

## دراسة قابلية استخدام حزم الوقود المطورة في قلب المفاعل VVER-1000 من حيث استقرار خصائصها الترموهيدروليكيكية

حسن أبوفاعور<sup>(1)</sup> و بيداء الأشقر<sup>(2)</sup> وسائد دبابنة<sup>(3)</sup>

تاريخ الإيداع 2013/05/15

قبل للنشر في 2014/01/27

### الملخص

درست في هذا البحث وفورنت الخصائص الترموهيدروليكيكية بين حزم الوقود التقليدية (TVS) وحزم الوقود المطورة (TVSA<sup>+</sup>) التي يتم العمل على تحسينها وإدخالها ضمن دورات تشغيل المفاعل لتلبي متطلبات المخططات المقترحة لتطوير دورة وقود المفاعل وأمثلة نموذج تحميل الوقود. إذ يمثل التوجه نحو تشغيل مفاعلات الماء المضغوط الروسية VVER-1000 العاملة أو قيد الإنشاء للعمل ضمن بيئة دورات الوقود المطورة إحدى أولويات إستراتيجية تطوير هذا النوع من المفاعلات بهدف زيادة القدرة التنافسية لها في السوق العالمية.

فُورنت في هذه الدراسة حزمة الوقود المطورة TVSA<sup>+</sup> بالحزمة التقليدية TVS العاملة في مفاعلات الماء المضغوط VVER 1000 من الناحية الترموهيدروليكيكية عند الاستطاعة الاسمية للمفاعل ضمن شروط الحالة المستقرة من أجل حزمة وقود ذات حمل أعظمي بالاعتماد على محاكاة حاسوبية لجريان المبرد حول قضيب الوقود باستخدام كود (Computational Fluid Dynamic) CFD ضمن بيئة برنامج (Solid Works Flow Simulation) إذ وُصفت تغيرات درجة الحرارة على ارتفاع قضيب الوقود لمكوناته كلها ووصف التدفق الحراري وتغيرات درجة حرارة وضغط الناقل الحراري (المبرد) على ارتفاع قضيب الوقود.

ومن خلال النتائج يمكن توضيح فعالية التعديل التصميمي الذي أُدخل على تصميم حزمة الوقود TVSA<sup>+</sup>، فضلاً عن كونها تلي متطلبات دورات الوقود المطورة ومخططات التحميل عالية الاستحراق، أثبتت النتائج إمكانية استخدام هذه الحزم في قلب المفاعل VVER-1000 التقليدي مع الحفاظ على حدود التشغيل وهوامش الأمان المعتمدة ضمن محطة تشغيل المفاعل VVER 1000 NPP جميعها دون أن تفرض أي تعديلات على خصائص تشغيل الدارة الأولية، ومن ثمّ عدم التأثير في أي من دارات المحطة.

**الكلمات المفتاحية:** المفاعل VVER-1000، دورة الوقود المطورة، حزم الوقود المطورة، الخصائص الترموهيدروليكيكية، CFD & Flow Simulation.

(1) طالب دكتوراه، (2) أستاذة مساعدة، قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة دمشق، سورية.

(3) أستاذ، قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة البلقاء التطبيقية، الأردن.

# Assessing the Use of Advanced Fuel Assembly for VVER-1000 Reactor Based on Evaluating its Thermal hydraulic Features

H. Aboufaoor<sup>(1)</sup>; B. Achkar<sup>(2)</sup> and S. Dababneh<sup>(3)</sup>

Received 15/05/2013

Accepted 27/01/2014

## ABSTRACT

In this work the Thermal hydraulic features of the traditional fuel assemblies (TVS) have been compared with the new ones (TVSA<sup>+</sup>) developed to improve reactor fuel cycle performance and to optimize fuel loading scheme. In fact, running Russian Pressurized Water Reactors VVER-1000 with enhanced fuel cycle is considered to be the first priority to increase its competitiveness in the international market.

CFD models of the VVER-1000 fuel rod cells for TVS and TVSA<sup>+</sup> assembly types were developed based on the technical documentation of a full-scale test facility built in the Kurchatov Institute, Russia. For the comparative analyses, the thermal hydraulic parameters in each fuel assembly were simulated by the computational fluid dynamics (CFD) tool, Solid Works -Flow Simulation. The temperature and the heat flux distribution over the all components of the fuel rod cells along the rod height were consequently determined.

Comparison of the two types of assemblies showed that TVSA<sup>+</sup> assembly can burn in the reactor core with higher safety margins, and doesn't excess any operating limits during the whole reactor cycle. Furthermore the TVSA<sup>+</sup> might allow to achieve long fuel cycle batch, nearly flat neutron flux, and high fuel burn up.

**Key Word:** VVER-1000 nuclear reactor, TVSA<sup>+</sup> assembly, Thermodynamic properties, Advanced fuel cycle, CFD & Flow Simulation.

---

<sup>(1)</sup> Ph.D., Student, <sup>(2)</sup> Associate Professor, Department of Physics, Faculty of Sciences, Damascus University, Syria

<sup>(3)</sup> Professor, Department of Physics, Faculty of Al-Balkaa, Jourdan.

## المقدمة

ظهرت الحاجة لتحسين أداء المفاعلات من خلال زيادة طول دورة الوقود وتحسين استخدامه منذ بداية الاستخدام التجاري لمحطات الطاقة النووية [1] [2] [2A]. وتركزت الجهود على الوصول إلى القيمة الأصغرية لكل من نفقات الوقود وكمية الوقود المستنفد وكمية النفايات من المواد المشعة بعد استحقاق الوقود. إذ تعدُّ زيادة قيمة استحقاق الوقود من أكثر الأهداف أهمية لتلبية هذه المتطلبات وهذا ما أكدته برامج الوكالة الدولية للطاقة الذرية، كما أشارت إليه الجهود البحثية التي تركزت على تطوير بنية استئثار المفاعل VVER-1000 واستراتيجيته من خلال نتائج المؤتمرات العلمية الأخيرة [2][3][4]، وقد أشارت إلى ضرورة العمل على تطوير البنية الهندسية لحزم القلب وتحسين استراتيجية التشغيل عبر الانتقال بهذه المفاعلات إلى العمل ضمن بيئة دورات الوقود المطورة التي تعتمد على التصاميم الجديدة لهذه الحزم [1] [5]، ويمكن إجمال النقاط الرئيسية التي تم العمل عليها في التصميم الجديد لحزم الوقود بما يأتي:

1. زيادة كتلة وتخصيب الوقود ضمن الحزمة: وذلك عبر زيادة القطر الخارجي للكبسولات من 7.57mm إلى 7.6mm وتخفيض قطر الثقب الداخلي للكبسولة من 1.4mm إلى 1.2mm وزيادة طول الجزء الفعال من قضيب الوقود من 3530 mm إلى 3700 mm\* وبيّن الشكل (2) مقارنة بين شكل حزم الوقود التقليدية والمطورة [5]. ومن أجل التخطيط لدورات بعدد أكبر من الأشواط وزيادة زمن شوط التحميل يمكن رفع تخصيب الوقود من 4.4% إلى 4.95%، وبذلك يمكن الوصول مع هذه المواصفات إلى عمق استحقاق يصل إلى 65 MWd/kg وطول شوط يقارب 300-550 EFPD (Effective Full Power Day) مقارنة مع 43 MWd/kg و 300-450 EFPD للنموذج التقليدي لتصميم الوقود [3][5][2A]

2. المادة الإنشائية: جرى التوجه في صناعة أغلفة قضبان الوقود والمواد الإنشائية في قلب المفاعل من أجل تطبيق دورات الوقود المطورة إلى استخدام خلائط الزركونيوم بدلا من الستيل؛ مما يمكن من تخفيض الامتصاص المرن للنترونات ضمن البنية الإنشائية للحزمة بنسبة تقارب نسبة مقطعي الامتصاص لهما\* 93.75%. وتشير هذه النسبة المرتفعة إلى الإمكانية العالية لتحسين التوازن النيوتروني في خلية الوقود وتتيح الفرصة للوصول إلى ميزات وخصائص متطورة للدورة من حيث زيادة طول الشوط ورفع الاستحقاق النهائي للوقود وتحسين خصائص التشغيل الاقتصادية من أجل قيم التخصيب

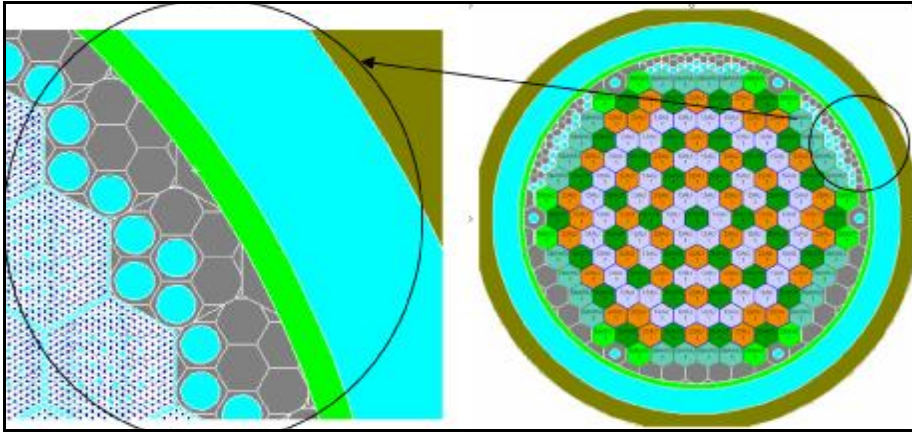
\* بيّن الشكل (2) أنه زيدَ طول الجزء الفعال من قضيب الوقود على حساب البنية الإنشائية له، أي أن الطول الإجمالي للقضيب بقي ثابتاً ويساوي 3837 mm. [6]  
\*\* المقطع العرضي للأسر النيوتروني للفولاذ 2.88 barn وللزركونيوم 0.18 barn [6].

المستخدمة نفسها في الدورات التقليدية كما تسمح بتخفيض قيمة التخصيب المطلوب للوقود من أجل العمل بشروط الدورات التقليدية [1][4][5][6][2A] دون ظهور آثار سلبية بقيم مؤثرة في خصائص الناقلية الحرارية والمقاومة الميكانيكية للمواد الإنشائية ضمن مجال الحمولة التي تشغل تحتها في قلب المفاعل VVER1000.

ومن أجل العمل على دراسة خصائص دورات الوقود المطورة لهذه المفاعلات وأمثلة نماذج تحميل الوقود اعتماداً على التصميم الجديدة للحزم  $TVSA^+$ ، لابدّ أولاً من تقييم الخصائص الترموهيدروليكية وخصائص نقل الطاقة الحرارية وتبريد مكونات القلب لهذه الحزم، والتأكد من البقاء ضمن حدود التشغيل وهوامش الأمان المطلوبة [7]، وانطلاقاً من أن الدراسات النيترونية الحاسوبية التي تستخدم من أجل دراسة خصائص الدورات المطورة ونماذج تحميل الوقود عالية الاستحراق المقترحة تعتمد على المحاكيات الحاسوبية [2A] التي لا تغطي الدراسة الحرارية؛ لذلك وجب البدء بإثبات موثوقية الأداء الهيدروليكي لهذه الحزم ضمن شروط التحميل الأعظمية قبل البدء باستخدامها كعناصر لتصميم نموذج تحميل الوقود الأمثل.

### 1. مواصفات قلب المفاعل VVER-1000.

يتألف قلب المفاعل من 163 حزمة وقود متوزعة بترتيب سداسي الشكل بخطوة تقارب 236 mm (الشكل 1)، ويوضح الجدول (1) الخصائص الفيزيائية والتصميمية الرئيسة للقلب [1-5][2][3][1A][2A]:

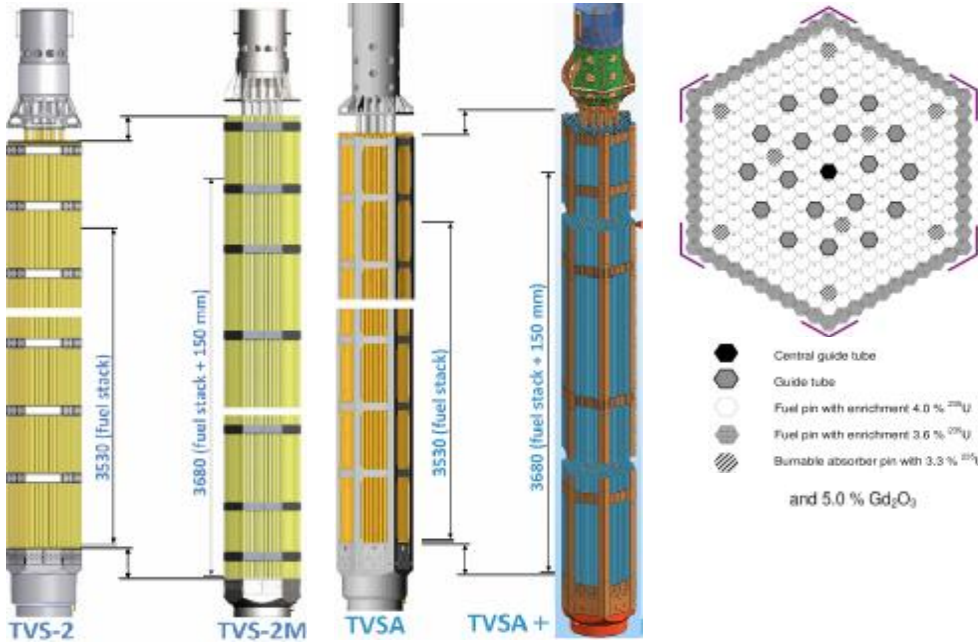


الشكل (1) مقطع في قلب المفاعل VVER 1000

الجدول (1) الخصائص الفيزيائية الرئيسية لقلب المفاعل VVER 1000/320

Hexagonal	نمط خلايا القلب
23.6	خطوة حزم الوقود [cm]
163	عدد حزم الوقود
61	عدد حزم الوقود المحتوية على مجموعات قضبان تحكم
415	القطر الداخلي لهيكل المفاعل [cm]
$3.10^9$	الاستطاعة الحرارية [W]
H <sub>2</sub> O + H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> (water + boron acid)	المبرد (المهدئ)
525 (3 g/kg)	تركيز البورون [ppm]
78000	معدل تدفق المهدئ [m <sup>3</sup> /h]
15,8	ضغط المبرد على مدخل القلب [Mpa]
578	درجة الحرارة الوسطية للمبرد [K]
563,15	درجة حرارة المبرد على مدخل القلب [K]
168	وسطى كثافة الاستطاعة الخطية [W/cm]
65	الاستحراق الأعظمي [MWd/kg]

تتألف حزمة وقود المفاعل VVER 1000 من شبكة منتظمة من قضبان الوقود، يتخللها قضبان غير وقودية مثل القضبان الفولادية وقضبان التحكم، وتحتوي كل حزمة على 312 قضيب وقود و 18 أنبوبة توجيه لقضبان التحكم وأنبوبة مركزية لأدوات التحكم (الشكل 2) [1][3-1][2A].



الشكل (2) حزمة وقود المفاعل VVER 1000 التقليدية والمطورة

تختلف قضبان الوقود بتخصيبيها في الحزمة الواحدة بهدف تخفيض تغيرات التدفق النيوتروني عبر مقطع الحزمة الناتج عن فجوات الماء الكبيرة نسبياً بين الحزم. وقد صممت حزم الوقود لتناسب معايير تشغيل محددة مثل الاهتزاز وهبوط الضغط والأخطار الزلزالية، ويبيّن (الجدول 2) مقارنة أهم خصائص حزم الوقود التقليدية والمطورة للمفاعل VVER 1000 [3-1][1A][2A]:

الجدول (2) الخصائص التصميمية الأساسية الوسطية للقلب وحزم TVSA

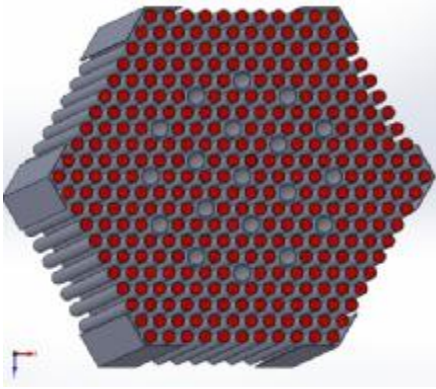
المعامل	الحزمة المطورة TVSA+	الحزمة التقليدية TVSA
طول الحزمة الكلي [mm]	4570	4570
كتلة الوقود في الحزمة [Kg]	505.4±4.5	494.5
خطوة الحزمة [mm]	234,8	235.3
خطوة خلية الحزمة في القلب [mm]	236	236
شبكات التباعد	15	21
<b>قضبان الوقود</b>		
عدد قضبان الوقود دون ماصات مع ماصات Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> w/o=5%	306	317
خطوة خلية القضبان [mm]	12,75	12,75
القطر الخارجي لغلاف القضيب [mm]	9,10	9,10
القطر الداخلي لغلاف القضيب [mm]	7,73	7,72
مادة غلاف قضيب الوقود	Zr 9110	steel 06X18H10T
طول جزء الوقود ضمن القضيب [mm]	3700	3530
القطر الخارجي لكبسولة الوقود [mm]	7.6	7.57
قطر النقب الداخلي للكبسولة [mm]	1,2	1.4
<b>أنابيب التوجيه</b>		
عدد أنابيب التوجيه	18	12
مادة أنابيب التوجيه	Zr 9110	steel 06X18H10T
الكثافة [g/cm <sup>3</sup> ]	6.55	7.75
القطر الخارجي [mm]	12,6	12,6
القطر الداخلي [mm]	10,9	10,9
القطر الخارجي للأنبوبية المركزية [mm]	13,0	13,0
القطر الداخلي للأنبوبية المركزية [mm]	11,0	11,0
<b>مجموعات قضبان التحكم</b>		
عدد قضبان التحكم	18	18
المادة الماصة في قضيب التحكم	B4C + Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub> • TiO <sub>3</sub>	B4C
القطر الخارجي لغلاف قضيب التحكم [mm]	8,2	8,2
ثخانة الغلاف [mm]	0,6	0,6
مادة الغلاف	steel 06X18H10T	steel 06X18H10T
كثافة مادة الغلاف [g/cm <sup>3</sup> ]	7.75	7.75

