

## تصميم حاوية تخزين جاف مؤقت للوقود النووي المستنفذ في مفاعل طاقة من النوع VVER ودراسة أمنها الحرجي والإشعاعي باستعمال الكودين MCNP5-beta & GETERA

د. ماجدة نحيلي\*\*

حسام ريا\*

د. سعدو الظواهره\*\*\*

### الملخص

استعمل الكود MCNP5-beta في هذا البحث لنمذجة حاوية تخزين جاف مؤقت لعددٍ من حزم الوقود المستنفذ، والمستحرق في مفاعل الطاقة VVER1000 باستعمال الكود GETERA وقيمت صلاحية هذا النموذج من خلال حساب معامل التضاعف النتروني الفعّال  $k_{eff}$  داخل الحاوية في حالة التخزين الاعتيادية، أو في حالة حادث يفترض انغمار المحتوى النووي بالماء، وقد بلغت قيمته (0.35633)، (0.98569) على الترتيب. فضلاً عن حساب معدل الجرعة الإشعاعية النترونية والفوتونية في عدد من النقاط المهمة خارج الحاوية التي يُتوقع تعرض العاملين فيها للإشعاع، وقد بلغت أعظم قيمة لمعدل الجرعة النترونية والفوتونية

\* طالب ماجستير، قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة دمشق، سوريا.

\*\* أستاذ في قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة دمشق، سوريا.

\*\*\* باحث في هيئة الطاقة الذرية، دمشق، سوريا.

(113.92 mrem/h)، (7.19 mrem/h) على الترتيب. وأظهرت النتائج التي تم الحصول عليها توافقاً جيداً مع السويات الموصى بها في تقارير الوكالة الدولية للطاقة الذرية وبعض الدراسات النظرية المشابهة.

**الكلمات المفتاحية:** MCNP5-beta، GETERA، معامل التضاعف الفعال، الوقود النووي المستنفذ، التخزين المؤقت الجاف، معدل الجرعة الإشعاعية.

## Interim dry storage cask design for spent nuclear fuel discharged from VVER power reactor with an evaluation of its radiation and criticality safety Using MCNP5C & GETERA codes

H. rayya\*

Dr. M. Nahili\*\*

Dr. S. AL-Zawahera\*\*\*

### Abstract

MCNP5-beta code was used to model an Interim dry storage cask for some spent nuclear fuel assemblies which are burned up in VVER1000 power reactor using GETERA code and then evaluate the validation of this model by calculating neutron multiplication factor  $k_{eff}$  inside the cask through regular storage case and an accident case supposes nuclear content being flooded with water, and its value was (0.35633),(0.98569) consecutively, in addition to calculate the neutron and photon radiation dose rate in several meaningful points outside the cask where workers are expected to be exposed, since the maximum value was (113.7 mrem/h),(7.19 mrem/h) consecutively. The obtained results have showed a good agreement with recommended international dose values from International Atomic Energy Agency reports and some similar theoretical studies.

**Key words:** MCNP5-beta, GETERA codes, effective multiplication factor, spent nuclear fuel, interim dry storage, radiation dose rate.

---

\* Master student, Department of Physics, University of Damascus, Damascus, Syria.

\*\* Professor at department of Physics, University of Damascus, Damascus, Syria.

\*\*\* Researcher at atomic Energy Commission, Damascus, Syria.

**1- مقدمة:**

تختلف الاستراتيجيات الدولية في طريقة إدارة الوقود النووي المستنفذ إذ تراوح بين إعادة المعالجة وصولاً إلى التخلص النهائي المباشر، هذا الأمر يشير إلى أن الوقود المستنفذ يُعامل بطرائق مختلفة في كل بلد، فهو مصدر للإنتاج ببعضها أو نفايات في بعضها الآخر، في الوقت الحالي يخضع معظم الوقود المستنفذ للتخزين في محطات الطاقة النووية، أو في بعض منشآت التخزين الخاصة المركزية أو في منشآت إعادة المعالجة، بحيث تكون الخطوة التالية إما إعادة الاستعمال عبر إعادة المعالجة، أو التخلص النهائي في منشآت ومدافن جيولوجية [1]، علماً أن تنفيذ هذه الاستراتيجيات يحتاج إلى مدة زمنية طويلة في معظم البلدان لذلك تتزايد كميات الوقود المستنفذ بشكل مطرد في العالم، وعليه فإنه من المتوقع إيداع كميات متزايدة من الوقود المستنفذ في التخزين المؤقت في العقود القادمة، ومن ناحية أخرى خزن الوقود المستنفذ بنجاح في الشروط الرطبة والجافة عقوداً عديدة دون بروز أي مشكلات جدية، ولذلك فإن إدارة الوقود المستنفذ للأسباب الاقتصادية والأمنية والأمان النووي تعدّ قضية مفتاحية لمستقبل الطاقة النووية، وفي الحالات المذكورة جميعها كان هناك نظام احتواء مؤقت للوقود المستنفذ أو للنفايات النووية العالية النشاط الإشعاعي الناجمة عن عملية إعادة المعالجة، بحيث يوفر هذا النظام تخزين الوقود المستنفذ مدداً زمنية طويلة تحاكي عدم توافر منشآت الدفن النهائي، أو بقاء إعدادها اعداداً كافياً في كثير من الدول.

**2- الوقود النووي المستنفذ (Spent Nuclear Fuel (SNF):**

يؤدي استعمال قضبان الوقود النووي مدة معينة في المفاعل النووي إلى استحقاقه، وتصيح بعدها قضبان الوقود غير قادرة على المحافظة على تفاعل الانشطار المتسلسل المستمر ذاتياً، يدعى هذا الوقود عندئذ بالوقود (المستنفذ). يصنف الوقود النووي المستنفذ على أنه نفايات نووية عالية النشاط الإشعاعي، ممّا يشكل خطراً

كامناً كبيراً لسببين ،أولهما: **الخطر الإشعاعي** إذ يملك قضيب الوقود النووي المستنفذ دون وجود درع أو حائل يحيط به مستويات إشعاعية عالية، فبعد عشر سنوات من إزالة قضبان الوقود النووي من المفاعل تكون الجرعة الإشعاعية على بعد متر واحد من حزمة وقود نووي مستنفذ مثالية نحو 20 rem/h، علماً أن جرعة مقدارها 5 rem يمكن أن تشل الحالة الفيزيولوجية للإنسان وتسبب الموت خلال أسبوع واحد من التعرض<sup>[1]</sup>، **وثانيهما: خطر الحرجية** إذ ينجم خطر الحرجية عن احتمال حصول انشطار ذاتي لنوى اليورانيوم والبلوتونيوم، عندما يكون معامل التضاعف أكبر من الواحد أو يساويه، وفي هذه الحالة تستعمل عناصر تحكم توضع في الحاويات النووية لمنع الوصول إلى حد الحرجية، وكذلك أيضاً التأكد من عدد الحزم في الحاوية بحيث لا تبلغ كتلة حرجة تحت أي ظرف. مما سبق يتبين ضرورة توافر حاجز أو درع إشعاعي بين الوقود النووي والإنسان، يصمم هذا الدرع بدءاً من بعض المواد كالماء والاسمنت والفولاذ واليورانيوم وغيرها التي تحظى بفعالية عالية ضد الإشعاع.

