

# تأثير اختلاف العدد الذري على مردود الأشعة السينية اللينة في جهاز البلازما المحرقة الكثيفة PF400

طالبة الدراسات العليا: أماني العكاري كلية العلوم - جامعة البعث  
بإشراف أ. د. وليد مصطفى صهيوني كلية العلوم - جامعة البعث  
ومشاركة: د. علاء ناصيف كلية الهندسة - الجامعة الوطنية الخاصة

## ملخص

دُرس في هذا البحث تأثير اختلاف نوع الغاز (ذري أو جزيئي) وضغطه على مردود الأشعة السينية اللينة الصادرة عن جهاز البلازما المحرقة الكثيفة PF400. تم إجراء الدراسة على غازي النيون والأزوت حيث تم أولاً إيجاد وسطاء البلازما المحرقة: مجال درجة الحرارة المناسب لإصدار الأشعة السينية اللينة وعدد الشحنات الفعالة للغازين المدروسين وذلك باستخدام نموذج الهالة (Corona Model) ومقارنة النتائج التي تم الحصول عليها مرجعياً ثم إيجاد مردود الأشعة السينية اللينة الصادرة عن بلازما الغازين المدروسين من خلال إجراء سلسلة من التجارب العددية باستخدام برنامج Lee. أظهرت النتائج أن أعلى قيمة لمردود الأشعة السينية اللينة في حالة غاز النيون ل 0.148 عند الضغط 3.2 Torr بينما في حالة غاز الأزوت كانت ل 0.0634 عند الضغط 4.4 Torr وذلك بسبب القيمة المرتفعة للعدد الذري والشحنة الفعالة لغاز النيون مقارنة بغاز الأزوت.

الكلمات المفتاحية: قبضة البلازما، جهاز البلازما PF400، مردود الأشعة السينية اللينة، نموذج Lee. نموذج الهالة

## The effect of the difference of atomic number on soft X-rays yield in the dense plasma focus device PF400

### Abstract

In this paper, the effect of difference gas type (atomic or molecular) and its pressure on the yield of soft X-rays emitted by the dense plasma focus device PF400 is studied. The study was conducted on neon and nitrogen gases, where the plasma focus parameters were first found: the appropriate temperature range for soft X-ray emission and the number of effective charge of the two studied gases, using the Corona Model and comparing the results that were obtained. It is used as a reference and then finds soft X-rays yield emitted from the plasma of the two studied gases by conducting a series of numerical experiments using the Lee code. The results showed that the highest value of the soft X-ray yield in the case of neon gas was 0.148 J at a pressure of 3.2 Torr, while in the case of nitrogen gas it was 0.0634 J at a pressure of 4.4 Torr, due to the value the higher atomic number and effective charge of neon gas compared to nitrogen gas.

**Key words:** Plasma pinch, PF400 plasma focus device, soft X-ray yield, Lee model. Corona Model

## مقدمة:

تعدّ البلازما المحرّقة أحد أنواع البلازما التي تم تطويرها خلال اوائل الستينات في القرن العشرين من أجل أبحاث الاندماج النووي من قبل العالمين W. Mather. J في الولايات المتحدة الأمريكية و N . V . Filippov في الاتحاد السوفيتي [1].

جهاز البلازما المحرّقة شبيه بجهاز قبضة البلازما وهو مؤهل لإنتاج بلازما ذات عمر قصير وكثافة الكترونية ودرجة حرارة الكترونية عالية (  $T_e > 500eV$  ) وإمكانية إصدار نبضات قصيرة وعالية الشدة من الأشعة السينية (إن طيف إشعاع البلازما المحرّقة في مجال الأشعة السينية يغطي مجالاً من 1keV الى 500keV) والنترونات السريعة وحزم الجسيمات المشحونة (الأيونات - الإلكترونات) [2,3].

تعتبر أجهزة قبضة البلازما المحرّقة من المصادر الواعدة لنبضات الأشعة السينية اللينة لفترات زمنية تتراوح من نانو ثانية الى مئات نانو ثانية وتكون الأشعة السينية المتولدة خلال نبضة من اجهزة القبضة Z-Pinch ذات طاقة اعلى من الطاقة الناتجة عن منابع توليد اخرى [4].

يقوم مبدأ عمل اجهزة البلازما المحرّقة على نقل الطاقة الكهربائية المخزنة في بنك مكثفات التي تنقل بسرعة الى مجموعة أقطاب بوساطة القذح السريع ليبدأ تيار الانفراج من سطح العازل المحيط بأسفل المصعد وينتشر ليصل الى نهايته فتقوم قوة لورنتز  $J \times B$  المتشكلة من تأثير حقل التحريض المغناطيسي الذاتي على التيار المار في صفحة البلازما (plasma sheet) بتسريعها بدءاً من أسفل المصعد وحتى نهايته عند محور تناظره وعندها تتضغط صفحة التيار مغناطيسياً خلال زمن قدره 50ns وكثافة  $10^{19}m^{-3}$  في عمود البلازما او ما يعرف بقبضة (pinch) ومن ثم ينهار عمود البلازما بفعل اللااستقرارات البلازما [5,6].

