

طريقة لتقدير العمر التشغيلي الآمن لمحطة

استطاعة نووية وآليات إطلالة عمر المنشأة

بلال علي¹

د. سليمان ديبو³

د. عبدالله رستاوي²

الملخص

في هذا البحث، أدخلنا مصطلحاً جديداً هو العمر التشغيلي الآمن لمحطة نووية ما. وعرفناه على أنه المدة الزمنية التي تتعرض خلالها خرسانة الدرع البيولوجي لكمية من الإشعاع النووي تتسبب بوصول هذه الخرسانة إلى عتبة فقدان المقاومة. كما أدخلنا تعريفاً آخرًا هو عتبة فقدان المقاومة لخرسانة ما على أنها التعرض لسيالة نيوترونية وجرعة أشعة غاما اللتان تسببان انخفاضاً في مقاومتها النسبية قدره 0.1 عن مقاومتها النسبية الابتدائية قبل التعرض للإشعاع. وبناء على ذلك، وضعنا طريقة لتقدير العمر التشغيلي الآمن لأي محطة نووية. وقمنا أيضاً، بناء على الدراسات المرجعية لتغير المقاومة النسبية لكافة المحطات، بتعيين مجال أعمار المحطات النووية الحالية، التي هي قيد التشغيل. فوجدنا أن العمر التشغيلي الآمن يتعلق بشكل رئيسي بنوع الركام الذي بُنيت منه خرسانات الدروع البيولوجية لتلك المحطات. وأن مجال الأعمار الآمن للمحطات الحالية المعين اعتماداً على المقاومة الانضغاطية النسبية يتراوح تقريباً بين 75 سنة حتى 110 سنوات.

الكلمات المفتاحية: العمر التشغيلي الآمن، عتبة فقدان المقاومة، مجال الأعمار الآمن.

¹ طالب ماجستير فيزياء نظرية في قسم الفيزياء بكلية العلوم في جامعة البعث.

² قسم الفيزياء بكلية العلوم في جامعة البعث.

³ قسم الفيزياء بكلية العلوم في جامعة البعث.

A method for estimating the safe operating life of a nuclear power plant and mechanisms to extend the life of the facility

Bilal Ali⁴

Dr. Abdullah Rastanawi⁵

Dr. Solaiman Dibo⁶

Abstract

In this paper, we have introduced a new term which is the safe operating life of a nuclear plant. We defined it as the time during which the biological shield concrete is exposed to an amount of nuclear radiation that causes this concrete to reach the threshold of strength loss. We also introduced another definition is the strength loss threshold of a concrete as being exposed to a neutron flux and gamma ray dose that cause a decrease in its relative strength of 0.1 from its initial relative resistance before exposure to radiation. Accordingly, we developed a method for estimating the safe operating life of any nuclear plant. Based on the reference studies of the change in the relative strength of all the plants, we also determined the life range of the current nuclear plants, which are in operation. We found that the safe operating life is mainly related to the type of aggregate from which the biological shield concretes for those plants were built. And the safe life range of the current plants, which is determined based on the relative compressive strength, ranges from approximately 75 years to 110 years.

Keywords: safe operating life, strength loss threshold, safe life range

⁴ Master student in Department of Physics- Faculty of Science- Al-Baath University

⁵ Department of Physics- Faculty of Science- Al-Baath University.

⁶ Department of Physics- Faculty of Science- Al-Baath University.

1. مقدمة

من المواضيع الهامة جداً من أجل التشغيل الطويل-الأمد لمحطات الاستطاعة النووية هو دراسة شيخوخة بناها الخرسانية. إن أهم البنى الخرسانية التي تلعب دوراً في تحديد العمر التشغيلي لأي محطة نووية هي: بناء الاحتواء الأولي، والدرع البيولوجي والخرسانة الداعمة. حيث إن هذه البنى وغيرها من البنى المتعلقة بأمان المحطة يجب أن تكون قادرة على الاحتفاظ بمقدرتها البنيوية طوال عمرها التشغيلي. ولذلك، يجب أن يبدي الفحص الدوري للمقدرة البنيوية لها، لا سيما بعد انقضاء مدة 60 عاماً من بدء تشغيلها، أنها ما تزال في حالة مرضية حتى يُضمن بأن الاستمرار في تشغيلها ما يزال آمناً [1].

إن جدار الدرع البيولوجي الخرسانى concrete biological shield (CBS) wall هو الخرسانة الأكثر أهمية في تحديد العمر التشغيلي، إن لم نقل أنها هي التي تحدد العمر التشغيلي. وذلك نظراً، أولاً، لأهمية وظيفتها اللتان هما؛ الوظيفة البنيوية التي هي تحمل إجهادات كبيرة مختلفة، والوظيفة التدريجية التي هي وقاية العاملين من خطر الإشعاع الصادر عن المفاعل، وثانياً، لأنها هي الخرسانة الأكثر تعرضاً للإشعاع بسبب قربها من وعاء الضغط للمفاعل. ولذلك، فإن إبداءها أنها ما تزال قادرة من الناحية البنيوية على أداء هاتين الوظيفتين المعدة لهما بالتصميم الأساس هو مطلب بالغ-الأهمية في إدارة شيخوخة المحطة بفعالية وانتباه وحرص. حيث أن تعرض هذه الخرسانة لسيالة نيوترونية أكبر من عتبة معينة يمكن أن يتسبب بفقدان الخرسانة لمقاومتها، بسبب حدوث ما يسمى الانتفاخات الحجمية فيها. وإذا ما تجاوزت سوية تشعيع الخرسانة بالنيوترونات لتلك العتبة، فإن جدار الدرع البيولوجي يصبح عرضة للانهييار في أي لحظة، وحدث كارثة نووية لا تُحمد عقباه. لذلك، نرى أنه من الضروري أن نكون على دراية دقيقة بتأثير التفاعلات النيوترونية وخاصة التي تتسبب بالانتفاخات الحجمية في الخرسانة، وكيفية تقليلها، وإجراء تقديرات للفقد في مقاومة الخرسانة من أجل تحديد العمر التشغيلي الموافق للعتبة من أجل كل محطة نووية على انفراد. وذلك أولاً من أجل تفادي حدوث

الكارثة نووية-بيئية، **وثانياً** من أجل معرفة كيف يمكننا إطالة عمر محطة معينة لأطول مدة ممكنة. وهذا هو جوهر الهدف من بحثنا.

2. هدف البحث

إن المشكلة الأساسية في هذا البحث تكمن في أننا نحن نفترض أن عمر خرسانة الدرع البيولوجي هو العمر التشغيلي الآمن لأي محطة نووية تم أو سيتم إنشاؤها، وذلك نظراً لأنه بانهايار هذه الخرسانة تتدمر المنشأة النووية كاملة حتى لو كانت كافة أجزاء المحطة، بما فيها المفاعل النووي، تعمل بشكل سليم. فضلاً عن الضرر الإشعاعي البيئي الذي ستتسبب به على كامل الأرض في حال حدوث هكذا كارثة. ولذلك، هدفنا من البحث يصبح **أولاً** هو عمل دراسة مرجعية عن تأثير الإشعاع النووي الصادر من قلب المفاعل عبر وعاء الضغط للمفاعل على الخواص الميكانيكية لخرسانة الدرع البيولوجي بشكل أساسي من أجل وضع طريقة لتحديد العمر التشغيلي الآمن لكل محطة بذاتها. وبما أن تكلفة إنشاء أي محطة نووية هي تكلفة اقتصادية عالية جداً، فإن هدفنا **ثانياً** يكون معرفة الآليات أو الإجراءات التي يمكننا من خلالها إطالة عمر خرسانة الدرع البيولوجي من أجل إطالة عمر المحطة للاستفادة منها لأطول مدة ممكنة.

3. مواد وطرق البحث

1.3. الخواص الميكانيكية للخرسانة

تعتبر مقاومة الخرسانة اسماً عاماً للعديد من الخصائص الميكانيكية للخرسانة، التي تقسم إلى عدة أنواع هي مقاومة الانضغاط compressive strength، ومقاومة الشد tensile strength، ومقاومة الانثناء flexural strength، مقاومة القص shear strength، مقاومة الكلال fatigue strength. ومعامل المرونة modulus of elasticity.

حيث أن أكثر هذه الأنواع تأثيراً والتي تم التركيز عليها هي:

مقاومة الانضغاط: وهي أقصى إجهاد ضغط يمكن أن للمادة (الخرسانة) أن تتحمله

من دون يحصل لها انهيار.

مقاومة الشد: هي أقصى إجهاد شد يمكن للمادة أن تتحمله من دون أن يحصل لها

انهيار.

معامل المرونة: هو ميل منحنى الإجهاد-انفعال stress-strain curve لهذا الجسم في مجال التشوه المرن [2].

2.3. دراسة مرجعية عن تأثير الإشعاع على الخصائص الميكانيكية

من خلال دراسة الخصائص الميكانيكية للخرسانات بعد تعريضها لسيلالات نيوترونية وجرعات من أشعة غاما وأحياناً لظروف محاكية للظروف التي تتعرض لها خرسانة الدرع البيولوجي، أحرز مختبر أوك ريدج الوطني (ORNL) أيضاً تقدماً كبيراً في فهم تأثيرات الإشعاع على الخرسانة الذي تجلى بنشره للتقارير والمقالات التالية [3,4,5,6,7,8,9]. كما أحرز معهد أبحاث الاستطاعة الكهربائية (EPRI) تقدماً كبيراً في فهم آثار (تأثيرات) الإشعاع على الخرسانة، منذ أن انطلق بدايةً بنشر وثيقة خارطة طريق ابتدائية في عام 2012، الذي تجلى بإصداره للعديد من التقارير [10,11,12,13,14,15]. وكذلك أيضاً، قدمت العديد فرق البحثية المختصة في العالم مساهمات إضافية أخرى قيمة نذكر منها مثلاً البحوث التالية [16,17,18]. ونحن نتوقع بأنه اعتماداً على هذه الأعمال يمكننا أن نضع طريقة لتقدير العمر التشغيلي الآمن، الذي يمكن للمحطة أن تشتغل خلاله بشكل آمن من ناحية كون الخرسانة ما تزال قادرة على تحمل الاجهادات التي تتعرض لها، فضلاً عن معرفة الإجراءات أو التحسينات التي من شأنها أن تساهم في إطالة عمر المحطة، فضلاً عن تحديد العمر التشغيلي الآمن للمحطات التي قيد التشغيل.

