

التحليل الهيدروحراري لقلب مفاعل الأبحاث في مركز البحوث النووية بتاجوراء

حسن محمد علي أبو حافة

المعهد العالي لشؤون المياه ، المجيلات- ليبيا
E-mail: hassan.abuhaffa@yahoo.com

ABSTRACT

Calculations and analysis are performed for the low-enriched uranium core (UO₂-Al of 19.7 % U²³⁵) for the steady state operation of the reactor at Tajoura Nuclear Research Center (TNRC) with maximum power of 10 MW. A model established for this analysis is used to simulate the steady-state reactor operation. The hottest fuel-assembly is considered in these analyses, the important safety related parameters are calculated and the results are compared with the results obtained from Argonne National Laboratory (ANL) and that from staff at TNRC. The comparison showed good agreements for reactor steady-state operation.

الملخص

تم في هذه الورقة إجراء الحسابات الهيدروحرارية لقلب مفاعل الأبحاث النووية بمركز البحوث النووية بتاجوراء والذي يستخدم حاليا يورانيوم منخفض التخصيب (UO₂ Al of 19.7% U²³⁵) وذلك عند تشغيله في حالة الاستقرار وبقدرة قصوى 10 ميغا وات. النموذج المؤسس لهذا التحليل يحاكي تشغيل المفاعل في حالة الاستقرار حيث أجريت الحسابات على أسخن مجموعة وقود في قلب المفاعل. أهم القيم المتعلقة بأمان المفاعل تم حسابها والنتائج قورنت بالنتائج المتحصل عليها من معمل ارجون الوطني (ANL) والمتحصل عليها من مركز البحوث النووية (TNRC) بتاجوراء حيث أظهرت هذه المقارنة اتفاق جيد في حالة التشغيل المستقر.

الكلمات المفتاحية: التحليل الهيدروحراري؛ يورانيوم منخفض التخصيب؛ مفاعل غاطس؛
.PLTEM Code; PARET Code

مقدمة

يعمل مفاعل تاجوراء (من نوعية المفاعل الغاطس pool type reactor) بقدرة قصوى 10 ميغاوات، ونظرا لان قضبان الوقود لقلب المفاعل معقدة من حيث الشكل عليه تم إجراء تطوير على البرامج المتوفرة مثل (PLTEM code, PARET code) والتي تستخدم للحسابات الحرارية. لذلك فقد تم بناء برنامج حاسوب خاص بهذا الوقود لمفاعل تاجوراء لدراسة الحسابات الحرارية لمرحلة التشغيل المستقر، بينما تم اخذ الحسابات النيوترونية من الدراسة التي قام بها معمل أرجون الوطني بأمريكا (ANL) ومن الدراسة التي قام بها مركز البحوث النووية (TNRC) بتاجوراء.

وصف قلب المفاعل وقضبان الوقود

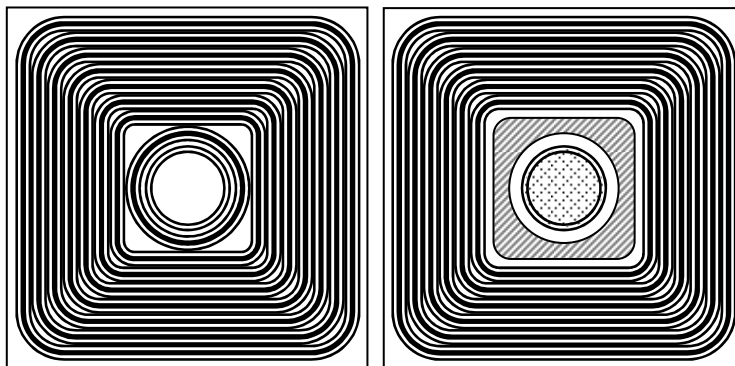
يستخدم قلب المفاعل تجميعات (Assembly) وقود نوع IRT-4M التي تحتوى على يورانيوم منخفض التخصيب (LEU) 19.7 % ويتكون قلب المفاعل من 16 تجميعة وقود؛ 10 من ذوات

6-أنابيب و 6 من ذوات 8-أنابيب محاطة بعاكس من البيريليوم [1]. الجدول (1) يوضح ترتيب التجميعات لقلب المفاعل، وشكل (1) عبارة عن قطاع عرضي لتجميعات الوقود.

الجدول 1: ترتيب التجميعات لقلب المفاعل 1

6	5	4	3	2	1
	∅	A3-1	∅	∅	2
	Kc-7	Kc-5	Kc-3	Kc-1	3
	Kc-8	Kc-6	Kc-4	Kc-2	4
	∅	∅	A3-2	∅	5
●					6

● Be block with Automatic Power Regulating rod
 ■ removable beryllium A3 6-tube IRT-4M type FA with safety rod (A3)
 ∅ 8-tube IRT-4M type FA Kc 6-tube IRT-4M type FA with shim rod (kc)



أ - من ذوات 6- أنابيب ب - من ذوات 8- أنابيب

شكل 1: قطاع عرضي لتجميعات الوقود IRT-4M

تتكون تجميعات الوقود نوع IRT-4M من ذوات 8-أنابيب كما بالشكل (1ب) من أنبوية إحلال مركزية (Central displacement tube) وقضيب وقود واحد اسطواني الشكل (One cylindrical) وسبعة قضبان وقود مربعة الشكل (Seven square shape fuel elements). ومادة الوقود هي كشطيرة محاطة بمغلف من ألومنيوم نوع SAV-1alloy ، الأبعاد الخاصة بقضبان الوقود من ذوات 8-أنابيب مبتدئا من قضيب الوقود الداخلي موضحة بالجدول (2). أبعاد تجميعات الوقود وبعض القيم الأخرى معطاة بالجدول (3).