تتميز قبضة البلازما بقدرتها على إصدار أنواع مختلفة من الإشعاعات والجسيمات نذكر منها: الأشعة السينية بأنواعها القاسية والمتوسطة واللينة، الأشعة فوق البنفسجية،

النيوترونات، الأيونات السريعة، الإلكترونات السريعة [7]، حيث تتعلق هذه الإصدارات بنوع الجهاز من الناحية الهندسية (طول وأنصاف أقطار الأقطاب) كما تتعلق بنوع الغاز أو المزيج الغازي المستخدم [8,9] في عملية التشغيل فمثلاً عند إنتاج النيوترونات يتم استخدام غاز الديتيريوم أما لإصدار الأشعة السينية تستخدم الغازات الخاملة [6].

### نموذج Lee:

صدرت أول نسخة عن هذا النموذج عام 1985 حيث كانت عبارة عن مرحلتين وبعد ذلك استخدم لوصف وتحسين أجهزة البلازما المحرقة ولاحقاً طور بخمس مراحل عام 2000 حيث قدم محاكاة واقعية لخصائص البلازما المحرقة وذلك من خلال ربط بارامترات الدارة الكهربائية مع ديناميكيات وترموديناميك البلازما والإصدارات الإشعاعية [11,10,12]. يتم من خلال هذا النموذج حساب مردود الأشعة السينية اللينة عند استخدام غازات مختلفة والإصدار النيوتروني [13] و تحسين هذا المردود عند تغيير الضغط ونوع الغاز وبارامترات بنك المكثفات.

ان أهم ما يميز هذا النموذج:

- ✓ انه يقدم محاكاة لأي جهاز البلازما المحرقة وفق نموذج Mather .
- ✓ يتضمن ترموديناميكيات العديد من الغازات منها H, D, He, N, Ne..
- ✓ يمكن حساب المردود الإشعاعي لكل من الإصدارات: الكبح - إعادة الاتحاد - الخطي ومردود الإشعاع الكلي بالمرحلة القطرية.
- ✓ يضم بارامترات النموذج ( $f_{cr}, f_{mr}, f_c, f_m$ ) لمطابقة أزمنة المرحلتين المحورية والقطرية.

يتم في هذا النموذج تقسيم ديناميكيات البلازما المحرقة في الأجهزة وفق نموذج Mather إلى ثلاثة مراحل أساسية هي: مرحلة الانهيار (break-down phase)، المرحلة المحورية (axial phase) ومرحلة الانضغاط (compression phase)، كما

يتم تقسيم مرحلة الانضغاط إلى ثلاثة مراحل ثانوية هي: مرحلة الصدمة الداخلة القطرية (inward radial shockwave phase)، مرحلة موجة الصدمة المنعكسة الخارجة (outward reflected shock wave phase) ومرحلة الانضغاط البطيء (slow compression phase). [14]

### النتائج والمناقشة:

تم استخدام برنامج Lee الإصدار (RADPFV 5.15 dec1) على جهاز البلازما المحرقة PF400 وفق البارامترات الآتية:

(1) بارامترات بنك المكثفات: التحريض  $L_0 = 40 \text{ nH}$  السعة  $C_0 = 0.95 \mu\text{F}$

المقاومة  $r_0 = 10 \text{ m}\Omega$

(2) الأبعاد الهندسية: نصف قطر المهبط  $b = 1.6 \text{ cm}$  نصف قطر المصعد

$a = 0.6 \text{ cm}$  طول المصعد  $z_0 = 1.7 \text{ cm}$

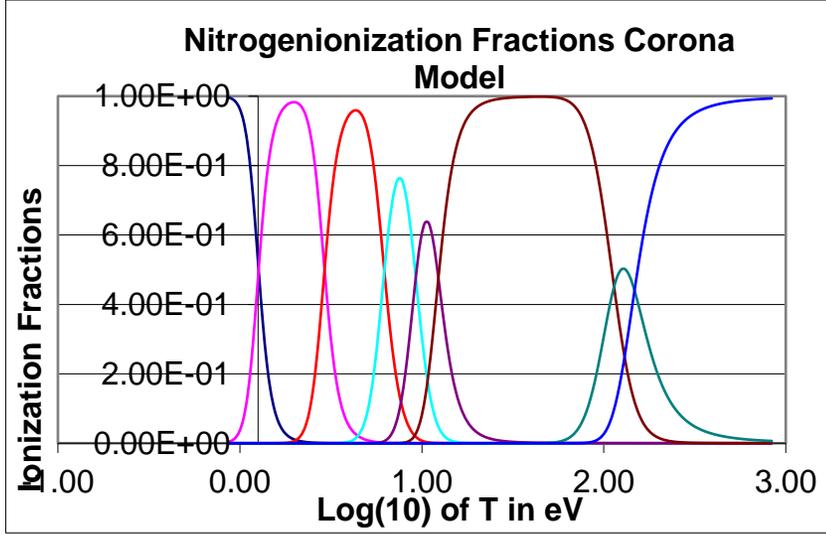
(3) طاقة التشغيل  $E_0 = 0.4 \text{ kJ}$  الجهد  $V_0 = 28 \text{ kV}$  الضغط  $P_0$ .....

### حساب الوسطاء البلازما المحرقة لغاز الازوت:

تم اعتماد نموذج الهالة (Corona Model) من أجل إيجاد وسطاء البلازما المحرقة والبيانات الترموديناميكية وذلك بالاستفادة من مجموعة البرمجيات (soft wares) والكودات (Codes) تم الحصول عليها من الجمعية الآسيوية الإفريقية لتدريبات البلازما (AAAPT).

