

دراسة تأثير استخدام الماصات القابلة للاحتراق على تولد نظائر البلوتونيوم في قضبان وقود المفاعل VVER-1000

د. حسن أبوفاور¹

¹ كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية الثانية - جامعة دمشق.

الملخص

جرى هذا البحث دراسة أثر استخدام الماصات القابلة للاحتراق على معامل التضاعف اللانهائي للوقود الطازج وعلى معدل تولد نظائر البلوتونيوم الأساسية في الوقود المستهلك تمت الدراسة عبر محاكاة تشغيل حزم وقود نووي مطورة TVSA+ من النوع 398GO في بيئة المفاعل الروسي VVER1000 وذلك باستخدام المحاكى الحاسوبي VVERHGMLC، حيث تمت مقارنة نتائج التشغيل لحزمتين متماثلتين تصميمياً من النوع 398GO الأولى لا تحتوي على ماصات قابلة للاحتراق والثانية تحتوي على 6 قضبان فيها ماصات قابلة للاحتراق بنسبة وزنية 5%.

تمت مقارنة أثر استخدام الماصات القابلة للاحتراق على معامل التضاعف اللانهائي ودورها في التحكم وضبط التفاعلية الزائدة وكذلك مراقبة أثرها على تولد النوى الانشطارية في الوقود المستهلك، وظهرت الدراسة الأثر المطلوب لاستخدام هذه الماصات في كبح معامل التضاعف اللانهائي للوقود الطازج مع عدم وجود اثر لاستخدامها على تولد نظائر البلوتونيوم عند نهاية دورة التشغيل للوقود المستهلك.

الكلمات المفتاحية: الماصات القابلة للاحتراق، المفاعل VVER-1000، تولد النوى الانشطارية، نظائر البلوتونيوم، معامل التضاعف اللانهائي، المحاكى VVERHGMLC.

تاريخ الإيداع: 2021/12/14

تاريخ القبول: 2022/05/11



حقوق النشر: جامعة دمشق -

سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق

النشر بموجب الترخيص

CC BY-NC-SA 04

Studying The Effect of Using the Burnable Absorber on Plutonium nuclides Production in a typical VVER-1000 fuel rod

Dr. Hasan Abou faoor ¹

¹ Faculty of Second Mechanical and Electrical Engineering - Damascus University-Syria

Abstract

This paper presents comparison results for the performance of gadolinium burnable absorber (GdBA) on infinite multiplication factor in UO₂ fuels and its impact on the concentration of plutonium isotopes in spent fuel. The result obtained through burnup simulating for (398GO) TVSA+ fuel Assemblies in VVER1000 nuclear reactor environment using VVERHGMLC Program. The study compares results for two fuel assemblies; one without GdBA in the fuel pins, and the other with 6 fuel rods with 5% weight percentage of GdBA.

The infinite multiplication factor behaviour and isotopic concentrations of major isotopes are compared and discussed, the study showed clearly the required effect for GdBA in curbing the infinite multiplication factor for fresh UO₂ fuel, without any significantly effect on the concentration of plutonium isotopes at the end of cycle for spent fuel.

Received :2021/12/14

Accepted:2022/05/11



Copyright: Damascus University- Syria, The authors retain the copyright under a CC BY- NC-SA

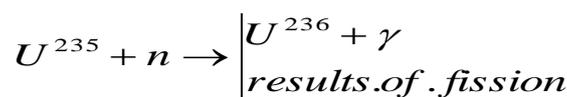
Keywords: VVER-1000, Gadolinium Burnable Absorber, Gdba, Infinite Multiplication Factor, VVERHGMLC, Plutonium Isotopes

1- مقدمة:

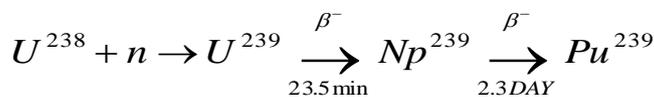
ان نتائج تحليل المحتوى النظيري لمجموعات وقود قلب المفاعل VVER-1000 المستحقة من أجل دورات تشغيل متعددة، أشارت إلى اختلاف محتوى وتركيز النكليدات المكونة لقضبان مجموعات (حزم) الوقود المستحقة ضمن القلب، حتى ضمن مجموعة الوقود نفسها والتي تكون معظم قضبان الوقود فيها متماثلة في الخصائص التصميمية (التخصيب) والخصائص التشغيلية (عدد أشواط التشغيل، وموقع تشيع الحزمة داخل القلب) [7],[6],[2],[6A],[5A],[4A],[2A]. والاشارة الأكثر أهمية والتي تجذب الانتباه هو اختلاف تركيز المواد القابلة للانشطار مثل نظائر البلوتونيوم Pu isotopes المتولدة أثناء احتراق الوقود وتحول بعض النكليدات الثقيلة مثل النظير U238 بسبب تفاعلات الأسر النتروني إلى نوى انشطارية مثل Pu239 والتي تتكسد ضمن الوقود ليساهم جزء منها في التفاعلات الانشطارية المولدة لطاقة المفاعل وجزء آخر يتم العمل على استخراجها من الوقود المستحرق واستخدامه في تطبيقات صناعية أخرى، ومن ذلك تبرز أهمية دراسة اثر استخدام مواد ضبط التفاعلية الزائدة مثل الماصات القابلة للاحتراق على تركيز النكليدات المنشطرة المتولدة في نهاية دورة التشغيل.