جدول 2: أبعاد قضبان الوقود ذوات 8-أنابيب

Fuel no.	shape	Size (mm)		Corner radius (mm)	
		Out	in	out	In
1	ring	21.3	18.1		
2	square	28.2	25	4.5	2.9
3	square	35.1	31.9	5.3	3.7
4	square	42	38.8	6.1	4.5
5	square	48.9	45.7	6.9	5.3
6	square	55.8	52.6	7.7	6.1
7	square	62.7	59.5	8.5	6.9
8	square	69.6	66.4	9.3	7.7

جدول 3: أبعاد تجميعات الوقود [1]

Parameter	LEU(new)
Fuel assembly design	IRT-4M
U-235 Enrichment, wt%	19.7
Fuel meat material	UO ₂ -AL
Fuel assemblies pitch, mm	71.5
Number of fuel tubes in assembly	6/8
Number of assemblies in the core	10/6
U-235 Loading per assembly, g	265/300
Dispersant density, g/cc	9.8
Uranium density in meat, gU/cc	2.77
Dispersant volume fraction, %	32.1
Uranium weight fraction, %	88.1
Meat/clad / element thickness, mm	0.7/0.45/1.6
Coolant channel thickness, mm	1.85
Meat length, mm	600
Assembly fuel meat volume, cc	483/551

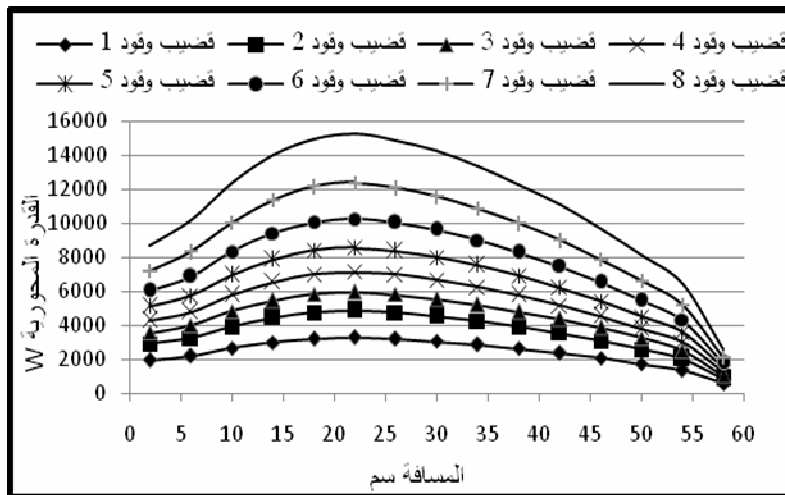
التحليل الهيدروحرارى لأسخن خلية خلال التشغيل المستقر

حسب الدراسات النيوترونيوتان التي قام بإحداها مركز البحوث النووية بتاجوراء (TNRC) [2] والأخرى معمل أرجون الوطني (ANL) [3]، أسخن خلية هي خلية الوقود ذات 8-أنابيب موجودة بالموضع 2-2 كما بالجدول (4).

جدول 4: توزيع كثافة القدرة المتوسطة في القلب (وات / سم³) [2]

	2	3	4	5
2	2.65678E02	2.62113E02	2.18249E02	2.56613E02
3	1.85703E02	1.60659E02	1.58969E02	1.79142E02
4	1.80906E02	1.54865E02	1.54087E02	1.711398E02
5	2.485015E02	2.07004E02	2.37922E02	2.18586E02

يوضح شكل (2) القدرة المحورية في كل قضيب وقود لخلية الوقود ذات 8-أنابيب حسب دراسة معمل أرجون الوطني بعد أن تمت معالجة البيانات لكل قضيب وقود بالكامل.



شكل 2: القدرة المحورية في كل قضيب وقود لأسخن خلية حسب ANL

تم حساب القطر الهيدروليكي ومساحة السريان والمحيط المبطل لكل قنوات التبريد المتكونة منها أسخن خلية وقود وكذلك عرض وحجم الوقود.

توليد الحرارة داخل تجمعات الوقود خلال حالة الاستقرار
كثافة القدرة للقلب (power density) وكثافة القدرة المحورية (axial power density) للخلية الساخنة متوفرة من الحسابات النيترونية، ومعدل التوليد الحراري لأسخن خلية وكذلك معدل توليد الحرارة في قطاع Z تحسب كالآتي:

$$q_{cell} = PP_r \quad (1)$$

$$q_{cell_j} = q_{cell} P_{rz_j} \quad (2)$$

حيث P مستوى قدرة المفاعل ميغاوات، P_r القدرة النسبية لأسخن خلية و P_{rz_j} القدرة النسبية في اتجاه Z لأسخن خلية في القطاع J

q_{cell} معدل توليد الحرارة لأسخن خلية ميغاوات، q_{cell_j} معدل توليد الحرارة في قطاع J ومعدل توليد الحرارة H_{GR} لكل قضيب وقود للخلية يعتمد على حجم قضيب الوقود ويعطى كالتالي:

$$H_{GR_i}^j = q_{cell_j} v_{f_i} / V \quad i = 1, M - 1, j = 1, N \quad (3)$$

حيث v_{f_i} حجم الوقود (m^3) للقضيب i^{th} ، V حجم الوقود (m^3) الكلي للخلية، M عدد قنوات المبرد و N عدد الأجزاء (القطع)

