ا مهورية العربية السورية
هيئة الطاقــة الذريــة

هـ ـ ط ذ س- هـ ـ ن/ ت د ع 706
كانون الثا 2006

تقرير عن دراسة علمية حاسوبية
قسم ا ندسة النووية

دراسة تأث إنتاج ا وليبدينيوم ^{99}MO على بعض مواصفات قلب مفاعــل البحــث باستخدام لغة ا اكاة DARE-P

إعداد

الدكتور إبراهيم يس
ا هندس حا عز الدين

هـ ـ ط ذ س- هـ ـ ن/ ت د ع 706

دراسة تأثير إنتاج الموليبدينيوم ^{99}Mo على بعض مواصفات قلب مفاعل البحث باستخدام لغة المحاكاة DARE-P

د. إبراهيم خميس و م. حاتم عزالدين
قسم الهندسة النووية – هيئة الطاقة الذرية – ص. ب 6091 – دمشق - سورية

المستخلص

جرى في هذه الدراسة البحث في أسس إنتاج الموليبدينيوم بطريقة تشعيع أهداف من اليورانيوم المخصب $^{235}U(n,f) \rightarrow {}^{99}Mo$ ودراسة تأثير بعض العوامل المؤثرة كالتدفق النتروني وزمن التشعيع والإغناء، وتم التوصل إلى أن إنتاج الموليبدينيوم يتطلب مفاعلات ذات تدفق نتروني عالي كما أن زيادة التدفق النتروني يؤدي إلى زيادة نشاطية ^{99}Mo وخاصة عند تدفقات أعلى من 10^{14} ، كما رأينا أن لزمن التشعيع عامل إيجابي وآخر سلبي على النشاطية، وبالتالي يجب تحديد الزمن الأمثل.

تمت نمذجة المعادلات التفاضلية المعبرة عن إنتاج ^{99}Mo لدراسة العوامل المؤثرة على إنتاج ^{99}Mo وخاصة تأثير التدفق النتروني وزمن التشعيع، إضافة إلى حساب كمية البلوتونيوم الناتجة عن التشعيع عند تخفيض نسبة الإغناء.

كما تمت دراسة إمكانية إنتاج ^{99}Mo في مفاعل منسر، حيث يمكن أن تصل النشاطية النوعية للموليبدينيوم إلى$[Ci/g_U{}^{235}]$ 0.3773 .ومن أجل الوصول إلى نشاطية 5000 كوري أسبوعياً في مفاعل مستقبلي وجدنا أنه يجب ان يتوفر فيه 8 مواقع تشعيع ويعمل عند تدفق نتروني 10^{14} وبوجود أهداف يحوي كل منها 5 $[g_U{}^{235}]$.

إن عمليات الحساب والمحاكاة جرت باستخدام لغة المحاكاة DARE-P التي جرى تحسينها وتطويرها في قسم الهندسة النووية, حيث تتمتع هذه اللغة بسهولة الاستخدام ومرونة النمذجة.

الكلمات المفتاحية: لغة المحاكاة، إنتاج الموليبدينيوم، التدفق النتروني، زمن التشعيع، النشاطية النوعية.

Study of the ^{99}Mo production effect on some of research reactor core specification using DARE-P

Dr. I. Khamis and Eng. H. Ezzuddin

Department of Nuclear Engineering, Atomic Energy Commission of Syria
P.O. Box 6091- Damascus , Syria

Abstract

In this study, the major basis of Mo- production using irradiation method for targets of enriched uranium is presented. Factors such as neutron flux, time of irradiation, and enrichment ration have also been analyzed. It was concluded that Mo-production requires nuclear reactors having high neutron fluxes, and that raising the neutron flux results in increasing the Mo-activities especially at fluxes that are higher than 10^{14} n.cm^{-2}.s^{-1} . Time of irradiation was found to have adverse i.e. positive and negative effects on Mo activity. Therefore, the optimum irradiation time should be determined. The Mo-production was modeled through a set of differential equation with respect to time with aim to study the most influencing factors on Mo production, especially the effects of neutron fluxe and time of irradiation. In addition, the mass of plutonium produced during the irradiation of low enriched uranium has been evaluated.

An investigation as to whether ^{99}Mo could be produced in the Syrian MNSR has been made. The result shows that a specific activity of 0.3773 Ci/g for ^{99}Mo could be produced. In future, a nuclear research reactor having neutron flux of 10^{14} n.cm^{-2}.s^{-1} and 8 irradiation sites suitable for targets of 5 g of ^{235}U could produce about 5000 Ci on a weekly.

Calculation and simulation have been achieved using the already developed DARE-P simulation language which was modified and improved in the Nuclear Engineering Department in the Atomic Energy Commission of Syria.

Key words: Simulation language, Mo-production, neutron flux, irradiating time, specific activity.

المحتويات

1 مقدمة

يعد الموليبدينيوم Mo99 (ذي عمر النصف 66 ساعة) المولد الطبيعي للتكنيشيوم $^{99}Tc^{m}$ المشع ذي الاستخدام الواسع في الطب النووي (يشكل أكثر من 80% من إجراءات الطب النووي التشخيصي) حيـث يتفكك هذا النيوكليد بنصف عمر يبلغ 6.02 ساعات. من بين الطرق المتبعة لإنتـاج كميـات معقولـة مـن الموليبدينيوم هناك طريقتين، وكلتاهما تعتمدان على النترونات الحرارية وهما[2]:

$^{98}Mo + n_{th} = {}^{99}Mo +$ أشعة غاما (1)

$^{235}U + n_{th} =$ نواتج الانشطار + نترون سريع + 3-2 (2)

تعتمد الطريقة الأولى $^{98}Mo(n,\gamma)^{99}Mo$ على تشـعيع كميـة مـن الموليبـدينيوم ^{98}Mo بنترونـات حرارية($E_{th}=0.0253$ eV) حيث يتم أسر تلك النترونات في الموليبدينيوم 98 وتحوله إلى الموليبدينيوم 99 خلال زمن محدد، حيـث يبلـغ مقطـع الامتصـاص للموليبـدينيوم ^{98}Mo[5] : $\sigma_{capture}=0.13$ barn، [1بارن=10^{-24} سم^{2}]

أما الطريقة الثانية $^{235}U(n,f)^{99}Mo$ فتعتمد على تشكل الموليبدينيوم99 من تفكك نـواتج الانشـطار الناتجة عن انشطار اليورانيوم235 بفعل النيترونات الحرارية(كما هو موضح في سلسلة التشكل) حيث يبلـغ المقطع الحراري لانشطار اليورانيوم 235: $\sigma_{fission}=582.2$ barn [5]. ويتم استخلاص الموليبدينيوم99 من خلال عمليات الفصل الكيميائي.

تعتبر المتطلبات التقنية لإنتاج ^{99}Mo من ^{98}Mo الطبيعي أكثر سهولة ومتاحة لمعظم البلـدان الناميـة التي تمتلك أو تشغل مفاعلات بحث، لكن الموليبدينيوم الناتج يكون ذو نشاطية نوعية منخفضة. بالمقابل فـإن إنتاج ^{99}Mo من انشطار ذرات اليورانيوم يؤمن نشاطية وكمية أكبر إلا أن ذلك يتطلب تقنية أكثـر صـعوبة وبالتالي من غير الممكن الحصول عليه إلا في البلدان التي تملك تقنية نووية عالية[7].

