Damascus University Journal for the Basic Sciences
Vol 40 No.1 (2024): 24 -37

مجلة جامعة دمشق للعلوم الأساسية
مجلد 40- عدد 2 (2024): 24-37

دراسة إمكانية استخدام الوقود النووي MOX في مفاعل الجيل الرابع ALLEGRO

المهندس حسان لميع الصالح[1]، الدكتور نبيل فضل الله جودية[2]، الدكتور محمد حبيب البرهوم[3]

[1] طالب دكتوراه، قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة دمشق، سورية.
hassan.alsaleh@damascusuniversity.edu.sy

[2] أستاذ مساعد، قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة دمشق، سورية.
nabil.joudieh@damascusuniversity.edu.sy

[3] مدير بحوث، قسم الهندسة النووية، هيئة الطاقة الذرية السورية، سورية. mbarhoom@aec.org.sy

الملخص

تم في هذا البحث دراســـة إمكانية اســـتخدام الوقود المختلط MOX في مفاعل البحث المبرد بغاز الهليوم من الجيل الرابع والمقترح أوروبياً ALLEGRO بدون التقيد بالمعايير الأوربية كدرجة الحرارة على محور الوقود وعلى غلاف الوقود، ودلت النتائج أن:

هناك إمكانية لاســـتخدام الوقود MOX في المفاعل ALLEGRO وتحقيق مراديد ترموديناميكية عالية بالنسبة لدورة الهليوم في الدارة الأولية للمفاعل تبلغ نحو 50% باستخدام كربيد السيليسيوم بدلاً من الفولاذ اللاصدئي باعتبار أن درجات الحرارة العالية تعيق استخدامه غلافاً للوقود.

الوقود MOX صـالحاً للاسـتخدام في مفاعلات الجيل الرابع في درجات الحرارة العالية، عندئذ يبدو المفاعل ALLEGRO وكأنه مفاعل من النوع VHTR والذي يُشـغل بالنترونات الحرارية، علماً أن المفاعل ALLEGRO هو من النوع السريع.

تاريخ الإيداع: 2022/10/24
تاريخ الموافقة: 2022/11/15

حقوق النشر: جامعة دمشق – سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص
CC BY-NC-SA 04

الكلمات المفتاحية: مفاعل، ALLEGRO، الجيل الرابع، التبريد بالهليوم، مفاعلات درجات الحرارة العالية جداً (VHTR).

ISSN (online): 2789-6366
http://journal.damascusuniversity.edu.sy/index.php/index/index

Studying the possibility of using nuclear fuel MOX in the fourth generation reactor Allegro

Hassan lamie Alsaleh [(1)], Dr. Nabil Fadlallaah Joudieh [(2)]
Dr. Mohamad Habib Albarhoum [(3)]

[(1)] PhD Student , Department of Physics, Faculty of Sciences, Damascus University, Syria. hassan.alsaleh@damascusuniversity.edu.sy
[(2)] Associate Professor, Department of Physics, Faculty of Sciences, Damascus University, Syria. nabil.joudieh@damascusuniversity.edu.sy
[(3)] Research Director, AECS-Nuclear Engineering mbarhoom@aec.org.sy

Abstract
In this research the use of MOX fuel in ALLEGRO, a research gas-cooled reactor of the Gen IV reactors type regardless the European criteria for both fuel-axis and clad external temperatures, the reactor being proposed by some European Countries.
Results showed that this fuel can be used in ALLEGRO to reach high efficiencies for Helium Cycle, about 50% and more, in the primary circuit of the reactor using SiC as clad instead of the Stainless Steel the high temperature preventing the latter from being a clad material.
This qualifies the MOX to be candidate for use in Gen IV reactors at high temperatures resembling the VHTRs although ALLEGRO is a fast reactor while VHTRs is a thermal reactor.

2022/10/24: Received
2022/11/15 Accepted:

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

Key Words: Reactor, ALLEGRO, Generation IV, Helium cooled, VHTRs.

1- المقدمة:

في تسعينات القرن الماضي عمل باحثو الطاقة النووية في إطار ما سمّي الجيل الثالث من المفاعلات، والذي تميز بتحقيق أكبر قدر من الأمان مقارنة بالأجيال السابقة. إلاّ أن مُفاعلات الجيل الثالث، على رغم أمانها المشهود حتى اليوم، لم تنجح في حل إشكالات كثيرة لا تزال ترافق عملية إنتاج الطاقة [1]. فاقتصاداتها والتخلص من نفايات الانشطار النووي أضحى مشكلة عالمية إضافية. ويتمثّل الإشكال الأهم في استخدام مخلفات اليورانيوم (وخصوصاً البلوتونيوم) في صنع الأسلحة النووية، وهذا ما يتعارض مع سياسة «الوكالة الدولية للطاقة الذرية».

بناء على ما سبق هناك حاجة ملحة إلى تطوير جيل جديد من المفاعلات النووية (الجيل الرابع) الذي يتميز باقتصادية وأمان واستدامة أكثر من سابقيها جيلاً، وخفض انتشار البلوتونيوم الصالح لإنتاج الأسلحة النووية [2].

تم اختيار المفاعل السريع المبرد بالغاز كواحد من أنظمة الجيل الرابع المحتملة من قبل المنتدى الدولي لمفاعلات الجيل الرابع (Generation IV reactors International Forum (GIF))يتوقع أن يؤدي هذا الخيار دوراً حاسماً في تطوير الاستخدام المستدام للطاقة النووية، وذلك من خلال إغلاق دورة الوقود النووي، التي تشمل [3]:

- تحويل U^{238} إلى Pu^{239}، ومنه إمكانية استخدام كميات أكبر من اليورانيوم الطبيعي أعلى بـــ 50 مرة على الأقل بالمقارنة مع الدورة المفتوحة للوقود النووي.
- تخفيض ملحوظ لإعادة تدوير الأكتينيدات الثانوية المشعة من النفايات عالية السمية (High Level Wastes (HLW)).
- تقليل إعادة معالجة الوقود المستهلَك.
- تخفيض زمن التخزين الحتمي للنفايات عالية السمية (HLW).

لا تزال مُفاعلات الجيل الرابع تمثل مجموعة من التصاميم النظرية قيد الدراسة [4]، ومن غير المتوقع أن تدخل مرحلة التصنيع التجاري قبل العام 2030، لذلك تتركز الدراسات في الوقت الحاضر على مفاعل البحث ALLEGRO والذي يمثل الخيار الأوربي في بناء تكنولوجيا الجيل الرابع من المفاعلات النووية ريثما يتم الانتقال بهذه التكنولوجيا إلى مستوى مفاعلات الطاقة المستخدمة في توليد الطاقة الكهربائية المدنية.