كثافة القدرة لقضيب الوقود i^{th} في قطاع J عند الجزء الاسطوانى تحسب كالتالي:

$$q_{v_i}^{j} = \frac{H_{GR_i}^j}{\Delta z_j \pi ((r_3)^2 - (r_2)^2)} \quad (4)$$

حيث r_2 نصف القطر الداخلي لقضيب الوقود الاول مع المغلف، r_3 نصف القطر الخارجي لقضيب الوقود الأول مع المغلف

كثافة القدرة لقضيب الوقود i^{th} في قطاع J عند الجزء الصفيحي تحسب كالتالي.

$$q_{v_i}^{j} = \frac{H_{GR_i}^j}{(\Delta z_j t_f d_i)} \quad i = 2, 3, \dots, M - 1 \quad (5)$$

حيث t_f سمك الوقود، d_i عرض الوقود i^{th}

معدل التدفق الكتلي لكل قناة تبريد

يتم حساب معدل التدفق الكتلي لكل قناة تبريد باستخدام المعادلة

$$w_i^j = u_i \rho_i^j A_i \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (6)$$

حيث A مساحة التدفق لقناة المبرد m^2 و u سرعة المبرد m/s و ρ كثافة المبرد $كجم / م^3$.

التحليل الهيدروحراري

بداية بحساب درجة حرارة المبرد عبر قنوات التبريد، يتم حساب درجة حرارة المغلف ودرجة الحرارة للوقود باستعمال طريقة التقنية العكسية، حيث الحرارة التي تتولد داخل الوقود يتم إزالتها بواسطة التبريد من جانبي قضيب الوقود.

لحساب درجة حرارة المبرد عند الموضع Z عند مروره إلى أسفل عبر قنوات التبريد، وحساب درجة حرارة المغلف السطحية، تستخدم المعادلات التالية:

$$Q_z = h_z A_z (T_c - T_z) \quad (7)$$

$$T_z - T_{z-\Delta z} = \frac{Q_z}{wc_p} \quad (8)$$

حيث Q_z الحرارة المزالة بواسطة المبرد عند الموضع Z (W), T_z درجة حرارة المبرد عند الموضع Z , $T_{z-\Delta z}$ درجة حرارة المبرد عند الموضع $Z-\Delta z$, h_z معامل انتقال الحرارة بالحمل عند الموضع Z (W/m^2K), c_p السعة الحرارية للمبرد عند الموضع Z ($J/kg.K$).

الحسابات العددية (NUMERICAL CALCULATION)

تم تقسيم قناة التبريد إلى أجزاء بطول ΔZ معدل التدفق الحراري dq للمبرد عبر ΔZ تعطى كالتالي:

$$dq(z) = wc_p dT \quad (9)$$

حيث W معدل التدفق الكتلي للمبرد كجم / ث
معدل توليد الحرارة الحجمي لقضيب الوقود الأول

$$q_1''' = \frac{H_{GR_1}^j}{\Delta z_j \pi ((r_3)^2 - (r_2)^2)} \quad (10)$$

معدل توليد الحرارة الحجمي لقضبان الوقود الأخرى

$$q_i''' = \frac{H_{GR_i}^j}{(\Delta z_j t_f d_i)} \quad i = 2,3,\dots, M-1 \quad (11)$$

حيث q''' معدل توليد الحرارة لكل وحدة حجم لـ i^{th} قضيب وقود.

قضيب الوقود يبرد من الجانبين، لذا التدفق الحراري يقسم إلى اتجاهين يمين ويسار. ومقدار التدفق الحراري في كل اتجاه يعتمد على موقع أقصى درجة حرارة، وعليه يحتاج هذا إلى طريقة المحاولة والخطأ لتعيين موضع أقصى درجة حرارة داخل الوقود وسيتم أخذ موضع أقصى درجة حرارة بالمنتصف كتخمين أولي حسب المعادلتين (12) و (13) كالتالي:

موضع درجة الحرارة القصوى لقضيب الوقود ذو الشكل الاسطواني

$$r_{\max}^j = r_1 + t_c + \frac{t_f}{2} \quad (12)$$

موضع درجة الحرارة القصوى لقضبان الوقود ذو الشكل الصفيحي

$$x_{\max i}^j = t_c + \frac{t_f}{2} \quad i = 2,3,\dots, M-1 \quad (13)$$

ويتم حساب درجة حرارة المبرد الخارجة من المعادلات التالية:

$$T_1^{j+1} = T_1^j + q_1^{mj} \left(r_{\max}^j - r_2^j \right) \frac{\Delta Z_j \pi}{w_1^j c_{p1}^j} \quad (14)$$

$$T_2^{j+1} = T_2^j + \frac{[q_1^{mj} (r_3^j - r_{\max}^j) \pi + q_2^{mj} (x_{\max i}^j - t_c) d_i] \Delta Z_j}{w_2^j c_{p2}^j} \quad (15)$$

$$T_{i+1}^{j+1} = T_{i+1}^j + \frac{[q_i^{mj} (t_f - x_{\max i}^j - t_c) d_i + q_{i+1}^{mj} (x_{\max i+1}^j - t_c) d_{i+1}] \Delta Z_j}{w_{i+1}^j c_{pi+1}^j} \quad (16)$$

$$T_9^{j+1} = T_9^j + q_8^{mj} \frac{(t_f - x_{\max 8}^j) d_8 \Delta Z_j}{w_9^j c_{p9}^j} \quad (17)$$

