

تصميم نظري لجهاز بلازما محرقية كثيفة بهدف زيادة مردود الأشعة السينية اللينة الصادرة

طالب الماجستير وليد رياض الديوب كلية العلوم جامعة البعث

بإشراف

الأستاذ الدكتور وليد مصطفى صهيوني

الدكتور علاء ناصيف

كلية العلوم - جامعة البعث

كلية الهندسة - الجامعة الوطنية الخاصة

ملخص

تمّ في هذا البحث إجراء دراسة نظرية لتصميم جهاز بلازما محرقية كثيفة بالاستناد إلى نموذج Lee. حيث تمّ تحديد طاقة تشغيل الجهاز وبارامترات بنك المكثفات (السعة، التحريض، الكمون) والأبعاد الهندسية للأقطاب الكهربائية، ثم إدخال بارامترات الجهاز المصمم في برنامج Lee لإختبار إمكانية تحقيقه لعملية تمحرق البلازما والحصول على كل من مسار تيار التفريغ الكلي لبنك المكثفات وكمون حجرة التفريغ ومقارنتها مع مقابلاتها في جهاز البلازما المحرقية الكثيفة UNU ICTP/ PFF وذلك عند استخدام غاز النيون كغاز للتشغيل والذي تمّ اختياره نظراً لقيمة مردود الأشعة السينية اللينة العالية التي يعطيها مقارنة بالغازات الأخرى. تمّ إجراء مقارنة بين درجات حرارة البلازما وعمليات اكتساب الطاقة وفقدانها بواسطة عمليات الكبح وإعادة الاتحاد والإصدار الخطي بين الجهازين المصمم والقياسي. كما تمّ إجراء مقارنة بين مردود الأشعة السينية اللينة بين الجهازين حيث كانت أعلى قيمة للمردود في الجهاز المصمم (2.58 J) بينما في الجهاز القياسي (2.11 J) وذلك بسبب التغيير الهندسي لأبعاد الأقطاب الكهربائية وبارامترات الدارة الكهربائية.

الكلمات المفتاحية: البلازما المحرقية الكثيفة، برنامج Lee، الأشعة السينية اللينة.

Theoretical Design of a Dense Plasma Focus Device to Increase Soft X-rays Yield

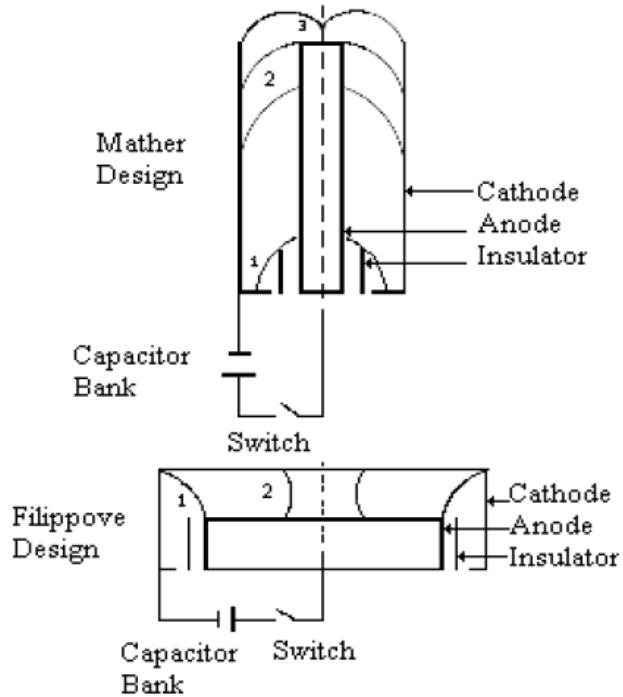
Abstract

In this research, a theoretical study was conducted to design a dense plasma focus device based on the Lee model. Where the operating energy of the device and the parameters of the capacitor bank (capacitance, inductance, voltage) and the geometric dimensions of the electrodes were determined, then the parameters of the designed device were entered into the Lee code to test the possibility of achieving the process of plasma focus and obtaining both the waveform of the total discharge current of the capacitor bank and the vacuum chamber voltage and its comparison with its counterparts in the UNU ICTP/ PFF dense plasma focus device when using neon gas as the operating gas, which was chosen due to its high soft X-ray yield value compared to other gases. Plasma temperatures and energy gain and loss by bremsstrahlung, recombination and linear emission were compared between the designed and standard devices. A comparison was also made of soft X-rays yield between the two devices, where the highest value of the yield was in the designed device (2.58 J), while in the standard device (2.11 J) due to the geometrical change of the electrodes dimensions and electrical circuit parameters .

Keywords: dense plasma focus, Lee code, soft X-ray.

مقدمة:

تم اكتشاف ظاهرة البلازما المحرقة الكثيفة من قبل العالمين **Filippov** في عام 1954 [1] **Mather** في عام 1961 [2] ، اللذان وضعوا تصميمين لجهازي بلازما محرقة كثيفة مختلفين من الناحية الهندسية (أبعاد حجرة التفريغ) كما هو مبين في الشكل (1)، لكنهما متشابهان من حيث آلية تكوين وحركة طبقة البلازما حتى الوصول إلى مرحلة التمرق وهذا التصميمان متشابهان أيضًا في قوانين القياس التي تعطي المردود النيوتروني ومردود الأشعة السينية اللينة، وبعد ذلك تم تصنيع وتركيب عدد كبير من أجهزة البلازما المحرقة الكثيفة في العديد من المختبرات حول العالم ، مع طاقات تشغيل تتراوح من عدة جول إلى ميغا جول [3]



الشكل (1) : مخطط يوضح هندسة نموذج **Mather** (من الأعلى) ونموذج **Filippov** (من الأسفل)

[3]

تصدر الأشعة السينية اللينة من البلازما المحرقية الكثيفة وفقاً لآليتين: الاصدار الخطي والاصدار المستمر (إعادة الاتحاد والكبح) [4] [5] [6] ، والأشعة السينية القاسية تنتج أيضاً من تصادم الحزم الإلكترونية الناتجة عن انهيار قبضة البلازما بالمصعد [7] [8] [9].