عملت الدول الأوربية على تصميم هذا المفاعل على عدة مراحل [5]: المرحلة الأولى، التشغيل بالوقود الأكسيدي المختلط (UO_2+PuO_2)، وهو وقود مجرب وشائع في مفاعلات الطاقة المشغلة في الوقت الحاضر، إلا أن كثافة الطاقة في قلب مفاعل ALLEGRO تبلغ قيمة أعلى من مثيلتها في مفاعلات الطاقة المشغلة في الوقت الحاضر بمرتين أو ثلاث (نحو $100\ MW/m^3$)، لذلك تضمنت المرحلة الثانية دراسة استخدم أنواع أخرى من الوقود التي تستطيع تحمل الحرارة وكثافة الطاقة العالية.

2- هدف البحث:

يهدف هذا البحث إلى

- دراسة إمكانية استخدام الوقود المختلط الأكسيدي MOX في المفاعل ALLEGRO بوصفه وقوداً نووياً قادراً على تحمل كثافة عالية للطاقة ولدرجة الحرارة، وذلك في ظل نفس الظروف الحرارية السائدة في المفاعلات (Very High Reactor Temperatures, (VHTR)) والتي تُمثل أعلى درجات حرارة لما هو موجود في المفاعلات النووية المشغلة في الوقت الحاضر على مستوى العالم.
- حساب درجة حرارة مركز الوقود، ودرجة الحرارة للغلاف الخارجي للوقود.
- دراسة هامش أمان المفاعل من أجل الوقود الأكسيدي عند درجات الحرارة العالية.

آخذين بالاعتبار، عدم التقيد بالمعايير الأوربية بالنسبة لدرجة الحرارة في مركز الوقود وفي غلافه، بحيث نستطيع رفع درجة حرارة المبرد إلى المستوى الموجود في المفاعلات VHTR، وهكذا يكتسب مفاعل ALLEGRO ميزتين أولاهما التشابه مع المفاعل من النوع VHTR من حيث درجات الحرارة، وثانيتهما تحقيق مراديد ترموديناميكية عالية بالنسبة لدورة الهليوم.

3- مواد وطرائق البحث:

تعتمد منهجية البحث على النمذجة باستخدام نظام حاسوبي تم إعداده محلياً (MALBRN) [6]، وظيفة هذا النظام تشغيل البرامج والكودات لإجراء الحسابات المطلوبة من خلال الاستفادة من واجهات المستخدم المتوفرة فيه (انظر الشكل (1)).

3-1- لمحة عن مفاعل البحث ALLEGRO [2]:

اعتمد مفهوم مفاعلات الجيل الرابع (GFR) بشكل أساسي على الدراسات التي أجريت في فرنسا في أواخر التسعينيات، وتم تطويرها في إطار البرنامجين الخامس والسادس للاتحاد الأوروبي على التوالي. حيث شملت تقييم التطوير والأمان لمصنع (مفاعل) تجريبي صغير دعي في ذلك الوقت ETDR (مفاعل التوضيح التجريبي للتكنولوجيا). وقد تم تحليل المفهوم وتحسينه من قبل مشروع الاتحاد الأوروبي GoFastR وتمت إعادة تسمية ETDR إلى ALLEGRO وتم إدخال العديد من التعديلات على تصميمه، مثلاً تم رفع الاستطاعة الحرارية إلى 75 ميغاوات.

وافقت معاهد الأبحاث النووية الثلاث المعنية ببرنامج ALLEGRO في منطقة أوروبا الوسطى (التشيك، المجر، سلوفاكيا) في عام 2010 على بدء مشروع مشترك يهدف إلى إعداد خطة أساسية بشأن بناء وتشغيل مفاعل ALLEGRO السريع المبرد بالغاز في أحد البلدان الثلاثة إضافة إلى بولندا التي انضمت إلى المشروع في عام 2012.كان الهدف الرئيسي من اتحاد ALLEGRO هو إنشاء مرافق للبحث والتطوير للتحقيق في قضايا تطوير الوقود النووي، والمشاكل المتعلقة بتكنولوجيا الهيليوم، والمسائل المتعلقة بالمواد الإنشائية، وبناء نموذج يهدف إلى توليد نتائج تجريبية لتطوير مفاعل ALLEGRO.

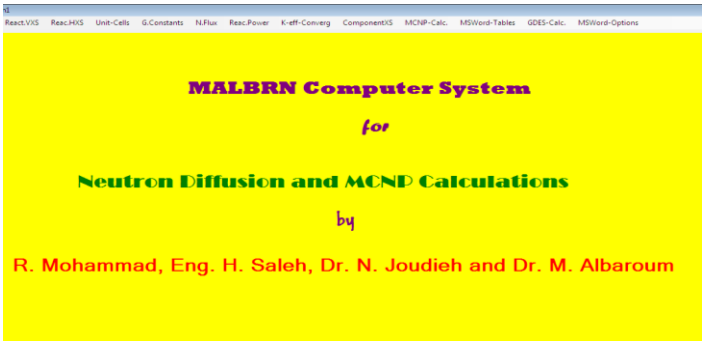
3-2- توصيف مختصر لنظام الحساب MALBRN:

يتضمن النظام الحاسوبي MALBRN الكود MCNP4C [7] المستخدم بكثرة في حل مسائل المفاعلات النووية، وبعض البرامج الفرعية. يعد الكود MCNP4C من أهم إصدارات كودات انتقال الجسيمات النووية والذرية المبنية على طريقة مونتي كارلو التي بدأ تطويرها في مخابر لوس الاموس منذ الأربعينات من القرن الماضي، حيث يعالج الكود مسائل انتقال النيترونات التي لا تتجاوز طاقتها 20 MeV، وكذلك انتقال الفوتونات أو الإلكترونات التي لا تتجاوز طاقتها 1000 MeV، بالإضافة إلى معالجته لمسائل الانتقال النتروني/الفوتوني المترابط أو الانتقال النتروني /الفوتوني/ الإلكتروني المترابط وغيرها حيث يعالج مسائل النقل ثلاثية الأبعاد (إحداثيات ديكارتية) دون اللجوء لأيّ تقريب في فضاء المكان أو الاتجاه أو الطاقة أو الزمان كما هو متبع في طرائق أخرى [6].