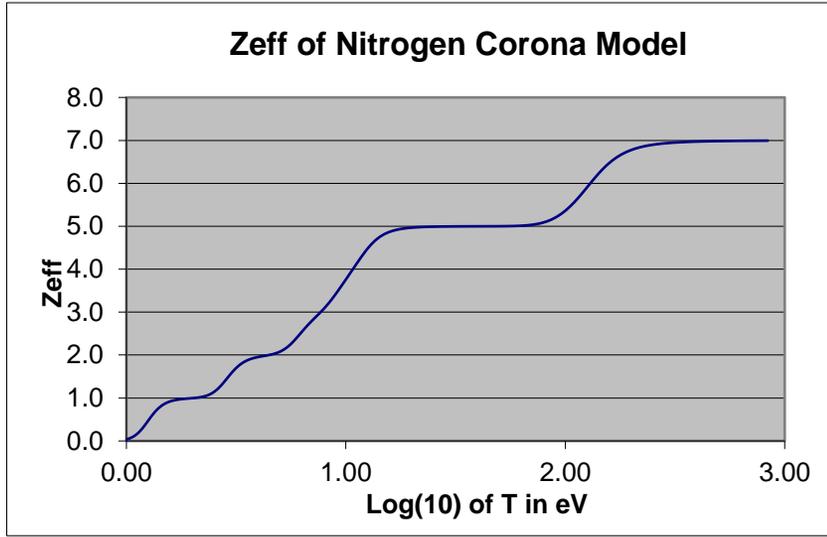
تم الحصول على النتائج التالية:

تم استخدام الكود (C4coronaNitrogen) من أجل الحصول على حالات تأيين غاز النروجين وعدد الشحنة الفعالة ونسبة الحرارة النوعية وفق نموذج الهالة (Corona Model) ضمن مجال درجة الحرارة ( $10^4\text{K} - 10^6\text{K}$ ) أو  $0.86 - 837.63\text{ eV}$  وفق الأشكال الآتية (النتائج كبيرة جدا ولا يمكن إدراجها):



الشكل (1): حالات تأيين الآزوت عند درجات حرارة مختلفة باستخدام (C4coronaNitrogen)

يوضح الشكل (1) حالات تأيين الآزوت كتابع لدرجة الحرارة وفق نموذج الهالة حيث يتضح أن مجال درجة الحرارة المناسب لتوليد الأيونات الشبيهة بالهيدروجين (H-like) والأيونات الشبيهة بالهيليوم (He-like) وبالتالي إصدار الأشعة السينية هو  $0.86 \times 10^6 - 2 \times 10^6$  (173 eV)



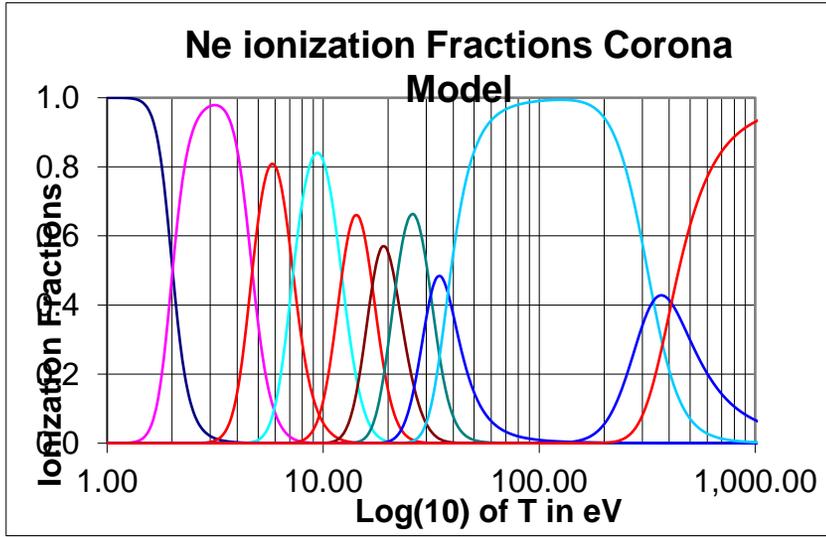
الشكل (2): عدد الشحنة الفعالة للأزوت عند درجات حرارة مختلفة باستخدام (C4coronaNitrogen)

نلاحظ من الشكل (2):

- ازدياد الشحنة الفعالة مع ازدياد درجة الحرارة.
- ضمن المجال (1.48 , 1.76 eV) تبقى قيمة الشحنة الفعالة ثابتة وهي مقابلة لـ  $N^{+5}$ .
- أقصى قيمة  $Z_{eff} = 6.99$  تكون درجة الحرارة المقابلة لها  $2.73 eV$  حيث يتأين الأزوت بشكل كامل.
- قيمة  $Z_{eff}$  ضمن مجال درجة الحرارة المناسب لإصدار الأشعة السينية تقع ضمن المجال (5.05 – 6.64)