نظراً لتمييز هذه الظاهرة من حيث الحصول على بلازما شديدة الحرارة والكثافة العالية جداً من خلال تفريغ بسيط لبنك مشحون مكثفات بكمون عشرات الكيلو فولط داخل حجرة تفريغ تحتوي على غاز تحت ضغط معين ونوعية الإصدارات التي تشمل الأشعة السينية بجميع أنواعها (لينة ، متوسطة الطاقة القاسية) ، حزم الأيونات والإلكترونات ، فقد أجريت العديد من التجارب والدراسات والبحوث النظرية لهذه الظاهرة ، حيث أجرى Roomi وآخرون في [2011] دراسة تجريبية لدراسة تأثير كل من الجهد وضغط التشغيل على إصدار الأشعة السينية اللينة من جهاز البلازما المحرقية APF عند استخدام غاز النيتروجين، حيث وجد أن أفضل جهد تشغيل يقع ضمن النطاق (10-13 كيلو فولط) ، وأن أعلى إصدار للأشعة السينية اللينة SXR كان عند ضغط 2.5 Torr ، بينما أعلى إصدار لأشعة X القاسية (HXR) كانت عند ضغط 3.5 Torr [10] ، ووجد P. Lee [2017] أن البلازما المحرقية مصدر كثيف للجسيمات عالية السرعة والاصدارات الإشعاعية عند استخدام الجهاز بطاقة تشغيل منخفضة مثل 3KJ ، في البلازما المحرقية الصادرة من غاز النيون ، الحد الأقصى لإصدار الأشعة السينية هو $10^{19}W$ لفترة زمنية تبلغ عدة نانوثانية. أما عند استخدام غاز الديوتيريوم ، فإن الاندماج النووي ينتج بمعدل 10^{15} نيوترون في الثانية وفترة الاصدار هي بضع عشرات من النانو ثانية مما يجعل هذه الأجهزة واحدة من أقوى مصادر الإشعاع النبضية في المختبر ، وتعتمد هذه المصادر على البلازما [11]. كما درس W. Sahyouni و A. Nassif [2018] اصدار الأشعة السينية اللينة من جهاز البلازما المحرقية NX2 عند استخدام غاز النيون باستخدام برنامج Lee ووجدوا أن القيمة القصوى لمردود الأشعة السينية اللينة باستخدام البارامترات الأساسية للجهاز هي ($Y_{SXR} = 22.6$) عند ضغط (2.9Torr) ، وبتقليل طول المصعد وزيادة نصف قطره ، يزداد إنتاج الأشعة السينية اللينة إلى (26.01J) . بكفاءة (1.53%) [12]. في عام 2019 ، أجرى Walid Sahyouni

وأخرون تجارب عديدة باستخدام برنامج Lee لدراسة خصائص الحزمة الأيونية التي ينتجها جهاز البلازما المحرقة الكثيفة NX2 عند استخدام غاز الهيليوم وغاز النيتروجين مع تغيير الضغط ، وأظهرت النتائج أن في حالة غاز الهيليوم ، كان تدفق الحزمة أعلى ، بينما كانت طاقة الحزمة الأيونية أعلى في حالة الغاز الثقيل لأن الشحنة الفعالة لأيون النيتروجين أكبر وكان جهد انهيار القبضة أعلى [13]. في عام 2021، أجرى Walid Sahyouni وآخرون سلسلة من التجارب العددية لدراسة تأثير الفرق في طول المصعد بين جهازي البلازما NX2 و PF400. أظهرت هذه الدراسة أن القيمة المنخفضة لطول المصعد في جهاز NX2 أثرت على السرعة المحورية ووصلت بالتالي قيمة أكبر من الطاقة المخزنة في بنك المكثفات وكانت أعلى قيمة لمردود الأشعة السينية $y_{sxr} = 4.5$ لجهاز NX2 و $y_{sxr} = 0.2$ لجهاز PF400 [14].

جعلت المحاكاة العددية لظاهرة البلازما المحرقة باستخدام برنامج Lee من الممكن إجراء بحث على الأجهزة الفعلية ، بالإضافة إلى استخدامها في تصميم واختبار أجهزة البلازما الجديدة لما يتمتع به من مزايا كبيرة من خلال ربط بارامترات الدارة الكهربائية بديناميك وترموديناميك البلازما والإصدارات الإشعاعية من البلازما المحرقة وتوفير محاكاة واقعية للخصائص الكلية في جميع مراحل تطوير البلازما المحرقة بدءاً من لحظة تفريغ بنك المكثفات ولذلك تم استخدامه في هذا إجراء البحث.

النتائج والمناقشة:

يعد تصميم جهاز بلازما محرقة كثيفة إجراءً معقداً لأنه يتضمن عدداً من المشكلات المترابطة مثل بارامترات الدارة الكهربائية المتعلقة ببنك المكثفات بالإضافة إلى هندسة الأقطاب الكهربائية. لذلك اخترنا في البداية طاقة بنك المكثفات وحددنا قيم كل من السعة والتحريض والجهد والمقاومة الداخلية للدارة وأبعاد الأقطاب، ثم أدخلنا هذه البارامترات في برنامج Lee لاختبار صحة هذه البارامترات في عملية تشكيل البلازما المحرقة. ثم تمت مقارنة النتائج مع جهاز البلازما المحرقة UNU ICTP/ PFF لعدد من خصائص البلازما المحرقة عند قيمتين لضغط غاز النيون. أخيراً ، تمت مقارنة مردود الأشعة السينية اللينة عندما تغير ضغط غاز النيون بين الجهاز المصمم والجهاز القياسي وفقاً للمنهج الآتي:

تحديد بارامترات الدارة الكهربائية:

يعتمد تحديد قيمة الطاقة التشغيلية للجهاز وبارامترات بنك المكثفات بشكل أساسي على الملاحظات التجريبية. لذلك، اخترنا طاقة تشغيل الجهاز (3 KJ) بحيث يكون الجهاز المصمم في فئة أجهزة البلازما المحرقية متوسطة الطاقة، وسعة بنك المكثفات $C_0 = 30 \times 10^{-6} F$ وقيمة التحريض $L_0 = 110 \times 10^{-9} H$.

وبالتالي، يتم حساب جهد التشغيل من خلال:

$$E = \frac{1}{2} C_0 V^2 \Rightarrow V = \sqrt{\frac{2E}{C_0}} = \sqrt{\frac{2 \times 3000}{30 \times 10^{-6}}} = 14 \text{ KV}$$

وتيار التفريغ الكلي:

$$I_0 = \frac{V_0}{\sqrt{\frac{L_0}{C_0}}} = \frac{14000}{0.06} = 231 \text{ KA}$$

والمقاومة الداخلية:

$$r_0 = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{110 \times 10^{-9}}{30 \times 10^{-6}}} = 0.015 \Omega$$

تحديد أبعاد أقطاب حجرة التفريغ:

نختار طول المصعد $z=15 \text{ cm}$ ، ونصف قطره $a=1 \text{ cm}$ ، ونسبة نصف قطر المهبط إلى المصعد $c = \frac{b}{a} = 3.37$ ، لذلك يكون نصف قطر المهبط $b = 3.37 \text{ cm}$. تم إدخال هذه البيانات في برنامج Lee وتم الحصول على النتائج التالية:

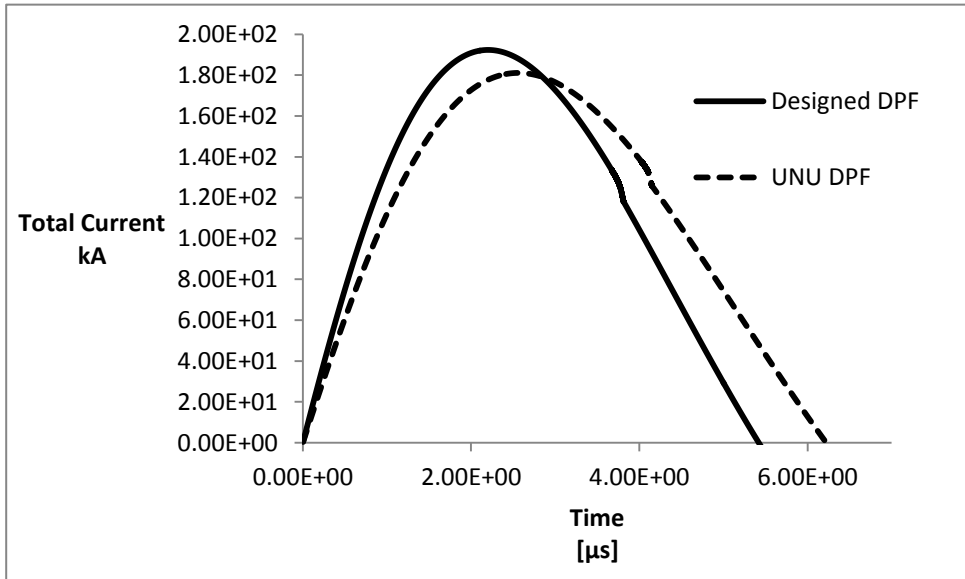
مقارنة نتائج الجهاز المصمم مع جهاز البلازما المحرقية الكثيفة UNU / ICTP PFF:

تتم مقارنة الجهاز المصمم بجهاز البلازما المحرقية UNU/ICTP PFF والذي يتضمن البارامترات الآتية [15]:

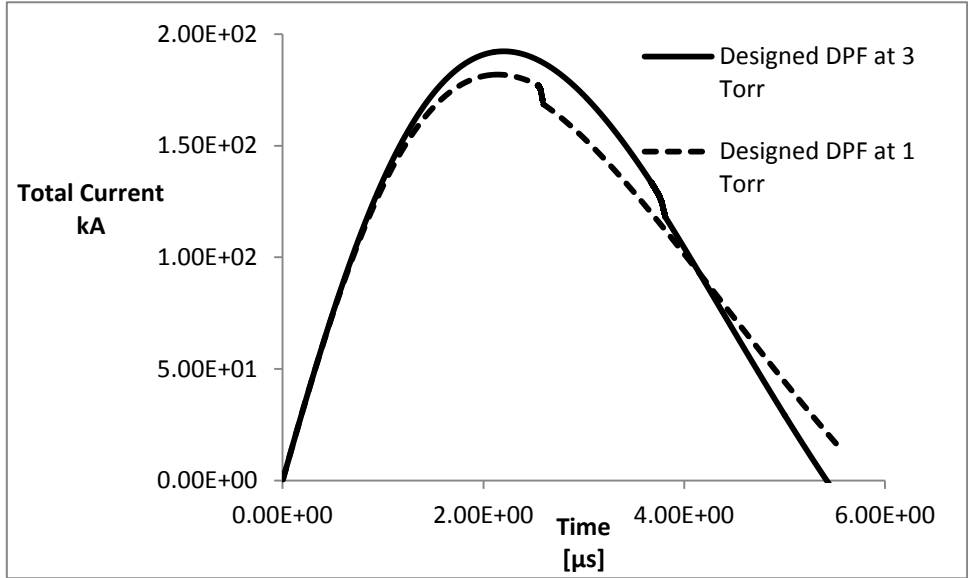
طاقة التشغيل (2.7 KJ) ونفس سعة بنك المكثفات والتحريض، وطول المصعد $z=16 \text{ cm}$ ، ونصف قطره $a=0.95 \text{ cm}$ ونسبة نصف قطر المهبط إلى المصعد $c = \frac{b}{a} = 3.37$.

(a) تيار التفريغ:

يعتبر مسار تيار التفريغ الكلي هو المؤشر الأكثر أهمية عن الأداء العام للبلازما المحرقة حيث يقوم بتقديم الطاقة لمجمل العمليات الديناميكية والترموديناميكية والالكتروديناميكية وعمليات الإصدار الإشعاعي في المراحل المختلفة للبلازما المحرقة، حيث يحتوي التابع الموجي لتيار التفريغ على معلومات عن جميع العمليات السابقة. كما أن الشكل العام لمسار تيار التفريغ محكوم ببارامترات بنك المكثفات وأبعاد أقطاب حجرة التفريغ لذلك فإن الخطوة الأولى عند دراسة البلازما المحرقة هي دراسة تيار التفريغ بدءاً من لحظة إغلاق بنك المكثفات وحتى انتهاء عملية التفريغ. لذلك تم أولاً مقارنة مسار تيار التفريغ الكلي للجهاز المصمم مع جهاز البلازما المحرقة الكثيفة UNU/ICTP PFF عند قيمة ضغط غاز النيون (3 Torr).



الشكل (2) التابع الموجي لتيار التفريغ الكلي للجهاز المصمم مع جهاز UNU / ICTP PFF



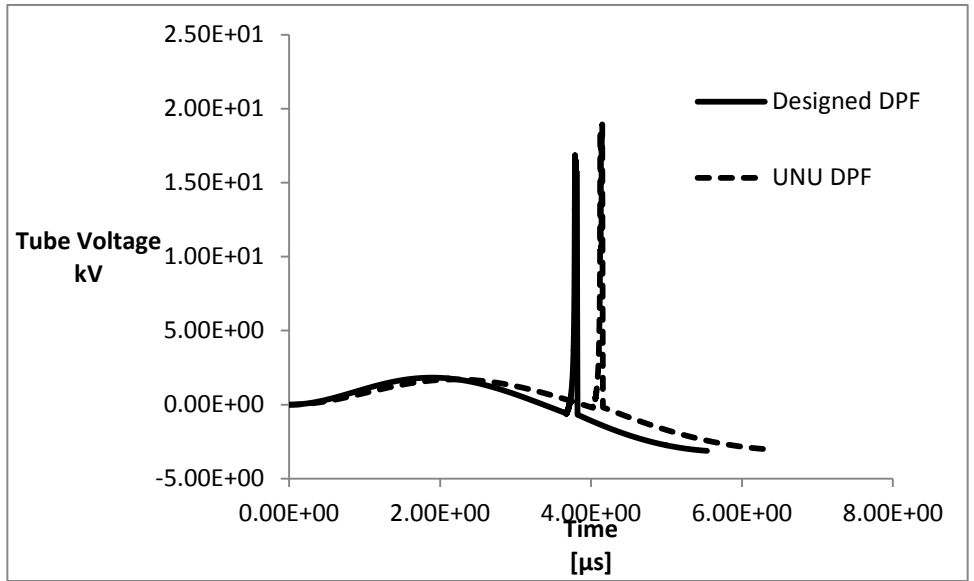
الشكل (3) مسار تيار التفريغ للجهاز المصمم عند قيمتي الضغط (1 Torr) و (3 Torr)

حيث نلاحظ من الشكل (2) توافق مساري التيارين مع ملاحظة أن مسار التيار في الجهاز المصمم أعلى قليلاً بسبب الاختلاف في الأبعاد الهندسية للجهازين، كما أن القيمة العظمى لتيار التفريغ في الجهاز المصمم أعلى من قيمتها في جهاز UNU/ICTP PFF لأن طاقة التشغيل في الجهاز المصمم أعلى.