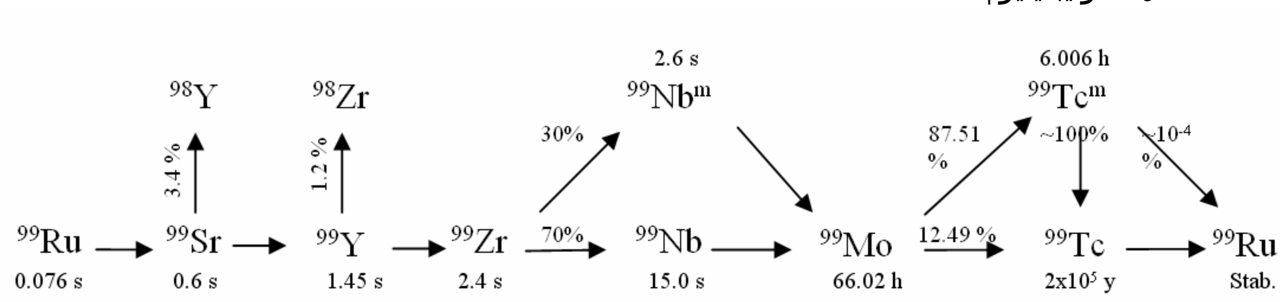
والمقصود بالنشاطية النوعية هي النشاطية الناتجة عن النظير المدروس والناتج بـدوره عـن تشـعيع 1[غ] يورانيوم235.

إن استخدام للمسرعات لهذه الأغراض هو قضية حازت على اهتمام علمي و تقني وهذا بـالنظر إلـى التقدم الحالي في تقنية المسرعات.

مما تقدم أعطت الوكالة الدولية أهمية لمتابعة التطورات الحالية في مجال إنتاج هذين النظيرين الهامين ^{99}mTc و ^{99}Mo من خلال مفاعلات البحث النووية والمسرعات، وخاصـة مـع ازديـاد الطلـب علـى الموليبدينيوم حيث تجاوزت احتياجات السوق 6000 كوري أسبوعياً[9].

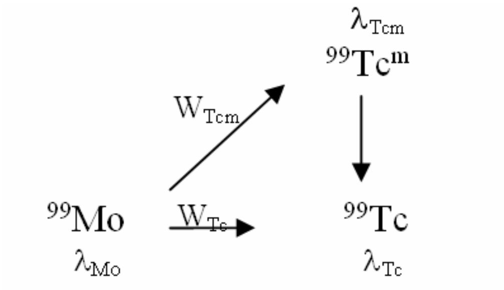
إن الكمية الكبيرة نسبياً للموليبدينيوم الناتجة من انشطار اليورانيوم235 سببها العدد الذري للموليبدينيوم المدروس A=99 حيث يبلغ خرج هذه النيوكليدات حـوالي 6.16 % [2]، وبمـا أن النيوكليـدات السـابقة للموليبدينيوم99 في سلسلة تشكله [6] قصيرة العمر فهي تتفكك جميعها لتتحول إلى الموليبدينيوم99 ذي عمر النصف الطويل نسبياً، هذا بالإضافة إلى النشاطية النوعية للموليبدينيوم الناتج بهذه الطريقة تزيد عن مثيلتهـا بأكثر من ألف مرة. لذلك فقد اعتمدنا هذه الطريقة كأساس في النمـوذج الرياضـي الـذي يصـف تشـكل الموليبدينيوم-99 من خلال المعادلات التفاضلية الخاصة بكل نيوكليد.

سلسلة تشكل الموليبدينيوم-99



سلسلة تشكل الموليبدينيوم99

وبتقريب بسيط يمكن اختصار السلسلة السابقة على اعتبار أن عمر النصف لكافة العناصـر السـابقة للموليبدينيوم99 صغير نسبياً (أي اعتبار أن الموليبدينيوم يتشكل مباشرة من انشطار ذرة اليورانيوم 35) إلى الشكل التالي:



وتكون المعادلات التفاضلية المعبرة عن تشكل كلاً من الموليبدينيوم99 والتكنيشيوم 99 والتي تمت برمجتهـا في لغة المحاكاة DARE-P :

$$\frac{dN_{Mo}}{dt} = \sigma_f \phi_{th} N_{U235} Y_{Mo} - \lambda_{Mo} N_{Mo} \qquad (3)$$

$$\frac{dN_{Tcm}}{dt} = \lambda_{Mo} N_{Mo} W_{Tcm} - \lambda_{Tc} N_{Tcm} \qquad (4)$$

$$\frac{dN_{Tc}}{dt} = \lambda_{Mo} N_{Mo} W_{Tc} - \lambda_{Tc} N_{Tc} \qquad (5)$$

حيث Y_{Mo} : نسبة تشكل الموليبدينيوم 99 من نواتج الانشطار

وقد أجريت دراسة حول إمكانية إنتاج الموليبدينيوم في مفاعل البحث MNSR في غانا(وهو مشـابه للمفاعل منسر السوري) باستخدام طريقة التشعيع النتروني لأهداف من MoO_3 (^{98}Mo) . وبينـت النتـائج إمكانية الحصول على مولدات التكنيشيوم ذات النشاطية النوعيـة التاليـة: ^{99}Mo, $0.537\ [mCi/g_U^{235}]$ و ^{99m}Tc, $0.392[mCi/g_U^{235}]$ وذلك عند تدفق نتروني حراري: $1x10^{12}\ [n.cm^{-2}.s^{-1}]$ ولثمانية أيام عمل وزمن تشعيع 2.5 ساعة يومياً [8].

أجريت عدة تحسينات و تعديلات على مولدات التكنيشيوم 99 منذ اكتشافها وهذا التطور الكبير أدى إلى زيادة الطلب على هذه المولدات حتى زاد حجم التجارة العالمية لهذه المادة في الربع الأخير من القرن الماضي عن 100 مليون دولار سنوياً [7]، حيث يتمتع التكنيشيوم بالميزات و الخصائص التالية:

- صغر عمر النصف
- الإطلاق الوافر من أشعة غاما منخفضة الطاقة نسبياً (141 keV)
- قليل السمية الإشعاعية.
- الاختفاء السريع من جسم المريض بسبب التفكك والتحول لعناصر مستقرة.
- انخفاض الجرعة الاشعاعية التي يتلقاها المريض (20-30 pSv/Bq).
- يملك خواص كيميائية مناسبة جداً لتحضير أنواع مختلفة من المستحضرات الصيدلانية الإشعاعية التشخيصية.

إن معظم الكميات المستخلصة من ^{99}Mo يتم إنتاجها بانشطار ^{235}U الموجود ضمن أهداف من اليورانيوم عالية الإغناء($HEU – 93\%$ ^{235}U).

ومن المعلوم أن العالم يسعى حالياً إلى الحد من انتشار الوقود عالي الإغناء، وبالتالي يتم العمل على تحويل الأهداف عالية الإغناء HEU الحالية إلى أهداف منخفضة الإغناء LEU ، وهذا التحول يتطلب تعديل عمليات الفصل . وما الهدف الرئيسي لبرنامج الإغناء المنخفض لمفاعل البحث والاختبار(RERTR) إلا تطوير التقنية المطلوبة لاستخدام يورانيوم منخفض الإغناء LEU بدل HEU في مفاعلات الاختبار والبحث.

2 ميزات مفاعلات البحث النووية المستخدمة لإنتاج نظير الموليبدينيوم99.

