



جامعة دمشق

كلية العلوم

قسم الفيزياء

رسالة مقدّمة لنيل درجة الماجستير في الفيزياء بعنوان:

دراسة استقصائية حاسوبية لإصدار الأشعة السينية اللينة من جهاز البلازما
المحرّقية باستخدام نموذج سينغ لي

A Computational Investigation for Soft X-ray Emission from the Plasma Focus Device Using Lee Model

إعداد الطالبة

رغد البحري

إشراف

المشرف المشارك:

د. محمد عاقل

مدير بحوث - دائرة البلازما - قسم

الفيزياء - هيئة الطاقة الذرية السورية

المشرف الرئيسي:

أ.م. د. يوسف أبو علي

كلية العلوم - جامعة دمشق

2025

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

﴿يَرْفَعُ اللَّهُ الَّذِينَ آمَنُوا مِنْكُمْ وَالَّذِينَ أُوتُوا الْعِلْمَ

دَرَجَاتٍ وَاللَّهُ بِمَا تَعْمَلُونَ خَبِيرٌ﴾

صدق الله العظيم

سورة المجادلة، الآية 11

الإهداء

إلى من بلغ الرسالة، وأدى الأمانة، ونصح الأمة، فكان رحمةً مهداةً ونوراً للعالمين

سيدنا محمد صلى الله عليه وعلى آله وصحبه أجمعين

إلى من كان لي سنداً وعوناً

أبي

إلى من وجودها حياة، ودعاؤها نجاة، وتحت قدميها الجنة، نبغ الحنان وصدق العطاء

أمي الغالية حفظها الله وأدامها تاجاً على رأسي

إلى رفيق دربي وشريك حياتي، من كان دعمه صامتاً عظيماً، وإيمانه بي دافعاً للاستمرار والعطاء

زوجي العزيز محمد، لك خالص الشكر والامتنان

إلى من شدّ الله بهم عضدي، فكانوا خير سندٍ وعون، وشركاء الدرب والنجاح

إخوتي وأخواتي الأعزاء

إلى من كانوا نبراس علمٍ وهداية، وكان لتوجيههم ونصحهم الأثر الكبير في بناء هذه المسيرة العلمية، أساتذتي

الأفاضل

الدكتور يوسف أبو علي، والدكتور محمد عاقل

إلى زملاء العلم والعمل، الذين شاركوني رحلة البحث والتعلم، وتبادلنا معهم الجهد والطموح، أهدىكم هذا

العمل تقديراً لصحبكم العلمية وتعاونكم الصادق

شكر وتقدير

الحمد لله، والشكر له كما ينبغي لجلال وجهه وعظيم سلطانه، والصلاة والسلام على خاتم المرسلين، وبعد:

«مَن لم يشكر الناس لم يشكر الله».

أتوجّه بخالص الشكر والتقدير لكل من كان عوناً لي في إنجاز هذا العمل، ولكل من دَلَّ الصعوبات، وبذل من وقته وجهده حتى خرج هذا البحث إلى النور بالصورة المرجوة، ولكل من قدّم لي الدعم والمساندة بصدق وامتنان. وأخصّ بالشكر الجزيل أساتذتي المشرفين، الذين كان لتوجيههم العلمي وخبرتهم الواسعة الأثر البالغ في تطوير هذا البحث وصقله:

الأستاذ الدكتور يوسف أبو علي، المشرف الرئيسي، لما بذله من صبر وجهود علمية قيّمة أسهمت في إخراج الرسالة بصورتها الحالية، فله خالص امتناني وجزيل شكري، جزاه الله كل خير.

والدكتور محمد عاقل، مدير بحوث في هيئة الطاقة الذرية - قسم الفيزياء - دائرة البلازما، والمشرف المشارك، لما قدّمه من توجيه ومتابعة وجهود علمية مثمرة كان لها أثر واضح في إنجاز هذه الرسالة، فله خالص الامتنان والتقدير، جزاه الله كل خير.

كما أتقدّم بجزيل الشكر إلى كلية العلوم ممثلةً بالدكتور عميد كلية العلوم، وإلى جميع أعضاء الهيئة التدريسية في قسم الفيزياء، وعلى رأسهم الدكتور رئيس قسم الفيزياء، لما قدّموه من دعم علمي وتوجيه بناء.

وأتوجّه بالشكر والتقدير إلى المدير العام لهيئة الطاقة الذرية، لما وفّره من بيئة علمية داعمة أسهمت في إنجاز هذا العمل.

كما لا يفوتني أن أتقدّم بالشكر والامتنان إلى كل من ساعدني وساندني، وكان لي عوناً وداعماً في إتمام هذا البحث.

المحتويات (Contents)

IV.....	المحتويات (Contents)
XI.....	الاشكال (Caption)
XIV.....	الجداول (Tables)
XVI.....	ملخص البحث (Abstract)
XVII	مقدمة (Introduction):
XVIII.....	مشكلة البحث (Research Problem):
XVIII.....	تساؤلات البحث (Research Questions):
XVIII.....	فرضيات البحث (Research Hypothesis):
XIX.....	مسلمات البحث (Research Assumptions):
XIX.....	هدف البحث (Research Objective):
XX.....	أهمية البحث (Research Importance):
XX.....	مسوّغات البحث (Research Justifications):
XXI.....	مصطلحات البحث (Research Terms):
XXII	محدوديات البحث (Research Limitations):
XXII	منهج البحث وأدواته (Research Methodology):
XXII	الدراسة المرجعية (Literature Review):
1.....	الفصل الأول (Chapter I)
1.....	البلازما المحرقة الكثيفة وإصدار الأشعة السينية اللينة (DPF and SXR Emission)
1.....	1.1 مقدمة (Introduction):
1.....	2.1 البلازما المحرقة الكثيفة (Dense Plasma Focus – DPF):
2.....	1.2.1 جهاز البلازما المحرقة الكثيفة (DPF Device):
3.....	2.2.1 أقسام جهاز البلازما المحرقة الكثيفة (Sections of DPF Device):

3.2.1.	تشغيل جهاز البلازما المحرقة الكثيفة (Operating of DPF Device)	4
4.2.1.	تصميم جهاز البلازما المحرقة الكثيفة (Design of DPF Device)	5
5.2.1.	حركية البلازما المحرقة الكثيفة (The Dynamic of DPF)	5
1.5.2.1.	طور الانهيار (The Breakdown Phase)	6
2.5.2.1.	طور التسريع المحوري (The Axial Acceleration Phase)	8
3.5.2.1.	طور الانضغاط القطري (The Radial-Compression Phase)	9
I.	مرحلة الانضغاط (The Compression Phase)	9
II.	المرحلة شبه السكونية (The Quiescent Phase)	11
III.	المرحلة غير المستقرة (The Unstable Phase)	12
IV.	مرحلة الاضمحلال (The Decay Phase)	13
6.2.1.	القيم النموذجية لبارامترات البلازما المحرقة الكثيفة	
	(The Typical Values of Parameters for DPF)	13
7.2.1.	إصدارات البلازما المحرقة الكثيفة (Dense Plasma Focus Radiation)	14
1.7.2.1.	الحزم الإلكترونية السريعة (Fast Electrons Beam)	15
2.7.2.1.	الحزم الأيونية السريعة (Fast Ions Beam)	15
3.7.2.1.	الحزم النeutرونية (Neutron Beams)	15
4.7.2.1.	الأشعة السينية القاسية (Hard X-ray, HXR)	16
5.7.2.1.	الأشعة السينية اللينة (Soft X-ray, SXR)	16
3.1.	الأشعة السينية اللينة من البلازما المحرقة الكثيفة (SXR from DPF)	17

17.....	1.3.1. إصدار الأشعة السينية اللينة من البلازما (SXR Emission from Plasma):
18.....	1.1.3.1. انتقال حر - حر (Free - Free Transition):
18.....	2.1.3.1. انتقال حر - مقيد (Free - Bound Transition):
18.....	3.1.3.1. انتقال مقيد - مقيد (Bound - Bound Transition):
20..	2.3.1. إصدار الأشعة السينية اللينة من البلازما المحرقة الكثيفة (SXR Emission from DPF):
	4.1. ميزات وتطبيقات الأشعة السينية اللينة من أجهزة البلازما المحرقة الكثيفة
21.....	21..... (Features and Applications of SXR from DPF Devices):
23.....	5.1. الخاتمة (Conclusion):
24	الفصل الثاني (Chapter II)
	النموذج النظري للبلازما المحرقة الكثيفة وإصدار الأشعة السينية اللينة
24	24 (Theoretical Model of DPF and SXR Emission)
24.....	1.2. مقدمة (Introduction):
24.....	2.2. نموذج الهالة (Corona Model):
	1.2.2. بارامترات البلازما باستخدام نموذج الهالة
25.....	25..... (Plasma Parameters Using the Corona Model)
	2.2.2. كثافة استطاعة الأشعة السينية الصادرة من البلازما
26	26 (X-ray Power Density from Plasma)
	3.2.2. شدات إصدار الأشعة السينية من البلازما
28.....	28..... (X-ray Emission Intensities from Plasma)
28.....	3.2. نموذج لي (Lee Model):

VIII

30.....	1.3.2. أطوار البلازما المحرقة الخمسة (The Five Phases of the Plasma Focus):
30.....	1.1.3.2. الطور المحوري (Axial Phase):
36.....	2.1.3.2. الطور القطري (Radial Phase):
36.....	I. طور الصدمة القطرية الداخلية (Radial Inward Shock Phase):
43.....	II. طور الصدمة القطرية المنعكسة (Radial Reflected Shock Phase):
45.....	III. طور الانضغاط البطيء (Slow Compression Phase):
47.....	IV. طور انهيار العمود محورياً (Expanded Column Axial Phase):
47.....	2.3.2. الحسابات العددية (Numerical Computation):
47.....	1.2.3.2. الإجراء الخاص باستخدام الكود (Procedure for Using the Code):
51.....	4.2. الخاتمة (Conclusion):
52	الفصل الثالث (Chapter III)
52	النتائج والمناقشة (Results and Discussions)
52.....	1.3. المقدمة (Introduction):
52.....	2.3. التجارب العددية (The Numerical Experiment):
	1.2.3. دراسة مردود الأشعة السينية اللينة من أجل مصعد أسطوانى
53.....	(Study of Y_{sxr} for Cylindrical Anode):
	1.1.2.3. دراسة مردود الأشعة السينية اللينة بدلالة ضغط غاز التشغيل
53.....	(Study of Y_{sxr} Versus Operating Pressure):

- 2.1.2.3. دراسة مردود الأشعة السينية اللينة بدلالة ضغط غاز التشغيل عند جهود تشغيل مختلفة
62..:(Study of Y_{sxr} Versus Operating Pressure at Different Operating Voltages)
- 3.1.2.3. دراسة مردود الأشعة السينية اللينة بدلالة ضغط غاز التشغيل عند أطوال مختلفة للمصعد
66.....:(Study of Y_{sxr} Versus Operating Pressure at Different Anode Lengths)
- 2.2.3. دراسة مردود الأشعة السينية اللينة من أجل مصعد مدبب
71.....:(Study of Y_{sxr} For Tapered Anode)
- 1.2.2.3. دراسة مردود الأشعة السينية اللينة بدلالة ضغط غاز التشغيل عند جهود تشغيل مختلفة
71...:(Study of Y_{sxr} Versus Operating Pressure at Different Operating Voltages)
- 2.2.2.3. دراسة تأثير تغيير شروط التدبب على مردود الأشعة السينية اللينة الصادرة من جهاز NX2
(Study the Effect of Changing the Tapered Conditions on the Y_{sxr} from the NX2
77.....:Device)
- 3.2.3. دراسة مردود الأشعة السينية اللينة المحسوب الصادرة من جهاز PF24 من أجل مصعد أسطواني
ومدبب
- 79.....:(Study of Y_{sxr} from PF24 Device for Cylindrical and Tapered Anode)
- 1.3.2.3. نظام الإلكترودات الأساسي لجهاز PF24
80.....:(The Original Electrode System of the PF24 Device)
- 2.3.2.3. أمثلة نظام الإلكترودات لجهاز PF24
82.....:(The Optimization Electrode System of the PF24 Device)
- 3.3. الخاتمة (Conclusion) : 84.....

90.....	References
---------	------------

الأشكال (Caption)

- الشكل 1.1: نموذجي جهاز البلازما المحرقة الكثيفة، (a) نموذج Filippov-type و (b) نموذج Mather-type [33]..... 3
- الشكل 2.1: شكل المهبط في أجهزة البلازما المحرقة الكثيفة لنموذج Mather-type، (a) المهبط يشكل جدران الحجرة، (b) المهبط عبارة عن قضبان على شكل قفص سنجاب [34]..... 4
- الشكل 3.1: يوضح حركية البلازما المحرقة الكثيفة: 1. طور الانهيار 2. طور التسريع المحوري 3. طور الانضغاط القطري، والإصدارات الإشعاعية الناتجة عنها: حزم إلكترونية، حزم أيونية، أشعة سينية، حزم نترونية [38]..... 6
- الشكل 4.1: تشكل خطوط التيار الفردية نتيجة الانفراج المنزلق (المتدرج) في طور الانهيار [40]..... 7
- الشكل 5.1: صورة ظليلية توضح مراحل طور الانضغاط القطري النموذجية: من (a) وحتى (e) مراحل الطور القطري قبل حدوث التضيق، (f) لحظة حدوث التضيق، (g) اضمحلال عمود البلازما، (h) تشكل فقاعة البلازما [43]..... 9
- الشكل 6.1: تمثيلاً تخطيطياً لعملية الانضغاط القطري r والاستطالة المحورية z لغمد البلازما [46]..... 10
- الشكل 7.1: يوضح المنحنيات النموذجية لتيار تفريغ بنك المكثفات وجهد الأنبوب في أجهزة البلازما المحرقة الكثيفة: 1- طور الانهيار، 2- طور التسريع المحوري، 3- طور الانضغاط القطري 4- حدوث التضيق حيث يشير انخفاض التيار وذروة الجهد إلى حدوث إصدار إشعاعي [35]..... 11
- الشكل 8.1: (a) تمثيلاً تخطيطياً لحالات عدم الاستقرار $m = 0$ و $m = 1$ [35]، (b) صور ظليلية تظهر تشكل حالات عدم الاستقرار في عامود البلازما المتضيق (1) عدم استقرار $m = 0$ ، (2) عدم استقرار $m = 1$ ، (3) مزيجاً من عدم الاستقرار $m = 0$ و $m = 1$ يحدثان في وقت واحد [43]، r_p يمثل نصف قطر عمود البلازما و B_θ شدة الحقل المغناطيسي الذي يعمل على ضغط عمود البلازما..... 12
- الشكل 9.1: عمليات إصدار الأشعة السينية من البلازما [9]..... 17
- الشكل 10.1: تمثيلاً تخطيطياً لآلية إصدار الأشعة السينية ذي الخط الطيفي المميز [38]..... 19
- الشكل 11.1: تمثيلاً تخطيطياً لتراكب طيف الإصدار المستمر والخطي للأشعة السينية [35]..... 20
- الشكل 1.2: يوضح الطور المحوري والذي يبدأ عند قمة العازل وينتهي عند نهاية المصعد..... 31
- الشكل 2.2: يوضح الدارة الكهربائية المكافئة لجهاز البلازما المحرقة، حيث C_0 سعة بنك المكثفات و L_0 تحريضية الدارة الخارجية و r_0 مقاومة الدارة الخارجية و r_p مقاومة البلازما و L_p تحريضية البلازما و h_L مقاومة التسريب والتي تحد من قيمة التيار
- الفعال [9]..... 34

- الشكل 3.2: يبين طور الصدمة القطرية الداخلية..... 36
- الشكل 4.2: يوضح حركة كل من جبهة الصدم المحددة بـ r_s والمكبس المغناطيسي المحدد بـ r_p في الطورين المحوري والقطري حيث يمثل المحور الشاقولي نصف قطر التضييق والمحور الأفقي الزمن [12]..... 40
- الشكل 5.2: يوضح طور الصدمة القطرية المنعكسة..... 44
- الشكل 6.2: يوضح طور الانضغاط البطيء..... 45
- الشكل 7.2: يوضح المخطط مدخلات نموذج الهالة ومخرجاتها التي تعتبر مدخلات لنموذج لي [78]..... 47
- الشكل 8.2: يوضح شكل منحنى التيار المحسوب والمقاس بعد عملية الموازنة [9]..... 49
- الشكل 9.2: يوضح واجهة الكود باستخدام واجهة الإكسل..... 50
- الشكل 1.3: يوضح منحنيات الموازنة بين التيارين التجريبي والمحسوب لأجهزة البلازما المحرقة المدروسة..... 54
- الشكل 2.3: يوضح المردود التجريبي والمحسوب لإصدار الأشعة السينية اللينة، وكذلك كثافة عدد الأيونات ودرجة حرارة عمود البلازما المتضيّق بدلالة ضغط غاز النيون لجهاز APF..... 57
- الشكل 3.3: موازنة منحنى التيار التجريبي مع منحنى التيار المحسوب لجهاز البلازما المحرقة (11.5 kV) NX2 ذي المصعد الأسطوانى عند جهد 11.5 kV وضغط تشغيل 1.5 Torr وطول المصعد 7 cm..... 62
- الشكل 4.3: المردود التجريبي والمحسوب لإصدار الأشعة السينية اللينة الصادرة من جهاز APF بدلالة ضغط غاز التشغيل عند جهود شحن مختلفة..... 65
- الشكل 5.3: مردود الأشعة السينية اللينة المحسوب ودرجة حرارة عمود البلازما المتضيّق بدلالة طول المصعد لجهاز NX2 عند ضغط 2 Torr..... 67
- الشكل 6.3: سلوك تيار عمود البلازما المتضيّق والكثافة العددية للأيونات بدلالة طول المصعد لجهاز NX2 عند ضغط 2 Torr..... 67
- الشكل 7.3: مقارنة بين المردود التجريبي والمحسوب لإصدار الأشعة السينية اللينة بدلالة ضغط غاز التشغيل لجهاز NX2 عند ثلاثة أطوال مختلفة للأنود 4, 5, 7 cm وجهد تشغيل ثابت 11.5 kV..... 69
- الشكل 8.3: رسم تخطيطي لجهاز NX2، (a) المصعد الأسطوانى و (b) المصعد المدبب..... 71
- الشكل 9.3: مقارنة منحنى التيار التجريبي مع منحنى التيار المحسوب لجهاز البلازما المحرقة NX2 ذو مصعد مدبب عند جهد 12.5 kV و ضغوط تشغيل مختلفة (a) 3 Torr، (b) 3.75 Torr، (c) 4.5 Torr، (d) 5.25 Torr من أجل مصعد مدبب..... 73

XIII

- الشكل 10.3: مقارنة بين مردود الأشعة السينية اللينة التجريبي والمحسوب بدلالة الضغط عند جهود تشغيل مختلفة (12.5 , 11.5 kV)
74.....المصعد الأسطوانى وحالة المصعد المدبب
- الشكل 11.3: مواءمة منحنى التيار التجريبي مع المحسوب لجهاز البلازما المحرقية PF24 عند 17 kV ، 0.225 Torr من أجل
80.....مصعد أسطوانى

الجداول (Tables)

- الجدول 1.2: يبين لوحة إدخال بارامترات الجهاز المدروس في كود نموذج لي.....48
- الجدول 1.3: يعرض أجهزة البلازما المحرقة وطاقتها بالإضافة إلى كل من البارامترات الكهربائية والهندسية المدخلة في الكود والمستخدم في عملية محاكاة الأجهزة ذو المصعد الأسطواني.....53
- الجدول 2.3: يبين بارامترات النموذج لأجهزة البلازما المحرقة الستة المدروسة في الجدول 1.3 والمستخدم لمحاكاة مردود الأشعة السينية بدلالة ضغط غاز النيون.....55
- الجدول 3.3: يبين البارامترات الحركية المحسوبة عددياً بدلالة ضغط غاز النيون لجهاز APF.....56
- الجدول 4.3: ملخص بارامترات عمود البلازما المتضيق بدلالة الضغط لأجهزة البلازما المحرقة المدروسة.....59
- الجدول 5.3: مقارنة قيم مردود الأشعة السينية اللينة التجريبية والمحسوبة في هذا العمل والتجريبية والمحسوبة مسبقاً بدلالة ضغط غاز النيون لأجهزة بلازما محرقة ذات طاقات مختلفة.....60
- الجدول 6.3: بارامترات الإدخال وبارامترات نموذج لي المستخدمة لمحاكاة مردود الأشعة السينية اللينة بدلالة الضغط عند جهود تشغيل مختلفة ولجميع الأجهزة المدروسة.....62
- الجدول 7.3: مقارنة بين النتائج التجريبية والمحسوبة لمردود الأشعة السينية اللينة كتابع للضغط عند جهود تشغيل مختلفة (تم عرض النتائج عند الضغط الأمثل لأعلى مردود).....63
- الجدول 8.3: بارامترات الإدخال وبارامترات نموذج لي للجهاز NX1 و NX2 المستخدمين في عملية المحاكاة من أجل حساب مردود الأشعة السينية اللينة بدلالة الضغط عند أطوال مصعد مختلفة.....66
- الجدول 9.3: ملخص القيم التجريبية والمحسوبة لمردود الأشعة السينية اللينة والسرعة المحورية لغمد التيار ومعامل السرعة (SF) وكثافة التيار (ID) لأطوال مصعد محتلة عند الضغط الأمثل لأعلى مردود.....70
- الجدول 10.3: بارامترات تشغيل جهاز البلازما المحرقة NX2 ذو مصعد مدبب.....72
- الجدول 11.3: بارامترات المواءمة الخاصة بكود نموذج لي المستخدمة في عملية محاكاة جهاز البلازما المحرقة NX2 ذو مصعد مدبب عند ضغوط تشغيل مختلفة.....72
- الجدول 12.3: بارامترات عمود البلازما المتضيق ومردود الأشعة السينية اللينة بدلالة الضغط عند جهود تشغيل مختلفة من أجل مصعد مدبب لجهاز NX2.....74
- الجدول 13.3: البارامترات الحركية المحسوبة عددياً لعمود البلازما المتضيق الناتجة عن تعديل شروط التدبب لكل قيمة من p_o و z_s و a_e 78

الجدول 14.3: بارامترات التشغيل والمواءمة لكود نموذج لي المستخدمة في محاكاة جهاز PF24 باستخدام مصعد أسطواني. 79.....

الجدول 15.3: بعض بارامترات عمود البلازما المتضيق بدلالة الضغط لجهاز PF24 باستخدام مصعد الأسطواني ومدبب قبل

الأمثلة..... 81.....

الجدول 16.3: بعض بارامترات عمود البلازما المتضيق ومردود الأشعة السينية اللينة بدلالة الضغط لجهاز PF24 باستخدام مصعد

أسطواني ومدبب قبل الأمثلة..... 81.....

الجدول 17.3: بعض بارامترات عمود البلازما المتضيق ومردود الأشعة السينية اللينة بدلالة الضغط لجهاز PF24 للمصعد

الأسطواني والمدبب بعد الأمثلة..... 83.....

الجدول 18.3: بعض بارامترات عمود البلازما المتضيق ومردود الأشعة السينية اللينة بدلالة الضغط لجهاز PF24 للمصعد

الأسطواني والمدبب بعد الأمثلة..... 83.....

ملخص البحث (Abstract)

تم في هذا البحث إجراء تجارب عددية باستخدام كود لي (RADPFV5.16) على أجهزة بلازما محرقية مختلفة الطاقة من نوع Mather بهدف دراسة تأثير تعديل شروط التشغيل (غاز التشغيل، جهد الشحن) وهندسة المصعد (طول المصعد) وتصميم المصعد (مصعد أسطواني، مصعد مدبب) على مردود الأشعة السينية اللينة الصادرة من هذه الأجهزة وباستخدام غاز النيون كغاز تشغيل. تم تقديم تفاصيل عن جهاز البلازما المحرقية الكثيفة وطريقة تشغيله. تم تقديم معلومات عن آليات إصدار الأشعة السينية من البلازما. تم كما تم عرض نتائج نموذج الهالة فيما يتعلق بخصائص إصدار الأشعة السينية اللينة. كذلك تم عرض البنية الرياضية لكود لي المستخدم في هذا البحث. من أجل إجراء التجارب العددية، الخطوة الأولى شملت إجراء تجارب عددية لمحاكاة 6 أجهزة بلازما محرقية مختلفة الطاقة (APF, UNU/ICTP, INTI, PF7, NX1, NX2) ذات مصعد أسطواني بهدف دراسة تأثير ضغط غاز التشغيل عند جهود تشغيل وأطوال مصعد مختلفة على مردود الأشعة السينية اللينة المحسوب ومقارنتها مع النتائج التجريبية المتوفرة وتم الحصول على تطابق جيد بين النتائج المحسوبة والتجريبية، كما تم دراسة العوامل المؤثرة على هذا المردود. في الخطوة الثانية من هذا العمل، قمنا بإجراء تجارب عددية لجهاز NX2 لدراسة تأثير الضغط على مردود الأشعة السينية اللينة من أجل جهود تشغيل مختلفة. كذلك تم مقارنة النتائج المحسوبة مع النتائج التجريبية المتوفرة والحصول على تطابق جيد. بعد ذلك تم إجراء تجارب عددية لمعرفة تأثير تغيير شروط التدبب على مردود الأشعة السينية اللينة. بينت النتائج أن مردود الأشعة السينية اللينة يزداد عند استخدام مصعد مدبب. في المرحلة الأخيرة، وبلاستفادة من التقارب بين النتائج التجريبية والمحسوبة في المراحل السابقة، أجريت تجارب عددية على جهاز PF24 وذلك بالاعتماد على منحنى التيار التجريبي المتوفر، حيث تم دراسة تأثير الضغط على مردود الأشعة السينية من أجل مصعد أسطواني ومدبب، وتم إجراء أمثلة للشروط الهندسية لمصعد الجهاز بهدف الحصول على التوليفة المثلى التي تعطي أعلى مردود.

كلمات مفتاحية (Keywords):

البلازما المحرقية الكثيفة، الأشعة السينية اللينة، نموذج الهالة، نموذج لي، منحنى تيار الانفراغ.

الجزء التمهيدِيّ

(الإطار العام للبحث)

مقدمة (Introduction):

نظراً للتطبيقات التكنولوجية المتنوعة للأشعة السينية اللينة، كان إنتاجها وتحسينها محورياً للبحث في العديد من المختبرات والمؤسسات. إن إصدار الأشعة السينية اللينة من البلازما يعتمد على مجموعة من التقنيات والتي تختلف في تكلفتها وكفاءتها واستخداماتها فمنها ما يكون منخفض التكلفة والكفاءة مثل الليزر، ومنها ما يكون مرتفع التكلفة والكفاءة مثل إشعاع السنكروترون الصادر من الإلكترونات، أما بالنسبة لأحد أبرز التقنيات في مجال إصدار الأشعة السينية اللينة هي تقنية البلازما المضغوطة مثل البلازما المحرقة الكثيفة المعروفة أيضاً بـ (Dense Plasma Focus – DPF) والتي تكون متوسطة التكلفة وعالية الكفاءة، حيث تتميز البلازما المحرقة الكثيفة بقدرتها على إنتاج بلازما ذات درجات حرارة وكثافة عالية جداً.