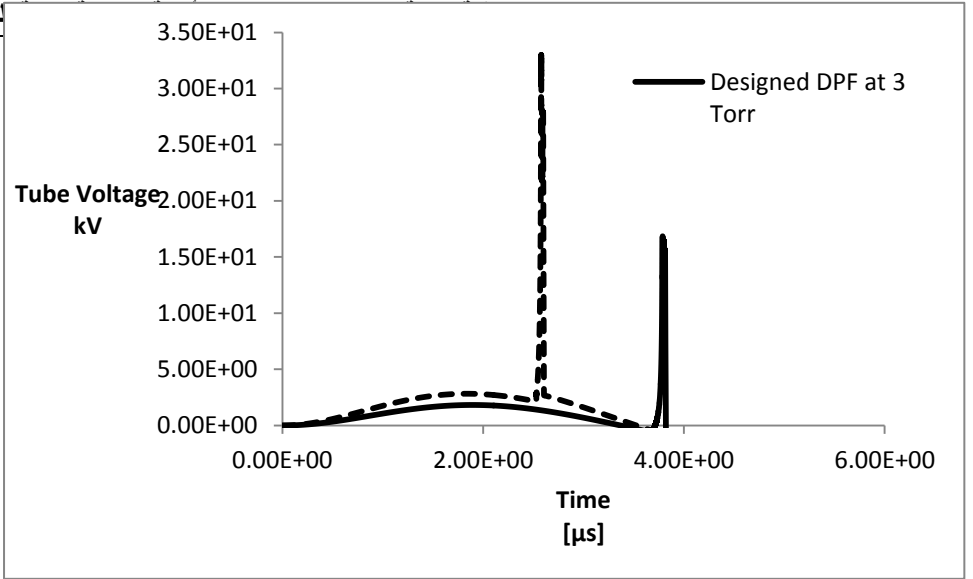
كما نلاحظ من الشكل (3) مسار تيار التفريغ للجهاز المصمم عند قيمتي الضغط (1 Torr) و (3 Torr). نلاحظ التوافق في شكل مساري التيارين والتطابق بينهما في المرحلة الأولى من عملية التفريغ وبيتعدان في القمة مع ملاحظة انخفاض القمة في حالة الضغط المنخفض بالإضافة إلى انتهاء عملية التفريغ باكراً. من شكل مسار التيار يمكن ملاحظة عملية الانتقال إلى المرحلة القطرية من مراحل تطور البلازما المحرقية التي تحتوي ضمنها مرحلة تشكل قبضة البلازما حيث تحدث في هذه المرحلة معظم عمليات الإصدار الإشعاعي من البلازما المحرقية الكثيفة.

في حالة الضغط (1 Torr) نجد أن أعلى قيمة لتيار التفريغ هي (182 kA) وتبدأ المرحلة القطرية عند (2.55 μ s) وتنتهي عند (2.60 μ s) وتستغرق قبضة البلازما (0.05 ns) تقريباً. أما عند قيمة الضغط (3 Torr) نجد أن أعلى قيمة لتيار التفريغ هي (192 kA) وتبدأ المرحلة القطرية عند (3.7 μ s) وتنتهي عند (3.8 μ s) وتستغرق قبضة البلازما (0.1 ns) تقريباً حيث يؤدي زيادة قيمة ضغط الغاز إلى زيادة مدة المرحلة القطرية ومرحلة القبضة.

(b) **جهد حجرة التفريغ:** تم مقارنة تغيرات جهد حجرة التفريغ مع زمن التفريغ في الجهاز المصمم مع جهاز UNU/ICTP PFF كما هو مبين في الشكل (4).

