المجلة الأردنية للفيزياء

ARTICLE

دراسة نظرية لإمكانية الحصول على النظير المشع ¹³N للتطبيقات الطبية باستخدام جهاز البلازما المحرقية الكثيفة

Doi	: https://doi.org/10.47011/13.4.3
	وليد مصطفى صهيوني [°] ، علاء عاطف ناصيف ^d
	a قسم الفيزياء، جامعة البعث، حمص، سوريا.
	b كلية الهندسة، الجامعة الوطنية الخاصة، حماة، سوريا.
Received on: 27/2/2018;	Accepted on: 10/4/2018

الملخص: يهدف البحث إلى دراسة خصائص حزمة أيونات الديتيريوم الصادرة عن قبضة البلازما (Pinch) المتشكلة في جهاز البلازما المحرقية الكثيفة عند استخدام غاز الديتيريوم في عملية التشغيل باستخدام برنامج Lee الحاسوبي، ودراسة تفاعل حزمة الأيونات هذه مع هدف من الغرافيت لإحداث التفاعل (d,n) وإنتاج النظير المشع N¹¹ (الأمونيا)، ثم ودراسة تفاعل حزمة الأيونات هذه مع هدف من الغرافيت لإحداث التفاعل (d,n) وإنتاج النظير المشع N¹¹ (الأمونيا)، ثم حساب النشاط الإشعاعي للنظير المشع N¹¹ (الأمونيا)، ثم حساب النشاط الإشعاعي للنظير المشع الناتج، وهل يحقق شروط استخدامه في التصوير المقطعي بالإصدار البوزيتروني حساب النشاط الإشعاعي للنظير المشع الناتج، وهل يحقق شروط استخدام هذه التقنية في انتاج النظائر المشعة قصيرة الأجل (A) وبالتالي استخدام هذه التقنية في انتاج النظائر المشعة قصيرة الأجل (A) النشاط الإشعاعي للنظير المشع الناتج، وهل يحقق شروط استخدام هذه التقنية في إنتاج النظائر المشعة قصيرة الأجل (A) وبالتالي استخدام هذه التقنية في إنتاج النظائر المشعة قصيرة الأجل (A) وباتالي استخدام هذه التقنية في إنتاج النظائر المشعة قصيرة الأجل (A) وباتالي استخدام هذه التقنية في إنتاج النظائر المشعة قصيرة الأجل (A) وباتالي استخدام هذه التقنية في إنتاج النظائر المشعة قصيرة الأجل (A) ومعدرك ومن حكرار مختلفة. وتم الحصول على أعلى قيمة للنشاط الإشعاعي للنظير المشع N¹¹ عند أزمنة تعرض ومعدلات تكرار مختلفة. وتم الحصول على أعلى قيمة للنشاط الإشعاعي ومالا الأسعامي الأ عند زمن تعرض مقداره تعرض ومعدلات تكرار مختلفة. وتم الحصول على أعلى قيمة النشاط الإشعاعي ومالا المنع الأ عند زمن تعرض مقداره ومعدلات تكرار مختلفة. وتم الحصول على أعلى قيمة المطلوبة لاستخدام النظير المشع الأ في تقنية مقداره ومعدل تكرار مذات 104 ما القيمة أقل من القيمة المطلوبة لاستخدام النظير المشع الأ في تقنية من القرمة المطلوبة الملوبة المن القيمة المطلوبة وستخدام النظير المشع الأ ما التصوير المطلوبة المدورة وما معاد أول الأ ما المن القمة أول من القيمة المطلوبة الملوبة المنع الما والي ما معال ال ما مع ما الأ من القيمة المطلوبة المام الإمام الما الأ ما ما القيم ألما الإسعامي المام الما والما ما ما ما مان ما مان ما ومان ما مان ما مان ما مان ما وال ما ما ما ما ما مان ما وما ما ما ما والوما ما م

الكلمات الدالة: جهاز البلازما المحرقية الكثيفة، برنامج Lee، النشاط الإشعاعي.

A Theoretical Study of the Possibility of Obtaining the Radioisotope ¹³N for Medical Applications Using Dense Plasma Focus Device

Walid Sahyouni^a and Alaa Nassif^b

a Physics Department, Al-Baath University, Homs, Syria. b Faculty of Engineering, Al-Wataniya Private University, Hama, Syria. Email: Alaa.nassif@wpu.edu.sy

Extended Abstract

The aim of this research is to study the possibility of obtaining the short-lived radioisotope ¹³N by colliding with a deuterium ion beam emitted by an NX2 dense plasma focus device with a graphite target, as a technique alternative to the traditional technique for getting short-lived radioisotope (SLR) accelerators.

Lee code was used to study the properties of the plasma pinch, which is the source of deuterium ion beams. Then, a function of distributing the beam energy and stopping power was found within the graphite using SRIM program. The reaction cross-section was also found from an EXFOR database and the radiative yield of the reaction was calculated.

The radioactivity of ¹³N was calculated and found to be equal to $A = 4.14 \times 10^3$ Bq.

The effect of the change in deuterium gas pressure on the radioactivity was studied and it was found that the best value for the pressure is 3 Torr, where the number of deuterium ions is the greatest amounting to 3.12×10^{11} ions and thus the radioactivity increased to 5.616×10^3 Bq.

The effects of repetition rate of the studied dense plasma focus device and the exposure time of the graphite target to deuterium ions were studied. The radioactivity was calculated at repetition rates (1,5,10,16) Hz and exposure times (30,60,600) sec., where we noticed an increase in the value of radioactivity at a repetition rate of 16 Hz and an exposure time of 600 sec., reaching to 28791×10^3 Bq.

To obtain a radioactivity value for ¹³N suitable for use in PET technique, the radioactivity value was calculated at high repetition rates (50,100,500) Hz and exposure times (30,60,600) sec. We obtained the value of radioactivity 527×10^6 Bq at a repetition rate of 500 Hz and an exposure time of 300 sec. and this value is suitable for use in PET technique. However, there are technical difficulties in the studied dense plasma focus device to obtain a high repetition rate of this value.