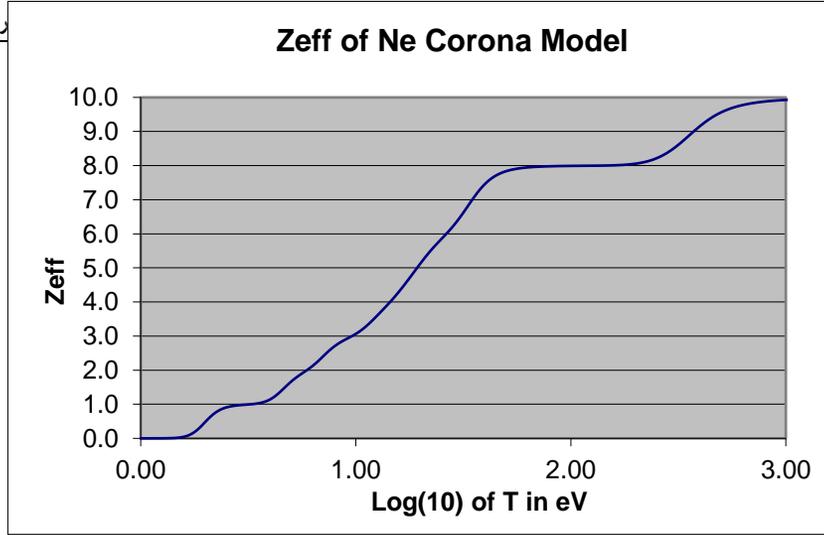
حساب وسطاء البلازما المحرقة لغاز النيون:

تم استخدام الكود (C2coronaNeon) من أجل الحصول على حالات تأيين غاز النتروجين وعدد الشحنة الفعالة ونسبة الحرارة النوعية وفق نموذج الهالة ( Corona Model) ضمن مجال درجة الحرارة ( $10^4\text{K} - 10^6\text{K}$ ) أو ( $0.86 - 837.63\text{ eV}$ ) وفق الأشكال الآتية:



الشكل (3) حالات تأيين النيون عند درجات حرارة مختلفة باستخدام (C2coronaNeon)

يوضح الشكل (3) حالات تأيين النيون كتابع لدرجة الحرارة وفق نموذج الهالة حيث يتضح أن مجال درجة الحرارة المناسب لتوليد الأيونات الشبيهة بالهيدروجين (H-like) والأيونات الشبيهة بالهيليوم (He-like) وبالتالي إصدار الأشعة السينية هو ( $200 - 500\text{ eV}$ ) ( $2.3 \times 10^6 - 5 \times 10^6\text{K}$ ).



الشكل (4): عدد الشحنة الفعالة للنيون عند درجات حرارة مختلفة باستخدام (C2coronaNeon)

نلاحظ من الشكل (4):

- الشكل ازدياد الشحنة الفعالة مع ازدياد درجة الحرارة.
- ضمن المجال (88.8 , 167 eV) تبقى قيمة الشحنة الفعالة ثابتة وهي مقابلة لـ  $Ne^{+8}$ .
- أقصى قيمة  $Z_{eff} = 6.99$  تكون درجة الحرارة المقابلة لها أكبر من 800 eV حيث يتأين النيون بشكل كامل.
- قيمة  $Z_{eff}$  ضمن مجال درجة الحرارة المناسب لإصدار الأشعة السينية تقع ضمن المجال (5.05 – 6.64).

تعطى علاقة مردود الأشعة السينية بالشكل [6]:

$$\frac{dQ_L}{dt} = -4.6 \times 10^{-31} N_i Z_{eff} Z_n^4 (\pi r_p^2) Z_f / T$$

نلاحظ أن المردود يتناسب طردياً مع كل من:

$Z_{eff}$  عدد الشحنة الفعالة

$Z_n$  العدد الذري للغاز المستخدم

$N_i$  كثافة الأيونات ضمن قبضة البلازما

$(\pi r_p^2) Z_f$  حجم قبضة البلازما المتشكلة

وعكساً مع درجة الحرارة  $T$

إيجاد مردود الأشعة السينية اللينة لبلازما الآزوت في جهاز البلازما المحرقة الكثيفة  
:PF400

تم استخدام برنامج Lee الاصدار (RADPFV5.15de 1) لتنفيذ سلسلة من التجارب العددية لمحاكاة الجهازين المدروسين وإيجاد بارامترات البلازما المحرقة ومردود الأشعة السينية اللينة الصادر ضمن مجال درجة الحرارة المناسب لكل من غاز الآزوت (جزئي) وغاز النيون (ذري) وكانت النتائج وفق الآتي:

تم إيجاد بارامترات بلازما الآزوت عند تغيير ضغط الغاز ضمن مجال درجة الحرارة المناسب لإصدار الأشعة السينية اللينة. حصلنا على النتائج الآتية:

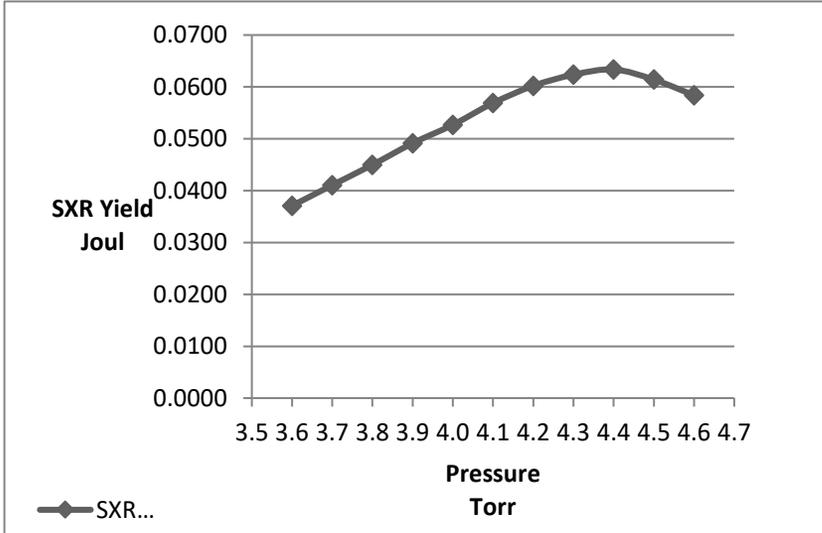
الجدول (1) دراسة تغييرات بارامترات البلازما المحرقة مع تغيير ضغط غاز الازوت في جهاز PF400