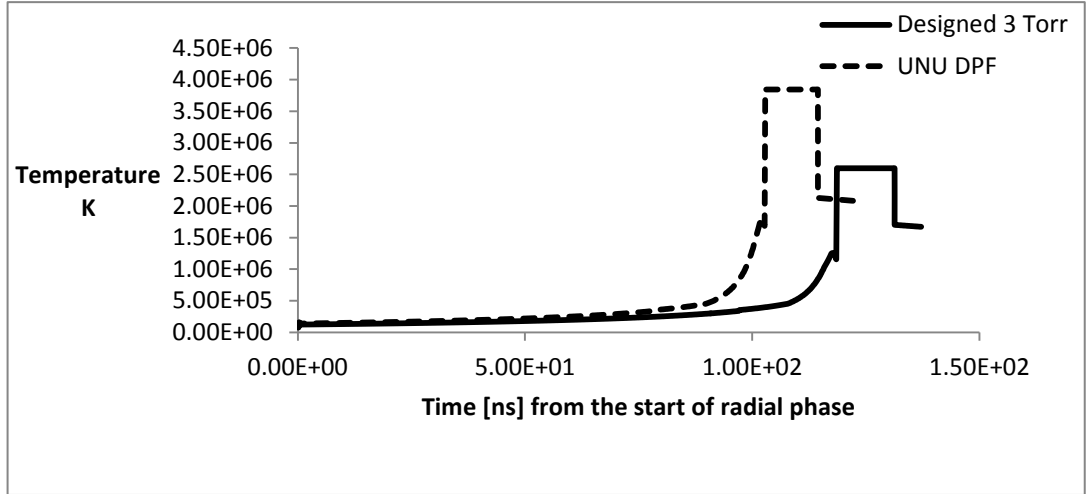


الشكل (4) تغيرات جهد حجرة التفريغ مع زمن التفريغ في UNU/ICTP PFF

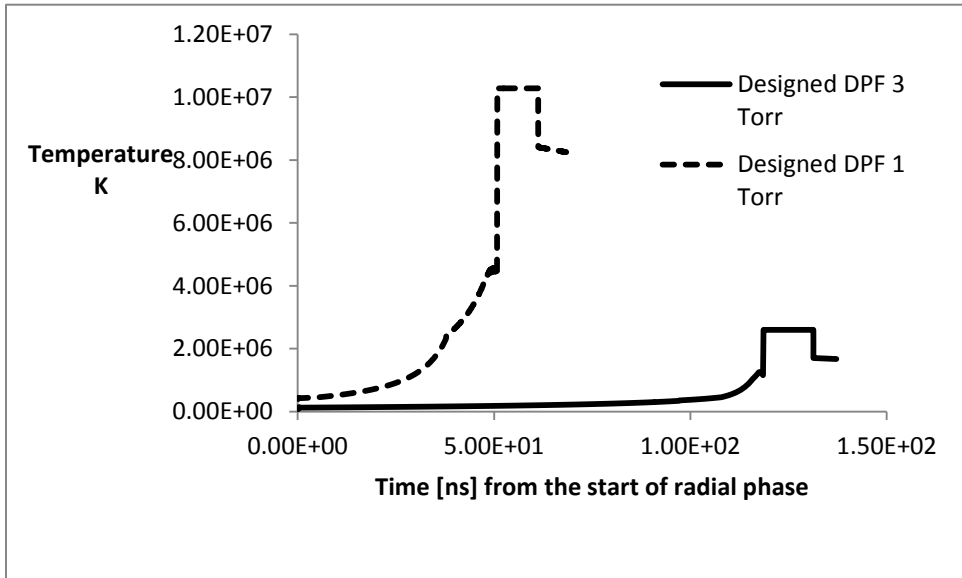


الشكل (5) تغيرات جهد حجرة التفريغ بدلالة زمن التفريغ عند قيمتي الضغط (1 Torr) و (3 Torr) بمقارنة الشكلين نلاحظ من الشكل (4) تطابق شكل التابع المعبر عن جهد حجرة التفريغ في كلا الجهازين والاختلاف في ذروة الجهد بسبب الاختلاف الهندسي بين الجهازين. ومن الشكل (5) نلاحظ دراسة تغيرات جهد حجرة التفريغ بدلالة زمن التفريغ عند قيمتي الضغط (1 Torr) و (3 Torr) حيث تدل بداية القمة إلى نهاية المرحلة المحورية وبداية مرحلة الانضغاط القطري والتي تتضمن بداخلها مرحلة تشكل قبضة البلازما حيث يشير الانحدار الحاد للقمة إلى تشكلها. يتضح من الشكل أن أعلى قيمة لجهد الحجرة عند الضغط (3 Torr) هي (1.62 kV) بينما عند الضغط (1 Torr) فإن أعلى قيمة للجهد هي (3.3 kV) حيث أن انخفاض قيمة ضغط غاز النيون أدى إلى ازدياد قيمة كمون الحجرة.

(c) درجة الحرارة:



الشكل (6) درجة حرارة البلازما بين الجهاز المصمم وجهاز UNU/ICTP



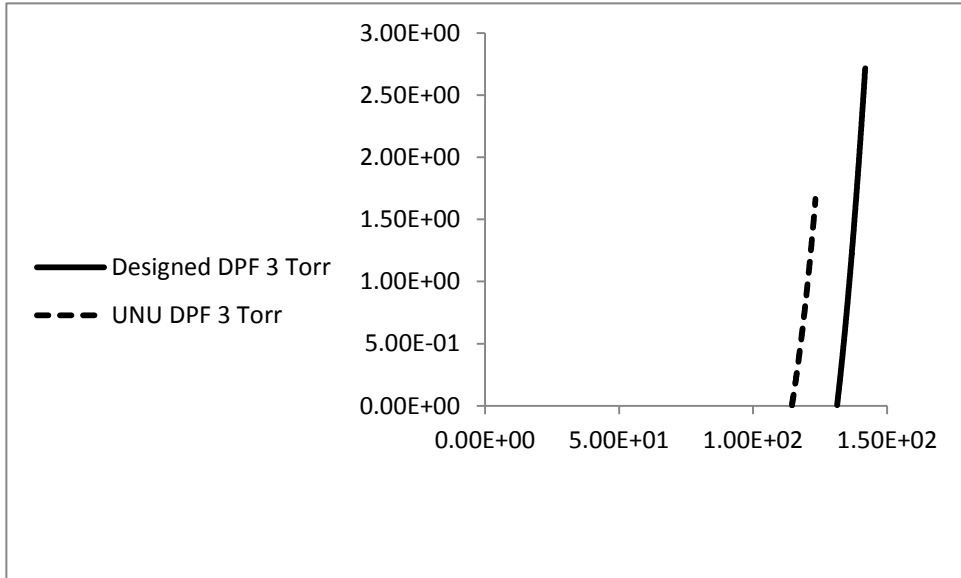
الشكل (7) تغير درجة الحرارة في الجهاز المصمم عند قيمتين لضغط النيون 3Torr و 1Torr كما يظهر الشكل (6) وجود تشابه في الشكل العام للمنحنيين حيث نلاحظ زيادة أسية ثم استقرار في درجة الحرارة ثم تناقص خطي مع تقدم الزمن مع الإشارة إلى حصول

ارتفاع حاد في درجة الحرارة في حالة الضغط المنخفض خلال زمن أقل من حالة الضغط المرتفع.

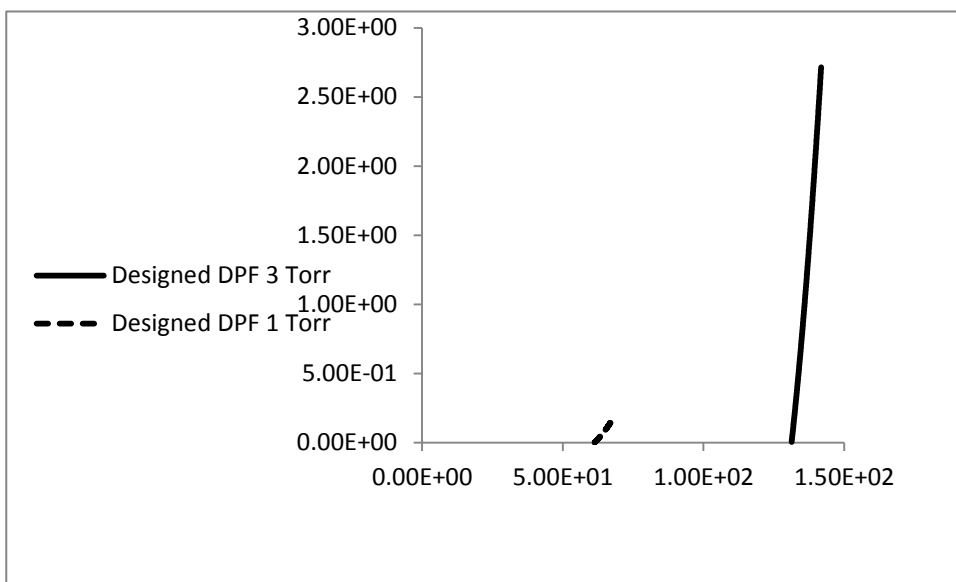
يعود الثبات في درجة الحرارة في الجزء العلوي من المنحنيين إلى ثبات سرعة موجة صدمة البلازما، والانخفاض الذي يحصل بعد هذا الاستقرار يعود إلى انخفاض قيمة تيار التفريغ أي انخفاض قيمة الطاقة الواصلة من بنك المكثفات إلى هذه المرحلة من مراحل تطور البلازما المحرقية.

(d) اكتساب الطاقة:

يعبّر التسخين الجولي عن العملية التي تحدث عند مرور تيار كهربائي ضمن ناقل مما يؤدي إلى إصدار حرارة، وفي البلازما المحرقية ينتج التسخين الجولي عن مرور التيار ضمن البلازما (ناقل) مما يؤدي إلى رفع درجة حرارتها وهذا ما يعتبر كسب حراري (اكتساب طاقة) للبلازما بواسطة هذه العملية.