ومن أشهر إمكانيات الكود MCNP تقدير معامل التضاعف K_{eff} للمنظومات الحرجة والمفاعلات الانشطارية [8]، بالإضافة للتطبيقات المهمة في مجالات مختلفة كحسابات التدريع لمختلف المصادر المشعة بما في ذلك المفاعلات النووية، وكذلك حساب الجرعة في مجالات الطب النووي، والتصوير الإشعاعي، والفيزياء الطبية، وتصميم الكواشف النووية، ودفن النفايات المشعة وإنتاج النظائر والمسرعات وغيرها. وقد أجريت حسابات عديدة أثبتت صلاحية الكود MCNP وصلاحية النموذج المعمول به لهذه الحسابات [8-9].

تعمل البرامج الفرعية المتوفرة ضمن MALBRN على استخدام الكود MCNP4C أوتوماتيكياً لإجراء الحسابات النترونية للمفاعل ALLEGRO بحيث لا يتكبد المستخدم عناء توليد ملف دخل للكود MCNP4C يدوياً [6].

تتم الحسابات النترونية (حساب حرجية المفاعل، وفائض التفاعلية البدئي، ومكافئات قضبان التحكم وقضبان الإغلاق نترونياً) للمفاعل بواسطة كود MCNP4C، حينما يقوم الرسام المتوفر فيه بإظهار الرسومات المطلوبة، كما يستطيع النظام MALBRN إجراء بعض الرسومات حسب التوصيف في الفقرات التالية.



الشكل (1): واجهة المستخدم للنظام الحاسوبي MALBRN [6]

3-3- الوقود المختلط MOX:

الوقود المختلط MOX هو خليط من أكسيدي البلوتونيوم (PuO_2) واليورانيوم الطبيعي (UO_2)، وبالتالي لا يحتاج هذا النوع من الوقود إلى إغناء باليورانيوم-235 لوجود البلوتونيوم-239 الذي يحل عملياً محل اليورانيوم-235 من وجهة نظر نترونية. استخدم هذا الوقود في مختلف أنواع المفاعلات النووية [11]، وما يزال يستخدم في المفاعلات النووية في الوقت الحاضر نظراً لخصائصه النترونية الممتازة وثبات خصائصه الميكانيكية في ظروف التشعيع في المفاعل النووي.

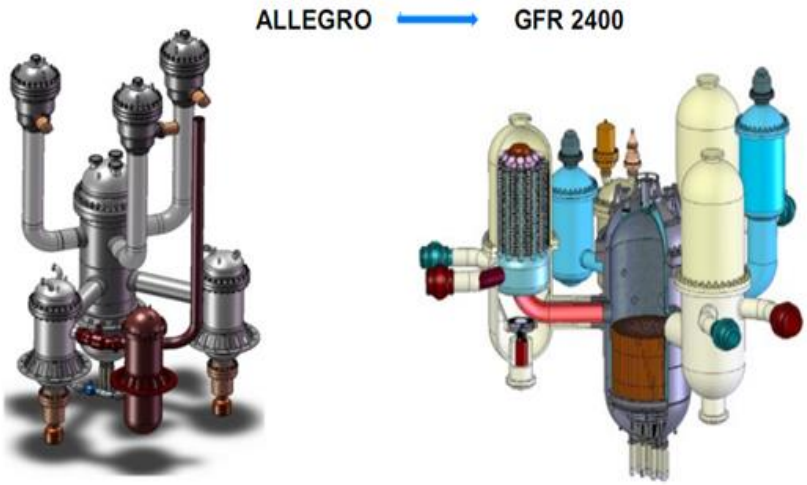
يوضح الجدول(1) التركيب التفصيلي للوقود المستخدم في هذا البحث.

الجدول(1): التركيب التفصيلي للوقود المختلط المستخدم في هذا البحث.

العنصر	النسبة المئوية%
U-235	0.499882
U-238	69.91262
Pu	17.74521
O_2	11.84228

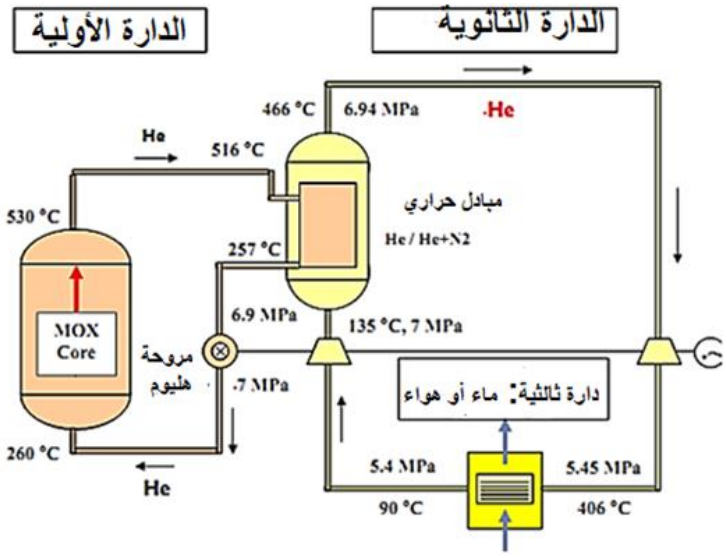
3-4- توصيف المفاعل ALLEGRO:

يفترض العرض التوضيحي لتقنية GFR أن السمات الأساسية لمفاعلات الطاقة التجارية المبردة بالغاز من الجيل الرابع GFR مثل المفاعل GFR2400 MW والمزمع استخدامها لتوليد الكهرباء يمكن اختبارها من خلال تطبيق الدراسة على مفاعل البحث (MWth ALLEGRO-75)، حيث أن معظم المعطيات الرئيسية لكلا المفاعلين مشابهة لبعضها البعض (انظر الشكل(2)).

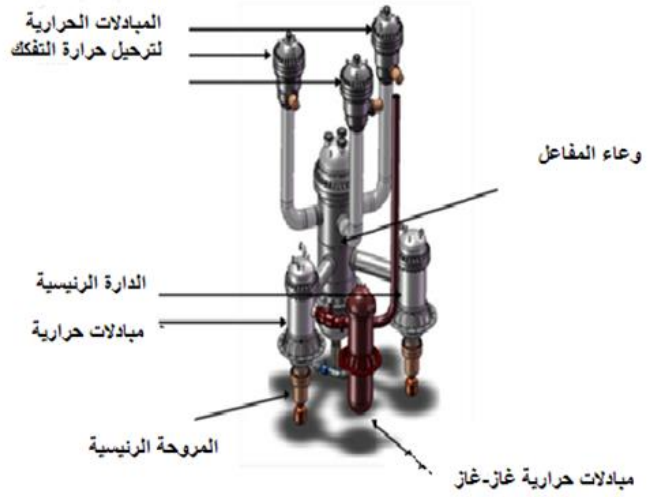


الشكل (2): يوضح التشابه بين مفاعل الطاقة باستطاعة 2400 ميغاواط ومفاعل البحث ALLEGRO [5].