عدد نسلت تم حسابه من المعادلة (18) كالتالي [4]:

$$Nu_{i,j} = 0.027 Re_{i,j}^{0.8} Pr_{i,j}^{1/3} \left(\frac{\mu_{i,j}}{\mu_{w i,j}} \right)^{0.14} \quad (18)$$

الموضع الجديد لدرجة حرارة الوقود القصوى تحسب من المعادلات التالية:

$$r_{\max}^j = \sqrt{\left(\frac{2c_3 k_f}{q_1^j} \right)} \quad \text{و} \quad x_{\max 2}^j = \frac{c_9 k_f}{q_2^j} \quad \text{و} \quad x_{\max 3}^j = \frac{c_{15} k_f}{q_3^j}$$

وهكذا إلى غاية $x_{\max 8,j}$.

حيث Re رقم رينولدز و Pr رقم براندل و μ اللزوجة الديناميكية و k_f الموصلية الحرارية للوقود و C ثابت و r_{\max} موضع درجة حرارة الوقود القصوى للوقود الاسطوانى و x_{\max} موضع درجة حرارة الوقود القصوى للوقود الصفيحي.

طريقة المحاولة والخطأ تستمر حتى القيمة المطلقة (x_{\max} الجديدة - x_{\max} القديمة) ≥ 0.001 ثم تحسب درجة الحرارة النهائية للمائع. وطريقة الحذف لجاوس [5] تستعمل لحل المعادلات الآنية الـ 48 لإيجاد قيمة الثوابت C.

درجة الحرارة السطحية للمغلف ودرجة الحرارة البيئية (المغلف و الوقود) تحسب من طريقة الحذف لجاوس كالتالي.

درجة الحرارة السطحية للمغلف

-1 للاسطوانة

$$Tc_{R_1}^j = c_1^j \ln(r_1) + c_2^j \quad (19)$$

$$Tc_{L_1}^j = c_5^j \ln(r_4) + c_6^j \quad (20)$$

-2 الصفیحة

$$Tc_{R_i}^j = c_k^j \quad i = 2,3,\dots, 8, \quad k = 8 \quad (21)$$

$$Tc_{L_i}^j = c_{k+3}^j (t_f + t_c) + c_{k+4}^j \quad (22)$$

درجة حرارة المغلف - الوقود البنیة

-1 للاسطوانة

$$Ts_{R_1}^{j+1} = c_1^j \ln(r_2) + c_2^j \quad (23)$$

$$Ts_{L_1}^{j+1} = c_5^j \ln(r_3) + c_6^j \quad (24)$$

-2 الصفیحة

$$Ts_{R_i}^{j+1} = c_{k-1}^j t_c + c_k^j \quad (25)$$

$$Ts_{R_{L_i}}^{j+1} = c_{k+3}^j (t_f + 2t_c) + c_{k+4}^j \quad (26)$$

درجة حرارة الوقود

-1 الاسطوانة

$$Tm_i^{j+1} = Ts_{R_1}^{j+1} + \frac{(q_i^j + q_i^{j+1}) \left((r_{\max}^{j+1})^2 - r_2^2 \right)}{4k_f} \ln(r_{\max} / r_2) \quad (27)$$

-2 الصفیحة

$$Tm_i^{j+1} = Ts_{R_i}^{j+1} + \frac{(q_i^j + q_i^{j+1}) (x_{\max_i}^{j+1} - t_c)}{4k_f} \quad i = 2,3,\dots, 8 \quad (28)$$

برنامج الحاسوب لتحليل حالة الاستقرار

تم بناء برنامج الحاسوب للتشغيل في حالة الاستقرار لحساب القيم المتعلقة بأمان قلب مفاعل تاجوراء.

ملخص البرنامج

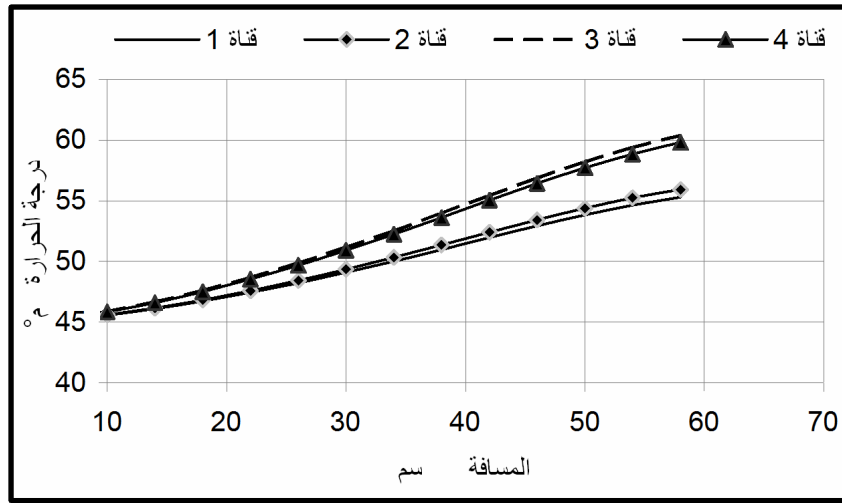
- 1- الجزء الأول: قراءة بيانات الإدخال من ملف البيانات
- 2- الجزء الثاني: حساب معدل توليد الحرارة الحجمي ومعدل التدفق الكتلي
- 3- استدعاء البرامج الفرعية ARR , $THTH$, $TSURF$ و $FTEMP$.
- البرنامج الفرعي ARR ينظم المعادلات 48 على شكل مصفوفة وحلها بطريقة الحذف لجاوس لإيجاد الثوابت 48 الغير معلومة.
- البرنامج الفرعي $THAT$ والبرنامج الفرعي $TSURF$ تستخدم لإيجاد خواص الديناميكا الحرارية للماء (الكثافة، اللزوجة، الموصلية الحرارية).
- البرنامج الفرعي $FTEMP$ لحساب درجة حرارة المائع.
- 4- الجزء الرابع: حساب كل من معامل انتقال الحرارة بالحمل، الضغط، الفيض الحراري، درجة الحرارة المركزية للوقود.
- 5- الجزء الخامس: البرنامج يكتب كل القيم المحسوبة في ملفات.