الشكل (8) قيمة التسخين الجولي بين الجهاز المصمم وجهاز (UNU/ICTP)



الشكل (9) قيمة التسخين الجولي عند قيمتين للضغط (3Torr و 1Torr)

تمت مقارنة قيمة التسخين الجولي بين الجهاز المصمم وجهاز (UNU/ICTP) كما هو مبين في الشكل (8) خلال المرحلة القطرية عند قيمة ضغط غاز النيون (3Torr) حيث نلاحظ التوافق بين المنحنيين مع ملاحظة أن الجهاز المصمم يكتسب طاقة (تسخين جولي) أعلى حيث تصل أعلى قيمة لهذه الطاقة (2.72 J) بينما في جهاز (UNU/ICTP) (1.67 J) وذلك بسبب الاختلاف في الأبعاد الهندسية بين الجهازين. كما نلاحظ من الشكل (9) قيمة التسخين الجولي عند قيمتين للضغط (1Torr و 3Torr) على التوالي للجهاز المصمم حيث نلاحظ ازدياد عملية اكتساب الطاقة مع ازدياد قيمة ضغط غاز النيون.

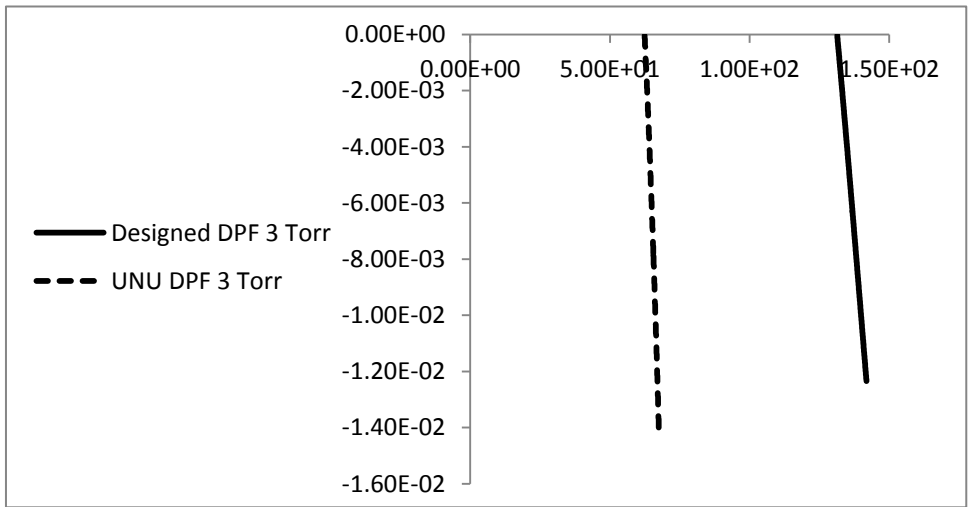
(e) خسارة الطاقة:

تتم عملية خسارة الطاقة في البلازما المحرقة من خلال ثلاث عمليات وهي: الكبح - إعادة الاتحاد - الإصدار الخطي.

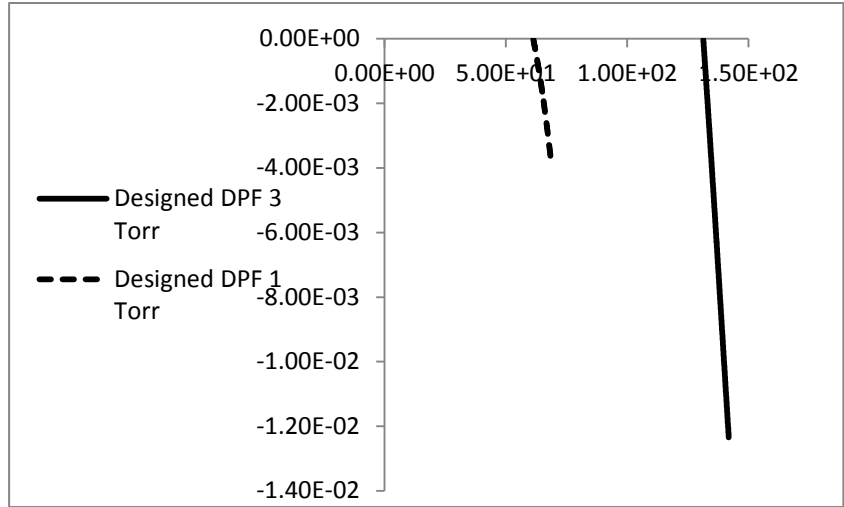
1- الكبح:

يتم فقدان الطاقة بالكبح نتيجة تفاعل كولون بين الالكترونات والأيونات الذي يعرف بالانتقال (حر- حر) للالكترون.

وبمقارنة عملية فقدان الطاقة بالكبح بين الجهاز المصمم وجهاز (UNU/ICTP) عند قيمة واحدة للضغط (3Torr) نلاحظ أن فقدان الطاقة بالكبح في الجهاز المصمم أقل من جهاز كما أن هذه الخسارة في الطاقة تزداد مع ازدياد ضغط غاز النيون في الجهاز المصمم كما في الشكل (10).

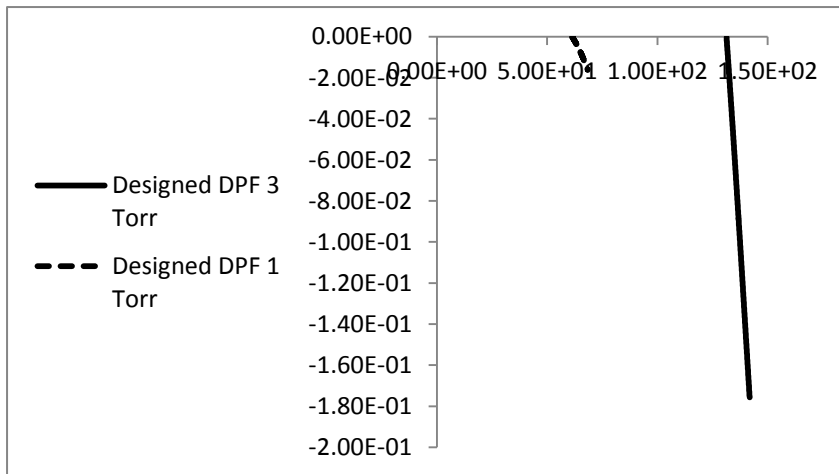


الشكل (10) عملية فقدان الطاقة بالكبح بين الجهاز المصمم وجهاز (UNU/ICTP)