## 2. المحاكاة الحاسوبية لجريان المبرد في قلب المفاعل VVER-1000.

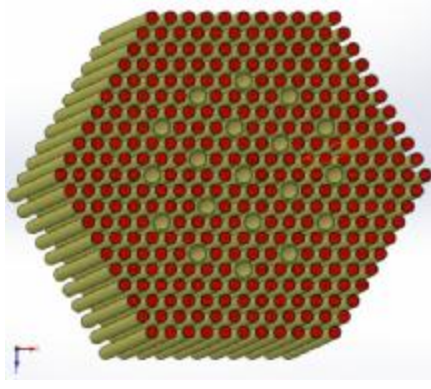
يُعدُّ المفاعل VVER1000 من المفاعلات اللامتجانسة (ذات القنوات) الذي يستخدم الماء المضغوط كمبرد ومهدئ وفق مبدأ دوران قسري، إذ يحمل المبرد الطاقة الحرارية المولدة في قضبان الوقود عن طريق تبريد غلاف هذه القضبان ويخرج من القلب دون تحول طوري نظراً إلى بقاء الدارة الأولية تحت ضغط وسطي يبلغ 15.7 Mpa ويفوق ضغط الإشباع [7][9]، ومن أهم نتائج الحساب الترموهيدروليكي للمفاعل التأكد من الحفاظ على هوامش الأمان ولاسيما هوامش حدوث أزمة غليان (DNB Departure of Nucleate Boiling) التي تشترط بقاء التدفق الحراري الأعظمي في القناة الحارة  $q_{max}$  أقل من قيمة التدفق الحراري الحرج  $q_{DNB}$ ، وبذلك نضمن عدم تطور نقاط الغليان الموضعي (الفقاعي) لتشكل طبقة فقاعية على جدران الغلاف (غليان غشائي). فضلاً عن بقاء الحرارة الأعظمية لقلب الوقود أقل بكثير من درجة حرارة الانصهار [7] [9].

نفذت الحسابات عبر المحاكاة الحاسوبية لجريان المبرد حول غلاف قضيب الوقود باستخدام كود CFD ضمن بيئة برنامج (Solid Works Flow Simulation)؛ وذلك من أجل حزمة وقود ذات حمل أعظمي ضمن شروط الحالة المستقرة عند الاستطاعة الاسمية للمفاعل إذ نفذت الحسابات وفق المراحل الآتية:

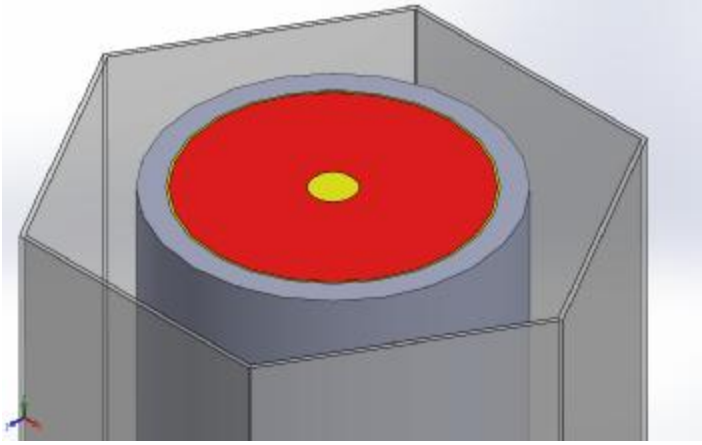
1. إعداد البنية المطلوبة ورسمها بحسب البيانات التصميمية للحزمتين TVS & TVSA<sup>+</sup>، إذ نفذ الرسم باستخدام برنامج Solid Works، كما هو موضح في الأشكال (3 و 4 و 5).



الشكل (4) حزمة وقود TVSA+



الشكل (3) حزمة وقود TVS



الشكل (5) مقطع في خلية وقود بين مكونات الخلية (الهليوم والوقود والغلاف ومجرى المبرد والجدار الافتراضي للخلية).

2. تصدير البنية إلى كود CFD إذ نفذت محاكاة الجريان حول غلاف قضيب الوقود عبر الخطوات الرئيسية الآتية:

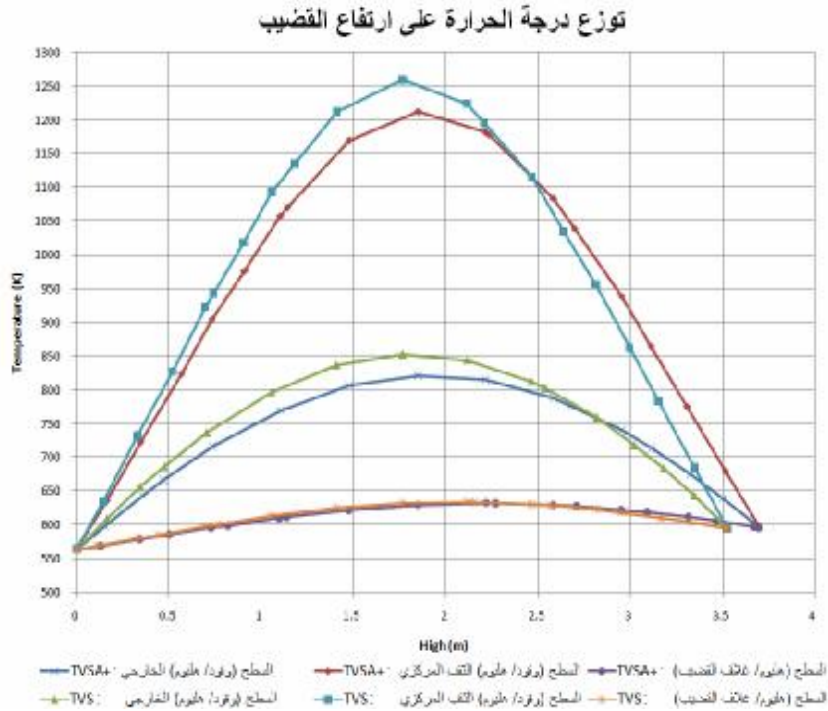
- تعريف جملة الواحدات المستخدمة SI
- تحديد نمط التحليل : جريان داخلي مع انتقال حرارة ضمن المواد الصلبة وأخذ حقل الجاذبية الأرضية بالحسبان.
- تحديد نوع وسيط التبريد ومجراه: ماء مضغوط ملامس لغلاف القضيب.
- تحديد الخصائص الأولية والشروط الحدية لمكونات الجملة: درجة حرارة دخول المبرد 563.15 k وضغطه 15.8MPa.
- تحديد نوع مواد مكونات الجملة : وذلك عبر استيراد هذه المواد من المكتبة الهندسية للكود بعد أن عُرِّفت بإدخال قيم الكثافة والحرارة النوعية والناقلية الحرارية كتتابع لدرجة الحرارة لكل مادة من مكونات القلب.
- تعريف الوقود كمصدر حراري عبر إدخال قيم توزع الاستطاعة المحورية التي تم الحصول عليها من الكود MCNP4C2 [2A].
- وُصِّفَت تَغْيِرَات درجة الحرارة لمكونات قضيب الوقود جميعها، فضلاً عن سرعة جريان الناقل الحراري والتدفق الحراري وتغْيِرَات ضغط الناقل الحراري على ارتفاع قضيب الوقود.