نظراً للطبيعة المعقدة للبلازما والظواهر الفيزيائية المتعددة التي تحدث خلالها تم استخدام نموذج المحاكاة العددي نموذج لي (Lee model) لفهم وتحليل سلوك البلازما بشكل أفضل ولتحسين تصميم وأداء أجهزة البلازما المحرقة الكثيفة بهدف زيادة مردود الأشعة السينية اللينة الصادرة من هذه الأجهزة. يعتمد هذا النموذج على مجموعة من المعادلات التفاضلية التي تصف التفاعلات الكهرومغناطيسية والحرارية والحركية داخل البلازما. يتميز نموذج لي ببساطته النسبية مقارنة ببعض النماذج الأخرى مما يجعله أداة قوية للمحاكاة الأولية وتحليل تأثير تعديل شروط التشغيل المختلفة على أداء الجهاز.

إن تقنية البلازما المحرقة تُنتج نبضات كثيفة من الأشعة السينية اللينة وهذا يفتح المجال أمام تطبيقات طبية وصناعية متعددة مثل التصوير الشعاعي والأبحاث البيولوجية ومعالجة المواد، كما تُعد تقنية البلازما المحرقة الكثيفة من المجالات الواعدة التي تستقطب اهتمام الباحثين على مستوى العالم وذلك نظراً لإمكاناتها الكبيرة في إحداث تقدم تقني وعلمي في مجالات متنوعة.

مشكلة البحث (Research Problem):

إن تحسين مردود الأشعة السينية اللينة الصادرة من أجهزة البلازما المحرقة الكثيفة ودراسة تأثير تعديل شروط التشغيل وهندسة وتصميم الجهاز على المردود مكلف من الناحية المادية والزمنية تجريبياً. وبالتالي اختصاراً للجهد والزمن والتكلفة تُستخدم عادةً نماذج المحاكاة العددية التي تتيح دراسة تأثير العوامل المختلفة على مردود الأشعة السينية اللينة بهدف الحصول على الشروط (البارامترات) المثلى التي تحسن المردود واعتمادها في التجارب المخبرية.

تساؤلات البحث (Research Questions):

تُعد أجهزة البلازما المحرقة الكثيفة أحد منابع الأشعة السينية اللينة، فعادةً يتم استخدام نموذج لي لأمتلة شروط تشغيل هذه الأجهزة واختبار تغير هندسة الجهاز على مردود الإصدار وأبعاد التضيّق وهذا يؤدي إلى اختصار الوقت والجهد اللازم لإجراء تجارب مخبرية بنفس الهدف. عند إجراء أبحاث تتعلق بمحاكاة أجهزة البلازما المحرقة الكثيفة، تتطلب الدراسة طرح عدد من التساؤلات البحثية المهمة التي يجب توفير الإجابة لها وأهمها:

1. ما هي العوامل الأساسية المؤثرة على مردود الأشعة السينية اللينة؟
2. ما هو تأثير تعديل شروط التشغيل وهندسة وتصميم المصعد على مردود الأشعة السينية اللينة؟
3. ما هو النموذج المستخدم لمحاكاة أجهزة البلازما المحرقة وما مدى دقة هذا النموذج في تمثيل سلوك البلازما؟
4. هل يمكن اعتبار النموذج صالحاً لمحاكاة أي جهاز بلازما محرقية، وبالتالي تقديم رؤى قيمة لتصميم أجهزة بلازما محرقية كثيفة محسنة تعتمد على بيانات دقيقة وتحليلات متقدمة؟

فرضيات البحث (Research Hypothesis):

هناك مجموعة من الفرضيات الأساسية التي تساعد في توجيه الدراسة، فيما يلي بعض الفرضيات البحثية التي تم استخدامها:

1. إن تعديل شروط التشغيل وهندسة وتصميم المصعد يمكن أن يزيد من كفاءة تحويل الطاقة الكهربائية إلى طاقة إصدار من البلازما والتي تؤثر على مردود الأشعة السينية اللينة الصادرة من أجهزة البلازما المحرقة الكثيفة.

2. نموذج لي المستخدم لمحاكاة أجهزة البلازما المحرقة والإصدارات الناتجة عنها صالح لإجراء تجارب عديدة.

3. إمكانية مقارنة النتائج العددية مع البيانات التجريبية المنشورة سابقاً.

مسلمات البحث (Research Assumptions):

يعتمد نموذج لي المستخدم في دراسة ومحاكاة أجهزة البلازما المحرقة الكثيفة على مجموعة من المسلمات التي تساعد في تبسيط وتحليل الظواهر المعقدة المتعلقة بالبلازما المحرقة. فيما يلي بعض المسلمات الأساسية لهذا النموذج:

1. يُفترض أن الانفراغ الكهربائي يحدث بنمط مثالي.
2. يُعتبر الغاز المستخدم لتشغيل جهاز البلازما المحرقة غاز مثالي.
3. يُفترض أن الحقول الكهربائية والمغناطيسية ثابتة وموزعة بشكل منتظم على محور الحركة.
4. يُفترض أن البلازما تتمتع بتمائل محوري.
5. يُفترض أن توزع الحرارة والكثافة في البلازما متجانس.

هدف البحث (Research Objective):

- إجراء محاكاة عددية باستخدام نموذج لي (Lee model) لأجهزة بلازما محرقة مختلفة الطاقة من أجل الحصول على الأشعة السينية اللينة وباستخدام غاز النيون كغاز تشغيل.
- استخدام نموذج لي (Lee model) لتحديد بارامترات بلازما التضيّق (التمحرق).
- دراسة مردود إصدار الأشعة السينية اللينة عددياً بتطبيق شروط مختلفة ومقارنتها مع البيانات التجريبية.

- أمثلة الشروط التي تعطي أفضل مردود للأشعة السينية اللينة الصادرة عن البلازما المحرقة الكثيفة والحارة.

أهمية البحث (Research Importance):

- إن محاكاة أجهزة البلازما المحرقة الكثيفة باستخدام نموذج لي يتيح للباحثين اختبار ودراسة تأثير تعديل شروط التشغيل المختلفة وهندسة وتصميم المصعد على مردود الأشعة السينية اللينة دون الحاجة إلى القيام بتجارب مخبرية والتي قد تكون مكلفة.
- تساعد المحاكاة باستخدام نموذج لي في تحديد طرق لتحسين أداء أجهزة البلازما المحرقة الكثيفة بحيث تكون أكثر كفاءة واستقراراً، مما يزيد من فعاليتها في التطبيقات المختلفة. هذا يساهم في تقليل التكلفة الإجمالية للبحث والتطوير.
- تعتبر المحاكاة باستخدام نموذج لي أداة تعليمية قوية تمكن الطلاب والباحثين من فهم حركية البلازما بشكل عملي ونظري.

مسوِّغات البحث (Research Justifications):

بسبب زيادة التطبيقات العملية المختلفة للأشعة السينية اللينة وخاصة التطبيقات الطبية، قام الباحثين بإجراء دراسات وأبحاث مكثفة للحصول على مصادر الأشعة السينية اللينة ذات مردود عالي وتكاليف منخفضة، وأحد هذه المصادر هي أجهزة البلازما المحرقة التي تعطي إصدارات إشعاعية مختلفة.

في هذا البحث، سنقوم بإجراء تجارب عديدة لمحاكاة أجهزة البلازما المحرقة الكثيفة باستخدام نموذج لي وبتطبيق شروط تشغيل مختلفة واستخدام غاز النيون كغاز تشغيل لدراسة تأثير تعديل شروط التشغيل وهندسة وتصميم المصعد على تحسين مردود الأشعة السينية اللينة الصادرة من هذه الأجهزة وأمثلة هذه الشروط لإمكانية استخدام هذه الأشعة في عدد من التطبيقات المختلفة، ومنها:

1. الطباعة الحجرية الضوئية.

2. مجهر الأشعة السينية اللينة.

3. تحليل الأشعة السينية الفلورية.

4. التصوير المقطعي الدقيق.

5. قياس سُمْك وتركيب الرقائق.

مصطلحات البحث (Research Terms):

- **البلازما المحرقة الكثيفة (Dense Plasma Focus - DPF):** أحد المصادر التي تُستخدم لتوليد بلازما ذات كثافة عالية ودرجة حرارة مرتفعة، حيث تُنتج هذه البلازما العديد من الإصدارات الإشعاعية. يتم الحصول على البلازما الحارة والكثيفة من خلال عملية انقراض كهربائي حيث يتم ضغط وتسخين الغاز بواسطة الحقول الكهرومغناطيسية القوية المتولدة.
- **الأشعة السينية اللينة (Soft X-ray - SXR):** هي نوع من الأشعة السينية الحرارية تتولد نتيجة تفاعل الإلكترونات مع الأيونات، تتميز بطول موجي 0.1 - 10 nm وتقع طاقتها ضمن مجال يتراوح بين 1 - 10 keV ويكون زمن إصدار الأشعة السينية اللينة قصير جداً، وغالباً ما تكون في مجال ns.
- **مردود الأشعة السينية اللينة (Soft X-ray Yield - Y_{sxr}):** هو قياس كمية الأشعة السينية اللينة الناتجة عن جهاز البلازما المحرقة الكثيفة وهو يمثل مقدار خسارة الطاقة على شكل إشعاع. يتأثر المردود بالعديد من العوامل بما في ذلك درجة حرارة وكثافة البلازما وأبعاد التضيق والتي يتم ضبطها عن طريق تغيير كل من بارامترات التشغيل والبارامترات الهندسية للمصعد.
- **نموذج الهالة (Corona Model):** نموذج نظري يستخدم لدراسة خصائص إصدار الأشعة السينية اللينة من البلازما. يُعنى هذا النموذج بوصف كيفية إصدار الأشعة السينية اللينة من طبقة خارجية (الهالة) محيطة بالمنطقة الأكثر كثافة وحرارة في البلازما.
- **نموذج لي (Lee Model):** نموذج رياضي يستخدم لمحاكاة حركية البلازما في أجهزة البلازما المحرقة الكثيفة، يعتمد على مجموعة من المعادلات التفاضلية التي تصف التفاعلات الكهرومغناطيسية والحرارية والتحريكية داخل البلازما.

- **المحاكاة الحاسوبية (Computer Simulation):** استخدام الحواسيب لتنفيذ النماذج الرياضية وتحليل سلوك البلازما ضمن أجهزة البلازما المحرقة الكثيفة.

محدوديات البحث (Research Limitations):

نقوم بإجراء التجارب العددية على أجهزة البلازما المحرقة الكثيفة عن طريق مواءمة منحنى التيار التجريبي مع منحنى التيار المحسوب عددياً، أحد محدوديات البحث هي عدم توفر منحنيات تيار تجريبية من أجل كل ضغط تشغيل لكل جهاز بلازما محرقة تمت دراسته.

منهج البحث وأدواته (Research Methodology):

- تتضمن منهجية البحث باستخدام نموذج لي عدة خطوات رئيسية، تشمل:
 1. الدراسات النظرية: تتضمن فهم نموذج لي الذي يصف حركية البلازما في أجهزة البلازما المحرقة.
 2. المحاكاة الحاسوبية: استخدام كود نموذج لي الرياضي المكتوب على الحاسوب لمحاكاة سلوك البلازما في أجهزة البلازما المحرقة.
 3. دراسة ظروف التشغيل المختلفة: تحليل تأثير تعديل شروط التشغيل، هندسة وتصميم المصعد على مردود الأشعة السينية اللينة وخصائص البلازما.
 4. تحليل النتائج: مقارنة نتائج المحاكاة مع البيانات التجريبية للتحقق من صلاحية ودقة النموذج.
- أما الأدوات المستخدمة في هذا البحث:

1. جهاز حاسوب

2. برنامج محاكاة حاسوبي (كود نموذج لي)

الدراسة المرجعية (Literature Review):

في أوائل ستينيات القرن الماضي قام (Mather 1965) [1] بتطوير جهاز البلازما المحرقة الكثيفة في الولايات المتحدة الأمريكية والذي يعتمد على الانفراغ الكهربائي لتوليد البلازما الحارة ويتميز هذا الجهاز بطورين رئيسيين

طور التسريع المحوري وطور الانضغاط القطري، في هذا العمل تمت ملاحظة ظهور مناطق محلية ذات درجة حرارة وكثافة عالية تسمى النقاط الساخنة والتي تعتبر أساسية لإصدار الأشعة السينية اللينة. بشكل مستقل تم تطوير نفس الجهاز في الإتحاد السوفيتي ولكن بتصميم هندسي مختلف على يد الباحث (Filipov 1962) [2]، تم استنباط فكرة هذا الجهاز من مجموعة أجهزة سابقة لها غرض مماثل تدعى بأجهزة التضييق (Z- pinch) [3] التي تنتج عمود بلازما ينضغط ذاتياً مما يؤدي إلى إنتاج بلازما ذات حرارة وكثافة عالية.

قام الباحث (Bostick *et al.* 1972) [4] بتحليل مصادر الأشعة السينية في بلازما الديوتيريوم الصادرة من أجهزة البلازما المحرقة الكثيفة كتابع لموضع وطاقة وزمن انبعاث الأشعة السينية، وقد لاحظ انبعاثات قوية للأشعة السينية اللينة في منطقة الهالة خارج محور عمود البلازما. منذ ذلك الحين أصبح هناك اهتمام متزايد باستثمار هذه الأجهزة كمنبع بديل للأشعة السينية اللينة من أجل التطبيقات المختلفة، حيث قام (Gutcheck and Muray 1982) [5] بإجراء مقارنة بين جهاز البلازما المحرقة الكثيفة والمصادر الأخرى للأشعة السينية اللينة مثل إشعاع السنكروترون ووجد أن جهاز البلازما المحرقة يتميز عن باقي المصادر بالحجم المادي الصغير والتكلفة القليلة وحجم الإصدار الإشعاعي الكبير والتدفق العالي لكل نبضة، كما تم دراسة إمكانية استخدام هذا الجهاز كمصدر للطباعة الحجرية بالأشعة السينية اللينة وتم التوصل إلى أنه يمكن إنتاج صور شعاعية مجهرية بدقة تبلغ $0.1 \mu m$.

في بداية الأبحاث التي تتعلق بأجهزة البلازما المحرقة، ركز الباحثون على إجراء التجارب المخبرية بهدف فهم سلوك وحركية البلازما المتولدة عن هذه الأجهزة والإشعاعات الصادرة منها. لاحقاً وبهدف خفض التكلفة وتوفير الوقت تم اقتراح عدد من النماذج النظرية التي تهدف إلى فهم الآليات الأساسية ودراسة الظواهر الفيزيائية المتولدة في أجهزة البلازما المحرقة بالإضافة لدراسة تأثير تعديل هندسة الجهاز وشروط التشغيل على مردود الأشعة الصادرة من هذه الأجهزة، من أهم وأبسط هذه النماذج نموذج لي (Lee Model) المستخدم في هذا البحث. في ثمانينيات القرن الماضي بدأت الدراسات العددية باستخدام نموذج لي بهدف إجراء محاكاة لأجهزة بلازما محرقة Mather-type. حيث قام (Lee 1984) [6] بتطوير نموذج يتألف من طورين ويربط بين سرعة

الغمد في طور التسريع المحوري وسرعة الغمد في طور الانضغاط القطري، وسرعة المكبس المغناطيسي وسرعة الصدم القطري من خلال التطبيق الدقيق لقانون الأديباتيك (الحراري الثابت). يبدأ النموذج بطور التسريع المحوري ويستمر إلى طور الانضغاط القطري وينتهي عندما تصل جبهة الصدم القطرية إلى محور المصعد. كما تم حساب التيار في النموذج من خلال معادلة تربط بين الدارة كهربائية للجهاز والأطوار الحركية للبلازما.

لاحقاً تم إجراء أول محاكاة لجهاز بلازما محرقية كثيفة باستخدام نموذج لي العددي من قبل الباحث (Lee *et al.* 1985) وزملائه [7] حيث تمت محاكاة جهاز بلازما محرقية بسيط مبني من مكثف واحد طاقته 3.3 kJ وقد أظهر هذا النموذج توافق بين نتائج المحاكاة العددية والنتائج التجريبية.

تمت مناقشة نموذج لي العددي لأول مرة من أجل إصدار الأشعة السينية اللينة، من قبل الباحث (Lee *et al.* 1988) وفريق عمله [8] باستخدام جهاز البلازما المحرقية UNU/ICTP وذلك بهدف التأكد من صلاحية نموذج لي. تم وصف طور التسريع المحوري بواسطة نموذج Snowplow وطور الانضغاط القطري بواسطة نموذج slug، وتم وضع الأساس النظري لحساب مردود الأشعة السينية اللينة.

قدمت الباحثة (Liu 1996) [9] أطروحة دكتوراه كان الهدف منها إجراء تجارب مخبرية ومحاكاة حاسوبية من أجل دراسة إصدار الأشعة السينية اللينة من جهاز بلازما محرقية 3 kJ باستخدام شروط تشغيل مختلفة. تم الحصول على معلومات حول حركية وتطور البلازما وخصائص الانفراغ في أجهزة البلازما المحرقية، تم أيضاً حساب كل من كثافة الطاقة ومستويات التأين ودرجات الحرارة اللازمة لتوليد الأشعة السينية اللينة باستخدام نموذج الهالة (Corona model) من أجل إدخالها في حسابات نموذج لي. من أهم النتائج التي تم التوصل إليها أنه من أجل بلازما النيون يكون مجال درجات الحرارة المناسب لتوليد الأشعة السينية اللينة بمردود عالي بين 200 eV - 500 eV، وأن إصدار الأشعة السينية اللينة ينتج بشكل أساسي عن خطوط ألفا للأيونات الشبيهة بالهيدروجين (H-Like) عند طاقة 1022 eV وطول موجي $13.447 \text{ \AA}$ وتلك الشبيهة بالهيليوم (He-Like) عند طاقة 922 eV وطول موجي $12.132 \text{ \AA}$. فضلاً عن ذلك يكون الطيف الخطي الناتج عن عملية إزالة الإثارة (De-excitation) هو السائد من إجمالي الأشعة السينية اللينة الصادرة بنسبة 64% مقارنة بالطيف المستمر الناتج

عن عمليات الكبح وإعادة الإتحاد بنسبة 36%. بالإضافة لهذه التجارب المخبرية تم تطوير نموذج لي عن طريق إضافة نمذجة طور الصدمة القطرية المنعكسة وطور الإصدار الإشعاعي وهذا التعديل أعطى صورة أكثر واقعية لحركة غمد البلازما ضمن الجهاز. تم مقارنة نتائج المحاكاة مع النتائج التجريبية ووجد توافق جيد من أجل أبعاد التضييق وزمن الإصدار.

في أطروحة أخرى للباحث (Zhang 1999) [10] تم أيضاً دراسة خصائص إصدار الأشعة السينية اللينة من أجهزة بلازما محرقية مختلفة (NX0, NX1, NX2, UNU/ICTP) من أجل شروط تشغيل مختلفة مثل (ضغط التشغيل وجهد الشحن وطول المصعد وقطبية المصعد ومعدل التكرار)، تم إجراء محاكاة لحركية البلازما بالاعتماد على نموذج لي وتمت مقارنة النتائج النظرية مع التجريبية وتم الحصول على توافق جيد.

في وقت لاحق تم تطوير نموذج لي على عدة مراحل [11, 12] وتم إجراء العديد من الأبحاث على أجهزة بلازما محرقية مختلفة [13-17] والتي تعتمد على التجارب العددية باستخدام نموذج لي. من أهم هذه الأبحاث فيما يتعلق بالمصعد الأسطوانى، قام (Saw et al. 2009) وزملائه [18] بتحسين مردود الأشعة السينية اللينة الصادرة من جهاز UNU/ICTP عددياً باستخدام كود نموذج لي، تظهر نتائج الدراسة أنه تم تحقيق زيادة بمقدار ثلاثة أضعاف في مردود الإصدار عندما تم تقليل طول المصعد وذلك نتيجة تغير السرعة المحورية والتي تؤدي إلى درجة حرارة تضييق مثالية عند ضغط مرتفع نسبياً.

كما قام الباحث (Akel et al. 2011) وزملائه [19] بتطبيق كود نموذج لي على جهاز البلازما المحرقية PFSY1 الموجود في هيئة الطاقة الذرية السورية، بهدف دراسة تأثير كل من تغيير الضغط وخفض قيمة التحريضية وتغيير كل من طول ونصف قطر المصعد على مردود الأشعة السينية اللينة، تم تحسين المردود بتغيير ضغط التشغيل فقط مع الحفاظ على جهد الشحن ووسطاء الجهاز، كما تم التوصل إلى أن مردود الأشعة السينية يزداد بانخفاض قيمة تحريضية الدارة. كما قام (Akel et al. 2012) وزملائه [20] بإجراء تجارب عددية لتوصيف الجهازين AECS PF1 و AECS PF2 الموجودان في هيئة الطاقة الذرية السورية.

تم أيضاً إجراء تجارب عددية على جهاز APF من قبل الباحث (Niknam Sharak *et al.* 2013) وزملائه [21] وذلك من أجل دراسة خصائص إصدار الأشعة السينية اللينة عند ضغوط وجهود تشغيل مختلفة، وقد لوحظ توافق جيد بين النتائج المحسوبة عددياً والبيانات التجريبية من حيث مردود الأشعة السينية اللينة والضغط الأمثل المقابل لأعلى مردود وتيار الانفراغ وتيار التضيق وزمن بقاء التضيق.

تم إجراء بحث دكتوراه من قبل الباحث (Jr Apilado Roy 2015) [22] بهدف إجراء دراسات تجريبية وعددية على جهاز INTI. قسمت الدراسة إلى قسمين، حيث جرى في القسم الأول تحسين مردود الأشعة السينية اللينة عن طريق إجراء تجارب عددية باستخدام كود نموذج لي وتعديل هندسة المصعد بهدف تحديد التوليفة المثلى التي تعطي أعلى مردود. أظهرت النتائج أن هناك توافق جيد بين مردود الأشعة السينية اللينة التجريبي والمحسوب للمصعد الأصلي والمصعد الأمثل. يتمتع المصعد الأمثل بمردود أعلى بعامل 1.5 مقارنة بالمصعد الأصلي. تم تحسين المردود تجريبياً عن طريق استخدام مزيج غازي مكون من غازي النيون والكربتون وتم مقارنة النتائج التجريبية مع النتائج العددية المحسوبة باستخدام كود نموذج لي ووجد توافق جيد بينهم. أما في القسم الثاني فقد تم دراسة العلاقة بين نبضة الأشعة السينية اللينة المميزة وحركية البلازما. أعطت هذه الدراسة إمكانية تقسيم نبضات الأشعة السينية اللينة إلى نبضات جيدة ذات مردود عالي ونبضات سيئة ذات مردود منخفض. في جميع التجارب من أجل المصعد الأصلي والمصعد الأمثل والمزيج الغازي Ne-Kr وجد أن إصدار الأشعة السينية اللينة يبدأ بين بداية طور الصدمة المنعكسة قبل 10 ns من طور التضيق ويستمر حتى بعد نهاية طور التضيق بزمن قدره 10 ns وتمتد حتى مرحلة المقاومة الشاذة وذلك من أجل النبضات الجيدة. بالنسبة لجميع النبضات السيئة، يبدأ إصدار الأشعة السينية اللينة إما في وقت مبكر جداً قبل بدء طور الصدمة المنعكسة أو في وقت متأخر جداً بعد بدء طور التضيق.

تم استخدام كود نموذج لي المعدل من قبل (Malek *et al.* 2022) وزملائه [23] لحساب خصائص إصدار الأشعة السينية اللينة الصادرة من جهاز PF1000 باستخدام غازات تشغيل مختلفة (الأكسجين، الهيدروجين، النتروجين، الديوتيريوم، الأرجون، الهيليوم، وأخيراً النيون)، بيّنت النتائج أن هناك علاقة قوية بين مردود الأشعة

السينية اللينة ونوع غاز التشغيل المستخدم، وتم التوصل إلى أن مردود الأشعة السينية اللينة من أجل النيون هو الأفضل بينما بالنسبة للأرجون فكان الأدنى، حيث أن نسبة نصف القطر (أصغر نصف قطر للتضييق/نصف قطر المصعد) من أجل النيون (0.05~) أصغر بثلاثة أضعاف من نسبة نصف القطر من أجل الأرجون (0.16~) وبالتالي فإن أي زيادة في الانضغاط على عمود البلازما يؤدي إلى زيادة في كثافة الأيونات بشكل ملحوظ بعامل قدره 253 مقارنة بالأرجون. كما وضع البحث أن من أهم ميزات استخدام غاز النيون كغاز تشغيل إمكانية الحصول على درجة حرارة تضييق عالية وبالتالي أعلى مردود للأشعة السينية اللينة عند ضغوط منخفضة على عكس الأرجون الذي يكون بحاجة إلى ضغوط عالية للحصول على درجة حرارة تضييق مناسبة لتوليد الأشعة السينية اللينة.

تم أيضاً استخدام النسخة المعدلة من كود نموذج لي من قبل (Barati 2023) [24] بهدف دراسة تأثير تغيير نصف قطر المصعد وطوله، نصف قطر وعدد قضبان المهبط على مردود الأشعة السينية اللينة، وتم التوصل إلى أن زيادة نصف قطر المصعد يؤدي إلى زيادة مردود الأشعة السينية اللينة. كما لوحظ أن زيادة طول المصعد يؤدي إلى انخفاض في المردود. وأيضاً زيادة عدد قضبان المهبط يؤدي إلى تضييق ذو درجة حرارة منخفضة وزمن بقاء صغير وبالتالي انخفاض في المردود.

أما فيما يتعلق بالمصعد المدبب قام الباحث (Wong et al. 2004) وزملائه [25] بدراسة خصائص إصدار الأشعة السينية اللينة الصادرة من جهاز NX2 ذو مصعد مدبب، وتم التوصل إلى أن الشكل الجديد للمصعد أدى إلى زيادة إصدار الأشعة السينية اللينة من أجل غاز النيون بمعامل (5~) كما اقترح نموذج لي.

فيما بعد تم إجراء تحسين على كود نموذج لي من خلال الأخذ في عين الاعتبار تدبب المصعد وتضمين فقدان الطاقة بسبب إشعاع إعادة الإتحاد في مرحلة الانضغاط البطيء من قبل (Wong et al. 2006) وزملائه [26]، تمت معايرة الكود من أجل جهاز NX2 مع مصعد مدبب وتمت مقارنة مردود الأشعة السينية اللينة النظرية الناتجة مع البيانات التجريبية السابقة ووجد هناك توافق جيد من حيث الضغط الأمثل. ومع ذلك، كانت نتائج النموذج فيما يتعلق بمردود الأشعة السينية اللينة أقل من القيم التي تم الحصول عليها تجريبياً.