إن الدرع البيولوجي هو البنية الخرسانية الوحيدة التي تعاني من سويات إشعاعية يمكن أن تتسبب بدهورها قبل كافة الخرسانات الأخرى بمدة طويلة نسبياً. لذلك، فإننا نعتبر أن عتبة فقدان المقاومة لهذه الخرسانة هو الذي يحدد العمر التشغيلي الآمن للمحطة، نظراً لأن بقية أجزاء المحطة غير الخرسانية التي تتعرض لسويات إشعاعية عالية في غالبيتها تخضع للصيانة الدورية والاستبدال. ومن أجل ذلك، فإننا نعرف العمر التشغيلي الآمن لمحطة ما بأنه المدة الزمنية التي تتعرض خلالها الخرسانة لكمية إشعاع نووي (سيلة نيوترونية وأشعة غاما) تتسبب بوصول الخرسانة إلى عتبة فقدان المقاومة الخاصة بها، التي تُسمى **عتبة الضرر (عتبة فقدان**

المقاومة). كما نعرف عتبة فقدان المقاومة لخرسانة ما بأنها التعرض لسيالة نيوترونية وجرعة أشعة غاما اللتان تسببان انخفاضاً في مقاومتها النسبية قدره 0.1 من مقاومتها النسبية الابتدائية قبل أي تعرضها للإشعاع.

إن تقدير عمر التشغيلي الافتراضي الآمن لمحطة نووية ما ومعرفة الإجراءات اللازمة لإطالة عمرها التشغيلي تتطلب منا معرفة ما يلي:

1.2.3. تعرض الخرسانة المتوقع للنيوترونات

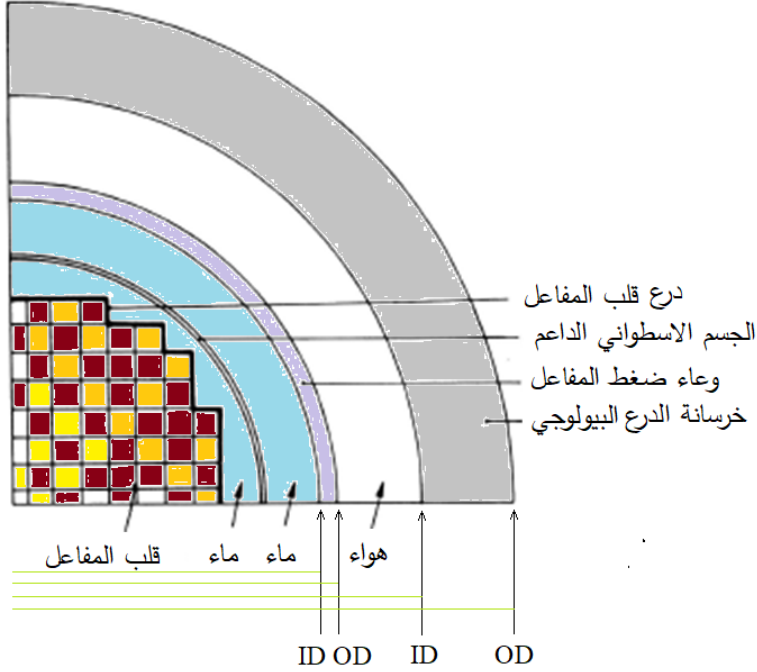
لكي يتم تقدير الحالة المتوقعة لخرسانة الدرع البيولوجي عند تقدير سنوات تشغيل المحطة بالاستنطاعة الكاملة الفعالة⁷ (EFPY)، فإننا بحاجة إلى معرفة سويات الإشعاع التي يتوقع أن تتعرض لها خلال هذا العمر. ومن الضروري إجراء الحسابات المتعلقة بسنوات التشغيل بالاستنطاعة الكاملة الفعالة من أجل كل محطة. وفي مثل هذه المقارنة للحسابات نحن بحاجة إلى معرفة الطرق التي تسمح لنا بحساب السوية المتوقعة للسيالة النيوترونية الساقطة على خرسانة جدار الدرع البيولوجي CBS انطلاقاً من معرفة السويات المتوقعة للسيالة النيوترونية الخارجة من فولاذ وعاء الضغط للمفاعل وفقاً لما تقدمه برامج مراقبة وعاء الضغط للمفاعل الخاص بكل محطة.

A. السيادة النيوترونية عند القطر الداخلي للدرع البيولوجي: إن سيالة نيوترونية ذات طاقة E أكبر من 0.1 MeV هي السيالة الأساسية التي تستخدم حالياً من أجل تقدير الحالة المتوقعة للخرسانة، نظراً لأن معظم العيوب النقطية⁸ المتشكلة في ركام الخرسانة إنما تنشأ بفعل نيوترونات تمتلك هكذا طاقات [15]. ويمكن حساب السيالة النيوترونية التي تتعرض لها الخرسانة انطلاقاً من السيالة النيوترونية الموجودة في وعاء الضغط للمفاعل RPV، التي عادة تكون محسوبة بدقة في كل محطة. وعلى الرغم من أنه يمكن حساب السيالة النيوترونية

⁷ إن 72 EFPY يمكن أن تمثل 80 عاماً من العمر الزمني للمحطة plant chronological age على فرض أن عامل القدرة هو 90% capacity factor.

⁸ إن العيوب النقطية هي مناطق صغيرة يحدث فيها انخلاع لمجموعة من الذرات المتجاورة من الشبكة البلورية للركام، التي تتسبب بتوسعات حجمية في الخرسانة.

الموجودة في وعاء الضغط للمفاعل RPV التي تمتلك طاقة أكبر من $E > 0.1 \text{ MeV}$ ، إلا أنه من الضروري أن يتم أولاً حساب السيادة النيوترونية المتوقعة التي تمتلك طاقة $E > 0.1 \text{ MeV}$ عند القطر الداخلي (ID) لوعاء الضغط للمفاعل، انظر الشكل (1).



الشكل (1): رسم مقطع عرضي للمفاعل يظهر أجزاءه من قلب المفاعل حتى خرسانة الدرع البيولوجي.

وهذا ما يجب عمله من أجل كل محطة على حده. ومن ثم أن يتم تقدير السيادة النيوترونية (n/cm^2)، التي يتم توهينها من عند القطر الداخلي ID لوعاء الضغط للمفاعل RPV حتى عند قطره الخارجي (OD). وذلك باستخدام معادلة التوهين الموجودة في الدليل التنظيمي المرجع [19]. مع ملاحظة أن المعادلة 3 في الدليل التنظيمي هذا مبنية على أساس أن عوامل التوهين قد تم تعيينها من أجل سماكة قدرها ذرة واحدة أو انزياح لكل ذرة (dpa). ووفقاً لما ذكر راندول **Randall** [20]، فإنهم كانوا سابقاً يحسبون السيادة النيوترونية الموهنة باستخدام شكل آخر لهذه المعادلة فيه قوة العامل الأسّي، المبني على أساس التوهين، تكون

$-0.24x$ ، حيث x هي سماكة الوعاء مقدره بالإنش (inches). وعلى كل حال، إن المعادلة المناسبة من أجل تعيين التوهين للسيالة النيوترونية العابرة لجدار وعاء الضغط للمفاعل RPV هي:

$$\Phi_{1.0 \text{ MeV}} = \Phi_{\text{surf}} (e^{-0.33x}) \quad (1)$$

حيث $\Phi_{1.0 \text{ MeV}}$ هي قيمة السيالة النيوترونية ذات الطاقة $E > 1.0 \text{ MeV}$ عند السطح الخارجي لوعاء الضغط للمفاعل. و Φ_{surf} هي السيالة النيوترونية ذات الطاقة $E > 1.0 \text{ MeV}$ عند السطح المبلل الداخلي لوعاء الضغط للمفاعل. و x هي سماكة جدار وعاء الضغط للمفاعل RPV مقدره بالإنش.

من أجل السهولة، عند الدراسة التحليلية، يستخدم بعض المؤلفين نسبة السيالة النيوترونية بين السيالة OD عند $E > 0.1 \text{ MeV}$ وعند $E > 1.0 \text{ MeV}$ التي تعتمد على سماكة الوعاء. وقد أجريت دراسة مرجعية للحصول على البيانات المتاحة من التقييمات السابقة من قبل باحثي المراجع [3,4,20]، وذلك من أجل تحديد نسبة بين السيالتين النيوترونييتين من أجل هاتين الطاقيتين. ولقد أظهرت مطابقة أفضل منحنى مع هذه البيانات أن هذه العلاقة تكون:

$$\Phi_{0.1 \text{ MeV}}/\Phi_{1.0 \text{ MeV}} = 2.123 (e^{0.191x}) \quad (2)$$

حيث $\Phi_{0.1 \text{ MeV}}$ هي السيالة النيوترونية ذات الطاقة $E > 0.1 \text{ MeV}$ عند السطح الخارجي لـ RPV.