**3- الكود MCNP<sup>[2]</sup>:**

يعدّ الكود (MCNP (Monte Carlo N-Particle) الركيّزة الأساسيّة التي تقوم عليها الحسابات النّرونيّة والفوتونيّة في المختبر، ومؤخراً شاع استعماله في العالم كلّه. فكود MCNP بإمكاناته المتعدّدة قادر على إجراء حساب لانتقال الإشعاع لأي نوع من المصادر الإشعاعيّة، سواءً كانت مصادر عاديّة (مختومة sealed) أم (حرجة critical)، من خلال النماذج الفيزيائيّة لمختلف التفاعلات النوويّة المعرفّة ضمنه والمرتبطة مباشرة بأحدث بيانات المقاطع العرضيّة (المكتبات ENDF/v- ENDF/vi). ويتميّز أيضاً بقدرته على تعريف أعقد أنواع البنى الهندسيّة. إذ يمكن نمذجة ما يصل إلى 26 سطحاً من الدرجة الأولى والثانيّة والرابعة فضلاً عن امكانية تعريف سطوح عشوائيّة. يجري تتبع الأخطاء المرتكبة في التوصيف الهندسي من خلال عرضها والإشارة إلى مواضع الخطأ، ممّا يسهّل المهمّة أمام المستخدم. كما يمكنه إجراء حسابات لعدد من البارامترات الفيزيائيّة، وذلك باستعمال العدادات (Tallies) المتاحة في الكود لعدد كبير من التّطبيقات تخص مثلاً مسائل الفيزياء الطبيّة، ومسائل التّدرّيع، وحسابات الحرجيّة، والجرع الإشعاعيّة، والتّطبيقات الإشعاعيّة والنّويّة.

**4- الكود GETERA:**

يُستعمل الكود الروسي المطور GETERA [3] لإجراء الحسابات النّرونيّة للخلايا الواحديّة أو مجموعة الخلايا المكونة للمفاعل ذات الأشكال الهندسيّة المختلفة (كروية أو اسطوانية أو مستوية) وفي مجال الطاقة الحراري والسريع، ومنها حساب استحقاق الوقود وتراكيز نواتج الانشطار.

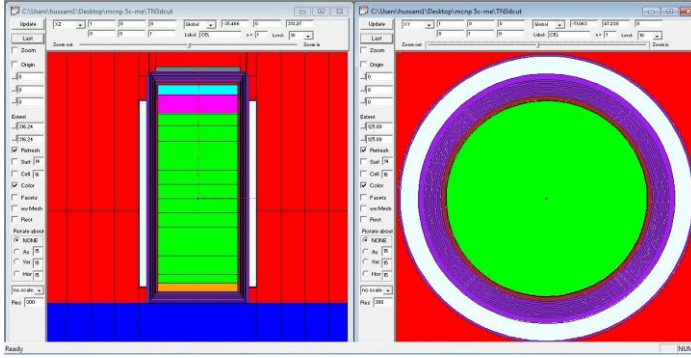
يحتوي الكود GETERA على مكتبة نّرونيّة تدعى (BNAB90)، تعتمد على ملفات المقاطع العرضيّة المأخوذة من المكتبات (JNDL-2 و ENDF-B4). تضم هذه المكتبة 93 مجموعة طاقية.

##### 5- قلب المفاعل في مفاعلات الماء المضغوط من النوع VVER:

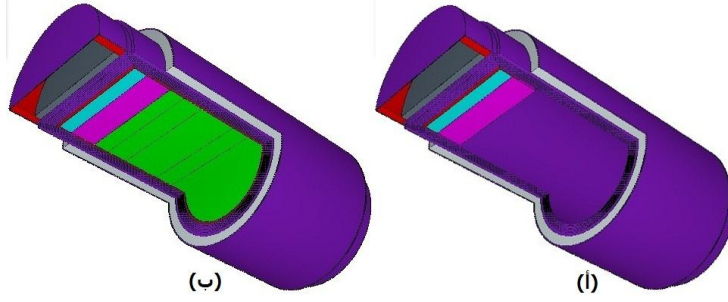
قلب المفاعل هو الجزء الذي يحوي الوقود الانشطاري (اليورانيوم  $U^{235}$ ) بنسبة تزيد على نسبته الطبيعية البالغة (0.7%) إلى نحو (3% إلى 5%). يُصنع الوقود النووي لمفاعلات الماء المضغوط على شكل أقراصٍ سمك كل منها وقطره لا يتجاوز 1.5 cm و 1cm على الترتيب. تصطف الأقراص فوق بعضها لتكون قضيباً (يصلُ طوله الى أكثر من 3m)، يتكون غلافه من خليطة معدن الزركونيوم. تجمع قضبان الوقود في شبكة سداسية لتشكل حزمة الوقود Fuel assembly، ويؤدي الماء دور المهدئ والناقل الحراري والعاكس في هذا النوع من المفاعلات.

##### 6- نمذجة الحاوية TN68 باستعمال الكود MCNP5-beta

من أجل تخمين كفاءة الكود المستعمل في هذا البحث في تصميم نظام احتواء جديد لحزم الوقود المستنفذ، جرى نمذجة حاوية مشابهة للحاوية TN68 في العمل [4]، تفترض أن الوقود المستنفذ عبارة عن طبقات اسطوانية متجانسة ضمن سلة تثبيت معدنية ويحيط بها درع فوتوني ونيوتروني كما في الشكل (1)،(2).



الشكل (1) مقطع طولي وعرضي للحاوية TN68 باستعمال رسام الكود MCNP5-beta

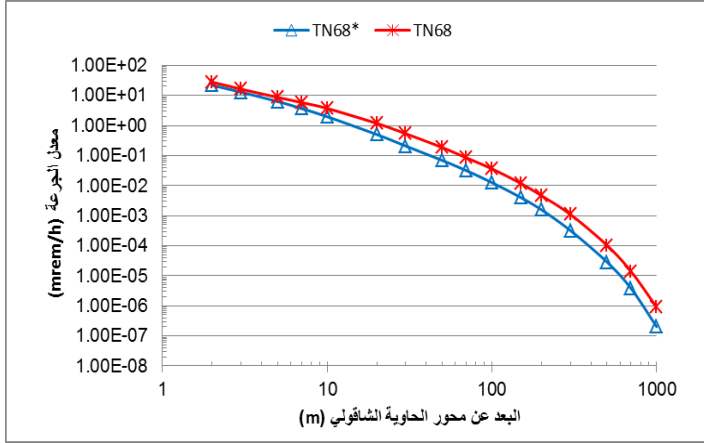


الشكل (2) أشكال ثلاثية الأبعاد: (أ) الحاوية TN68 بالحالة الجوفاء (ب) الحاوية TN68 تحوي بداخلها سلة حزم الوقود بعد تحميلها بالوقود المستنفذ باستعمال رسام الكود MCNP5-beta

