

تأثير بارامترات بنك المكثفات على طاقة حزمة أيونات الأرجون الصادرة عن جهاز البلازما المحرقة AECS-PF1

*إشراف الدكتور: وليد صهيوني

** الدكتور المشارك: علاء ناصيف

اسم الطالب: أروى الحمود

ملخص

تمّ في هذا البحث إجراء سلسلة من التجارب العددية باستخدام كود Lee لدراسة تأثير تغيير كل من سعة وتحريض بنك المكثفات في جهاز البلازما المحرقة الكثيفة-AECS PF1 (2.8 kJ) على طاقة حزمة أيونات الأرجون الصادرة. أظهرت النتائج أن زيادة سعة بنك المكثفات إلى $35\mu\text{F}$ أدّى إلى زيادة طاقة تشغيل الجهاز وبالتالي ارتفاع نسبة تأيّن الغاز وبالنتيجة ارتفاع طاقة حزمة الأيونات إلى 2.2 ج. بينما أدى إنقاص تحريض بنك المكثفات إلى 200 nH مع المحافظة على طاقة تشغيل الجهاز إلى طاقة حزمة 3.1 ج مقارنة بـ 1.4 ج عند استخدام البارامترات الأساسية للجهاز.

الكلمات المفتاحية: قبضة البلازما، حزمة الأيونات، كود Lee، غاز الأرجون.

*أ. د. جامعة البعث، كلية العلوم، قسم الفيزياء.

** د. الجامعة الوطنية الخاصة، كلية الصيدلة.

*** طالبة ماجستير، فيزياء المادة الكثيفة.

Effect of capacitor bank parameters on argon ion beam energy emitted by AECS-PF1 plasma focus device

Abstract

In this paper, a series of numerical experiments were conducted using the Lee code to study the effect of changing both the capacitance and inductance of the capacitor bank in the AECS-PF1 (2.8 kJ) dense plasma focus device on the energy of argon ion beam. The results showed that increasing the capacity of the capacitor bank to 35 μ F led to an increase in the operating energy of the device and thus an increase in the rate of ionization of the gas, and this led to an increase in the energy of ion beam to 2.2 J. While reducing the inductance of the capacitor bank to 200 nH with maintaining the operating energy of the device resulted in ion beam energy of 3.1 J compared to 1.4 J when using the basic parameters of the device.

Keywords: plasma pinch, ion beam, Lee code, argon gas

مقدمة:

تعدّ البلازما المحرّقة أحد تطبيقات القبضة المغناطيسية (Pinch) حيث بدأت هذه الفكرة في أوائل ستينات القرن الماضي وتقدم البحث فيها إلى أن تمّ التوصل إلى تصميم نموذجين لأجهزة توليد البلازما المحرّقة هما نموذج ماذر ونموذج فيليبوف [1] ، حيث يختلف هذان النموذجان بالأبعاد الهندسية للالكترودات.

تمّ طرح فكرة البلازما المحرّقة في البداية لاستخدامها في تطبيقات الاندماج النووي (nuclear fusion) حيث تمّ استخدام غازات الديتيريوم ومزيج ديتيريوم- تريتيوم (D-T) [2] كغازات تشغيل ضمن أجهزة البلازما المحرّقة ولكن مع التقدم بأبحاث البلازما المحرّقة تحوّل الاهتمام من أبحاث الاندماج النووي إلى إمكانية استخدام أجهزة البلازما المحرّقة كمنبع للعديد من الإصدارات الإشعاعية مثل النيوترونات والأشعة السينية المستخدمة في الرقائق الالكترونية والتصوير الشعاعي [3] وحزم الالكترونات والأيونات المستخدمة في إنتاج النظائر المشعة قصيرة العمر [4] ، ومن بين هذه الدراسات الدراسة التي تناولت حساب قيمة النشاط الإشعاعي لنظير النتروجين N^{13} بهدف استخدامه بالتصوير المقطعي بالإصدار البوزيتروني [5] PET وفي معالجة المواد [6] وترسيب الأفلام الرقيقة [8] [7] .