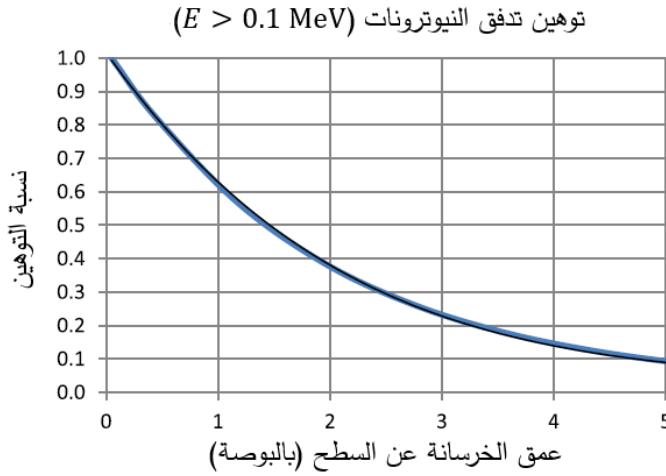
لقد تم استقراء البيانات المقدمة من مفاعلات الماء المضغوط PWRs ومفاعلات الماء المغلي BWRs في الولايات المتحدة [4] من أجل تقدير السيالة النيوترونية عند الجدار الخارجي OD لوعاء الضغط للمفاعل RPV المتوقعة بعد 80 عاماً من بدء تشغيل المفاعل (مع افتراض EFPY قدرها 73.6 years)، فكانت، من أجل مفاعلات الماء المضغوط PWRs: $\Phi_{0.1 \text{ MeV}} = 6.8 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$. وكانت من أجل مفاعلات الماء المغلي BWRs: $\Phi_{0.1 \text{ MeV}} = 1.0 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$. مرة أخرى، نذكر بأنه من الضروري أن يتم إجراء تقدير مستقل للسيالة النيوترونية للمحطات كل على حده لتوفير قيم دقيقة تنطبق على كل محطة بذاتها.

باستخدام السيادة النيوترونية التي عند القطر الخارجي OD للوعاء، يمكن حساب السيادة النيوترونية التي عند القطر الداخلي ID لخرسانة الدرع البيولوجي CBS. إن السيادة النيوترونية ذات الطاقة $E > 0.1 \text{ MeV}$ التي عند القطر الداخلي ID لخرسانة الدرع البيولوجي CBS ستكون أخفض مما هي عليه عند القطر الخارجي OD لوعاء الضغط للمفاعل RPV. ويرجع ذلك في المقام الأول إلى وجود فجوة هوائية بين OD للوعاء و ID للخرسانة. وقد تم استخدام التحليلات التي أجراها مختبر أوك ريج الوطني (ORNL) [4] ومعهد أبحاث الاستطاعة الكهربائية (EPRI) [11] لمقارنة قيم السيادة النيوترونية عند OD للوعاء مع تلك التي للخرسانة عند ID للجدار الداخلي ل CBS. في كل من التحليلين، عند كلا الموضعين قد تم الحساب من أجل $E > 0.1 \text{ MeV}$ لمحطة مفاعل ماء مضغوط PWR ذات حلقتين لويستغهاوس ولمحطة ذات ثلاثة حلقات لويستغهاوس⁹. ولكلاهما تم استخدام الكثافة الخرسانية، والمكونات العنصرية، والمحتوى المائي التي تم أخذها من تقرير اللجنة التنظيمية النووية NUREG-6453 [21]. وقد بينت النتائج أن السيادة النيوترونية التي عند القطر الداخلي لخرسانة الدرع البيولوجي CBS تكون أقل بـ 0.9 مرة من تلك التي تكون عند القطر الخارجي لوعاء الضغط للمفاعل RPV OD. وعلى هذا الأساس، يوصي أنه عند إجراء أي تقدير يجب أن يتم استخدام حصة محافظ عليها (ثابتة) للسيادة النيوترونية عند القطر الداخلي قدرها 0.9 من السيادة النيوترونية عند RPV OD.

B. التوهين عبر الخرسانة: إن التوهين عبر الخرسانة هو من المقادير الهامة من أجل تقدير القدرة البنوية لجدار الدرع البيولوجي، نظراً لأن القدرة البنوية تحافظ على نفسها أكثر كلما كانت السيادة النيوترونية أصغر. يمكن حساب التوهين باستخدام كودات عبور النيوترونات وفوتونات غاما التي تحاكي التأثيرات المتبادلة لها مع مادة الخرسانة [4]. وقد تم حساب ذلك من أجل خرسانة عادية وخرسانة تتضمن تسليحاً بالفولاذ [3]. يبين الشكل (2) رسماً بيانياً لنتائج هذه الحسابات. علماً أن هذه الحسابات كانت قد أجريت من أجل محطة نموذجية ذات حلقتين وذات ثلاث حلقات. وقد كانت النتائج من أجل ذات الحلقتين هي الأكثر محافظة

⁹ حلقات تبريد بالماء.

(ثباتاً). ولهذا، هي التي تم تقديمها في **الشكل (2)**. في هذا الشكل تم رسم نسبة التوهين Φ_0/Φ_x بتدرج خطي ($x + \Delta x, x = 0,1,2,\dots$) بحيث يمكن تمييز التعبير في التدفق أو السيادة مع العمق بسهولة أكبر. لاحظ أن قيمة السيادة النيوترونية تتناقص حوالي رتبة واحدة (من 1.0 حتى 0.1) خلال الـ 5 إنشات (12.7 cm) الأولى. وأن نسبة التوهين ضمن الـ 5 إنشات الأولى هذه من الخرسانة تكون كبيرة. ويتناقص التدفق النيوتروني إلى النصف تقريباً ضمن الإنش ونصف الأولى (3.8 cm) من بداية الخرسانة.



الشكل (2): نسبة توهين السيادة النيوترونية ($E > 0.1 \text{ MeV}$) عبر خرسانة اسمنت بورتلاند بدلالة العمق في الخرسانة خلال أول 5 إنشات من بداية الخرسانة.

وبمطابقة المنحنى الناتج، **الشكل (2)**، مع خط اتجاه لمتعدد-حدود polynomial

trend line تم الحصول عبارة لنسبة التوهين attenuation ratio تعطى **بالمعادلة (3)** أدناه:

$$A_n = (-9.5577 \times 10^{-6})d^5 + (4.8793 \times 10^{-4})d^4 - (9.6891 \times 10^{-3})d^3 + (9.4840 \times 10^{-2})d^2 - 0.47235d + 1.016565 \quad (3)$$

حيث A_n هو نسبة التوهين للسيادة في خرسانة اسمنت بورتلاند، و d هو السماكة أو

العمق في جدار CBS من سطح عند القطر الداخلي ID للخرسانة بالإتش.

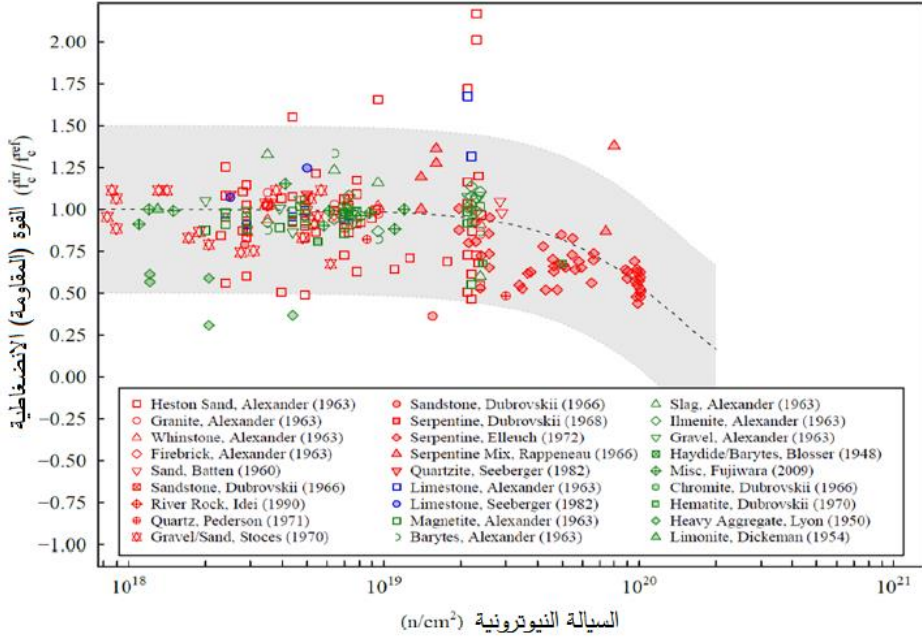
2.2.3. اختبارات تأثير السيادة النيوترونية

لسنوات عديدة، كان المرجع الذي يستخدمه معظم الباحثين لتحديد عتبة تعرض الخرسانة هو مقالة هيلسدورف وزملائه. حيث إن هيلسدورف وزملائه [22] نشروا في عام 1978 مقالة عن آثار أو تأثيرات الإشعاع النووي على الخواص الميكانيكية للخرسانة. كانوا قد قاموا فيها بتجميع وتنسيق وتلخيص كافة البيانات التجريبية المنشورة مسبقاً عن تأثيرات الإشعاع على خصائص الميكانيكية للخرسانة. إن ما يمكن ملاحظته في هذه البيانات أن اختبارات تأثير السيالة النيوترونية على الخرسانات كانت قد أجريت عند درجات الحرارة مختلفة جداً ومن أجل أيضاً طاقات نيوترونية مختلفة جداً. ورغم ذلك، توصل هيلسدورف وزملائه من خلال توحيد البيانات إلى أن تعرض الخرسانة إلى سيالة نيوترونية أكبر من $1.0 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ يمكن أن يؤدي إلى مفعول تناقص سريع في كل من مقاومة الخرسانة ومعامل المرونة [22]؛ أي بلوغ عتبة الضرر.

ومنذ عام 1978 حتى عام 2016 أنجزت أيضاً أعمال كثيرة عن تأثيرات الإشعاع النووي في الخرسانة الدرع البيولوجي التي تم نشرها في بحوث كثيرة منها [3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15]. وفي عام 2017 تم تجميع قاعدة بيانات كبيرة عن الخصائص الميكانيكية للخرسانات المشعة بالنيوترونات من قبل فيلد وزملاؤه [16]. حيث أن فيلد وزملاؤه قدموا الشكل (3) الذي يبين رسماً بيانياً لمقاومة الانضغاط النسبية للخرسانة بدلالة السيالة النيوترونية. إن هذا الرسم يدل على أن مقاومة الانضغاط النسبية تبدي تناقصاً سريعاً عند سيالة قدرها $1 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$. وعلماً أن طاقة النيوترونات ودرجة حرارة الخرسانة، كما نوهنا، كانتا تختلفان بشكل كبير من اختبار لآخر. حتى أن بعض هذه البيانات كانت تتعلق باختبارات أجريت عند طاقات درجات حرارة مخالفة وأعلى من تلك التي في محطات الطاقة النووية.