النتائج

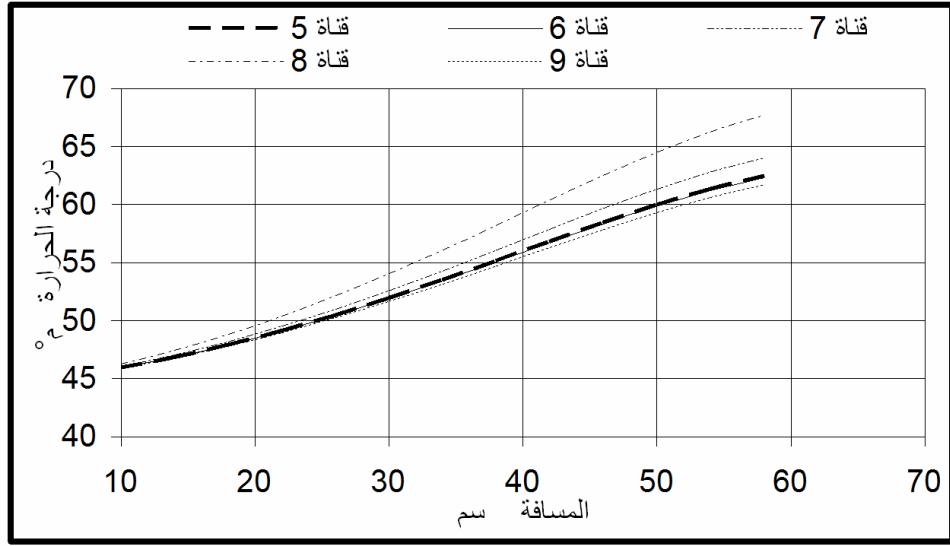
النتائج تتضمن كل من درجة حرارة المائع، درجة حرارة المغلف، درجة حرارة الوقود.

درجة حرارة المائع

حسب الحسابات النيوترونية بواسطة (ANL) يوضح شكل (أ3) توزيع درجات الحرارة خلال قنوات التبريد من 1-4 بينما يوضح شكل (ب3) توزيع درجات الحرارة خلال قنوات التبريد من 5-9. حيث أعلى درجة حرارة وجدت في القناة رقم 8 وهي 67.7 م°، بينما وجدت أقل درجة حرارة في القناة رقم 1 وهي 55.3 م°. ولكن حسب الحسابات النيوترونية التي قام بها TNRC، فإن أعلى درجة حرارة وجدت في القناة رقم 8 وهي 65 م°، بينما وجدت أقل درجة حرارة في القناة رقم 1 وهي 55 م°.



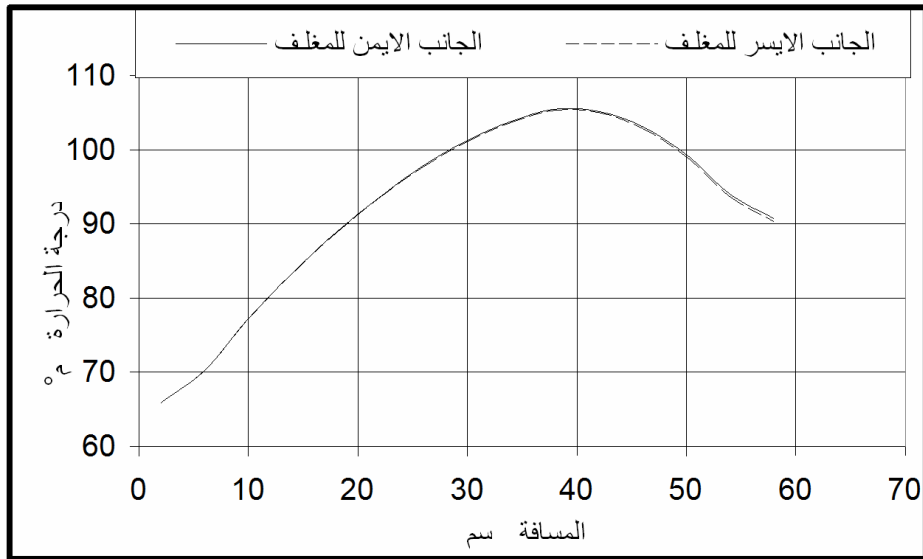
شكل 13: توزيع درجات الحرارة لقنوات التبريد من 1-4