يتعلّق نوع وطاقة حزم الأيونات الصادرة بالعديد من العوامل مثل نموذج جهاز البلازما المحرّقة وطاقة تشغيله وأبعاد الالكترودات ونوع غاز التشغيل في نوع حزم الجسيمات

الصادرة فعلى سبيل المثال تم استخدام جهاز البلازما المحرقة لزرع أيونات النتروجين على ركائز من الستانلس ستيل [9] والتيتانيوم [10] . كما تم استعمال أيونات النتروجين من أجل الحصول على طبقة نتريد الكربون على الجرافيت [11] ، كما أن ترسيب الأفلام الرقيقة باستخدام البلازما المحرقة أعطى تغيرات هيكلية وبنوية في هذه الأفلام أفضل من استخدام الطرق التقليدية [12] .

ولكن على الرغم من النتائج الجيدة التي أعطاها استخدام أجهزة البلازما المحرقة كمصادر أيونية في العديد من التطبيقات، إلا أن استخدام هذه التقنية لا يزال في طور التطوير المستمر وذلك للإحاطة بالظروف التشغيلية والبارامترات المختلفة التي تتحكم بميزات حزم الأيونات الصادرة (الطاقة، التدفق، العدد...)، فمثلاً تمت دراسة علاقة خصائص قبضة البلازما والإصدارات الإشعاعية بالعدد الذري للغاز [13] وتطرح هنا التجارب العددية كإحدى الوسائل المستخدمة في دراسة ظاهرة البلازما المحرقة والإصدارات الإشعاعية الصادرة حيث يتم استخدام البرامج الحاسوبية لمحاكاة هذه الظاهرة ودراستها ويبرز من هذه البرامج كود Lee الذي يعدّ من أفضل البرامج الحاسوبية نظراً للميزات التي يتمتع بها حيث يقمّ محاكاة واقعية بدرجة كبيرة جداً للبلازما المحرقة حيث من أهم ميزات هذا البرنامج ربط بارامترات تشغيل الجهاز مع الإصدارات الإشعاعية. طرحت فكرة هذا البرنامج لأول مرة من قبل Sing Lee عام 1985 [14] وجرى تطوير مستمر لهذا البرنامج ليتمكن من تقديم نتائج متطابقة بدرجة كبيرة جداً مع النتائج التي تعطيها

أجهزة البلازما المحرقة. تعتمد آلية استخدام هذا الكود على عملية الموائمة بين كل من مسار التيار المتدفق بدءاً من عملية التفريغ ضمن الغاز للجهاز الفعلي مع مسار التيار المحسوب بواسطة الكود نظراً لأن التيار يقدم الطاقة اللازمة لكل العمليات الحاصلة ضمن جهاز البلازما المحرقة من تأييد الغاز وحتى نهاية عملية التمرق، استخدم هذا الكود على نطاق واسع في دراسة أجهزة البلازما المحرقة والإصدارات الإشعاعية الصادرة عنها وخصائص الحزم الأيونية والالكترونية بالإضافة إلى استخدامه في تصميمي أجهزة بلازما محرقة جديدة. ونظراً لهذه الميزات الكبيرة التي يتمتع بها كود Lee قمنا باستخدامه في هذا البحث لإجراء سلسلة من التجارب العددية لدراسة تأثير سعة وتحريض بنك المكثفات على طاقة أيونات الأروغون الصادرة عن جهاز البلازما المحرقة الكثيفة AECS-PF1.

جهاز البلازما المحرقة الكثيفة AECS-PF1:

يوجد هذا الجهاز في هيئة الطاقة الذرية السورية، وهو عبارة عن نسخة معدلة عن جهاز البلازما المحرقة UNU/ICTP PFF. يعمل هذا الجهاز بطاقة تشغيل 2.8 kJ، وهو مصمم وفق نموذج ماذر (Mather Type) حيث تكون حجرة التفريغ من الفولاذ تحتوي على مصعد نحاسي بشكل أسطوانة طولها 160 mm وقطرها 19 mm محاطة بمهبط يتكون من 6 قضبان نحاسية بقطر 64 mm، يتم العزل بين المصعد والمهبط بواسطة الزجاج. يتم استخدام هذا الجهاز لدراسة ظاهرة البلازما المحرقة كمصدر للأشعة السينية

تأثير بارامترات بنك المكثفات على طاقة حزمة أيونات الأرجون الصادرة عن جهاز البلازما
المحرقة AECS-PF1

الليينة والحزم الأيونية عند استخدام غازات مختلفة مثل الأرجون، النتروجين... بضغوط

مختلفة [16] [15] .