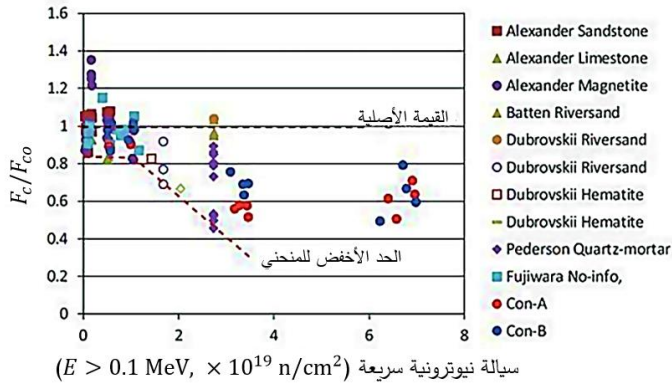
وفي عام 2017 قدم ماروياما وزملاؤه [23] بيانات منسقة من أجل طاقة للنيوترونات $E > 0.1 \text{ MeV}$ وعند درجات حرارة اختبارية أقل من 212°F (100°C) إلى جانب نتائج اختباراتهم الجديدة. ولقد تمت دراسة الخرسانة في هذه الاختبارات كخرسانة نموذجية يمكن الاستفادة منها في تشغيل المفاعلات النووية التجارية. وقد تم تلخيص هذه البيانات في الشكل

(4). وهذا الشكل أيضاً يبين أن تناقصاً سريعاً لمقاومة الانضغاط النسبية يبدأ عند سيالة نيوترونية قدرها $1.0 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$. وهذه النتيجة تتفق مع الآراء المطروحة من قبل المؤلفين في المؤلفات التقنية ومع ما قدمه هيلسدورف وزملائه.



الشكل (3): رسم بياني لمقاومة الانضغاط النسبية للخرسانة بدلالة السيالة

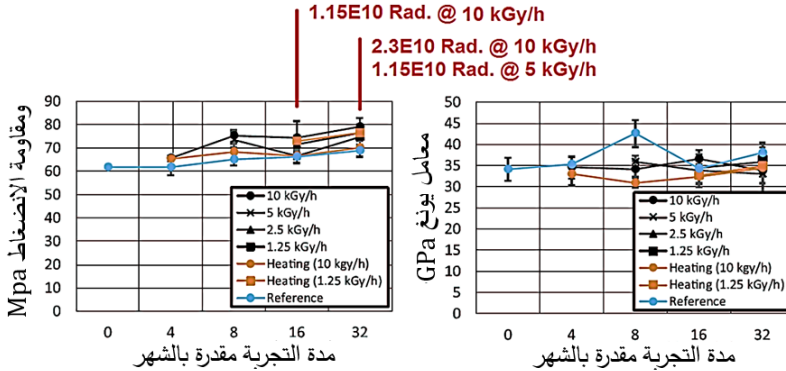
النيوترونية [16].



الشكل (4): رسم بياني لمقاومة الانضغاط النسبية للخرسانية (f_c/F_{co}) بدلالة سيالة نيوترونية سريعة ($E > 0.1 \text{ MeV}$) [23]. حيث f_c هي مقاومة الانضغاط المختبرة بعد التشعيع؛ F_{co} مقاومة الانضغاط الأصلية قبل التشعيع.

3.2.3. اختبار غاما

لقد قدم هيلسدروف وزملائه [22] في عام 1978 أيضاً التغير في مقاومة الانضغاط بدلالة جرعة غاما ، لكن من أجل كمية محدودة من البيانات المجمعة. وإن نزعة القيمة الوسطى المستقرأة من الرسم البياني لهذه البيانات تدل على أن هنالك التناقص في مقاومة الانضغاط يصبح ملحوظاً عند جرع غاما تبدأ من $2.0 \times 10^{10} \text{ Rad}$ حتى $3.0 \times 10^{10} \text{ Rad}$. لكن على كل حال، إن البيانات في الرسم البياني كانت متباينة بشكل كبير ولا يمكن اعتبارها ممثلة لظروف التشغيل في المفاعلات التجارية. ولقد قدم ماروياما وزملاؤه [23] أيضاً دراسة مرجعية لبيانات اختبارات جرعات غاما السابقة وقد لاحظوا فيها أن تسخين العينات كان يؤثر على العديد من نتائج الاختبار. ولذلك، قاموا بتصميم اختبارات غاما للحد من التسخين ، كما قاموا بإجراء هذه الاختبارات، وتلخيص بياناتها [23]. يبين الشكل (5). البيانات الممثلة لمقاومة الانضغاط ومعامل المرونة. وقد تم التعليق أعلى هذا الشكل على أن الخطوط هي من أجل معدلات تعرض مختلفة لأشعة غاما. ويلاحظ منها، بصورة عامة، أن هنالك نزعة تزايد لمقاومة الانضغاط للعينات كلما طالت فترة تشعيها، خلافاً لما هو متوقع.



الشكل (5): تغير مقاومة الانضغاط ومعامل المرونة بدلالة الجرعة لأشعة غاما ومن أجل جرع مختلفة مشار إليها أعل الشكل [23].

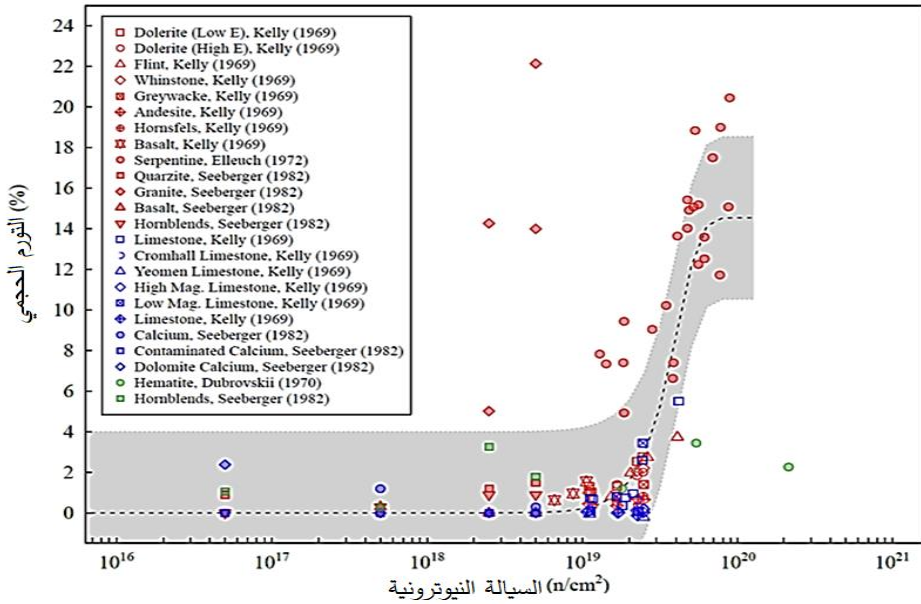
وقد اقترح ماروياما في مقاله أيضاً أنه يجب علينا إما أن نقوم برفع القيمة المرجعية للعتبة من أجل التعرض لأشعة غاما إلى سوية أعلى أو أنه يجب علينا التخلي عنها مطلقاً. وبالتالي، بالنظر في بيانات هيلسدورف السابقة وبيانات الاختبارات التي قدمها ماروياما، يبدو لنا أن التشبع بغاما حتى عتبة قدرها 2.3×10^{10} Rad ليس له تأثيراً ضاراً على الخصائص الميكانيكية للخرسانة.

A. تغير خصائص الخرسانة

ونستخلص مما سبق أنه في ظروف محاكية لما يتعرض له الدرع البيولوجي الخرساني، إن القدرة البنوية للدرع البيولوجي الخرساني CBS تتأثر بشدة عندما تتجاوز قيمة السيالة النيوترونية ($E > 0.1$ MeV) عتبة الضرر البالغة 1.0×10^{19} n/cm². وتتأثر الخرسانة تأثيراً غير ذي شأن عندما تتجاوز جرعة غاما عتبة قدرها 2.3×10^{10} Rad. وعندما تتجاوز قيمة السيالة النيوترونية 1.0×10^{19} n/cm²، تكون الانتفاخات الحجمية في الخرسانة الناتج الإشعاع (RIVE) مصحوباً ببدء تناقص سريع في خصائصها الميكانيكية. وعندما تتجاوز جرعة غاما العتبة 2.3×10^{10} Rad، يتوقع حدوث تناقص إضافي ما في مقاومة الانضغاط النسبية، ولكنه ضئيل. ولذلك، فإن التقديرات البنوية فيما يلي سوف تستند على سويات للسيالة النيوترونية فقط، والتي سوف نعتبر فيها أن العتبة 1.0×10^{19} n/cm² هي بمثابة قيمة وسطى لعتبات مختلفة، كما سيتوضح لاحقاً.

وبناء على ما سبق أيضاً، يجب أن ننبه إلى إن التغييرات الكبيرة في خصائص الميكانيكية لخرسانة تكون كبيرة جداً على عمق قدره عدة إنشات من القطر الداخلي للدرع البيولوجي الخرساني CBS. وأن هذا العمق يتوقف على قيمة السيالة النيوترونية عند القطر الداخلي ID للدرع البيولوجي الخرساني CBS. وأننا لا نفترض حدوث تغييرات مخيفة عندما تكون السيالة النيوترونية أخفض من عتبة الضرر.