The radioactivity of ¹³N was calculated at very high times of exposure of the graphite target to deuterium ions (1000, 1500, 2000, 2500, 3000) sec. at the repetition rates of the device studied. The highest radioactivity value obtained was 55.79×10^6 Bq at an exposure time of 3000 sec. and this value is less than the required value for the required use in PET technique.

Keywords: Dense plasma focus device NX2, Lee code, Radioactivity.

المقدمة

(coronary) (CAD)؛ إذ يرتبط تركيز الأمونيا في أنسجة القلب خطياً مع تدفق الدم. فعند معدلات تدفق الدم العالية يحدث امتصاص غير خطى للأمونيا من قبل هذه الأنسجة، وتُظهر مناطق ضخ الدم المنخفضة (المناطق المريضة) نشاطًا اشعاعيًا أقل، وهذا بدوره يساعد في تقييم عيوشية عضلة القلب [2]. إن لعملية التصوير المقطعى بالإصدار (Positron Emission Tomography) البوزيتروني (PET) باستخدام النظير المشع ¹³N مزايا عديدة أهمها: المساعدة فى تحديد مناطق ضخ الدم المنخفض فى عضلة القلب، بالإضافة إلى وجود قدرة تباين زمنى (temporal resolution) عالية، وهذا يساعد على أخذ عينات في عدة ثوان، وبالتالى يسمح بإجراء قياسات مباشرة لمناطق تدفق الدم، كما يمكن استعمال النماذج الحركية للمواد المشعة من إجراء التقييم الكمى لتدفق الدم. وبسبب نصف العمر القليل للنظير المشع ¹³N البالغ حوالي .10 min يتحول خلال هذه الفترة إلى يوريا وأحماض أمينية معتدلة وحمضية يتم طرحها خارج الجسم. وتقدم هذه الميزات للأطباء إمكانية الحصول على معلومات هامة لتقييم حالة المرضى الذين يشتبه بوجود أمراض الشرايين الإكليلية (CAD) لديهم [2].

تم إجراء العديد من الدراسات والأبحاث التجريبية والعددية من أجل دراسة إمكانية استخدام أجهزة البلازما المحرقية منخفضة الطاقة لإنتاج النظائر المشعة قصيرة العمر (SLR). فقد درس Bienkowska وآخرون [3]

ازداد في السنوات الأخيرة الطلب على النظائر المشعة قصيرة العمر (SLR) (Short-lived radioisotopes) بشكل ملحوظ، وذلك لأهميتها فى التطبيقات الطبية، وخصوصاً في الطب النووي وفي التشخيص الطبي من خلال التصوير المقطعى بالإصدار البوزيترونى (Positron Emission Tomography PET)، ولكن هذه الزيادة في الطلب على استخدام هذه النظائر لم تترافق مع تطور تقنيات الإنتاج؛ إذ إن الطريقة التقليدية للحصول على هذه النظائر المشعة تتم من خلال قذف أهداف بحزم من الأيونات ضمن المسارعات (accelerators)، ولكن تكلفة هذه الطريقة فى الإنتاج ضخمة جداً وتحتاج لأبنية خرسانية ضخمة للتدريع، واستخدام عدد كبير من العاملين، وتكلفة صيانة مرتفعة، كما أن هذه النظائر تتميز بعمر النصف القصير، وبالتالي يجب إنتاجها بالقرب من أماكن استخدامها وهذا يتطلب وجود المسارعات ضمن المستشفيات، وهذا أمر صعب التحقيق. كل هذه الأسباب دفعت للتفكير في البحث عن تقنيات إنتاج أخرى، وهنا تطرح أجهزة البلازما المحرقية الكثيفة (DPF) نفسها كطريقة بديلة محتملة لإنتاج هذه النظائر المشعة، وذلك نظراً لتكلفتها المنخفضة نسبياً مقارنة بالمسارعات، وعدم وجود نواتج إشعاعية ضارة [1].

يستخدم النظير المشع ¹³N (الأمونيا) في عملية تصوير (PET) لتقييم عيوشية العضلة القلبية (تدفق الدم) artery disease) عند تضيق الشرايين الإكليلية

إنتاج النظائر المشعة من جهاز البلازما المحرقية PF-150 A=2.8×10⁴ إشعاعي نشاط إشعاعي (20 kJ) Bq. كما درس Roshan وآخرون [4] استعمال جهاز البلازما المحرقية NX2 (1.7 kJ) تجريبياً من أجل الحصول على النظير المشع ¹³N وسجلوا أعلى نشاط إشعاعى 40 kBq وتوقعوا الحصول على نشاط يصل إلى 10 MBq عند استخدام معدل تكرار Hz وفترة تعرض .600 sec. وأجرى Akel وآخرون [5] سلسلة من التجارب العددية على جهاز البلازما المحرقية الكثيفة Lee باستخدام برنامج Lee وتوصلوا إلى (1.7 kJ) NX2 نشاط إشعاعي مقداره 1.03 kBq عند معدل تكرار 1 Hz، و0.443 MBq عند معدل تكرار (Hz) وفترة تعرض .600 sec، ونشاط مقداره 4.5 MBq عند معدل تكرار Hz، وفترة تعرض .600 sec، ونشاط مقداره 600 عند معدل تكرار 16 Hz وفترة تعرض 7.5 MBq .sec. وتحقق Saed وأخرون [1] عددياً من إمكانية إنتاج النظير ¹³N من أجهزة البلازما المحرقية الكثيفة وتوصلوا إلى نشاط إشعاعى مقداره 0.2 MBq عند معدل تكرار 1 Hz وفترة تعرض .600 sec، وارتفع هذا النشاط إلى MBq عند معدل تكرار MBq.