بارامترات الجهاز:

جدول 1: بارامترات لجهاز البلازما المحرقة الكثيفة [14] AECS-PF1

$E_0 = 2.8 \text{ KJ}$	طاقة التشغيل Operation Energy
$L_0 = 1350 \text{ nH}$	تحريض الدارة Inductance of circuit
$C_0 = 25 \mu F$	سعة بنك المكثفات Capacitance
$r_0 = 46 \text{ m}\Omega$	المقاومة Resistance
$V_0 = 15 \text{ KV}$	كمون التشغيل Operation Voltage
$P_0 = \text{Variable}$	ضغط التشغيل Pressure
$a = 0.95 \text{ cm}$	نصف قطر المصعد Anode radius
$b = 3.2 \text{ cm}$	نصف قطر المهبط Cathode radius
$Z_0 = 16 \text{ cm}$	طول المصعد Anode length
Ar	غاز التشغيل Working gas

النتائج والمناقشة:

درس S.LEE و S.H.Saw [16] خصائص حزمة الأيونات الصادرة عن البلازما المحرقة الكثيفة بعد انهيار قبضة البلازما وانطلاق الأيونات منها نتيجة الكمون المتولد ضمن قبضة البلازما وفق الأسلوب التالي:

يعطى تدفق حزمة الأيونات بالعلاقة:

$$J_b = n_b \cdot v_b \dots \dots \dots (1)$$

v_b : سرعة أيونات الحزمة، n_b : عدد الأيونات ضمن الحزمة ويعطى بالعلاقة:

$$n_b = \frac{N_i}{V} \dots \dots \dots (2)$$

حيث:

N_i : العدد الكلي للأيونات V : حجم قبضة البلازما

نوجد n_b من الطاقة الحركية لأيونات الحزمة (Kinetic Energy of beam) BKE

(ions) ومن طاقة تحريض القبضة (Pinch inductive energy) PIE وفق التالي:

تُعطى الطاقة الحركية لأيونات الحزمة (BKE) بالعلاقة:

$$BKE = \frac{1}{2} \cdot N_b \cdot M \cdot m_p \cdot v_b^2 \dots \dots \dots (3)$$

حيث:

$m_p = 1.673 \times 10^{-27} \text{ kg}$ كتلة البروتون، M العدد الكتلي لأيون

تُعطى طاقة تحريض قبضة البلازما (PIE) بالعلاقة:

$$PIE = \frac{1}{2} \cdot L_b \cdot I_{pinch}^2 \dots \dots \dots (4)$$

حيث I_{pinch} : تيار القبضة

L_p : التحريض المتولد ضمن قبضة البلازما الذي يعطى بالعلاقة:

$$L_b = \frac{\mu}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{b}{r_p}\right) \cdot Z_p \dots \dots \dots (5)$$

حيث:

$$\mu = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$$

b : نصف قطر المهبط، r_p : نصف قطر القبضة، Z_p : طول القبضة.

إن الأيونات الصادرة عن القبضة تتحرك بطاقة حركية (BKE) تعتبر جزء من طاقة

تحريض قبضة البلازما (أي الطاقة المتولدة ضمن القبضة) هذا الجزء من الطاقة نرسم

له بالرمز f_e وبالتالي نكتب:

$$BKE = f_e \cdot PIE \dots \dots \dots (6)$$

بمساواة علاقة BKE وعلاقة PIE نجد:

$$\frac{1}{2} \cdot N_b \cdot M \cdot m_p \cdot v_b^2 = f_e \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\mu}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{b}{r_p}\right) \cdot Z_p \cdot I_{pinch}^2$$

$$N_b = \frac{f_e \cdot \frac{\mu}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{b}{r_p}\right) \cdot Z_p \cdot I_{pinch}^2}{M \cdot m_p \cdot v_b^2} \dots \dots (7)$$