#### 7- مقارنة معدل الجرعة الفوتونية خارج الحاوية TN68 في العمل [4] والحاوية TN68\* في هذا البحث

حسب معدل الجرعة الفوتونية على ارتفاع 1m من سطح الأرض في النقاط نفسها التي حسبت فيها الجرعة الفوتونية في العمل [4] اذ يوضح الشكل (3) مقارنة بين قيم معدل الجرعة الفوتونية للحاوية TN68 في العمل [4] بمثلتها للحاوية TN68\* في هذا البحث، ويلاحظ من الشكل (3) أن هناك تشابهاً في شكل منحنى الجرعة الفوتونية كتابع للبعد عن المحور الشاقولي في الدراستين، بذلك يكون بالإمكان إجراء دراسة تصميمية لحاوية جديدة مع تفصيل أكبر في البناء الهندسي للوقود المستنفذ، وسلة الحزم وتوصيف المصدر المشع.





الشكل (3) معدل الجرعة الفوتونية بدلالة البعد عن محور الحاوية الشاقولي في الدراستين (TN68 ,TN68\*)

#### 8- نمذجة الخلية الواحدية للوقود المستنفذ من المفاعل VVER-1000 باستعمال

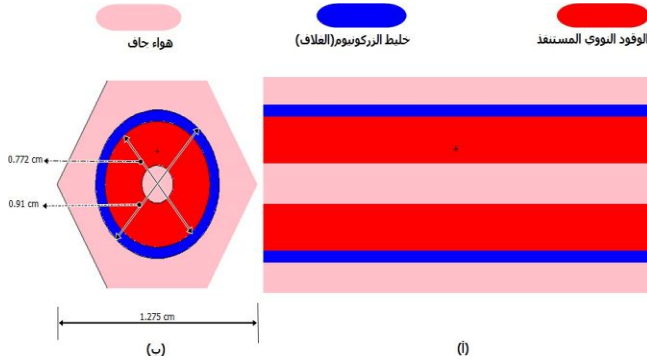
##### الكود MCNP5-beta

نوضح فيما يأتي الطريقة المتبعة في هذا البحث لنمذجة الوقود النووي المستنفذ في المفاعل VVER-1000 في الحالة الجافة باستعمال الكود MCNP5-beta. يتكون قضيب الوقود المستعمل في المفاعل VVER-1000 من أقراص الوقود التي تُرص في أنبوب معدني أسطواني يتكون من خليطة الزركونيوم - النيوبيوم، ويحيط به الماء الخفيف كمهدئ. وفي هذا البحث يخزن الوقود المستنفذ بشكل جاف، لذلك يحل الهواء الجاف مكان الماء في عملية النمذجة. يعطي الجدول (1) المواصفات الهندسية لمكونات قلب المفاعل VVER-1000 المستعملة في عملية المحاكاة.

الجدول (1) المواصفات الهندسية لمكونات قلب المفاعل VVER-1000

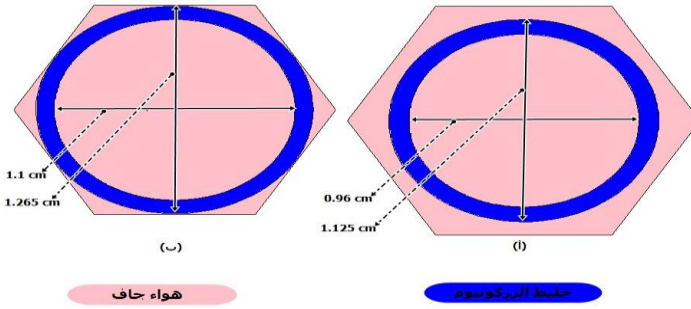
9.1 mm	قطر قضيب الوقود مع الغلاف
7.53 mm	قطر قضيب الوقود من دون الغلاف
0.69 mm	سماكة غلاف قضيب الوقود
3530 mm	ارتفاع قضيب الوقود
163	عدد حزم الوقود في المفاعل
312	عدد قضبان الوقود في حزمة الوقود
23.600 cm	الخطوة بين حزم الوقود
23.400 cm	طول حزمة الوقود
18	عدد قضبان التحكم في حزمة الوقود
1.275 cm	المسافة بين قضبان الوقود
331	العدد الكلي للقضبان في حزمة الوقود
1.090 cm	القطر الداخلي لقضيب التحكم
1.265 cm	القطر الخارجي لقضيب التحكم
0.960 cm	القطر الداخلي للقضيب المركزي
1.125 cm	القطر الخارجي للقضيب المركزي

جرى أولاً نمذجة الخلية الواحديّة للوقود المستنفذ المكونة من قضيب الوقود وغلافه وقناة الهواء المحيطة به، ويوضّح الشكل (4) مقطعاً طولياً وعرضياً لقضيب الوقود باستعمال رسام الكود MCNP5-beta.



الشكل (4) مقطع طولي وعرضي لقضيب الوقود باستخدام الكود MCNP5-beta

9- نمذجة القضيب المركزي وقضيب التحكم باستخدام الكود MCNP5-beta  
 جرى نمذجة القضيب المركزي وقضيب التحكم المستعمل في حزمة الوقود المستنفذ في المفاعل VVER-1000، ويوضح الشكل (5) مقطعاً عرضياً للقضيب المركزي ولقضيب التحكم باستخدام الكود MCNP5-beta وفق المحورين XY.

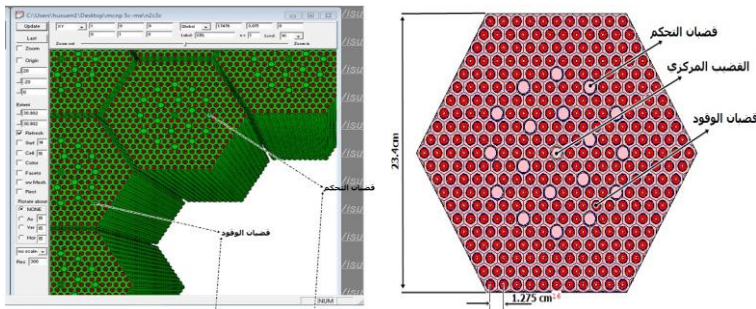


الشكل (5)

- (أ) مقطع عرضي للقضيب المركزي في المفاعل VVER-1000 باستخدام الكود MCNP5-beta  
 (ب) مقطع عرضي لقضيب التحكم في المفاعل VVER-1000 باستخدام الكود MCNP5-beta

### 10- نمذجة حزمة الوقود المستنفذ (SNFA) باستعمال الكود MCNP5-beta

تملك حزمة الوقود في المفاعل VVER-1000 بنية هندسية على شكل شبكة سداسية، وتتكون حزمة الوقود من 312 قضيب وقود و18 قضيب تحكم، وقضيباً مركزياً واحداً وللحصول على حزمة الوقود كُريت الخلية الواحدة باستعمال التعليمه (fill) 312 مرة. فضلاً عن خلية واحدة تمثل القضيب المركزي وخلية واحدة تمثل قضيب التحكم التي كررت 18 مرة أيضاً ونفذت الحسابات بمراعاة أن حزمة الوقود المستنفذ تتكون من بنية متجانسة (الوقود النووي، الغلاف، الهواء). يوضح الشكل (6) مقطعاً عرضياً لحزمة الوقود وعليها أماكن توضع قضبان التحكم وقضبان الوقود وطبقة الهواء الجاف بين قضبان الوقود.