$P_o$	$T_{pinch}$	$I_{peak}$	$I_{pinch}$	$v_a$	$v_s$	$v_p$	$Y_{srx}$
Torr	$10^6(K)$	kA	kA	cm/ $\mu$ s	cm/ $\mu$ s	cm/ $\mu$ s	Joul
3.6	1.93	127	71	7.2	25.9	18.3	0.0371
3.7	1.85	127	70	7.1	25.4	18.0	0.0411
3.8	1.76	127	69	7.0	24.9	17.7	0.0450
3.9	1.68	127	68	6.9	24.4	17.3	0.0491
4.0	1.59	127	67	6.8	23.9	17.0	0.0527
4.1	1.51	127	66	6.7	23.5	16.7	0.0569
4.2	1.44	127	65	6.6	23.0	16.4	0.0602
4.3	1.36	127	64	6.5	22.5	16.1	0.0623
4.4	1.29	127	63	6.5	22.2	15.8	0.0634
4.5	1.22	127	62	6.4	21.7	15.5	0.0614
4.6	1.16	128	61	6.3	21.2	15.2	0.0584

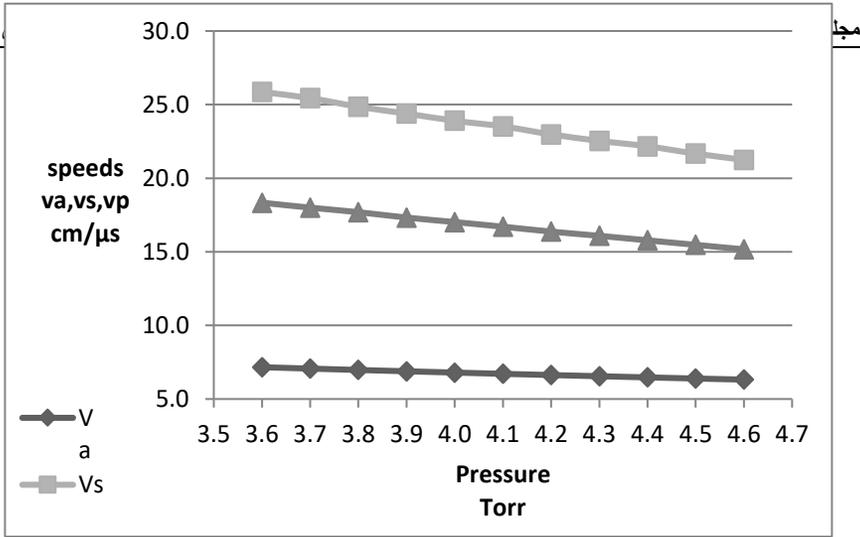
نلاحظ من النتائج:

تأثير اختلاف العدد الذري على مردود الأشعة السينية اللينة في جهاز البلازما المحرقة الكثيفة  
PF400

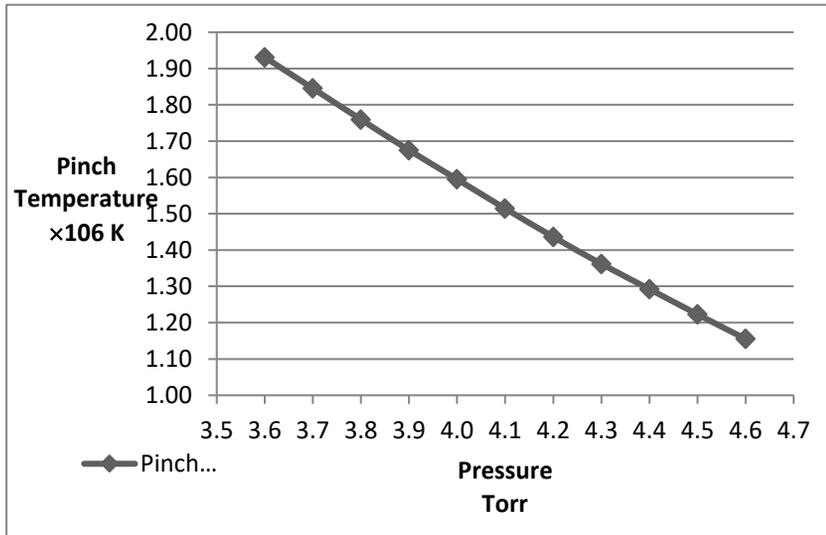
ازدياد قيمة مردود الأشعة السينية اللينة من 0.0371 عند قيمة الضغط 3.6 Torr ويصل إلى أعلى قيمة ل 0.0634 عند الضغط 4.4 Torr ثم ينخفض إلى 0.0584 عند الضغط 4.6 Torr الشكل (5) ، التناقص في المردود مع زيادة الضغط بسبب انخفاض قيم السرعات (المحورية  $V_a$ ، القطرية  $V_s$ ، سرعة المكبس المغناطيسي  $V_p$ ) الشكل (6) مما يؤدي إلى انخفاض درجة حرارة البلازما إلى أقل من درجة الحرارة اللازمة لإصدار الأشعة السينية اللينة الشكل (7).