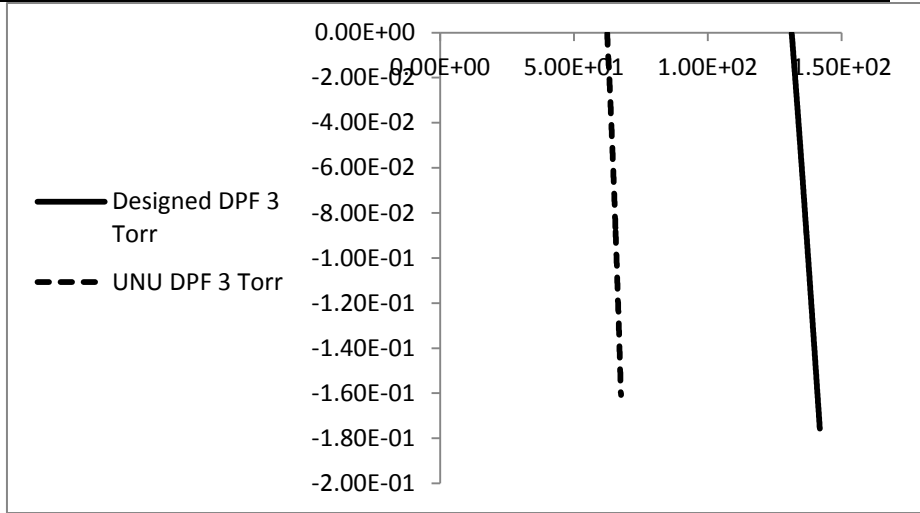


الشكل (11) عملية فقدان الطاقة بالكبح عند قيمتين للضغط (3Torr و 1Torr) للجهاز المصمم
2- إعادة الاتحاد:

يتم خسارة الطاقة في هذه العملية من خلال اتحاد الكترون مع أيون أو ما يعرف بالانتقال (حر - مقيد). يتضح من الشكلين (12) و (13) أن الجهاز المصمم يفقد طاقة بهذه العملية أكبر قليلاً من جهاز (UNU/ICTP) وأيضاً تزداد خسارة الطاقة بواسطة إعادة الاتحاد في الجهاز المصمم مع ازدياد ضغط الغاز المطبق.



الشكل (12) خسارة الطاقة بواسطة إعادة الاتحاد في الجهاز المصمم عند قيمتين للضغط (3Torr و 1Torr)

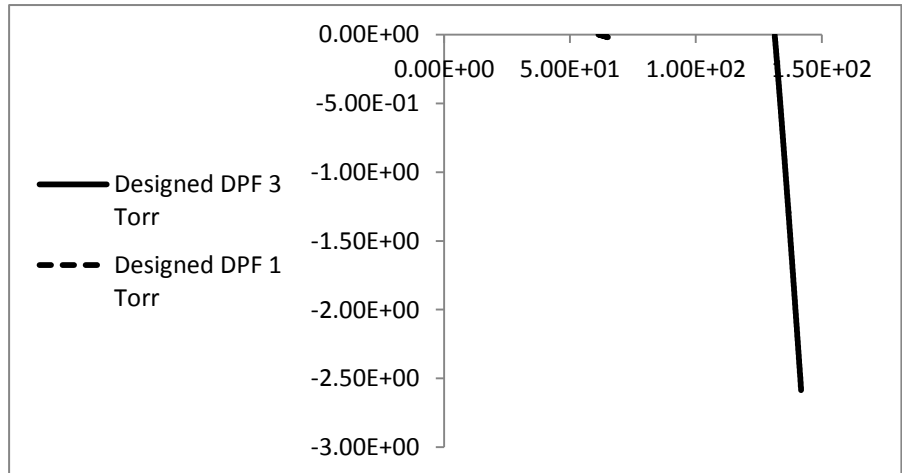


الشكل (13) خسارة الطاقة بواسطة إعادة الاتحاد بين الجهاز المصمم وجهاز (UNU/ICTP)

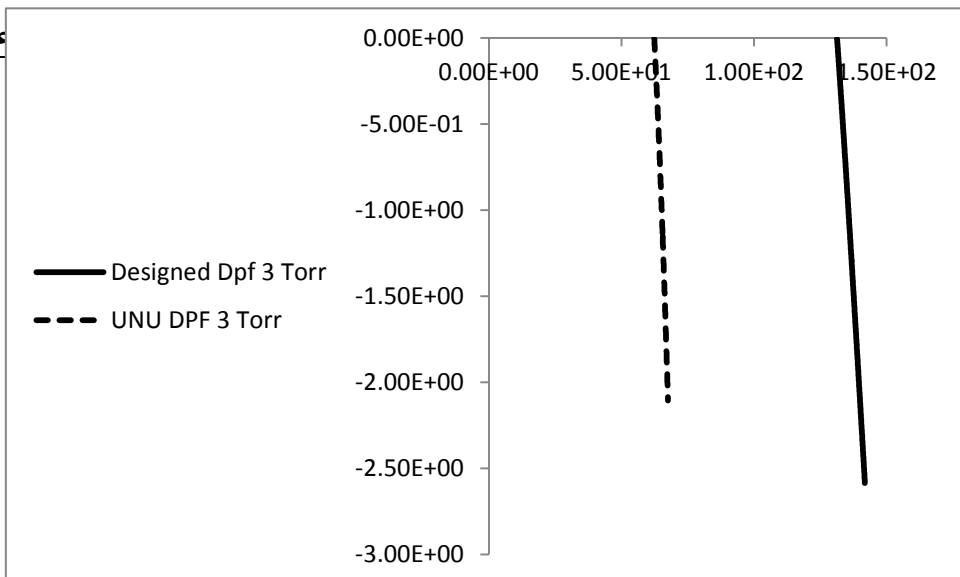
3- الإصدار الخطي:

يتم فقدان الطاقة بالإصدار الخطي في البلازما المحرقية من خلال انتقال الإلكترون إلى سويات أيونية أخفض أو ما يسمى بالانتقال (مقيد - مقيد).

نلاحظ من الشكلين (14) و(15) أن فقدان الطاقة بالإصدار الخطي في الجهاز المصمم أعلى قليلاً من جهاز (UNU/ICTP) كما يؤدي ازدياد الضغط في الجهاز المصمم إلى ازدياد فقدان الطاقة من خلال هذه الآلية.