بالتعويض في العلاقة (2) نجد:

$$n_b = \frac{N_b}{V} = \frac{N_b}{\pi \cdot r_p^2 \cdot Z_p} = \frac{f_e \cdot \frac{\mu}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{b}{r_p}\right) \cdot Z_p \cdot I_{pinch}^2}{M \cdot m_p \cdot v_b^2 \cdot \pi \cdot r_p^2 \cdot Z_p}$$

بالإصلاح نجد:

$$n_b = \left(\frac{f_e}{M}\right) \cdot \left(\frac{\mu}{2\pi^2 \cdot m_p}\right) \cdot \left(\frac{\ln\left(\frac{b}{r_p}\right)}{r_p^2}\right) \cdot \left(\frac{I_{pinch}^2}{v_b^2}\right) \dots\dots(8)$$

إذاً تم إيجاد عدد الأيونات المنطلقة من قبضة البلازما n_b .

الآن يجب إيجاد سرعة هذه الأيونات v_b :

إن الأيونات المتحركة من قبضة البلازما بسرعة v_b أي بطاقة حركية حيث أن منشأ

هذه الطاقة وكمون التسريع الناشئ عن انهيار قبضة البلازما U . وبالتالي يمكن إيجاد

قيمة السرعة v_b وفق الأسلوب الآتي:

إن كل أيون يملك شحنة فعالة Z_{eff} وطاقة حركية $\frac{1}{2} M \cdot m_p \cdot v_b^2$ ومنشأ هذه الطاقة

الحركية هي طاقة كهربائية وبالتالي:

$$\frac{1}{2} \cdot M \cdot m_p \cdot v_b^2 = Z_{eff} \cdot e \cdot U \Rightarrow$$

$$v_b = \sqrt{\frac{2 \cdot Z_{eff} \cdot e \cdot U}{M \cdot m_p}} \dots\dots(9)$$

الآن بتعويض (8) و(9) في (1) لإيجاد تدفق حزمة الأيونات J_b .

$$J_b = n_b \cdot v_b$$

J_b

$$= \left(\frac{f_e}{M}\right) \cdot \left(\frac{\mu}{2\pi^2 \cdot m_p}\right) \cdot \left(\frac{\ln\left(\frac{b}{r_p}\right)}{r_p^2}\right) \cdot \left(\frac{I_{Pinch}^2}{v_b^2}\right) \cdot \left(\frac{2 \cdot e}{m_p}\right)^{1/2} \cdot \left(\frac{Z_{eff}}{M}\right)^{1/2} \cdot U^{1/2}$$

نعوض v_b في قيمتها من المعادلة (9):

J_b

$$= \left(\frac{f_e}{M}\right) \cdot \left(\frac{\mu}{2\pi^2 \cdot m_p}\right) \cdot \left(\frac{\ln\left(\frac{b}{r_p}\right)}{r_p^2}\right) \cdot I_{Pinch}^2 \cdot \frac{M \cdot m_p}{2 \cdot Z_{eff} \cdot e \cdot U} \cdot \left(\frac{2 \cdot e}{m_p}\right)^{1/2} \cdot \left(\frac{Z_{eff}}{M}\right)^{1/2} \cdot U^{1/2}$$

بإصلاح هذه العلاقة وإخراج الثوابت وحسابها وفق التالي:

$$\frac{\mu}{2\sqrt{2}\pi^2(2 \cdot m_p)^{1/2}} = 2.75 \times 10^{15}$$

تصبح علاقة تدفق الأيونات بالشكل:

$$J_b = 2.75 \times 10^{15} \cdot \frac{f_e}{\sqrt{M \cdot Z_{eff}}} \cdot \left(\frac{\ln\left(\frac{b}{r_p}\right)}{r_p^2}\right) \cdot \frac{I_{Pinch}^2}{\sqrt{U}} \quad \dots(10)$$