سنقوم في هذه الدراسة بالبحث عن إمكانية الحصول على النظير المشع 13 بواسطة جهاز البلازما المحرقية الكثيفة NX2 من خلال اصطدام حزم الديترونات الناتجة عن انهيار قبضة البلازما عند استخدام غاز الديتيريوم، وتسريع هذه الأيونات بالكمون الناتج بعد الانهيار بهدف من الغرافيت وحدوث التفاعل $^{12}C(d,n)^{13}$ ، إذ إن هذا التفاعل هام للغاية بسبب طاقة العتبة المنخفضة (240 mbarns) والمقطع العرضي الكبير(240 mbarns)

الإشعاعي لهذا النظير والبحث في استخدامه في عملية التصوير المقطعي بالإصدار البوزيتروني (Positron) Emission Tomography PET).

المواد المستخدمة: برنامج Lee الحاسوبي؛ قاعدة بيانات EXFOR؛ برنامج SRIM.

طرق البحث

Dense) آلية عمل جهاز البلازما المحرقية الكثيفة (Plasma Focus DPF)

يتكون جهاز البلازما المحرقية الكثيفة (الشكل 1) من قطبين محوريين أسطوانيين معزولين كهربائيا من إحدى النهايات والنهاية الأخرى مفتوحة، وتوضع هذه المجموعة من الأقطاب ضمن حجرة مفرغة تحتوى على غاز تحت ضغط معين. عند إغلاق القاطعة، فإن كمونا من مرتبة عشرات kV يتم تطبيقه بين الأقطاب، حيث تنتقل الطاقة المخزنة كهربائيا فى بنك المكثفات إلى الأقطاب وتتشكل طبقة من البلازما بينهما، وتتحرك هذه الطبقة محوريا بسبب قوة لورنتز (J × B). وعند الوصول إلى نهاية الأقطاب تنهار هذه الطبقة قطريا نحو محور المصعد حيث تتقبّض (pinched) بسبب الحقول الكهرطيسية وتتشكل قبضة بلازما (Pinch) حارة وكثيفة، وتستمر هذه القبضة لمدة عشرات نانو ثانية ثم تنهار هذه القبضة بسبب لا استقرارات البلازما (لا استقرار من النوع Sausage m = 0) ويتولد نتيجة لذلك كمون عال (هذا الكمون يكون أعلى بكثير من كمون بنك المكثفات المستخدم في عملية التشغيل). ولذلك تتسرع الإلكترونات باتجاه المصعد والأيونات بالاتجاه المعاكس، وهذه الألية مشابهة لعمل الثنائي (diode) بسبب الاختلاف بين كتل الإلكترونات والأيونات [6].



الشكل 1. مخطط لجهاز البلازما المحرقية الكثيفة وتشكّل قبضة البلازما (Pinch).

جهاز البلازما المحرقية الكثيفة NX2

تقوم دراستنا على إجراء سلسلة من التجارب العددية على جهاز البلازما المحرقية الكثيفة NX2؛ الذي هو عبارة عن جهاز بلازما محرقية مركّز (NX2 فاز النيون من (focus (CPF) يعمل أساساً باستخدام غاز النيون من أجل توليد SXR، ولكن يمكن استعمال غازات أخرى منها غاز الديتيريوم. آلية عمل هذا الجهاز مشابهة لأجهزة البلازما المحرقية التقليدية ضمن مرحلتين شعاعية ومحورية، ولكن ما يميزه من الناحية التقليدية بمكثفة في بنك المكثفات، حيث تعمل الأجهزة التقليدية بمكثفة

وحيدة، بينما يعمل جهاز NX2 بمجموعة من المكثفات مرتبة بشكل متواز لتقليل التحريض الكهربائي الساكن (الضائع) L₀ في الدارة الخارجية إلى أقل من 15nH. وتُستخدم مجموعة من 12 مكثفة سعة كل منها 0.6μF مرتبة كما في الشكل (2). يعمل هذا الجهاز بتردد تكراري مقداره Hz ليك الك (2). يعمل هذا الجهاز بتردد العالي عند كمون تشغيل مقداره 11.5kV. وبسبب التردد العالي في جهاز NX2، فإن أقطاب الستانلس ستيل تحتاج لتبريد بالماء لتجنب التسخين الزائد [7].



الشكل 2. مخطط جهاز البلازما المحرقية الكثيفة (NX2).

إيجاد تابع توزع الطاقة لأيونات الديتيريوم

تمت دراسة خصائص حزم الأيونات عالية الطاقة الصادرة عن أجهزة البلازما المحرقية في العديد من التجارب، ووجد أن الطيف الأيوني يعتمد على طاقة الأيون من خلال قانون تناقص الطاقة:

$$\frac{dN_i}{dE_i} \propto E_i^{-m} \tag{1}$$

حيث N_i عدد الديترونات الساقطة على الهدف، والأس m يقع ضمن المجال (2-9) وهو يعتمد على مجال الطاقة المدروس [8]. وبأخذ قانون توزع الطاقة

للديترونات بعين الاعتبار، فإنه يمكن كتابة تابع توزع الطاقة بالعلاقة:

$$f(E) = \frac{dN_i}{dE} = C.E^{-m}$$
⁽²⁾

وهنا تجدر ملاحظة أن طيف الديترونات الساقطة على الهدف يختلف عن طيف الديترونات الصادرة عن قبضة البلازما لسببين: الأول أن طيف الطاقة يعتمد على زاوية إصدار الديترونات، وذلك حسب آلية التسريع وهذه الألية توجد عدة نماذج مقترحة لتفسيرها، والثاني هو تفاعل الديترونات مع الغاز المتبقي ضمن حجرة التفريغ، وهذا يقلل من طاقتها، ولكن هذا الانخفاض في الطاقة قليل جداً، ولذلك يمكن إهماله في حساباتنا. فقد وجد مثلاً أنه