قام (Barati and Habibi 2019) [27] بتعديل كود نموذج لي لحساب الحقل المغناطيسي بين المصعد والمهبط وتحريضية البلازما، تم استخدام الكود المعدل لمحاكاة جهاز APF مع أشكال مختلفة للمصعد (أسطواني، أسطواني مجوف، مدبب) وتم دراسة تأثير الضغط على مردود الأشعة السينية اللينة من أجل كل مصعد، كما تم دراسة تأثير عدم تماثل تيار التفريغ في الطور المحوري. تم ملاحظة أن المردود الأعلى المقابل للضغط الأمثل الأعلى يكون من أجل المصعد المدبب وذلك بسبب الانخفاض الكبير نسبياً في نصف قطر نهاية المصعد والذي يرافقه ارتفاع في تيار البلازما، والمردود الأدنى المقابل للضغط الأمثل الأقل يكون من أجل المصعد الأسطواني المجوف. كما أظهرت النتائج أن عدم تماثل تيار التفريغ في الطور المحوري يؤدي إلى معدل مقاومة أعلى في الطور المحوري وبالتالي مردود أشعة سينية لينة أقل. تم إجراء مقارنة بين النتائج التجريبية ونتائج المحاكاة ووجد تطابق جيد في النتائج وهذا أعطى مصداقية للنموذج المعدل.

مازالت الدراسات المتعلقة بتأثير شكل المصعد على خصائص إصدار الأشعة السينية اللينة مستمر إلى الآن، حيث تم استخدام أشكال كثيرة للمصعد ودراسة تأثير شكلها على مردود الأشعة السينية اللينة. ففي أحدث دراسة قام الباحث (Barati 2023) [28] باستخدام نموذج لي لدراسة خصائص إصدار الأشعة السينية اللينة الصادرة من جهاز بلازما محرقية بمصعد ذو رأس بيضوي. تم دراسة تأثير تعديل نصف قطر رأس المصعد البيضوي على مردود الأشعة السينية اللينة.

في هذا البحث سنقوم بإجراء تجارب عديدة باستخدام كود نموذج لي إصدار (RADPFV5.16) على أجهزة بلازما محرقية مختلفة الطاقة من نوع Mather بهدف دراسة تأثير تعديل شروط التشغيل (ضغط غاز التشغيل، جهد التشغيل) وهندسة المصعد (طول المصعد) وتصميم المصعد (مصعد أسطواني، مصعد مدبب) على مردود الأشعة السينية اللينة الصادرة منه وباستخدام غاز النيون كغاز تشغيل.

الفصل الأول (Chapter I)

البلازما المحرقة الكثيفة وإصدار الأشعة السينية اللينة

(DPF and SXR Emission)

1.1. مقدمة (Introduction):

منذ ستينيات القرن الماضي وإلى الآن تم الاهتمام بدراسة أجهزة البلازما المحرقة على نطاق واسع كمصدر فعال للأشعة السينية اللينة. في هذا الفصل سنقوم بتقديم بعض التفاصيل عن أجهزة البلازما المحرقة الكثيفة وسنتعرف على أقسامها ومبدأ تشغيلها وشروط تصميمها وحركية وأطوار البلازما المحرقة التي تحدث داخل هذه الأجهزة والإصدارات الإشعاعية الصادرة عنها. فيما بعد سنقدم معلومات حول آليات إصدار الأشعة السينية اللينة من البلازما المحرقة الكثيفة وأخيراً سيتم عرض أهم تطبيقات الأشعة السينية اللينة الصادرة من هذه الأجهزة.

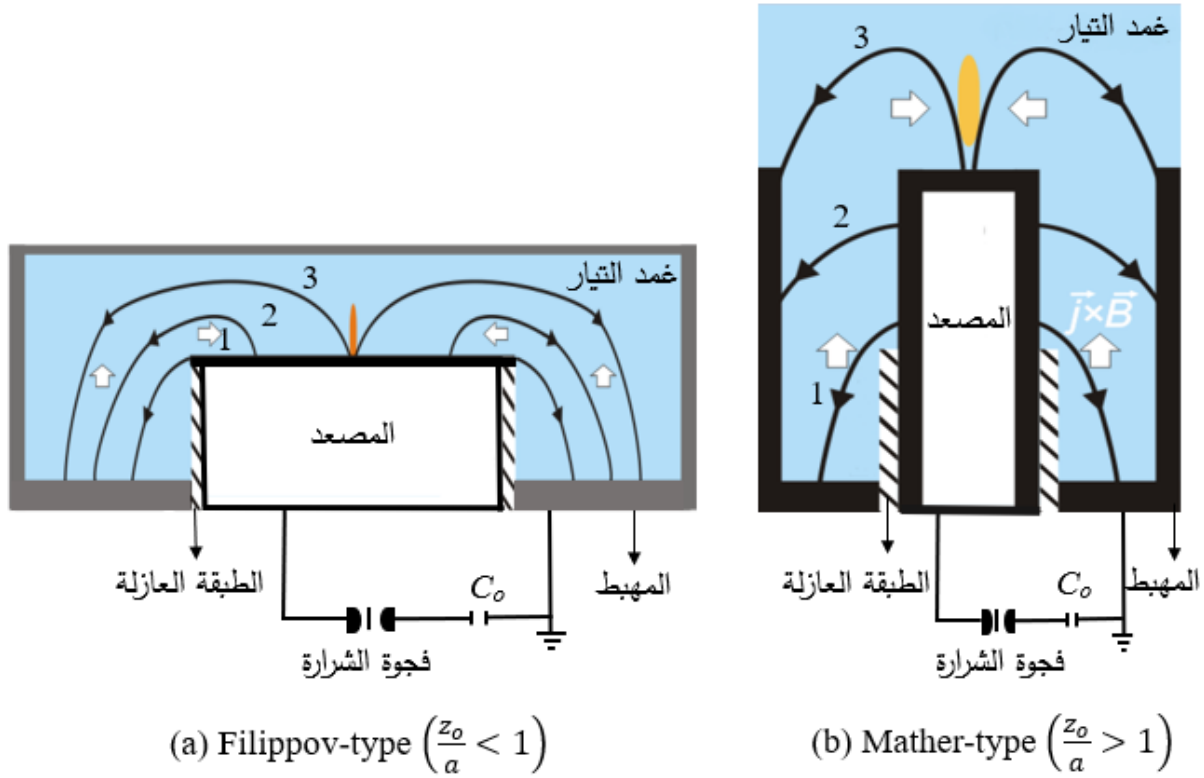
2.1. البلازما المحرقة الكثيفة (Dense Plasma Focus – DPF):

تُعتبر البلازما المحرقة الكثيفة أحد تقنيات البلازما المضغوطة، حيث تعتمد هذه التقنية على مبدأ الانفراغ الكهربائي عبر مجموعة إلكترونات [1]، يبدأ الانفراغ الكهربائي بتأين الغاز الموجود داخل الجهاز مما يؤدي لاحقاً إلى تشكيل غمد تيار البلازما، فيما بعد يتم ضغط غمد التيار إلى بقعة صغيرة تُعرف بالبقعة المحرقة (التضيّق) تحت تأثير الحقل المغناطيسي الناتج عن التيار الكهربائي حيث تصل كثافة الطاقة في البقعة المحرقة إلى مستويات عالية جداً [29].

1.2.1. جهاز البلازما المحرقة الكثيفة (DPF Device):

جهاز البلازما المحرقة الكثيفة هو جهاز طاقة نبضي محوري، يعمل على تسريع وضغط البلازما في بقعة صغيرة والتي قد تتبعث منها اعتماداً على نوع الغاز المستخدم [29] نبضات مكثفة من النيوترونات [30] والأشعة السينية اللينة والقاسية والجسيمات المشحونة مثل الإلكترونات والأيونات [31].

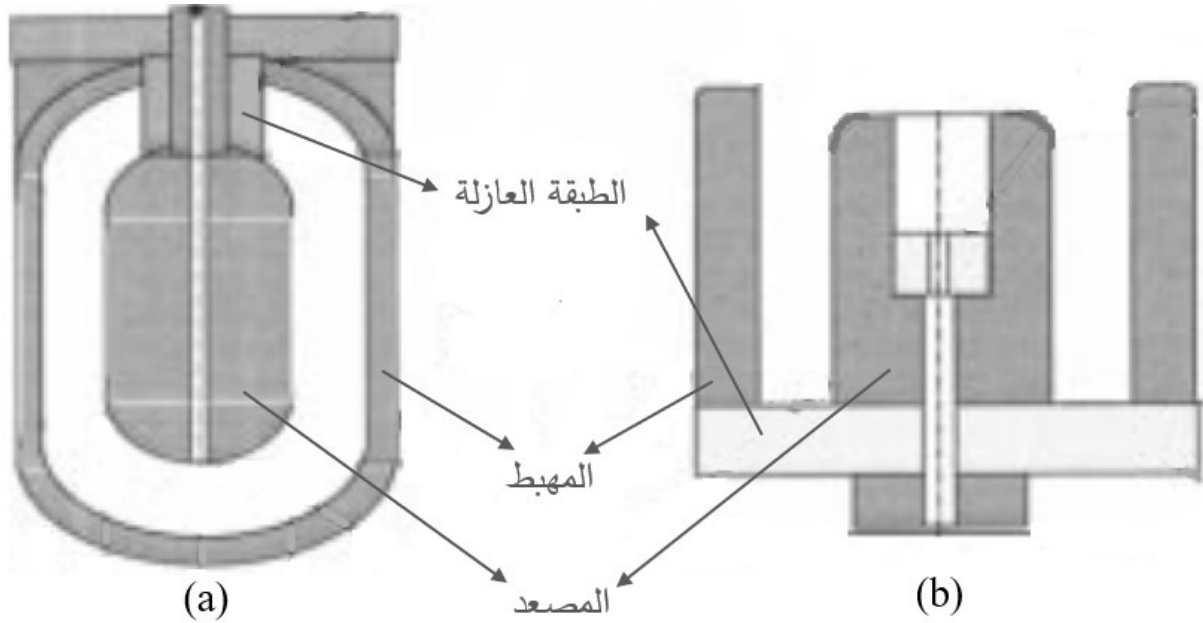
تم تطوير نموذجين لأجهزة البلازما المحرقة الكثيفة بشكل مستقل على يد كل من الباحثين Filippov (الإتحاد السوفييتي) [2] و Mather (الولايات المتحدة الأمريكية) [7] في أوائل الستينيات. نوع Mather هو تعديل لأجهزة Coaxial plasma gun التي تعمل عند ضغوط تشغيل عالية، بينما تم تطوير آلة Filippov كتعديل لأجهزة Z-pinch بهدف فصل منطقة العازل عن منطقة التضيق [22]. يختلف النموذجين في التصميم من حيث هندسة الإلكتروودات، حيث تكون نسبة طول المصعد إلى نصف قطره z_0/a أقل من 1 بالنسبة لنموذج Filippov، بينما نموذج Mather له نسبة طول المصعد إلى نصف قطره z_0/a أكبر من 1 وهو النوع المستخدم في هذا البحث [32]. يوضح الشكل 1.1 نموذجي جهاز البلازما المحرقة الكثيفة، حيث (a) يوضح هندسة المصعد لنموذج Filippov-type و (b) يوضح هندسة المصعد لنموذج Mather-type [33].



الشكل 1.1: نموذجي جهاز البلازما المحرقة الكثيفة، (a) نموذج Filippov-type و (b) نموذج Mather-type [33].

2.2.1. أقسام جهاز البلازما المحرقة الكثيفة (Sections of DPF Device):

يتكون الجهاز بشكل أساسي من حجرة يتم تخليتها من الهواء وتحتوي على غاز تشغيل عند ضغط يتحدد بنوع الغاز، يوجد ضمن الحجرة مجموعة من الإلكتروودات، يشكل المصعد الإلكتروود المركزي ويكون محاط بمجموعة من القضبان على شكل قفص سنجاب تشكل المهبط أو قد يكون المهبط هو نفسه جدران حجرة الجهاز كما هو موضح في الشكل 2.2 [34]. تكون حجرة الجهاز مفتوحة من الأعلى ومغلقة من الأسفل، يحيط بالمصعد جزئياً من قاعدته طبقة عازلة تفصله عن المهبط مما يمنع حدوث انقراض سطحي مباشر، بالإضافة لأنها تساعد على تشكل غمد تيار بلازما متناظر محورياً، كما يؤثر طول الطبقة العازلة على زاوية انحناء غمد تيار البلازما وبالتالي يؤثر لاحقاً على كفاءة التضييق. توصل الحجرة من الأسفل بدارة كهربائية تتألف بشكل أساسي من وحدة تغذية جهد عالٍ وبنك مكثفات وفجوة شرارة ودارة قذح (الشكل 1.1) [29].



الشكل 2.1: شكل المهبط في أجهزة البلازما المحرقة الكثيفة لنموذج Mather-type، (a) المهبط يشكل جدران الحجرة، (b) المهبط عبارة عن قضبان على شكل قفص سنجاب [34].

3.2.1. تشغيل جهاز البلازما المحرقة الكثيفة (Operating of DPF Device):

إن مبدأ تشغيل جهاز البلازما المحرقة الكثيفة بسيط وهو موضح في الشكل 1.1، حيث تعتمد هذه الأجهزة على تحويل الطاقة الكهربائية المخزنة في بنك المكثفات إلى طاقة كهرومغناطيسية ضمن الحجرة ويتم تحويل جزء من هذه الطاقة إلى طاقة بلازما أثناء انهيار الغاز عند سطح العازل [35]. في كلا النموذجين يتم تخلية الحجرة باستخدام مضخة تخلية مناسبة، ثم يضخ الغاز المطلوب عند ضغط يعتمد على نوع الغاز، فمن أجل الغازات الثقيلة (النيون والهيليوم) يكون ضغط التعبئة منخفض ومن أجل الغازات الخفيفة (الأرغون والكريبتون) يكون الضغط مرتفع [29]. فيما بعد يتم تطبيق نبضة جهد عالية تعمل على شحن بنك المكثفات، وعند التفريغ يتم نقل الطاقة الكهربائية المخزنة في بنك المكثفات إلى المصعد بشكل سريع عن طريق دائرة القذح التي تعطي نبضة جهد عالية تولد شرارة في فجوة الشرارة تعمل على فتح الدارة ونقل الطاقة إلى الحجرة، نتيجة لذلك ينهار الغاز الموجود عند الطبقة العازلة ويتطور هذا الانفراج إلى غمد تيار بلازما [10]، ومن خلال تأثير قوة لورنتز يتسارع غمد تيار البلازما محورياً على طول المصعد من أجل نموذج Mather، وقطرياً من أجل نموذج Filippov مبتعداً عن

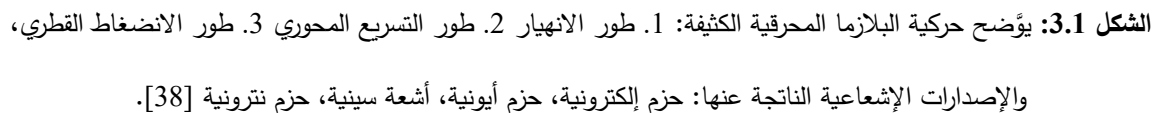
العازل من الموضع 1 إلى الموضع 2، وفي الموضع 3 يتجمع الغمد في مركز المصعد حيث يكون تيار تفريغ بنك المكثفات في قيمته العظمى وينضغط الغمد مشكلاً عمود بلازما حار وكثيف [36].

4.2.1. تصميم جهاز البلازما المحرقة الكثيفة (Design of DPF Device):

يعتمد تصميم أجهزة البلازما المحرقة الكثيفة على نموذج حركي يقسم حركات البلازما إلى ثلاث أطوار رئيسية، طور الانهيار وطور التسريع المحوري وطور الانضغاط القطري، يؤخر طور التسريع المحوري طور الانضغاط القطري حتى يصل تيار تفريغ بنك المكثفات إلى قيمته العظمى [37]. من أجل تحسين المردود الصادر من هذه الأجهزة يجب اتباع بعض القواعد العامة في التصميم. أولاً، يجب مزامنة كلاً من زمن حركة غمد التيار محورياً على طول المصعد والزمن اللازم لوصول تيار تفريغ بنك المكثفات إلى ذروته، بحيث ينتهي الطور المحوري عندما يصل تيار تفريغ بنك المكثفات إلى ذروته، هذا يؤدي إلى زيادة كثافة الطاقة والتيار ضمن غمد البلازما المتضيق إلى أصغر نصف قطر. يتم التحكم في زمن حركة غمد التيار محورياً عن طريق التحكم في كلاً من طول المصعد وضغط وجهد التشغيل وكثافة الغاز التي تؤثر على سرعة الغمد، ويتم التحكم في زمن تفريغ بنك المكثفات عن طريق التحكم في تحريضية الدارة الكهربائية وسعة بنك المكثفات والذي يؤثر على تيار البلازما [37]. ثانياً، يجب التحكم في الزمن اللازم لعملية ضغط البلازما قطعياً لتشكيل تضيق كثيف وفعل ويتم التحكم به عن طريق ضبط نسبة الحرارة النوعية والتي تتعلق بنوع غاز التشغيل المستخدم حيث تحدد سلوكه التحريكي-الحراري تحت الضغط أو التمدد وثابت النفاذية وكثافة الغاز المحيط وتيار تفريغ بنك المكثفات الذي يحدد قوة الحقل المغناطيسي [22].

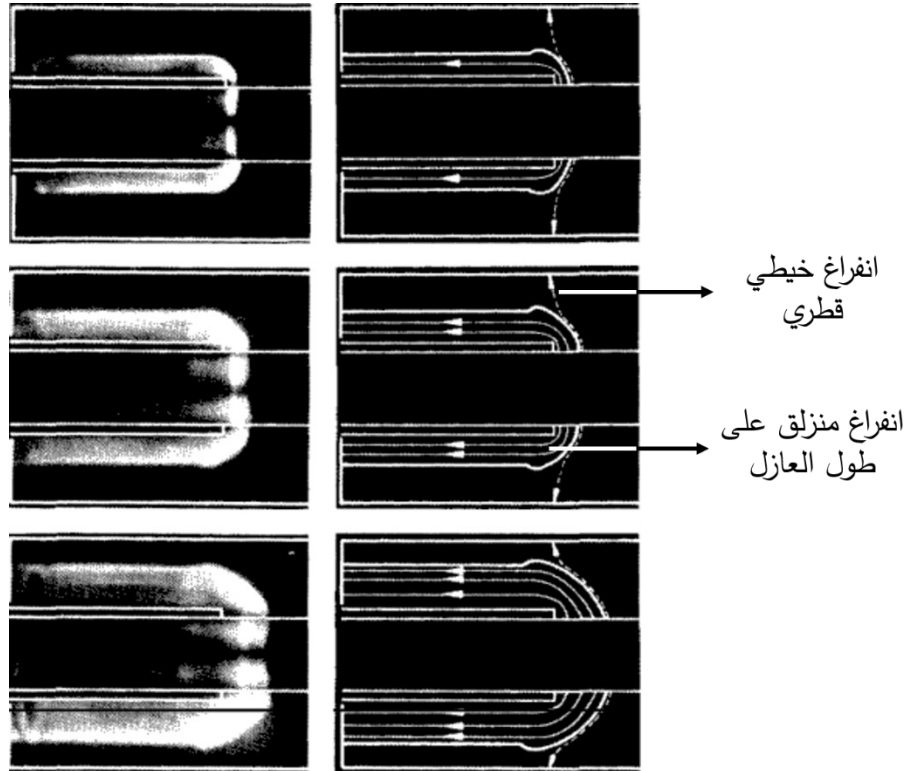
5.2.1. حركية البلازما المحرقة الكثيفة (The Dynamic of DPF):

تنقسم حركية البلازما المحرقة الكثيفة إلى ثلاث أطوار رئيسية تنتهي بإصدارات إشعاعية مختلفة موضحة في الشكل 3.1، (1) طور الانهيار ويبدأ عند وصول الطاقة المخزنة في بنك المكثفات إلى المصعد وينتهي عند حدوث التشكيل الأولي لغمد تيار البلازما عند النهاية المغلقة لمجموعة الإلكتروودات، (2) طور التسريع المحوري ويبدأ عند دفع غمد تيار البلازما محورياً للأعلى على طول المصعد وينتهي عند وصول غمد التيار إلى النهاية المفتوحة



يُعد طور الانهيار الطور الأولي الذي يضع الأساس لتطوير بنية البلازما التي يتدفق من خلالها تيار تفريغ بنك المكثفات (موضح في الشكل 3.1). يبدأ طور الانهيار عندما تصل الطاقة المخزنة في بنك المكثفات إلى المصعد عندها سوف يبدأ انفرغ كهربائي منزلق متماثل (انفرغ متدرج يبدأ من قمة العازل وينزلق باتجاه نهايته)، يسبق هذا الانفرغ انهيار كهربائي للغاز يحدث على طول العازل الذي يفصل بين مجموعة الإلكترويدات وذلك بعد زمن قدره 10 ns [39]. فيما بعد تتسارع الإلكترونات الناتجة من الغاز المحيط باتجاه المصعد بفعل الحقل الكهربائي المتولد وإثناء حركتها تصطدم بذرات الغاز المعتدلة مسببة تأين إضافي، يستمر هذا التأين حتى يصل الانفرغ المنزلق إلى

نهاية العازل ويربط بين المهبط والمصعد، ومع تطور عملية الانفراغ تتشكل خطوط تيار فردية منفصلة متعددة ذات ناقلية عالية، تتطور هذه الخطوط لتشكل غمد تيار البلازما كما هو موضح في الشكل 4.1. نلاحظ من الشكل حدوث نوعين من الانفراغ، الأول انفراغ منزلق على طول العازل والآخر انفراغ خيطي قطري يحدث عند قمة العازل (هذا النوع من الانفراغ يؤثر في النهاية على مردود الإصدار) [40]. تعمل قوة لورنتز القطرية على دفع غمد تيار البلازما من المصعد باتجاه الخارج نحو المهبط مع المحافظة على الاتصال الكهربائي بينهم، كما يرتفع غمد التيار بطريقة عكسية نتيجة لقوة لورنتز المحورية ويشير هذا إلى نهاية طور الانهيار وسيتبعها طور التسريع المحوري [22]. يستغرق تشكل الغمد حوالي 100 - 300 ns ويأخذ في النهاية شكل قطع مكافئ مفتوح إلى الأسفل متجانس ومتماثل محورياً [40]. يعتمد انفراغ التيار الأولي بشكل كبير على ضغط ونوع غاز التشغيل المستخدم [40] والبارامترات الهندسية لمجموعة الإلكترونيات [9] وطول ونوع الطبقة العازلة [41].



الشكل 4.1: تشكل خطوط التيار الفردية نتيجة الانفراغ المنزلق (المتدرج) في طور الانهيار [40].

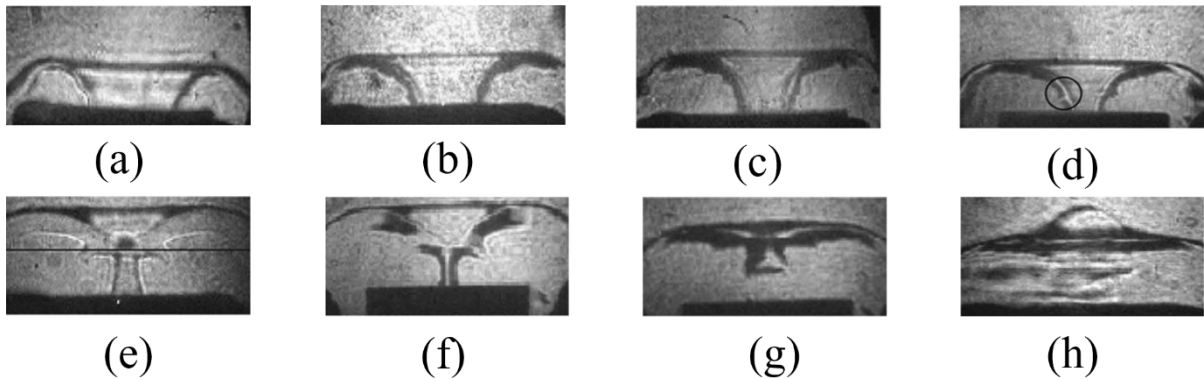
2.5.2.1. طور التسريع المحوري (The Axial Acceleration Phase):

يُعد طور التسريع المحوري الطور الأساسي لتشكيل تضييق ساخن وكثيف وقُعال (موضح في الشكل 3.1). بعد اكتمال تشكل غمد تيار البلازما، يتم تسريع الغمد محورياً باتجاه الأعلى نحو النهاية المفتوحة للجهاز بفعل قوة لورنتز المحورية $\vec{J} \times \vec{B}$ الناتجة عن تفاعل التيار العالي مع الحقل المغناطيسي المتولد ذاتياً [29]. يتحرك الغمد بسرعة تفوق سرعة الصوت وذلك بسبب تيارات التفريغ العالية (في نطاق kA و MA) وضغوط التشغيل المنخفضة. بسبب التصادمات المرنة والمسارات الحرة الوسطية الصغيرة لتبادل الشحنة بين الأيونات والذرات فإن الغمد المتحرك يُولد موجة صدم ديناميكية غازية تعمل على ضغط وتسخين الغاز المعتدل الموجود في مقدمته، وبالتالي سيكون لغمد التيار بنية معقدة تتكون من طبقة غاز معتدلة إلى حد كبير مضغوطة وساخنة تليها طبقة مؤينة وتعتبر هذه طبقة انتقالية حيث يتم تحويل الذرات المعتدلة إلى بلازما ومنطقة بلازما مؤينة بالكامل والتي تحمل الجزء الأكبر من التيار عند الحافة الخلفية للغمد يليها منطقة حقل مغناطيسي مفرغ تقريباً مع كثافة بلازما منخفضة جداً تعمل على حصر البلازما والحفاظ على شكل الغمد [38]. في النهاية يأخذ الغمد شكل المظلة المنحنية وذلك لأن قوة لورنتز المحورية تتناسب مع $\frac{1}{r^2}$ وبالتالي تكون القوة أكبر عند سطح المصعد مقارنة بالقوة عند سطح المهبط وعندها تكون سرعة الغمد عند المصعد أعلى من سرعته عند المهبط ويتم سحب مركز الغمد للأمام بينما تتأخر المناطق الخارجية للغمد [10]. يستغرق الطور المحوري عادةً حوالي 4 - 1 μs مع سرعة محورية مُقاسة تتراوح بين [42] 15 - 1.7 cm/ μs . للطور المحوري دوراً مهماً في تشكيل تضييق ساخن وكثيف ولتحقيق ذلك هناك شرطين، أولاً يجب أن ينتهي الطور المحوري عندما يصل تيار تفريغ بنك المكثفات إلى ذروته ذلك سيضمن نقل الطاقة بكفاءة عالية من بنك المكثفات إلى غمد تيار البلازما وبالتالي يصبح تيار البلازما أعظمي. ثانياً يجب أن يتمتع هيكل غمد التيار بخصائص معينة لتحقيق تمحرق بكفاءة جيدة بحيث يكون له تماثل محوري (r, z) وذلك لضمان انضغاط البلازما قطرياً بشكل متساوٍ من جميع الجوانب [9]. في نهاية الطور المحوري يلتف الطرف الداخلي لغمد التيار (الطرف القريب من المصعد) حول نهاية المصعد ليتم فيما بعد ضغطه قطرياً باتجاه محور المصعد، بينما يستمر الطرف الخارجي (الطرف القريب من المهبط) لغمد التيار بالاندفاع محورياً للأعلى جارفاً معه الجزء الأكبر من

البلازما المتراكمة، وفي النهاية سيشارك في التضيق النهائي فقط الجزء المتراكم من البلازما عند الطرف الداخلي للغمد [22].