يتكون التصميم الأصلي لمفاعل البحث ALLEGRO من وعاء المفاعل الأسطواني الشكل والذي يحتوي على اثنتين من الدارات الابتدائية للتبريد (انظر الشكلين(3) و (4))، الدارة الأولية تشمل غاز الهيليوم الذي يعمل على ترحيل الحرارة من قلب المفاعل إلى الدارة الثانوية الحاوية على الماء المضغوط بواسطة المبادلات الحرارية. يتم نقل الحرارة أخيراً بواسطة ثلاثة مبردات للهواء من الدارة الثانوية إلى الغلاف الجوي، باعتبارها المشتت الحراري النهائي (انظر الشكل(3)).



الشكل (3): يوضح دارتي تبريد مفاعل البحث ALLEGRO [10].



الشكل (4): يوضح المكونات الأساسية لمفاعل البحث ALLEGRO [5].

تبلغ كثافة إطلاق الطاقة في مفاعل البحث ALLEGRO حوالي $102\ MW/m^3$ (انظر الجدول (2))، يُستخدم فيه غاز الهليوم كمبرد، حيث تم تصميم هذا النوع من المفاعلات لإثبات تقنية الجيل الرابع، وذلك من خلال تأهيل التقنيات الضرورية (كالوقود، والتبريد، وأنظمة الأمان...الخ) لتشغيل هذا المفاعل، لذلك تم اقتراح أنماط تحميل مختلفة لقلب المفاعل اعتمدنا منها نمط تحميل قلب المفاعل بوقود MOX [5].

يعطي الجدول (2) مواصفات قلب مفاعل البحث ALLEGRO، والذي يتألف من 81 عنصر وقود و 6 مواقع للتشعيع (انظر الشكل (5)) يتألف كل عنصر وقود من 169 قضيب وقود. يتم التحكم بالمفاعل بواسطة 6 عناصر تحكمية مصنوعة من كربيد

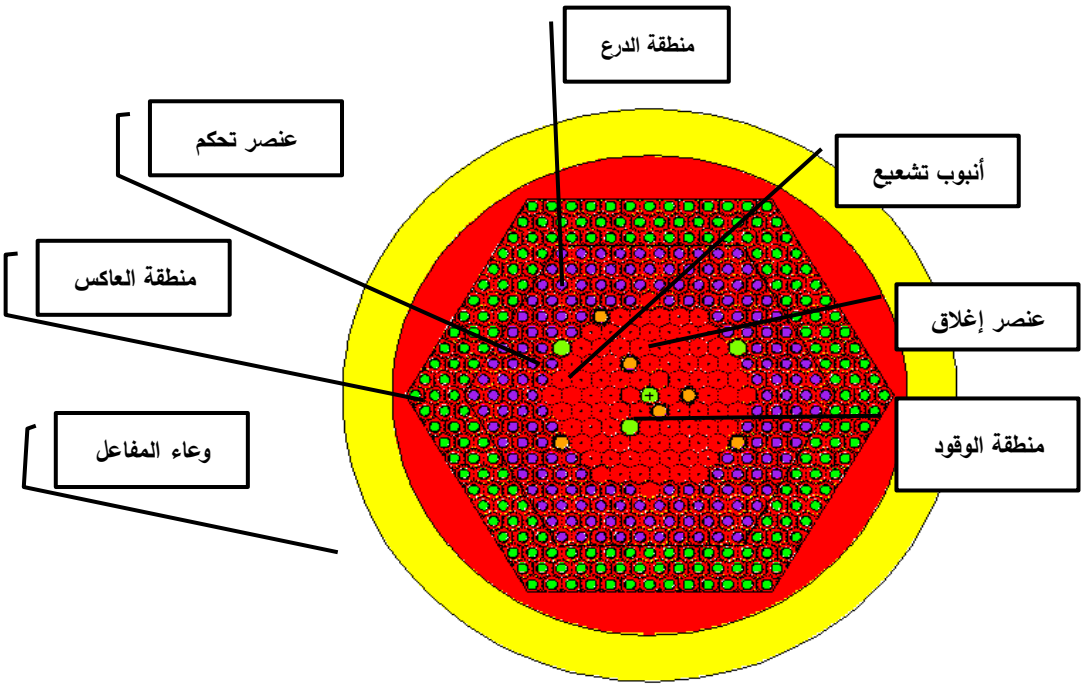
البورون B_4C و4 عناصـر للإغلاق مصـنوعة من مواد أخرى (انظر الفقرات اللاحقة). تحيط بمنطقة الوقود بالاتجاه القطري أربع حلقات من منطقة العاكس مكونة من 174 عنصر يلي حلقات العاكس ثلاث حلقات من درع المفاعل مكونة من 198 عنصر، أما بالاتجاه الشاقولي فتتوضع من الأعلى والأسفل طبقة من العاكس لها نفس تركيب العاكس القطري، يليها من الأعلى والأسفل طبقة من الدرع لها نفس تركيب الدرع القطري.

الجدول (2): مواصفات قلب مفاعل البحث ALLEGRO حسب التصميم المقترح.

البند	القيمة	
	في هذا البحث	المقترحة أوربياً
استطاعة الحرارية للمفاعل (ميغاواط)	75	75
كثافة الاستطاعة في قلب المفاعل (ميغاواط/م^3)	102.71	100
كثافة الاستطاعة في الوقود (ميغاواط/م^3)	254.1	مجهولة
عدد عناصر الوقود في المفاعل	81	81
عدد قضبان الوقود في مجمعة الوقود	169	169
عدد مجمعات العاكس القطري في المفاعل	174	174
عدد مجمعات الدرع القطري في المفاعل	198	198
عدد قضبان التحكم+ عدد قضبان الاغلاق	4+6	4+6
عدد قضبان التحكم	6	6
عدد العواكس / عدد الدروع	2 / 2	2 / 2
نوع الوقود / نسبة اليورانيوم في الوقود	20.35 / (U, Pu)O	مجهولة / (U, Pu)O_2
المبرد/(الضغط (ميغا باسكال))	Helium/7	Helium/7
قطر وعاء المفاعل (متر)/المادة المصنوع منها	3.46/SS	3.46/SS
ارتفاع المفاعل (متر)/القطر(متر)	2.95 / 2.90	2.95 / 2.90
ارتفاع القلب (متر)	0.86	0.86

3-4-1- نمذجة المفاعل ALLEGRO:

تمت نمذجة المفاعل ALLEGRO بواسطة كود MCNP4C، وتم اختيار معطيات المواد لقلب المفاعل كما هي معروفة عندنا، إذ أن خصائص هذه المواد كما هي مستخدمة أوربياً ليست معروفة بالنسبة لنا، كما أن هذه الخصائص قد تختلف كثيراً بين بلد وآخر أو حتى بين مؤسسة علمية وأخرى. وفي الكثير من الأماكن كانت لنا طريقة عمل مختلفة عن طرائق عمل الأوربيين وخاصة فيما يتعلق بمواقع قضبان التحكم في قلب المفاعل ومواد هذه القضبان (انظر الشكل (5)).