الشكل (5) تغير المردود مع تغير ضغط غاز الآزوت في جهاز PF400



الشكل (6) تغيير السرعات مع تغيير ضغط غاز الآزوت في جهاز PF400



الشكل (7) تغيير درجة حرارة القبضة مع تغيير ضغط غاز الآزوت في جهاز PF400

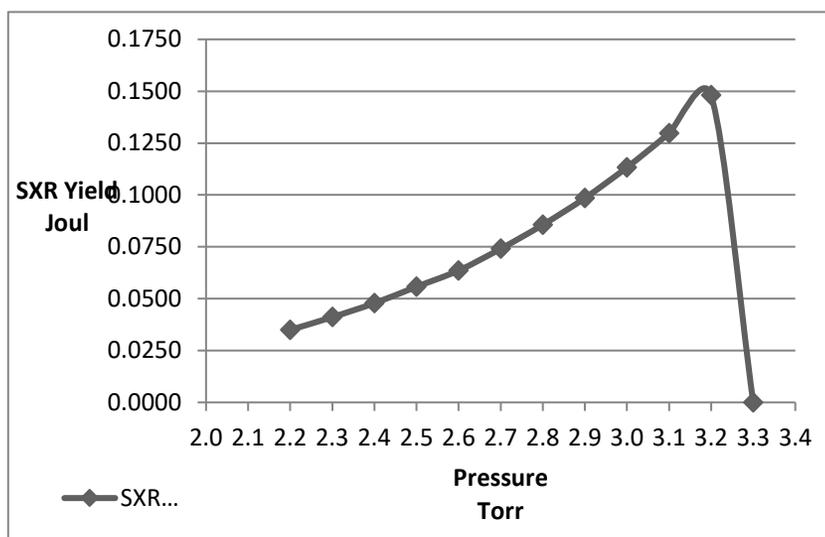
تأثير اختلاف العدد الذري على مردود الأشعة السينية اللينة في جهاز البلازما المحرقة الكثيفة  
PF400

إيجاد مردود الأشعة السينية اللينة لبلازما النيون في جهاز البلازما المحرقة الكثيفة  
:PF400

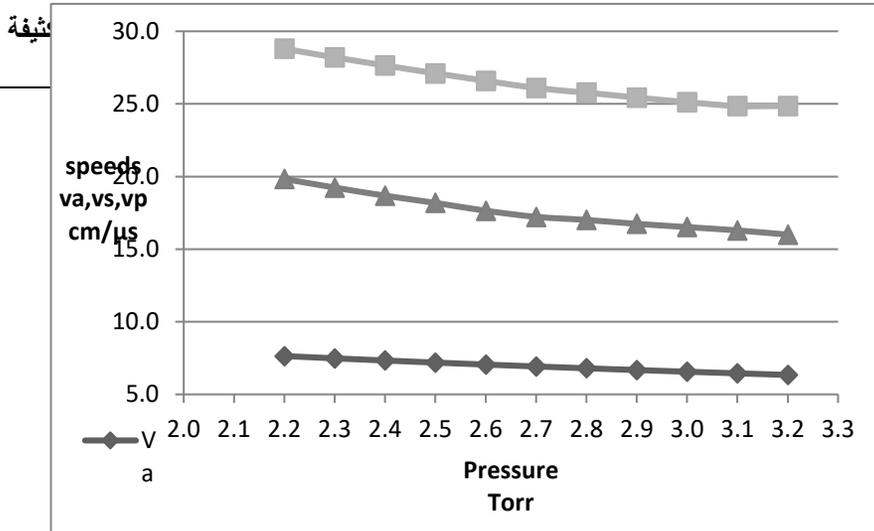
الجدول (2) دراسة تغييرات بارامترات البلازما المحرقة مع تغيير ضغط غاز النيون  
في جهاز PF400

$P_o$ Torr	$T_{pinch}$ $10^6(K)$	$I_{peak}$ kA	$I_{pinch}$ kA	$v_a$ cm/ $\mu$ s	$v_s$ cm/ $\mu$ s	$v_p$ cm/ $\mu$ s	$Y_{srx}$ Joul
2.2	4.95	127	75	7.6	28.8	19.8	0.0350
2.3	4.64	127	74	7.5	28.2	19.2	0.0411
2.4	4.35	127	72	7.3	27.6	18.7	0.0478
2.5	4.07	127	71	7.2	27.1	18.2	0.0558
2.6	3.82	127	70	7.1	26.6	17.6	0.0636
2.7	3.57	127	69	6.9	26.1	17.2	0.0740
2.8	3.33	127	67	6.8	25.8	17.0	0.0856
2.9	3.11	127	66	6.7	25.4	16.7	0.0985
3.0	2.89	127	64	6.6	25.1	16.5	0.1133
3.1	2.70	127	63	6.4	24.9	16.3	0.1297
3.2	2.51	128	61	6.3	24.9	16.0	0.1480