الشكل (6) مقطع عرضي لحزمة الوقود المستنفذ باستعمال رسام الكود MCNP5-beta

### 11- حساب استحقاق الوقود النووي في المفاعل VVER-1000 باستعمال كود GETERA

بعد إنجاز مرحلة النمذجة باستعمال الكود MCNP5-beta والتحقق من صحتها، جرى نمذجة الخلية الواحدة للمفاعل VVER-1000 باستعمال كود GETERA وذلك لحساب استحقاق الوقود عند الاستطاعة الاسمية للمفاعل البالغة 3000MW، واعتمد الزمن 1095 يوماً كزمن لنهاية الحساب والزمن 20 يوماً كخطوة زمنية للاستحقاق. وحسب تغير تركيز بعض النوى المشعة التي تتشكل في قلب المفاعل بنتيجة

عملية الانتشار كتابع لزمن الاستحراق الذي بلغ ثلاث سنوات من زمن عمل المفاعل بعمق استحراق قدره 44.5GWd/MTU لوقود نووي ذي تخصيب أولي قدره 4.4%. بعد معرفة تركيب الوقود النووي المستحرق، إذ أنّ المدة الزمنية للتخزين الرطب تؤثر تأثيراً ملموساً في تراكيز النكليدات في الوقود المستنفذ وفق قانون التفكك الإشعاعي، تتلاشى بعض النكليدات خلال هذه المدة وينخفض تركيز بعضها الآخر، في حين يختلف تركيز بعض النكليدات ذات عمر النصف الكبير اختلافاً ضئيلاً جداً. يوضّح الجدول (2) تراكيز النكليدات التي أدخلت في ملف الدخل الخاص بالكوود MCNP، وذلك بعد استحراق الوقود في المفاعل، ومن ثم تخزينه بالشكل الرطب مدة خمس سنوات

الجدول (2) تركيز النكليدات المشعة في الوقود المستنفذ

النكليد	التركيز بعد نهاية الاستحراق مباشرة (atom/barn.cm)	التركيز بعد مرور خمس سنوات في التخزين الرطب (atom/barn.cm)
U235	2.56E-04	2.56E-04
U238	1.96E-02	1.96E-02
Tc99	5.16E-05	5.16E-05
Cd13	6.66E-09	6.66E-09
Xe35	9.35E-09	6.38E-09
Sm49	1.20E-07	1.1971E-07
Sm51	3.62E-07	3.47998E-07
Eu55	2.86E-07	1.42392E-07
Np37	1.12E-05	1.12E-05
Np39	2.19E-06	5.03464E-07
Pu38	3.87E-06	3.71598E-06
Pu39	1.61E-04	1.61E-04
Pu40	5.91E-05	5.90327E-05
Pu41	3.84E-05	3.0194E-05
Am41	1.18E-06	1.17375E-06
Nd45	3.00E-05	3.00E-05
Pm47	7.48E-06	1.99488E-06
Cs34	6.71E-06	1.25004E-06
Pm48	5.27E-08	2.76217E-08
Rh05	6.63E-08	6.00774E-08
Pm49	5.40E-08	5.06639E-08
Cs35	1.9324E-05	1.9324E-05
Eu54	8.81E-07	5.94508E-07

**12- توصيف نظام الاحتواء:**

حتى تكون الحاوية مناسبة للتخزين الجاف المؤقت لعدد من حزم الوقود المستنفذ، ينبغي الحفاظ بدرجة أساسية على أمان المحتوى النووي داخل الحاوية بحيث يكون معامل التضاعف النتروني دوماً دون القيمة (1) بما في ذلك حالات الحوادث، وكذلك الحفاظ على معدل الجرعة الخارجية ضمن المستويات المعمول بها في توصيات الوكالة الدولية للطاقة الذرية، حسب معايير (ICRP60) التي تحدد الجرعة الإشعاعية على سطح الحاوية بالقيمة  $0.1-0.2 \text{ mSv/h}$  (10-20 mrem/h) للإشعاع النتروني والقيمة  $0.1-0.325 \text{ mSv/h}$  (10-32.5 mrem/h) للإشعاع الفوتوني<sup>[1]</sup>.

هناك بروتوكولات تحدد شدة الإشعاع على سطح الحاوية والقيمة المرتبطة بها للجرعة الإشعاعية للأفراد عند مسافات معينة من سطح الحاوية، منها [5]

1. أن تكون الجرعة الإشعاعية على سطح الحاوية  $0.005 \text{ mSv/h}$

2. إذا كانت الجرعة الإشعاعية على سطح الحاوية  $0.5 \text{ mSv/h}$  فإن الجرعة على

مسافة متر واحد من الحاوية ينبغي أن تكون  $0.01 \text{ mSv/h}$ .

تتكون الحاوية بشكل رئيسي من:

- سلة معدنية (basket) على شكل أسطوانة مفتوحة من الأعلى، وتحوي بداخلها شبكة سداسية مخصصة لتثبيت حزم الوقود النووي التي بلغ عددها 11 حزمة،
  - درع بيولوجي فوتوني على شكل غطاء أسطواني يحيط بالسلة،
  - درع نتروني على شكل غطاء أسطواني يحيط بالدرع البيولوجي.
- يبلغ ارتفاع السلة 352 cm وقطرها 122 cm، والسلة هي خليطة معدنية تتكون بشكل رئيسي من (الحديد 34% والكروم 10% والألمنيوم 31% والبيريليوم 17% والمنغنيز 1% والنيكل 4.5%)<sup>[6]</sup>.

يتكون الدرع الفوتوني من:

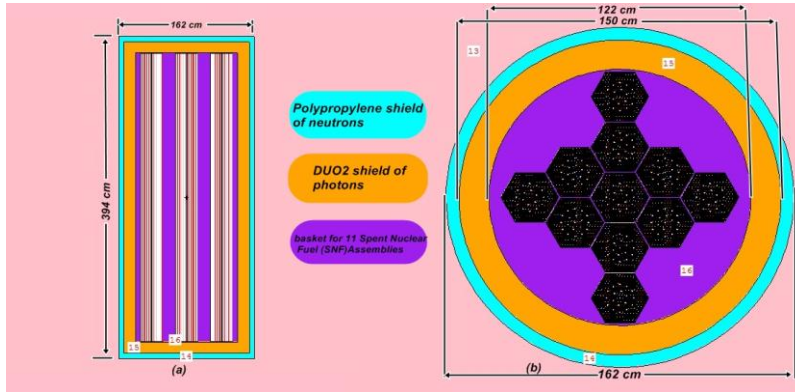
- ثنائي أكسيد اليورانيوم المنضب بسمك 14 cm، ويتكون بشكل رئيسي من (الأكسجين 66.6667% واليورانيوم  $^{238}$  33.248% واليورانيوم  $^{235}$  0.0843% واليورانيوم  $^{234}$  0.00016%) وبكثافة قدرها  $10.4 \text{ g/cm}^3$  [6].