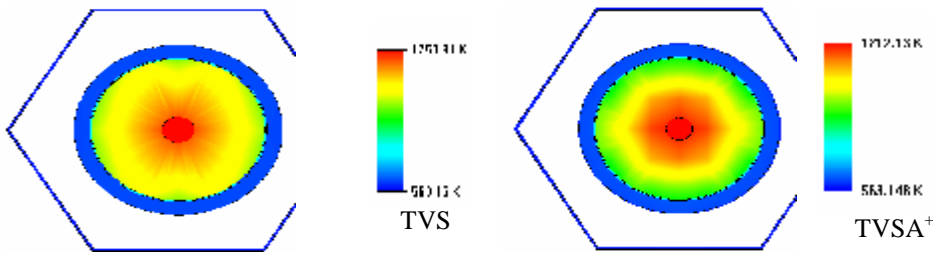
### 3. النتائج الحسابية:

سُجِّل عبر المحاكاة الحاسوبية تغيير المعاملات الترموهيدروليكية من أجل 22 خطوة عبر المقطع القطري للقضيب ونحو 2000 نقطة لكل خطوة عبر ارتفاع القضيب للمكونات الثابتة (وقود وهليوم وغلاف) ونحو 4000 نقطة لكل خطوة عبر ارتفاع القضيب من أجل الناقل الحراري، ويمكن إجمال النتائج وفق الأشكال (6)، (7)، (8)، و (9) للمكونات الثابتة، والأشكال (10)، (11)، (12)، (13)، و (14) من أجل الناقل الحراري (المبرد).

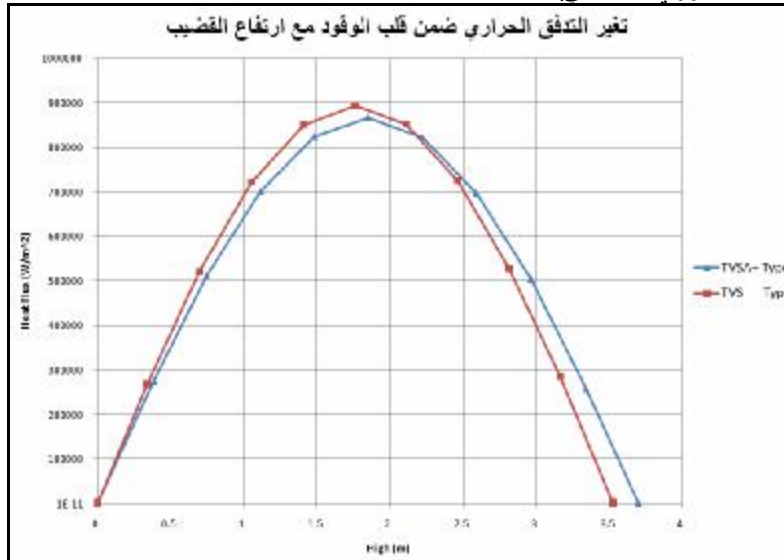
#### a) البنية الثابتة لقضيب الوقود (الوقود والهليوم والغلاف)



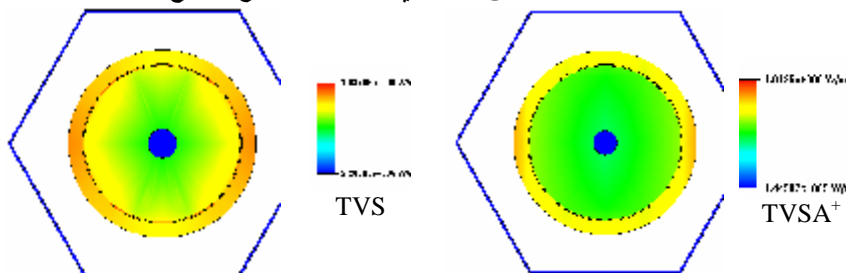
الشكل (6) مقارنة تغير درجة الحرارة لمكونات قضيب الوقود (وقود، هليوم، غلاف) بين الحزم التقليدية والمطورة.



الشكل (7) مقارنة توزيع درجة الحرارة على مقطع القضيب عند مركز قلب المفاعل (الحمل المحوري الأعظمي)



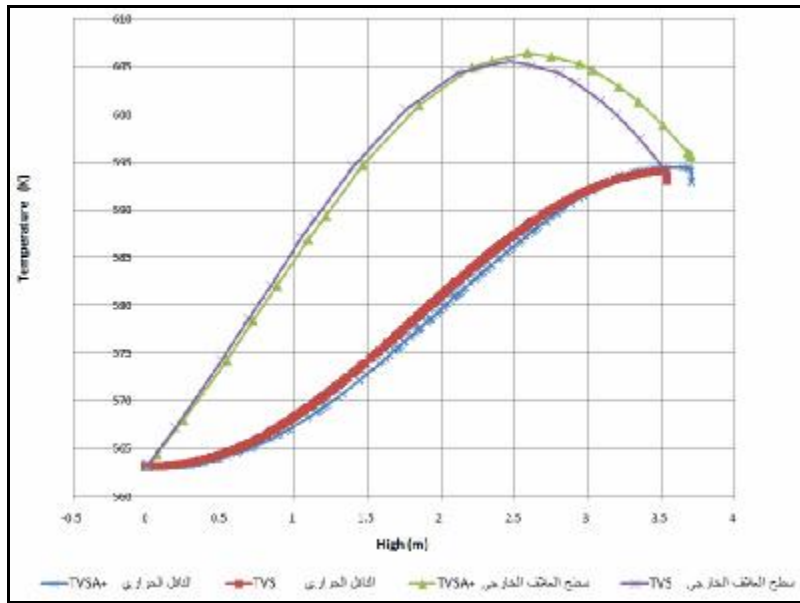
الشكل (8) مقارنة تغير التدفق الحراري لمادة الوقود مع ارتفاع القضيب