الشكل (5): يوضح تخطيطياً مقطعاً عرضياً لقلب المفاعل ALLEGRO باستخدام رسام كود MCNP.

- معطيات مقطع شاقولي في قلب المفاعل المقترح:

يُعطي الجدول (3) بيانات مقطع شاقولي لقلب المفاعل ALLEGRO المعتمدة في النمذجة، ويوضح الشكل (6) منطقتي العاكس والدرع الشاقولي للمفاعل كما يظهرها رسام الكود MCNP4C.

الجدول (3): معطيات مقطع شاقولي في قلب مفاعل البحث ALLEGRO.

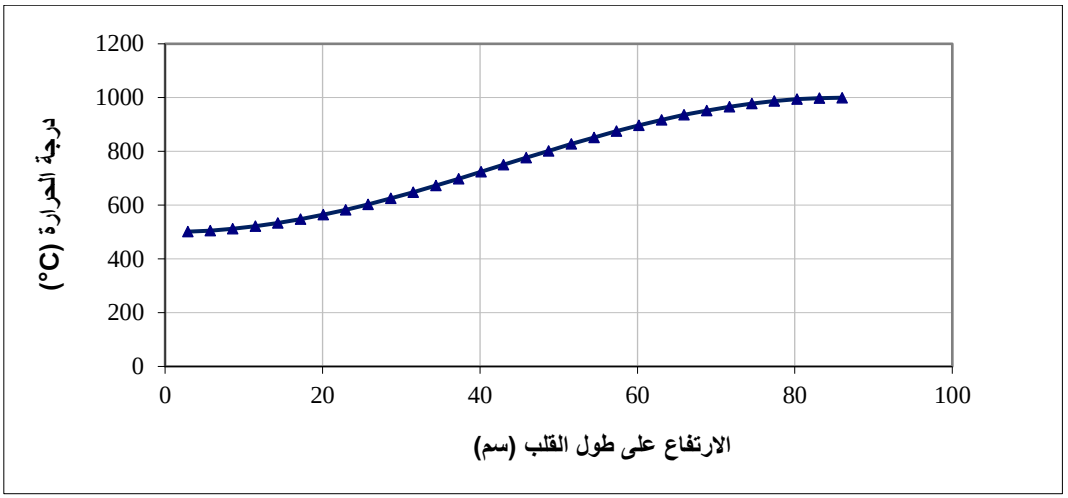
البند	القيمة	
	هذا البحث	المقترحة أوربياً
ارتفاع أنبوب التشعيع (سم)	166	166
ارتفاع قضيب التحكم (سم)	86	مجهول
ارتفاع قضيب الاغلاق (سم)	86	مجهول
سماكة العاكس الشاقولي (سم)	44	غير معلنة
ارتفاع العاكس الشاقولي (سم)	30	30
سماكة الدرع الشاقولي (سم)	33	غير معلنة
ارتفاع الدرع الشاقولي (سم)	50	50
المبرد/(الضغط (ميغا باسكال))	Helium/7	Helium/7
ارتفاع وعاء المفاعل(سم)/المادة المصنوع منها	295/SS	295/SS

الشكل (6): يوضح تخطيطياً مقطعاً شاقولياً لقلب المفاعل ALLEGRO كما يظهره رسام كود MCNP.

4- استخدام الوقود المختلط MOX في المفاعل ALLEGRO في درجات الحرارة العالية:

إن مفهوم درجات الحرارة العالية يشير هنا إلى تحقيق درجة حرارة خرج للمبرد تقارب 1000 ^{0}C ودرجة حرارة دخل للمبرد تقارب 500 ^{0}C أو أقل من هذه، بحيث لا ينقص المردود الترموديناميكي عن 0.5 في أسوأ أحواله كما هو الحال في المفاعلات المتقدمة VHTR. وعلى الرغم من أن درجتي حرارة الدخل والخرج هذه هي نفسها المعمول بها في هذا النوع من المفاعلات، إلا أن المفاعل ALLEGRO كمفاعل من الجيل الرابع يجب أن يتمتع بدرجة حرارة خرج تتجاوز 1000 ^{0}C ودرجة حرارة دخل أقل من 500 ^{0}C، لكننا في هذا البحث لن نطرح درجات حرارة مختلفة عن تلك المعمول بها في الوقت الحاضر.

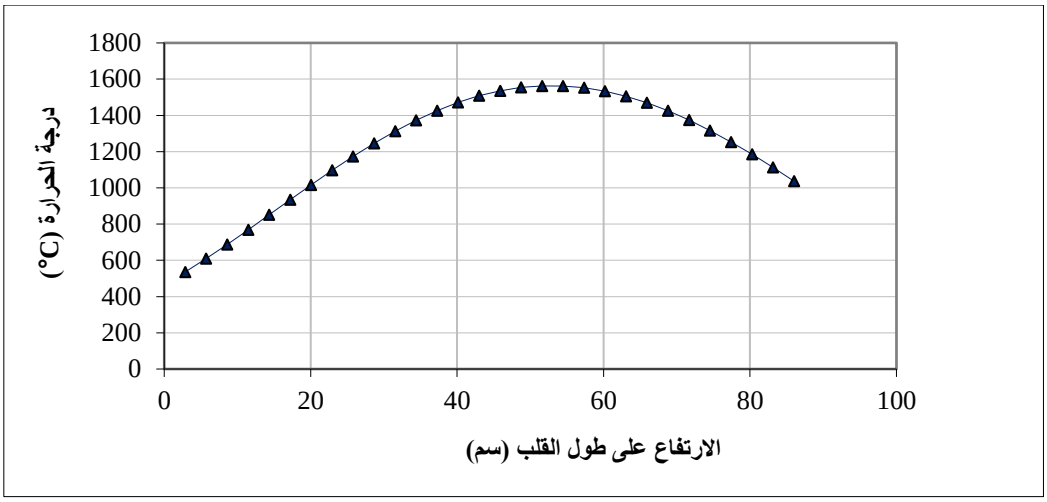
تم استخدام البرنامج MALBARN لحساب تغيرات درجة الحرارة لمبرد الهليوم على طول قلب المفاعل ALLEGRO، كما هو موضح بالشكل (7)، حيث أن درجة الحرارة تبلغ 500 ^{0}C عند مدخل المبرد، و 1000 ^{0}C عند الارتفاع 80cm لقلب المفاعل.