يعتمد إنتاج ^{99}Mo من أجل الطب النووي على أحدى العمليتين :

1- تحويل الذرة من ^{98}Mo بامتصاص نترون،

2- انشطار ^{235}U بعد امتصاصها أيضاً للنترون،

وبالتالي كلا العمليتين تحتاج إلى نترون واحد على الأقل لحدوث التفاعل. وبالرغم من أن هناك طرق عديدة لإنتاج النترونات (تنتج النترونات عندما ضرب جزيئات مشحونة بذرات ثقيلة ومن تفاعلات ألفا أو غاما مع ذرات خفيفة مثل البيريليوم أو الليثيوم)، إلا أنه ولإنتاج كميات كبيرة من النترونات المطلوبة لإنتاج كميات تجارية من ^{99}Mo فإن المصدر الأكثر فعالية هو مفاعل نووي يشغل عند طاقات في مجال الميغاوات.

إن الأهداف المستخدمة لإنتاج ^{99}Mo هي عموماً إما:

صفائح رقيقة من الوقود مغلفة بالألمنيوم أو خليطة U-Al أو قضبان صغيرة جداً تحوي وقود $U\text{-}Al_x$ مشابه لذلك المستخدم لتزويد المفاعل .

فيلم رقيق UO_2 مغاف على داخل أنبوب ستانلس ستيل .

خواص المفاعلات المستخدمة لإنتاج ^{99}Mo :

كل المفاعلات هي مصدر للنترونات ولكن ليست كلها مناسبة لإنتاج^{99}Mo. العوامل التي تحدد هذه الإمكانية هي[9]:

- مستوى الطاقة و التدفق النتروني المتاح لتشعيع الهدف، فمن المعلوم وكما سيأتي لاحقاً أن النشاطية النوعية للموليبدينيوم الناتج تتأثر بشكل واضح بقيمة التدفق النتروني، فمن أجل إنتاج كميات تجارية منه لابد من توفر تدفق نتروني عالي من مرتبة 10^{13} .

- مقدار الحجم الذي يمكن أن يتوضع فيه الهدف، فكلما زاد هذا الحجم كلما زادت الكمية المنتجة.

- إمكانية إزالة الحرارة من الهدف عندما تكون الأهداف نظائر قابلة للانشطار وبالأخص ^{235}U, وهذا أمر هام وخاصة إذا علمنا أن كمية الحرارة الناتجة عن الأهداف فـي المفاعـل يمكـن أن تصـل إلـى 200KW الأمر الذي يمكن أن يتطلب تبريداً قسرياً[9].

من المفاعلات التي تستخدم لإنتاج ^{99}Mo:

مفاعل NRU : يوجد هذا المفاعل في كندا وهو يشغل 80 % من إنتاج العالم لـ ^{99}Mo من انشطار ^{235}U وبدأ تشغيله في عام 1957 وهو مهدأ ومبرد بالماء الثقيل . يعمل عند حوالي 60 KW ويشعع حتـى 20 هدف لمدة من أسبوع لأسبوعين.

مفاعل HFR : يتوضع هذا المفاعل المتعدد الأغراض في هولندا وبدأ تشغيله في عام 1962 ويشغل حالياً عند 45MW وهو مفاعل مبرد ومهدأ بالماء الخفيف وله توضعات هائلة والتي تستخدم لإنتاج النظائر . الأهداف المستخدمة لإنتاج ^{99}Mo هي خليط يورانيوم ألمنيوم وغلاف ألمنيوم. واليورانيوم مغنى بشـكل كامل.

مفاعل HFIR : مهمة هذا المفاعل هو إحداث نظائر ذات عدد ذري عالي مع مصيدة تدفق مركزيـة مما يمكن من إنتاج أعلى تدفق نتروني حراري في العالم، العمل يتم حاليا لتشعيع ^{98}Mo لإنتاج ^{99}Mo ذي نشاطية نوعية عالية.

إضافة لذلك فقد دخلت المسرعات ميدان التنافس لإنتاج الموليبدينيوم وهناك تجارب وقياسات تجـري لتقييم إنتاج ^{99}Mo من خلال قذف ذرة ^{100}Mo بالبروتونات.

3 دراسة أثر نسبة إغناء اليورانيوم على إنتاج الموليبدينيوم ^{99}Mo .

عند دراسة أثر تخفيض نسبة إغنـاء اليورانيـوم علـى إنتـاج الموليبـدينيوم ^{99}Mo لنمـوذج مـن العينات(Targets) ذات كتلة 5.2 غ ونسبة إغناء عالية (90%) (4.7 غ U^{235}) عبر تخفيض الإغناء مع الحفاظ على وزن العينة الكلي (أي تخفيض الإغناء على حساب تخفيض كمية U^{235} في العينة) وذلك عنـد تدفق نتروني وزمن تشعيع ثابتين، تم الحصول على النتائج التالية بعد عملية المحاكاة:

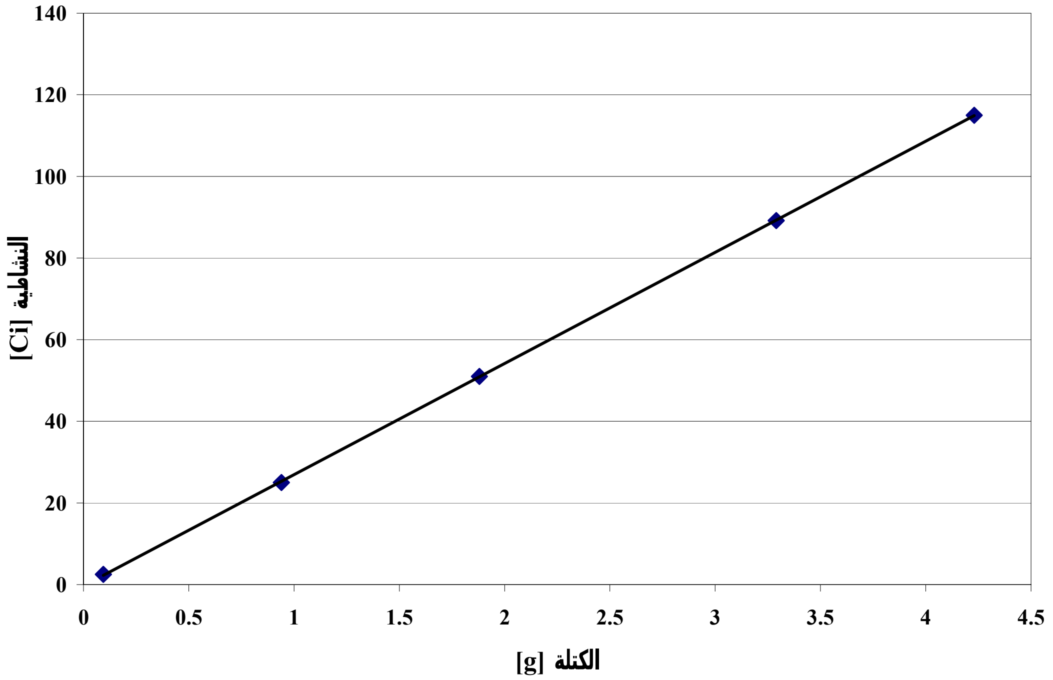
التدفق النتروني flux=1.0 x 10^{14} [n/cm^2.s]

زمن التشعيع t =150 [hours]

جدول 3-1

الإغناء %	الكتلة [g]	نشاطية ^{99}Mo [Ci]
90	4.23	115
70	3.29	89
40	1.88	51
20	0.94	25
2	0.094	2.5

نلاحظ أن نشاطية الموليبدينيوم الناتج تتناسب طرداً وبشكل خطي مع كمية اليورانيوم-235 الداخلة في تكوين العينة (الشكل(3-1)) بغض النظر عن نسبة الإغناء.وبالتالي نلاحظ انه ولإنتاج كميات مكافئة من ^{99}Mo من أهداف منخفضة الإغناء LEU يجب أن تحوي تلك الأهداف كمية ^{235}U أكبر بحوالي خمس مرات من تلك الموجودة في أهداف HEU التي تحل محلها.