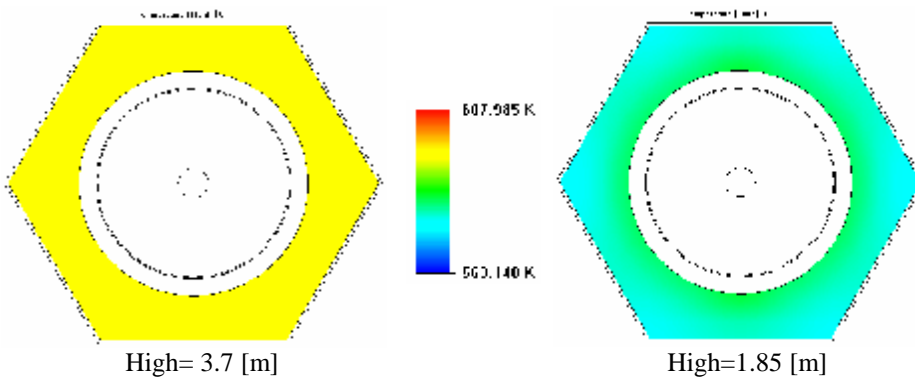
الشكل (9) مقارنة تغير التدفق الحراري عبر مقطع القضيب عند مركز قلب المفاعل (الحمل المحوري الأعظمي)

(b) الناقل الحراري (المبرد)

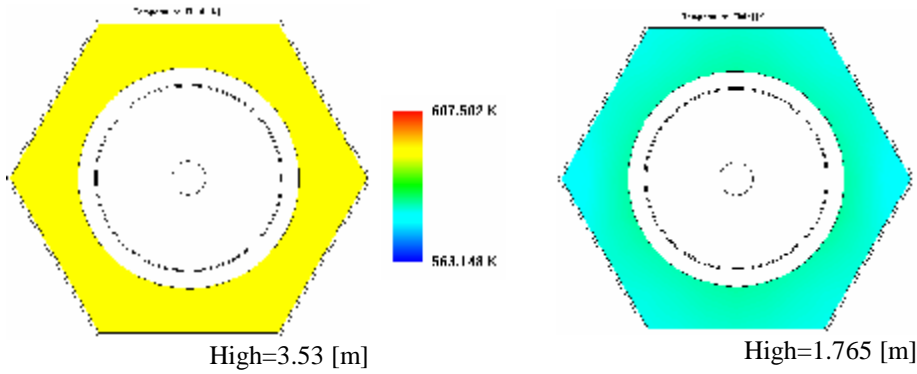
تغير درجة حرارة المبرد و سطح غلاف القضيب مع الارتفاع



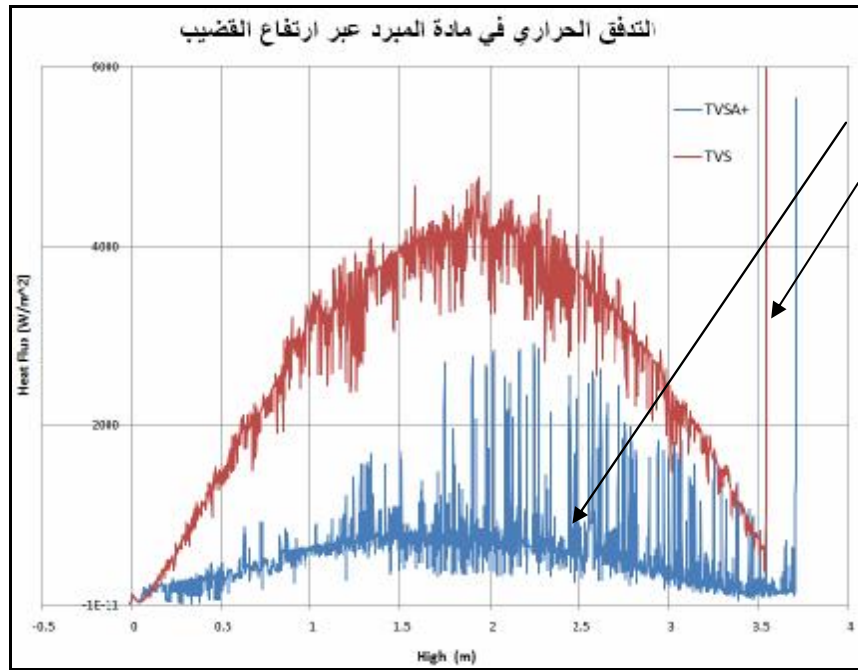
الشكل (10) مقارنة تغير درجة حرارة الناقل الحراري و سطح غلاف الوقود مع الارتفاع



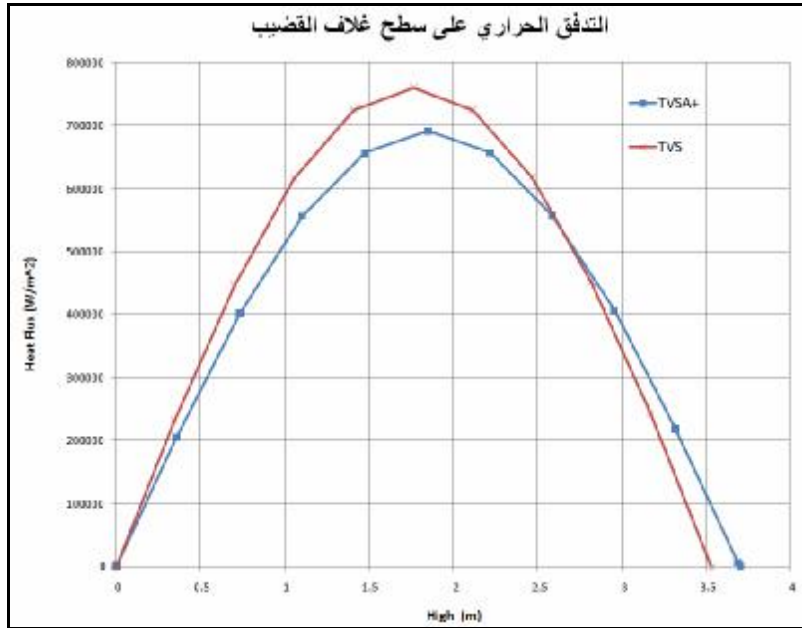
الشكل (11) توزيع درجة حرارة المبرد حول قضيب حزمة TVSA<sup>+</sup> عبر مقطعين لعبور الناقل بارتفاعين مختلفين