الشكل (7): تبعية درجة حرارة خرج الهليوم للموقع على طول قلب المفاعل ALLEGRO.

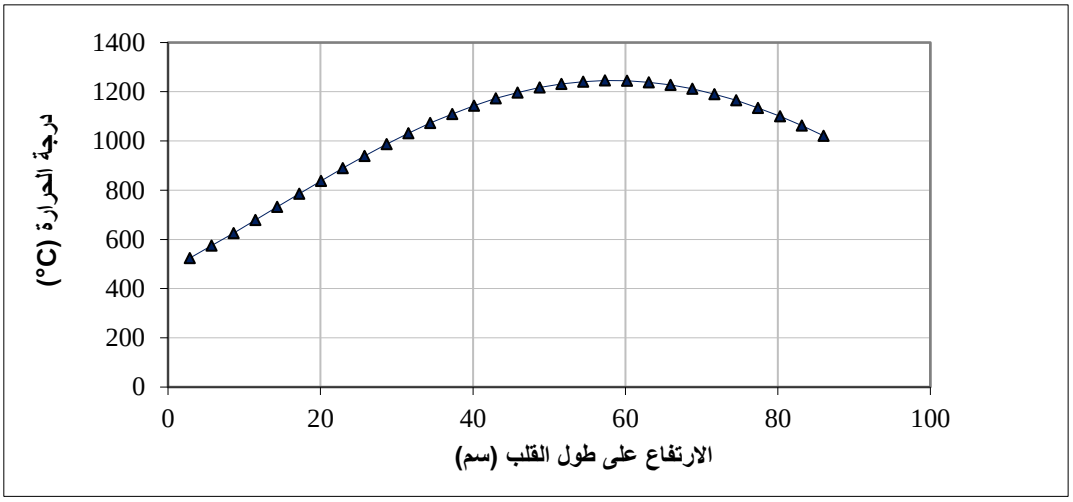
من المعلوم أن تحديد درجة حرارة دخول وخروج المبرد هو الذي يحدد المردود الترموديناميكي لدورة الهليوم. ولكن دراسة استخدام هذا الوقود في هذا النوع من المفاعلات لا تعني فقط الحصول على مردود ترموديناميكي معين، وإن كان هذا الأمر مهماً، بل تعني، هل لهذا الاستخدام أية آثار تقيد استخدام مواد معينة في المفاعل؟

للإجابة عن هذا السؤال، تم دراسة تغير درجة الحرارة في مركز الوقود وفي غلافه على طول قلب المفاعل ALLEGRO كما هو موضح في الشكلين (8 و9).



الشكل (8): تبعية درجة حرارة مركز الوقود للموقع على طول قلب المفاعل ALLEGRO

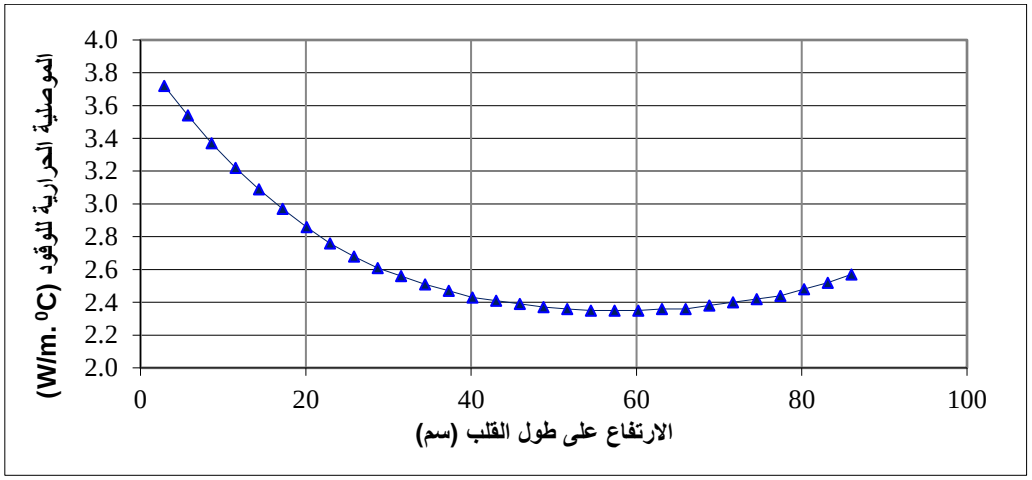
نلاحظ من الشكل (8) أن درجة حرارة مركز الوقود العظمى تبلغ القيمة ^{0}C 1562.4 على الارتفاع 54.47cm وهي أعلى بكثير من المعايير الأوربية التي تحصر هذه الدرجة بنحو 1140 °C [12].



الشكل (9): تبعية درجة حرارة غلاف الوقود الخارجية للموقع على طول قلب المفاعل ALLEGRO.

نلاحظ من الشكل (9) أن درجة حرارة غلاف الوقود العظمى تبلغ القيمة ^{0}C 1245.8 على الارتفاع 57.33 cm وهي أعلى بكثير من المعايير الأوربية التي تحصر هذه الدرجة بنحو 863 °C [12]. كما وأن وسطي درجة حرارة الغلاف الخارجية هو بحدود ^{0}C 1027.9 وهذا يلغي مبدئياً استخدام الفولاذ اللاصدئي كغلاف للوقود (لانخفاض درجة انصهاره (1430 °C)) [13]، ولذلك تم في هذا البحث اختيار كربيد السيليسيوم (درجة انصهاره ^{0}C 2850) [13] بدلاً منه.

نلاحظ أيضاً أن وسطي درجة حرارة الوقود في مركزه (على الارتفاع) هو بحدود ^0C 1233.1. أي أن الفارق بين درجة حرارة الوقود القصوى والوسطية في مركزه يتجاوز ^0C 250، ويرجع ذلك إلى أن الناقلية الحرارية للوقود ضعيفة (انظر الشكل **10**) الذي يوضح تغير الموصلية الحرارية للوقود تبعاً لدرجات الحرارة على طول قلب المفاعل.