من أجل ديترونات ذات طاقة (400keV) تعبر مسافة (20cm) من غاز الديتيريوم بضغط (3Torr)، فإن فقدان الطاقة كان بحدود (6keV)، وهذا قليل جداً مقارنة مع الطاقة الكلية للديترونات [9,8]. وبإجراء التكامل:

$$dN_{i} = CE^{-m} dE \Longrightarrow$$
$$N_{i} = \int_{0}^{N_{i}} dN_{i} = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} CE^{-m} dE \Longrightarrow N_{i} = \left[C \frac{E^{1-m}}{1-m}\right]_{E_{\min}}^{E_{\max}}$$

:C نوجد قيمة الثابت

$$\Rightarrow C = N_i \cdot \left[\frac{1 - m}{E_{\max}^{1 - m} - E_{\min}^{1 - m}} \right]$$
(3)

وبالتعويض في علاقة f(E) ، نحصل على:

$$f(E) = N_i \cdot \left[\frac{1 - m}{E_{\max}^{1 - m} - E_{\min}^{1 - m}}\right] \cdot E^{-m}$$
(4)

المردود الإشعاعي للتفاعل

يعرف المردود الإشعاعي بأنه احتمال التفاعل لديترون واحد يعبر هدفًا سميكًا في تجارب إنتاج النظائر المشعة بحيث تكون سماكة الهدف أكبر بكثير من مسافة اختراق الأيون، ولذلك يجب حساب مردود الهدف. عندما يخترق أيون وارد طاقته (E) مسافة صغيرة (dx) ضمن الهدف، فإن طاقته تنخفض بمقدار ((E - dE))، وهذا يؤدي إلى فإن طاقته تنخفض بمقدار ((E - dE))، وهذا يؤدي إلى تغيير في المقطع العرضي للتفاعل ($(\sigma(E))$) وقدرة الإيقاف ($\frac{dE}{dx}$) الذين يعتمدان على طاقة الديترون الوارد [10].

(dx) إن احتمال التفاعل لديترون واحد يعبر مسافة (dx) ضمن الهدف يمكن استنتاجه من المقطع العرضي: $\sigma(E)$ ، حيث n كثافة الهدف، و $\sigma(E).dx$ المقطع العرضي للتفاعل.

وعند عبور الديترون هدفًا سميكًا نحصل على:

$$P = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} n.\sigma(E) \cdot \left(\frac{dE}{dx}\right)^{-1} \cdot dE$$

حيث (P) هو احتمال التفاعل لديترون واحد طاقته حيث (P) هو احتمال التفاعل العدد الكلي للتفاعلات، (E_d) يصبح المردود الإشعاعي للتفاعل معطى بالعلاقة:

$$\langle y \rangle = \frac{\Omega_2}{\Omega_1} \cdot \left[\frac{1 - m}{E_{\max}^{1 - m} - E_{\min}^{1 - m}} \right] \cdot \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} n \cdot \frac{E^{-m} \cdot \sigma(E)}{\frac{dE}{dx}} \cdot dE.$$
 (5)

 Ω_2 ، (القبضة)، Ω_2 الزاوية المجسمة للمنبع (القبضة)، Ω_1 الزاوية المجسمة للمنبع (القبضة)، Ω_1 المجسمة للهدف. n كثافة هدف الغرافيت $\frac{dE}{dx}$. $(n = 1.129 \times 10^{29} m^{-3})$ المقطع $\frac{dE}{dx}$. $(n = 1.129 \times 10^{29} m^{-3})$ الغرافيت. $\sigma(E)$ المقطع العرضي التجريبي للتفاعل . $^{12}C(d,n)^{13}N$

$$rac{dE}{dx}$$
 إيجاد قدرة الإيقاف

يتم حساب قدرة الإيقاف للديتيريوم في مادة الهدف وفق علاقة (Bethe) التالية [11]:

$$\frac{dE}{dx}(MeV/m) = \frac{4\pi z^2 nZ}{mv^2} (\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0})^2 \left(\ln\left[\frac{2mv^2}{I}\right] \right). \quad (6)$$

حيث: z شحنة الديتيريوم (z=1)، n عدد الذرات في واحدة الحجم $(atom / m^3)$ لمادة الهدف. Z العدد الذري لمادة الهدف، m كتلة الإلكترون. v سرعة الجسيمة الواردة، e شحنة الإلكترون، ε_0 سماحية الجلاء. I متوسط طاقة الإثارة والتأيين للمادة الماصة، ويتم تحديد هذا المقدار تجريبياً لكل مادة. وبالنسبة للغرافيت موضوع الدراسة، فإن (I = 73.8 eV).

The Stopping) 2013 SRIM نستخدم برنامج The Stopping) 2013 SRIM نستخدم برنامج [12] and Range of Ions in Matter) (0.6-3MeV) الإيقاف لأيونات الديتيريوم ذات الطاقة (0.6-3MeV على القيم المبينة ضمن هدف الغرافيت، وقد تم الحصول على القيم المبينة في الجدول (1).

برسم تغيرات قدرة الإيقاف ضمن الغرافيت مع طاقة أيونات الديتيريوم الواردة، نحصل على الشكل (3)، ثم نرسم منحني المطابقة ونحصل على العلاقة التي تعطي قدرة الإيقاف كما يلي:

$$\frac{dE}{dx} = 51458E^{-0.687} \tag{7}$$

قدرة الإيقاف	طاقة أيونات الديتيريوم
(MeV/m) (Stopping Power)	(MeV) (Ions Energy)
7.16E+04	0.6
6.81E+04	0.65
6.50E+04	0.7
5.98E+04	0.8
5.55E+04	0.9
5.19E+04	1
4.90E+04	1.1
4.61E+04	1.2
4.36E+04	1.3
4.13E+04	1.4
3.94E+04	1.5
3.76E+04	1.6
3.60E+04	1.7
3.45E+04	1.8
3.20E+04	2
2.94E+04	2.25
2.71E+04	2.5
2.53E+04	2.75
2.37E+04	3

الجدول 1. قيم قدرة الإيقاف مع تغير طاقة أيونات الديتيريوم.



