فيض النيوترونات في اليورانيوم Φ_U، لكن يتناقص المعامل f عندما يتزايد نصف قطر الخلية ؛ لأن ذلك يسبب زيادة في نسبة

الأفياض $\frac{\phi_U}{\phi_m}$ ، حيث تصل كميات أقل من النيوترونات الحرارية إلى وسط أقلام الوقود ؛ لأن الطبقة الخارجية تعمل كحاجز للنيوترونات.



الشكل رقم (٥,٦). تغير معامل الاستعمال الحراري f مع نصف قطر قلم الوقود والخلية.

(٥,٤,٥) عامل التضاعف اللانهائي

لقد تبين مما سبق أن توزيع الوقود في أماكن محددة مدروسة له تأثير إيجابي ومفيد في المعاملات الثلاثة ε و p و f، مما يرفع من قيمة عامل التضاعف اللانهائي بالنسبة للمفاعلات غير المتجانسة. أما معامل الانشطار الحراري (η)، فهو لا يتأثر بتوزيع الوقود داخل قلب المفاعل، وتعتمد قيمته على نوع الوقود ونسبة خصوبته فقط. ولهذا سندرس الآن تأثير نسبة خصوبة الوقود في عامل التضاعف، وذلك باختيار نوعين من وقود اليورانيوم.

(٥,٤,٥,١) وقود اليورانيوم الطبيعي

لقد أُجريت دراسات عديدة منذ بداية عصر الطاقة النووية لتحديد التوزيع الأمثل للوقود داخل المفاعل للحصول على أفضل قيمة لعامل التضاعف اللانهائي K_∞، ويظهر الجدول رقم (٥,٢) الآتي قيم K_∞ للتوزيعات المثالية لوقود اليورانيوم الطبيعي مع أكثر المواد المهدئة للنيوترونات استعمالاً.

الجدول رقم (٥,٢). عامل التضاعف K_∞ لمختلف التوزيعات المثالية لوقود اليورانيوم الطبيعي داخل المفاعلات غير المتجانسة.

المهدئ	نصف قطر الوقود r_0(cm)	نصف قطر الخلية R(cm)	عامل التضاعف K_∞
الجرافيت	1.4	12	1.07
أكسيد البريليوم	1.4	8.5	1.08
الماء الثقيل	1.3	8	1.20
الماء العادي	1.5	2.5	0.97

يُوضح الجدول رقم (٥,٢) السابق أن قيمة عامل التضاعف أقل من الواحد الصحيح ($K_\infty<1$) بالنسبة للماء العادي ووقود اليورانيوم الطبيعي، مما يجعل من المستحيل تشغيل هذا النوع من المفاعلات. أما المفاعلات التي تستعمل وقود اليورانيوم الطبيعي ومهدئ الجرافيت أو أكسيد البريليوم، فلها K_∞ قريب جداً من الواحد الصحيح، مما يجعل تشغيلها من الصعب بسبب تسرب النيوترونات حتى وإن كانت كبيرة الحجم. وهكذا لم يبقَ إلا المفاعلات المهدئة بالماء الثقيل ($K_\infty=1.2$)، التي يمكن تصنيعها بأبعاد واقعية وعملية مستعملاً وقود اليورانيوم الطبيعي ($\eta = 1.32$).

(٥,٤,٥,٢) وقود اليورانيوم المخصب

تؤدي عملية تخصيب الوقود على الرغم من تعقيدها وتكلفتها إلى تحسين كبير لعامل التضاعف اللانهائي، حيث تتزايد قيمة المعامل η بسرعة خاصة، حتى وإن كانت نسبة التخصيب قليلة. إن استعمال وقود مخصب، ولو بنسبة قليلة، يفتح المجال