3.5.2.1. طور الانضغاط القطري (The Radial-Compression Phase):

يلعب طور الانضغاط القطري دوراً مهماً للغاية في تطور البلازما المحرقة يتم في هذا الطور ضغط وتكوين عمود بلازما متضيق حار وكثيف وغني بالإصدارات الإشعاعية [9]. بعد أن يصل غمد تيار البلازما إلى النهاية المفتوحة للجهاز، يتجمع الطرف الداخلي للغمد حول قمة المصعد ويتم ضغطه قطرياً باتجاه محور المصعد بفعل قوة لورنتز القطرية، يُرافق هذا الضغط القطري استطالة محورية للغمد باتجاه الأعلى ليتشكل فيما بعد عمود بلازما متضيق يستغرق تشكله حوالي 200 - 50 ns [10]، تم توضيح مراحل انضغاط عمود البلازما في الشكل 5.1. يتم تقسيم طور الانضغاط القطري إلى أربع مراحل فرعية: (1) مرحلة الانضغاط (مرحلة الصدم القطري الوارد)، (2) مرحلة السكون (مرحلة الصدم القطري المنعكس)، (3) مرحلة عدم الاستقرار (مرحلة الانضغاط البطيء)، (4) مرحلة الاضمحلال [22].

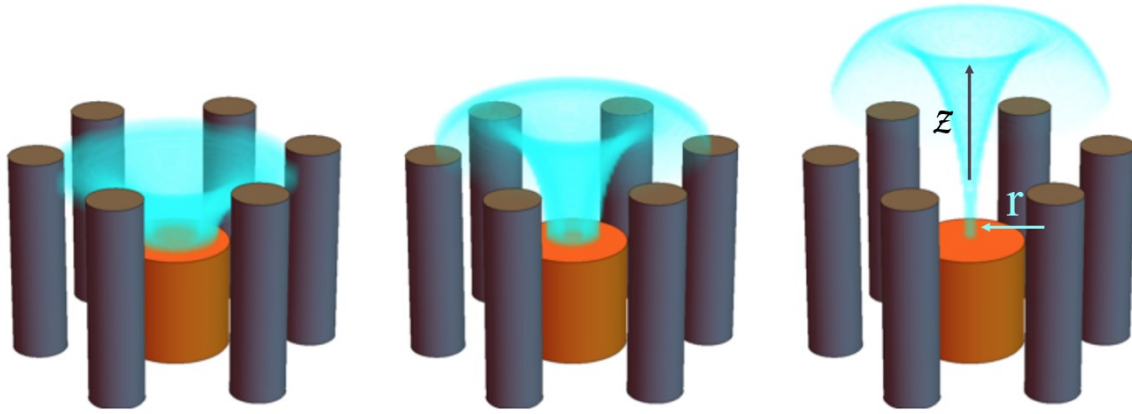


الشكل 5.1: صورة زمنية تُوضح مراحل طور الانضغاط القطري النموذجية: من (a) وحتى (e) مراحل الطور القطري قبل حدوث التضيق، (f) لحظة حدوث التضيق، (g) اضمحلال عمود البلازما، (h) تشكل فقاعة البلازما [43].

I. مرحلة الانضغاط (The Compression Phase):

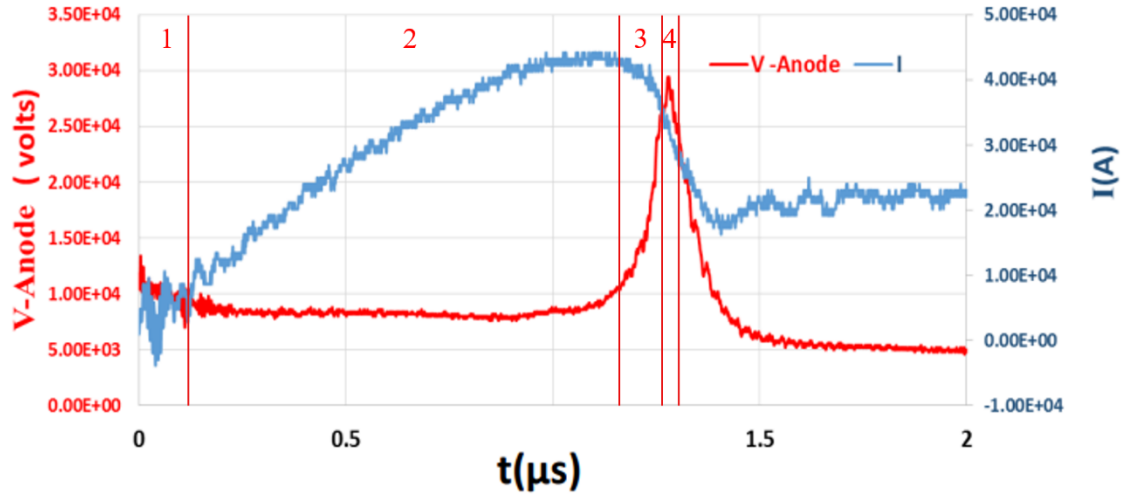
تبدأ هذه المرحلة عندما يتجمع الغمد حول قمة المصعد ويتحرك قطرياً باتجاه الداخل نحو محور المصعد بشكل موحد في جميع الاتجاهات، يرافق حركة الغمد القطرية استطالة محورية z للغمد ليشكل في النهاية عمود بلازما

مع مظهر جانبي على شكل قمع (كما يوضح الشكل 6.1) [10]. إن آلية التسخين الرئيسية داخل البلازما، قبل استطالة غمد التيار محورياً، هي التسخين بالصدمة، وهو تسخين ناتج عن موجة الصدمة المتشكلة في المرحلة المحورية والتي تسبق غمد التيار، ولهذا السبب تكون الإلكترونات التي درجة حرارتها حوالي 100 eV باردة مقارنة بالأيونات التي تبلغ درجة حرارتها حوالي 300 eV [44] (تنتقل الطاقة بشكل أساسي إلى الأيونات بسبب كتلتها الأكبر مقارنة بكتلة الإلكترون وقد يحدث تسخين شاذ للإلكترون أيضاً [45]).



الشكل 6.1: تمثيلاً تخطيطياً لعملية الانضغاط القطري r والاستطالة المحورية z لغمد البلازما [46].

بعد تحويل بنية البلازما إلى عمود بلازما، يصبح تسخين جول هو آلية التسخين الرئيسية، وهو تسخين ناتج عن المقاومة الكهربائية للبلازما التي تبدد الطاقة على شكل حرارة [47]، عندها سيتم زيادة ضغط عمود البلازما بشكل كظومي [44]، ونتيجة لهذا يبدأ الحقل المغناطيسي بالانتشار بسرعة كبيرة في عمود البلازما مما يؤدي إلى زيادة كبيرة غير طبيعية في مقاومة البلازما (مقاومة شاذة ناتجة عن تصادمات الإلكترونات مع الحقل المغناطيسي والتي تلعب دور مهم في تسخين البلازما) وزيادة في تحريضية الجملة وبالتالي يصبح هناك زيادة كبيرة في المعاوقة [45] وهذا يؤدي إلى ارتفاع كبير في الجهد وانخفاض في التيار (كما هو موضح في الشكل 7.1) [12]، حيث تعتبر هذه الأحداث السمة الأساسية لأجهزة البلازما المحرقة الكثيفة. حيث تبلغ درجة حرارة الإلكترون النهائية حوالي 1 - 2 keV [38]. تنتهي هذه المرحلة عندما يصل عمود البلازما المضغوط قطرياً باتجاه الداخل إلى محور المصعد تعتبر هذه المرحلة مرحلة مستقرة تحافظ فيها البلازما على بنيتها (قبل تعرض العمود للاضطراب وحالات عدم الاستقرار) [48].

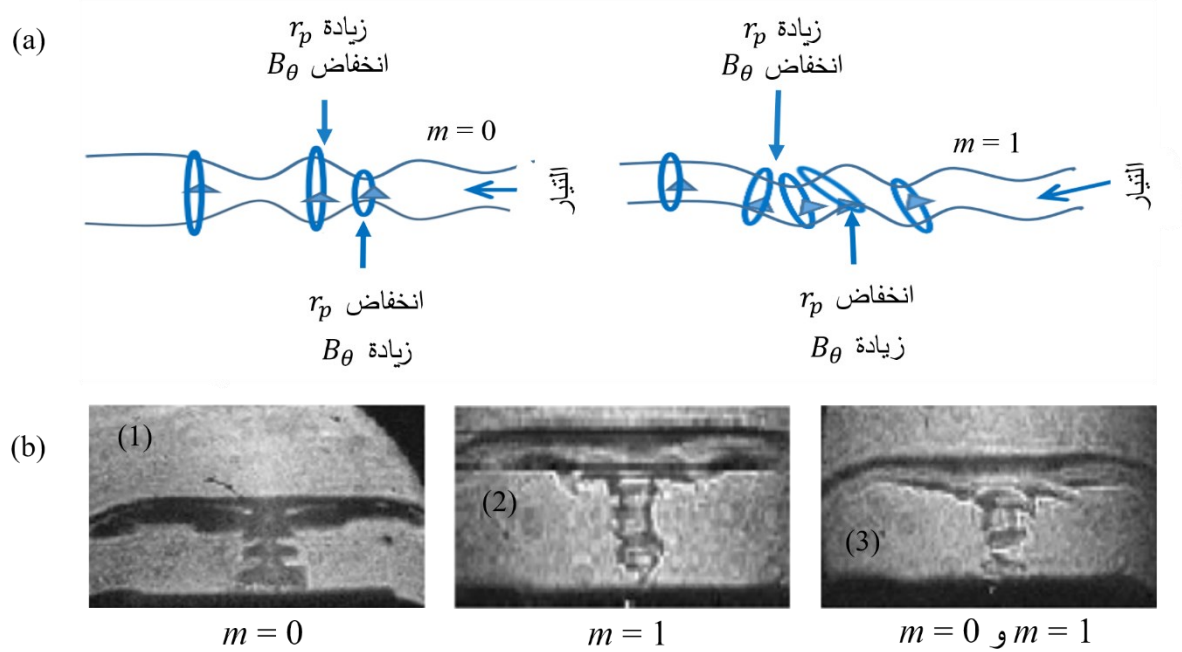


الشكل 7.1: يوضح المنحنيات النموذجية لتيار تفريغ بنك المكثفات وجهد الأنود في أجهزة البلازما المحرقة الكثيفة: 1- طور الانهيار، 2- طور التسريع المحوري، 3- طور الانضغاط القطري 4- حدوث التضيق حيث يشير انخفاض التيار وذروة الجهد إلى حدوث إصدار إشعاعي [35].

II. المرحلة شبه السكونية (The Quiescent Phase):

بعد أن يصل عمود البلازما المضغوط إلى محور المصعد يبدأ في التوسع قطرياً باتجاه الخارج ومحورياً باتجاه الأعلى، يتم إعاقة التوسع القطري بسبب الضغط المغناطيسي المطبق على عمود البلازما بينما التوسع المحوري (استطالة العمود) لا يتوقف وهذا يؤدي إلى تغيرات مفاجئة بالسرعة وبالتالي تشكيل موجة صدم محورية [12]. يؤدي التغير في تحريضية البلازما الذي بدأ أثناء مرحلة الانضغاط إلى توليد حقل كهربائي في عمود البلازما يعمل هذا الحقل على تسريع الإلكترونات باتجاه المصعد وتسريع الأيونات في الاتجاه المعاكس نحو المناطق الخارجية، وبما أن الإلكترونات تتحرك بسرعة أكبر نظراً لصغر كتلتها مقارنة بكتلة الأيونات، فإن سرعة الانحراف النسبية بين الإلكترونات والأيونات تزداد وتقترب من السرعة الحرارية المتزايدة للإلكترون، وفي هذه الحالة تبدأ حالات عدم الاستقرار الجزئي مثل سيكلوترون-إلكترون [49] وأشكال أخرى من عدم استقرار حزمة-بلازما وعدم استقرار رايلي-تايلور [38]. في نهاية المرحلة الساكنة تتطور حالات عدم الاستقرار المغناطيسي-الهيدروديناميكي من النوع $m = 0$ (وهو اضطراب متماثل حول محور البلازما يسبب انضغاط وتمدد نصف قطر عمود البلازما قطرياً دون انحراف جانبي لمحور البلازما) و $m = 1$ (وهو اضطراب غير متماثل محورياً يسبب انزياح جانبي لمحور البلازما) بسبب زيادة درجة حرارة الإلكترون الناتجة عن تغيرات في التيارات والحقول الكهرومغناطيسية [50].

تسبب حالات عدم الاستقرار من النوع $m = 0$ ضغط إضافي لعمود البلازما موضعياً بحيث يصبح في عمود البلازما مناطق متموضعة ذات كثافة ودرجة حرارة أعلى من مناطق أخرى تسمى البقع الساخنة [9]. يوضح الشكل 8.1 حالات عدم الاستقرار من نوع $m = 0, m = 1$ [35].



الشكل 8.1: (a) تمثيلاً تخطيطياً لحالات عدم الاستقرار $m = 0$ و $m = 1$ [35]، (b) صور ظليلية تظهر تشكل حالات عدم الاستقرار في عمود البلازما المتضيق (1) عدم استقرار $m = 0$ ، (2) عدم استقرار $m = 1$ ، (3) مزيجاً من عدم الاستقرار $m = 0$ و $m = 1$ يحدثان في وقت واحد [43]، r_p يمثل نصف قطر عمود البلازما و B_θ شدة الحقل المغناطيسي الذي يعمل على ضغط عمود البلازما.

III. المرحلة غير المستقرة (The Unstable Phase):

بسبب عدم الاستقرار من النوع $m = 0$ يتم تعزيز الحقل الكهربائي المتولد ذاتياً والذي يعمل على تسريع الإلكترونات والأيونات باتجاهين متعاكسين، ونتيجة لذلك تزداد التصادمات بين الجسيمات وهذا يؤدي إلى زيادة الكثافة في عمود البلازما مرة أخرى حتى يصل إلى 10^{19} cm^{-3} [12]، أيضاً تزداد الكثافة بسبب اصطدام الإلكترونات بسطح المصعد مما يسبب زيادة في إشعاع الكبح حيث يتم حقن كمية كبيرة إلى حد ما من الشوائب (ذرات أو أيونات معدنية من مادة المصعد والتي تتأين في البلازما) في عمود البلازما [32]. تؤدي حالات عدم الاستقرار الجزئي وإشعاع الكبح إلى تسخين البلازما لتصل درجة حرارة الإلكترون في النهاية حتى $4 - 5 \text{ keV}$ [51]. هذه المرحلة

مسؤولة عن تطور الظواهر الإشعاعية مثل إصدار الأشعة السينية اللينة والقاسية، والجسيمات المشحونة السريعة (إلكترونات وأيونات)، ونبضات كثيفة من النيوترونات [29].

IV. مرحلة الاضمحلال (The Decay Phase):

المرحلة الأخيرة من مراحل الطور القطري وأيضاً المرحلة الأخيرة من حركية البلازما المحرقة هي مرحلة الاضمحلال. حيث يبدأ حدوث انفجارات على طول عمود البلازما بشكل متسلسل، وتستمر هذه الانفجارات حتى يضمحل العمود بالكامل وتخفض كثافة البلازما إلى أقل من $2 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ [9, 10]. أثناء هذه المرحلة تتشكل فقاعة بلازما كبيرة ساخنة ورقيقة يتم توضيحها بدقة أكبر في الشكل 5.1(h). تستمر الإصدارات التي بدأت في المرحلة غير المستقرة حتى مرحلة الاضمحلال حيث تصدر فقاعة البلازما كمية كبيرة من إشعاع الكبح، وبالتالي يرتفع إصدار الأشعة السينية القاسية أثناء اضمحلال عمود البلازما المتضيق وتصل نبضة النيوترون إلى ذروتها [32].

6.2.1. القيم النموذجية لبارامترات البلازما المحرقة الكثيفة

(The Typical Values of Parameters for DPF):

تتميز البلازما المحرقة الكثيفة بأنها تمتلك صفات مميزة مشتركة وقيم نموذجية للبارامترات الرئيسية المتعلقة بحركية غمد التيار وعمود البلازما المتضيق [29]. من أهم هذه القيم النموذجية:

1. الزمن المطلوب لانهايار غاز التشغيل وتشكل غمد التيار في بداية نبضة التفريغ يتراوح تقريباً من خمس إلى سدس زمن دور التفريغ [29].
2. تتراوح سرعة غمد التيار في طور التسريع المحوري بين $10 \text{ cm}/\mu\text{s}$ - $2 \text{ cm}/\mu\text{s}$ [52] مما يؤدي إلى ارتفاع درجة حرارة الأيونات إلى ما يقارب 300 eV والإلكترونات إلى ما يقارب 100 eV وذلك عند وصول غمد التيار إلى نهاية المصعد [53].
3. سرعة غمد التيار في طور الانضغاط القطري أكبر من سرعته في طور التسريع المحوري بمقدار 2.5 - 2 مرة ويصل إلى $25 \text{ cm}/\mu\text{s}$ [52].

4. تبلغ قيمة نصف قطر عمود البلازما المتضيق في طور الانضغاط القطري تقريباً عُشر قيمة نصف قطر المصعد [54].
5. طول عمود البلازما المتضيق بالنسبة لأجهزة البلازما المحرقة التي تحوي مصعد مصمت يكون مساوياً تقريباً لنصف قطر المصعد، أما الأجهزة التي تحوي مصعد مجوف يكون طول عمود البلازما المتضيق ضعف نصف قطر المصعد حيث يكون نصف عمود البلازما داخل المصعد والنصف الآخر فوقه [54].
6. تتراوح قيمة كثافة الطاقة والتي تعطى بالعلاقة $\frac{E}{V_p}$ (حيث E طاقة بنك المكثفات و V_p حجم عمود البلازما المتضيق) من أجل الأجهزة التي طاقتها من 50 J حتى MJ ضمن المجال $(1-10) \times 10^{10} \text{ J/m}^3$ [55].
7. تقع كثافة الإلكترونات والأيونات ضمن عمود البلازما المتضيق ضمن المجال $5 \times 10^{(24-26)} \text{ m}^{-3}$ [56].
8. قيمة درجة حرارة الإلكترونات والأيونات داخل عمود البلازما المتضيق تتراوح بين 200 eV - 2 keV بالنسبة للأيونات [47] و 200 eV - 1.5 keV بالنسبة للإلكترونات [56].
9. تتراوح قيمة طاقة الإلكترونات المتسارعة التي تتحرك نحو المصعد بين 10 - 100 keV [57]. بينما تتراوح طاقة الأيونات المتسارعة محورياً باتجاه الأعلى مبتعدة عن سطح المصعد في نطاق keV إلى MeV [58] حيث تصدر معظم الأيونات ضمن زاوية مقدارها 20° بالنسبة لمحور المصعد.

7.2.1. إصدارات البلازما المحرقة الكثيفة (Dense Plasma Focus Radiation):

يتميز عمود البلازما المتضيق بقدرته على إنتاج أنواع مختلفة من الإصدارات الإشعاعية والجسيمات المشحونة. يعتمد نوع الإصدار على تصميم الجهاز من حيث شكل وأبعاد ومادة الإلكترونات والعازل، بارامترات التشغيل من حيث جهد التشغيل وسعة بنك المكثفات وضغط ونوع غاز التشغيل، كما يعتمد على درجة حرارة وكثافة البلازما. من أهم الإصدارات الناتجة عن البلازما المحرقة [59]:

1.7.2.1. الحزم الإلكترونية السريعة (Fast Electrons Beam):

يتم إنتاج الحزم الإلكترونية السريعة نتيجة الحقول الكهربائية العالية المتولدة ذاتياً ضمن عمود البلازما المتضيق والتي تعمل على تسريع الإلكترونات مما يكسبها طاقات عالية [60]. تتميز الحزم الإلكترونية بإمكانية توليد تيارات عالية للغاية في مدة زمنية قصيرة وذلك لأن جميع ذرات الغاز تتأين بالكامل تقريباً أي كثافة عالية، وأيضاً نتيجة تقليل التناثر بين الإلكترونات حيث تساعد بنية البلازما على فصل الإلكترونات عن بعضها بسبب وجود الأيونات حول الإلكترونات [59].

2.7.2.1. الحزم الأيونية السريعة (Fast Ions Beam):

يتم إنتاج الحزم الأيونية السريعة [31] بنفس طريقة توليد الحزم الإلكترونية السريعة نتيجة الحقول الكهربائية المتولدة ذاتياً في البلازما، ولكن الأيونات تكون أبطأ بسبب كتلتها الأكبر وهذا يعني أن الأيونات ستستغرق وقتاً أطول للوصول إلى طاقات عالية، وبالتالي يجب أن تكون الحقول الكهربائية إما أعلى بكثير أو أن تستمر لأكثر من 10 ns حتى تصل طاقة الأيونات إلى 100 keV على طول عمود البلازما. يمكن أيضاً إنتاج الأيونات السريعة من خلال التفاعلات النووية التي تحدث داخل جهاز البلازما المحرقة خاصة إذا تم تشغيله بغاز الديوتيريوم [59].

3.7.2.1. الحزم النeutronية (Neutron Beams):

يتم إنتاج النيوترونات [30] عندما يتم استخدام غاز مناسب. عادةً ما يستخدم الديوتيريوم لإنتاج نيوترونات أحادية الطاقة تبلغ طاقتها 2.5 MeV. كما يمكن الحصول على النيوترونات باستخدام غازات أخرى مثل الهيدروجين مع هدف الليثيوم أو مزيج الديوتيريوم والتريتيوم (D-T) الذي يؤدي إلى إنتاج نيوترونات أكثر بمئة مرة وبطاقة 13 MeV [59].

4.7.2.1. الأشعة السينية القاسية (Hard X-ray, HXR):

يتم إنتاج الأشعة السينية القاسية وهي أشعة سينية غير حرارية نتيجة قصف المصدر بالإلكترونات المتسارعة حيث تتراوح طاقة فوتوناتها بين 0.1 - 10 MeV. يتم إنتاجها قبل النيوترونات مباشرة ويمكن استخدامها في تطبيقات الأشعة السينية المزدوجة والتصوير الشعاعي النيوتروني.

5.7.2.1. الأشعة السينية اللينة (Soft X-ray, SXR):

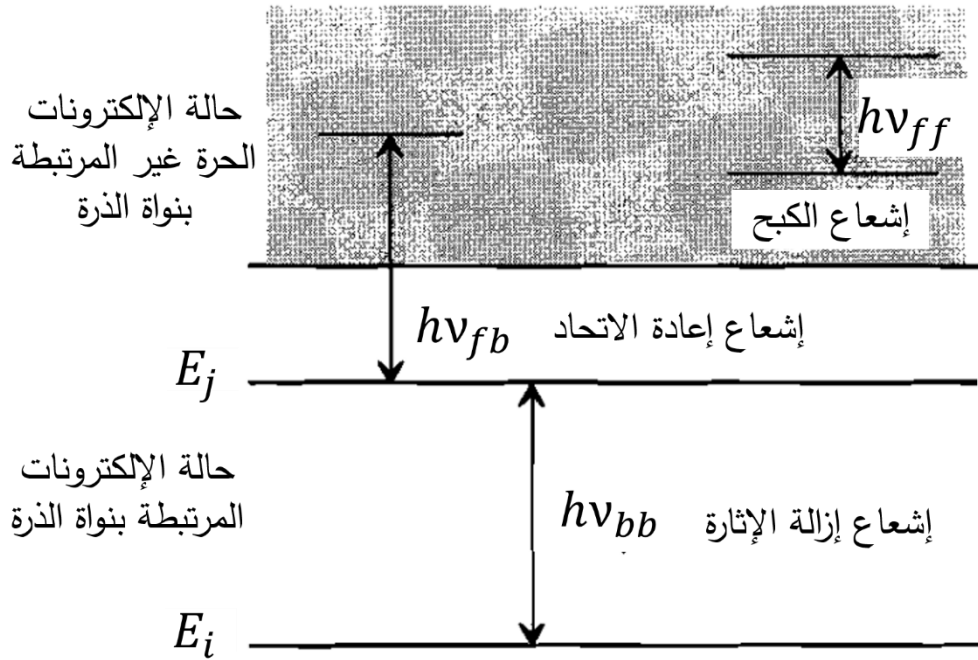
تصدر الأشعة السينية اللينة وهي أشعة سينية حرارية من منطقة التضييق بشكل متناظر وفي جميع الاتجاهات تقريباً وبطاقة فوتون تتراوح بين 1 - 10 keV. حيث تتولد الأشعة السينية اللينة بسبب التفاعل بين الإلكترونات الحرة والأيونات أو الذرات، العمليات الرئيسية لإنتاج الأشعة السينية اللينة بكفاءة هي إشعاع إزالة الإثارة وإشعاع إعادة الاتحاد وإشعاع الكبح وتحدث داخل منطقة البلازما الكثيفة حيث تتوافق طاقة الفوتون المنطلق مع طيف إصدار الأشعة السينية اللينة [10]. تعتبر البلازما المحرقة الكثيفة مصدر مناسب للأشعة السينية اللينة وذلك بسبب تتطابق درجة حرارة البلازما بشكل جيد مع مجال طاقة الأشعة السينية اللينة مما يزيد من كفاءة الإنتاج. بما أن الإلكترونات الموجودة داخل البلازما تفقد وتكتسب الطاقة باستمرار من خلال التصادمات مع الذرات مما يؤدي إلى ارتفاع احتمال إصدار الأشعة السينية اللينة وهذا يعني أن كفاءة تحويل طاقة البلازما إلى أشعة سينية لينة يمكن أن تقترب من 100%. تبلغ الكفاءة الإجمالية لتحويل الطاقة الكهربائية إلى بلازما في جهاز البلازما المحرقة النموذجي حوالي 5% لجهاز 3 kJ وبالنسبة للأجهزة الأكبر حجماً ذات الطاقة الأعلى يمكن أن تكون الكفاءة أعلى قليلاً. تعمل الهندسة الأسطوانية لعمود البلازما المتضييق أيضاً على تعزيز خصائص إصدار الأشعة السينية وذلك عند عرضها من منظور النهاية على طول محور الجهاز حيث تظهر منطقة التضييق كمصدر دائري صغير ذو درجة حرارة وكثافة عاليتين، يُعد حجم المصدر الصغير هذا مفيداً للتطبيقات التي تتطلب حزم أشعة سينية عالية الكثافة مثل التصوير أو الطباعة الحجرية [59]. سيتم تقديم شرح مفصل عن إصدار الأشعة السينية اللينة من البلازما المحرقة وهي موضوع هذا البحث في الفقرة 3.1.

3.1. الأشعة السينية اللينة من البلازما المحرقة الكثيفة (SXR from DPF):

نظراً لأهمية الأشعة السينية اللينة في التطبيقات التكنولوجية المختلفة، عمل الباحثون على إجراء دراسات مكثفة تهدف إلى فهم آليات وشروط توليد الأشعة السينية اللينة من البلازما المحرقة الكثيفة. كما تم إجراء المزيد من الأبحاث بهدف إيجاد طرقاً لتحسين مردود الأشعة السينية اللينة الصادرة من هذه الأجهزة.