يتكون الدرع النتروني من:

- البولي بروبيلين: طبقة بسمك 6cm، ويتكون بشكل رئيسي من الهيدروجين 66.52% والكربون 33.48% ( $\text{C}_3\text{H}_6$ ) n وكثافته  $0.9 \text{ g/cm}^3$  [6]، وهكذا يكون الارتفاع الكلي للحاوية مع الدرع الفوتوني والنتروني 394cm، وقطرها الخارجي 162 cm، وقطرها الداخلي 122 cm.

1-12. نمذجة نظام الاحتواء باستعمال الكود MCNP5-beta:

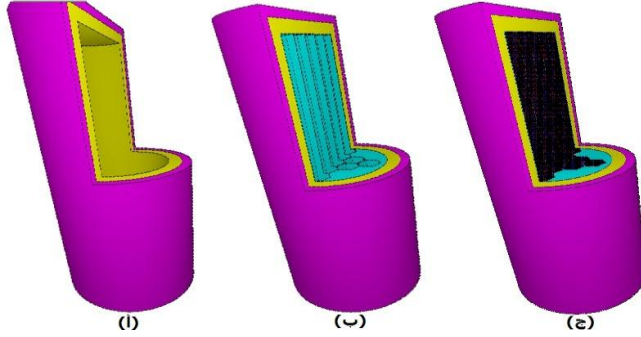
يوضح الشكل (7) مقطعاً للحاوية (السلة، درع بيولوجي، درع نتروني) المستعملة للتخزين الجاف للوقود المستنفذ، ولحساب الجرعة النترونية والفوتونية ومعامل التضاعف الفعال لحزم الوقود المستنفذ المخزنة.



الشكل (7) مقطع عرضي وطولي لحاوية التخزين مع الدرع باستعمال

رسام الكود MCNP5-beta.

يوضح الشكل (8) صوراً ثلاثية الأبعاد لحاوية التخزين المصممة باستعمال رسام الكود MCNP5-beta



الشكل (8) أشكال ثلاثية الأبعاد: (أ) الحاوية بالحالة الجوفاء (ب) الحاوية تحوي بداخلها سلة حزم الوقود قبل تحميلها بالوقود المستنفذ (ج) الحاوية تحوي بداخلها سلة حزم الوقود بعد تحميلها بالوقود المستنفذ باستعمال رسام الكود MCNP5-beta

## 2-12. حساب معامل التضاعف النثروني للوقود النووي ضمن الحاوية

بعد إنجاز عملية استحقاق الوقود باستعمال كود GETERA وبعد مدة تبريد (قدّرت بخمس سنوات) تراعي الوصول إلى الحرارة المتبقية الملائمة تم الحصول على تركيب الوقود المستنفذ بشكل دقيق، وبعدها أدخلت تراكيب هذه المواد إلى كود MCNP5-beta وحسبت الحرجية باستعمال البطاقة (Kcode).

وأعطت نتائج الحساب القيمة  $k_{eff}=0.35633$  لمعامل التضاعف النثروني بانحراف معياري قدره 0.044% إذ بلغ مجال معامل التضاعف عند مستوى ثقة 99% من 0.35517 إلى 0.35749. وحسبت أيضاً قيمة معامل التضاعف في حالة حادث افتراضي لانغمار المحتوى النووي بشكل كامل بالماء، وأعطت نتائج الحساب القيمة  $k_{eff}=0.98569$  بانحراف معياري 0.046% إذ بلغ مجال معامل التضاعف عند



مستوى ثقة 99% من 0.98446 إلى 0.98690، ومنه فإن عدد حزم الوقود المستنفذ الممكن تخزينه بشكل آمن حرجياً في هذه الحاوية هو 11 حزمة.

### 12-3. حساب معدل الجرعة

حسب التدفق النتروني والفوتوني باستعمال بطاقة العداد F5 المتاحة في الكود MCNP5-beta، ومنه معدل الجرعة المكافئة مقدرة بالواحدة (mrem/h)، وذلك باستعمال معاملات التحويل من تدفق إلى جرعة مكافئة الصادرة عن (ICRP1987) [7]. حسبت الجرعة الممتصة D مقدرة بالواحدة D(mrem/h) من العلاقة الآتية:

$$D \text{ (mrem/h)} = D \text{ (Sv/particle)} \times Si \text{ (particles/s)} \times 10^5 \text{ (mrem/Sv)} \times 3600 \text{ (s/h)} \dots (1)$$

إذ: Si (particles/s) - معدل الإصدار الفوتوني أو النتروني (كما في الجدولين 3 و4) لحزمة واحدة من الوقود المستنفذ المخزن في حاوية التخزين الجاف المعروفة بالاسم TN68<sup>[4]</sup>.

الجدول (3) الطيف الطاقي النتروني ومعدل الإصدار النتروني عند كل طاقة من أجل حزمة واحدة من الوقود النووي المستنفذ المخزن في الحاوية الجافة TN-68<sup>[4]</sup>

النسبة في الطيف	عدد النترونات n/(s.assembly)	المجال الطاقي MeV
0.01843	$2.181 \times 10^6$	20-6.34
0.20989	$2.484 \times 10^7$	6.34-3
0.23295	$2.756 \times 10^7$	3-1.85
0.13102	$1.550 \times 10^7$	1.85-1.40
0.17702	$2.095 \times 10^7$	1.40-0.90
0.19296	$2.283 \times 10^7$	0.90-0.40
0.03777	$4.469 \times 10^6$	0.40-0.10
1	$1.183 \times 10^8$	المجموع

الجدول (4) الطيف الطاقي الفوتوني ومعدل الإصدار الفوتوني عند كل طاقة من أجل حزمة واحدة من الوقود النووي المستنفذ المخزن في الحاوية الجافة TN-68<sup>[4]</sup>

النسبة في الطيف	عدد الفوتونات Photon/(s.assembly)	المجال الطاقي MeV
0.00422	$4.826 \times 10^{12}$	1.33 - 1.66
0.03273	$3.321 \times 10^{13}$	1.00 - 1.33
0.03549	$3.321 \times 10^{13}$	0.80 - 1.00
0.65402	$3.321 \times 10^{13}$	0.60 - 0.80
0.05790	$3.321 \times 10^{13}$	0.40 - 0.60
0.01359	$3.321 \times 10^{13}$	0.30 - 0.40
0.02211	$3.321 \times 10^{13}$	0.20 - 0.30
0.07902	$3.321 \times 10^{13}$	0.10 - 0.20
0.10092	$3.321 \times 10^{13}$	0.05 - 0.10
1	$1.015 \times 10^{15}$	المجموع