أمام مواد مهدئة، مثل الجرافيت، والماء العادي، اللذين لم يكونا مجديينِ من قبل مع اليورانيوم الطبيعي؛ علماً أن استخدام الماء العادي كمهدئ له مزايا عديدة؛ لأنه متوافر في الكثير من المناطق، ويمكن استعماله كمبرد وناقل للحرارة في الوقت نفسه. بالإضافة إلى ذلك، فإن شبكة توزيع الوقود المخصب مع الماء العادي متقاربة نسبياً، مما يرفع من قيمة المعامل p، وf، ويجعل الكتلة الحرجة أقل، وحجم المفاعل صغيراً، مقارنةً بأحجام المفاعلات الأخرى، التي تستخدم الماء كمهدئ؛ ولهذه الأسباب انتشرت مفاعلات الماء العادي في العالم، إلا أنها تحتاج إلى وقود مخصب بنسبة حوالي ثلاثة بالمئة.

(٥,٥) عامل التضاعف الفعَّال (K_{eff})

عند دراسة عامل التضاعف اللانهائي (K_∞) أهملنا عمداً تسرب النيوترونات خارج المفاعل باعتبار أن المفاعل كبير جداً، أوله أبعاد غير منتهية جدلاً، لكن في الواقع مهما كان المفاعل كبيراً، فله حجم محدود، ولا مفر من تسرب كمية من النيوترونات خارجه، وكلما صغر الحجم زاد التسرب. ولهذا يجب تعريف عامل جديد لتضاعف النيوترونات يأخذ في الحسبان تسربها إلى خارج المفاعل. يُسمَّى هذا العامل الجديد عامل التضاعف الفعَّال، الذي يمثل النسبة بين عدد النيوترونات المنتجة وعدد النيوترونات المفقودة، سواء كان ذلك بالامتصاص، أو التسرب وفق المعادلة الآتية:

$$Keff = \frac{n_p}{n_L} = \frac{n_p}{n_A + n_{LK}} \qquad (٥,٢١)$$

حيث إن:

n_p: عدد النيوترونات الانشطارية المنتجة.

n_L: عد النيوترونات المفقودة.

N_A: عدد النيوترونات الممتصة.

n_{LK}: عدد النيوترونات المتسربة.

(٥,٥,١) العلاقة بين عاملي التضاعف

يتم استنتاج العلاقة بين عاملي التضاعف K_∞، وK_{eff} من خلال حساب احتمال فقدان النيوترونات بالامتصاص والتسرب. وبما أن عدد النيوترونات المفقودة n_L تكون سواء بالامتصاص، أو التسرب، فإن $n_L = n_A + n_{LK}$، أما معادلتا احتمال الامتصاص، واحتمال التسرب فهما على النحو الآتي:

احتمال الامتصاص:

$$P(A) = \frac{n_A}{n_L} \qquad (٥,٢٢)$$

احتمال التسرب:

$$P(LK) = \frac{n_{LK}}{n_L} \qquad (٥,٢٣)$$

كذلك يمكن تعريف عدم التسرب (£)، الذي يساوي احتمال الامتصاص أيضاً بحكم أن النيوترونات تفقد سواء بالامتصاص أو التسرب فقط.

$$\begin{aligned} £ &= 1 - P(LK) = P(A) \\ &= \frac{n_A}{n_A + n_{KL}} \end{aligned} \qquad (٥,٢٤)$$

وهكذا يمكن استنتاج العلاقة بين عاملي التضاعف K_∞ وK_{eff} على النحو الآتي:

$$\begin{aligned} K_{eff} &= \frac{n_P}{n_L} = \frac{n_P}{n_A + n_{LK}} \\ &= \frac{n_p}{n_A} \cdot \frac{n_A}{n_A + n_{LK}} \\ &= K_\infty £ \end{aligned} \qquad (٥,٢٥)$$

حيث إن:

£ يمثل احتمال عدم التسرب (أو احتمال الامتصاص).