شكل 3ب: توزيع درجات الحرارة لقنوات التبريد من 5-9

درجة الحرارة السطحية للمغلف

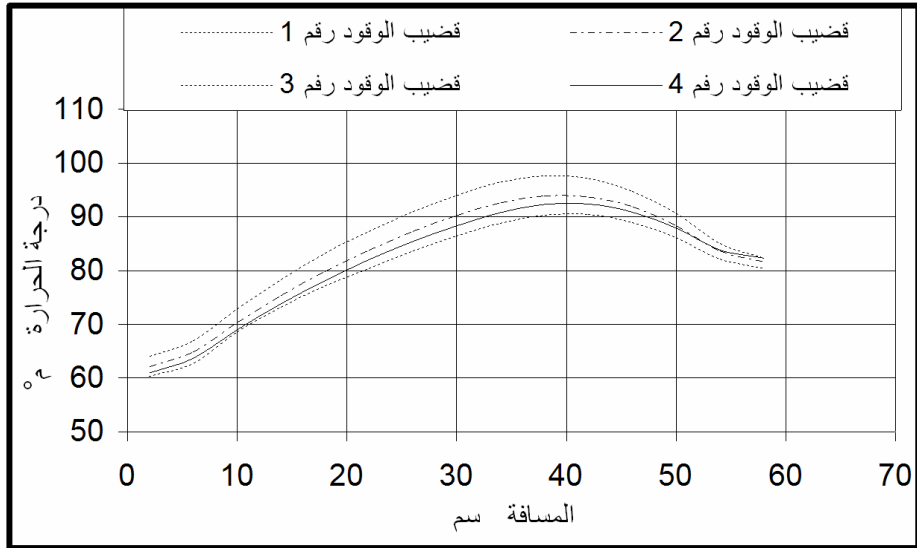
حسب الحسابات النيوترونية بواسطة (ANL) يوضح شكل (4) درجة الحرارة السطحية للمغلف لجانبي القضيب رقم 8 من عناصر الوقود لأسخن خلية حيث وجدت أعلى درجة حرارة وهي 105.5 م°، وجدت بعد المنتصف للجانب المتصل بالقناة رقم 8. ولكن حسب الحسابات النيوترونية لمفاعل تاجوراء، فإن أعلى درجة حرارة وجدت على مغلف قضيب الوقود رقم 8 وهي 103.7 م° للجانب المتصل بالقناة رقم 8.



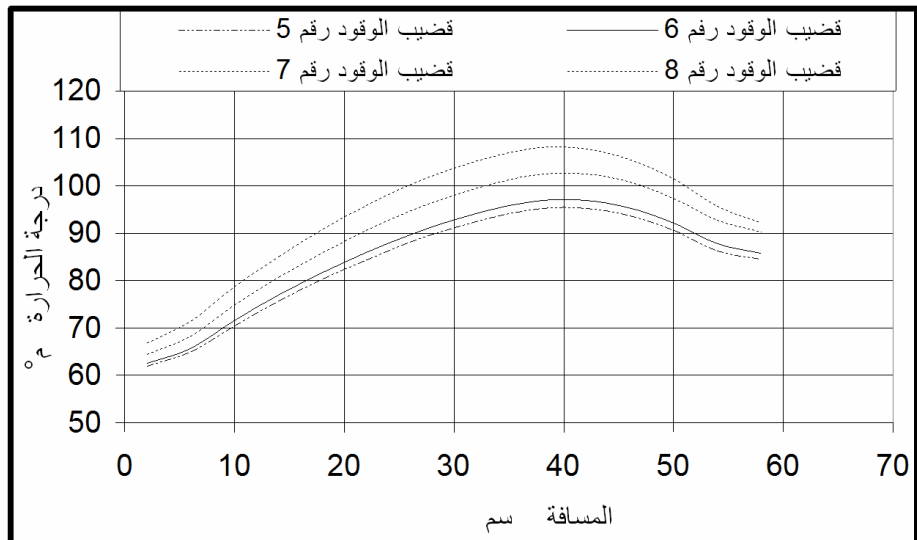
شكل 4: درجة الحرارة السطحية للمغلف 8

درجة حرارة الوقود

توزيع درجات حرارة الوقود لقضبان الوقود من الأول وحتى الرابع موضح بالشكل (أ5) بينما من الخامس وحتى الثامن بالشكل (ب5) حيث أعلى درجة حرارة للخلية وجدت في قضيب الوقود رقم 8 بعد المنتصف وكانت 108.1°C .