سيولة أيونات الحزمة (Ions Fluence): هي التدفق في وحدة الزمن. وفي حالتنا

المدرسة فإن زمن التدفق هو زمن بقاء القبضة (pinch duration) τ وبالتالي:

$$Fluence = 2.75 \times 10^{15} \cdot \frac{f_e}{\sqrt{M \cdot Z_{eff}}} \cdot \left(\frac{\ln\left(\frac{b}{r_p}\right)}{r_p^2}\right) \cdot \frac{I_{Pinch}^2}{\sqrt{U}} \cdot \tau \quad \dots(11)$$

وحدة قياسها ($\text{ions} \cdot \text{m}^{-2}$).

في حالة البلازما المحرقة الكثيفة أثبتت الدراسات أن جزء الطاقة المتحررة من قبضة

البلازما والمتحولة إلى طاقة حركية للأيونات هو $f_e=0.14$ ؛ أي ما معناه أن 14% من

PIE تتحول إلى BKE.

خصائص حزمة الأيونات التي يمكن حسابها استناداً إلى العلاقات السابقة:

ويتم حساب عدد الأيونات الموجودة ضمن الحزمة من خلال جداء سيولة الأيونات بالمقطع العرضي لقبضة البلازما:

Number of ions in beam= Fluence \times pinch cross-section

$$N_i = \text{Fluence} \times \pi r_p^2 \quad \dots(12)$$

طاقة أيونات الحزمة (Ions beam Energy): يتم حساب طاقة الحزمة بضرب عدد أيونات الحزمة بالشحنة الفعالة والكمون المتولد ضمن القبضة وفق العلاقة:

$$E_b = N_i \times Z_{eff} \cdot U \quad \dots(13)$$

حيث: Z_{eff} الشحنة الفعالة للأيون، U الكمون المتعرض ضمن قبضة البلازما.

تم استخدام هذه العلاقة لإيجاد قيمة طاقة حزمة أيونات الأرجون الصادرة وذلك عند قيمة

ضغط غاز الأرجون 0.6 Torr.

تأثير بارامترات بنك المكثفات على طاقة حزمة أيونات الأرجون الصادرة عن جهاز البلازما
المحرقة AECS-PF1

تغيير سعة بنك المكثفات C_0 :

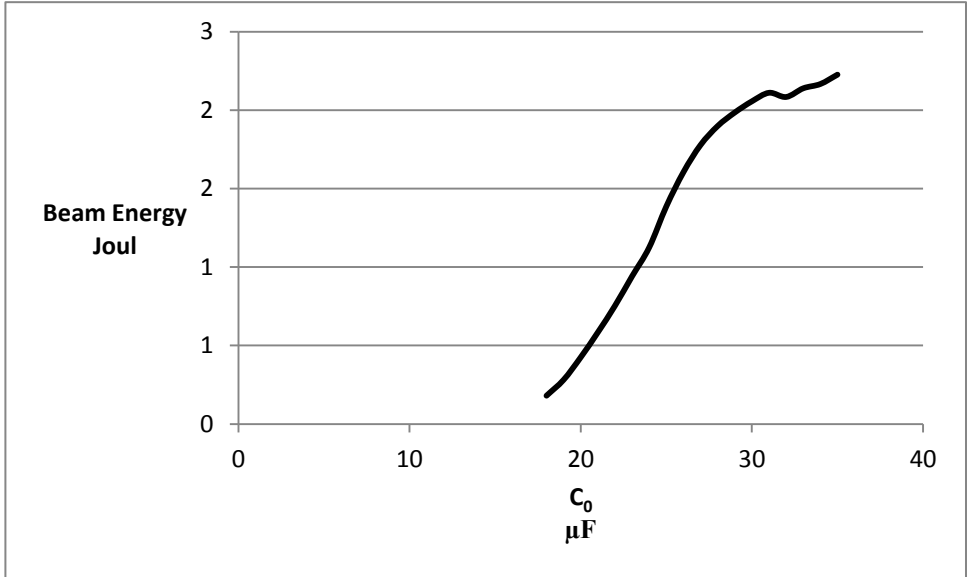
تم تغيير سعة بنك المكثفات للجهاز المدروس من $18 \mu F$ إلى $35 \mu F$ وبالتالي تتغير طاقة تشغيل الجهاز من 2 kJ إلى 3.9 kJ وإيجاد قيمة كل من ذروة التيار وتيار القبضة والكمون المتولد ضمن قبضة البلازما وعدد أيونات الأرجون الصادرة وطاقة حزمة الأيونات كما هو موضح في الجدول (2):