1.3.1. إصدار الأشعة السينية اللينة من البلازما (SXR Emission from Plasma):

تُصدر البلازما نوعين من أطياف الأشعة السينية اللينة، (1) طيف الإصدار المستمر ويغطي مجال واسع من الأطوال الموجية بطاقات مختلفة وينتج عن عمليات كبح الإلكترونات (انتقال حر - حر) وإعادة الاتحاد بين الإلكترونات والأيونات (انتقال حر - مقيد)، (2) طيف الإصدار الخطي المميز الناتج عن عملية إزالة الإثارة للإلكترونات التي تم إثارتها سابقاً (انتقال مقيد - مقيد) ويعطي خطوط طيفية منفصلة عند طاقات محددة [35]، يوضح الشكل 9.1 عمليات الإصدار الثلاثة.



الشكل 9.1: عمليات إصدار الأشعة السينية من البلازما [9].

1.1.3.1. انتقال حر - حر (Free - Free Transition):

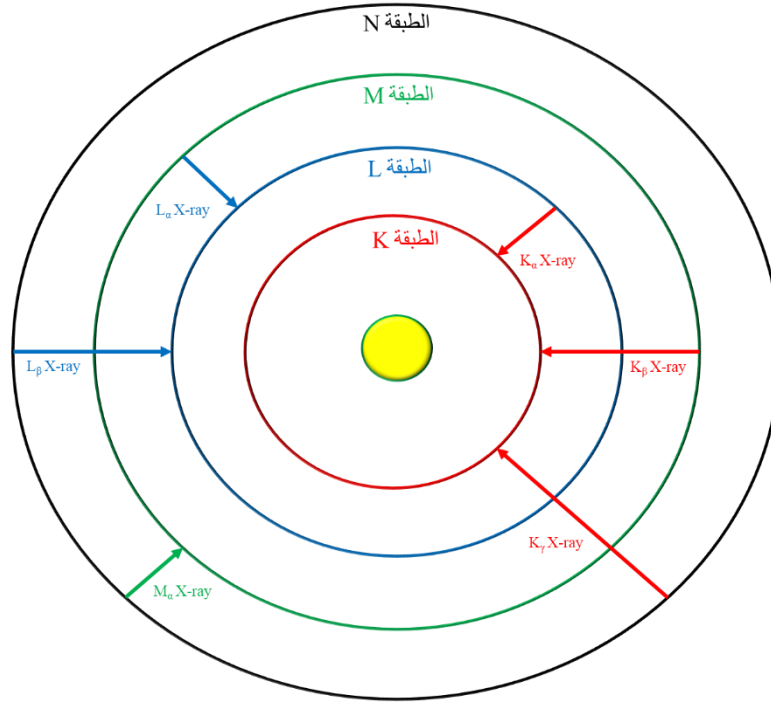
تحدث هذه العملية عندما يصطدم إلكترون حر بجسيم آخر فإنه يتباطأ ويفقد جزء من طاقته وينتقل إلى سوية حرة ذات طاقة أقل، ويتم إصدار الطاقة الزائدة على شكل فوتون أشعة سينية $h\nu_{ff}$ مع طيف إصدار مستمر ويسمى أيضاً بإشعاع الكبح [38].

2.1.3.1. انتقال حر - مقيد (Free - Bound Transition):

تحدث هذه العملية عندما يتم أسر إلكترون حر في سوية مقيدة لأيون، عندها يتم إصدار الطاقة على شكل فوتون أشعة سينية $h\nu_{fb}$ مع طيف إصدار مستمر ويسمى أيضاً بإشعاع إعادة الإتحاد. يُنافس عملية إشعاع إعادة الإتحاد عملية إعادة الإتحاد ثلاثي الأجسام وتحدث عندما يصطدم إلكترونين حرين في وقت واحد بأيون فيتم أسر أحدهما والآخر يمتص الطاقة الزائدة بدل من إصدار فوتون أشعة سينية، هذه العملية تصبح أكثر احتمالية عند الكثافات الأعلى [10].

3.1.3.1. انتقال مقيد - مقيد (Bound - Bound Transition):

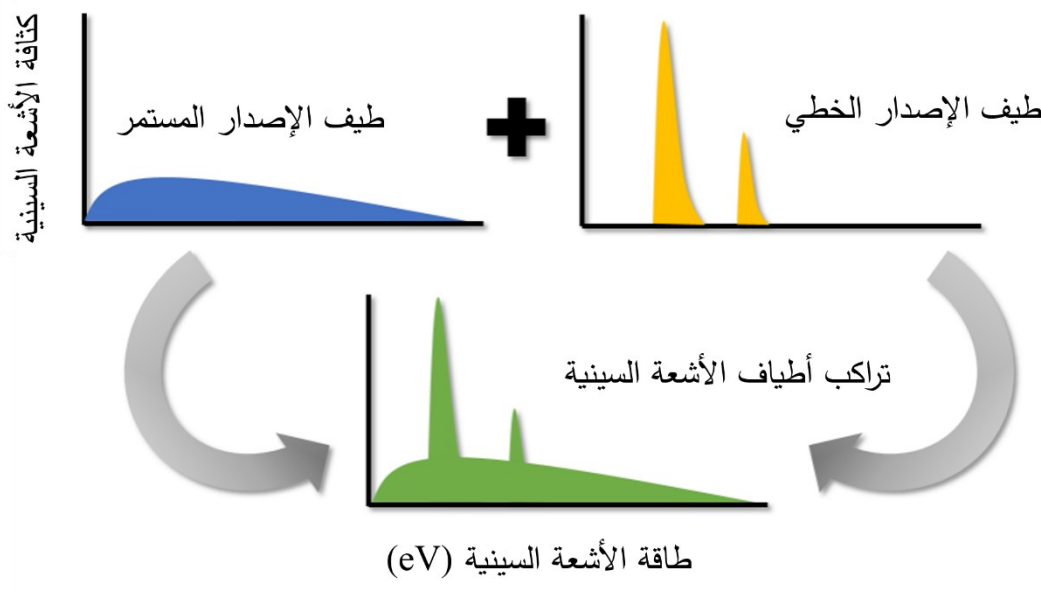
تحدث هذه العملية عندما ينتقل إلكترون مقيد في أيون إلى سوية مقيدة أخرى ذات طاقة أقل، وذلك بعد إثارة هذا الإلكترون إلى سوية طاقة أعلى إما عن طريق امتصاص الفوتونات أو عن طريق الاصطدامات مع جسيمات أخرى وخاصة الإلكترونات، في الحالة الثانية تقذف الإلكترونات المتسارعة وتطرد الإلكترونات من السويات الداخلية للذرة، بعد ذلك يتم ملء هذه الشواغر على الفور بواسطة الإلكترونات المنقولة من السوية الطاقة الأعلى إلى السوية الطاقة الأقل لأيون مما يؤدي إلى فقدان طاقتها، حيث يتم إصدار الطاقة الزائدة على شكل فوتون أشعة سينية ذو طاقة محددة جيداً $h\nu_{bb}$ مع طيف إصدار خطي ويسمى أيضاً بالخط المميز للأشعة السينية. يوضح الشكل 10.1 آلية إصدار الأشعة السينية ذي الخط الطيفي المميز الناتجة عن انتقال الإلكترون من الطبقة L إلى الطبقة K والتي تسمى " K_α X-ray"، والناتجة عن انتقال الإلكترون من الطبقة M إلى الطبقة K والتي تسمى " K_β X-ray" [38].



الشكل 10.1: تمثيلاً تخطيطياً لآلية إصدار الأشعة السينية ذي الخط الطيفي المميز [38].

قد يتفاعل الفوتون الصادر مع جسيمات أخرى في البلازما عن طريق امتصاصه مما يؤدي إلى تشوه في شكل الخط. عند درجات الحرارة العالية جداً تتأين المادة بشكل كامل بحيث لا يحدث إشعاع مقيد - مقيد بعد ذلك [9].

تعتمد القوة النسبية للإصدارات المستمرة والخطية على كيفية تشكل البلازما، فعادةً ما يهيمن الإصدار المستمر على البلازما المتشكلة من مادة ذات عدد ذري مرتفع، بينما يمكن أن تكون الإصدارات الخطية أقوى بالنسبة للمواد ذات العدد الذري المتوسط والمنخفض. كما يعتمد حساب الطاقة الصادرة من هذه العمليات على حالة البلازما [35]. يوضح الشكل 11.1 تراكب كل من طيف الإصدار المستمر والخطي للأشعة السينية.



الشكل 11.1: تمثيلاً تخطيطياً لتراكب طيف الإصدار المستمر والخطي للأشعة السينية [35].

2.3.1. إصدار الأشعة السينية اللينة من البلازما المحرقة الكثيفة (SXR Emission from DPF):

إن البلازما المحرقة ذات درجات الحرارة من بضعة مئات من eV إلى بضعة keV وكثافة إلكترون تبلغ 10^{25} m^{-3} هي مصدر وفير للأشعة السينية. وهي تُصدر نوعين من أطيف الأشعة السينية، الطيف المستمر والذي يصل إلى ذروته عند الطول موجي $\lambda = \frac{6200}{T_e} \text{ A}^\circ$ وبالتالي بالنسبة للبلازما ذات درجة حرارة 1 keV تحدث ذروة الإصدار عند الطول موجي 6.2 A° وهي تقع في منطقة الأشعة السينية اللينة [22]. أيضاً بالنسبة لبلازما النيون المؤينة بالكامل تقريباً عند درجة حرارة عالية مناسبة يقع الإصدار الخطي في منطقة الأشعة السينية اللينة حيث يكون لإشعاع الخط K_α طول موجي 12.132 A° [32]. يغطي طيف إصدار الأشعة السينية اللينة من البلازما المحرقة مجالاً 10 keV – 1 في زمن يتراوح من بضعة ns إلى بضعة مئات من ns [9]. يقع مصدر الأشعة السينية اللينة عند الطرف المفتوح للجهاز وعلى محور المصعد بالقرب من وجهه، له شكل أسطواني تقريباً بأبعاد يتراوح قطرها من أقل من 1 mm إلى أكثر من 10 mm وطول محوري من بضعة mm إلى بضعة cm، ترتبط هذه الأبعاد بنصف قطر المصعد [61]. تكشف صور الأشعة السينية اللينة عن بنية دقيقة تحوي نقاط صغيرة مشعة بشدة تسمى البقع الساخنة [1] ذات أبعاد نموذجية تبلغ حوالي 50 - 100 μm وتحدث في غضون 5 ns من الضغط الأول (تشكيل التضييق) خلال فترة مرحلة الانضغاط المستقر [48]. تم التوصل إلى أن كلاً من

الإصدار الخطي والمستمر في المجال الطيفي 3 – 4 keV يصدران بشكل أساسي من هذه النقاط الساخنة [48].
يمتد إصدار الأشعة السينية اللينة على فترة زمنية تبلغ حوالي 60 - 70 ns [9].

تعتمد خصائص إصدار الأشعة السينية اللينة بشكل كبير على نظام التشغيل والبارامترات الخاصة بجهاز البلازما المحرقة الكثيفة على سبيل المثال يمتلك نوع غاز التشغيل وضغط التعبئة التأثير الأقوى على الإصدار والطاقة المخزنة في بنك المكثفات وتيار التفريغ والمادة التي تصنع منها الإلكتروودات وشكلها وأبعادها وأيضاً درجة حرارة وكثافة البلازما وعمر عمود البلازما المتضيق [62].

يُعد استخدام أجهزة البلازما المحرقة كمصدر للأشعة السينية اللينة مهم في العديد من التطبيقات مثل الطباعة الحجرية الدقيقة والمجهر بالأشعة السينية، بالإضافة إلى أن الأشعة السينية اللينة الصادرة توفر وسيلة ملائمة لدراسة خصائص البلازما المحرقة [32].

4.1. ميزات وتطبيقات الأشعة السينية اللينة من أجهزة البلازما المحرقة الكثيفة

(Features and Applications of SXR from DPF Devices):

تتميز أجهزة البلازما المحرقة الكثيفة بخصائص تسمح باستخدامها في تطبيقات متنوعة عندما يتم اعتمادها كمنبع للأشعة السينية اللينة، من أهم هذه التطبيقات:

1. الطباعة الحجرية الضوئية (X-ray Lithography):

هي تقنية تستخدم لطباعة الدارات الإلكترونية على سطوح رقائق معدنية. يعد جهاز البلازما المحرقة مناسباً لاستخدامه في الطباعة الحجرية حيث يلبي معاييرها من حيث صغر حجم المصدر النقطي ودرجة الحرارة والكثافة العالية والمجال الطيفي الواسع للأشعة السينية اللينة الصادرة (0.1 - 10 nm) خاصة عند استخدام غاز النيون. يمكن أيضاً تشغيل هذه الأجهزة بمعدلات تكرار عالية مما يسمح بتوليد طاقة كافية تسمح بالكشف عن المواد المقاومة للتيار [63].

2. مجهر الأشعة السينية اللينة (Soft X-ray Microscopy):

إن أجهزة البلازما المحرقة الكثيفة التي تعمل بالنيتروجين تصدر أشعة سينية لينة بطول موجي يبلغ حوالي 2.5 nm يقع هذا الطول داخل نافذة الماء 4.3 – 2.4 nm مما يسمح باستخدامه للفحص المجهرى للأنسجة الحية. تساعد أجهزة البلازما المحرقة الكثيفة في الحصول على صورة بتقريغ واحد وذلك بسبب صغر حجم منطقة الإصدار وكثافتها وشدتها العاليين. من الممكن أيضاً استخدام أجهزة البلازما المحرقة في التصوير المجسم بالأشعة السينية اللينة [64].

3. تحليل الأشعة السينية الفلورية (X-ray Fluorescence Analysis):

هي تقنية تحليلية غير مدمرة تُستخدم لتحديد تركيب المواد وذلك عن طريق تعريض مادة ما لأشعة سينية عالية الطاقة، تمتص الذرات داخل المادة هذه الطاقة وتصدر أشعة سينية ثانوية تُعرف باسم الأشعة السينية الفلورية. يمكن استخدام أجهزة البلازما المحرقة الكثيفة كمصدر للأشعة السينية اللينة في هذه التقنية نظراً لأنها تتميز بصغر حجم منطقة الإصدار مما يحقق قياسات لمساحات صغيرة جداً، وبدقة زمنية عالية 10 ns مما يساعد على مراقبة التغيرات السريعة في المواد، كما أنها تتمتع بحساسية عالية تسمح باكتشاف كميات صغيرة في العينة، تتميز أيضاً بسهولة المعايرة وإمكانية إجراء التحليل في الخلاء أو في جو عادي مما يوفر مرونة لتحليل أنواع مختلفة من العينات [10].

4. التصوير المقطعي الدقيق (X-ray Microtomography):

هي تقنية تصوير ثلاثية الأبعاد تسمح بمشاهدة العينة بعدة مقاطع أفقية أو عمودية. يمكن استخدام أجهزة البلازما المحرقة الكثيفة في هذه التقنية حيث تسمح الأشعة السينية اللينة الصادرة منها بإجراء فحص تفصيلي للخصائص الداخلية وبنية المواد بدقة دون إتلافها أو تقطيعها، يمكن استخدام هذه التقنية في علوم المواد والهندسة والطب [10].

5. قياس سُمك وتركيب الرقائق (Thickness and Composition Measurements in Foils):

توفر أجهزة البلازما المحرقة الكثيفة إصدار أشعة سينية لينة عالية الكثافة مما يتيح إجراء قياسات لسُمك وتركيب الرقائق بدقة دون تدميرها وبشكل مباشر اثناء عملية التصنيع [10].

لا توجد صعوبات كبيرة في تطوير أجهزة البلازما المحرقة كمصدر للأشعة السينية اللينة حيث أن هذه الأجهزة لها عمر طويل نسبياً، ويمكن اعتبارها خياراً أقل تكلفة وأكثر مرونة ومتعددة الاستخدامات مقارنة بمصادر الأشعة السينية التقليدية مثل إشعاع السنكروترون أو أنظمة الليزر عالية الطاقة [10].

5.1. الخاتمة (Conclusion):

تم في هذا الفصل تقديم تفاصيل كاملة عن أجهزة البلازما المحرقة الكثيفة، متضمناً أقسامها ومبدأ تشغيلها وتصميمها وحركية وأطوار البلازما المحرقة الكثيفة والإصدارات الناتجة عنها والتي تتضمن الحزم النترونية والأشعة السينية اللينة والقاسية والحزم الإلكترونية والأيونية السريعة. بالإضافة لذلك، تم إعطاء تفاصيل عن المميزات الأساسية المشتركة لبارامترات غمد وعمود البلازما لجميع أجهزة البلازما المحرقة. تم شرح العمليات التي تساهم في إصدار الأشعة السينية اللينة من البلازما وخاصة الأشعة الصادرة من البلازما المحرقة الكثيفة وخصائصها، وأخيراً تم عرض أهم ميزات وتطبيقات الأشعة السينية اللينة الصادرة من هذه الأجهزة.

الفصل الثاني (Chapter II)

النموذج النظري للبلازما المحرقة الكثيفة وإصدار الأشعة السينية اللينة

(Theoretical Model of DPF and SXR Emission)

1.2. مقدمة (Introduction):

في هذا الفصل، سيتم عرض النموذج النظري الذي يُستخدم من أجل الحصول على معلومات حول خصائص إصدار الأشعة السينية اللينة من أجهزة البلازما المحرقة الكثيفة وهو نموذج الهالة (Corona Model). وكذلك سيتم عرض النموذج الفيزيائي الرياضي نموذج لي (Lee Model) الذي يستخدم لوصف حركية وأطوار البلازما المحرقة الكثيفة. فيما يتعلق بنموذج الهالة سيتم عرض المعادلات المتعلقة بحساب بارامترات البلازما والتي يتم منها دراسة خصائص إصدار الأشعة السينية اللينة، أما بالنسبة لنموذج لي فسيتم تقديم بعض التفاصيل حول النموذج مع المعادلات المستخدمة وخطوات اشتقاق هذه المعادلات بالإضافة لعملية تشغيل الكود لإجراء التجارب العددية.

2.2. نموذج الهالة (Corona Model):

للحصول على معلومات مفصلة عن سويات البلازما يمكن إجراء حسابات تقريبية تعتمد على نماذج رياضية بسيطة. بيّنت الأبحاث أن نموذج توازن الهالة (Corona Equilibrium) هو الأفضل من أجل إجراء حسابات تتعلق بالبلازما المحرقة، حيث يمكن إيجاد الطاقة اللازمة لتوليد الأيونات الشبيهة بالهيليوم والهيدروجين للغازات المستخدمة في البلازما المحرقة [9, 10, 65].

1.2.2. بارامترات البلازما باستخدام نموذج الهالة

(Plasma Parameters Using the Corona Model)

تعتمد خصائص إصدار الأشعة السينية اللينة من البلازما بشكل أساسي على درجة حرارتها وسويات التأين والكثافة العددية للأيونات، حيث يتم حساب نسبة التأين وعدد الشحنة الأيونية الفعالة ونسبة التسخين النوعي الفعال وإصدار الأشعة السينية من البلازما بدلالة درجة الحرارة بالاعتماد على نموذج الهالة والذي يستخدم كتقريب لحساب البارامترات الترموديناميكية لبلازما الغازات المستخدمة في تشغيل أجهزة البلازما المحرقة الكثيفة [9, 10, 65].

تعطى نسبة التأين بالعلاقة:

$$\alpha_z = \frac{N_z}{N_i} \quad (1.2)$$

وهي تتحدد بنسبة البلازما المؤينة إلى سوية التأين z ، حيث N_z يمثل عدد الأيونات المؤينة إلى السوية z و N_i يمثل الكثافة العددية الكلية للأيونات في البلازما [9, 10, 65].

وتعطى عدد الشحنة الأيونية الفعالة بالعلاقة:

$$Z_{eff} = \frac{N_e}{N_i} = \frac{\sum_{z=0}^{z_n} (zN_z)}{\sum_{z=0}^{z_n} N_z} \quad (2.2)$$

ويحدد بعدد الشحنة الوسطي لأيون واحد في البلازما المتوازنة، حيث N_e, N_i الكثافة العددية الكلية للإلكترونات والأيونات في البلازما على الترتيب و N_z الكثافة العددية للأيونات التي تأينت إلى السوية الأيونية z [9, 10, 65]. تلعب عمليات التأين والإثارة دوراً مهماً في انضغاط البلازما، ويتم وصف هذه العمليات بواسطة نسبة التسخين النوعي الفعال التي تعطى بالعلاقة [9, 10, 65]:

$$\frac{\gamma - 1}{\gamma} \approx \frac{5}{2} + \frac{E_i}{kT_e(1 + Z_{eff})} \quad (3.2)$$

حيث k ثابت بولتزمان، و T_e درجة حرارة الإلكترونات وهي مقدرة بالكلفن، E_i طاقة التأين.

كما تعطى الطاقة اللازمة لإثارة أيون واحد بالعلاقة [9, 10, 65]:

$$E_{ion} \approx \frac{3}{2}(1 + Z_{eff})kT + E_i + E_X \quad (4.2)$$

حيث E_X طاقة الإثارة الوسطية للأيون عند درجة حرارة معينة. للتبسيط نأخذ بعين الاعتبار فقط الحدين الأوليين، والذين هما الأجزاء الرئيسية لطاقة البلازما في البلازما المحرقة [9, 10, 65].

تُعطى طاقة التأين الوسطية اللازمة لتسخين ذرة معتدلة واحدة إلى سوية بلازما معينة بالعلاقة:

$$E_i = \frac{\sum_{z=0}^{Z_n} (I_z N_z)}{\sum_{z=0}^{Z_n} N_z} \quad (5.2)$$

حيث I_z طاقة التأين اللازمة لرفع ذرة معتدلة واحدة إلى سوية التأين z [9, 10, 65].

2.2.2. كثافة استطاعة الأشعة السينية الصادرة من البلازما

(X-ray Power Density from Plasma)

تُعطى كثافة استطاعة إصدار الكبح (Bremsstrahlung) بالعلاقة [9, 10, 65]:

$$P_B = 1.69 \times 10^{-38} N_e \sqrt{T_{eV}} \sum_z (N_z Z^2) \quad (6.2)$$

بينما تُعطى كثافة استطاعة إصدار إعادة الاتحاد (Recombination) بالعلاقة [9, 10, 65]:

$$P_{rec} = 5.5 \times 10^{-37} \frac{N_e}{\sqrt{T_{eV}}} \sum_z (N_z Z^4) \quad (7.2)$$

وأما كثافة استطاعة الإصدار الخطي (Line Radiation) فنُعطى بالعلاقة [9, 10, 65]:

$$P_L = 3.95 \times 10^{-35} \frac{Z_n^4}{T_{eV}} N_e N_i \quad (8.2)$$

حيث Z_n يمثل العدد الذري.

وبالتالي تكون كثافة الإشعاع الكلي الصادر عن البلازما P_{rad} هي عبارة عن مجموع كثافات الإصدارات

الثلاث السابقة [9, 10, 65]:

$$P_{rad} = (P_b + P_{rec} + P_L) \quad \text{W/m}^3 \quad (9.2)$$

وبالتالي يعبر عن مردود الإشعاع الصادر عن البلازما بالعلاقة الآتية [9, 10, 65]:

$$Y = \int_{t_p} \left(\int_{V_p} P_{rad} dV \right) dt \quad \text{Joule} \quad (10.2)$$

حيث t_p و V_p هما حجم وزمن حياة البلازما المصدرة للأشعة السينية على الترتيب والتي يُفترض أنها متجانسة. من أجل البلازما المحرقة الكثيفة، يتم كتابة حدود الإشعاع بدلالة كل من الكثافة العددية للأيونات n_i والعدد الذري Z_n وعدد الشحنة الأيونية الفعالة Z_{eff} وطول عمود البلازما المتضيق Z_p ونصف قطر عمود البلازما المتضيق r_p ودرجة حرارة التضيق مقدرة بالكلفن T .

ومن ثم تتم مكاملة كثافات الإصدار على كامل زمن التضيق وتعطى بالعلاقات:

حد الضياع الكبحي (Bremsstrahlung loss term) [9, 10, 65]:

$$\frac{dQ_B}{dt} = -1.6 \times 10^{-40} n_i^2 Z_{eff}^3 (\pi r_p^2) Z_p T^{0.5} \quad (11.2)$$

حد الضياع بإعادة الإتحاد (Recombination loss term) [9, 10, 65]:

$$\frac{dQ_{rec}}{dt} = -5.92 \times 10^{-35} n_i^2 Z_{eff}^5 (\pi r_p^2) Z_p / T^{0.5} \quad (12.2)$$

حد الضياع الخطي (The line loss term) [9, 10, 65]:

$$\frac{dQ_L}{dt} = -4.6 \times 10^{-31} n_i^2 Z_{eff} Z_n^4 (\pi r_p^2) Z_p / T \quad (13.2)$$

بعد ذلك تختزل الطاقة المتولدة بواسطة الامتصاص الذاتي للبلازما الذي يعتمد بشكل أولي على الكثافة ودرجة الحرارة، ويتم عندئذ إصدار كمية الطاقة المختزلة على شكل مردود الأشعة السينية اللينة.

3.2.2. شذات إصدار الأشعة السينية من البلازما

(X-ray Emission Intensities from Plasma)

تعطى استطاعة الإصدار لخط لايمان-ألفا الناتج عن الأيونات الشبيهة بالهيدروجين بالعلاقة [9, 10, 65]:

$$P_{Ly\alpha} = 2.13 \times 10^{-31} N_i^2 \frac{\alpha_z Z_{eff}}{\sqrt{T_{ev}}} e^{(-\frac{h\nu_{Ly\alpha}}{T_{ev}})} \quad (14.2)$$

تعطى استطاعة الإصدار لخط لايمان-بيتا الناتج عن الأيونات الشبيهة بالهيدروجين بالعلاقة [9, 10, 65]:

$$P_{Ly\beta} = 4.05 \times 10^{-32} N_i^2 \frac{\alpha_z Z_{eff}}{\sqrt{T_{ev}}} e^{(-\frac{h\nu_{Ly\beta}}{T_{ev}})} \quad (15.2)$$

تعطى استطاعة الإصدار لخط الهيليوم-ألفا الناتج عن الأيونات الشبيهة بالهيليوم بالعلاقة [9, 10, 65]:

$$P_{He\alpha} = 1.31 \times 10^{-31} N_i^2 \frac{\alpha_z Z_{eff}}{\sqrt{T_{ev}}} e^{(-\frac{h\nu_{He\alpha}}{T_{ev}})} \quad (16.2)$$

تعطى استطاعة الإصدار لخط الهيليوم-بيتا الناتج عن الأيونات الشبيهة بالهيليوم بالعلاقة [9, 10, 65]:

$$P_{He\beta} = 3.3 \times 10^{-32} N_i^2 \frac{\alpha_z Z_{eff}}{\sqrt{T_{ev}}} e^{(-\frac{h\nu_{He\beta}}{T_{ev}})} \quad (17.2)$$

3.2. نموذج لي (Lee Model):

منذ تصميم جهاز البلازما المحرقة في ستينيات القرن الماضي بذل الباحثون جهود حثيثة لفهم وتحليل سلوك البلازما ولقياس وحساب جميع بارامترات البلازما المحرقة [66, 67] مما دفع الباحثون لإجراء دراسات بهدف وضع نماذج رياضية أكثر واقعية تشمل جوانب البلازما المختلفة مثل تصوير حركية البلازما وقياس مردود الإصدارات المختلفة من البلازما المحرقة. تمكن الباحثون من تطوير نماذج تعطي تصور واقعي عن الآليات التي تحدث داخل البلازما ومن هذه الآليات عدم الاستقرار الميكروي وعدم الاستقرار المغناطيسي-الهيدروديناميكي والتسارع الناتج عن اضطرابات البلازما والمقاومة الشاذة للبلازما والتي تعتبر مهمة لما تعطيه من معلومات عن سلوك البلازما [12,68]. من أهم النماذج المستخدمة في دراسة البلازما المحرقة هو نموذج سينغ لي (Lee)

(Model)، وهو نموذج عددي تم تطويره على عدة مراحل منذ عام 1984 حيث كان النموذج مؤلف من طورين [29] وفي عام 1991 تم تطويره إلى ثلاث أطوار [69] من ثم تم تحسينه ليصبح كود مؤلف من خمس أطوار متضمناً سرعة الاضطراب الصغيرة المحدودة (Finite small disturbance speed) وربط الإصدار بحركية البلازما بالإضافة إلى الامتصاص الذاتي (Self-absorption) كما تمت إعادة كتابة الكود على المايكروسوفت اكسل باستخدام لغة الفيجوال بيسيك (Visual Basic) مع واجهة مايكروسوفت إكسل سهلة الاستعمال [70] وما زال تطوير الكود مستمر حتى الآن [28]. في هذا البحث تم استخدام كود نموذج لي ذو الأطوار الخمسة لإجراء التجارب العددية لجميع أجهزة البلازما المحرقة المدروسة.