الشكل (3-1)- علاقة النشاطية ^{99}Mo مع كتلة ^{235}U الداخلة في تركيب الهدف

إن استخدام أهداف LEU بدل HEU سيتطلب في معظم الحالات تغييرات في كلاً من العمليات الكيميائية والتصميمية للهدف، وبالتالي هناك ثلاث مسائل أساسية تجب معالجتها :

- تعديل الأهداف والعمليات أقل ما يمكن.
- ضمان منح عالي مستمر ونقاوة لمنتج ^{99}Mo.
- الحد من المساوئ الاقتصادية.

أحد الأمور المتعلقة باستخدام LEU لإنتاج ^{99}Mo هي الكمية الأكبر من ^{239}Pu المولدة. يتم توليد ^{239}Pu من خلال الأسر النتروني لـ ^{238}U .

وبحساب هذه النسبة بواسطة لغة المحاكاة DARE-P عند نفس كمية ^{235}U في كلا الهدفين(منخفض وعالي الإغناء) كانت لدينا النتائج التالية:

الجدول 3-2*

كتلة ^{239}PU [g]	نشاطية ^{99}Mo [Ci]	كتلة اليورانيوم في الهدف[g]	الإغناء %	كتلة ^{235}U [g]
$0.2x10^{-13}$	641	5.56	90	5
$6.1x10^{-13}$	640	25	20	5

*النتائج عند تدفق نتروني 10^{14} وزمن تشعيع 150 ساعة

بالنتيجة وجدنا أن كمية ^{239}Pu المتشكلة في هدف LEU أكبر بحوالي 30 مرة من تلك الكميـة فـي هدف HEU وذلك لإعطاء نشاطية مكافئة من ^{99}Mo.

4 دراسة حساسية بعض المتغيرات المتعلقة بكمية الموليبدينيوم المنتج مثل قيمة التدفق النتروني و زمن التشعيع وكمية المادة المشععة ، ..إلخ .

تمت نمذجة نوعين من عينات اليورانيوم المتوفرة لأغراض التشعيع في ملف الدخل :

جدول4-1

العينة الأولى		العينة الثانية	
الإغناء	91 %	الإغناء	20 %
الوزن الكلي	5.3 غرام	الوزن الكلي	9 غرام
وزن اليورانيوم الكلي	5.16 غرام	وزن اليورانيوم الكلي	8 غرام
وزن اليورانيوم (U_{235})	4.7 غرام	وزن اليورانيوم (U_{235})	1.58 غرام

وستتم دراسة إنتاج الموليبدينيوم في هاتين العينتين وذلك بالنسبة لبعض المتغيرات التابعة له.

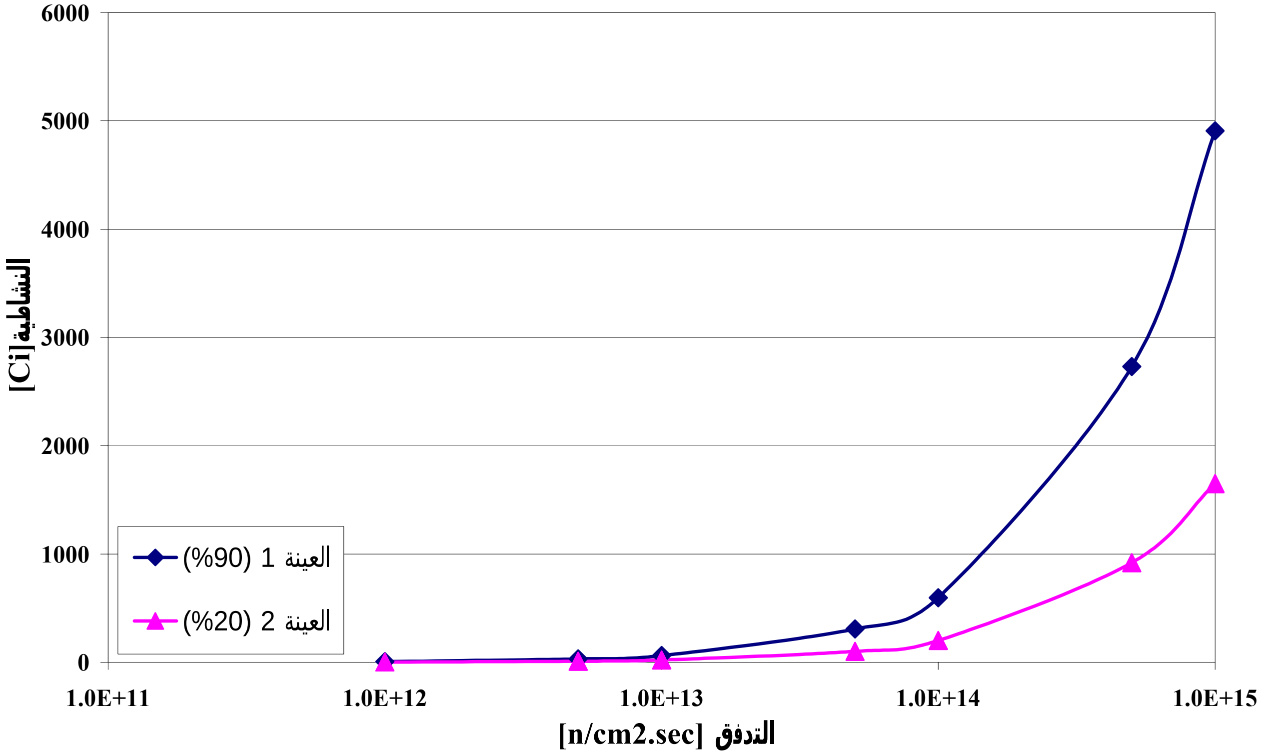
4-1 عند زمن تشعيع ثابت .

عند تشعيع أهداف من كلتا العينتين السابقتين بزمن تشعيع ثابت مقداره 150 ساعة ومن أجل تـدفقات نترونية مختلفة تم الحصول على النشاطية والنشاطية النوعية لكل حالة (جدول 4-2).