وبناء على ما سبق،

$$S_n = 1.183 \times 10^8 (s^{-1}) \times 11 = 1.301 \times 10^9 (s^{-1})$$

$$S_\gamma = 1.015 \times 10^{15} (s^{-1}) \times 11 = 1.116 \times 10^{16} (s^{-1})$$

وإذا عوضنا هاتين القيمتين في المعادلة (1) نحصل على العلاقة بين الجرعة المكافئة ومعدل الجرعة الممتصة مقدرة بالواحدة (mrem/h):

$$D_n (mrem/h) = 4.683 \times 10^{17} \times D_n (Sv)$$

$$D_\gamma (mrem/h) = 4.017 \times 10^{24} \times D_\gamma (Sv)$$

يأخذ معدل الجرعة قيمة متفاوتة في نظام الاحتواء، إذ لا يكون للجرعة القيمة نفسها في النقاط جميعها على سطح الحاوية وحولها، بل تختلف زيادة ونقصاناً اعتماداً على عشوائية الإصدارات الإشعاعية لحزم الوقود المستنفذ فضلاً عن عامل التراكم الإشعاعي، كما يؤدي التوضع الهندسي لهذه الحزم ضمن الحاوية دوراً في تفاوت معدل الجرعة على السطوح المختلفة للحاوية، ولذلك حسبت معدلات الجرعة ضمن

ثلاثة تقسيمات هندسية للفضاء المحيط بالحاوية، تفضي مجتمعة إلى تخمين موثوق به لسلوك التعرض الإشعاعي للعاملين في مجال التخزين الجاف:

المنطقة الأولى: حساب معدل الجرعة وفق المحور الأفقي للأسطوانة بدءاً من مسافة 1cm عن سطح الحاوية إلى مسافة تبعد 500 m عنه،

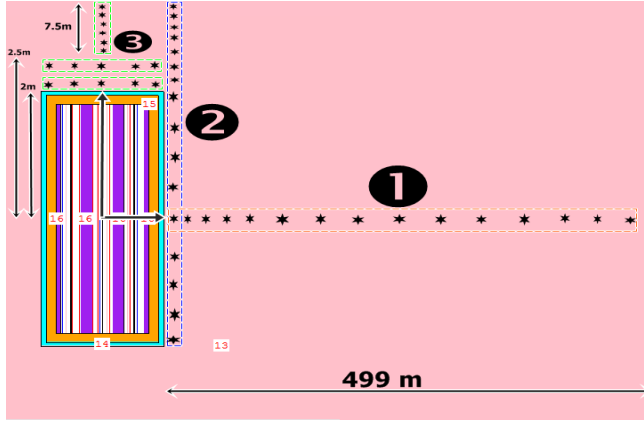
المنطقة الثانية: حساب معدل الجرعة في النقاط التي تبعد 1cm عن سطح الحاوية والتي تقع على محور يوازي محور الحاوية الشاقولي (وصولاً إلى 10 m فوق سطح الحاوية الأعلى، وانتهاء عند سطح الحاوية الأسفل).

المنطقة الثالثة: حساب معدل الجرعة عند السطح الأعلى للحاوية:

- في نقاط أفقية تبعد 1 cm عن غطاء الحاوية.
- في نقاط أفقية تبعد 50 cm عن غطاء الحاوية.
- في النقاط التي تقع على المحور الشاقولي للحاوية بدءاً من 1 cm إلى 9.5 m عن غطاء الحاوية.

ولحساب معدلات الجرعة في المناطق السابقة جميعها استعملت عدادات نقطية (point tallies) بلغ عددها نحو العشرين عدداً في مواقع مختلفة من كل منطقة.

يوضح الشكل (9) رسماً تخطيطياً لأماكن توضع العدادات في المناطق الثلاث السابقة.



الشكل (9) مخطط يوضح المناطق الثلاث التي حسبت الجرعات فيها

باستعمال الكود MCNP5-beta

يعطي الجدول (5) مقارنة المواصفات العامة لحاوية التخزين الجاف التي صممت في هذا البحث (وأعطيت الاسم SYR-11) مع الحاوية TN68 - إذ قورنت حسابات الأمان الإشعاعي (معدل الجرعة) - والحاوية TPCS-117 - حيث قورنت حسابات الأمان الحرجي (معامل التضاعف النثروني الفعال)

الجدول (5) مقارنة المواصفات الفنية للحاوية المقترحة في هذا البحث بنماذج أخرى

المواصفات	الحاوية (1)	الحاوية (2)	الحاوية (3)
اسم الحاوية	SYR11	متعددة الأهداف الشاملة-TPCS [8] 117	[4]TN-68
الارتفاع ( cm )	394	600	545.8
القطر الخارجي ( cm )	162	275	248.49
القطر الداخلي ( cm )	122	194	176.54
درع الوقاية من أشعة غاما	DUO <sub>2</sub>	DUO <sub>2</sub> +stainless steel	stainless steel
درع الوقاية من النيوترونات	polypropylene	siloxane rubber	polypropylene
عددالحزم (SFA) المخزنة	11 (VVER1000)	36 (VVER1000)	68 (design basis fuel)
الإغناء الأولي <sup>235</sup> U %	4.40%	5% or less	(design basis fuel) **
عمق الاستحراق MwattDay/kgU	44.5	mean 40/ maximum 65	40
الأمان النووي (الحرجية)	تخزين اعتيادي	$k_{eff}=0.35633$	$k_{eff}\leq 0.3$
	حالة حادث	$k_{eff}=0.98569$	$k_{eff}\leq 0.92$
معدل الجرعة (mrem/h)	على السطح	*118.92	35.7
	على بعد 2m	14.34	8.4
<p>* جمعت أعلى قيمة لمعدل الجرعة النيوترونية ولمعدل الجرعة الفوتونية على بعد 1cm من سطح الحاوية،                  **The design basis fuel typically assumes a maximum assembly enrichment ،                  maximum burn up ،and minimum cooling time.                  *** مجموع أعلى جرعة للفوتونات والنيوترونات على بعد 4.5 inch من سطح الحاوية</p>			

## 13. النتائج والمناقشة:

## 13-1: حساب معدل الجرعة بدلالة البعد عن محور الحاوية الشاقولي في المنطقة الأولى

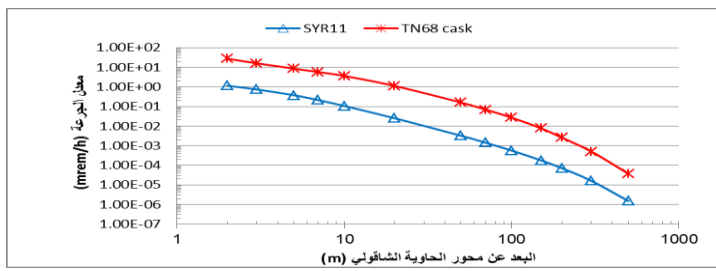
حسب معدل الجرعة الفوتونية والنترونية في المنطقة الأولى للحاوية SYR11 ودونت كما في الجدول (6). ثم قُورنت قيم معدل الجرعة الفوتونية والنترونية في المنطقة الأولى للحاوية SYR11 بمثيلتها العائدة للحاوية TN68، كما في الجدول (6).