يربط كود لي بين الدارة الكهربائية وحركية البلازما والترموديناميك وإصدارات البلازما المحرقة، فهو يصف كل من الطور المحوري والطور القطري (راجع الفقرة 5.2.1)، ويستخدم في تفسير الظواهر الفيزيائية التي تحدث داخل البلازما المحرقة من أجل أجهزة بلازما من نوع Mather، كما تم تعديله ليشمل جهاز DENA من نوع Filippov [12]. إن ما يميز هذا الكود هو تحديد أهم خصائص البلازما المحرقة الكثيفة بالإضافة إلى مردود الإصدارات الناتجة عنه [12]. من ميزات كود لي [71]:

1. أداة عددية تستخدم في الأبحاث التي تتعلق بإصدار الأشعة السينية اللينة من أجهزة البلازما المحرقة.
2. يستخدم لمحاكاة أي جهاز من نوع Mather وتقديم معلومات حول حركية كل من الطورين المحوري والقطري.
3. تصميم أجهزة بلازما محرقة جديدة عن طريق إجراء تجارب عددية بتعديل بارامترات الجهاز.
4. يتضمن معلومات ترموديناميكية عن الغازات (D-T, H, D, Ne, Ar, Xe, He, N, Kr)
5. يتضمن بارامترات النموذج المستخدمة في عملية مواءمة منحنى التيار المحسوب عددياً مع منحنى التيار المقاس تجريبياً وبالتالي إعطاء معلومات عن كل من الطورين المحوري والقطري.
6. حساب مردود الأشعة السينية اللينة.
7. إمكانية إجراء الحسابات في حال تغير شكل المصعد.

يعد منحنى التيار في البلازما المحرقة من أهم مميزات هذه الأجهزة حيث يُعطي معلومات هامة عن حركية البلازما في كل من الطورين وعمليات نقل الطاقة إلى داخل عمود البلازما المتضيق، حيث تؤثر كل من العمليات الإشعاعية والترموديناميكية والكهربائية والتحريكية على منحنى تيار الانفراغ. تُجرى عملية مواءمة بين منحنى التيار المحسوب ومنحنى التيار التجريبي وعند الحصول على أفضل تطابق بينهما عندئذ بالإمكان نظرياً تحديد القيم العددية لبارامترات البلازما المتضيق على نحو تقريبي والتي يمكن الحصول عليها تجريبياً. من هنا تكتسب عملية قياس منحنى التيار أهمية كبيرة في أجهزة البلازما المحرقة [12].

بيّنت التجارب أن هناك مناطق متموضعة من الكثافات ودرجات الحرارة العالية لم تؤخذ بعين الاعتبار في النموذج، حيث يتم حساب الكثافة ودرجة الحرارة المتجانسة الوسطية، وبالتالي تكون أخفض من تلك المقاسة. ولكن بما أن بارامترات النموذج الأربعة تنتج عن مواءمة منحنى التيار المقاس مع التيار المحسوب فإن النموذج يدمج توازنات الطاقة والكتلة مع كل العمليات التي لم يتم نمذجتها بشكل خاص. باستخدام نموذج لي تم إجراء العديد من التجارب العددية وجرى اختبار العديد من البارامترات التي يمكن حسابها كالسرعات والمسارات ومردود الأشعة السينية، على نحوٍ واسع من أجل أجهزة بلازما متعددة. أعطت هذه الحسابات نتائج تتوافق توافقاً جيداً مع القيم التجريبية. استناداً لذلك يمكن اعتبار النموذج أداة مفيدة لإجراء دراسات وأبحاث نظرية على أجهزة بلازما محرقة منخفضة ومتوسطة وعالية الطاقة [12].

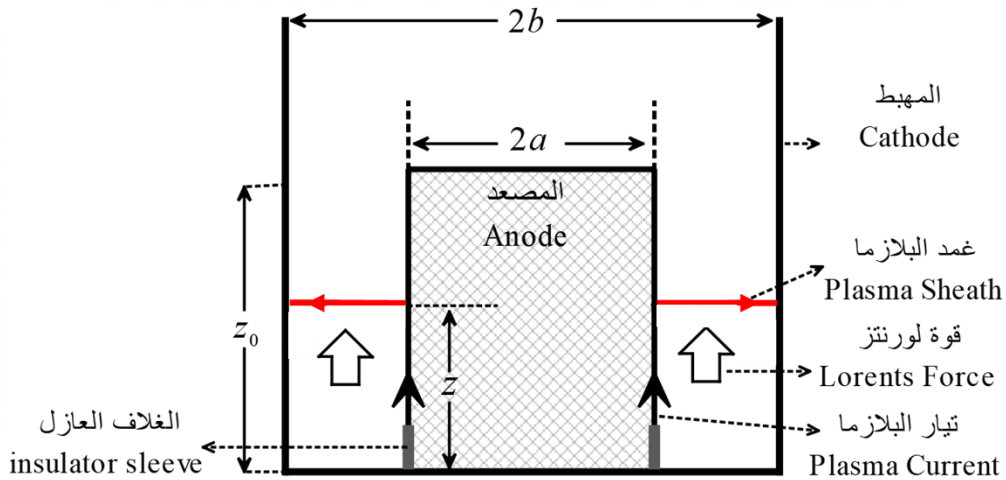
1.3.2. أطوار البلازما المحرقة الخمسة (The Five Phases of the Plasma Focus):

يعالج كود لي عملية تطور وتشكل البلازما المحرقة بناءً على طورين أساسيين هما الطور المحوري والطور القطري والذي يقسم بدوره إلى 4 أطوار فرعية.

1.1.3.2. الطور المحوري (Axial Phase):

يبدأ الطور المحوري بتشكيل غمد تيار البلازما عند قمة العازل ليتم تسريعه فيما بعد على طول المصعد، يتم وصف هذا الطور بواسطة نموذج الكاسحة (Snowplow model) [12] والذي يفترض أن غمد البلازما عبارة عن صفيحة مستوية رقيقة (سماكة معدومة تقريباً) تجرف الغاز المتعادل أمامها على طول المصعد مكونة طبقة كثيفة

من البلازما المتأينة، يتضمن النموذج معادلات حركة الغمد وربطها بمعادلة الدارة الكهربائية. تتضمن هذه المعادلات بارامترات النموذج وهما معامل الكتلة والتيار، حيث يعبر معامل الكتلة f_m عن النسبة المئوية لكتلة الغاز التي تتجرف على طول المصعد في الطور المحوري حيث يأخذ بعين الاعتبار مسامية غمد التيار بالإضافة إلى ذلك انحناء بنية جبهة الصدم للغمد المتحرك وتأثير الطبقة الحدودية للغمد وتحويل وتجزئة التيار وجميع التأثيرات الأخرى غير المحددة والتي تكافئ زيادة أو نقصان الكتلة في بنية الغمد المتحرك. أما معامل التيار f_c فيعبر عن النسبة المئوية للتيار المتدفق بشكل فعال في بنية الغمد المتحرك (بسبب جميع التأثيرات ومن ضمنها ضياع التيار عند جدار المهبط أو بالقرب منه بالإضافة لإنحناء غمد التيار) والذي يحدد جزء التيار الذي يحرك البنية بشكل فعال خلال الطور المحوري. كما يوجد معاملين مشابهيين في الطور القطري وهما f_{mr}, f_{cr} [72]. يوضح الشكل 1.2 الطور المحوري والذي يبدأ بتشكيل غمد التيار عند قمة العازل إلى نهاية المصعد ($z_0 = z$)، حيث z موضع غمد التيار و z_0 طول المصعد و $2b$ قطر المهبط و $2a$ قطر المصعد.



الشكل 1.2: يوضح الطور المحوري والذي يبدأ عند قمة العازل وينتهي عند نهاية المصعد.

تقسم المعادلات الرياضية التي تتحكم بالطور المحوري إلى قسمين هما معادلة حركة غمد التيار ومعادلة الدارة

الكهربائية وسوف يتم إعطاء تفاصيل عن طريقة اشتقاقهما [9].

أ. معادلة حركة غمد التيار (Equation Motion of Current Sheath):

في البداية يجب تعريف بعض المقادير ومنها الكتلة المتدفقة عبر غمد التيار في الموضع z والتي تعطى بالعلاقة:

$$m = [\rho_o \pi (b^2 - a^2) z] f_m \quad (18.2)$$

حيث a نصف قطر المصعد بينما b نصف قطر المهبط والنسبة بينهما ثابتة تعطى بالعلاقة $c = \frac{b}{a}$ و f_m معامل الكتلة في الطور المحوري وتكون قيمته دائماً $f_m < 1$ و ρ_o الكثافة الحجمية للغاز (المحيط بغمد التيار) [9]. أما المقدار الثاني فهو التيار المتدفق ضمن عمود البلازما I_p ، أثناء تفريغ بنك المكثفات تم افتراض أن جزء من تيار الانفراغ الكلي I يبقى عند الغلاف العازل (يسمى مسار التسريب والذي يمكن تمييزه بمقاومة التسريب r_L) أما الجزء الآخر منه فيتدفق داخل الغمد (التيار المتدفق ضمن عمود البلازما) مما يؤدي إلى دفع الغمد على طول المصعد خلال فترة زمنية معينة. يعطى I_p بالعلاقة:

$$I_p = f_c I \quad (19.2)$$

حيث I تيار الانفراغ الكلي و f_c معامل التيار في الطور المحوري وتكون قيمته دائماً $f_c < 1$. أما المقدار الثالث فهو الحقل المغناطيسي السمتي والذي يتولد نتيجة لتدفق التيار الكهربائي ضمن الإلكترونات ويعطى بالعلاقة:

$$B_\theta = \frac{\mu I f_c}{2\pi r} \quad (20.2)$$

حيث $\mu = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ معامل النفاذية المغناطيسية.

لإيجاد القوة المغناطيسية المطبقة بواسطة الحقل المغناطيسي السمتي (B_θ) على غمد التيار نقوم

بالمكاملة على كامل الغمد من $r = a$ إلى $r = b$:

$$F = \int_a^b \frac{B_\theta^2}{2\mu} 2\pi r dr = \int_a^b \left[\frac{\left(\frac{\mu I f_c}{2\pi r} \right)^2}{(2\mu)} \right] 2\pi r dr \quad (21.2)$$

بمكاملة العلاقة (21.2) فنحصل على علاقة القوة المغناطيسية:

$$F = \frac{\mu}{4\pi} (f_c I)^2 \ln(c) \quad (22.2)$$

والتي تدفع غمد تيار البلازما على طول المصعد.

يعطى تغير اندفاع غمد التيار بالنسبة للزمن بالعلاقة الآتية (باعتبار أن السرعة خلال الطور المحوري

$$: (v = \frac{dz}{dt})$$

$$\frac{d(mv)}{dt} = \frac{d}{dt} \left([\rho_o \pi (b^2 - a^2) z] f_m \frac{dz}{dt} \right) \quad (23.2)$$

بإجراء الاشتقاق للطرف الثاني من العلاقة (23.2) نجد:

$$\frac{d(mv)}{dt} = \rho_o \pi (b^2 - a^2) f_m \left[\left(\frac{dz}{dt} \right)^2 + z \frac{d^2 z}{dt^2} \right] \quad (24.2)$$

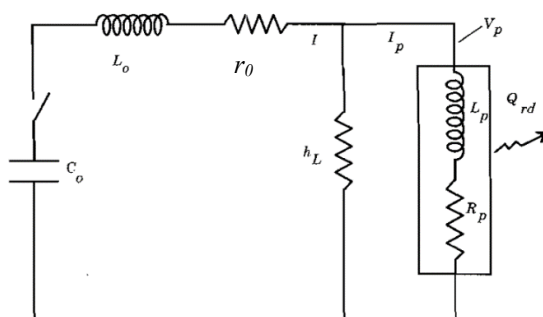
والتي تعبر عن القوة المغناطيسية.

بمساواة العلاقتين (22.2) و (24.2) نحصل على معادلة تغير حركة غمد التيار:

$$\frac{d^2 z}{dt^2} = \frac{\left[\frac{\mu \ln(c)}{4\pi^2 f_m \rho_o (b^2 - a^2)} (f_c I)^2 - \left(\frac{dz}{dt} \right)^2 \right]}{z} \quad (25.2)$$

ب. معادلة الدارة الكهربائية (Circuit Equation):

يبين الشكل 2.2 مخطط الدارة الكهربائية المكافئة لجهاز البلازما المحرقة.



الشكل 2.2: يوضح الدارة الكهربائية المكافئة لجهاز البلازما المحرقة، حيث C_o سعة بنك المكثفات و L_o تحريضية الدارة الخارجية و r_o مقاومة الدارة الخارجية و r_p مقاومة البلازما و L_p تحريضية البلازما و h_L مقاومة التسريب والتي تحد من قيمة التيار الفعّال [9].

وفقاً لقاعدة كيرشوف الثانية، تعطى معادلة الدارة الكهربائية [9] بالعلاقة الآتية:

$$\frac{1}{C_o} \int I dt - V_o + r_o I + \frac{d}{dt} (L_o I) + R_p I_p + \frac{d}{dt} (L_p I_p) = 0 \quad (26.2)$$

بتعويض I_p من العلاقة (19.2) بالعلاقة (26.2) نحصل على المعادلة العامة لتغيّر التيار الكهربائي:

$$\frac{dI}{dt} = \frac{\left[V_o - \frac{1}{C_o} \int I dt - (r_o + f_c R_p) I - \frac{d}{dt} (L_o + f_c L_p) I \right]}{L_o + f_c L_p} \quad (27.2)$$

تعطى تحريضية البلازما في الطور المحوري من أجل الموضع z بالعلاقة:

$$L_p = \frac{\mu}{2\pi} z \ln c \quad (28.2)$$

وبتعويض قيمة هذه التحريضية في العلاقة (27.2) ومع مقاومة البلازما نحصل على معادلة تغيّر تيار الدارة الكهربائية في الطور المحوري:

$$\frac{dI}{dt} = \frac{\left[V_o - \frac{1}{C_o} \int I dt - r_o I - \frac{d}{dt} \left(L_o + f_c \frac{\mu}{2\pi} z \ln c \right) I \right]}{\left[L_o + \frac{f_c \mu}{2\pi} (\ln c) z \right]} \quad (29.2)$$

من هذه العلاقة نحصل على تغيّر التيار المتدفق في الطور المحوري:

$$\frac{dI}{dt} = \frac{\left[V_o - \frac{1}{C_o} \int I dt - r_o I - I f_c \frac{\mu}{2\pi} (\ln c) \frac{dz}{dt} \right]}{\left[L_o + \frac{f_c \mu}{2\pi} (\ln c) z \right]} \quad (30.2)$$

إن المعادلتين (25.2) و (30.2) هما المعادلتان المولدتان للنموذج في هذا الطور، كما تربطان حركية البلازما بالدارة الكهربائية. تستخدم هذه المعادلات لوصف كل من حركة غمد التيار وشدة التيار في كل لحظة على طول المصعد.

يعطى الجهد الكهربائي الناتج عبر حجرة البلازما [9] بالعلاقة:

$$V = \frac{d}{dt}(L_p I_p) + R_p I_p \quad (31.2)$$

بإهمال مقاومة البلازما في الطور المحوري وبتعويض تحريضية البلازما المعطاة بالعلاقة (28.2)

وتتأثر البلازما المعطى بالعلاقة (19.2) في العلاقة (31.2) نحصل على علاقة الجهد الكهربائي [9]:

$$V = \frac{\mu}{2\pi} f_c \ln c \left(z \frac{dI}{dt} + I \frac{dz}{dt} \right) \quad (32.2)$$

كما يمكن أن يعطى الجهد الكهربائي بالعلاقة:

$$V = V_o - \frac{1}{C_o} \int I dt - r_o I - L_o \frac{dI}{dt} \quad (33.2)$$

يعطى عمل القوة المغناطيسية المنجز بالعلاقة:

$$\begin{aligned} W &= \iiint_{(plasma)} dV \cdot \left(\int_0^z \vec{F} \cdot \hat{z} dz \right) \\ W &= \int_0^z \left(\frac{\mu}{4\pi} I_p^2 \ln c \right) dz \\ W &= \int_0^t \frac{dz}{dt} \left(\frac{\mu}{4\pi} f_c^2 I^2 \ln c \right) dt \end{aligned} \quad (34.2)$$

ويمكن كتابة العمل بدلالة تحريضية البلازما بالعلاقة:

$$W = \int_0^t \frac{1}{2} I_p^2 L_p dt \quad (35.2)$$

تعطى الطاقة الحركية (بافتراض أن غمد البلازما ينساب من المصعد إلى المهبط بسرعة ثابتة) [9] بالعلاقة

الآتية:

$$E_K = \frac{1}{2} f_m \rho_o \pi (b^2 - a^2) z \cdot \left(\frac{dz}{dt} \right)^2 \quad (36.2)$$

2.1.3.2. الطور القطري (Radial Phase):

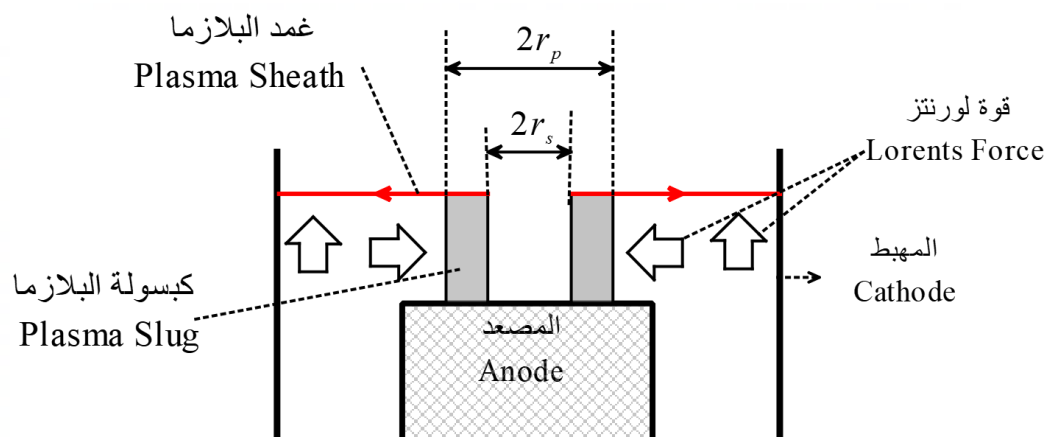
يُعتبر الطور القطري الأكثر أهمية لأن معظم الإصدارات تنتج أثناء هذا الطور يتم وصف هذا الطور بواسطة نموذج الكبسولة (Slug model) [12] والذي يفترض أن عمود البلازما عبارة عن أسطوانة ذات سماكة، ويقسم إلى 4 أطوار فرعية وهي: طور الصدمة القطرية الداخلية، طور الصدمة القطرية المنعكسة، طور الانضغاط البطيء، طور انهيار العمود محورياً.

I. طور الصدمة القطرية الداخلية (Radial Inward Shock Phase):

يبدأ الطور القطري بوصول غمد التيار إلى نهاية المصعد ويلتف حول قمة المصعد مشكلاً أسطوانة تيار على سطحه حيث يتم افتراض بنية هندسية بسيطة لهذه الأسطوانة. ينتج عن التيار المتدفق خلال هذه الأسطوانة انضغاط مغناطيسي [9] يعطى بالعلاقة:

$$P_B = \frac{B_\theta^2}{2\mu} \quad (37.2)$$

يعمل الانضغاط المغناطيسي كمكبس مغناطيسي (Magnetic Piston, MP) نصف قطره r_p يدفع أسطوانة التيار باتجاه محور المصعد بسرعة أكبر من سرعة الصوت مما يؤدي إلى تشكل جبهة الصدم (Shock Front, SF) نصف قطرها r_s يدفعها المكبس بالاتجاه القطري. ينتج عن ذلك مسافة فاصلة بين r_p, r_s تحتوي على الكتلة التي جرفتها جبهة الصدم أثناء حركتها والتي تسمى بالكبسولة (Slug)، تكون هذه الكبسولة ذات سماكة يحددها كل من نصف قطرها الخارجي (المكبس المغناطيسي) والداخلي (جبهة الصدم) كما يوضح الشكل (3.2).



الشكل 3.2: يبين طور الصدمة القطرية الداخلية.

بداية هذا الطور تكون عندما $r_s = r_p$ ونهايته عند وصول جبهة الصدم إلى محور المصعد أي $r_s = 0$. تتألف حركية الصدمة القطرية من المراحل الآتية:

1. حركة الصدمة القطرية (Radial Shock Motion):

يفترض نموذج الكبسولة وجود مسافة اتصال صغيرة غير محددة بين جبهة الصدم والمكبس المغناطيسي. في الطور القطري، تكون سرعة المكبس المغناطيسي أكبر من سرعة الصوت وبالتالي تكون سرعة أمواج الضغط داخل الكبسولة أكبر من سرعة الجسيمات فيها، تحت هذه الشروط يمكن افتراض أن كمية واحدة تكون منتظمة عبر الكبسولة وهي الضغط p ، وبالتالي يمكن ربط هذا الضغط بسرعة جبهة الصدم عن طريق معادلات قفز-صدمة (Shock-jump) حيث تعطى سرعة جبهة الصدم [9] بالعلاقة:

$$v_s = \frac{dr_s}{dt} \quad (38.2)$$

فيكون الضغط الناتج عن جبهة الصدم:

$$P_s = \frac{2}{\gamma + 1} \rho_o v_s^2 \quad (39.2)$$

حيث تعبر الكمية $\gamma = \frac{C_P}{C_V}$ عن نسبة الحرارة النوعية للغاز في حالة ضغط وحجم ثابتين.

بالمساواة بين المعادلتين (37.2) و (39.2) نحصل على سرعة جبهة الصدم [9]:

$$\frac{dr_s}{dt} = v_s = - \left[\frac{\mu(\gamma + 1)}{\rho_o} \right]^{\frac{1}{2}} \times \frac{f_c}{\sqrt{f_{mr}}} \frac{I}{4\pi r_p} \quad (40.2)$$

يعبر المقدار (If_c) عن التيار المتدفق في الغمد كما يعبر المقدار $\rho_o f_{mr}$ عن كثافة الكتلة الفعالة التي يتم جرفها داخل الكبسولة.

2. حركة المكبس المغناطيسي (Radial Piston Motion):

يمكن معالجة كبسولة البلازما كنظام حراري. وبالتالي يمكن استخدام القانون الأول في الترموديناميك مع هذا النظام [9]:

$$dh = dQ + Vol dP \quad (41.2)$$

تعبّر dQ عن كمية الحرارة، حيث تعطى الإنتالبية h بالعلاقة:

$$h = \frac{\gamma}{\gamma - 1} P \cdot Vol \quad (42.2)$$

بتعويض العلاقة (42.2) بالعلاقة (41.2) نحصل على العلاقة:

$$\gamma P \cdot dVol + Vol \cdot dP = dQ \cdot (\gamma - 1) \quad (43.2)$$

يعطى حجم كبسولة البلازما بالعلاقة:

$$Vol = \pi(r_p^2 - r_s^2)z_f \quad (44.2)$$

حيث تعبّر z_f عن طول كبسولة البلازما المتشكلة على سطح المصعد.

للتخلص من Vol من العلاقة (43.2) نقوم باشتقاق العلاقة (44.2) كتابع لكل من dr_p و dr_s و

dz_f . للقيام بذلك يجب تطبيق المقادير التفاضلية السابقة بعناية على كتلة ثابتة من الغاز، على سبيل المثال عندما

يتحرك المكبس المغناطيسي بمقدار dr_p لا يتم إدخال كتلة جديدة من الغاز إلى الحجم الجديد $Vol + dVol$.