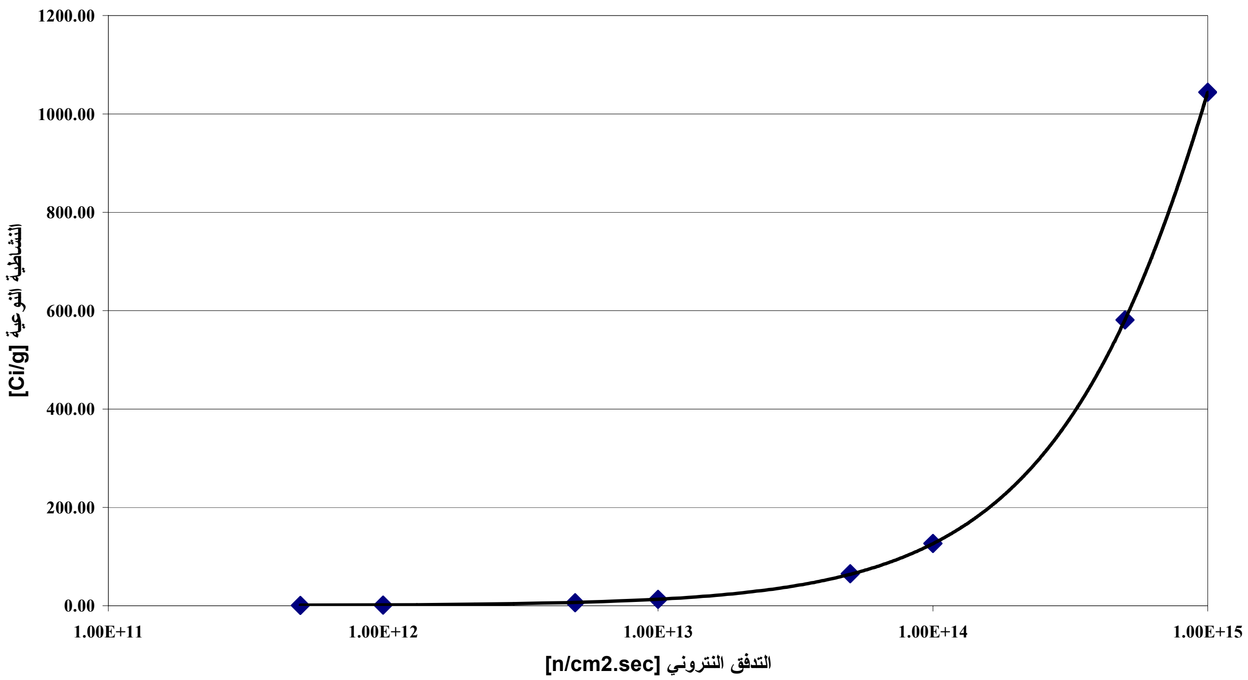
بالعودة للشكل (4-1,2) نلاحظ زيادة في قيمة النشاطية والنشاطية النوعية بزيادة التـدفق النترونـي وهذه الزيادة تكون تدريجية بالنسبة للتدفق دون 10^{14} ، أما عند زيادة التدفق عن تلك القيمة فمـن الملاحـظ الزيادة المطردة للنشاطية, وهذه القيمة للنشاطية تتعلق بكمية اليورانيوم في الهدف (الإغنـاء) فبزيـادة هـذه الكمية تزداد النشاطية.

جدول 4-2

التدفق	النشاطية		النشاطية النوعية
	العينة 1	العينة 2	$[Ci/g_U{}^{235}]$
5.00E+11	3.07	1.03	0.65
1.00E+12	6.14	2.06	1.31
5.00E+12	30.70	10.32	6.53
1.00E+13	61.40	20.64	13.06
5.00E+13	307.00	100.95	65.32
1.00E+14	596.00	201.89	126.81
5.00E+14	2731.00	920.67	581.06
1.00E+15	4907.00	1650.21	1044.04



الشكل(4-1)- علاقة النشاطية بالتدفق



الشكل(4-2)- علاقة النشاطية النوعية بالتدفق

2-4 عند تدفق ثابت.

عند تدفق نتروني ثابت مقداره 1×10^{14} [نترون/سم^2. ثا]. نجد أن تشعيع العينات السابقة عند الأزمنـة التالية يعطي النتائج التالية:

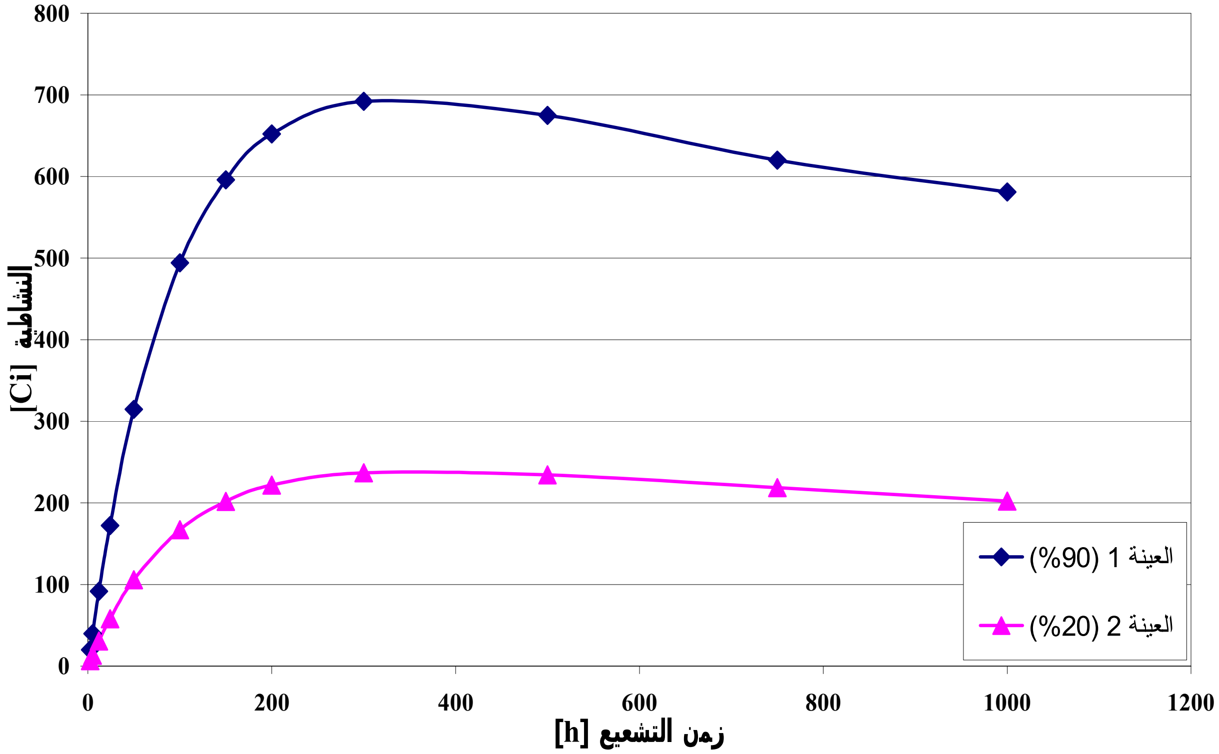
جدول 4-3

زمن التشعيع [h]	العينة 1 - 90% النشاطية الأعظمية [Ci]	العينة 2-20% النشاطية الأعظمية [Ci]	النشاطية النوعية $[Ci/g_U{}^{235}]$
2.5	20.1	6.8	4.28
5	39.7	13.3	8.44
12	91.7	30.9	19.52
24	172	58.0	36.67
50	315	106	66.94
100	494	167	105.11
150	596	202	126.81
200	652	222	138.72
300	692	237	147.23
500	675	234	143.62
750	620	219	131.91
1000	581	202	123.62