2- انماط التفاعلات المتبادلة بين النترونات مع الوقود النووي [3] [6A] , اذا كان الوقود النووي هو عبارة عن UO_2 أي مزيج من (U^{235}, U^{238}) فان تغير التكوين النظائري سيكون نتيجة للعمليات التالية:

- الاسر النتروني بواسطة (U^{235}):



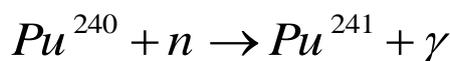
- اسر النترون من قبل (U^{238}):



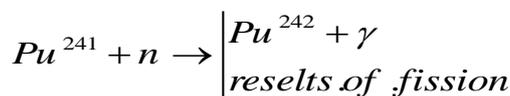
- اسر النترون من قبل (Pu^{239})



- اسر النترون من قبل (Pu^{240})



- اسر النترون من قبل (Pu^{241})



ونلاحظ من المعادلات الاخيرة انه يتكسد نظائر انشطارية (وقود جديد) من نظائر البلوتونيوم (Pu^{239}) و (Pu^{241}) وهذا يؤدي الى:

1- انشطار بعض من هذه النوى وسينتج عنه المساهمة في إطلاق الطاقة وحدث تغير لاحق للتكوين النظيري بسبب ظهور بنات هذه النوى الانشطارية ضمن تركيبة الوقود.

2- الجزء المتبقي من هذه النوى الانشطارية الجديدة سيبقى بتركيز عالية في بعض قضبان مجموعات الوقود المستنفذ مما يفسح مجال لإعادة معالجة وقود هذه القضبان لاستخلاص هذه المواد واستخدامها في تطبيقات صناعية أخرى وأهمها صناعة وقود نووي جديد وصناعة الأسلحة النووية.

وأبدت التقريبات الأولى لمراقبة هذه الظاهرة إلى احتمال وجود أثر للمواد المضافة إلى الوقود مثل الماصات القابلة للاحتراق والتي تضاف بغرض ضبط تفاعلية الوقود الطازج والتحكم بمعامل التضاعف اللانهائي في بداية دورة الإستحراق للحزمة [2A]، لكن هل سيكون لها أثر ذو دلالة على تغير تركيز المواد الانشطارية خلال دورة التشغيل للحزمة وبالتالي على تركيز المواد الانشطارية الجديدة في الوقود المستنفذ، ولذلك نتوجه هذه الدراسة إلى مقارنة أثر وجود الماصات القابلة للاحتراق على تغير تركيز وتولد هذه النوى الانشطارية في قضبان وقود مجموعات وقود قلب المفاعل VVER-1000.

3- استراتيجية الدراسة:

من أجل مراقبة وتحديد أثر استخدام الماصات القابلة للاحتراق على تولد النوى الانشطارية في قضبان وقود مجموعات قلب المفاعل VVER-1000 تم دراسة تغير المحتوى النظيري لقضبان حزمة وقود من النوع 398GO وذلك من أجل الحالات التالية

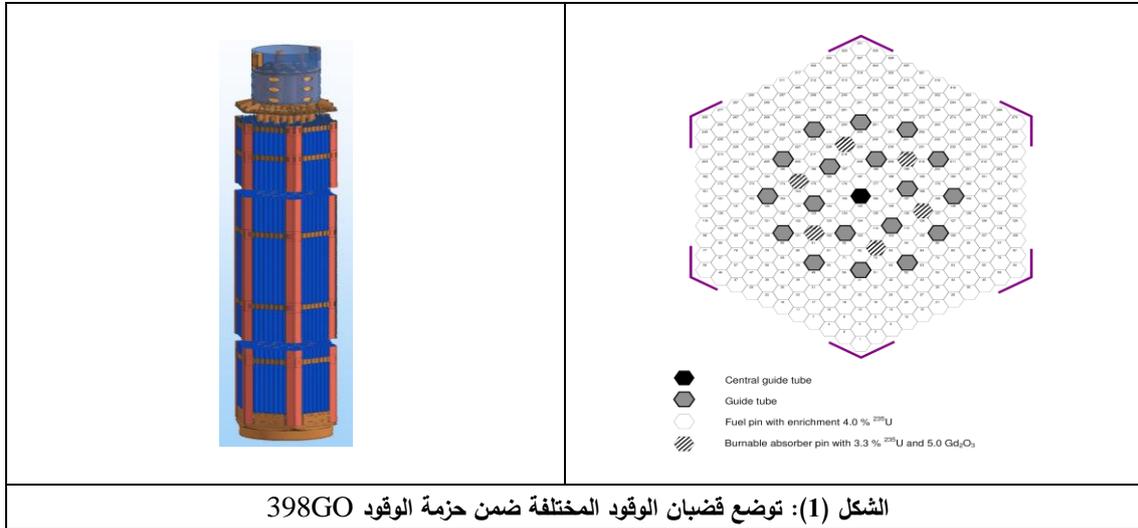
1- الحالة الأولى: التصميم المعتمد للحزمة وهو وجود ست قضبان وقود تحتوي على ماص قابل للاحتراق Gd_2O_3 بمحتوى وزني 5% موزعة بين قضبان وقود المجموعة.