obeikandl.com

(٥,٥,٢) دورة النيوترونات داخل المفاعل

تبدأ دورة النيوترونات من لحظة ولادتها وتنتهي بفقدانها بالتسرب، أو امتصاصها بالوقود الأمر الذي يؤدي إلى إنتاج جيل جديد من النيوترونات. وتعتمد حالة المفاعل النووي على تغير أعداد النيوترونات من جيل إلى آخر، ويمكن معرفة ذلك عن طريق قياس عامل التضاعف الفعَّال K_{eff} وحسابه في كل لحظة. ولتسهيل عملية مراقبة دورة النيوترونات وحصر أعدادها، لنفرض أن لدينا نوعين فقط من النيوترونات السريعة والحرارية داخل المفاعل. يُستنتج تغير عدد النيوترونات المنتجة والممتصة من جيل إلى آخر عن طريق عامل التضاعف اللانهائي (K_∞)، كما سبق شرحه، أما عملية تسرب النيوترونات خارج المفاعل، فيفضَّل تقسيمها إلى جزءين حسب أنواع النيوترونات. يختص الجزء الأول بتسرب النيوترونات وهي لا تزال سريعة قبل تهدئتها، ويختص الجزء الثاني بتسربها وهي بالمرحلة الحرارية. ولهذا يُقسم احتمال عدم التسرب £ إلى جزءين على النحو الآتي.

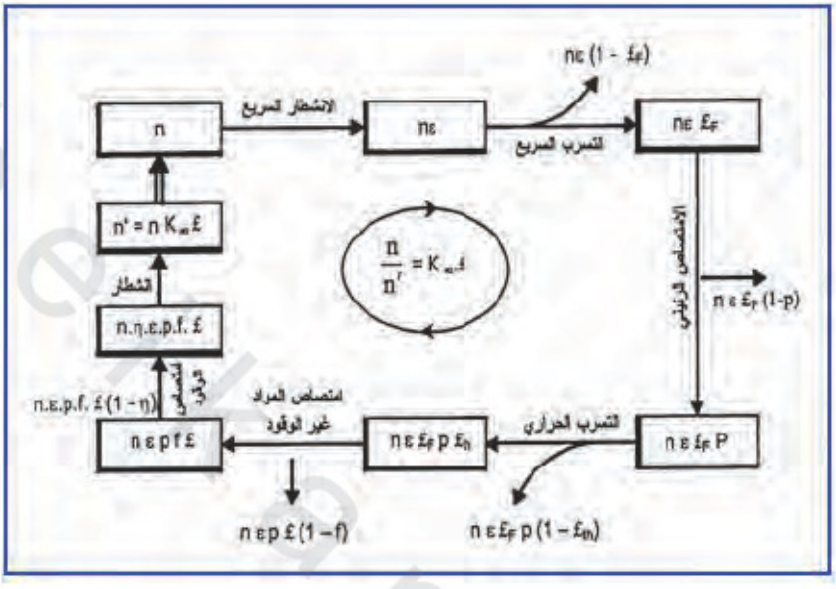
$$£ = £_F . £_{Th} \qquad (٥,٢٦)$$

حيث إن:

$£_F$ و $£_{Th}$ يمثلان احتمال عدم التسرب السريع والحراري تتالياً.

يوضح الشكل رقم (٥,٧) تتبع الأحداث التي تحصل لأجيال النيوترونات المتتالية، التي يحكمها عامل التضاعف الفعَّال K_{eff}، الذي يُعرف بالمعادلة المشهورة ذات المعاملات الست الآتية:

$$K_{eff} = K_\infty £ = \eta \varepsilon p f £_F £_{Th} \qquad (٥,٢٧)$$



الشكل رقم (٥,٧). دورة النيوترونات داخل المفاعل النووي [١].