الشكل (10): تغير الموصلية الحرارية على طول قلب المفاعل ALLEGRO باستخدام الوقود MOX.

5- نظرة إلى أمان المفاعل ALLEGRO في هذه الظروف.

يبين الجدول (4) الخصائص النترونية للمفاعل ALLEGRO بالمواصفات المعتمدة في هذا البحث حيث في الوضع الحالي للمفاعل ALLEGRO هناك فائض تفاعلية ابتدائي قريب من 62 مك وهناك 6 قضبان تحكم تستطيع إغلاق المفاعل بهامش إغلاق قدره 28.123 مك، وهناك أيضاً أربعة قضبان إغلاق إضافية مختلفة تستطيع أن تغلق المفاعل أيضاً بهامش إغلاق قدره 23.489 مك.

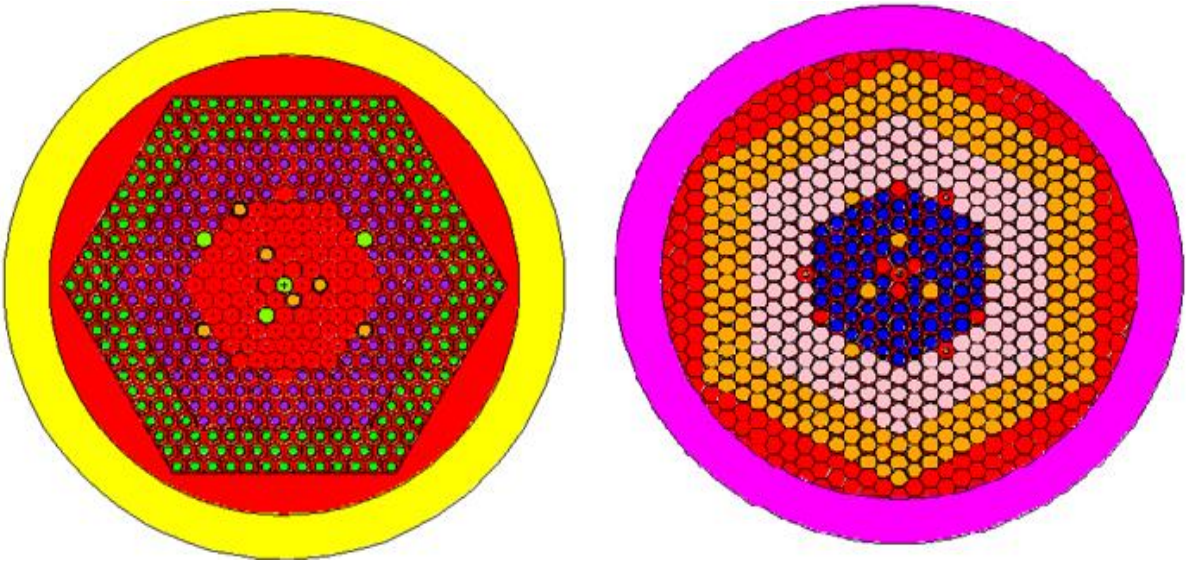
الجدول (4): الخصائص النترونية للمفاعل ALLEGRO بالمواصفات المعتمدة في هذا البحث

البيان:	القيمة
نوع الوقود المستخدم / نسبة اليورانيوم-235 في الوقود /النسبة المئوية للبلوتونيوم في الوقود	0.711 / 20. 35 / PuO_2+UO_2
كثافة الوقود (غ/سم3)	10.4
نصف قطر قضيب الوقود / سماكة الغلاف (سم)	0.045 / 0.2825
معامل التضاعف النتروني/التفاعلية في المفاعل (مك)	62.327 / 1.066474
مادة الوقود/ مادة الغلاف	PuO_2+UO_2 / كربيد السيليسيوم
عدد قضبان التحكم/مادة التحكم/مكافئ القضيب/هامش إغلاق المفاعل (مك)	6 / B_4C / -15.075 / -28.123
عدد قضبان الإغلاق /مادة التحكم/مكافئ القضيب/هامش إغلاق المفاعل (مك)	4 / B_4C / -21.454 / -23.489

إذاً المفاعل آمن نترونياً، ولا مشكلة في هذا الوقود من هذه الناحية وبالتالي يمكن استخدام الوقود MOX في درجات الحرارة العالية في المفاعل ALLEGRO.

6- مقارنة المواصفات النترونية للمفاعل ALLEGRO بتصميمه الحالي مع التصميم المقترح أوربياً.

تم في هذا البحث مقارنة المواصفات النترونية للمفاعل ALLEGRO بتصميمه الحالي مع التصميم المقترح أوربياً [14] حيث يوضح الشكل (11) والجدول (5) الاختلاف بين تصميم القلبين من حيث تموضع قضبان التحكم والإغلاق والتشعيع.



قلب المفاعل ALLEGRO كما هو مقترح أوروبياً [14]. قلب المفاعل ALLEGRO كما هو مقترح في هذا البحث.

الشكل (11): مقارنة التصميم الحالي للمفاعل ALLEGRO مع التصميم المقترح أوربياً[14].

الجدول 5: مقارنة توزع قضبان التحكم وقضبان الإغلاق وأنابيب التشعيع بين المفاعلِ ALLEGRO المقترح أوروبياً، والمفاعل ALLEGRO كما هو مقترح في هذ البحث.

متسلسل	رقم الصف في قلب المفاعل	المفاعل ALLEGRO كما هو مقترح أوروبياً			المفاعل ALLEGRO كما هو مقترح في هذ البحث.		
		قضبان تحكم	قضبان إغلاق	أنابيب تشعيع	قضبان تحكم	قضبان إغلاق	أنابيب تشعيع
1	5	1					1
2	6			1			1
3	8		2		2		
4	9	1				1	
5	10			1	1		
6	11	1	1	2	1	1	2
7	12			1			1
8	13	1			1		
9	14		2		2		
10	16	1					1

تم إجراء الحسابات النترونية لقلب المفاعلِ ALLEGRO كما هو مقترح أوروبياً، ومقارنتها من خلال (الجدول (6)) مع النتائج التي حصلنا عليها سابقاً من أجل المفاعل ALLEGRO كما هو مقترح في هذ البحث، حيث يمكن ملاحظة الفارق الكبير في فائض التفاعلية الابتدائي بين التصميمين (حوالي 40 مك) وذلك لتمكين دورة وقود داخل المفاعل وقت أطول في التصميم الجديد منها في التصميم القديم، وهذا اقتضى ضرورة تعديل مكافئات قضبان التحكم والإغلاق لمناسبة الوضع الجديد للمفاعل.