الشكل (14) فقدان الطاقة بالإصدار الخطي في الجهاز المصمم عند قيمتين للضغط (3Torr و 1Torr)



الشكل (15) فقدان الطاقة بالاصدار الخطي بين الجهاز المصمم وجهاز (UNU/ICTP)

(f) إيجاد مردود الأشعة السينية اللينة للجهاز المصمم:

تم إيجاد مردود الأشعة السينية اللينة لكل من الجهاز المصمم وجهاز UNU DPF عند

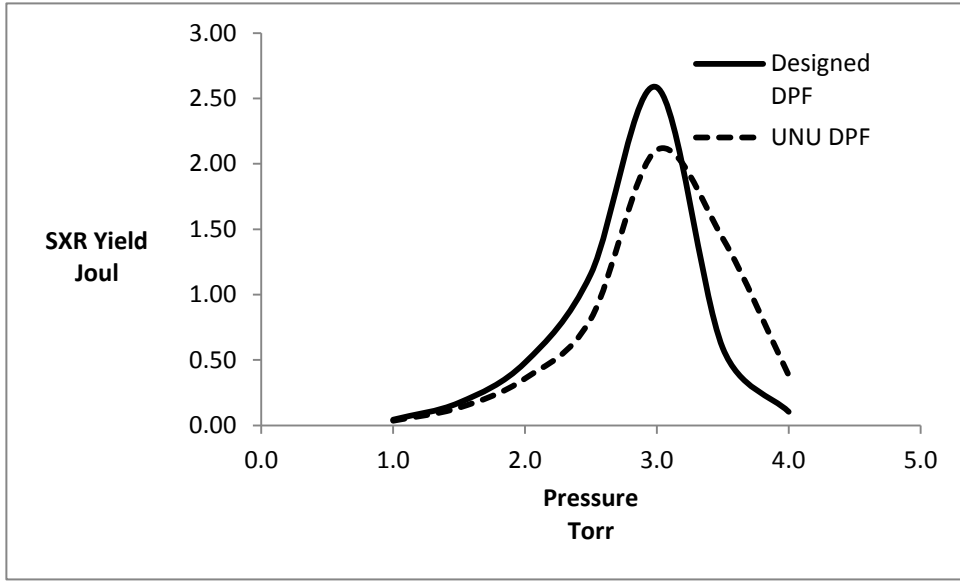
تغير ضغط غاز النيون وكانت النتائج المبينة في الجدول (1):

الجدول (1) مردود الأشعة السينية اللينة لكل من الجهاز المصمم وجهاز UNU DPF

Pressure Torr	UNU DPF SXR Yield Joul	Designed DPF SXR Yield Joul
1.0	0.04	0.04
1.5	0.14	0.17
2.0	0.36	0.48
2.5	0.81	1.16
3.0	2.11	2.58
3.5	1.43	0.59
4.0	0.38	0.10

وللمقارنة قمنا برسم تغيرات مردود الأشعة السينية مع تغيرات ضغط الغاز النيون كما هو

مبيّن في الشكل (16):



الشكل(16) مردود الأشعة السينية مع تغيرات ضغط الغاز النيون بين الجهاز المصمم وجهاز (UNU/ICTP)

الاستنتاجات:

طور هذا البحث مفهوماً نظرياً لتصميم جهاز بلازما محرقية كثيفة يعمل بغاز النيون، من أجل زيادة مردود الأشعة السينية اللينة. تمت مقارنة بارامترات الجهاز المصمم بجهاز البلازما المحرقية UNU ICTP / PFF، حيث تمت زيادة طاقة التشغيل في الجهاز المصمم إلى 3 KJ، وتم تقليل طول المصعد إلى 15 cm، وزيادة نصف قطر المصعد إلى 1 cm. أظهرت النتائج توافقاً في الميزات المدروسة بين الجهازين، ولوحظ أن مردود الأشعة السينية في الجهاز المصمم ازداد إلى 2.58 J مقارنة بـ 2.11 J في جهاز UNU ICTP / PFF. هذه الدراسة والنتائج التي تم الحصول عليها مفيدة لتطوير تصميمات جديدة لأجهزة البلازما المحرقية الكثيفة لأغراض عملية، كما أكدت النتائج أهمية برنامج Lee كأحد أفضل أدوات التجارب العددية لدراسة البلازما المحرقية.

References

1. Mather, J. W. (1965). **Formation of a high- density deuterium plasma focus**. *The Physics of Fluids*, 8(2), 366-377.
2. Filippov, N. V., Filippova, T. I., & Vinogradov, V. P. (1962). **Dense high-temperature plasma in a non-cylindrical Z-pinch compression** . *Nucl. Fusion, Suppl.*
3. Talebitaher, A., Springham, S. V., Shutler, P. M. E., Lee, P., & Rawat, R. S. (2012). Imaging of plasma focus fusion by proton coded aperture technique. *Journal of fusion energy*, 31(3), 234-241.
- 4- Akel, M., & Lee, S. (2012). **Dependence of plasma focus argon soft X-ray yield on storage energy, total and pinch currents**. *Journal of fusion energy*, 31(2), 143-150.
- 5- Lee, S., Saw, S. H., Rawat, R. S., Lee, P., Talebitaher, A., Abdou, A. E., ... & Devi, K. (2011). **Correlation of measured soft X-ray pulses with modeled dynamics of the plasma focus**. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 39(11), 3196-3202.
- 6-Akel, M., Al-Hawat, S., & Lee, S. (2009). **Numerical experiments on soft X-ray emission optimization of nitrogen plasma in 3 kJ plasma focus SY-1 using modified lee model**. *Journal of fusion energy*, 28(4), 355.
- 7- Mahtab, M., Taghipour, M., Roshani, G. H., & Habibi, M. (2014). **Approach to the Highest HXR Yield in Plasma Focus Device Using Adaptive Neuro fuzzy Inference System to Optimize Anode Configuration**. *Journal of Experimental Physics*, 2014.
- 8- Di Lorenzo, F., Raspa, V., Knoblauch, P., Lazarte, A., Moreno, C., & Clause, A. (2007). **Hard x-ray source for flash radiography based on a 2.5 kJ plasma focus**. *Journal of Applied Physics*, 102(3), 033304.
- 9- Fogliatto, E., González, J., Barbaglia, M., & Clause, A. (2014, May). **A model of hard X-rays emission from free expanding Plasma-Focus discharges**. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 511, p. 012036).
10. Roomi, A., Saion, E., Habibi, M., Amrollahi, R., Baghdadi, R., Etaati, G. R., ... & Iqbal, M. (2011). **The Effect of Applied Voltage and Operating Pressure on Emitted X-Ray from Nitrogen (N 2)**

Gas in APF Plasma Focus Device. Journal of fusion energy, 30(5), 413-420.

11. Syahputra, R. F., Farma, R., Nawi, N. D., Rashid, N. A., Ismail, F. D., & Ali, J. (2018, September). **Influence of Electrical Properties on Radiation and Emission to Pinch Radius Thermal Plasma Device.** In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 1090, No. 1, p. 012058). IOP Publishing.

12. Sahyouni, W., & Nassif, A. (2020). **Nitrogen Soft X-Ray Yield Optimization from UNU/ICTP PFF Plasma Focus Device.** Am J Mod Phys, 8(6), 86.

13. Walid, S., & Alaa, N. (2019). **Ions beam properties produced by NX2 plasma focus device with helium and nitrogen gas.** American Journal of Modern Physics, 8(1), 1-4.

14. Walid Sahyouni, Alaa Nassifm and Rasha Yousef.(2021) .**Study The Effect of Anode Length on Nitrogen Plasma Pinch Dimensions in NX2 and UNU / ICTP PFF Dense Plasma Focus Devices. EME.000573. 3(5).2021**

15. Lee, S., & Saw, S. H. (2010). **Generation of Soft X-Ray (SXR) from Plasma Focus.** International Journal of Engineering and Technology, Issue 1, Volume 1, December 2010 ISSN: 2180-3633 Electronic Version.