2- الحالة الثانية: نفس التصميم السابق لكن دون وجود ماصات قابلة للاحتراق في أي من القضبان وذلك لنتمكن من مقارنة وتوصيف الآثار الناتجة عن وجود مزيج الماصات القابلة للاحتراق مع الوقود في الحالة الأولى

تم دراسة الحالة الثانية كحالة شاهدة فقط من أجل الاسترشاد وتوجيه مسار استخلاص النتائج

4- حزمة (مجمعة) الوقود 398GO [1],[7],[2A]

يبين الشكل (1) التالي مظهر ومقطع عرضي لحزمة الوقود 398GO المستخدمة في دورات تشغيل قلب المفاعل VVER-1000.

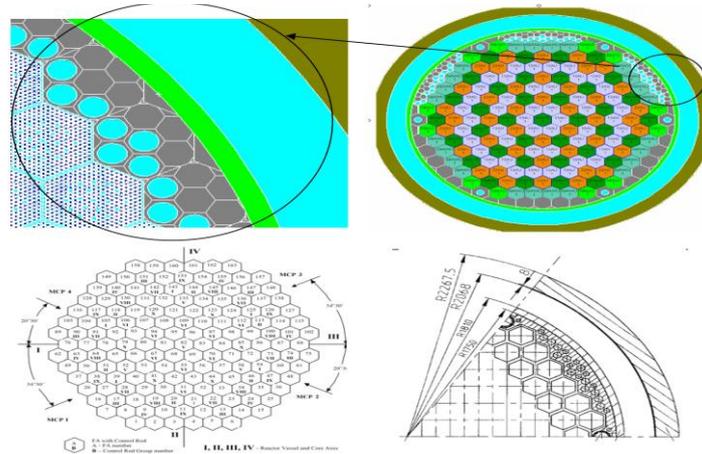


ان هذه الحزمة هي أحد أنواع حزم الوقود من النمط $TVSA^+$ المستخدمة في نماذج تحميل الوقود المطورة لتشغيل قلب المفاعل VVER-1000، وتحتوي هذه الحزمة على 306 قضيب وقود بتخصيب 4% و 6 قضبان وقود تحتوي على ماصات قابلة للاحتراق من اكسيد الغادولينيوم يكون فيها تخصيب الوقود 3.3% والمحتوى الوزني لأكسيد الغادولينيوم Gd_2O_3 ضمن الوقود 5%، ويبين الجدول التالي الخصائص التصميمية الأساسية لهذا النمط من الحزم.

الجدول(1): المواصفات التصميمية لحزمة الوقود المطورة من النوع 398GO			
alloy E110	مادة واقية قضيب الوقود	4570	طول مجموعة mm ⁺ TVSA
98.97 Zr+1 Nb+ 0.03 Hf	تركيب الخليط %	ca. 730	كتلة مجموعة Kg ⁺ TVSA
6.4516	الكثافة g/cm ³	234,8	خطوة مجموعة الوقود mm
ca. 1,575	كتلة وقود اليورانيوم ضمن القضيب kg	236	خطوة خلية مجموعة الوقود في القلب mm
3700	طول جزء الوقود ضمن القضيب mm	hexagonal	نمط الخلية
7.6	القطر الخارجي لكبسولة الوقود mm	312	عدد القضبان في مجموعة ⁺ TVSA
1,2	قطر الثقب الداخلي للكبسولة mm	505.4±4.5	كتلة الوقود في المجموعة Kg
448	كثافة الاستطاعة الخطية الأعظمية W/cm	312	عدد قضبان الوقود
6	عدد قضبان ماصات GD في المجموعة	uniform triangular	شكل الخلية
Gd2O3	المادة الماصة	12,75	خطوة خلية القضبان mm
5	النسبة الوزنية للماص في الوقود % w/o	9,10	القطر الخارجي للقضبان mm
360	كثافة الاستطاعة الخطية الأعظمية W/cm	7,73	القطر الداخلي لواقية القضيب mm

5- قلب المفاعل VVER-1000

يتألف قلب المفاعل من 163 حزمة وقود متوضعة بترتيب سداسي الشكل بخطوة تقارب 236 mm الشكل (2) ويبين الجدول (2) الخصائص الفيزيائية والتصميمية الرئيسية لقلب المفاعل VVER1000