الشكل 3. قدرة الإيقاف لأيونات الديتيريوم ضمن هدف الغرافيت مع منحني المطابقة.

إيجاد المقطع العرضي للتفاعل $\sigma(E)$ من قاعدة بيانات EXFOR

نستخدم قاعدة بيانات EXFOR لإيجاد المقطع للتفاعل 12 EXFOR العرضي للتفاعل 12 $^{12}C(d,n)^{13}N$ العرضي للتفاعل الطاقة (0.6-3MeV)

•			
المقطع العرضي	طاقة أيونات الديتيريوم		
(Cross-section) (mbarn)	(MeV) (Ions Energy)		
12.37	0.6542		
15.72	0.6869		
27.16	0.7385		
39.95	0.7902		
105	0.8943		
82.34	0.9825		
82.29	1.043		
99.81	1.09		
114.3	1.142		
128.8	1.189		
129.7	1.245		
181	1.279		
97.59	1.338		
119.8	1.436		
127.9	1.478		
130.2	1.525		
119.3	1.586		
114.6	1.632		
137.5	1.679		
169.2	1.727		
151.3	1.778		
160	1.829		
163.7	1.867		
189.3	1.979		
193.9	2.026		
186.5	2.077		
208.7	2.129		
211.7	2.227		
240	2.279		
224.4	2.33		
209.2	2.381		
177.1	2.436		
176	2.483		
181.4	2.534		
160.8	2.576		
165.1	2.641		
189.7	2.684		
123.2	2.739		
142	2.786		
142.3	2.846		
147.7	2.875		
125.7	2.981		
119.9	3.084		

الجدول 2. قيم المقطع العرضي مع تغيّر طاقة أيونات الديتيريوم.



الشكل 4. منحنى مطابقة القيم التجريبية للمقطع العرضى للتفاعل.

برسم تغيرات المقطع العرضي للتفاعل مع طاقة أيونات الديتيريوم نحصل على الشكل (4)، وبرسم منحني المطابقة نحصل على العلاقة التي تعطي المقطع العرضي:

$$\sigma(E) = 29.503E^{6} - 221.07E^{5} + 429.58E^{4} + 443.37E^{3} - 2459.5E^{2} + 2910.3E - 1031.8$$
(8)

حساب زوايا الإصدار والسقوط

توجد في هذه الدراسة زاويتان يجب حسابهما: الأولى هي زاوية إصدار الأيونات من القبضة، والثانية هي زاوية سقوط الأيونات على الهدف، كما هو موضح في الشكل (5).

$$\Omega_1 = 2\pi (1 - \cos \theta_1) \tag{9}$$

يفرض:
$$heta_1=25^{\circ}=0.436rad$$
، بالتالي: $\Omega_1=2\pi\left(1-\cos{0.436}
ight)=0.587sr$

$$\Omega_2 = \pi \cdot \theta_2 = \pi \cdot \left(\frac{r}{R}\right)^2 \tag{10}$$

حيث r نصف قطر المنبع، R البعد بين الهدف والمنبع (القبضة).

بفرض
$$R=20cm$$
 ، $r=1cm$ ، وبالتعويض: $\Omega_{2}=\pi.{\left(rac{1}{20}
ight)}^{2}=0.0078sr$



الشكل 5. زاوية إصدار وسقوط أيونات الديتيريوم على هدف الغرافيت.

الآن يمكن حساب مردود التفاعل بتعويض القيم التي تم الحصول عليها وإجراء التكامل، وبذلك نحصل على قيمة المردود: $^{-5} = 1.565 \! = \! \left< y \right>.$

النشاط الإشعاعي

يعطى النشاط الإشعاعي بالعلاقة:

$$A = N_d \cdot \left\langle y \right\rangle \frac{\ln 2}{T_{1/2}}.$$
 (11)

حيث: N_d عدد أيونات الديتيريوم الساقطة على الهدف. $T_{1/2}$ عمر النصف للنظير المشع $T_{1/2}$:

 $T_{1/2} = 9.97 \min \approx 600 \sec$.

حساب عدد الأيونات الساقطة على هدف الغرافيت

يعطى العدد الكلي لأيونات الديتيريوم الساقطة على الهدف بالعلاقة [10]:

$$N_d = \frac{\tau}{e} I_i \tag{12}$$

حيث: I_i تيار الأيونات، au زمن تشكل القبضة (زمن إصدار الأيونات)، e شحنة الإلكترون.

بافتراض أن آلية التسريع هي تشكل ثنائي بلازما (Diode) ضمن عمود البلازما حيث يتألف من منطقتين لهما ناقلية مرتفعة وبينهما منطقة ذات ناقلية منخفضة (فجوة تسريع)، فإن كثافة تيار الأيونات تعطى بالعلاقة:

$$J_{i} = 1.86 \cdot \left(\frac{m_{e}}{m_{i}}\right)^{1/2} \cdot J_{0}$$
(13)

حيث m_e كتلة الإلكترون، m_i كتلة الأيون، J_0 كثافة التيار الكلى.

ويمكن حساب كثافة التيار الكلي من علاقة (Langmuir-Child) التالية:

$$J_0 = \frac{\sqrt{2}}{9\pi} \cdot \left(\frac{e}{m_e}\right)^{1/2} \cdot \frac{\phi^{3/2}}{d^2}$$
(14)

d الكمون المتحرض من قبضة البلازما، ϕ حيث: ϕ الكمون المتحرض من قبضة البلازما. وبالتالي يكون تيار الأيونات: $I_i = J_i . \pi r^2$

بالتعويض، نجد:

$$I_i = 0.29 \left(\frac{e}{m_i}\right)^{1/2} .\phi^{3/2} .\left(\frac{r}{d}\right)^{1/2}$$
(15)

$$N_d = 1.39 \times 10^{12} \phi^{3/2} \cdot \left(\frac{r}{d}\right)^{1/2} \cdot \tau.$$
 (16)