لقد وصف المرجع [9] بشكل كامل حدوث الانتفاخات الحجمية في الخرسانة الناتجة الإشعاع RIVE والتغيرات في مقاومة الانضغاط ومقاومة الشد ومعامل المرونة. يبين الشكل (6) الانتفاخات الحجمية الناتجة عن الإشعاع RIVE، الذي يلاحظ فيه أن تزايداً سريعاً في الانتفاخات الحجمية يبدأ عند السيالة النيوترونية الموافقة لبدء الانخفاض السريع في مقاومة الانضغاط للدرع البيولوجي الخرساني المبين في الشكل (4). وهناك أيضاً تغيراً مشابهاً في كل من مقاومة الشد ومعامل المرونة تم ذكره في التقرير [9].



الشكل (6): الانتفاخات الحجمية بدلالة السيالة النيوترونية. علماً أن مجال طاقة النيوترونات ودرجة الحرارة يختلفان بشكل كبير من اختبار لآخر وليس كليهما ممثلين للظروف في المحطات النووية [9].

وقد تم تحويل الرسوم البيانية السابقة إلى علاقات رياضية تربط الخاصة الميكانيكية المختبرة بالسيالة النيوترونية من قبل لي بابي [7]. وسيتم فيما يلي ذكر العلاقة الخاص بكافة الخصائص الميكانيكية الهامة:

لقد جرى حساب الانتفاخات الحجمية العائدة إلى التوسع الحجمي الناتج عن الإشعاع RIVE، كتابع للسيالة المتراكمة من قبل لي بابي [7]. حيث قام لي بابي بفرز أو تصنيف مجمل البيانات وتحديد البيانات التي يمكن اعتبارها ممثلة لمجمل مكونات مفاعلات الماء الخفيف. فوجد أن علاقة الانتفاخات الحجمية هي:

$$\varepsilon_{sw}(\Phi) = \kappa \varepsilon_{max} \frac{e^{\delta\Phi} - 1}{\varepsilon_{max} + \kappa e^{\delta\Phi}} \quad (4)$$

حيث $\varepsilon_{sw}(\Phi)$ هي الانتفاخات الحجمية كتابع للسيالة النيوترونية، و Φ هي السيالة النيوترونية $E > 0.1 \text{ MeV}$ بوحدة n/cm^2 ، و κ هو بارامتر؛ تجانس الانفعال، ليس له أبعاد ويساوي 0.00968، و ε_{max} هي الانتفاخات الحجمية الأعظمية وتساوي 0.00936، و δ هو مقلوب السيالة ويساوي $3.092 \times 10^{-20} \text{ cm}^2/\text{n}$.

واستناداً إلى نفس البيانات وجد لي بابي [7] أن علاقة مقاومة الانضغاط للخرسانة كتابع للسيالة النيوترونية هي:

$$f_c(\Phi) = f_{co} e^{-(\Phi \times 7.253 \times 10^{-21})^{1.582}} \quad (5)$$

حيث f_{co} هي مقاومة الانضغاط للخرسانة المصممة بعد 28 يوماً بدون تشيع، مقدرة بوحدة الباوند على الإنش المربع psi، و Φ هي السيالة النيوترونية ($E > 0.1 \text{ MeV}$) مقدرة بـ n/cm^2 .

واستناداً إلى نفس البيانات وجد لي بابي [7] أن علاقة لمقاومة الشد للخرسانة كتابع للسيالة النيوترونية هي:

$$f_t(\Phi) = f_{to} e^{-(\Phi \times 8.649 \times 10^{-21})^{0.436}} \quad (6)$$

حيث f_{to} هي مقاومة الشد للخرسانة قبل التشيع، محسوبة وفقاً لمتطلبات معهد الخرسانة الأمريكية (ACI)، ومقدرة بـ psi.

واستناداً إلى نفس البيانات وجد لي بابي [7] أن علاقة عامل المرونة للخرسانة كتابع للسيالة النيوترونية هي:

$$E(\Phi) = E_o e^{-(\Phi \times 4.073 \times 10^{-22})^{0.4025}} \quad (7)$$

حيث E_0 هو معامل المرونة للخرسانة قبل التشيع، محسوباً وفقاً لمتطلبات معهد الخرسانة الأمريكية (ACI) ، ومقدراً ب ψ .

ونحن نرى أن العلاقات الرياضية السابقة الممثلة لكافة الدراسات الهامة بالنسبة السلامة المفاعل، التي تقدم لنا توصيفاً إجمالياً للخصائص الميكانيكية لمجمل خرسانات الدروع البيولوجية المستخدمة في محطات الاستطاعة النووية الحالية، لا يمكن الاطمئنان إليها من أجل التنبؤ بالعمر التشغيلي الآمن لمحطة استطاعة نووية معينة مختارة، لأنها في الحقيقة أولاً تقدم قيماً وسطى للخصائص الميكانيكية لمجمل خرسانات الدروع البيولوجية المستخدمة في محطات الاستطاعة النووية. وثانياً لأنه ربما تكون خرسانة الدرع البيولوجي للمحطة المعنية المختارة ذات مقاومة ابتدائية (قبل التشيع) أصغر من تلك التي توافق القيمة الوسطى لمجمل الخرسانات المستخدمة. وعندئذ، إذا ما توقعنا العمر التشغيلي لهذه المحطة، اعتماداً على الدراسات السابقة والعلاقات الممثلة، وقررنا عدم إيقاف هذه المحطة حتى ينتهي العمر التشغيلي المتوقع، فإننا سنكون، لا سمح الله، قد سمحنا بحدوث كارثة نووية، لأن مثل هذه الخرسانة سيكون لها، كما سيتبين لاحقاً، عتبة ضرر أصغر من العتبة المستنتجة من الدراسات السابقة والتي يمكن التنبؤ بها من العلاقات أعلاه، والتي هي $1.0 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$.

لكن على كل حال، يمكننا من إعادة استقراء البيانات المذكورة للتوصل إلى عمر تشغيلي مطمئن نضمن خلاله عدم حدوث كارثة نووية. كما يمكن وضع طريقة لتحديد العمر التشغيلي الافتراضي الآمن للخرسانة التي سيتم منها إنشاء الدرع البيولوجي لاحقاً. وكما يمكن أيضاً من خلالها فهم الدراسة المرجعية اقتراح التعديلات في الخرسانة وفي بنية المفاعلات من أجل إطالة عمر أي محطة استطاعة نووية.

4. تقدير العمر التشغيلي للمحطات النووية

لقد كانت كافة الاستقراءات والمعالجات التي أجراها هيلسدورف وزملائه [22] وفيلد وزملائه [16] وماروياما وزملائه [23] على البيانات المجمعة المتوفرة عن الخصائص الميكانيكية للخرسانات المشعة بالنيوترونات قد تمت بطرق متشابهة تقريباً وقد أعطت نتائج

متقاربة جداً لمقاومة الخرسانة، وذلك لأنه في جميعها قد تم إيجاد السلوك أو التابع الوسطى لتأثير النيوترونات على مقاومة خرسانة الدرع البيولوجي.

ونحن سنقوم بقبول السلوك الوسطى لكافة الخرسانات على أنه سلوكاً عاماً لأي خرسانة تدرس بشكل منفصل ومستقل لكن في ظروف خرسانة الدرع البيولوجي لمحطة معينة بذاتها. ونحن نرى بأن هذه الاستقرارات والمعالجات رغم أنها جيدة ومفيدة، إلا أنها تُفقد البيانات الكثير من المعلومات التي تتضمنها، والتي يمكن أن تكون مفيدة في تحديد عمر كل منشأة على حدة. فبما أن البيانات المتوفرة قد تم الحصول عليها من خرسانات مختلفة ومتنوعة بشكل كبير من حيث البنية، فإنه من المفترض أن يكون لكل خرسانة مستقلة منها خصائص ميكانيكية خاصة بها. وبالتالي، فإن التغيرات في مقاومة كل منها مع الزمن، وبالتالي، مع السيادة النيوترونية يجب أن تكون مختلفة.

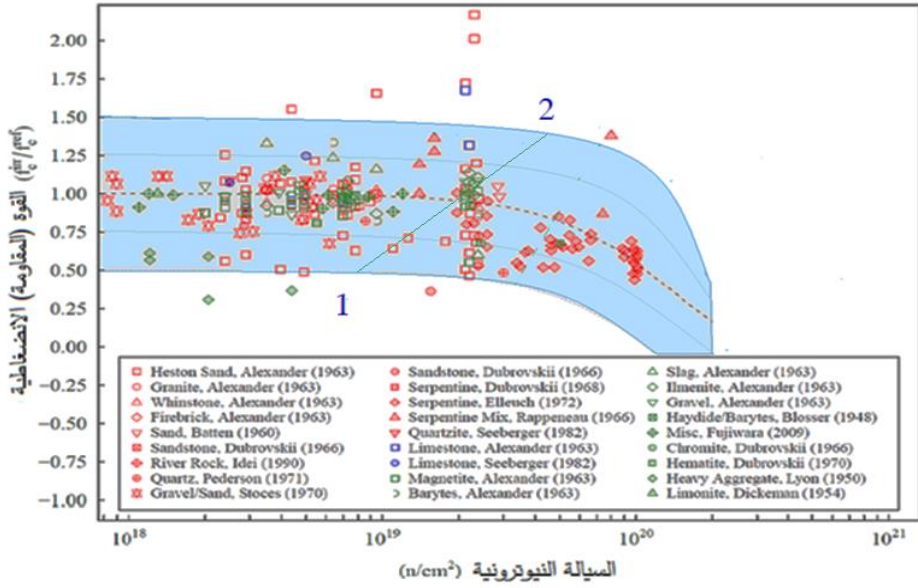
وبما أن حديد التسليح والاسمنت يتم إنتاجها عالمياً وفق مواصفات ومعايير تقريباً متماثلة وخاصة في الدول المتقدمة، فإن التغير في مقاومة حديد التسليح والاسمنت نتيجة تأثير النيوترونات سيكون متماثلاً تقريباً في خرسانة يستخدمان فيها.