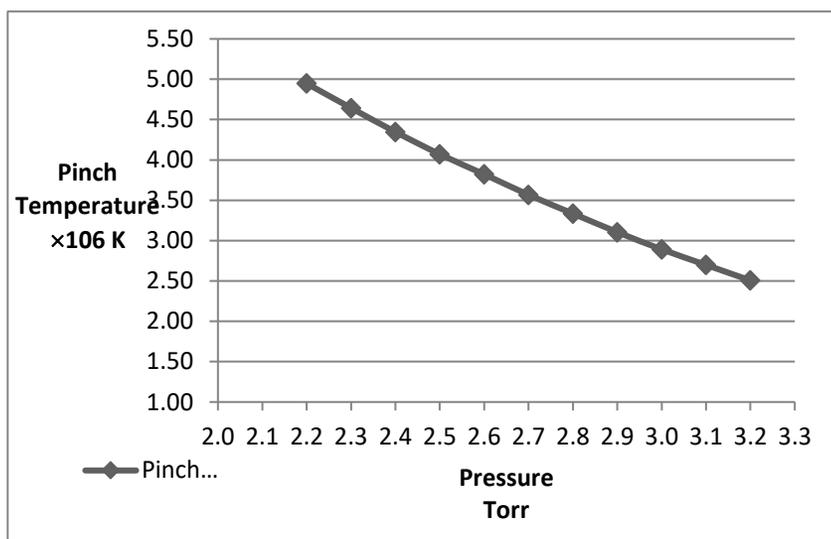
ازدياد قيمة مردود الأشعة السينية اللينة من 0.0350 عند قيمة الضغط 2.2 Torr ويصل إلى أعلى قيمة ل 0.1480 عند الضغط 3.2 Torr ثم ينخفض إلى الصفر الشكل (8) وذلك بسبب انخفاض درجة الحرارة إلى ما دون درجة الحرارة اللازمة لإنتاج الأشعة السينية اللينة الشكل (10) وذلك بسبب انخفاض قيم السرعات (المحورية  $V_a$ , القطرية  $V_s$ , سرعة المكبس المغناطيسي  $V_p$ ) مع ازدياد ضغط غاز النيون الشكل (9)



الشكل (8) تغيّر المردود مع تغيّر ضغط غاز النيون في جهاز PF400

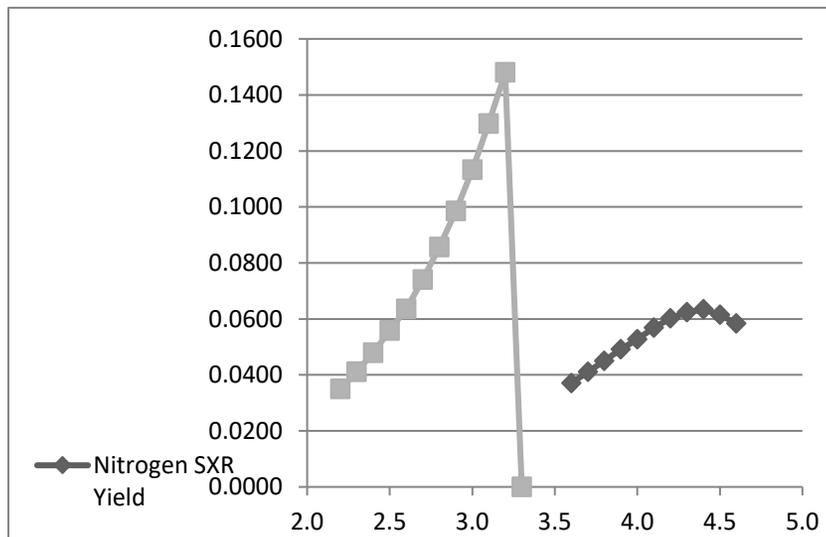


الشكل (9) تغير السرعات مع تغير ضغط غاز النيون في جهاز PF400



الشكل (10) تغير درجة حرارة القبضة مع تغير ضغط غاز النيون في جهاز PF400

## المقارنة بين مردود الاشعة السينية الصادر عن الجهاز PF400 لكل من الغازين النيون والازوت:



### الشكل (11) مردود الاشعة السينية اللينة للآزوت والنيون في جهاز PF400

نلاحظ من الشكل (11) أن مردود الأشعة السينية اللينة عند استخدام غاز النيون أعلى منه في حالة الأزوت لذلك تمت مناقشة العوامل المؤثرة على قيمة المردود وفق الآتي:

$$1- \text{ عدد الشحنة الفعالة في حالة النيون أكبر } Z_{eff/neon} \approx 9, Z_{eff/nitrogen} \approx 6$$

2- يتضح من علاقة المردود أنه يزداد مع ازدياد حجم قبضة البلازما المتشكلة في قمة المصعد لذلك وبالاستفادة من التجارب العددية التي تم إجراؤها تم إيجاد أبعاد (نصف القطر  $a_{min}$  ، طول القبضة  $Z_{max}$ ) قبضة البلازما للغازين المدروسين كما هو موضح في الجدولين (3) و (4):

الجدول (4): أبعاد قبضة بلازما النيون

$P_o$	$z_{max}$	$a_{min}$
Torr	(cm)	(cm)
2.2	0.8	0.07
2.3	0.8	0.07
2.4	0.8	0.07
2.5	0.8	0.07
2.6	0.8	0.07
2.7	0.8	0.07
2.8	0.8	0.07
2.9	0.8	0.07
3.0	0.8	0.07
3.1	0.8	0.07
3.2	0.8	0.07

الجدول (3): أبعاد قبضة بلازما الآزوت

$P_o$	$z_{max}$	$a_{min}$
Torr	(cm)	(cm)
3.6	0.9	0.06
3.7	0.9	0.06
3.8	0.9	0.07
3.9	0.9	0.07
4.0	0.8	0.07
4.1	0.8	0.07
4.2	0.8	0.06
4.3	0.8	0.06
4.4	0.8	0.06
4.5	0.8	0.06
4.6	0.8	0.06

بمقارنة حجم القبضة في حالة الغازين نلاحظ أن حجم قبضة البلازما المتشكل تقريباً نفسه وبالتالي لا يوجد تأثير ملحوظ لحجم القبضة على اختلاف مردود الأشعة السينية اللينة.