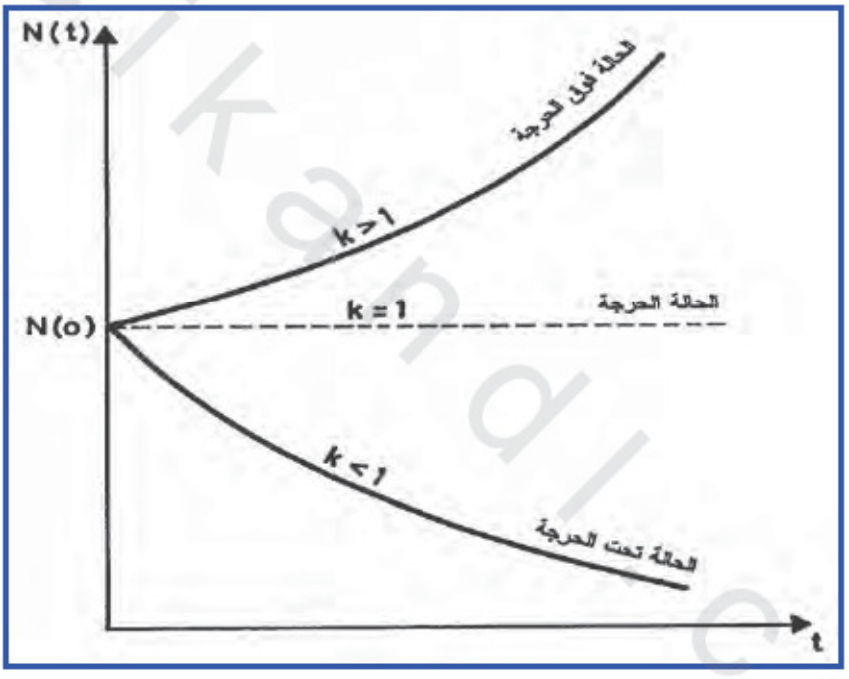
يظهر الشكل رقم (٥,٧) أن نسبة عدد نيوترونات الأجيال المتتالية تساوي عامل التضاعف الفعَّال، الذي يحدد بدوره حالة المفاعل، وذلك عند مقارنته بالواحد الصحيح:

أولاً: $K_{eff} > 1$ إذا كان عامل التضاعف الفعَّال أكبر من الواحد الصحيح، فهذا يدل على تزايد النيوترونات من جيل على آخر، وأن عدد النيوترونات المنتجة يفوق عدد النيوترونات المفقودة بالامتصاص والتسرب معاً، وعندئذ يكون المفاعل في الحالة فوق الحرجة (الخطرة).

ثانياً: $K_{eff} = 1$ إذا كان عامل التضاعف الفعَّال يساوي الواحد الصحيح، فهذا يعني أن عدد النيوترونات المنتجة يساوي عدد النيوترونات المفقودة بالامتصاص والتسرب معاً، وعندئذٍ يكون المفاعل في الحالة الحرجة.

ثالثاً: $K_{eff} < 1$ إذا كان عامل التضاعف أقل من الواحد الصحيح، فهذا يدل على أن النيوترونات المنتجة في تناقص مستمر مما يؤدي حتماً على توقف المفاعل بعد فترة من الزمن. وعند ذلك يكون المفاعل في الحالة تحت الحرجة.

ويظهر الشكل رقم (٥,٨) هذه الحالات الثلاث حسب قيمة عامل التضاعف الفعَّال K_{eff} مقارنةً بالواحد الصحيح.



الشكل رقم (٥,٨). تطور مجتمع النيوترونات وحالة المفاعل النووي [٢].

تجدر الإشارة إلى أننا لم نتطرق حتى الآن إلى كيفية حساب احتمال عدم التسرب $\pounds_F$ أو $\pounds_{Th}$، اللذين يتميزان بحسابات معقدة؛ وذلك لأن هذه الحسابات تحتاج إلى معرفة دقيقة لكل من الشكل الهندسي للمفاعل وأبعاده، ونوع الوقود وتوزيعه

داخل قلب المفاعل، وكذلك كميات المواد الأخرى المكونة للمفاعل. وسنتطرق إلى هذه الحسابات التي تعتمد على نظريات انتقال النيوترونات وانتشارها داخل المفاعلات النووية في الفصول القادمة من هذا الكتاب إن شاء الله.