شكل أ5: توزيع درجة حرارة الوقود



شكل ب5: درجة حرارة الوقود

يمكن تلخيص نتائج الدراسة التي تم التوصل إليها في النقاط التالية:

- 1- وجدت أعلى درجة حرارة خروج للمبرد (67.7°C) في القناة رقم 8 الواقعة بين قضيب الوقود رقم 8 من الداخل وقضيب الوقود رقم 7 من الخارج

2- وجدت أقصى درجة حرارة لسطح المغلف (105.5 م°) في قضيب الوقود رقم 8

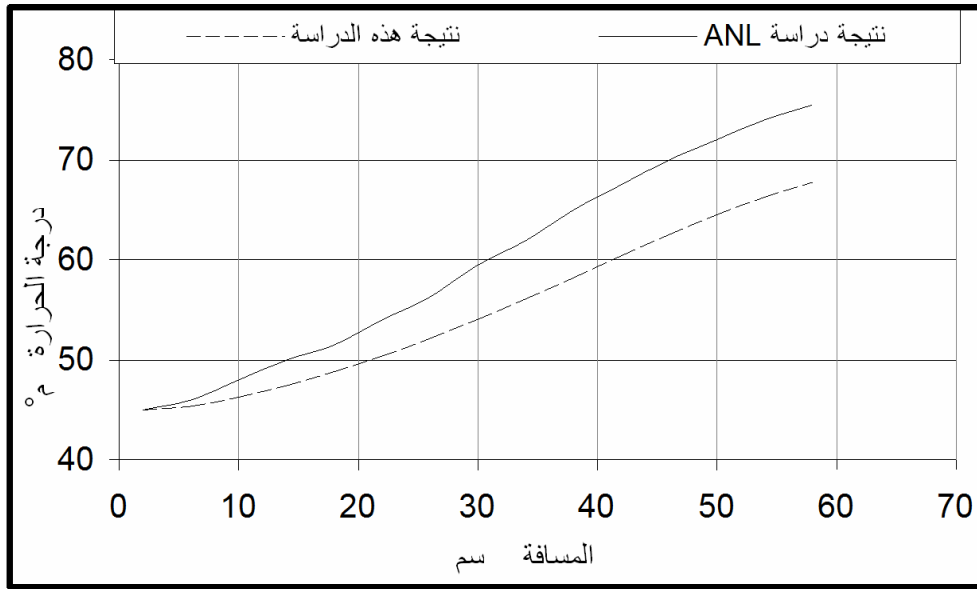
3- وجدت أقصى درجة حرارة للوقود (108.1 م°) في قضيب الوقود رقم 8

المقارنة

استخدم معمل ارجون الوطني (ANL) البرنامج (PLTEMP code) [6] لتحليل الحالة المستقرة، وتمت محاكاة كل أنابيب الوقود كأسطح مستوية متوازية مفصولة فيما بينها بواسطة قنوات التبريد الخاصة بها.

درجة حرارة خروج المبرد

يوضح الشكل (6) مقارنة بين نتائج هذا البرنامج ونتائج (ANL) لدرجة حرارة الخروج للمبرد عبر أسخن قناة. أعلى درجة حرارة خروج للمبرد لنتائج هذه الدراسة ودراسة (ANL) ودراسة (TNRC) معطاة بالجدول (7).



شكل 6: درجة حرارة خروج المبرد

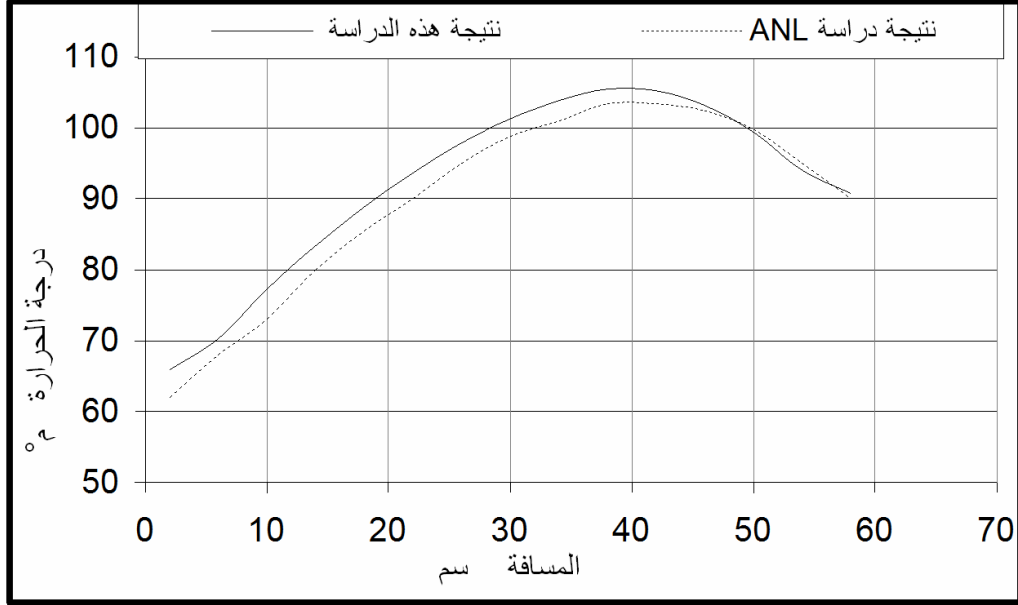
جدول 7: أقصى درجة حرارة خروج للمبرد

نتيجة هذه الدراسة	67.7 م°
نتيجة دراسة ANL	75.5 م°
نتيجة دراسة TNRC	63.7 م°

وجود الفرق في درجات الحرارة طبيعي جدا وذلك ناتج من أن هذه الدراسة صمم لها برنامج خاص حيث تم أخذ تعقيدات الوقود في الاعتبار وعولجت كما هي إما الدراستان الاخرتان (ANL, TNRC) فقد طورت برامج ليست مصممة أصلا لقلب هذا المفاعل وتحتاج لبعض الفرضيات

درجة الحرارة السطحية للمغلف

الشكل (7) الموضح يبين مقارنة بين درجة الحرارة السطحية للمغلف لأسخن خلية المحسوبة بواسطة هذا البرنامج، والمحسوبة بواسطة ANL والجدول (8) يحتوي على أعلى درجة حرارة سطحية للمغلف المحسوبة بواسطة هذا البرنامج والمحسوبة بواسطة ANL والمحسوبة بواسطة TNRC.