الجدول (6) معدل الجرعة في المنطقة الأولى في الحاوية (SYR11) والحاوية (TN68)

TN68		SYR11		البعد عن محور الحاوية (m)
الجرعة (mrem/h)				
الفوتونات	النترونات	الفوتونات	النترونات	
-	-	3.84E+00	4.35E+01	0.82
2.74E+01	4.05E+00	1.14E+00	1.32E+01	2
1.59E+01	2.18E+00	7.37E-01	6.97E+00	3
8.54E+00	9.55E-01	3.75E-01	2.75E+00	5
5.70E+00	5.60E-01	2.10E-01	1.45E+00	7
3.60E+00	2.90E-01	1.06E-01	7.19E-01	10
1.12E+00	7.20E-02	2.51E-02	1.90E-01	20
1.58E-01	7.50E-03	3.20E-03	3.45E-02	50
6.93E-02	2.80E-03	1.42E-03	1.88E-02	70
2.75E-02	9.60E-04	5.64E-04	9.37E-03	100
7.69E-03	2.10E-04	1.78E-04	3.99E-03	150
2.56E-03	5.40E-05	7.11E-05	2.06E-03	200
5.00E-04	6.00E-06	1.60E-05	6.90E-04	300
3.69E-05	1.70E-07	1.51E-06	1.22E-04	500

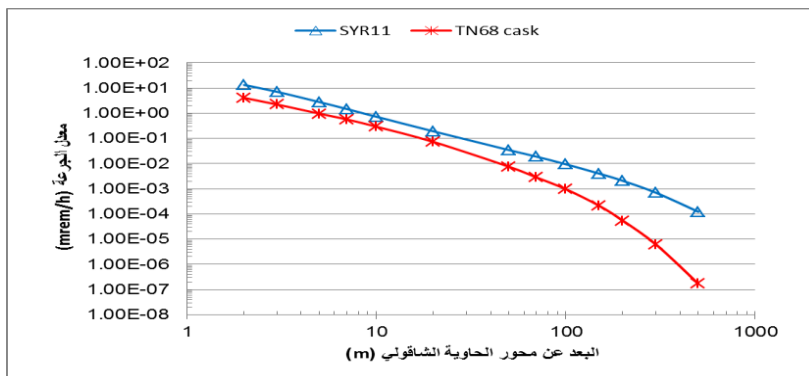
يوضّح الشكل (10) مقارنة بين قيم معدل الجرعة الفوتونية للحاوية SYR11 بمثيلتها للحاوية TN68<sup>[4]</sup>. يلاحظ من الشكل (10) أن هناك تشابهاً في شكل منحنى الجرعة الفوتونية كتابع للمسافة عن المحور الشاقولي في حالة الحاويتين TN68

وSYR11، وأن قيم معدل الجرعة الفوتونية للحاوية TN68 أكبر مما هو عليه للحاوية SYR11.



الشكل (10) معدل الجرعة الفوتونية بدلالة البعد عن محور الحاوية الشاقولي في الحاويتين (TN68,SYR11)

يوضح الشكل (11) مقارنة بين قيم معدل الجرعة النترونية للحاوية SYR11 بمثيلاتها للحاوية TN68. يلاحظ من الشكل (11) أن هناك تشابهاً في شكل منحنى الجرعة النترونية كتابع للمسافة عن المحور الشاقولي في حالة الحاويتين TN68 وSYR11، وأن قيم معدل الجرعة النترونية للحاوية SYR11 أكبر مما هو عليه للحاوية TN68.



الشكل (11) معدل الجرعة النترونية بدلالة البعد عن محور الحاوية الشاقولي في الحاويتين (TN68,SYR11)

## 13-2. حساب معدل الجرعة بدلالة البعد عن محور الحاوية الأفقي في المنطقة الثانية

حسب معدل الجرعة الفوتونية والنترونية في المنطقة الثانية، كما يوضح الجدول (7)

الجدول (7) معدل الجرعة في المنطقة الثانية في الحاوية (SYR11)

SYR11					
النترونات		الفوتونات		البعد عن المحور الشاقولي (cm)	البعد عن المحور الأفقي (cm)
الخطأ النسبي	الجرعة (mrem/h)	الخطأ النسبي	الجرعة (mrem/h)		
0.1203	4.13E+01	0.1323	4.09E+00	82	0
0.2566	2.45E+00	0.4007	1.97E-02	82	196
0.1604	2.42E+00	0.2076	1.75E-02	82	-193
0.1214	2.96E+01	0.1135	2.73E+00	82	150
0.1782	3.38E+01	0.1229	4.10E+00	82	-150
0.0822	2.92E+01	0.1608	3.92E+00	82	100
0.1698	4.20E+01	0.1084	3.33E+00	82	-100
0.1265	3.37E+01	0.1091	2.89E+00	82	50
0.0944	3.27E+01	0.1261	3.46E+00	82	-50
0.0235	8.18E+00	0.5408	8.61E-01	82	250
0.0171	6.60E+00	0.373	1.27E+00	82	300
0.0138	3.41E+00	0.2075	9.34E-01	82	400
0.013	1.94E+00	0.1587	5.82E-01	82	500
0.0117	8.52E-01	0.1293	2.54E-01	82	700
0.0109	4.84E-01	0.1202	1.35E-01	82	900
0.011	3.88E-01	0.1175	1.04E-01	82	1000

## 13-3. حساب معدل الجرعة بدلالة البعد عن محور الحاوية الشاقولي على امتداد

السطح العلوي للحاوية في المنطقة الثالثة

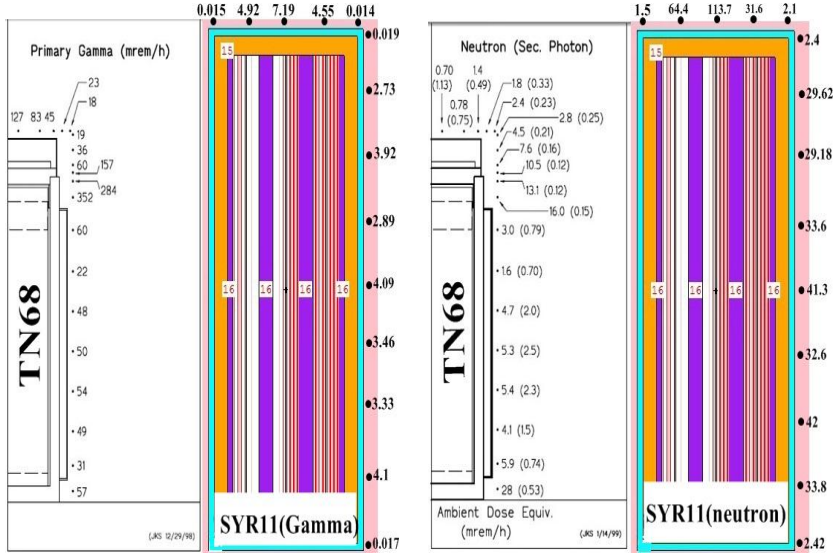
حسب معدل الجرعة الفوتونية والنترونية في المنطقة الثالثة، كما يوضح الجدول (8)