الشكل(2): مقطع في قلب المفاعل VVER-1000

الجدول (2): الخصائص الفيزيائية الرئيسية لقلب المفاعل VVER-1000/320 [27]			
H2O	المبرد (المهدئ)	23.6	خطوة مجموعات الوقود cm
1005	حرارة الوقود K	163	عدد مجموعات الوقود
578	حرارة المهدئ K	61	عدد مجموعات الوقود المحتوية على قضبان تحكم
525 (3 g/kg)	تركيز البور ppm	355	ارتفاع الوقود في القلب cm
168 (42.5)	وسطي كثافة الاستطاعة W/cm (W/GU)	415	القطر الداخلي لهيكل المفاعل cm
0, ..., 70	الاستحراق MWd/kg	3000	الاستطاعة الحرارية (MW)

6- المحاكى VVERHGMLC [1A],[2A],[3A],[5A],[7A],[4],[5],[8]

تم تنفيذ الحسابات النثرية وحسابات الاحتراق لحزمة الوقود 398GO ضمن بيئة المحاكى VVERHGMLC " محاكى تصميم وتشغيل المفاعل VVER-1000 " والذي يؤمن تنفيذ معظم حسابات التصميم النثرى الديناميكي لقلب المفاعل مثل حسابات دورة واحتراق الوقود في قلب المفاعل والحسابات النثرية (الحرية وتوزع التدفق النثرى) وحسابات تصميم مخطط تحميل الوقود وتوزع الاستطاعة عبر قلب المفاعل وتقدير تشيع الهيكل بالنثرات السريعة ومراقبة تغير التكوين النكليدي للوقود ضمن مختلف أنواع قضبان الوقود في الحزم فضلا عن إمكانية دراسة ومقارنة اثار تعديل قيم المعاملات التصميمية للقلب على كل المعاملات سابقة الذكر.

يؤمن المحاكى تنفيذ الحسابات سابقة الذكر عبر تشغيل عدد من الكودات وهي:

- الكود GETERA: كود توليد المقاطع العرضية الساكنة.

- كود NRFLC (Nuclear Reactor Fuel Load Calculation).

- كود MCNP 4C2 المعدل: كود التصميم النثرى في الحالة الساكنة للمفاعل.

حيث يتم تشغيل هذه الكودات ضمن البنية الحاسوبية للمحاكى التي تستخدم بيئة النوافذ ويتم من خلالها توليد ملفات الدخل لهذه الكودات وتشغيلها وقراءة ملفات الخرج واستخراج البيانات منها ومعالجتها وإظهار الرسوم البيانية المعبرة عنها كما يقوم بربط هذه الكودات فيما بينها ونقل البيانات التي يحتاجها كل كود من الكود الآخر ليتم تنفيذ محاكاة ديناميكية للحالة التشغيلية للمفاعل. ويبين الشكل التالي الواجهة الرئيسية للمحاكى



الشكل (3): الواجهة الرئيسية للبرنامج VVERHGMLC

7- نتائج الدراسة:

عبر المحاكى VVERHGMLC السابق تمت عملية محاكاة تشغيل النموذجين السابقين للحزمة 398GO (مع وبدون ماصات مستحقة) وذلك ضمن شروط تشيع متماثلة من حيث مكان الحزمة والتدفق النثرى المعرضة له بكل مكوناته، وتم مراقبة تغير التكوين النكليدي للنموذجين في مناطق ثلاثة ضمن الحزمة