(٥,٦) تأثير عواكس النيوترونات

عواكس النيوترونات هي مواد خفيفة مثل المواد المهدئة للنيوترونات، وتتميز بقدرة كبيرة على تشتت النيوترونات، وقدرة صغيرة على امتصاصها. وعادةً ما يكون المهدئ والعاكس من المادة نفسها، ويوضع هذا الأخير حول قلب المفاعل للحد من تسرب النيوترونات إلى الخارج وعكس تجاه بعضها وإعادتها إلى قلب المفاعل؛ ذلك لأن فيض النيوترونات لا يساوي الصفر عند أطراف قلب المفاعل بل يمتد إلى ما وراء ذلك، ولا يساوي الصفر إلا عند نقطة الاستطالة الخطية للفيض، مما يسبب وجود تيار موجب J_+ لتسرب النيوترونات إلى الخارج. وعند وضع العاكس حول قلب المفاعل يولد تيار سالب J_- من النيوترونات باتجاه الداخل فيحد من تسربها. وهكذا يمكن تعريف معامل العاكس β للنيوترونات، الذي يمثل نسبة كثافة التيار السالب الداخل لقلب المفاعل وكثافة التيار الموجب الخارج منه عند الأطراف وفق المعادلة الآتية:

$$\beta = \frac{J-}{J+} = \frac{\frac{\phi}{4} + \frac{\lambda_{tr}}{6} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x}}{\frac{\phi}{4} - \frac{\lambda_{tr}}{6} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x}} \qquad (٥,٢٨)$$

حيث إن:

Φ: فيض النيوترونات.

λ_{tr}: المسار الحر لانتقال النيوترونات للمادة العاكسة.

لقد بينا في الفصل السابق كيفية الحصول على قيمة فيض النيوترونات بحل معادلة الانتشار بالنسبة لمصدر نقطي. وبالطريقة نفسها يمكن حل معادلة الانتشار

بالنسبة لمصدر على شكل لوح غير منتهٍ، حيث تتناسب هذه المعادلة مع وجود عاكس حول قلب المفاعل.

يكون شكل فيض النيوترونات في هذه الحالة على النحو الآتي:

$$\phi = A.e^{-Kx} \qquad (٥,٢٩)$$

حيث إن الثابت $K = 1/L$، علماً أن L يمثل طول مسار انتشار النيوترونات في مادة العاكس

وعند تعويض الفيض بقيمته في معادلة معامل العاكس السابقة نحصل على العلاقة الجديدة الآتية:

$$\beta = \frac{1-\frac{4}{6}.\lambda_{tr}K}{1+\frac{4}{6}.\lambda_{tr}.K} = \frac{3-2.\lambda_{tr}K}{3+2.\lambda_{tr}.K} \qquad (٥,٣٠)$$

يوضح الجدول رقم (٥,٣) قيم معامل العاكس β لأكثر المواد استعمالاً كمهدئ وعاكس للنيوترونات.

الجدول رقم (٥,٣). معامل العاكس لأهم المواد المهدئة للنيوترونات [١].

العاكس	β (∞)	β(a=40 cm)*
الماء العادي (H_2O)	0.80	0.80
الماء الثقيل (D_2O)	0.98	0.92
أكسيد البريليوم (BeO)	0.94	0.93
الجرافيت (C)	0.95	0.91

* (a = 40 cm) تمثل سمك العاكس. أما سمك العاكس اللانهائي $\beta(\infty)$ فهو يساوي تقريباً ثلاثة أضعاف L طول المسار الحر لانتشار النيوترونات في مادة العاكس؛ ولذلك فلا فائدة من استعمال عاكس يتجاوز سمكه تلك القيمة ($3L \approx \infty$).