الجدول (8) معدل الجرعة في المنطقة الثالثة في الحاوية (SYR11)

SYR11					
النترونات		الفوتونات		البعد عن المحور الشاقولي (cm)	البعد عن المحور الأفقي (cm)
الخطأ النسبي	الجرعة (mrem/h)	الخطأ النسبي	الجرعة (mrem/h)		
0.4091	1.14E+02	0.1348	7.19E+00	0	198
0.1576	3.16E+01	0.09	4.55E+00	40	198
0.2841	2.13E+00	0.2558	1.40E-02	80	198
0.1961	1.54E+00	0.1671	1.52E-02	-80	198
0.4603	6.45E+01	0.1466	4.92E+00	-40	198
0.0221	2.71E+01	0.3897	9.30E+00	0	250
0.0264	2.00E+01	0.3593	6.44E+00	40	250
0.0352	8.80E+00	0.0941	4.87E-01	80	250
0.0314	8.74E+00	0.1496	5.19E-01	-80	250
0.0245	2.07E+01	0.0779	2.73E+00	-40	250
0.0185	7.01E+00	0.2983	2.99E+00	0	350
0.0177	3.02E+00	0.3055	1.32E+00	0	450
0.0166	1.67E+00	0.3099	7.18E-01	0	550
0.0159	1.07E+00	0.3122	4.45E-01	0	650
0.0156	7.54E-01	0.3113	3.04E-01	0	750
0.0202	5.72E-01	0.3119	2.18E-01	0	850
0.0161	4.43E-01	0.3146	1.63E-01	0	950

يوضح الشكلان (12) (13) مقارنة بين قيم معدل الجرعة الفوتونية والنترونية في المنطقتين الثانية والثالثة في الحاوية التي صممت في هذا البحث (SYR11) وأخرى تقع على بعد 4.5 inch من سطح الحاوية وغطائها (TN68)، وكما أظهر الشكلان (10) و(11) اقتراب قيم معدلات الجرعة الفوتونية والنترونية في المنطقة الأولى بين الحاويتين مع أفضلية طفيفة للحاوية (TN68) في التدرج النتروني وأفضلية طفيفة للحاوية (SYR11) في التدرج الفوتوني فإن الأمر ذاته ملاحظ في المنطقتين الثانية والثالثة. وبذلك يعدّ النموذج الذي صمم في هذا البحث صالحاً ومتوافقاً مع عدد من الحاويات والدراسات الأخرى من الناحية الإشعاعية.



الشكل (12) مقارنة معدل الجرعة النيوترونية (13) مقارنة معدل الجرعة الفوتونية  
 قريبا من السطح للحاويتين (TN68,SYR11) قريبا من السطح للحاويتين (TN68,SYR11)

### النتائج:

الغاية من هذا البحث التخزين المؤقت للوقود النووي المستنفذ من مفاعل الطاقة VVER1000 عبر نمذجة نظام احتواء جاف، وذلك باستعمال الكود MCNP5 إذ تم التأكد من صلاحية هذا النموذج بمقارنته بدراسات أخرى تناولت الدراسة الإشعاعية لعدد من حاويات تخزين الوقود المستنفذ من مفاعلات الطاقة، ويمكن إجمال أهم نتائج البحث بالنقاط الآتية:

- بلغ عدد الحزم ضمن الحاوية 11 حزمة من وقود نووي ذي نسبة إغناء أولي قدرها 4.4% مستنفذ بعمق استحقاق 44.5MWD/kgU مخزن ضمن أحواض تبريد مائية مدة خمس سنوات

- الحاوية عبارة عن اسطوانة بلغ ارتفاعها 394 cm ، وقطرها الخارجي 162cm ، وقطرها الداخلي 122 cm تتألف من سلة مكونة من خليط من الألمنيوم والحديد وبعض المعادن يليها ويحيط بها درع فوتوني من مادة ثنائي أكسيد اليورانيوم المنضوب بلغ سمكه 14 cm ، يليه ويحيط به درع نتروني من مادة البولي بروبلين بلغ سمكه 6 cm .
  - قيمة معامل التضاعف الفعال في حالة التخزين العادية  $k_{eff}=0.35633$  ، وفي حالة حادث يفترض انغمار كامل المحتوى النووي بالماء  $k_{eff}=0.98569$
  - بلغ معدل الجرعة الإشعاعية ( الفوتونية والنترونية) الأعظمي على مسافة 1cm من سطح الحاوية 118.92 mrem/h ، وعلى بعد 2m من سطحها 14.43 mrem/h .
- يدل التقارب الجيد بين القيم المحسوبة في هذا البحث وبين تلك العائدة لبعض المراجع والتصاميم على إمكانية استعمال الطريقة المتبعة في هذه النمذجة لإجراء بعض الحسابات الإشعاعية المتعلقة بتخزين الوقود النووي المستنفذ من مفاعل طاقة أو مفاعل بحثي، إذ يكون تصنيف الوقود في الحالتين ضمن النفايات العالية المستوى الإشعاعي.

## المراجع References

1. iaea, 2006. management of spent fuel from nuclear power reactors, isbn 92-0-102107-0, pp. 211-305
2. X-5 Monte Carlo Team, 2003. A general monte carlo N-Particle transport code Version 5, pp. 25-43.
3. Belousov, N., Bichkov, S. and Marchuk, Y., 1990. The code GETERA for cell and policell calculations model capability.
4. Shultis, J.K., 2000. Radiation analysis of a spent-fuel storage cask, Dept. Mechanical and Nuclear Engineering, Kansas state university, pp. 6-29.
5. iaea, 1998. Storage of spent fuel from power reactors. ISSN 1011-4289, pp. 123-311.
6. McConn, Jr., Williams, R., Rucker, R., Pagh, C. and Gesh, C., 2011. Compendium of material composition data for radiation transport modeling, Homeland Security, U.S. Department of Energy, pp. 154-268.
7. Feiveson, H., Mian, Z., Ramana, M.V. and Hippel, F., 2011. Managing Spent Fuel from nuclear power reactors, International panel on fissile materials, ISBN 978-0-9819275-9-6, pp. 15-65.
8. Haire, J. M. and Forsberg, C.V., 2006. Conception of universal cask based on cermet for SNF transportation and storage, IHLRWM, pp. 3-7.