1. قضبان وقود محيطية تقع على جوانب الحزمة

2. قضبان وقود داخلية قرب مركز الحزمة

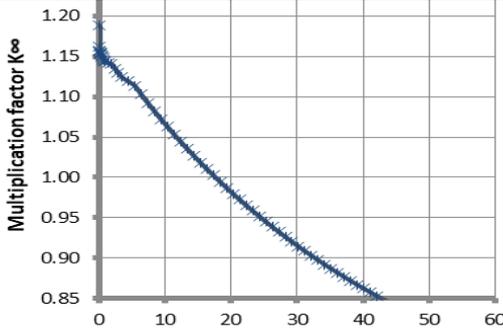
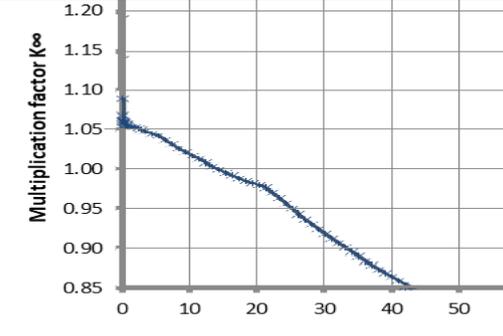
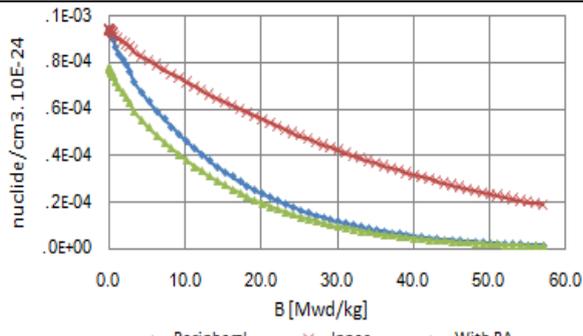
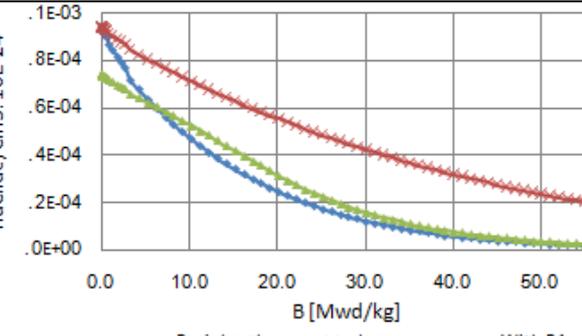
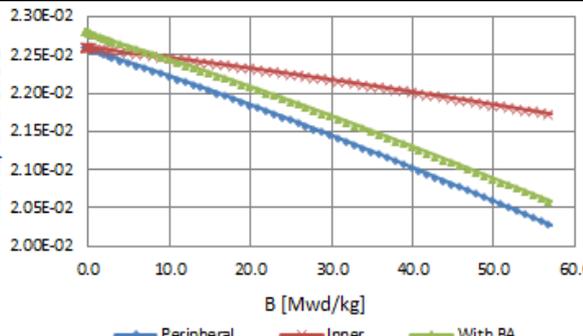
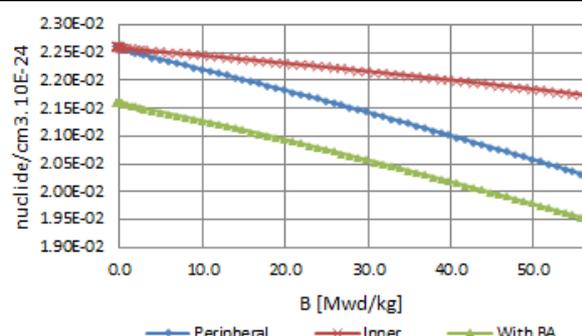
3. المواقع الستة للقضبان المخصصة للماصات المستحقة

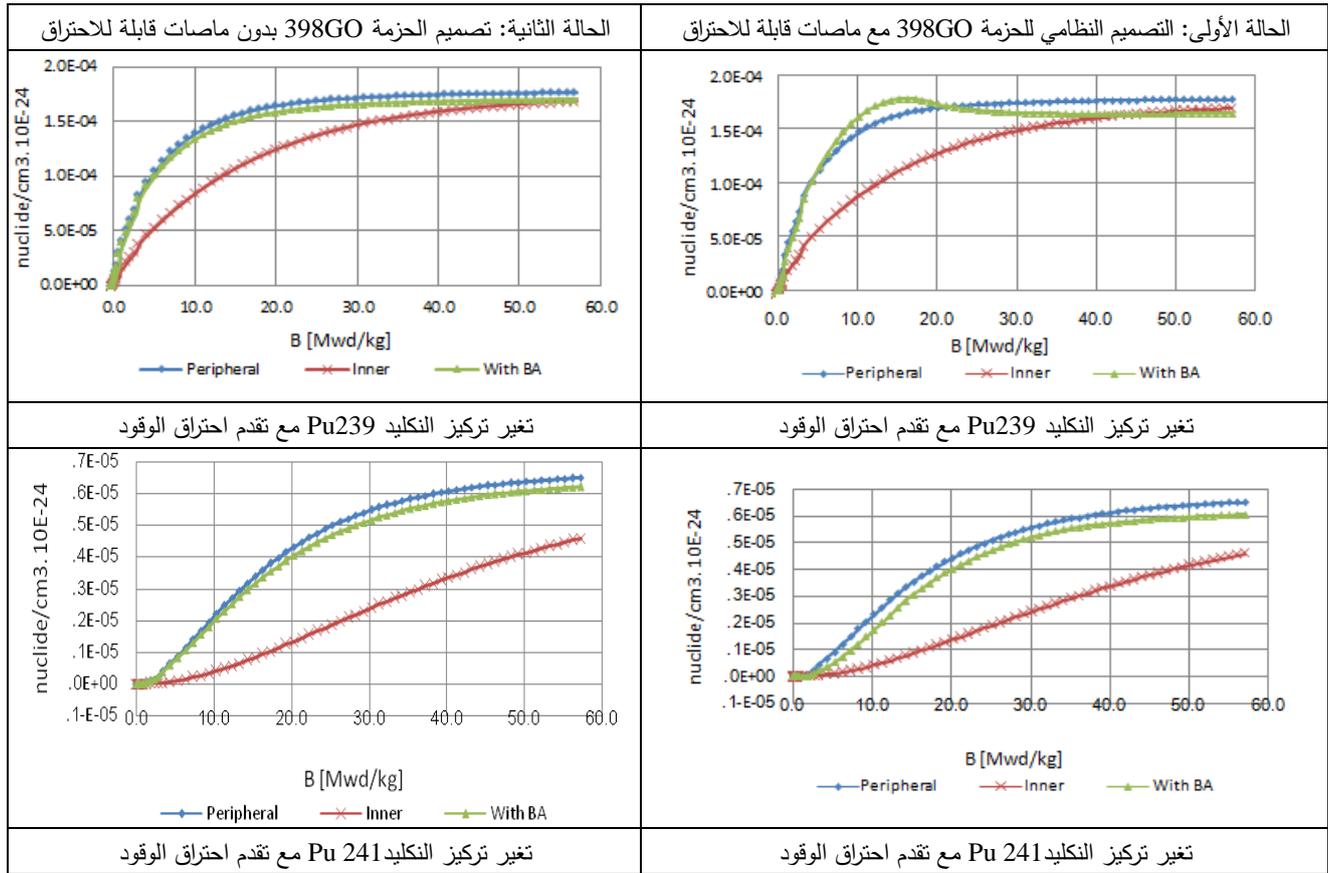
- a. النموذج الاول قضيب وقود بتخصيب 3.3% من U235 و 5% محتوى وزنى من Gd2O3