جدول 2: مميزات حزمة أيونات الأرجون عند تغيير سعة بنك مكثفات الجهاز AECS-PF1

E_0 kJ	C_0 μF	I_{peak} kA	I_{pinch} kA	U keV	Numb ions	Beam En J
2.0	18.0	48	19	8	1.8E+13	0.2
2.1	19.0	49	22	9	2.3E+13	0.3
2.3	20.0	50	25	10	2.9E+13	0.4
2.4	21.0	51	27	12	3.3E+13	0.6
2.5	22.0	52	29	14	3.6E+13	0.8
2.6	23.0	53	31	16	3.7E+13	0.9
2.7	24.0	54	33	19	3.7E+13	1.1
2.8	25.0	55	34	25	3.4E+13	1.4
2.9	26.0	56	36	30	3.2E+13	1.6
3.0	27.0	57	37	33	3.1E+13	1.8
3.2	28.0	58	38	35	3.1E+13	1.9
3.3	29.0	59	39	37	3.1E+13	2.0
3.4	30.0	60	40	37	3.1E+13	2.1
3.5	31.0	60	41	38	3.1E+13	2.1
3.6	32.0	61	42	37	3.0E+13	2.1
3.7	33.0	62	43	37	3.1E+13	2.1
3.8	34.0	63	43	37	3.1E+13	2.2
3.9	35.0	63	44	37	3.2E+13	2.2

من هذه النتائج يمكن ملاحظة:

- ازدياد قيمة التيارات I_{pinch} و I_{peak} نتيجة زيادة سعة بنك المكثفات وبالتالي ازدياد قيمة تيار التفريغ الناتج.
- ازدياد قيمة الكمون المتولد داخل قبضة البلازما بسبب زيادة قيمة طاقة التشغيل
- ازدياد عدد الأيونات الناتجة عن انهيار قبضة البلازما بسبب ازدياد تأيين غاز الأرجون نتيجة لزيادة طاقة التشغيل.
- ازدياد طاقة حزمة الأيونات مع ازدياد سعة بنك المكثفات حتى الوصول إلى أعلى طاقة 2.2 كما هو موضح في الشكل (1).



الشكل 1: تغيير طاقة حزمة أيونات الأرجون مع تغيير سعة بنك مكثفات الجهاز AECS-PF1

تأثير بارامترات بنك المكثفات على طاقة حزمة أيونات الأرجون الصادرة عن جهاز البلازما
المحرقة AECS-PF1

تغيير تحريض بنك المكثفات L_0 :