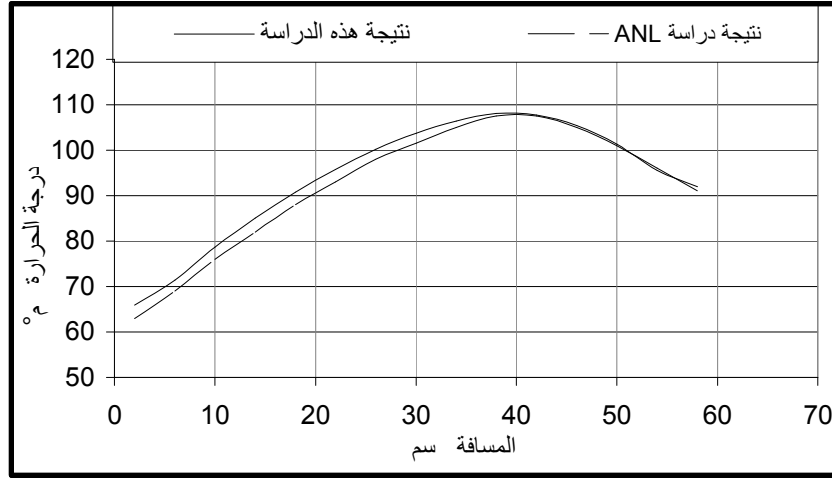
شكل 7: درجة الحرارة السطحية للمغلف

جدول 8: درجة الحرارة السطحية للمغلف

نتيجة هذه الدراسة	°م 105.5
نتيجة دراسة ANL	°م 103.4
نتيجة دراسة TNRC	°م 108.1

درجة حرارة الوقود

الشكل (8) الموضح يبين مقارنة بين درجة حرارة الوقود المحسوبة بواسطة هذا البرنامج، والمحسوبة بواسطة ANL والجدول (9) يحتوي على أقصى درجة حرارة للوقود المحسوبة بواسطة هذا البرنامج والمحسوبة بواسطة ANL والمحسوبة بواسطة TNRC.



شكل 8: درجة حرارة الوقود المركزية

جدول 9: درجة حرارة الوقود المركزية

نتيجة هذه الدراسة	108.1 م°
نتيجة دراسة ANL	107.5 م°
نتيجة دراسة TNRC	109.3 م°

الاستنتاجات

- من خلال الحسابات لقلب مفاعل الأبحاث بتاجوراء منخفض التخصيب وبقدرة قصوى 10 ميجاوات، يمكن استنتاج النقاط التالية:
- أعلى درجة حرارة خارجية للمبرد 67.7 م° وجدت بالقناة رقم 8 والمتصلة بقضيب الوقود رقم 8 من الداخل ومن الخارج بقضيب الوقود رقم 7.
 - أقل درجة حرارة خارجية للمبرد 55.3 م° وجدت بالقناة رقم 1 المتصلة بقضيب الوقود رقم 1 من الداخل.
 - أعلى درجة حرارة لسطح المغلف 105.5 م° وجدت على قضيب الوقود رقم 8.
 - أعلى درجة حرارة مركزية للوقود 108.1 م° وجدت على قضيب الوقود رقم 8.
 - من ناحية أمان قلب المفاعل لكي يتم التأكد من عدم حدوث الغليان عند سطح المغلف فإن أقصى درجة حرارة مسموح بها على سطح المغلف هي 102 م° [6]، علماً بأن درجة الغليان عند سطح المغلف تحدث عند 116 م° تقريباً نظراً لأن الضغط حوالي 175 كيلوباسكال لأن ارتفاع الماء حوالي 8 أمتار. عليه فإنه في حالة البقاء ضمن هذا الحد يجب أن تكون أقصى قدرة تشغيل هي 9.3 ميجاوات حسب هذه الدراسة بينما لا تتعدى 9.7 ميجاوات حسب دراسة (ANL) ولا تتعدى 9 ميجاوات حسب دراسة TNRC.

- [1] Liaw J.R., Hanan,N.A. and Matos J.E. "Feasibility study for LEU conversion of the 10MW IRT-1 Research reactor at the Tajora Nuclear Research Center in Libya "RERTR program, Argonne national Laboratory, Argonne, IL 60439, USA (February 4, 2004)
- [2] Abulgasem A. O. "Report number R-cf-05-2006" Renewable Energies and Water Desalination Research Center, Tajora (2006)
- [3] Garner P.L., Hanan N.A. "IRT-1 LEU core: Power densities for peak 8-tube FA" Argonne National Laboratory, 2006
- [4] Bejan A. "Heat transfer" John Wiley & Sons, Inc. (1993), p. 316
- [5] Stark P. A. "Introduction to numerical methods" Macmillan Publishing Co., London (1970)
- [6] Garner P.L. and Hanan N.A. "Conversion Analysis for the REWDRC IRT-1 reactor" Argonne National Laboratory, Draft (September 2006)
- [7] Incropera F. P. and Dewitt D. P. "fundamentals of heat and mass transfer", John Wiley and Sons, Inc.(1996)