3 تم مقارنة كثافة الأيونات ضمن قبضة البلازما كما هو موضح في الجدولين (5) و (6):

الجدول (5) : كثافة الأيونات قبضة بلازما الآزوت الجدول (6):كثافة الأيونات قبضة بلازما النيون

P <sub>o</sub> Torr	n <sub>i</sub> (10 <sup>23</sup> )/m <sup>3</sup>
2.2	2.9
2.3	3.0
2.4	3.1
2.5	3.2
2.6	3.4
2.7	3.5
2.8	3.7
2.9	3.8
3.0	4.0
3.1	4.2
3.2	4.4

P <sub>o</sub> Torr	n <sub>i</sub> (10 <sup>23</sup> )/m <sup>3</sup>
3.6	4.3
3.7	4.3
3.8	4.4
3.9	4.5
4.0	4.6
4.1	4.7
4.2	4.9
4.3	5.0
4.4	5.1
4.5	5.3
4.6	5.4

نلاحظ أن كثافة أيونات الآزوت أعلى ولكن هذا العامل وحده لا يكفي ليكون مردود بلازما الآزوت أعلى.

4- من مجال درجة الحرارة المناسب لإصدار الأشعة السينية اللينة في الغازين المدروسين نلاحظ درجة الحرارة اللازمة لإصدار الأشعة السينية اللينة في حالة النيون أقل مما يؤدي إلى ازدياد قيمة المردود.

5- العدد الذري للنيون أكبر مما يؤدي إلى ازدياد قيمة المردود.

نستنتج تأثير العدد الذري المرتفع لغاز النيون وقيمة شحنته الفعالة مقارنة مع الآزوت بالإضافة إلى مجال درجة الحرارة المناسب لإصدار الأشعة السينية اللينة المنخفض أدى إلى زيادة قيمة المردود في حالة النيون بكفاءة تصل إلى (0.037%) مقارنة مع (0.015%) في حالة الآزوت.

#### الاستنتاجات

- من النتائج التي تم التوصل إليها تبين أن مردود الأشعة السينية اللينة في حالة غاز النيون (ذري) كان أكبر وذلك بسبب ازدياد قيمة الشحنة الفعالة وقيمة العدد الذري.
- إن مجال درجة الحرارة لإصدار الأشعة السينية اللينة في حالة غاز النيون أسهم في زيادة المردود.
- أظهرت نتائج الدراسة أن حجم قبضة البلازما المتشكل لم يؤثر على مردود الأشعة السينية اللينة حيث كان متساوي تقريباً في حالة الغازين المدروسين.

#### المراجع المستخدمة

- [1] Lee, S. (2014). **Plasma focus radiative model: Review of the Lee model code.** *Journal of Fusion Energy*, 33(4), 319–335.
- [2] Al-Hawat, S., & Saloum, S. (2009). **Characterization of a 2.8 kJ small plasma focus using a five phase radiative model.** *Contributions to Plasma Physics*, 49(1-2), 5–14.
- [3] Liu, M. (1996). **Soft X-rays from compact plasma focus** (Doctoral dissertation).
- [4] Sh. Al-Hawat and S. Saloum, *Contrib. Plasma Phys.*, **49**, No. 1–2, 5–14 (2009)
- [5] Zakoullah, M., Alamgir, K., Shafiq, M., Hassan, S. M., Sharif, M., & Waheed, A. (2001). **Enhanced copper K-alpha radiation from a low-energy plasma focus.** *Applied Physics Letters*, 78(7), 877–879.
- [6] 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.
- [7] Akel, M. (2012). **Numerical experiments on plasma focus for soft x-ray yield scaling laws derivation using Lee model** (No. AECS-PH/RSS--993). Atomic Energy Commission.
- [8] Al-Hawat, S., Akel, M., & Wong, C. S. (2011). **X-ray emission from argon plasma focus contaminated with copper**

**impurities in AECS PF-2 using five channel diode**

**spectrometer.** *Journal of fusion energy*, 30(6), 503–508.

[9] Akel, M., & Salo, S. (2013). **Numerical Study of Radiation Emissions from the Plasma Focus** (No. AECS-PH/RSS--1046). Atomic Energy Commission

[10] Behbahani, R. A., & Aghamir, F. M. (2011). **Anomalous resistivity effect on multiple ion beam emission and hard x-ray generation in a Mather type plasma focus device.** *Physics of Plasmas*, 18(10), 103302

[11] F.M. Aghanir and R.A. Behbahani, *Journal of Applied Physics* 109, 043301 (2011)

[12] Lee, S., & Saw, S. H. (2008). **Neutron scaling laws from numerical experiments.** *Journal of fusion energy*, 27(4), 292–295.

[13] Zhang, T., Rawat, R. S., Hassan, S. M., Lin, J. J., Mahmood, S., Tan, T. L., ... & Lee, S. (2006). **Drive parameter as a design consideration for Mather and Filippov types of plasma focus.** *IEEE transactions on plasma science*, 34(5), 2356–2362

[14] Kaastra, J. S., Paerels, F. B. S., Durret, F., Schindler, S., & Richter, P. (2008). **Thermal radiation processes.** In *Clusters of Galaxies* (pp. 155–190). Springer, New York, NY.