ولكن عندما تتحرك جبهة الصدم من الموضع r_s إلى الموضع $r_s + dr_s$ فإنها تدخل كتلة جديدة من الغاز إلى

الحجم الجديد، حيث يتم ضغط هذه الكتلة بنسبة $\left(\frac{\gamma+1}{\gamma-1}\right)$ والتي تشغل جزء من زيادة الحجم، لا تتوافق الزيادة الفعلية

في الحجم المتاح من الكتلة الأصلية للغاز في الحجم Vol مع الزيادة في dr_s ولكن تتوافق مع الزيادة الفعالة

$$dr_s \left[\frac{2}{\gamma+1} \right] dz_f \text{ وهذا ينطبق أيضاً على الزيادة في } dz_f [9].$$

باشتقاق العلاقة (44.2) بالنسبة لـ dr_s و dr_p و dz_f نحصل على [9]:

$$dVol = 2\pi \left(r_p dr_p - \frac{2}{\gamma+1} r_s dr_s \right) z_f + (r_p^2 - r_s^2) \frac{2\pi}{\gamma+1} dz_f \quad (45.2)$$

فتكون نسبة الحجم التفاضلي إلى الحجم معطاة بالعلاقة:

$$\frac{dVol}{Vol} = \frac{2 \left(r_p dr_p - \frac{2}{\gamma+1} r_s dr_s \right) z_f + (r_p^2 - r_s^2) \frac{2}{\gamma+1} dz_f}{(r_p^2 - r_s^2) z_f} \quad (46.2)$$

أما للحصول على المقدار $\frac{dP}{P}$ نعوض قيمة v_s من العلاقة (40.2) في العلاقة (39.2) ومن ثم القيام باشتقاق عبارة الضغط من العلاقة (39.2):

$$\frac{dP}{P} = 2 \frac{dv_s}{v_s} = 2 \left(\frac{dI}{I} - \frac{dr_p}{r_p} \right) \quad (47.2)$$

بتعويض (47.2) و (46.2) في العلاقة (43.2) وبالإصلاح نحصل على سرعة المكبس المغناطيسي المعطاة بالعلاقة:

$$\begin{aligned} \frac{dr_p}{dt} = & \left[\frac{2}{\gamma + 1} \frac{r_s}{r_p} \frac{dr_s}{dt} - \frac{r_p}{\gamma I} \left(1 - \frac{r_s^2}{r_p^2} \right) \frac{dI}{dt} - \frac{1}{\gamma + 1} \frac{r_p}{z_f} \left(1 - \frac{r_s^2}{r_p^2} \right) \frac{dz_f}{dt} \right. \\ & \left. + \frac{4\pi(\gamma - 1)}{\mu\gamma(f_c I)^2} \frac{r_p}{z_f} \left(1 - \frac{r_s^2}{r_p^2} \right) \frac{dQ}{dt} \right] / \left[\frac{\gamma - 1}{\gamma} + \frac{1}{\gamma} \frac{r_s^2}{r_p^2} \right] \end{aligned} \quad (48.2)$$

باعتبار أن هذه الجملة كظومه [12, 73] ومنه تصبح العلاقة (48.2) بالشكل:

$$\frac{dr_p}{dt} = \frac{\left[\frac{2}{(\gamma + 1)} \frac{r_s}{r_p} \frac{dr_s}{dt} - \frac{r_p}{\gamma I} \left(1 - \frac{r_s^2}{r_p^2} \right) \frac{dI}{dt} - \frac{1}{(\gamma + 1)} \frac{r_p}{z_f} \left(1 - \frac{r_s^2}{r_p^2} \right) \frac{dz_f}{dt} \right]}{\left[\frac{\gamma - 1}{\gamma} + \frac{1}{\gamma} \frac{r_s^2}{r_p^2} \right]} \quad (49.2)$$

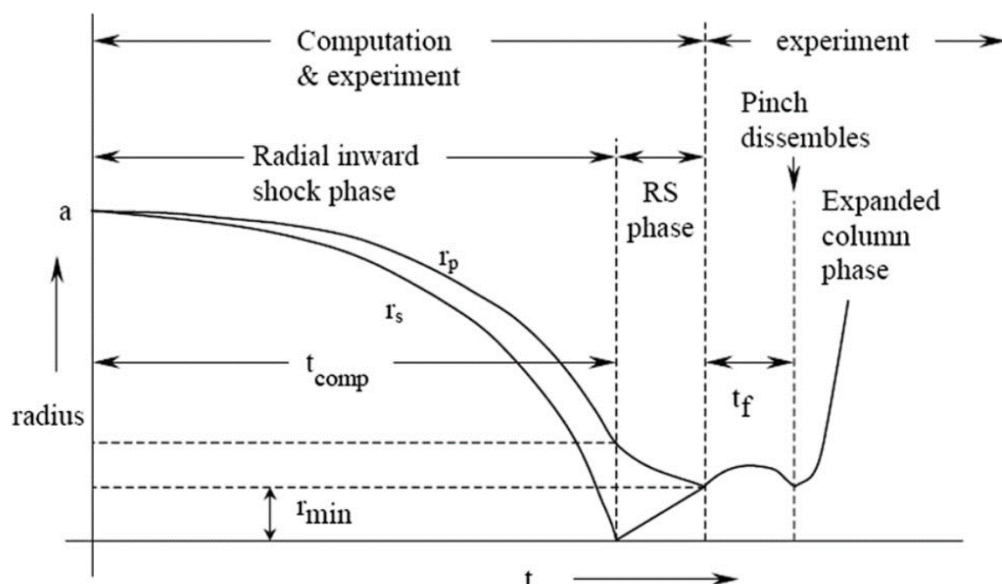
3. اعتبارات نموذج الكبسولة (Slug Model Considerations):

يواجه نموذج الكبسولة الموصوف في الفقرتين I و II مشكلتين، الأولى هي إعطاءه قيمة لسرعة غمد البلازما أكبر بكثير من القيم المقاسة تجريبياً. أما الثانية، عندما تصل جبهة الصدم إلى محور المصعد فإنها تعطي صورة غير متوافقة مع الملاحظات التجريبية [74]. من المعادلة (49.2) في نهاية هذا الطور يكون $r_s = 0$ عندها تصبح سرعة المكبس المغناطيسي تساوي الصفر، وهذا غير واقعي وينتج عن افتراض وجود ضغط منتظم داخل الكبسولة والتي تتطلب سرعة اضطراب صغيرة غير محددة [69]. من المفيد النظر إلى الصورة الفيزيائية لهذا النموذج من أجل المزيد من التفاصيل.

A. الصورة الفيزيائية (Physical Picture): بالنظر إلى النتائج التجريبية الوفيرة المتاحة حتى الآن وباستخدام

مفهومي جبهة الصدم والمكبس المغناطيسي يمكن وضع صورة فيزيائية لحركية الطور القطري. من المعروف أن

الطور القطري يبدأ عند وصول غمد التيار إلى حافة سطح المصعد ($r = a$) وتكون سماكة الغمد عندها معدومة تقريباً (رقيقة جداً) ويملك طول محوري. تتحرك جبهة الصدم قطرياً باتجاه الداخل مدفوعة بالمكبس المغناطيسي مجمعة الغازات التي تصادفها داخل الكبسولة. يتم اعتبار أن كبسولة البلازما تتألف من طبقات أسطوانية رقيقة (الطبقة رقيقة بما فيه الكفاية لمعاملتها كطبقة متجانسة ولكنها سميكة بما فيه الكفاية لتحتوي عدد كافٍ من الجسيمات بداخلها لنتمكن من تطبيق الديناميك الإحصائي) حيث تمثل الطبقة الداخلية جبهة الصدم أما الطبقة الخارجية فتمثل المكبس المغناطيسي. تتوقف حركة جبهة الصدم عند وصولها للمحور، ولكن الطبقات القريبة من المكبس المغناطيسي لا تتوقف حتى يصل الضغط المتزايد المطبق على المحور إلى الطبقات القريبة من المكبس. يتم نقل هذه المعلومات بواسطة أمواج الضغط المتحركة نحو الخارج باتجاه المكبس المغناطيسي بسرعة اضطراب محلية صغيرة. عندما تصطدم جبهة الصدم بالمكبس المغناطيسي تتوقف حركته ويتشكل عمود من البلازما والذي يكون نصف قطره متوافق مع أصغر نصف قطر لتضييق البلازما. يوضح الشكل (4.2) مخطط الطور القطري والذي يبين حركة كل من جبهة الصدم المحددة بـ r_s والمكبس المغناطيسي المحدد بـ r_p حيث يمثل المحور الشاقولي نصف القطر والمحور الأفقي الزمن [9].



الشكل 4.2: يوضح حركة كل من جبهة الصدم المحددة بـ r_s والمكبس المغناطيسي المحدد بـ r_p في الطورين المحوري والقطري حيث يمثل المحور الشاقولي نصف قطر التضييق والمحور الأفقي الزمن [12].

B. نموذج الكبسولة المحسن (Improved Slug Model): لتبسيط المحاكاة، يتم تحديد حركية الكبسولة بواسطة طبقتين حدوديتين هما جبهة الصدم والمكبس المغناطيسي، مع الأخذ بعين الاعتبار تأخير الاتصال بسبب سرعة الاضطراب الصغيرة المحدودة بين المكبس والجبهة. يعني تأخر الاتصال بأن موجة الصدم سوف تشعر في كل لحظة زمنية بضغط المكبس في زمن أقل من زمن الاتصال الفعلي وبالمثل فإن المكبس المغناطيسي سوف يشعر بتأثير جبهة الصدم عند موضع سابق لموضع الاتصال، والذي يوضح الصورة التي تنبأ بها نموذج الكبسولة [69].

C. معادلات طور الصدمة الواردة (Equations for Inward Shock Phase):

لأخذ التأخير الزمني بعين الاعتبار يمكن استبدال معادلات حركة جبهة الصدم والمكبس المغناطيسي المعطاة بالعلاقين (40.2) و (49.2) بالعلاقين الآتيتين:

$$\frac{dr_s}{dt} = v_s = - \left[\frac{\mu(\gamma + 1)}{\rho_o} \right]^{\frac{1}{2}} \times \frac{f_c}{\sqrt{f_{mr}}} \frac{I|_{t_{-1}}}{4\pi r_p|_{t_{-1}}} \quad (50.2)$$

$$\frac{dr_p}{dt} = \frac{\left[\frac{2}{\gamma + 1} \frac{1}{r_p} \left(r_s \frac{dr_s}{dt} \right)_{t_{-1}} \frac{P_B|_{t_{-1}}}{P_B} - \frac{r_p}{\gamma I} \left(1 - \frac{r_s^2}{r_p^2} \right) \frac{dI}{dt} - \frac{1}{\gamma + 1} \frac{r_p}{z_f} \left(1 - \frac{r_s^2}{r_p^2} \right) \frac{dz_f}{dt} \right]}{\left[\frac{\gamma - 1}{\gamma} + \frac{1}{\gamma} \frac{r_s^2}{r_p^2} \right]} \quad (51.2)$$

يتم تحديد التأخير الزمني ($t_{-1} = \Delta t$) بواسطة سرعة أمواج الضغط في الكبسولة والمسافة بين المكبس المغناطيسي وجبهة الصدم [9]، ويعبر عنه بالعلاقة:

$$t_{-1} = \frac{d_{SF-MP}}{C_s} \quad (52.2)$$

حيث $d_{SF-MP} = r_p - r_s$ المسافة بين جبهة الصدم SF والمكبس المغناطيسي MP و C_s سرعة أمواج الضغط في الكبسولة (سرعة الاضطراب المحدودة) في نظام إحداثيات يتحرك مع الكبسولة حيث تعطى سرعة أمواج الضغط في الكبسولة [9] بالعلاقة:

$$C_s = \sqrt{\frac{\partial P}{\partial \rho}} = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma N k T}{N_i m_i}} = \sqrt{\gamma (1 + Z_{eff}) k T / M m_i} \quad (53.2)$$

حيث Z_{eff} الشحنة الفعالة و k ثابت بولتزمان و m_i كتلة البروتون و M الوزن الجزيئي و N_i الكثافة العددية للأيونات و N الكثافة العددية الكلية.

4. الاستطالة المحورية للتضييق (Axial Elongation of the Focus Pinch):

تنتشر جبهة الصدم محورياً بالاتجاه z أثناء عملية الانضغاط وبفرض أن الضغط الذي يدفع جبهة الصدم محورياً هو نفسه الذي يدفعها قطرياً وبالتالي يزداد طول الكبسولة z_f ، وذلك لأن الضغط المغناطيسي يحيط بالكبسولة باستثناء قمته بحيث تكون غير خاضعة لأي قوة، وهذا يؤدي إلى زيادة انضغاط كبسولة البلازما [9]. تعطى الاستطالة المحورية بالعلاقة:

$$\frac{dz_f}{dt} = - \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right) \frac{dr_s}{dt} \quad (54.2)$$

5. معادلة الدارة الكهربائية (Circuit Equation):

في الطور القطري، يمكن التعبير عن تحريضية البلازما بالعلاقة الآتية:

$$L_p = \frac{\mu}{2\pi} z_o \ln c + \frac{\mu}{2\pi} z_f \ln \left(\frac{b}{r_p} \right) \quad (55.2)$$

حيث z_f و r_p مقداران متغيّران مع الزمن.

تعطى معادلة الدارة الكهربائية وبإهمال مقاومة البلازما في هذا الطور بالعلاقة [9]:

$$\frac{dI}{dt} = \frac{V_o - \frac{\int I dt}{C_o} - r_o I + f_{cr} I \frac{\mu}{2\pi} \left[\frac{z_f}{r_p} \frac{dr_p}{dt} - \left(\ln \frac{b}{r_p} \right) \frac{dz_f}{dt} \right]}{L_o + f_{cr} \frac{\mu}{2\pi} (\ln c) z_o + f_{cr} \frac{\mu}{2\pi} \left(\ln \frac{b}{r_p} \right) z_f} \quad (56.2)$$

كما يوجد كميات فيزيائية في هذا الطور مثل الجهد الكهربائي لأنبوب البلازما المحرقة [9]، والذي نحصل عليه

باستخدام العلاقة (31.2) و (55.2) ويُعبّر عنه بالعلاقة:

$$V = \frac{\mu}{2\pi} \left[z_o \ln c + z_f \ln \left(\frac{b}{r_p} \right) \right] f_{cr} \frac{dI}{dt} + f_{cr} I \frac{\mu}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{b}{r_b} \right) \frac{dz_f}{dt} - \frac{z_f}{r_p} \frac{dr_p}{dt} \right] \quad (57.2)$$

كما تعطى القوة المغناطيسية والعمل المبذول [9, 29] بالعلاقين الآتيتين:

$$F = P_B \cdot S = P_B \cdot 2\pi r_p \cdot z_f = \frac{\mu_o f_{cr}^2 I^2}{4\pi r_p} \cdot z_f \quad (58.2)$$

$$W = \int F \cdot \frac{dr_p}{dt} \cdot dt = \int \frac{\mu_o f_{cr}^2 I^2}{4\pi r_p} \cdot z_f \cdot \frac{dr_p}{dt} \cdot dt \quad (59.2)$$

والتي يتم استخدامهما لحساب العمل والقوة المغناطيسية في كامل مراحل الطور القطري.

أما الطاقة الحركية تعطى بالعلاقة:

$$E_k = \frac{1}{2} f_{mr} \frac{N_i}{N_o} \rho_o \cdot \pi (r_p^2 - r_s^2) \left[\frac{dr_p}{dt} \right]^2 \quad (60.2)$$

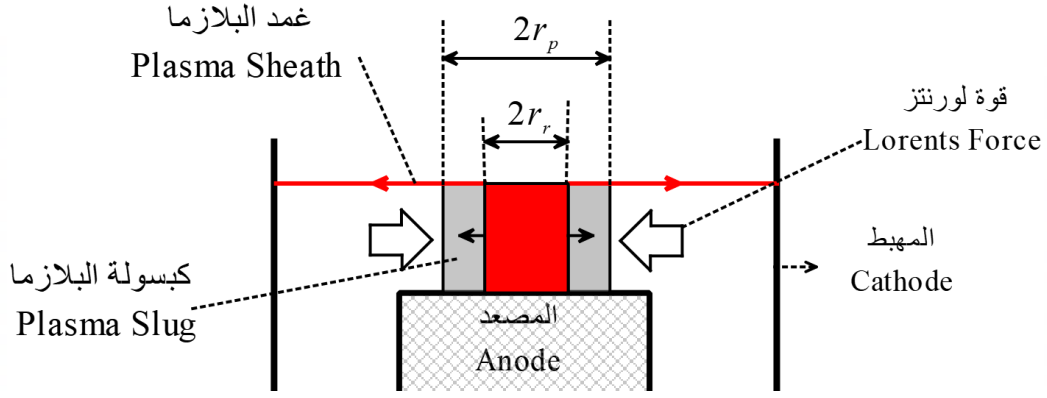
حيث N_i الكثافة العددية للأيونات و N_o الكثافة العددية لغاز التشغيل. يتم اعتبار أن سرعة طبقة البلازما بأكملها تعادل سرعة المكبس المغناطيسي، وهذا مقبول كون المنطقة الموجودة بالقرب من المكبس المغناطيسي أكثر أهمية من جبهة الصدم بالنسبة للطاقة الحركية [9].

بمكاملة المعادلات المولدة للنموذج في هذا الطور (40.2) و (49.2) و (54.2) و (56.2) يمكن

الحصول على المقادير r_s, r_p, z_f, I .

II. طور الصدمة القطرية المنعكسة (Radial Reflected Shock Phase):

يبدأ هذا الطور بعد وصول جبهة الصدم إلى محور المصعد كون البلازما في هذه الحالة تصادمية، ثم تنعكس قطرياً بالاتجاه الخارجي بينما يتابع في هذه الأثناء المكبس المغناطيسي حركته نحو الداخل كما يوضح الشكلين (4.2) و (5.2) حيث يعبر r_r عن نصف قطر الصدمة المنعكسة. يتم وصف هذا الطور باستخدام معادلات حركة جبهة الصدم قطرياً بالاتجاه الخارجي وحركة المكبس المغناطيسي قطرياً بالاتجاه الداخلي والاستطالة المحورية للتضييق والدائرة الكهربائية والتي تم توضيحها في طور الصدمة القطرية الداخلية في القسم (I). لا بد من الإشارة أن درجة الحرارة خلف الصدمة المنعكسة تقفز للضعف عما كانت عليه في الطور المذكور.



الشكل 5.2: يوضح طور الصدمة القطرية المنعكسة.

تكون سرعة الصدمة المنعكسة تساوي جزء من سرعة جبهة الصدم الواردة على المحور. على سبيل المثال

يمكن ان تكون سرعة الصدمة المنعكسة 0.3 من سرعة جبهة الصدم كما توضح العلاقة الأتية [9]:

$$\frac{dr_r}{dt} = -0.3 \left(\frac{dr_s}{dt} \right)_{on-axis} \quad (61.2)$$

وتشير إشارة السالب إلى أن جبهة الصدم والصدمة المنعكسة باتجاهين متعاكسين.

تعطى سرعة المكبس المغناطيسي في هذا الطور بالعلاقة [9]:

$$\frac{dr_p}{dt} = \frac{-\frac{r_p}{\gamma I} \left(1 - \frac{r_s^2}{r_p^2} \right) \frac{dI}{dt} - \frac{r_p}{(\gamma + 1)z_f} \left(1 - \frac{r_s^2}{r_p^2} \right) \frac{dz_f}{dt}}{\frac{\gamma - 1}{\gamma} + \frac{1}{\gamma} \frac{r_s^2}{r_p^2}} \quad (62.2)$$

أما الاستطالة المحورية للبلازما فتعطى بالعلاقة [9]:

$$\frac{dz_f}{dt} = -\frac{2}{\gamma + 1} \left(\frac{dr_s}{dt} \right)_{on-axis} \quad (63.2)$$

بينما تعطى معادلة الدارة الكهربائية بالعلاقة (39.2)، ويعطى كل من الجهد الكهربائي والعمل المنجز في هذا

الطور أيضاً بالعلاقين (40.2) و (42.2).

يتم اعتبار أن البلازما التي يتم حصرها بواسطة جبهة الصدم المنعكسة (قطرياً) ثابتة خلال هذا الطور

وبالتالي فإن الطاقة الحركية مرتبطة فقط بالجزء المتحرك بين الصدمة المنعكسة والمكبس المغناطيسي ويتم تقريب

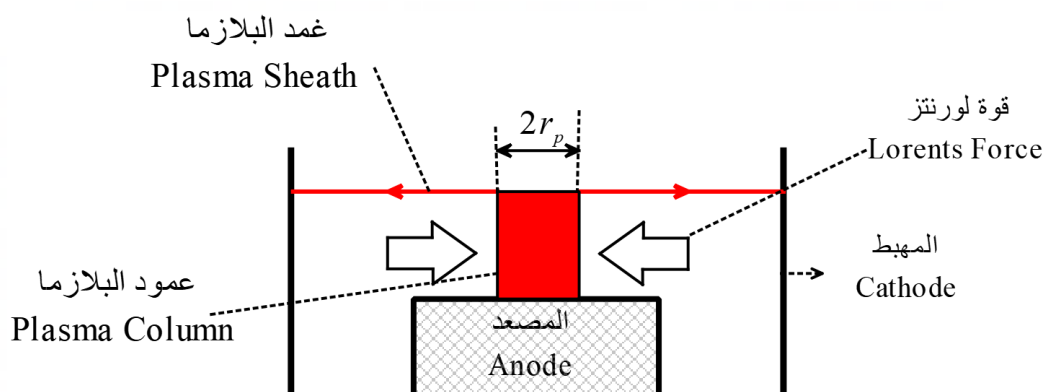
سرعة المكبس المغناطيسي بسرعة طبقة البلازما بأكملها حيث يتم وضع هذا الفرض لتبسيط الحسابات، وبناءً على ذلك تعطى الطاقة الحركية في هذا الطور بالعلاقة [9]:

$$E_k = \frac{1}{2} f_{mr} \frac{N_i}{N_o} \rho_o \cdot \pi (r_p^2 - r_r^2) \left[\frac{dr_p}{dt} \right]^2 \quad (64.2)$$

ينتهي هذا الطور عندما تصطدم الصدمة المنعكسة بالمكبس المغناطيسي أي $r_r = r_p$.

III. طور الانضغاط البطيء (Slow Compression Phase):

يبدأ هذا الطور عندما تصطدم الصدمة المنعكسة بالمكبس المغناطيسي أي عندما تكون $r_r = r_p$ كما هو موضح في الشكل (4.2)، عندها يتشكل عمود حار وكثيف من البلازما المحرقة والمحصور بالمكبس المغناطيسي وبالتالي تبدأ مرحلة الإصدار. يتم وصف هذا الطور بمعادلة حركة المكبس المغناطيسي واستطالة عمود البلازما المتشكل بالإضافة إلى معادلة الدارة الكهربائية. كما تم تضمين التأثيرات الترموديناميكية [75] والامتصاص الذاتي للبلازما ومردود الإصدارات الإشعاعية [76] بالإضافة إلى خصائص الحزم الأيونية وتدفقات البلازما السريعة ضمن هذا الطور. يتم اعتبار زمن الانضغاط البطيء على أنه زمن عبور الاضطرابات الصغيرة عبر عمود البلازما والتي تبلغ حوالي (20 ns). يوضح الشكل (6.2) عمود البلازما المتشكل.



الشكل 6.2: يوضح طور الانضغاط البطيء.

تعطى سرعة المكبس المغناطيسي (بالعلاقة الآتية [9]) $(r_s = 0 \Rightarrow \frac{dr_s}{dt} = 0)$:

$$\frac{dr_p}{dt} = \frac{-\frac{r_p}{\gamma I} \frac{dI}{dt} - \frac{1}{\gamma + 1} \frac{r_p}{z_f} \frac{dz_f}{dt} + \frac{4\pi(\gamma - 1) r_p}{\mu \gamma (f_{cr} I)^2} \frac{dQ}{z_f \frac{dt}}{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \quad (65.2)$$

يعبر المقدار $\frac{dQ}{dt}$ عن تسخين جول ويتم حساب نسبة الحرارة النوعية γ كتابع لدرجة الحرارة اعتماداً على نموذج الحالة.

أما بالنسبة لسرعة استطالة عمود البلازما يمكن التعبير عنها بالعلاقة الآتية [9]:

$$\frac{dz_f}{dt} = -\frac{2}{\gamma + 1} \left(\frac{dr_s}{dt} \right)_{on-axis} \quad (66.2)$$

أما معادلة الدارة الكهربائية في هذا الطور تعطى بالعلاقة [9]:

$$\frac{dI}{dt} = \frac{V_o - \frac{\int I dt}{C_o} - \frac{\mu}{2\pi} \left(\ln \frac{b}{r_p} \right) \frac{dz_f}{dt} I f_{cr} + \frac{\mu}{2\pi} \frac{z_f}{r_p} \frac{dr_p}{dt} I f_{cr} - I (R_p f_{cr} + r_o)}{L_o + \frac{\mu}{2\pi} f_{cr} \left((\ln c) z_o + \left(\ln \frac{b}{r_p} \right) z_f \right)} \quad (67.2)$$

بينما يعطى الجهد المتعرض بالعلاقة [9]:

$$V = \frac{\mu f_{cr}}{2\pi} I \left[\left(\ln \frac{b}{r_p} \right) \frac{dz_f}{dt} - \frac{z_f}{r_p} \frac{dr_p}{dt} \right] + \frac{\mu f_{cr}}{2\pi} \left[\left(\ln \frac{b}{r_p} \right) z_f + (\ln c) z_o \right] \frac{dI}{dt} + R_p I f_{cr} \quad (68.2)$$

كما يعطى العمل المنجز بالعلاقة (59.2) أما الطاقة الحركية فتكون مهمة بالمقارنة بطاقة البلازما.

تعود أهمية هذا الطور إلى حصول الإصدارات الناتجة عن البلازما المحرقة جميعاً فيه، في هذا الطور

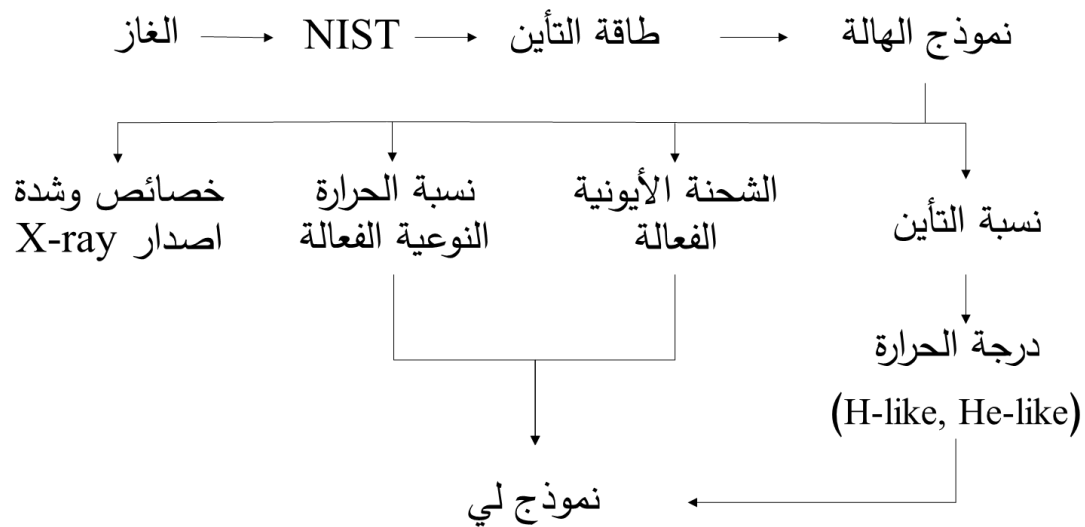
يحسب الإشعاع الخطي Q_L من العلاقة (13.2) حيث أن طاقة الأشعة السينية اللينة المتولدة داخل عمود

البلازما المتضيق تعتمد على كل من $T, r_p, z_p, Z_{eff}, Z_n, n_i, I_p$ ، وزمن حياة عمود البلازما المتضيق τ_p

[77]. تعطى العلاقة بين I_p و T بالشكل [12]:

$$T = \frac{\mu}{8\pi^2 k (n_i r_p^2)(1+Z_{eff})} I_p^2 \quad (69.2)$$

اعتماداً على نموذج الهالة، تم اعتبار (نموذج لي) أن مردود الأشعة السينية اللينة للنيون يكون مساوياً لمردود الإشعاع الخطي من أجل درجات الحرارة التي تقع ضمن مجال 200 - 500 eV [9, 10]. يوضح الشكل (7.2) المدخلات المطلوبة لنموذج الهالة والتي تعتمد على كمونات التأين وطيف إصدار الأشعة السينية لبلازما الغازات المأخوذة من قاعدة البيانات NIST [78]، ومخرجات نموذج الهالة تكون هي مدخلات لنموذج لي.



الشكل 7.2: يوضح المخطط مدخلات نموذج الهالة ومخرجاتها التي تعتبر مدخلات لنموذج لي [78].

IV. طور انهيار العمود محورياً (Expanded Column Axial Phase):

يتحلل في هذا الطور عمود البلازما بعد أن يتوسع ويتلاشى، لا يتضمن هذا الطور أي إصدارات لذلك لا يؤخذ بعين الاعتبار ضمن نموذج كود لي.

2.3.2. الحسابات العددية (Numerical Computation):

1.2.3.2. الإجراء الخاص باستخدام الكود (Procedure for Using the Code):

يجب تهيئة كود نموذج لي قبل اجراء التجارب العددية للحصول على محاكاة حقيقية وحساب بارامترات البلازما المحرقة الحركية والإشعاعية [12] وذلك عن طريق إدخال بارامترات الجهاز المدروس بالإضافة إلى بارامترات النموذج التي تم تعريفها سابقاً في لوحة التهيئة المخصصة في الكود كما هو موضح في الجدول 1.2.