يُلاحظ من الجدول السابق أن معامل العاكس اللانهائي $\beta(\infty)$ للماء العادي والماء الثقيل يساوي كل منهما 80٪ و98 ٪ تتالياً. وبما أن السمك المكافئ هو حوالي 40 سم، فلا فائدة في استعمال سمك أكبر من ذلك. وهنا تظهر أهمية العاكس، حيث إن سمك حوالي 40 سم من الماء تكفي لإعادة حوالي 80٪ من النيوترونات إلى قلب المفاعل، مما يترتب عنه تخفيض الكتلة الحرجة، وتخفيض التكلفة الإجمالية للمفاعل.

(٥,٧) تمارين

١- عَرِّفْ كلاً من عامل التضاعف اللانهائي (K_∞)، وعامل التضاعف الفعَّال (K_{eff}).

٢- اشرحْ معالم كل من عامل التضاعف اللانهائي وعامل التضاعف الفعَّال (K_{eff}).

٣- اذكرْ بعض الطرائق المستخدمة لتحسين عامل التضاعف اللانهائي وكذلك طرائق تحسين عامل التضاعف الفعَّال.

٤- ارسمْ شكلاً مبسطاً لشرح دورة النيوترونات داخل قلب المفاعلات النووية الحرارية.

٥- ارسمْ شكلاً يوضح تغير حالة المفاعل النووي استناداً إلى قيم عامل التضاعف الفعَّال (K_{eff}).

٦- إذا كان لدينا مفاعلاً متجانساً يحتوي على خليط من الماء واليورانيوم المخصب بنسبة 4٪، علماً أن تركيز اليورانيوم (الكثافة ρ=19.1 g/cm^3) في هذا المحلول تساوي 30٪، وقيمة معامل الانشطار السريع $\varepsilon \approx 1$، فاحسب ما يلي:

أ) معامل الانشطار الحراري η.

ب) معامل الاستعمال الحراري f.

ج) معامل احتمال الهروب من الامتصاص p.

د) عامل التضاعف اللانهائي K_∞.

٧- لنفرض أنَّ لدينا مفاعلاً غير متجانس يحتوي على حزم من ثاني أكسيد اليورانيوم UO_2 المخصب بنسبة 3٪، موزعةً داخل قلب أسطواني من الجرافيت، الذي يعمل كمهدئ للنيوترونات الانشطارية. إذا كانت نسبة أفياض النيوترونات $\frac{\phi_m}{\phi_U} = 2$، ونصف قطر الخلية الدائرية وقلم الوقود يساوي 12 سم و1.5 سم تتالياً فاحسبْ ما يلي:

أ) معامل الانشطار الحراري η.

ب) معامل الاستعمال الحراري f.

ج) معامل احتمال الهروب من الامتصاص p.

د) عامل التضاعف اللانهائي K_∞.

٨- أعِدْ نفس الحسابات المطلوبة في التمرين السابق رقم ٧ عند تعويض مهدئ الجرافيت بالماء العادي وافتراض نسبة أفياض النيوترونات $\frac{\phi_m}{\phi_U} = 1.5$

٩- ارسم دورة النيوترونات لمفاعل نووي عند افتراض وجود نوعين من النيوترونات سريعة وحرارية فقط، ثم احسبْ عدد النيوترونات عند كل مرحلة علماً أن: ε= 1.02 ، p= 0.95 ، f = 0.90 ، η = 1.8، بالإضافة إلى قيم احتمال عدم التسرب السريع والحراري: $L_f = 0.78$ و $L_{th} = 0.82$.

١٠- أثناء التصميم الأولي لمفاعل نووي للماء المضغوط (PWR)، وُجِدَ أنَّ احتمال عدم التسرب السريع $L_f = 0.80$ عندما يكون قلب المفاعل بدون عواكس النيوترونات:

أ) ما فائدة إضافة عواكس سمكها حوالي 50 سم من الماء حول قلب المفاعل؟

ب) ما قيمة احتمال عدم التسرب L_f عند وضع هذه العواكس وافتراض أن تأثيرها الأساسي سيكون في هذا المعامل؟