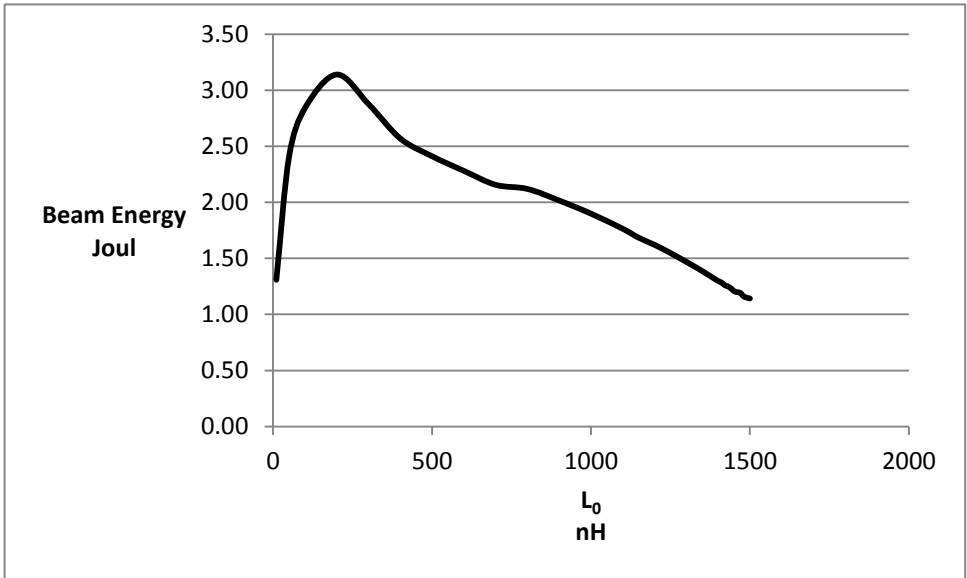
تم إجراء سلسلة من التجارب العددية لدراسة تأثير تغيير قيمة تحريض بنك المكثفات على طاقة حزمة أيونات الأرجون الصادرة وإيجاد نفس المتغيرات في المرحلة السابقة وذلك من خلال تغيير تحريض بنك المكثفات من 10 nH إلى 1500 nH وكانت النتائج المبينة في الجدول (3):

جدول 3: مميزات حزمة أيونات الأرجون عند تغيير تحريض بنك مكثفات الجهاز AECS-PF1

E_0 kJ	L_0 nH	I_{peak} kA	I_{pinch} kA	U keV	Numb ions	Beam En J
2.8	10.0	207	36	17	5.0E+13	1.3
2.8	50.0	163	46	31	4.2E+13	2.4
2.8	100.0	138	53	29	4.6E+13	2.8
2.8	200.0	113	54	35	4.1E+13	3.1
2.8	300.0	99	52	35	3.9E+13	2.9
2.8	400.0	89	49	33	3.8E+13	2.6
2.8	500.0	82	47	35	3.5E+13	2.4
2.8	600.0	77	45	36	3.3E+13	2.3
2.8	700.0	72	43	37	3.2E+13	2.2
2.8	800.0	68	41	37	3.1E+13	2.1
2.8	900.0	65	40	37	3.1E+13	2.0
2.8	1000.0	63	38	35	3.1E+13	1.9
2.8	1100.0	60	37	33	3.1E+13	1.8
2.8	1150.0	59	36	32	3.1E+13	1.7
2.8	1200.0	58	36	30	3.2E+13	1.6
2.8	1250.0	57	35	29	3.2E+13	1.5
2.8	1300.0	56	35	27	3.3E+13	1.5
2.8	1350.0	55	34	25	3.4E+13	1.4
2.8	1400.0	54	34	23	3.5E+13	1.3
2.8	1410.0	54	34	23	3.5E+13	1.3
2.8	1420.0	54	34	22	3.5E+13	1.3
2.8	1430.0	54	34	22	3.5E+13	1.3
2.8	1440.0	54	34	21	3.6E+13	1.2
2.8	1450.0	54	33	21	3.6E+13	1.2
2.8	1460.0	53	33	21	3.6E+13	1.2
2.8	1470.0	53	33	20	3.7E+13	1.2
2.8	1480.0	53	33	20	3.7E+13	1.2
2.8	1490.0	53	33	19	3.7E+13	1.1
2.8	1500.0	53	33	19	3.7E+13	1.1

من هذه النتائج نلاحظ:

- انخفاض قيمة ذروة التيار نتيجة زيادة تحريض بنك المكثفات وبالتالي انخفاض قيمة تيار التفريغ.
- وجود ذروة في قيمة تيار القبضة والكمون المتولد ضمنها مقابلة لقيمة التحريض .200 nH
- تمّ الحصول على أعلى قيمة لطاقة حزمة الأيونات J 3.1 عن قيمة التحريض .200 nH



الشكل 2: تغيير طاقة حزمة أيونات الأرجون مع تغيير تحريض بنك مكثفات الجهاز AECS-PF1

1- أعطت نتائج هذه الدراسة تصوراً عن تأثير بارامترات بنك المكثفات (السعة،

التحريض) على طاقة أيونات الأرجون الصادرة عن جهاز البلازما المحرقة.