الجدول 6: مقارنة المواصفات النترونية بين المفاعلِ ALLEGRO المقترح أوروبياً، والجديد المقترح في هذا البحث.

البيان:	المفاعل ALLEGRO كما هو مقترح في هذ البحث.	المفاعل ALLEGRO كما هو مقترح أوروبياً
نوع الوقود المستخدم.	PuO_2+UO_2	PuO2+UO2
نسبة اليورانيوم−235 في الوقود	0.711	0.711
النسبة المئوية للبلوتونيوم في الوقود	20. 35	25
كثافة الوقود (غ/سم3)	10.4	10.4
معامل التضاعف النتروني	1.066474	1.02057
التفاعلية في المفاعل (مك)	62.327	20.155
مادة الغلاف	كربيد السيليسيوم	الفولاذ اللاصدئي
عدد قضبان التحكم/مادة التحكم/مكافئ القضيب/هامش إغلاق المفاعل (مك)	−28.123/-15.075/B_4C / 6	−55.877/-12.672/B_4C /6
عدد قضبان الإغلاق /مادة التحكم/ مكافئ القضيب/هامش إغلاق المفاعل (مك)	-23.489/-21.454/B_4C/4	-25.904/-11.515 / B_4C/4

6−المناقشة والاستنتاجات.

لا بد من الإشارة إلى أننا في هذا البحث الذي هو في الأساس مفاعل بحث من النوع السريع نترونياً ويهدف إلى تجريب وإثبات تكنولوجيا مفاعلات الجيل الرابع التي هي قيد الدراسة والتصميم في الوقت الحاضر. هذا المفاعل مطروح أوربياً بحيث تكون درجة حرارة دخل المبرد بحدود ^0C 400 ودرجة حرارة خرج بحدود ^0C 830، وهو غير مطروح ليعمل في درجات حرارة أعلى سواء درجات حرارة الدخل أو الخرج. أما في هذا البحث، فقد تم طرح هذا المفاعل كمفاعل سريع ولكن بدرجات حرارة دخل وخرج أعلى بكثير مما هو مطروح أوربياً.

اقتضى هذا الطرح استبدال غلاف الوقود من الفولاذ اللاصدئي إلى كربيد السيليسيوم. وتمت دراسة جميع خصائص المفاعل النترونية والهيدروحرارية والترموديناميكية بالإضافة إلى أمان المفاعل النتروني وتم إثبات أن الوقود MOX يمكن استخدامه في المفاعل ALLEGRO ليصبح المفاعل ALLEGRO ليس مفاعلاً سريعاً فحسب، بل مفاعلاً من النوع العالي درجة الحرارة (VHTR) أيضاً.

وبناء على ما سبق فإن:

الوقود الأكسيدي هو مرشح قوي لاعتماده كي يكون وقوداً من أنواع الوُقود التي ستستخدم في مفاعلات الجيل الرابع، حتى في درجات الحرارة العالية التي يماثل فيها مفاعلات الحرارة العالية المتقدمة VHTRs وهذا أمر ممتاز لأن المفاعل ALLEGRO يكون قد جمع بين خصائص المفاعلات الحرارية المتقدمة وبين خصائص المفاعلات السريعة من حيث قدرته على استهلاك اليورانيوم 238 إلى الحد الأقصى وكذلك حرق الأكتينات وعدم الحاجة إلى مهدئ للنترونات.

References

[1] G. Cognet, 2010.Generation 3 Nuclear Reactors. French- Slovak summer school. The different generations of nuclear reactors From Generation-1 to Generation-4. CEA Delegate for Central Europe Nuclear Counsellor – French Embassy.

[2] Branislav HATALA , Radoslav ZAJ, 2014.Introduction to Gas Fast Reactors (GFR) general concept, history, designs, main issues,1st ESNII+ Summer School KTH Royal Institute of Technology ,May 19 – 21, 2014 Stockholm, Sweden

[3] Laura Rodrí guez-Penalonga and B. Yolanda Moratilla Soria, 2017. A Review of the Nuclear Fuel Cycle Strategies and the Spent Nuclear Fuel Management Technologies. Cátedra Rafael Mariño de Nuevas Tecnologí as Energé ticas, Universidad Pontificia Comillas, 28015 Madrid, Spain; ymoratilla@comillas.edu

[4] L. Bělovský, J. Gadó, B. Hatala, A. Vasile, G. Wrochna, 2017. The ALLEGRO Experimental Gas Cooled Fast Reactor Project. FR17 ConferenceYekaterinburg, June 25-29, 2017

[5] Ladislav Bělovský , 2014. Project ALLEGRO He-Cooled Fast Reactor Demonstrator. Seminar, ÚJV Řež, March 28, 2014.

[6] R. Mohammad, N. Judieh, M. Albarhoum, 2020. Developing New Simulation Techniques for Advanced MTRs,a Ph.D thesis achieved at the Department of Physics, Damascus University.

[7] MCNP4C, 2008− RSICC Computer Code Collection MCNP4C2, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge Tennessee 37831-6362.

[8] SHAABAN I., ALBARHOUM M., 2015 − Minimizing MTR reactor uranium load with the use of MOX fuel by employing ORIGEN-S and MCNP4C codes, Annals of Nuclear Energy (83), 34-40.

[9] ALBARHOUM M., 2015 - Calculation of the effect of boron as impurity on the reactivity of the Miniature Neutron Source Reactors using the MCNP code, Progress in Nuclear Energy (81), 91-97.

[10] Dr. Ladislav Bělovský, ÚJV ŘEŽ,, 2019. THE ALLEGRO EXPERIMENTAL GAS-COOLED FAST REACTOR PROJECT. Czech Republic 20 March 2019

[11] Frank, J.Rahn, Achilles, G., Adamantiades, J. E. K., Chaim, B. (1984). A Guide to Nuclear Power Technology. New York, USA.

[12] Petr DARILEK, Radoslav ZAJAC, ALLEGRO - INTRODUCTION TO GFR, NIS—SK-

[13] IAEA, 2008.Thermophysical Properties of Materials For Nuclear Engineering: A Tutorial and Collection of Data. ISBN 978–92–0–106508–7 .© IAEA, 2008

[14] Branislav HATALA and Petr DAŘÍLEK , 2015. ALLEGRO Project EUROSAFE 2015.2nd - 3rd November 2015 Brussels Radoslav ZAJAC