وبما أن الركام يشكل حوالي 70% من مكونات الخرسانة، فإن التغير في مقاومة الخرسانة إنما يحصل بشكل رئيسي في الركام. وبما أن كل نوع من الركام إنما يؤخذ عادة من صخور البلد الذي يتم فيه بناء المحطة. وهذه الصخور تكون عادةً مكونة من مواد معدنية بلورية مختلفة. وبالتالي، فإن هذه الصخور ستمتلك شبكات بلورية مختلفة (مكعبية، مشورية، ...). وبالتالي، سيكون لها طاقات ارتباط للذرات في شبكاتها البلورية مختلفة. وبكلام آخر، إن طاقات ارتباط الذرات تكون مختلفة من ركام لآخر. بالتالي، فإن التغيرات في مقاومات الخرسانات نتيجة تأثير النيوترونات على رُكُمها المختلفة ستكون مختلفة من خرسانة لأخرى. ولذلك، قمنا باستقراء البيانات المتوفرة بطريقة مختلفة.

1.4. تقدير العمر التشغيلي للمحطات النووية من أجل مقاومة الانضغاط النسبية للخرسانة:

في هذا البحث، سنقدم فقط نموذجاً واحداً عن طريقة استقراءاتنا والمعالجة للبيانات المتوفرة عن تغير المقاومة الانضغاطية النسبية ومقاومة الشد النسبية ومعامل المرونة النسبي مع السيالة النيوترونية. إن استقراء تغير المقاومة الانضغاطية النسبية مع تزايد السيالة ميبين في المنطقة الملونة في الشكل (7).

في استقراء البيانات المتوفرة المشار إليه بالمنطقة الملونة في الشكل (7) حاولنا أن نعطي أولاً للبيانات المستوحاة تغيراً تناقصياً، لأنه كلما زادت السيالة النيوترونية تزايدت الانتفاخات الحجمية، وبالتالي تناقصت المقاومة الانضغاطية النسبية. وثانياً اعتبرنا أن الخطين الطرفين الحدوديين للمنطقة الملونة يمثلان خرسانتين مختلفتين. ولذلك أعطينا لهما بدايتي تناقص سريع مختلفتين، حيث إنه، وفقاً لتصوراتنا، إن الخطين الحدوديين ينتجان عن خرسانتين مختلفتين تمتلكان خصائصاً ميكانيكية مختلفة. ولذلك، فإن بداية التناقص السريع لهما تكون عند نقطتين مختلفتين أشرنا لهما على الشكل (7) ب 1 و 2. وهاتان النقطتان توافقان سيالتان مختلفتان. وفضلاً على ذلك، إننا نفترض بأن كل خرسانة المدروسة كان سيكون لها سلوكاً مماثلاً للسلوك الوسطي لتغير المقاومة الانضغاط النسبية مع تغير السيالة النيوترونية، المبين في الشكل (7)، فيما لو عينت مقاومة الخرسانة عند ظروف ثابتة محددة مماثلة لظروف خرسانة الدرع البيولوجي الذي يبني منها.



الشكل (7): استقراء تغير المقاومة الانضغاط النسبية مع تزايد المسألة النيوترونية.

وفقاً لهذه المنهجية قمنا باستقراء تقريبي لخمس مجموعات من البيانات التي نفترض أنها تعود، في الواقع، لخمس خرسانات مختلفة. يبين **الجدول (1)** خمس مجموعات من البيانات المستقراء من **الشكل (7)** التي نفترض أنها تعود لخمس خرسانات مختلفة افتراضية. وبالتالي، تعود لخمس محطات نووية مختلفة افتراضية.

الجدول (1): خمس مجموعات من البيانات تعطي تغير مقاومة الانضغاط النسبية

المستقره التي تعود لخمس خرسانات مفترضة مختلفة منفصلة موجودة في الواقع، في خمس محطات نووية منفصلة.

$\frac{f_{c5}}{F_{co5}}$	$\frac{f_{c4}}{F_{co4}}$	$\frac{f_{c3}}{F_{co3}}$	$\frac{f_{c2}}{F_{co2}}$	$\frac{f_{c1}}{F_{co1}}$	Φ (n/cm ²)
1.5	1.25	1	0.75	0.5	1E+18
1.48	1.24	0.98	0.72	0.46	1E+19
1.47	1.22	0.97	0.7	0.44	5E+19
1.46	1.21	0.96	0.69	0.43	6E+19
1.45	1.2	0.95	0.67	0.4	6.5E+19
1.44	1.19	0.94	0.65	0.35	7E+19
1.43	1.18	0.92	0.63	0.3	7.5E+19
1.42	1.17	0.9	0.61	0.25	8E+19
1.41	1.15	0.88	0.59		8.5E+19
1.4	1.14	0.86	0.57		9E+19
1.39	1.13	0.84	0.55		9.5E+19
1.38	1.11	0.82	0.51		1E+20
1.33	1.03	0.75			1.20E+20
1.23	0.89				1.50E+20
1.1	1.25				2E+20

ونظراً لأن بيانات أي عمود مقاومة انضغاطية نسبية في **الجدول (1)** تمثل خرسانة معينة، فإنه لو تم أخذ هذه القياسات لكل خرسانة على انفراد لكان من المفترض أن تبدأ كلها من الواحد، مثلها مثل المقاومة الانضغاطية النسبية الوسطى. ولذلك، يجب أن نقوم بعمل انزياح للقيم بمقدار ثابت بحيث تصبح أول قيمة في كل عمود مقاومة انضغاطية نسبية مساوية للواحد،

فمثلا يجب إنقاص قيم العمود الأخير بمقدار نصف (-0.5)، ويجب إضافة نصف إلى قيم العمود الأول (+0.5). وهكذا بناء عليه، فإننا نحصل على **الجدول (2)**.

الجدول (2): مجموعات بيانات تغير مقاومة الانضغاط النسبية المستقرأه العائدة لخمس خرسانات مفترضة مختلفة منفصلة بعد أن تمت إزاحتها لتصبح وكأنها مأخوذة لخمس خرسانات مستقلة بذاتها.

$\frac{f_{c5}}{F_{co5}}$	$\frac{f_{c4}}{F_{co4}}$	$\frac{f_{c3}}{F_{co3}}$	$\frac{f_{c2}}{F_{co2}}$	$\frac{f_{c1}}{F_{co1}}$	Φ (n/cm ²)
0.995	0.99	0.987	0.985	0.98	1E+18
0.98	0.98	0.98	0.97	0.96	1E+19
0.97	0.97	0.97	0.95	0.94	5E+19
0.96	0.96	0.96	0.94	0.93	6E+19
0.95	0.95	0.95	0.92	0.9	6.5E+19
0.94	0.94	0.94	0.9	0.85	7E+19
0.93	0.93	0.92	0.88	0.8	7.5E+19
0.92	0.92	0.9	0.86	0.75	8E+19
0.91	0.9	0.88	0.84		8.5E+19
0.9	0.89	0.86	0.82		9E+19
0.89	0.88	0.84	0.8		9.5E+19
0.88	0.86	0.82	0.76		1E+20
0.84	0.78	0.75			1.20E+20
0.75	0.64				1.50E+20
0.6	0.35				2E+20

لنقم برسم تابعة المقاومة الانضغاطية النسبية كتابع للسليالة النيوترونية في الجدول (2) من أجل الخرسانات الخمس المفترضة 1 و 2 و 3 و 4 و 5 أولاً بواسطة برنامج ماثكاد من أجل مطابقتها (مقايستها) مع تابع مقترح توحى به النقاط البيانية.

إن الشكل العام لمعادلة المنحنى المقترح لمقايصة بيانات المقاومة الانضغاطية النسبية

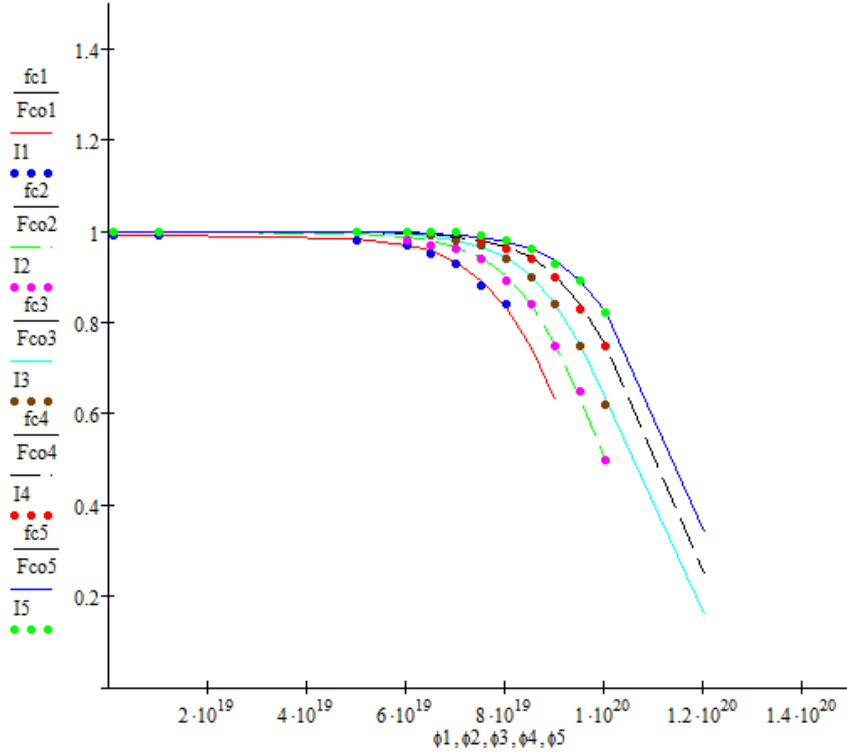
هو من الشكل:

$$\frac{f_{ci}(\Phi)}{F_{coi}} = \frac{1}{1 + e^{\frac{\Phi-A}{B}}} \quad (8)$$

حيث إن f_{ci} في المعادلة (8) تمثل مقاومة الانضغاطية للخرسانة في أثناء التشيع بالسليالة النيوترونية، و t تمثل رقم الخرسانة و F_{coi} تمثل مقاومة الانضغاط قبل التشيع، ، إن A, B هما بارامتران يمكن تعيينهم من خلال النقاط البيانية.