2- بيّنت النتائج أن تغيير التحريض أعطى حزمة الأيونات طاقة أعلى من تغيير

السعة وهذا الإجراء ضروري جداً في عملية تطوير أجهزة البلازما المحرقة

حيث أنه بهذه الطريقة يتم الحفاظ على طاقة تشغيل الجهاز.

المراجع المستخدمة

- [1] Mather, J. W, (1965), **Formation of a high density deuterium plasma focus**, The Physics of Fluids, 8(2), 366-377..
- [2] Haines, M. G, (2011), **A review of the dense Z-pinch**, Plasma Physics and Controlled Fusion, 53(9), 093001.
- [3] Lee, P., Feng, X., Zhang, G. X., Liu, M. H., & Lee, S, (1997), **Electron lithography using a compact plasma focus**, Plasma Sources Science and Technology, 6(3), 343.
- [4] Shirani, B., & Abbasi, F, (2013), **Prospects for 13 N Production in a Small Plasma Focus Device**, Journal of Fusion Energy, 32, 235-241.
- [5] SAHYOUNI. W, NASSIF. A, ZEIDAN. O, and KAFA, N, (2023), **Determination of conditions for obtaining radioactivity of 13N isotope for medical use by NX2 dense plasma focus device**, St. Petersburg State Polytechnical University Journal, Physics and Mathematics, vol. 16, No. 2.
- [6] Hassan, M, (2006), **Plasma processing of materials using plasma focus**, Lahore: GC University Lahore.
- [7] Rawat, R. S., Aggarwal, V., Hassan, M., Lee, P., Springham, S. V., Tan, T. L., & Lee, S, (2008), **Nano-phase titanium dioxide thin film deposited by repetitive plasma focus: Ion irradiation and annealing based phase transformation and agglomeration**, Applied Surface Science, 255(5), 2932-2941.
- [8] Kant, C. R., Srivastava, M. P., & Rawat, R. S, (1998), **Dense plasma focus energetic ions based fullerene films on a Si (111) substrate**, Physics Letters A, 239(1-2), 109-114..
- [9] Feugeas, J. N., Llonch, E. C., De González, C. O., & Galambos, G, (1988), **Nitrogen implantation of AISI 304 stainless steel with a coaxial plasma gun**, Journal of applied physics, 64(5), 2648-2651.
- [10] Rawat, R. S., Chew, W. M., Lee, P., White, T., & Lee, S, (2003), **Deposition of titanium nitride thin films on stainless steel—AISI**

- 304 substrates using a plasma focus device**, Surface and Coatings Technology, 173(2-3), 276-284.
- [11] Inestrosa-Izurieta, M. J., Jauregui, P., & Soto, L, (2016), **Deposition of materials using a plasma focus of tens of joules**, In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 720, No. 1, p. 012045), IOP Publishing.
- [12] Omrani, M., Amrollahi, R., & Habibi, M, (2013), **The effect of TiN nanoparticles deposition with different number of shots on SS316L by plasma focus device**, Radiation Effects and Defects in Solids, 168(3), 188-198.
- [13] Sahyouni. W and Nassif. A, (2021), **Effect of Atomic Number on Plasma Pinch Properties and Radiative Emissions**, Advances in High Energy Physics, Vol. , Article ID 6611925, 5 pages, <https://doi.org/10.1155/2021/6611925>.
- [14] Lee, S., & Serban, A, (1996), **Dimensions and lifetime of the plasma focus pinch**, IEEE Transactions on plasma science, 24(3), 1101-1105.
- [15] Akel, M., AL-Hawat, S., Ahmad, M., Ballul, Y., & Shaaban, S, (2022), **Features of Pinch Plasma, Electron, and Ion Beams That Originated in the AECS PF-1 Plasma Focus Device**, Plasma, 5(2), 184-195.
- [16] Lee, S., & Saw, S. H, (2013), **Plasma focus ion beam fluence and flux—For various gases**, Physics of Plasmas, 20(6)..