استخدام برنامج Lee

سنستخدم برنامج Lee - الإصدار (RADPFV5.15FIB) [14] لتنفيذ تجارب عددية على جهاز البلازما المحرقية NX2 من أجل حساب مميزات قبضة البلازما المتشكلة عند استخدام غاز الديتريوم كغاز للتشغيل وفق المعطيات التالية [15]:

- ، L_0 = 20 nH, بارامترات بنك المكثفات: التحريض .I السعة $r_0 = 2.3 \ {
 m m} \Omega$ السعة $C_0 = 28 \ {
 m \mu F}$
- ال. بارامترات أنبوب البلازما المحرقية: نصف قطر المهبط. b = 4.1 cm ، نصف قطر المصعد a = 1.9 cm، طول. المصعد $z_0 = 5 \text{ cm}$.
- ، $V_0 = 14 \text{ kV}$ المطبق. التشغيل: الجهد المطبق. III الضغط $P_0 = 10$ Torr. الضغط ال
- IV. بارامترات النموذج: عامل الكتلة في المرحلة المحورية. $f_c=0.7$ ، عامل التيار في المرحلة المحورية $f_m=0.06$ ، عامل التيار عامل الكتلة في المرحلة القطرية $f_{\rm nr}=0.16$ ، عامل التيار في المرحلة القطرية $f_{\rm cr}=0.7$.
- من برنامج Lee، وبعد إدخال المعطيات السابقة، تم الحصول على البيانات التالية:

نصف قطر القبضة:

$$r_p = 0.313 cm = 0.313 \times 10^{-2} m$$

طول القبضة: $z_p = 2.802 cm = 2.802 \times 10^{-2} m$
زمن بقاء القبضة: $\tau = 30 ns = 30 \times 10^{-9} s$

الكمون المتولد عن انهيار القبضة:

$$U = 65kV = 65 \times 10^{3}V$$

النتائج

بالتعويض نحصل على عدد أيونات الديتيريوم المقذوفة من خلال القبضة والساقطة على الهدف:

$$N_d = 2.3 \times 10^{11} ions$$

وبالتالي يكون النشاط الإشعاعي:

$$A = 2.3 \times 10^{11} \times 1.565 \times 10^{-5} \times \frac{0.693}{600}$$

 $=4.14\times10^{3}Bq$

سنقوم الآن بدراسة العوامل المؤثرة على النشاط الإشعاعي.

تأثير تغيّر ضغط غاز الديتيريوم على النشاط الإشعاعي

تم إيجاد مميزات قبضة البلازما عند ضغوط مختلفة لغاز الديتيريوم، ثم حساب النشاط الإشعاعي عند كل قيمة للضغط. وتم الحصول على النتائج المبينة في الجدول (3).

الجدول 3. تغيّر مميزات قبضة البلازما وعدد الأيونات والنشاط الإشعاعي مع تغيّر ضغط غاز الديتيريوم.

P(Torr)	$r_p(cm)$	d(cm)	$\phi(kV)$	$\tau(ns)$	$N_d(ions)$	A(Bq)
1	0.300	2.806	102	13.5	1.99×10^{11}	3.59×10^{3}
3	0.303	2.805	89	19.1	3.12×10^{11}	5.616×10 ³
7	0.309	2.802	74	25.8	2.39×10^{11}	4.302×10^{3}
10	0.313	2.802	65	30	2.30×10^{11}	4.14×10^{3}
15	0.321	2.803	54	36.5	2.15×10^{11}	3.87×10^{3}
20	0.332	2.800	45	43	1.96×10^{11}	3.528×10 ³
40	0.403	2.797	19	78.4	1.08×10^{11}	1.944×10^{3}

وبرسم تغيرات النشاط الإشعاعي مع ضغط غاز الديتيريوم، نحصل على الشكل (6).



الشكل 6. تغيرات النشاط الإشعاعي مع ضغط غاز الديتيريوم.

نلاحظ أن للنشاط الإشعاعي قيمة عظمى عند الضغط (3Torr)، وهذا يعود لأن عدد أيونات الديتيريوم يكون أعظميًا عند هذه القيمة للضغط.

دراسة تغير النشاط الإشعاعي مع معدل التكرار

تمت دراسة تأثير معدل التكرار (عدد الإطلاقات في واحدة الزمن) على كمية النشاط الإشعاعي الذي تم الحصول عليه، وذلك عند معدلات تكرار (1,5,10,16) مع زمن تعرض لأيونات الديتيريوم على هدف الغرافيت . sec (30,60,300)، وحساب المردود عند كل زمن وفق العلاقة:

$$A = N_d \cdot \langle y \rangle \cdot \upsilon \cdot \left(1 - e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} \cdot t} \right)$$

حيث t زمن تشغيل الجهاز، v تواتر الاطلاقات.

قمنا بحساب النشاط الإشعاعي عند أزمنة تعرّض مختلفة (.30,60,300,600 sec) ومعدلات تكرار مختلفة (1,5,10,16 Hz)، وحصلنا على النتائج المبينة في الجدول (4):

		<i>ن وهندن الطرار</i> :	ي مع صير رمن الصرط	. کیر الساط الإسکام
	$t = 30 \sec .$	$t = 60 \sec .$	$t = 300 \sec .$	$t = 600 \sec .$
U(Hz)	A(Bq)	A(Bq)	A(Bq)	A(Bq)
1	122×10^{3}	240×10^{3}	1054×10^{3}	1799×10^{3}
5	612×10^{3}	1204×10^{3}	5270×10^{3}	8997×10^{3}
10	1225×10^{3}	2409×10^{3}	10540×10^{3}	17994×10^{3}
16	1961×10^{3}	3855×10^{3}	16865×10^{3}	28791×10^{3}

الجدول 4. تغير النشاط الإشعاعي مع تغير زمن التعرض ومعدل التكرار.