بإجراء مقايصة (مطابقة) بواسطة المربعات الأصغرية للنقاط البيانية للمقاومة

الانضغاطية مع المعادلة (8) بواسطة الماثكاد، نحصل على الشكل (8).



الشكل (8): مقارنة النقاط البيانية للمقاومة الانضغاطية النسبية للخرسانات 1 و 2 و 3 و 4 و 5 كتابية للسائلة النيوترونية بواسطة الماتكاد.

إن توابع المقايسة للنقاط البيانية للخرسانات 1 و 2 و 3 و 4 و 5 هي:

$$\frac{f_{c1}(\Phi)}{F_{co1}} = \frac{0.99}{1 + e^{\frac{\Phi_1 - 9.5 \times 10^{19}}{9 \times 10^{18}}}} \quad (9)$$

$$\frac{f_{c2}(\Phi)}{F_{co2}} = \frac{1}{1 + e^{\frac{\Phi_2 - 10 \times 10^{19}}{9 \times 10^{18}}}} \quad (10)$$

$$\frac{f_{c3}(\Phi)}{F_{co3}} = \frac{1}{1 + e^{\frac{\Phi_3 - 10.5 \times 10^{19}}{9 \times 10^{18}}}} \quad (11)$$

$$\frac{f_{c4}(\Phi)}{F_{co4}} = \frac{1}{1 + e^{\frac{\Phi_4 - 11 \times 10^{19}}{9 \times 10^{18}}}} \quad (12)$$

$$\frac{f_{c5}(\Phi)}{F_{co5}} = \frac{1}{1 + e^{\frac{\Phi_5 - 11.4 \times 10^{19}}{9 \times 10^{18}}}} \quad (13)$$

يبين الجدول (3) قيمتي البارامترين A, B من أجل الخرسانات 1 و 2 و 3 و 4 و 5.

الجدول (3): قيمتي البارامترين A, B من أجل الخرسانات 1 و 2 و 3 و 4 و 5.

	خرسانة 1	خرسانة 2	خرسانة 3	خرسانة 4	خرسانة 5
A	9.5×10^{19}	10×10^{19}	10.5×10^{19}	11×10^{19}	11.4×10^{19}
B	9×10^{18}	9×10^{18}	9×10^{18}	9×10^{18}	9×10^{18}

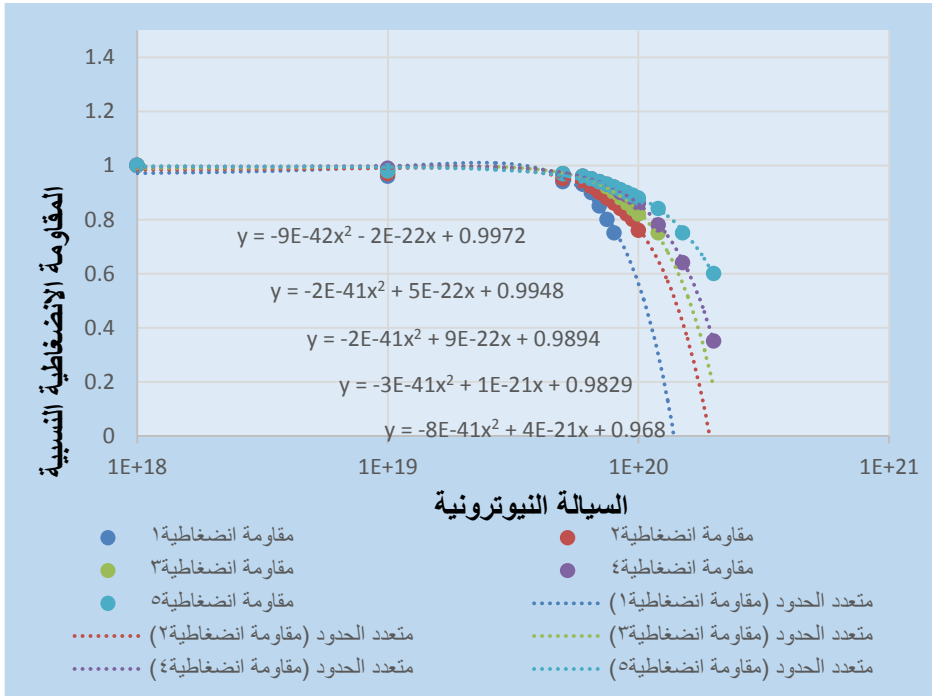
كما قمنا بمقايسة النقاط البيانية أيضاً مع تابع متعدد حدود من الدرجة الثانية له الشكل:

$$\frac{f_{ci}(\Phi)}{F_{coi}} \cong a\Phi^2 + b\Phi + c \quad (14)$$

باستخدام برنامج اكسل من خلال إيجاد معادلة خط الاتجاه (منحني المقايسة).

يبين الشكل (9) مقايسة النقاط البيانية للمقاومة الانضغاطية النسبية للسيالة

بواسطة الاكسل. مع توابع المقايسة (المطابقة).



الشكل (9): مقايسة النقاط البيانية للمقاومة الانضغاطية النسبية للخرسانات 1 و 2 و 3 و 4 و 5 معاً كتابع للسيلة وبواسطة الاكسل.

إن توابع المقايسة النقاط البيانية للخرسانات 1 و 2 و 3 و 4 و 5 من خلال الاكسل هي:

$$\frac{f_{c1}(\Phi)}{F_{co1}} = -8 \times 10^{-41}\Phi^2 + 4 \times 10^{-21}\Phi + 0.968 \quad (15)$$

$$\frac{f_{c2}(\Phi)}{F_{co2}} = -3 \times 10^{-41}\Phi^2 + 1 \times 10^{-21}\Phi + 0.9829 \quad (16)$$

$$\frac{f_{c3}(\Phi)}{F_{co3}} = -2 \times 10^{-41}\Phi^2 + 9 \times 10^{-22}\Phi + 0.9894 \quad (17)$$

$$\frac{f_{c4}(\Phi)}{F_{co4}} = -2 \times 10^{-41}\Phi^2 + 5 \times 10^{-22}\Phi + 0.9948 \quad (18)$$

$$\frac{f_{c5}(\Phi)}{F_{co5}} = -9 \times 10^{-42}\Phi^2 - 2 \times 10^{-22}\Phi + 0.9972 \quad (19)$$

يبين **الجدول (4)** قيم البارامترات a, b, c من أجل خمس خرسانات؛ 1 و 2 و 3 و 4 و 5.

الجدول (4): قيم البارامترات a, b, c من أجل خمس خرسانات؛ 1 و 2 و 3 و 4 و 5.

	خرسانة 1	خرسانة 2	خرسانة 3	خرسانة 4	خرسانة 5
a	-8×10^{-41}	-3×10^{-41}	-2×10^{-41}	-2×10^{-41}	-9×10^{-42}
b	4×10^{-21}	1×10^{-21}	9×10^{-22}	5×10^{-22}	-2×10^{-22}
c	0.968	0.9829	0.9894	0.9948	0.9972

تعين العمر التشغيلي الآمن للمفاعل: نعين نحن العمر التشغيلي الآمن لمحطة بناء على تعريفنا له كما يلي. انطلاقاً من تعريفنا لعتبة فقدان المقاومة للخرسانة، يكون:

$$\frac{f_{ci}(\Phi)}{F_{coi}} = 0.9 \cong a\Phi^2 + b\Phi + c \quad (20)$$

حيث إن البارامترات a و b و c في المعادلة يتم إيجادها، كما ذكرنا أعلاه،

إن العمر التشغيلي الافتراضي للمحطة يكون:

$$t = \frac{\Phi \times 1 \text{ years}}{\Phi_1} \quad (21)$$

حيث $\Phi_1(1 \text{ years}) = 8.31 \times 10^{17} \text{ n/cm}^2$ هي السيادة النيوترونية عند القطر الداخلي لخرسانة الدرع البيولوجي CBS خلال عام واحد من تشغيل المحطة النووية. وهو مقدار يختلف من محطة لأخرى.

تطبيق (1): إيجاد العمر التشغيلي الآمن بالنسبة للخرسانة ($i = 1$) فيما يتعلق بالمقاومة الانضغاطية النسبية.

من خلال العلاقة (15) التي تمثل تغيرات مقاومة الانضغاط النسبية بتغير السيادة النيوترونية بالنسبة للخرسانة ($i = 1$):

$$\frac{f_{c1}(\Phi)}{F_{co1}} = -8 \times 10^{-41} \Phi^2 + 4 \times 10^{-21} \Phi + 0.968 \quad (15)$$

$$\frac{f_{c1}(\Phi)}{F_{co1}} = 0.9 \Rightarrow 0.9 = -8 \times 10^{-41} \Phi^2 + 4 \times 10^{-21} \Phi + 0.968$$

$$-8 \times 10^{-41} \Phi^2 + 4 \times 10^{-21} \Phi + 0.068 = 0$$

بحل هذه المعادلة نجد:

$$\Phi = 6.3405 \times 10^{19}, \quad \Phi' = -1.3405 \times 10^{19} \text{ (مرفوض)}$$

وعندئذ، فإن العمر التشغيلي الافتراضي للمحطة يكون:

$$t = \frac{\Phi \times 1 \text{ years}}{\Phi_1} = \frac{\Phi}{\Phi_1} = \frac{6.3405 \times 10^{19}}{8.31 \times 10^{17}} = 76.29 \text{ years}$$

يبين **الجدول (5)** العمر التشغيلي الافتراضي لخمس خرسانات تم استقراؤها من البيانات التجريبية المتوفرة التي يمكن أن نعزيها لخمس محطات نووية افتراضية ذات مفاعل ماء مضغوط.

الجدول (5): السيادة الموافقة لعتبة فقدان المقاومة الانضغاطية النسبية والعمر التشغيلي الافتراضي لخمس محطات مفاعل ماء مضغوط.