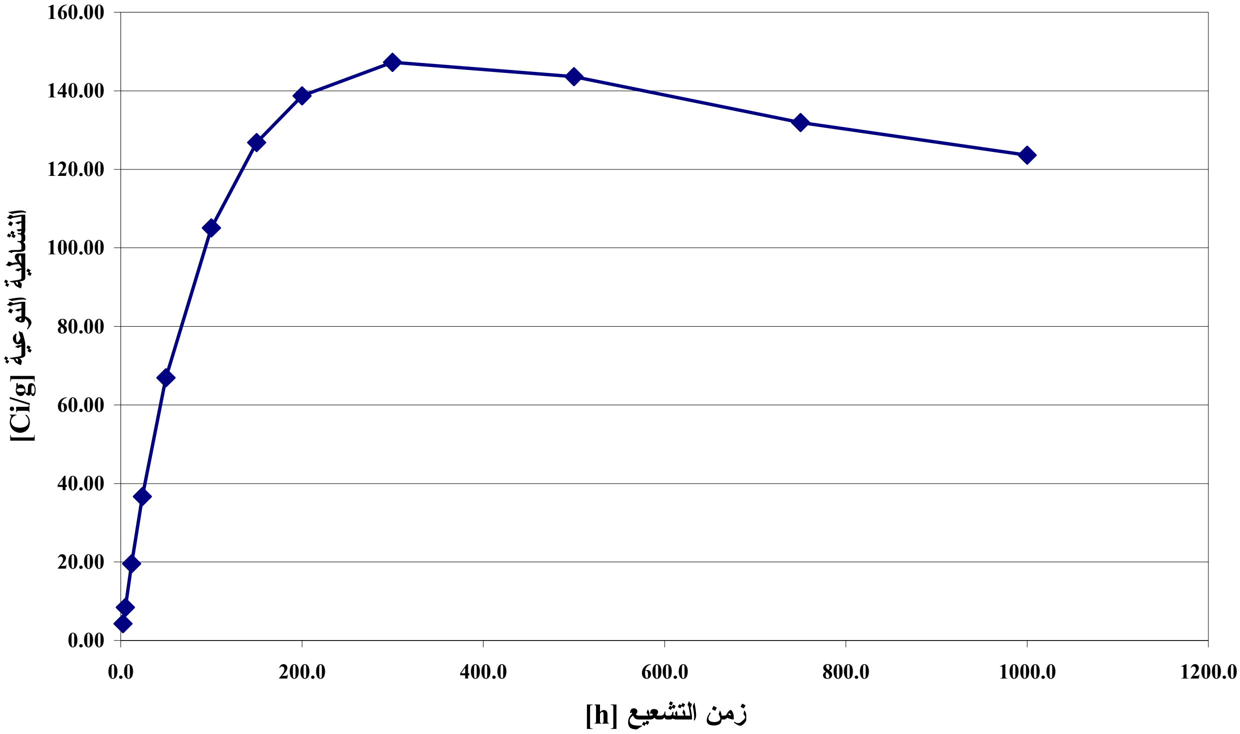
من دراسة النتائج وبالعودة للشكلين (4-3,4) نجد أن لزمن التشعيع تأثيراً كبيراً على النشاطية الناتجة وهذا التأثير ليس دائماً في الاتجاه الإيجابي، فبعد زمن معين حسب تركيب الهدف تبدأ النشاطية بالانخفاض.

وهذا يعود إلى أن تشكل الموليبدينيوم ناتج عن عاملين متعاكسين هما انشطار ذرات اليورانيـوم فـي الهدف وتفكك الموليبدينيوم مع الزمن(المعادلة (3))، وبالتالي هذان المعاملان يحددان كمية ^{99}Mo.

وبالتالي هناك زمن محدد يجب عنده إجراء عملية القطف، فمثلاً بعد مرور 300 ساعة (12.5 يـوم) على تشعيع الهدف (عند تدفق النتروني 10^{14}) تبلغ النشاطية ذروتها وعندها من المفضل البدء بإجراء العملية الكيميائية لاستخلاص ^{99}Mo ، لكن هذا الزمن تابع لعدة ظروف منها نسبة تفكك ^{99}Mo ونشاطيته النوعية، تكاليف الاستخلاص والإنتاج، إضافة لتكاليف تشغيل المفاعل، وهذه العوامل مجتمعة هي التي تحدد انتهـاء عملية التشعيع.



الشكل(4-3)- علاقة النشاطية مع زمن التشعيع



الشكل(4-4)- علاقة النشاطية النوعية مع زمن التشعيع

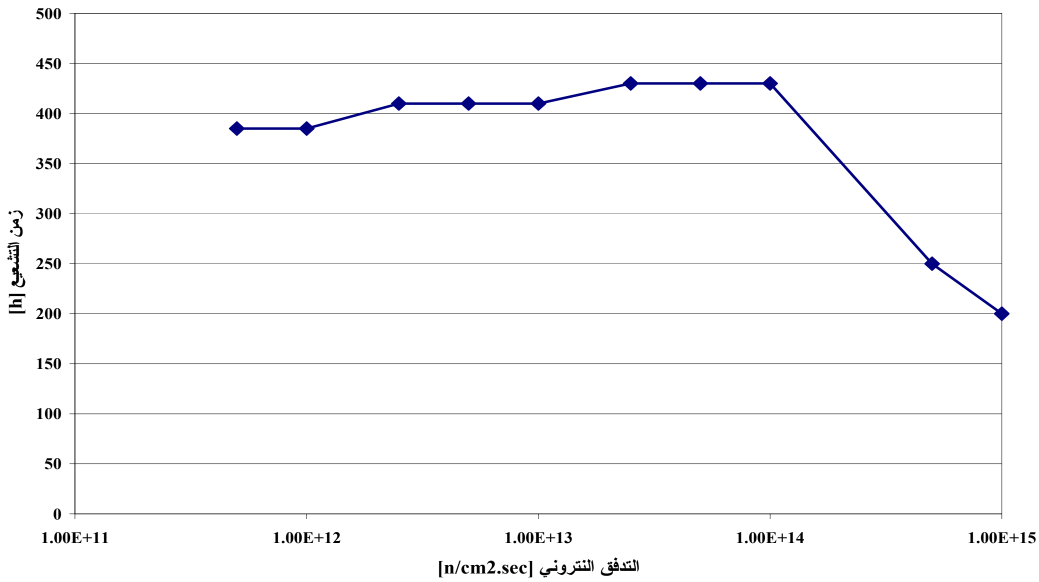
3-4 علاقة النشاطية النوعية الأعظمية بالتدفق وزمن التشعيع

لاحظنا في الفقرة السابقة أن النشاطية عند تدفق نتروني محدد تابعة لزمن التشعيع وتصل إلى قيمة أعظمية عند زمن معين، وبالتالي كان لابد من دراسة هذه المسألة للحصول على النشاطية الأعظمية الممكنة عند عدد من التدفقات النترونية ومعرفة الزمن اللازم للوصول إلى هذه القيم.

جدول 4-4

الزمن [hour]	النشاطية النوعية الأعظمية [$Ci/g_U{}^{235}$]	التدفق [n/cm2.sec]
385	0.81	5.00E+11
385	1.63	1.00E+12
410	4.09	2.50E+12
410	8.17	5.00E+12
410	16.34	1.00E+13
430	41.0	2.50E+13
430	82	5.00E+13
430	164	1.00E+14
250	670	5.00E+14
200	1157	1.00E+15

يبين الجدول 4-4 النتائج الرقمية لهذه الدراسة، والتي تظهر أن قيم النشاطية الأعظمية محدودة وتابعة للتدفق النتروني (بغض النظر عن زمن التشعيع). أي عند تدفق 10^{12} لا يمكن الوصول إلى نشاطية نوعية أعلى من 1.63 [كوري/غ $_U{}^{235}$] مهما كان زمن التشعيع. كما يمكن ومن الجدول السابق وضع مخطط (الشكل (4-5)) يربط بين التدفق النتروني وزمن التشعيع نستطيع من خلاله معرفة الزمن اللازم لتشعيع أي هدف للوصول للنشاطية النوعية الأعظمية وذلك بمعرفة قيمة التدفق النتروني المتاحة في المفاعل.