b. النموذج الثاني قضيب وقود بتخصيب 3.3% من U235

وتم دراسة أثر إضافة المواد المستخرقة على معامل التضاعف اللانهائي للحزمة ومراقبة تغير تركيز النكليدات الانشطارية الأساسية U235 & U238 والنكليدات المتولدة Pu239 & Pu241 وكانت النتائج كالتالي

7- نتائج الدراسة:

<p>الحالة الثانية: تصميم الحزمة 398GO بدون ماصات قابلة للاحتراق</p> 	<p>الحالة الأولى: التصميم النظامي للحزمة 398GO مع ماصات قابلة للاحتراق</p> 
<p>علاقة معامل التضاعف اللانهائي مع استحقاق الوقود</p> 	<p>علاقة معامل التضاعف اللانهائي مع استحقاق الوقود</p> 
<p>تغير تركيز النكليد U235 مع تقدم احتراق الوقود</p> 	<p>تغير تركيز النكليد U235 مع تقدم احتراق الوقود</p> 
<p>تغير تركيز النكليد U238 مع تقدم احتراق الوقود</p>	<p>تغير تركيز النكليد U238 مع تقدم احتراق الوقود</p>



8- مناقشة النتائج

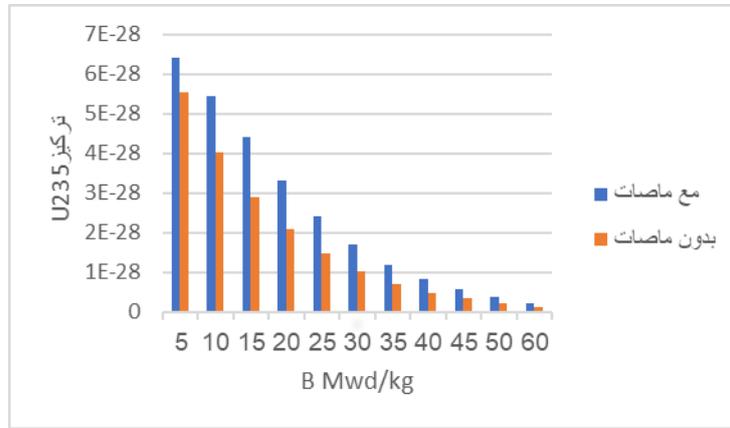
- من خلال مقارنة نتائج المحاكاة الحاسوبية لاستحراق حزمة الوقود 398GO مع ماصات قابلة للاحتراق مع نتائج المحاكاة الحاسوبية لاستحراق الحزمة الشاهدة (نفس تركيبة 398GO لكن دون قضبان ماصات قابلة للاحتراق) نستنتج ما يلي
- قامت الماصات القابلة للاحتراق بالدور التصميمي المطلوب منها في ضبط تفاعلية الحزمة الطازجة وكبح معامل التضاعف اللانهائي من قيمة 1.15 في حال عدم وجودها الى قيمة 1.05 في حال وجودها ضمن القضبان الستة بنسبة وزنية 5% في قضبان تخصبها 3.3%، وهنا تم تحقيق الغاية من استخدام الماص القابل للاحتراق والان سندرس الآثار الناتجة عن وجوده في تركيز النكليدات الانشطارية الأساسية والمتولدة
 - اثر استخدام الماص القابل للاحتراق على استنزاف وتوالد النوى الانشطارية
 - بالنسبة لتغير تركيز النكليد U235 مع تقدم احتراق الوقود نلاحظ
 - تمائل في تغير التركيز في الحزمتين من اجل القضبان المحيطة والمركزية
 - ان إضافة الماصات المستحقة الى القضبان الستة في حزمة الوقود أدى الى تحسين استحراق النكليد المنشطر داخل هذه القضبان حيث نلاحظ الفرق في تسطح المنحني عند وجود الماصات المستحقة مقارنة مع استنزاف كبير للنكليد في حالة عدم وجود هذه الماصات في بداية دورة استحراق الحزمة، ويبين المخطط التالي الفرق في تركيز النكليد U235 عند قيم استحراق مختلف في حالة وجود ماصات مستحقة في القضيب او عدم وجودها بنسبة تتراوح بين 1.35 الى 1.75 مع تقدم الاستحراق
 - بالنسبة لتغير تركيز النكليد U238 مع تقدم احتراق الوقود نلاحظ
 - تمائل في تغير التركيز في الحزمتين من اجل القضبان المحيطة والمركزية