	Φ_2	Φ_3	Φ_4	Φ_5	Φ_6
$\Phi_i(n/cm^2)$	6.34×10^{19}	6.97×10^{19}	7.49×10^{19}	8.12×10^{19}	9.09×10^{19}
$t(\text{years})$	76.29	83.88	90.23	97.71	109.38

هكذا يكون بذلك قد قمنا باستقراءاتنا للبيانات المتوفرة هو تغير المقاومة الانضغاطية النسبية مع السيادة النيوترونية فيما يتعلق بالمقاومة الانضغاطية النسبية وتوصلنا الى تحديد العمر التشغيلي الآمن للمحطة النووية وذلك من أجل خمس خرسانات مختلفة كما تم ذكرها سابقاً.

5. توصيات من أجل إطالة عمر محطة:

إن إطالة عمر أي محطة النووية قيد التشغيل هو إحدى أهداف هذا البحث. لقد تبين لنا من خلال الدراسة المرجعية ومن معالجة النتائج التجريبية أنه نطيل عمر محطة يجب علينا إجراء بعض التعديلات على التصميم الحالي للمفاعل. وهذه التعديلات كلها تركز على تقليل السيادة النيوترونية الساقطة على خرسانة الدرع البيولوجي. لأنه، كما ذكرنا أعلاه، كلما كانت السيادة النيوترونية الساقطة خلال وحدة الزمن على خرسانة الدرع البيولوجي أصغر، كلما كان عمر الخرسانة أكبر. وبالتالي، كان عمر المحطة أكبر.

لذلك، من أجل تقليل السيادة النيوترونية يمكننا أن نقدم بعض من التوصيات:

أولاً تغليف وعاء الضغط للمفاعل بغلاف قابل للتبديل من مادة أو مواد خليط يكون احتمال التفاعل من أجلها قليل وعدد التشعيرات صغير، مثل: ^{40}Ca , ^{39}K .

ثانياً باستبدال تيار الهواء في الفجوة الهوائية بتيار من غاز أو مزيج غازي ذي مقطع عرضي كبير لامتصاص أو أسر النيوترونات، ويفضل أن يكون خاملاً كيميائياً وإشعاعياً مثل الهليوم مع زيادة كثافة هذا الغاز بالقدر المتاح.

ثالثاً تركيب بطانة معدنية قابلة للتبديل على الجهة الداخلية للخرسانة من معدن عاكس للنيوترونات بسماكة مناسبة مثل: ^{27}Al , ^{56}Fe .

6 . المناقشة

تقسم التفاعلات النيوترونية-النوية إلى: تفاعلات تشتت مرن ولا مرن، وتفاعلات امتصاص أو أسر، وتفاعلات الانشطار في العناصر الثقيلة. إن أحد أنواع تفاعلات التشتت الأكثر تأثيراً نسميها تفاعلات إزاحة الذرات عن مواقعها في الشبكة البلورية للجسم الصلب، حيث يعطي فيها النيوترون جزءاً من طاقته إلى النواة المتشنتة. فإذا كانت طاقة الارتداد للنواة المتشنتة أكبر من طاقة ارتباط ذرتها في الشبكة البلورية، فإن الذرة ككل تُقتلع من موضعها بطاقة حركية ما، وعادة ما تكون هذه الطاقة كبيرة بما يكفي أن تقتلع في طريقها عدداً كبيراً من ذرات الشبكة البلورية، مشكلة بذلك ذرات خلالية، ومنطقة خالية أو شاغرة من الذرات، وهذا ما يعرف بعيب فرنكل.

إن عدد هذه العيوب يزداد مع زيادة التعرض للسيلة النيوترونية، مما يؤدي إلى تشكل مجموعات من عيوب فرنكل، التي تسمى عيوباً عنقودية. وفي نهاية المطاف، يؤدي ذلك إلى تناقص مقاومة الخرسانة. فكلما ازداد عدد عيوب فرنكل كلما تناقصت قيمة المقاومة. وعند عدد عيوب معين تنخفض قيمة المقاومة الانضغاطية بمقدار 0.1 من قيمتها قبل التشجيع. وعندئذ، نعتبر أن الخرسانة قد وصلت إلى عتبة الضرر (خطر الانهيار). وبالتالي، يجب إيقاف المفاعل عن العمل وإنهاء عمل المحطة. إن التقليل من هذا النوع من التفاعلات يمكن يُطيل من عمر خرسانة الدرع البيولوجي. وبالتالي، من عمر المحطة. إن أحد الآليات التي تقلل من تأثير هذه التفاعلات هي إعادة الاتحاد لأزواج فرنكل.

7 . الاستنتاجات:

1. إن تغيرات المقاومة الانضغاطية النسبية للخرسانة توصف بالمعادلة (8).
2. يمكن أن يتم وصف تغيرات المقاومة الانضغاطية النسبية للخرسانة بتابع متعدد الحدود من الدرجة الثانية يعطى بالمعادلة (14).
3. يمكن أن يتم حساب العمر التشغيلي الآمن للمفاعل النووي وفقاً للمعادلة (21).
4. إن تفاعل التشتت غير المرن للنيوترون هو التفاعل الذي يتسبب بأكبر ضرر في الخرسانة نتيجة تشكيل عيوب فرنكل فيها.

5. إن مجال الأعمار الآمن للمفاعلات النووية الحالية المعين اعتماداً على تغير المقاومة الانضغاطية النسبية يتراوح تقريباً بين 76.29 سنة حتى 109.38 سنة.

المراجع

- [1] Bruck, P. M., et al. "Structural assessment of radiation damage in light water power reactor concrete biological shield walls." *Nuclear Engineering and Design* 350 (2019): 9-20.
- [2] Askeland, Donald R.; Phulé, Pradeep P. (2006). *The science and engineering of materials* (5th ed.). Cengage Learning. p. 198. ISBN 978-0-534-55396-8.
- [3] Electric Power Research Institute, *Study of Radiation Damage to Structural Components in Nuclear Reactors*, EPRI Report NP-152, January 1976.
- [4] Remec, I., *Study of Neutron Flux and Dpa Attenuation in the Reactor Pressure Vessel Wall*, ORNL/NRC/LTR-99/5, June 1999.
- [5] Remec, I., 2013. *Radiation Environment in Biological Shields of Nuclear Power Plants*. Oak Ridge National Laboratory (ORNL).
- [6] Le Pape, Y., Giorla, A., Sanahuja, J., 2016. Combined Effects of Temperature and Irradiation on Concrete Damage. *J. Adv. Concr. Technol.* 14, 70–86.
- [7] Rosseel, T., Maruyama, I., Le Pape, Y., Kontani, O., Giorla, A., Remec, I., 2016. Review of the Current State of Knowledge on the Effects of Radiation on Concrete. *J. Adv. Concr. Technol.* 14, 366–383.
- [8] Le Pape, Y., 2015. Structural Effects of Radiation-Induced Volumetric Expansion on Unreinforced Concrete Biological Shields. *Nucl. Eng. Des.* 534–548.
- [9] Field, K.G., Le Pape, Y., Remec, I., February 2015. Perspective on Radiation Effects in Concrete for Nuclear Power Plants – Part I: Qualification of Radiation Exposure and Radiation Effects. *Nucl. Eng. Des.* 282, 126–143.
- [10] Electric Power Research Institute, *Effects of Radiation on Concrete – a Literature Survey and Path Forward*, EPRI Report 1025584, 2012.
- [11] Electric Power Research Institute, *Expected Condition of Reactor Cavity Concrete after 80nYears of Radiation Exposure*, EPRI Report 3002002676, 2014.

- [12] Electric Power Research Institute, Long-Term Operations: Impact of Radiation Heating on PWR Biological Shield Concrete, EPRI Report 3002008129, 2016a.
- [13] Electric Power Research Institute, Structural Model of PWR Concrete Reactor Pressure Vessel Supports – Effects of Chronic Radiation Exposure on Margin, EPRI Report 3002007347, Rev. 1, 2016b.
- [14] Electric Power Research Institute, Structure Disposition of Neutron Radiation Exposure in BWR Vessel Support Pedestals, EPRI Report 3002008128, 2016c.
- [15] Electric Power Research Institute, Irradiation Damage of the Concrete Biological Shield: Basis for Evaluation of Concrete Biological Shield Wall for Aging Management, EPRI Report 3002011710, Rev. 0, 2018.
- [16] Remec, I., Rosseel, T., Field, K., Le Pape, Y., 2017. Characterization of Radiation Fields for Assessing Concrete Degradation in Biological Shields of NPPs. EPJ Web of Conferences 153, 05009.
- [17] Kontani, O., Ichikawa, Y., Ishizawa, A., Takizawa, M., Sato, O., 2010. Irradiation Effects on Concrete Structures. In: International Symposium on the Aging Management and Maintenance of Nuclear Power Plants, pp. 173-182.
- [18] Maruyama, I., Haba, K., Sato, O., Ishikawa, S., Kontani, O., Takizawa, M., 2016. A Numerical Model for Concrete Strength Change under Neutron and Gamma-Ray Irradiation. J. Adv. Concr. Technol. 14, 144–162.
- [19] US NRC Regulatory Guide 1.99, Rev. 2, Radiation Embrittlement of Reactor Vessel Materials, May 1988.
- [20] Randall, P., 1986. Basis for Revision 2 of the US Nuclear Regulatory Commission’s Regulatory Guide 1.99. Radiation Embrittlement of Nuclear Reactor Pressure Vessel Steels An International Review (second Volume), ASTM, STP 909, 149–162.
- [21] Remec, I., Kam, F.B.K., H.B. Robinson-2 Pressure Vessel Benchmark, NUREG/CR-6453, October, 1997.

- [22] Hilsdorf, H.K., Kropp, J., Koch, H.J., 1978. The Effects of Nuclear Radiation on the Mechanical Properties of Concrete. American Concrete Institute, Special Publications SP 55-10, 223-254.
- [23] Maruyama, I., Kontani, O., Takizawa, M., Sawada, S., Ishikawa, S., Yasukouchi, J., Sato, O., Etoh, J., Igari, T., 2017. Development of Soundness Assessment Procedure for Concrete Members affected by Neutron and Gamma-Ray Irradiation. J. Adv. Concr. Technol. 15, 440-523.