الشكل(4-5) – علاقة زمن التشعيع بالتدفق النتروني للوصول للنشاطية الأعظمية

5 دراسة إنتاج الموليبـدينيوم ^{99}Mo فـي مفاعـل منسـر باسـتخدام اليورانيوم235 كهدف(target).

من المعلوم أن مفاعل منسر هو من المفاعلات الصغيرة ويعمل باستطاعة 30KW و تدفق نترونـي 10^{12} [n/cm2.sec]. يحوي هذا المفاعل خمس مواقع تشعيع داخلية وأخرى خارجية. يبلـغ التـدفق فـي القنوات الداخلية 10^{12} [n/cm2.sec].

في هذا الجزء من الدراسة نبحث إمكانية إنتاج الموليبدينيوم في مفاعل منسر وما هي النشاطية المتوقع حدوثها، وذلك بافتراض وضع هدف من اليورانيوم-235 في إحدى قنوات التشعيع الداخلية مع تأمين تبريـد لهذا الهدف أو وضع الهدف في مكان قضيب الوقود. يعمل مفاعل منسر من 3-5 ساعات يومياً ولمدة 5-6 أيام أسبوعياً.

بداية نقوم بإجراء مقارنة حسابية بين طريقتي إنتاج ^{99}Mo في منسر (جدول 5-1)، الطريقة الأولـى والتي تعتمد على تشعيع أهداف ^{98}Mo والتي أجريت حسابياً على مفاعل منسر في غانا [8] (الشبيه بمفاعـل منسر السوري)، والطريقة الثانية المعتمدة على أهداف من اليورانيوم.

جدول 5-1

النشاطية النوعية عند نهاية التشعيع $[Ci/g_U{}^{235}]$	النشاطية النوعية عند بداية التشعيع $[Ci/g_U{}^{235}]$	الأيام
زمن التشعيع 2.5 ساعة يومياً		
5.457E-02	0.000E+00	1
9.697E-02	4.361E-02	2
1.299E-01	7.749E-02	3
1.557E-01	1.038E-01	4
1.754E-01	1.234E-01	5
1.911E-01	1.402E-01	6

وبالمقارنة مع نتائج تشعيع ^{98}Mo نجد أن النشاطية النوعية الناتجة عن ^{99}Mo لأهداف من اليورانيوم أعلى بـ 400 مرة من النشاطية النوعية الناتجة عن ^{99}Mo لأهداف من ^{98}Mo .

جدول 5-2

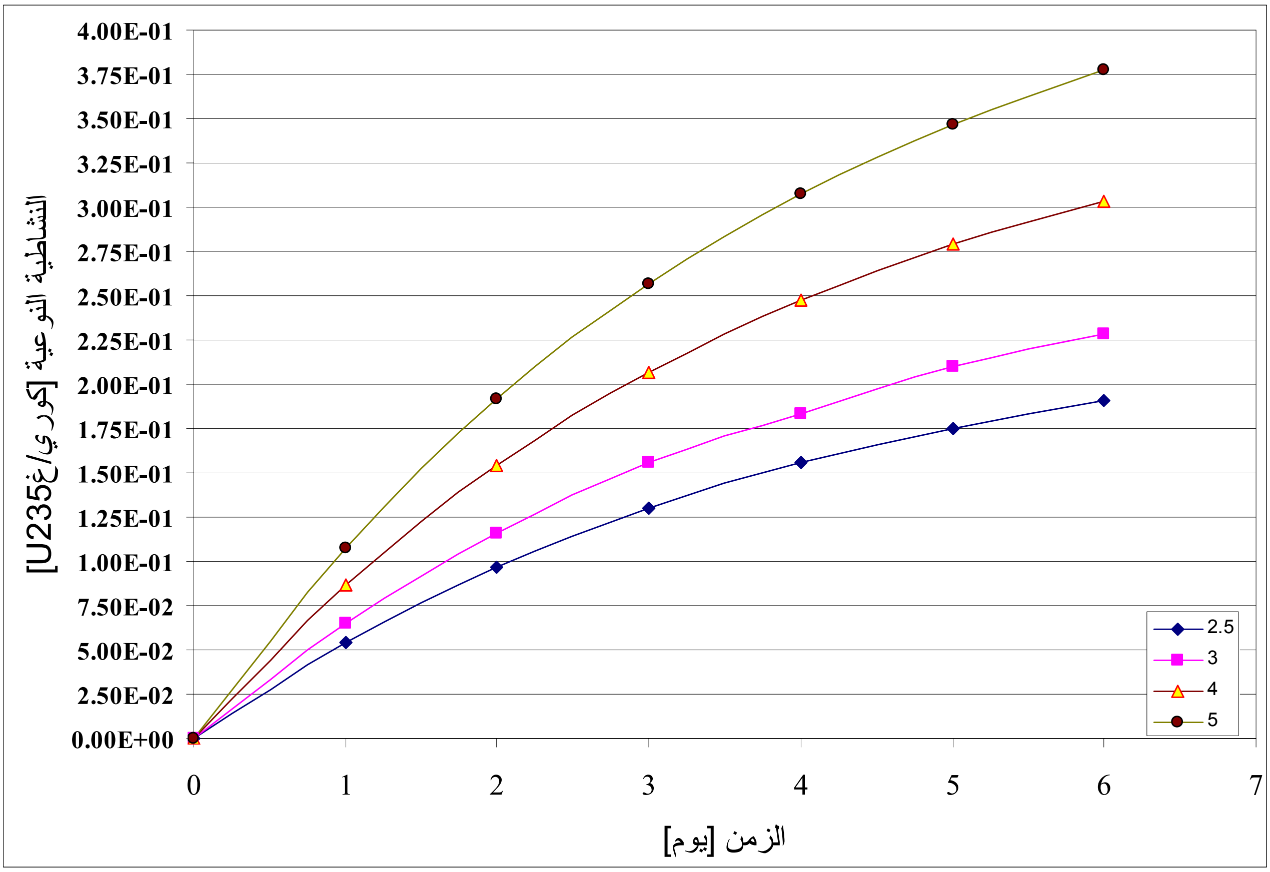
4.830E-04 [Ci]	Mo98---> Mo99	6 أيام 2.5 سا/يوم flux=1.0E12	منسر (غانا)
1.911E-01 [Ci]	U235---> Mo99	6 أيام 2.5 سا/يوم flux=1.0E12	منسر (سوريا)

بإجراء عملية المحاكاة لحساب النشاطية النوعية الناتجة عن ^{99}Mo عند أزمنة تشعيع مختلفـة (3-4-5) ساعات يومياً ولمدة 5-6 أيام أسبوعياً وتدفق نتروني 1×10^{12} $[n/cm^2.s]$ تم الحصول علـى النتـائج الواردة في الجدول 5-3.

بالنظر إلى الشكل (5-1) نجد أن النشاطية النوعية للموليبدينيوم تزداد بزيادة عدد ساعات التشعيع اليومية فضلاً عن عدد أيام التشغيل الأسبوعية، لتصل إلى أعظم قيمة لها وهي 0.3773 [كوري/غ$_{U^{235}}$].