وبإجراء دراسة لتغيرات النشاط الإشعاعي مع تغير معدل التكرار، نلاحظ أنه مع ازدياد معدل التكرار، فإن النشاط الإشعاعي يزداد أيضاً. ويلاحظ من الشكل (7) أنه عند معدل تكرار 1*Hz* لفترة زمنية . 600sec (فترة زمنية مساوية لعمر النصف للنظير المدروس)، كان النشاط الإشعاعي 10⁶ Bq بينما عند زيادة معدل

التكرار إلى 16*Hz* ضمن نفس الفترة الزمنية، فإن النشاط الإشعاعي ارتفع إلى 28.791×10⁶ Bq، وهذا يدل على أن معدل التكرار عامل هام جداً من أجل زيادة النشاط الإشعاعي.



الشكل 7. تغيرات النشاط الإشعاعي مع معدل التكرار.

كما تمت دراسة تغيرات النشاط الإشعاعي مع زمن الإطلاق، ونلاحظ أيضاً زيادة النشاط مع زيادة زمن الإطلاق؛ فمن أجل معدل تكرار (v = 10Hz) ولفترة تعرّض ($t = 30 \sec c$)، كان النشاط الإشعاعي $(A = 1.225 \times 10^6 Bq)$. وعند زيادة فترة التعرّض إلى

ازداد النشاط الإشعاعي إلى $(t = 600 \sec .)$ ، ازداد النشاط الإشعاعي إلى ($A = 17.994 \times 10^6 Bq$) وبالتالي فإن زمن التعرّض هو أيضاً عامل مؤثر على النشاط الإشعاعي.



الشكل 8. تغيرات النشاط الإشعاعي مع زمن التعرض.

عند دراسة استخدام النظير المشع 13 (الأمونيا) في عملية التصوير المقطعي بالإصدار البوزيتروني (PET) لعضلة القلب وفق الدراسة [2]، فإن النشاط الإشعاعي يجب أن يكون بحدود (10-20mCi)؛ أي يجب أن يكون بحدود $(10^6Bq-740 \times 10^6Bq)$ بكثير من القيمة التي تم الحصول عليها (v=16Hz) عند معدل تكرار (v=16Hz).

وبما أنه قد تبيّن لنا أن زيادة معدل التكرار تزيد من النشاط الإشعاعي، فإننا سنقوم بحساب النشاط الإشعاعي عند معدلات تكرار أعلى (50,100,500*Hz*).

تم إجراء حساب لقيمة النشاط الإشعاعي عند معدلات تكرار عالية، وتم الحصول على النتائج المبينة في الجدول (5).

v = 50Hz		$\upsilon = 100 Hz$		$\upsilon = 500 Hz$		
	T(sec)	A(Bq)	T(sec)	A(Bq)	T(sec)	A(Bq)
	30	6.12×10^{6}	30	12.25×10^{6}	30	61.29×10^{6}
	60	12.04×10^{6}	60	24.09×10^{6}	60	120.49×10^{6}
	300	52.70×10^{6}	300	105.40×10^{6}	300	527.04×10^{6}
	600	89.97×10^{6}	600	179.94×10^{6}	600	899.74×10^{6}

الجدول 5. تغيّر النشاط الإشعاعي عند معدّلات تكرار مرتفعة.



الشكل 9. تغيرات النشاط الإشعاعي مع معدلات تكرار مرتفعة.

من الحسابات، يتضح أنه تم الحصول على نشاط إشعاعي مناسب مقداره $Bq = 527.04 \times 10^6 Bq$ ، وذلك عند معدل تكرار ($\upsilon = 500 Hz$) وفترة تعرض (. t = 300 sec) هذه النتيجة تعتبر جيدة من الناحية النظرية، ولكن بسبب الصعوبات التقنية لأجهزة البلازما المحرقية الكثيفة الموجودة حالياً، لا يمكن الوصول إلى هذه

القيم باستخدام معدلات تكرار عالية، لذلك يمكن الاستعاضة عن ذلك بزيادة زمن التعرّض.

تمت دراسة النشاط الإشعاعي عند أزمنة تعرض مرتفعة تصل حتى (50 min)، وحصلنا على النتائج المبينة في الجدول (6):

الجدول 6. تغيّر النشاط الإشعاعي عند أزمنة تعرّض مرتفعة.

	$t = 1000 \sec .$	$t = 1500 \sec .$	$t = 2000 \sec .$	$t = 2500 \sec .$	$t = 3000 \sec $.
v(Hz)	A(Bq)	A(Bq)	A(Bq)	A(Bq)	A(Bq)
1	2.46×10^{6}	2.96×10^{6}	3.24×10^{6}	3.39×10^{6}	3.48×10^{6}
5	12.32×10^{6}	14.81×10^{6}	16.21×10^{6}	16.99×10^{6}	17.43×10^{6}
10	24.65×10^{6}	29.62×10^{6}	32.42×10^{6}	33.98×10^{6}	34.86×10^{6}
16	39.44×10^{6}	47.4×10^{6}	51.87×10^{6}	54.38×10^{6}	55.79×10^{6}



الشكل 10. تغيرات النشاط الإشعاعي عند أزمنة تعرض مرتفعة.

يتبين من النتائج التي تم الحصول عليها أن أعلى نشاط إشعاعي تم الحصول عليه هو (10⁶Bq× 55.79) عند زمن تعرض (.3000 sec)، وهذه القيمة أقل من القيمة المطلوبة لاستخدام النظير المشع ¹³N في عملية التصوير المقطعي بالإصدار البوزيتروني (.Tomography PET).