ii. الفرق في قيم تركيز النكليد في القضبان المحتوية على الماصات يعود الى وجود النكليد المنشطر بدلا من المادة الماصة بالنسبة الوزنية 5% مما أدى الى رفع تركيزه الاولي من $2.16E-26 \text{ n/cm}^3$ الى $2.28E-26 \text{ n/cm}^3$ وحافظ على نفس الفرق في التراكيز خلال دورة الاستحراق.

e. بالنسبة لتغير تركيز النكليد Pu239 مع تقدم احتراق الوقود نلاحظ

i. تماثل في تغير التركيز في الحزمتين من اجل القضبان المحيطية والمركزية

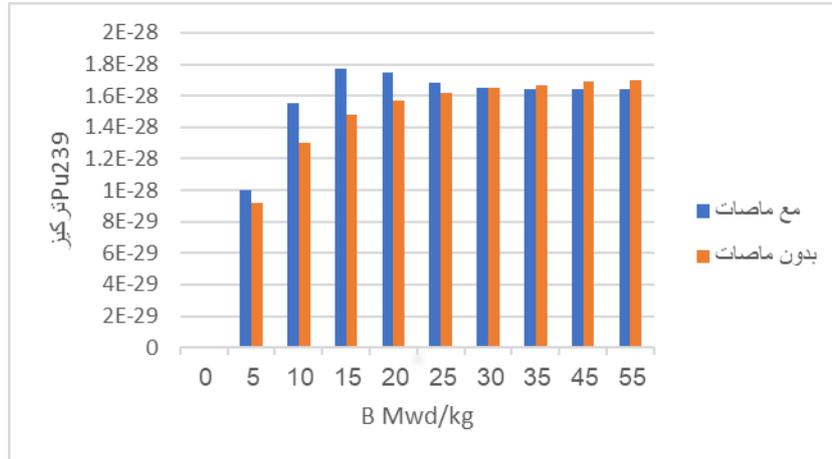
ii. في القضبان الحاوية على ماصات قابلة للاحتراق حدثت زيادة في تركيز النكليد Pu239 بنسبة 132.4% عند استحراق 9 Mwd/kg وحافظ على ذروة زيادة بنسبة 130% حتى استحراق 17 Mwd/kg ليعود وينسجم مع تركيز النكليد بشكل مماثل لظهوره في باقي القضبان كما يمثل الشكل التالي



f. بالنسبة لتغير تركيز النكليد Pu241 مع تقدم احتراق الوقود نلاحظ

i. تماثل في تغير التركيز في الحزمتين من اجل القضبان المحيطية والمركزية

ii. تماثل في تراكيز النكليد في الحزمتين من اجل القضبان مع ماصات وفي حالة بدون ماصات قابلة للاحتراق كما يبين الشكل التالي



g. من المخططات السابقة نستنتج ان التغيرات الحاصلة على تركيز النكليدات الانشطارية كانت واضحة في المراحل الأولى للاحتراق بينما عند نهاية دورة تشغيل المفاعل فان تركيز هذه النوى لم يبدى فروق ذات أهمية في مختلف أنواع القضبان ومواقعها وفي القضبات التي كانت تحوي ماص قابل للاحتراق او عند نزع الماص منها

9-الخلاصة:

من خلال مقارنة نتائج المحاكاة الحاسوبية لاحتراق حزمة الوقود 398GO مع ماصات قابلة للاحتراق مع نتائج المحاكاة الحاسوبية لاحتراق الحزمة الشاهدة (نفس تركيبة 398GO لكن دون قضبان بصاصات قابلة للاحتراق) نستنتج ما يلي:

1. تحقيق الأثر المبتغى من الماصات القابلة للاحتراق في كبح تفاعلية الحزم الطازجة وضبط معامل التضاعف وتحقيق امان التشغيل
2. لم يكن لاضافة المواد القابلة للاحتراق اثر ذو أهمية في تغير تركيز المواد الانشطارية الأساسية U235 او المتولدة Pu239 و Pu241 وخاصة عند نهاية دورة التشغيل وازلة حزم الوقود من قلب المفاعل
3. ان التغيرات في تراكيز المواد الانشطارية الأساسية او المتولدة ظهرت كما يلي
 - a. تنظيم استنزاف النظير U235 في القضبان ذات الماصات القابلة للاحتراق مما يشير الى أهمية وجود الماصات القابلة للاحتراق في كل قضبان الحزمة ونوصي باتمام دراسة وتنفيذ نمذجة حاسوبية لهذه الحالة
 - b. ظهور ذروة لتوالد نوى Pu239 في النصف الأول من دورة التشغيل في القضبان الحاوية على الماصات وهذا أيضا عامل يوصى بدراسته للتحقق من نسبة مشاركة هذا النكليد في انتاج الطاقة بالتشارك مع النظير U235

10- المراجع:**1-10 المراجع العربية:**

- [1] أبو فاعور، حسن، الأشقر، بيداء،، ذبابنة، سائد (2015)، " تصميم برنامج حاسوبي لمحاكاة تشغيل المفاعل VVER-1000"، مجلة جامعة دمشق للعلوم الأساسية، المجلد 31، العدد الثاني.
- [2] أبو فاعور، حسن. (2015). "أمثلة إدارة الوقود في قلب المفاعل عبر دراسة إمكانية تصميم مخطط تحميل وقود شطرنجي بدون إزاحة للحزم أثناء إعادة التحميل"، جامعة دمشق. أطروحة دكتوراه.
- [3] أبو فاعور، حسن، الأشقر. بيداء، الطاهرة. سعدو، (2012)، " تطوير إمكانيات تشغيل الكود MCNP 4C2 لمستثمري الكود في الجمهورية العربية السورية"، مجلة جامعة دمشق للعلوم الأساسية، العدد الثاني.
- [4] أبو فاعور، حسن. (2012). " تأثير طرق تحميل الوقود واستخدام المواد المستحقة على تغيرات التدفق النتروني والزمن التشغيلي للمفاعل VVER-1000"، جامعة دمشق. أطروحة ماجستير.
- [5] أبو فاعور، حسن، (2012)، "دراسة تأثير بعض السموم المستحقة على تركيبة الوقود للمفاعل PWR-1150 باستخدام الكود GETERA"، مجلة جامعة دمشق للعلوم الأساسية، العدد الثالث.
- [6] أبو فاعور، حسن،، بيطار، هام، (2007)، "التصميم النتروفيزيائي التشغيلي لمفاعل طاقة حراري VVER-1000"، جامعة حلب، مشروع تخرج.
- [7] عمر، حسان. خميس، ابراهيم، (2002)، "تشغيل الكودين CITATION&WIMS-D/4 باستخدام نظام التشغيل Windows"، هيئة الطاقة الذرية السورية. دراسة عملية حاسوبية.

2-10 المراجع الأجنبية:

- [1] Abou faour. H, Achkar. B, Dababneh.S, (2014), "Evaluation of loading Pattern Characteristics influence on VVER 1000 Nuclear Reactor Pressure Vessel Neutron Fluence" JJMIE, Vol 8 No 4, ISSN 1995-6665.
- [2] Pavlov, V. I., Sidorenko, V. D., Pozdnyakov , N.E.,(1992), " Effectiveness Of Using Burnable Absorbers In A VVER-1000", Plenum Publishing Corporation , Vol. 73, No. 6, pp. 466-470.
- [3] Duderstadt, J.J., Hamilton ,L.J.,(1976), "Nuclear Reactor Analysis", Department of Nuclear Engineering , The University of Michigan, DUD 621.4832.
- [4] Jiang, sh., (2009)," Nuclear Fuel Management Optimization Using Estimation of Distribution Algorithms", PhD Thesis, Imperial College London , University of London, UK.
- [5] Belousov N., Bichkov S., Marchuk Y. "The Code GETERA for cell and polycell calculations at al.. Models and. Capabilitie"s. – In: Proceedings of the 1992 Topical Meeting on Advances in Reactor Physics. Charleston, SC, USA, 8–11 March, 1992, v.2, p.516–523.
- [6] Zhiwen .X.U., (2003), "Design Strategies for Optimizing High Burnup Fuel in Pressurized Water Reactors", Massachusetts Institute Of Technology" , Doctor Of Philosophy ,China.
- [7] Alekseev, P. N., D'yakov, A. V., Kolokol, A. S., Proshkin, A. A., Shimkevich, A. L., (2007), " Improvement Of The Operating Characteristics Of VVER Oxide Fuel ", Atomic Energy, Vol. 102, No. 2.
- [8] E.D Blakeman, D.E Peplow, J.C Wagner, "PWR Facility Dose Modelling Using MCNP5 and the CADIS/ADVANTG Variance-Reduction Methodology". ORNAL 2007.