جدول 5-3

زمن التشعيع اليومي [ساعة]	عدد أيام التشعيع الأسبوعي [يوم]	النشاطية النوعية[كوري/غ$_{U^{235}}$]
3	5	2.102E-01
	6	2.287E-01
4	5	2.788E-01
	6	3.034E-01
5	5	3.467E-01
	6	3.773E-01



الشكل(5-1)- علاقة النشاطية النوعية مع زمن التشعيع حسب ساعات التشغيل اليومية للمفاعل منسر

6 دراسة أثر إنتاج الموليبدينيوم على تصميم واستطاعة المفاعل

مر سابقاً أن كل المفاعلات هي مصدر للنترونات ولكن ليست كلها مناسبة لإنتاج^{99}Mo، وبالتالي هناك عوامل تحدد أو تفرض على المفاعل تأمينها من حيث التصميم ليتم فيه إنتاج الموليبدينيوم ومن هذه العوامل مستوى الطاقة و التدفق النتروني المتاح لتشعيع الهدف، وبالتالي يجب أن يتمتع المفاعل بقيمة تدفق نتروني عالي من أجل إنتاج كميات تجارية منه، فكما رأينا أنه من الصعوبة بمكان إنتاج هذه الكميات عند تدفق نتروني اقل من 1×10^{14} (الشكل(4-2)). وأيضا مقدار الحجم الذي يمكن أن يوضع فيه الهدف، أي أن عدد وأحجام مواقع التشعيع يجب أن تؤخذ بعين الاعتبار عند تصميم المفاعل فكلما زاد هذا الحجم أو زاد عددها كلما زادت الكمية المنتجة. كما ويجب إيجاد وسيلة لإزالة الحرارة من الهدف عندما تكون الأهداف نظائر قابلة للانشطار وبالأخص ^{235}U، فكما هو معروف أن انشطار ذرات اليورانيوم يولد حرارة عالية تجب إزالتها باستمرار.

أجريت عملية المحاكاة لحساب عدد مواقع التشعيع اللازمة للحصول على حوالي 5000 كوري* أسبوعياً (5-6 يوم بالأسبوع بشكل مستمر) من مفاعل يعمل عند تدفقات نترونية من 10^{13} إلى 2.5×10^{14} من أجل كميات (5 و 10 غرام)من الوقود U^{235} .

جدول 6-1

التدفق	5 أيام: النشاطية الكلية	5 أيام: عدد مواقع التشعيع	6 أيام: النشاطية الكلية	6 أيام: عدد مواقع التشعيع
كتلة اليورانيوم 235 في موقع التشعيع 5 غ				
1.00E+13	59.13	84.57	64.38	78
2.50E+13	148.00	33.78	160.88	31
5.00E+13	295.88	16.90	322.00	16
7.50E+13	443.88	11.26	482.88	10
1.00E+14	578.63	8.64	626.13	8
2.50E+14	1446.63	3.46	1564.75	3

جدول 6-2

التدفق	5 أيام: النشاطية الكلية	5 أيام: عدد مواقع التشعيع	6 أيام: النشاطية الكلية	6 أيام: عدد مواقع التشعيع
كتلة اليورانيوم 235 في موقع التشعيع 10 غ				
1.00E+13	119	42	129	39
2.50E+13	297	17	322	16
5.00E+13	592	8	644	8
7.50E+13	888	6	966	5
1.00E+14	1159	4	1254	4
2.50E+14	2898	2	3135	2

نلاحظ من الجدول 6-1 أنه عند تدفق نتروني 10^{14} وهدف يحوي 5 غ يورانيوم 235 يمكن الوصول إلى نشاطية 5000 كوري أسبوعياً إذا توفر 8 مواقع تشعيع داخل المفاعل،

* أخذت هذه القيمة لتكون مرجعاً لأي مفاعل مستقبلي حيث يمكن النسب إليها في حال كان المطلوب أقل من ذلك.

7 الخلاصة والتوصيات

يتم إنتاج ^{99}Mo بطريقتين، إما بتفاعل $^{98}Mo\ (n,\gamma)\ ^{99}Mo$ أو $^{235}U(n,FP) \rightarrow\ ^{99}Mo$ ، و الطريقة الثانية أكثر فعالية وانتشاراً ولكن تتطلب مفاعلات ذات تدفق نتروني عالي، إضافة إلى بعض المواصفات الضرورية لإنتاج الموليبدينيوم. وقد تمت نمذجة المعادلات التفاضلية المعبرة عن إنتاج ^{99}Mo بالطريقة الثانية لدراسة العوامل المؤثرة على إنتاج ^{99}Mo وخاصة تأثير التدفق النتروني وزمن التشعيع. وتوصلنا إلى أن زيادة التدفق النتروني يؤدي إلى زيادة نشاطية ^{99}Mo وخاصة عند تدفقات أعلى من 10^{14} ، كما رأينا أن لزمن التشعيع عامل إيجابي وآخر سلبي على النشاطية، وبالتالي يجب تحديد الزمن الأمثل.

كما تمت دراسة إمكانية إنتاج ^{99}Mo في مفاعل منسر، حيث يمكن أن تصل النشاطية النوعية للموليبدينيوم إلى[Ci/g] 0.3773 .

كما تبين أنه من الممكن الوصول إلى نشاطية 5000 كوري أسبوعياً في مفاعل يتوفر فيه 8 مواقع تشعيع ويعمل عند تدفق نتروني 10^{14} وبوجود أهداف يحوي كل منها 5 $[g_{U}^{235}]$.

إن عمليات الحساب والمحاكاة جرت باستخدام لغة المحاكاة DARE-P التي جرى تحسينها وتطويرها في قسم الهندسة النووية, حيث تتمتع هذه اللغة بسهولة الاستخدام ومرونة النمذجة، لذلك يوصى بنشر هذه اللغة لتكون متاحة للجميع. كما يوصى بمتابعة هذه الدراسة عن الموليبدينيوم والعوامل الداخلة والمؤثرة في إنتاجه وطرق استخلاصه لما له من أهمية عالمية ووطنية خاصة في حال التفكير في امتلاك مفاعل في المستقبل.

8 المراجع

1. تحسين لغة المحاكاة DARE-P لتصبح تخاطبية وتصميم واجهة لها في بيئة النوافذ
د. ابراهيم خميس، م. حاتم عزالدين
هـ ط ذ س – هـ ن/ت د ع 606 - 2005

2. Assessment of molybdenum-99 production from high-enriched uranium (HEU) targets in comparison with that of low-enrich uranium (LEU) targets
Z.I. Kolar, W.J.C. Okx and J.L. Kloosterman
Delft, Netherland, 2002

3. Interoduction to nuclear engineering
Raymond L. Murray
New jercy, 1961

4. Activation spectrometry in chemical analysis
Susan J. Parry
USA, 1991

5. Защита от ионизирующих излучений
В. П.Машкович, А. В. Кудрявцева
Масква,1995

6. Радиоактивные цепочки
Н. Г. Гусев, П. П. Демктриев
Масква,1978

7. Radiochimica acta, Radionuclide generator technology
Munchen 1987 Vol 41 no 2/3
Jornal of radioanalytical and nuclear chemistry, Articles, vol. 198, No. 2(1995) 393-397

8. The feasibility of production a ^{99}Mo : ^{99m}Tc generator using the Miniature Neutron Source Reactor (MNSR)- Ghana
E. K. Osae

9. Production tecnologies foe molybdenum-99 and technetium-99 -Tec Doc 1065
IAEA-Vienna 1999

Syrian Arab Republic
Atomic Energy Commission(AECS)
Damascus P. O. Box 6091

Report on Scientific Informatic Study
Department of Nuclear Engineering

Study of the ^{99}Mo production effect on some of research reactor core specification using DARE-P

Dr. I. Khamis
Eng. H. Ezzuddin

AECS - NE \ RSS 706 December 2006