الشكل (12) توزيع درجة حرارة المبرد حول قضيب حزمة TVS عبر مقطعين لعبور الناقل بارتفاعين مختلفين



الشكل (13) مقارنة توزيع التدفق الحراري في مادة المبرد عبر ارتفاع القضيب لنوعي الحزمة TVS و TVSA<sup>+</sup>



الشكل (14) مقارنة توزيع التدفق الحراري على سطح غلاف القضيبي عبر الارتفاع لنوعي الحزمة + TVSA و TVS.

#### 4. مناقشة وتحليل النتائج:

عبر مقارنة قيم المميزات الترموهدروليكية لعملية تبريد قضيبي الوقود في نمطي الحزمة TVS (التقليدية) و TVSA<sup>+</sup> (المطورة)، وذلك من أجل حزمة ذات حمل أعظمي عند الاستطاعة الاسمية للمفاعل في الحالة المستقرة يمكن استنتاج ما يأتي:

1. عبر مقارنة تغير درجة حرارة قلب الوقود في الحالتين الشكلان (6 و 7) ومخطط توزيع التدفق الحراري في البنية الإنشائية للوقود الشكلان (8 و 9) نلاحظ أن تسخين قلب الوقود من أجل الوصول إلى الاستطاعة الاسمية للمفاعل هو أقل في الحزم المطورة بنسبة 4.4% ودرجة حرارة قلب الوقود الأعظمية في الحزم المطورة أقل منها في الحزم التقليدية بنسبة 3.9%، وهذا يكسبها خصائص إيجابية من حيث زيادة هامش الأمان في الابتعاد عند درجة حرارة انصهار الوقود ويحسن من المميزات الإنشائية للوقود إذ إن خصائص الاستقرار والمقاومة الميكانيكية للوقود تتناقص مع ارتفاع درجة الحرارة. كما أن انخفاض قيمة التدفق الحراري في قلب وقود الحزم المطورة يدل على انخفاض الكثافة العددية لتفاعلات الانشطار اللازمة لتوليد مستوى الاستطاعة نفسه، ويمكن تفسير ذلك بأن زيادة الطول التصميمي لحزمة الوقود المطورة بحدود 4.22% يتيح إمكانية الوصول إلى

درجة حرارة خروج الناقل الحراري نفسها من القلب مع معدل تسخين أقل للناقل. وتشير إمكانية خفض الكثافة العددية لتفاعلات الانشطار داخل الحزم، إلى إمكانية استخدام هذا النمط من الحزم في مخططات تحميل وقود ذات طول شوط أكبر إذ إن استنزاف المادة الانشطارية فيها أقل.

2. عبر مقارنة خصائص انتقال الحرارة في غلاف قضيب الوقود في الحالتين (الشكلان 6 و 10) الذي يتكون من خليطة زركونيوم (Zr 9110) في الحزم المطورة وخليطة ستيل (steel 06X18H10T) في الحزم التقليدية، وبسبب أن الناقلية الحرارية لخليطة الزركونيوم أكثر استقراراً مع ارتفاع درجة الحرارة منها للستيل في مجال درجات حرارة غلاف قضبان الوقود (610 K - 563 K)، فإن معدل تسخين الناقل الحراري (المبرد) يكون أكثر انسياباً في الحزم المطورة. يُضاف إلى هذا الخصائص النيترونية المهمة لخليطة الزركونيوم التي تساعد على موازنة الطيف النيتروني وتجانس استحقاق الوقود داخل القلب.

3. وبمقارنة درجة حرارة المبرد (الشكل 10) نلاحظ شبه تطابق في درجة حرارة خروج الناقل الحراري من القلب، أي إنه حُمّل المبرد الحمل الحراري نفسه في الحالتين مما يعكس الفرضية التي تم الانطلاق منها وهي مقارنة خصائص الحزمتين عند تشغيلهما ضمن شروط عمل الدارة الأولية لمحطة مفاعل VVER1000 التقليدية وعند مستوى الاستطاعة الاسمية للمفاعل في الحالة المستقرة، ويمكن الإشارة في الشكل (10) إلى أن معدل تسخين الناقل الحراري في الحزمة TVSA<sup>+</sup> كان أكثر انسياباً منه للحزمة TVS؛ مما يزيد هامش أمان عدم حدوث غليان موضعي فجائي للناقل، ويمكن تفسير ذلك بشكل واضح من خلال الشكلين (13 و 14) إذ قورن في الشكل (13) التدفق الحراري في مادة المبرد الذي يشير إلى تجانس أكبر في عملية تسخين الناقل الحراري من أجل حزم الوقود المطورة TVSA<sup>+</sup>، إذ إن قيمة الطاقة الحرارية المنقولة إلى المبرد لم تتغير بشكل كبير على كامل ارتفاع قضيب الوقود مقارنة بالحزمة التقليدية TVS التي يبين الشكل (13) وجود ذروة واضحة عند منتصف ارتفاع القضيب لقيمة الطاقة المنقولة إلى المبرد. وبيّن الشكل وجود هامش أمان واضح للفرق في قيمة التدفق الحراري للحالتين لأنّ القيم جميعها من أجل الحزم المطورة كانت أقل من مقابلاتها في الحزم التقليدية. أمّا الشكل (14) الذي يقارن بين قيم التدفق الحراري على سطح الغلاف في الحالتين فيشير إلى أن قيمة التدفق الحراري الأعظمي على سطح الغلاف في الحزمة TVSA<sup>+</sup> يقارب  $69.18 \text{ W/cm}^2$  وفي الحزمة TVS يقارب  $76.08 \text{ W/cm}^2$ ، وهذا يزيد من قيمة هامش الأمان لحدوث أزمة غليان DNB. فإذا قمنا بتعريف معدل هامش الأمان بالنسبة:

$$R_{DNB} = \frac{q_{DNB} - q_{Max}}{Q_{DNB}}$$

إذ:  $q_{DNB}$  تعتمد على خصائص الناقل، وهي ثابتة في الحالتين، وعرّفنا  $R_{DNB1}$  بأنه معدل هامش الأمان من أجل الحزم التقليدية و  $R_{DNB2}$  معدل هامش الأمان لأزمة الغليان في الحزم المطورة فإن  $R_{DNB2}$  سيعطى بالعلاقة:

$$R_{DNB2} = \frac{1 - q_{Max2}}{q_{DNB1}} \times (1 - R_{DNB1})$$

ونظراً إلى أن  $q_{max2}$  أصغر من  $q_{max1}$  وقيم  $R_{DNB}$  تراوح بين  $0 < R_{DNB} < 1$  فإن  $R_{DNB2}$  سيكون دوماً أكبر من  $R_{DNB1}$ ، وهذا يفسر زيادة هامش أمان حدوث أزمة غليان في الحزم المطورة.

4. من خلال النتائج السابقة فإن هذه الدراسة تمكن من فهم آلية نقل الطاقة الحرارية من داخل قضيب الوقود إلى الناقل الحراري (المبرد) عبر مكونات قضيب الوقود جميعها وتوضح أثر كل من هذه المكونات في نقل الطاقة الحرارية عند الحالة التشغيلية الحقيقية، إذ تصبح خصائص هذه المكونات متغيرة تبعاً لدرجة حرارتها. وتعود أهمية هذه الدراسة إلى أن فهم هذه المتغيرات ومعرفتها تعدّ أحد الشروط الرئيسة للباحث في عمليات إدارة الوقود في قلب المفاعل In Core Fuel Management ولاسيما عند محاولة تصميم أنماط جديدة لنماذج تحميل الوقود واقتراحها.

### 5. الخلاصة

وُصِّتْ وقُورنَتْ في هذه الدراسة الخصائص الترموهيدروليكية لعملية تبريد قضيب الوقود في كل من نمطي حزم الوقود TVS (حزمة الوقود التقليدية) و  $TVSA^+$  (حزمة الوقود المطورة)، وقد بيّنت النتائج أن المعاملات التشغيلية الأساسية في الحزمة المطورة مثل (درجة حرارة قلب الوقود وقيم التدفق الحراري في الوقود وسطح الغلاف) كانت أقل من مثيلاتها في الحزمة التقليدية، وهذا يسمح باقتراح إمكانية استخدام هذه الحزم في تطوير دورات وقود المفاعلات العاملة حالياً (أي ضمن القلب التقليدي للمفاعل VVER1000) وفق مخططات تحميل الوقود المطورة ضمن الشروط الاعتيادية لعمل الدارة الأولية لمحطة المفاعل VVER1000 دون تجاوز أي من هوامش الأمان أو حدود التشغيل، ويسمح ذلك بالإفادة من خصائص هذه الحزم في تحسين الطيف النيتروني وتجانسه في قلب المفاعل، وإمكانية زيادة طول شوط تشغيل المفاعل وزيادة عمق الاستحراق النهائي للوقود.

## المراجع REFERENCES

- [1A] أبو فاعور، حسن، بيطار، همام. (2007). "التصميم النتروفيزيائي التشغيلي لمفاعل طاقة حراري VVER-1000"، جامعة حلب، مشروع تخرج.
- [2A] أبو فاعور، حسن. (2012). "تأثير طرق تحميل الوقود واستخدام المواد المستخرقة على تغيرات الطيف النيتروني والزمن التشغيلي للمفاعل VVER-1000"، جامعة دمشق. أطروحة ماجستير.
- [1]. 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.
- [2]. Lotsch, T., Khalimonchuk, V., Kuchin. A. (2009). "PROPOSAL OF A BENCHMARK FOR CORE BURNUP CALCULATIONS FOR A VVER-1000 REACTOR CORE", 19th AER symposium, BMU SR 2511 and BMU R0801504 (SR2611).
- [3]. Lotsch, T., Khalimonchuk, V., Kuchin. A. (2010). "Corrections And Additions To The Proposal Of A Benchmark For Core Burnup Calculations For A Vver-1000 Reactor", 20th AER symposium, BMU SR 2511 and BMU R0801504 (SR2611).
- [4]. Lotsch, T., Khalimonchuk, V., Kuchin. A. (2011). "Solutions for the task 1 and task 2 of the benchmark for core burnup calculations for a vver-1000 reactor", 21th AER symposium, BMU SR 2511, R0801504 (SR2611) and 3611R01504-866100/09.
- [5]. Enin, A., Bezborodov, Y., Pluzhnikov. D. (2009). "Improvement of VVER-1000 FA design and manufacturing techniques. The basic results of operation VVER-1000 FA made by jsc «NCCP»" 8-th international conference, Bulgaria, 27.09 – 04.10
- [6]. Lunin, G., Novikov, A., Pavlov, V., Pavlovichev, A. (2000). "Development of four-year fuel cycle based on the advanced fuel assembly with uranium-gadolinium fuel and its implementation to the operating wer-1000 units", Russian Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow, Russia, SK01ST079.
- [7]. Ivanov, B., Ivanov. K. (2002). "VVER-1000 Coolant Transient Benchmark", INRNE, Academy of Sciences, Bulgaria, NEA/NSC/DOC6
- [8]. Alyushin, V. M., Baranov, V. G., Kudryashov, N. A., Khlunov. A. V. (2010). "Numerical Modeling Of The Temperature Distribution In A VVER Fuel Element", Atomic Energy, Vol. 108, No. 3, UDC 621.039.51
- [9]. Duderstadt J. J., Hamilton, L. J., (1976). "Nuclear Reactor Analysis", Department of Nuclear Engineering, The University of Michigan, DUD 621.4832.