الاستنتاجات

- عند الشروط المدروسة، فإن النشاط الإشعاعي للنظير
 A = 4.14×10³ Bq كان ¹³N
- عند دراسة تأثير تغير ضغط غاز الديتيريوم على النشاط الإشعاعي للنظير المشع المدروس، تبيّن تغير عدد الأيونات الصادرة عند تغير ضغط الغاز، وأن قيمة الضغط Torr 3 هي أفضل قيمة حيث يكون عندها عدد الأيونات أعظمياً (ions)، وبالتالي يكون النشاط الإشعاعي في أعلى قيمة له، وهي 10⁶ ×10⁶ Bq.
- بالاستفادة من ميزة أن جهاز البلازما المحرقية المستخدم في الدراسة تكراري، تم تنفيذ عدد من التجارب العددية لحساب النشاط الإشعاعي عند معدلات تكرار مختلفة (1,5,10,16 Hz) وأزمنة مختلفة لتعرض الهدف للأيونات (.30,60,600 sec)، وتبيّن أن النشاط الإشعاعي يزداد عند زيادة معدل التكرار وزمن التعرّض؛ فقد تم تسجيل قيمة نشاط إشعاعي Bq ×10³ Bq عند معدل تكرار Br وزمن تعرّض .500 sec،

وبالتالي فإن معدل التكرار وزمن التعرض عاملان مهمان جداً من أجل زيادة النشاط الإشعاعي.

- تبيّن عند إجراء الدراسة المرجعية أنه في أحد استخدامات النظير المشع ¹³ لتصوير عضلة القلب بتقنية التصوير المقطعي بالإصدار البوزيتروني (Positron Emission Tomography PET) فإن النشاط الإشعاعي المطلوب للنظير المشع يقع ضمن المجال (Raingle (Raine))، وهذا المجال أعلى بكثير من أعلى قيمة تم التوصل إليها. وبما أنه أعلى بكثير من أعلى قيمة تم التوصل إليها. وبما أنه معدل التكرار وزمن التعرض، فقد قمنا بإجراء المزيد من المحاولة من هذه النتيجة لمحاولة من التجارب العددية بالاستفادة من هذه النتيجة لمحاولة من إيادة النشاط الإشعاعي.
- قمنا بحساب النشاط الإشعاعي عند معدلات تكرار عالية
 30, 60, 600 (600) وفترات تعرض (50, 100, 500 Hz)
 دومد توصلنا إلى قيمة نشاط إشعاعي تقع ضمن (sec.)
 دوملنا المطلوب للاستخدام في تصوير PET؛ إذ كانت القيمة PET وزمن
 القيمة Bq 10⁶ Sq
 عند معدل تكرار Hz 500 Sec.
 تعرض sec.
- تعتبر هذه النتيجة جيدة، ولكن توجد صعوبات تقنية في أجهزة البلازما الموجودة حالياً، وهي أنه لا يمكن الوصول إلى مثل هذه القيمة لمعدل التكرار.
- تم اللجوء إلى العامل الثاني وهو زيادة زمن تعرّض الهدف لأيونات الديتيريوم؛ فقد تم حساب النشاط الإشعاعى عند أزمنة تعرّض طويلة (,1500, 1000

وعند معدلات تكرار متوافرة في الدراسة، وتم الحصول على في الجهاز المستخدم في الدراسة، وتم الحصول على أعلى قيمة للنشاط الإشعاعي، وهي 10⁶Bq× 55.79 (3000 sec.)، وهذه القيمة أقل من القيمة المطلوبة للاستخدام المدروس.

 نستنتج من دراستنا هذه أن أجهزة البلازما منخفضة الطاقة ضمن الشروط التقنية المتوافرة حالياً لا يمكنها

المراجع

- [1] Saed, M., Roshan, M.V., Banoushi, A. and Habibi, M., Journal of Modern Physics, 7 (12) (2016) 1512.
- [2] Castillo, S., "Medical and Statistical Review of N-13 Ammonia Positron Emission Tomograph", (Florence Houn, MD MPH FACP, Medical Officer, 1999).

إنتاج النظير المشع ¹³N بنشاط إشعاعى مناسب

للتصوير المقطعى بالإصدار البوزيترونى (Positron

• يمكن البحث مستقبلا في إنتاج النظائر المشعة قصيرة

العمر عند استخدام أجهزة بلازما محرقية كثيفة ذات طاقة أعلى، وهذا يمكن من زيادة عدد وطاقة أيونات

الديتيريوم، وبالتالي الحصول على نشاط إشعاعي أكبر.

.(Emission Tomography PET

- [3] Bienkowska, B., Jednorog, S., Ivanova-Stanik, I.M., Scholz, M. and Szydlowski, A., Acta Physica Slovaca, 54 (4) (2004) 401.
- [4] Roshan, M.V., Springham, S.V., Rawat, R.S. and Lee, P., IEEE Transactions on Plasma Science, 38 (12) (2010) 3393.
- [5] Akel, M., Alsheikh Salo, S., Ismael, S., Saw, S.H. and Lee, S., Physics of Plasmas, 21 (7) (2014) 072507.
- [6] Kiai, S.S., Adlparvar, S., Sheibani, S., Elahi, M., Safarien, A., Farhangi, S., ... and Khanchi, A.R., Journal of Fusion Energy, 29 (5) (2010) 421.
- [7] Federico, J. et al., International Journal of Engineering and Technology, 1 (1) (2010).

- [8] Shirani, B. and Abbasi, F., Journal of Fusion Energy, 32 (2) (2013) 235.
- [9] Young, F.C., Golden, J. and Kapetanakos, C.A., Review of Scientific Instruments, 48 (4) (1977) 432.
- [10] Knoll, G.E., "Radiation Detectibn and Measurement", (John Wiley & Sons, New York, 1999).
- [11] "The stopping and range of ions in matter", www.srim.org.
- [12] Michelmann, R., "Experimental Nuclear Reaction Data (EXFOR)", https://wwwnds.iaea.org/exfor/exfor.htm.
- [13] Shirani, B. and Abbasi, F., Journal of Fusion Energy, 32 (2) (2013) 235.
- [14] Lee, S., "Radiative Dense Plasma Focus Computation Package: RADPF", http://www.plasmafocus.net; http://www.intimal.edu.my/ school/fas/UFLF.
- [15] Lee, S. and Saw, S.H., Physics of Plasmas, 20 (6) (2013) 062702