الجدول 1.2: يبين لوحة إدخال بارامترات الجهاز المدروس في كود نموذج لي.

L_o (nH)	C_o (μ F)	b (cm)	a (cm)	z_o (cm)	r_o (m Ω)
f_m	f_c	f_{mr}	f_{cr}	Model Parameters	
V_o (kV)	P_o (Torr)	Molecular Wt	Atomic Num	At=1, Mol=2	Operational Parameters

تقسم بارامترات الإدخال إلى:

بارامترات الدارة الكهربائية الخارجية: L_o, C_o, r_o والتي تعبر عن مقاومة الدارة الكهربائية وسعة بنك المكثفات وتحريضية الدارة الخارجية على الترتيب.

بارامترات الأنبوب: b, a, z_o تعبر عن طول ونصف قطر المصعد ونصف قطر المهبط على الترتيب.

بارامترات النموذج: f_m, f_c, f_{mr}, f_{cr} (الموصوفة في الفقرة 1.1.3.2).

بارامترات التشغيل: V_o, p_o وهما ضغط الغاز وجهد التشغيل على الترتيب.

بارامترات الغاز: العدد الذري، الوزن الذري، عدد الذرات في المول الواحد.

بعد ادخال بارامترات الجهاز المدروس نقوم بإجراء مواءمة التيار المقاس تجريبياً إلى التيار المحسوب

عددياً وذلك بتعديل بارامترات النموذج للحصول على توافق جيد بين المنحنيين.

في البداية نقوم بمواءمة الجزء من منحنى التيار الذي يعطي معلومات عن الطور المحوري وذلك بتعديل

بارامترات الطور المحوري f_m, f_c كما هو موضح في الشكل (8.2)، حيث تتم مطابقة الجزء الصاعد من منحنى

التيار (الجزء 1) ثم تتم مطابقة الجزء العلوي من المنحني (الجزء 2) بالإضافة لذروة التيار (الجزء 3). بعد ذلك

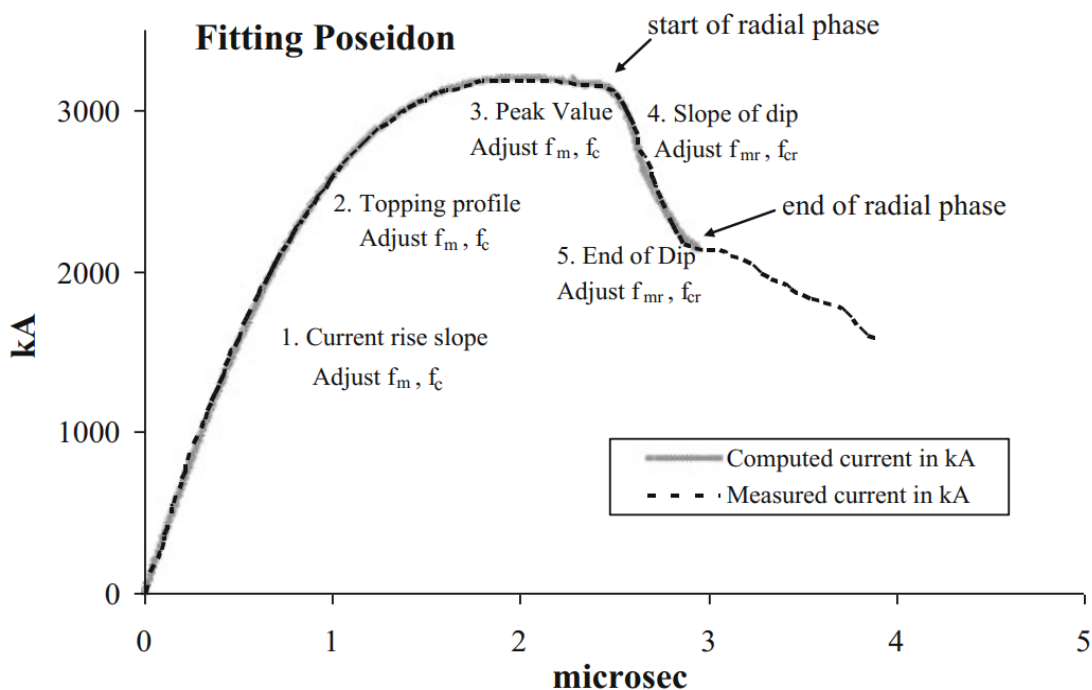
نقوم بمواءمة الجزء المعبر عن الطور القطري من منحنى التيار وذلك بتعديل بارامترات الطور القطري f_{mr}, f_{cr}

حيث تتم مطابقة الانحدار (الجزء 4) من المنحني ثم عمق الانحدار (الجزء 5) والتي تعبر عن نهاية الطور

القطري. كما يمكن تعديل كل من L_o و r_o (إذا تطلب الأمر) للحصول على أفضل مواءمة. يجدر الملاحظة أنه

لا تتم الموائمة لجزء منحنى التيار ما بعد نهاية الطور القطري وذلك لعدم وجود إصدارات عند هذا الجزء [79،

بعد الحصول على توافق جيد بين التيار التجريبي والمحسوب يمكن القول إن نتائج النموذج تعبر بواقعية عن بارامترات البلازما التجريبية وتعطي توصيفاً دقيقاً للعمليات داخل جهاز البلازما المحرقة. بالإمكان إجراء التجارب العددية لدراسة تأثير كل من الضغط أو الجهد أو طول المصعد على بارامترات البلازما المحرقة، يتم تثبيت بارامترات المواءمة وإدخال قيم مختلفة لكل من الضغط أو الجهد أو طول المصعد وإجراء الحسابات ومناقشة النتائج.



الشكل 8.2: يوضح شكل منحنى التيار المحسوب والمقاس بعد عملية المواءمة [9].

يتم إدخال البارامترات المذكورة أعلاه بواسطة برنامج الاكسل، حيث يوضح الشكل (9.2) الواجهة المستخدمة في عملية المواءمة، والتي تحتوي بارامترات الدخل وبارامترات الخرج الموضحة بالسطر 17، من أهم بارامترات الخرج: ذروة تيار تفريغ بنك المكثفات I_{peak} والتيار المتدفق ضمن عمود البلازما المتضيق I_p والسرعة المحورية v_a وسرعة المكبس المغناطيسي v_p وسرعة جبهة الصدم v_s والكثافة العددية للأيونات n_i ومعامل السرعة $SF = I_{peak} / ap_o^{1/2}$ وكثافة التيار $ID = I_{peak} / a$ والجهد المتعرض V_{max} ومردود إصدار الأشعة السينية اللينة Y_{srr} ومردود الإصدار الخطي Y_{line} بالإضافة إلى العديد من البارامترات الأخرى.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	
1	Plasma Focus Computation: 5 Phase Model by S Lee: RADPFV5.16							16-Feb-22 (adapted from 1984;1991 ICTP Spring College version in 2000; Oct 2005 include tr								
2	I. Axial Phase II. Radial Inward Shock III. Radial Reflected Shock IV. Slow Compression Phase V. Expanded Large Column							To run: Click cursor on blank cell; the								
3	Device: UNU ICTPP (Control Panel)				Modified Yn model; Feb 08			beam-target: ni 12 z f^2 v max^0.5 sig				I=1startquesol 3*VRMAX		Includes plasma self-abs		
4	L ₀ (nH)	C ₀ (μF)	b (cm)	a (cm)	z ₀ (cm)	r ₀ (mΩ)	Machine parameters: To run, set p'meters; or fill in next cell 1 or 2 or 3 for UNU, NX2 or PF10									
5	17.7	156	9.5	6.55	30	1.6	Yn calibration point: 0.5MA 6x10^9									
6	f _m	f _c	f _{mr}	f _{cr}	Model Parameters		TAPER?	taperstart	endrad	Y _a Y _{b,t} Y _s Y _{max} in J (At endindica						
7	0.305	0.62	0.5	0.44			Y=1 N=0	(cm)	(cm)	9.39E+03 1.02E+11 1.02E+11 4.32E-01						
8	V ₀ (kV)	P ₀ (Torr)	Molecular W	Atomic Num	At=1, Mol=2	Operational	30Oct08: Gases: H2, D2, D-T(1:1), He, N2, Ne, Ar, Kr, Xe									
9	60	3	4	1	2	Parameters	(Vary model parameters until best agreement is obtained between exp & computed current traces)									
10	RHO	I ₀ A	t ₀ s	t ₀ s	ch v, ms-1	Ch v _{max} ms-1	Ch t _{pinch} s	Tridialstart (us)		Radial Durations (us)		Pinch Duration (ns)		Tridialend(us)		
11	6.99E-04	5.63E+06	1.66E-06	7.93E-07	3.78E+05	2.95E+05	2.22E-07	2.210		0.506		78.830		2.716		
12	c	F	AL	10	BE	RESF	ALT									
13	1.450	4.580	2.095	3.571	0.781	0.150	1.636									
14	Dataline															
15	E ₀	RESF	c=b/a	L ₀	C ₀	r ₀	b	a	z ₀	V ₀	P ₀	I _{peak}	I _{pinch}	T _{pinch} min	T _{pinch} max	
16	kJ			nH	uF	mΩ	cm	cm	cm	kV	Torr	kA	kA	10^-6	10^-6	
17	280.8		0.2	1.5	17.7	156.0	1.6	9.5	6.5500	30.0	60	3.0	3084	386	3.21 3.63	
18	TR	IR	VR	ZR	ZZR	TR	TRRadial	IR	VR	KSR	KPR	ZFR	SSR	SPR	SZR	
19	microsec	kA	kV	cm	cm/us	usec	ns	kA	kV	mm	mm	mm	cm/us	cm/us	cm/us	
20	3.32E-03	1.13E+01	0.00E+00	1.78E-04	5.35E-02	2.21E+00	3.17E-01	3.06E+03	1.04E+01	6.54E+01	6.55E+01	3.88E-02	-1.60E+01	-2.96E+00	1.20E+01	
21	Fig 1. Discharge Current															
22	Fig 2. Axial Trajectory & Speed															
23	Fig 3. Radial Trajectories															
24	Fig 4. Tube voltage kV															
25	Fig 5. Radial Speeds															
26	Fig 6. Plasma Temperature															
27																
28																
29																
30																
31																
32																
33																
34																
35																
36																
37																
38																
39																
40																
41																
42																
43																
44																
45																
46	8.97E-02	3.02E+02	3.22E-01	7.64E-02	1.65E+00	2.22E+00	8.57E+00	3.07E+03	1.67E+01	6.41E+01	6.43E+01	1.04E+00	-1.63E+01	-1.39E+01	1.22E+01	
47	9.31E-02	3.13E+02	3.47E-01	8.21E-02	1.71E+00	2.22E+00	8.89E+00	3.07E+03	1.68E+01	6.41E+01	6.43E+01	1.08E+00	-1.63E+01	-1.39E+01	1.22E+01	
48	9.64E-02	3.24E+02	3.73E-01	8.80E-02	1.77E+00	2.22E+00	9.20E+00	3.07E+03	1.68E+01	6.40E+01	6.42E+01	1.12E+00	-1.63E+01	-1.39E+01	1.22E+01	

الشكل 9.2: يوضح واجهة الكود باستخدام واجهة الإكسل.

في كل مرة يتم فيها تشغيل الكود يمر بدورة حساب كاملة يتم الحصول على خصائص البلازما المحرقة.

في عام 2006، تم إجراء تعديل على الكود ليأخذ في الاعتبار هندسة المصعد المدبب [26] حيث تم

دمج تناقص نصف قطر المصعد في الكود وفقاً للعلاقة التالية:

$$a = a_s \frac{z - z_s}{z_0 - z_s} (a_s - a_e) \quad (70.2)$$

حيث a هو نصف القطر الأساسي للمصعد، a_s نصف قطر المصعد عند بداية التدبب، a_e هو نصف قطر المصعد عند نهاية التدبب، z_0 هو طول المصعد، z هو الموضع المحوري لغمد تيار البلازما و z_s هي المسافة المحورية التي يبدأ عندها التدبب.

يتم إجراء الحسابات المتعلقة بالمصعد المدبب عن طريق إدخال رقم 1 في لوحة التهيئة المخصصة للمصعد المدبب في الكود.

4.2. الخاتمة (Conclusion):

تم في هذا الفصل تقديم بعض التفاصيل عن نموذج الهالة المستخدم كدخل لنموذج لي العددي ومن ثم تقديم تفاصيل كاملة عن نموذج لي العددي والذي يتألف من 5 أطوار، وهي الطور المحوري والطور القطري والذي بدوره يحوي أربعة أطوار فرعية. بالنسبة لنموذج الهالة تم عرض المعادلات التي يتم استخدامها في حساب خصائص الأشعة السينية اللينة المُدخلة في ملف كود لي، أما بالنسبة لنموذج لي فقد تم شرح طريقة اشتقاق المعادلات الرياضية المولدة للنموذج. وتوضيح الإجراءات الخاص لاستخدام الكود قبل إجراء الحسابات العددية. كما تم شرح عملية موازنة منحنى التيار التجريبي مع المحسوب، والتعرف على واجهة الكود المستخدم وأهم مميزاته ومخرجاته.

الفصل الثالث (Chapter III)

النتائج والمناقشة

(Results and Discussions)

1.3. المقدمة (Introduction):

قمنا بإجراء العديد من التجارب العددية باستخدام كود نموذج لي إصدار (RADPFV5.16) على أجهزة بلازما محرقية مختلفة الطاقة من نوع Mather بالاعتماد على منحنيات التيار المقاسة تجريبياً، وذلك بهدف دراسة تأثير كل من تعديل شروط التشغيل (ضغط غاز التشغيل وجهد الشحن) وهندسة المصعد (طول المصعد) وتصميم المصعد (مصعد أسطواني ومصعد مدبب) على مردود الأشعة السينية اللينة وباستخدام غاز النيون كغاز تشغيل، وتم مقارنة النتائج المحسوبة مع النتائج التجريبية المتوفرة.

2.3. التجارب العددية (The Numerical Experiment):

لإجراء التجارب العددية، قمنا أولاً بإنشاء ملف دخل للكود بحيث يعمل كجهاز بلازما محرقية محدد، وذلك بإجراء عملية مواءمة لمنحني تيار التفريغ التجريبي المتوفر من الأبحاث السابقة مع منحني تيار التفريغ المحسوب. ومن خلال توفر البارامترات الهندسية والكهربائية للجهاز المدروس يتم تجهيز الكود للعمل. تمت عملية المواءمة بتعديل بارامترات النموذج لكل من الطورين المحوري والقطري بالإضافة إلى تعديل كل من التحريض والمقاومة عند الحاجة للحصول على أفضل مواءمة (تطابق) بين التيارين التجريبي والمحسوب كما تم توضيحه في الفصل الثاني في القسم 2.3.2. تم إجراء التجارب العددية على أجهزة ذات مصعد أسطواني وأخرى ذات مصعد مدبب وذلك لمعرفة تأثير تغيير شكل المصعد على مردود الأشعة السينية اللينة.

1.2.3. دراسة مردود الأشعة السينية اللينة من أجل مصعد أسطواني:

(Study of Y_{SXR} for Cylindrical Anode):

قمنا بإجراء تجارب عديدة على 6 أجهزة بلازما محرقية مختلفة الطاقة ذات مصعد أسطواني وهي NX2, INTI, UNU/ICTP, APF, NX1, PF7 (حيث تتوفر لهذه الأجهزة جميعاً نتائج تجريبية لمردود الأشعة السينية اللينة باستخدام غاز النيون كغاز تشغيل). يوضح الجدول 1.3 أجهزة البلازما المحرقية ذات المصعد الأسطواني وطاقاتها بالإضافة إلى بارامترات الكهربية والهندسية التي جرى إدخالها في الكود واستخدمت في عملية المحاكاة.

الجدول 1.3: يعرض أجهزة البلازما المحرقية وطاقاتها بالإضافة إلى كل من البارامترات الكهربية والهندسية المدخلة في الكود والمستخدم في عملية محاكاة الأجهزة ذات المصعد الأسطواني.

Device	E_o (kJ)	L_o (nH)	C_o (μ F)	r_o (m Ω)	V_o (kV)	p_o (Torr)	b (cm)	a (cm)	z_o (cm)
NX2 (4 cm) [10]	1.9	15	28.8	1.2	11.5	6	4	1.9	4
INTI [81]	2.2	116	30	13.4	12	2	3.2	0.95	16
UNU/ICTP [82]	2.9	108	30	12	14	2.8	3.2	0.95	16
APF [83]	3.0	128	36	0.8	13	4	2.2	1	14.8
NX1 [10]	3.1	20	31.2	10	14	9	2.5	1.5	5.4
PF7 [84]	3.9	27.5	54	11.6	12	0.4	4.1	2.6	7

1.1.2.3. دراسة مردود الأشعة السينية اللينة بدلالة ضغط غاز التشغيل:

(Study of Y_{SXR} Versus Operating Pressure):

للحصول على معلومات حول حركية البلازما وبارامترات عمود البلازما المتضيق قمنا بإجراء تجارب عديدة لدراسة سلوك مردود الأشعة السينية اللينة بدلالة ضغط غاز التشغيل، ومن ثم أجرينا مقارنة بين المردود المحسوب عددياً في هذا العمل والمردود المقاس تجريبياً في الأبحاث المنشورة سابقاً للأجهزة المتوفرة.

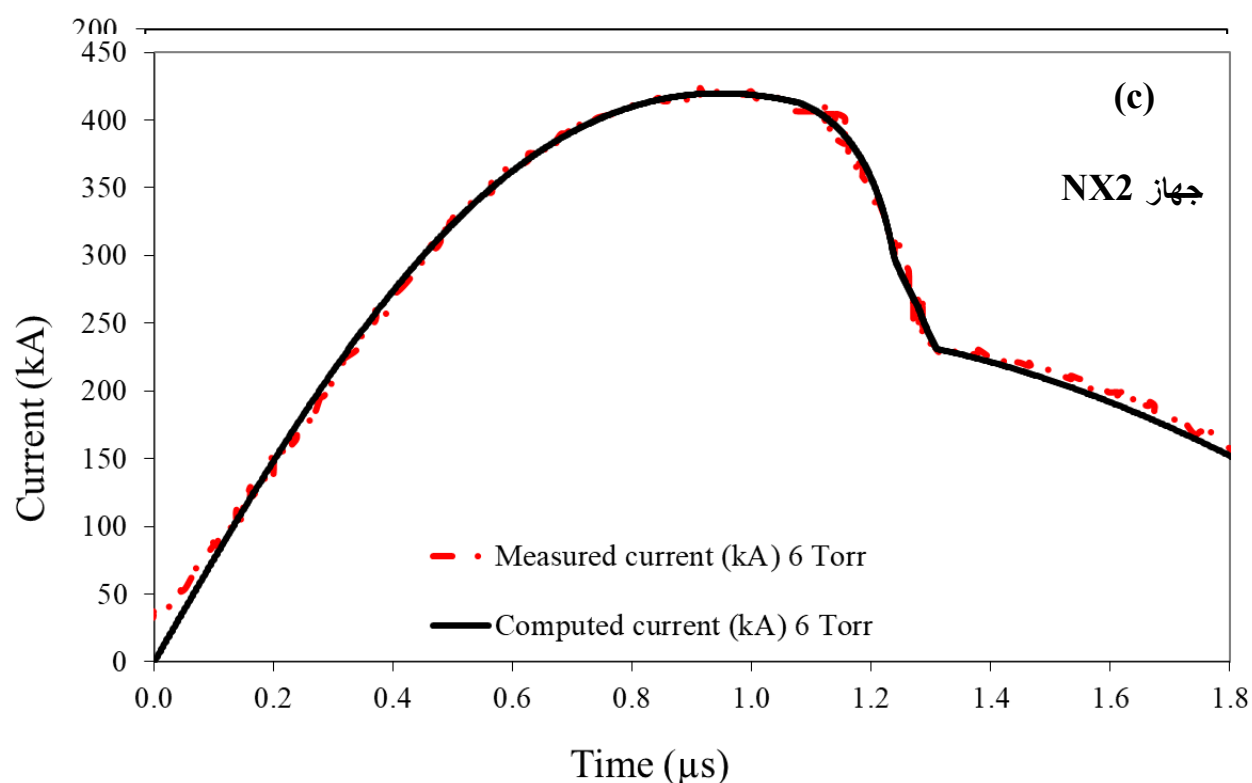
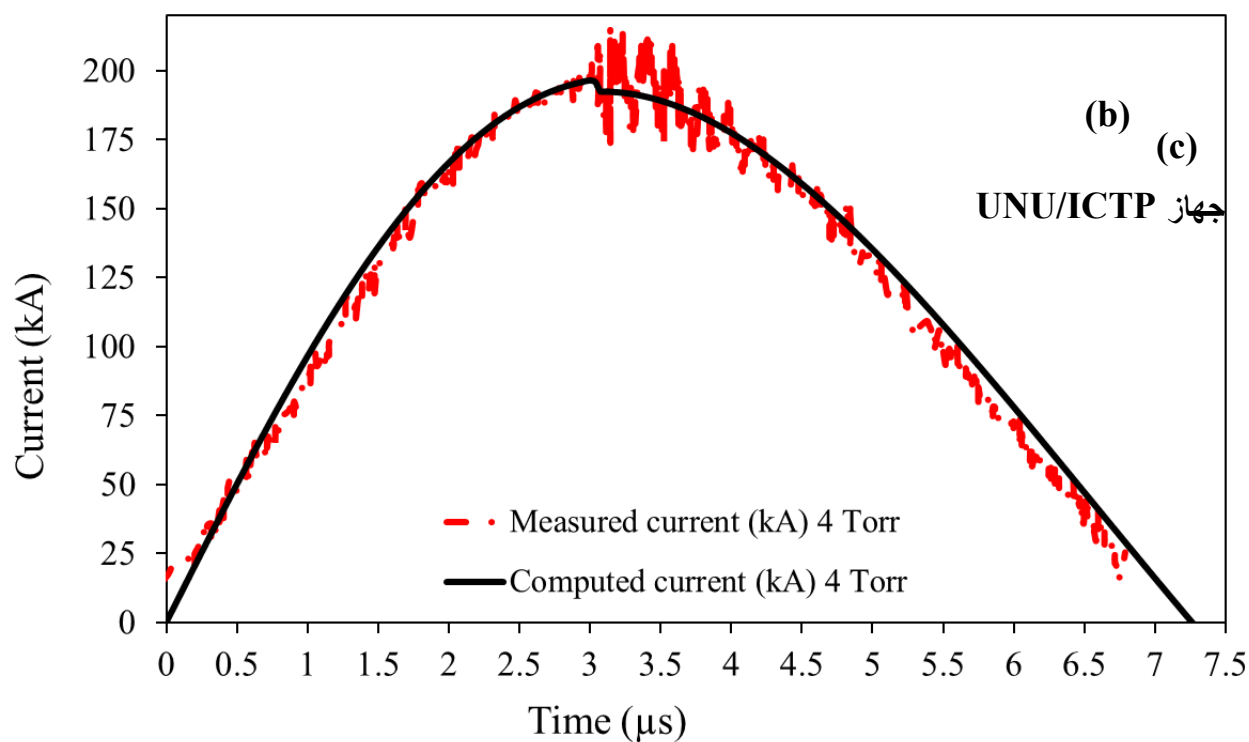
يوضح الشكل 1.3 منحنيات المواممة بين التيارين التجريبي المتوفر والتيار المحسوب في هذا العمل

لأجهزة بلازما محرقية مختلفة (a) جهاز APF (13 kV) عند الضغط 4 Torr [83] (b) جهاز UNU/ICTP

عند الضغط 2.8 Torr [82] (c) جهاز NX2 (11.5 kV) عند الضغط 6 Torr وطول مصعد 4 cm [10]

حيث تم تحديد الضغط الابتدائي (ضغط المواممة) لكل جهاز بالاعتماد على ضغط التشغيل التجريبي، في النهاية

يتم تثبيت بارامترات المواممة والبدء بإجراء التجارب العددية.



الشكل 1.3: يوضح منحنيات المواءمة بين التيارين التجريبي والمحسوب لأجهزة البلازما المحرقة المدروسة.

يوضح الشكل 1.3 أن هناك توافقاً جيداً بين منحنيات التيار المحسوبة عددياً والمقاسة تجريبياً. فضلاً

عن ذلك، تُعد النتائج العددية التي تم الحصول عليها باستخدام كود نموذج لي هي نتائج جيدة، ولهذا السبب فهي

تصف بشكل جيد حركية البلازما المحرقة، وتوفر قيماً تقريبية لبارامترات عمود البلازما المتضيق. تجدر الإشارة إلى أن إجراء المواءمة يتم حتى نهاية الطور القطري، وبعدها تبدأ مرحلة الاسترخاء، وفي هذه المرحلة لا توجد أهمية للمواءمة لأنه لا يوجد إصدارات.

يُظهر الشكل 1.3 (a) أن الضجيج الكهربائي الذي يبدأ بعد الزمن $3 \mu s$ يشير إلى وصول النظام إلى حالة التجاوب. يمكن لهذا الضجيج الكهربائي أن يخفي انخفاض كبير في شدة التيار وهو انخفاض مؤقت ناتج عن تغيرات في مقاومة البلازما أثناء طور الانضغاط أو خلال العمليات الحركية الأخرى. هذا الانخفاض في التيار له أهمية علمية كبيرة لأنه يمكن أن يشير إلى حدوث عدم استقرار في البلازما أو فقدان طاقة، ولكن يصعب تمييزه بسبب هيمنة الضجيج. يظهر هذا الضجيج عادةً في منحنيات التيار المقاسة تجريبياً لأجهزة البلازما المحرقة عالية التحريضية (أكثر من 100 nH) [85].

يُبين الجدول 2.3 ملخص لبارامترات النموذج المدخلة في الكود لمحاكاة مردود الأشعة السينية اللينة الصادرة من كل جهاز من الأجهزة الستة.

الجدول 2.3: يبين بارامترات النموذج لأجهزة البلازما المحرقة الستة المدروسة في الجدول 1.3 والمستخدم لمحاكاة مردود الأشعة السينية.

Device	f_m	f_c	f_{mr}	f_{cr}
NX2 (4 cm) [10]	0.04	0.6	0.07	0.70
INTI [81]	0.03	0.7	0.22	0.75
UNU/ICTP [82]	0.05	0.7	0.26	0.85
APF [83]	0.01	0.5	0.10	0.48
NX1 [10]	0.07	0.7	0.09	0.85
PF7 [84]	0.51	0.7	0.37	0.58

من الجدول 2.3 يمكن ملاحظة أن الجهاز PF7 يملك قيم f_m و f_{mr} مرتفعة بشكل غير عادي عند المقارنة بالأجهزة الأخرى المدروسة، ويُعزى ذلك إلى كون هذا الجهاز يعمل عند ضغوط أقل بكثير من الأجهزة الأخرى.

بعد الانتهاء من عملية المواءمة يتم تثبيت بارامترات النمذج والبدء بإجراء التجارب العددية. قمنا بإجراء تجارب عددية على جهاز (13 kV) APF باستخدام ضغوط أولية مختلفة لغاز النيون (1-12 Torr). يوضح الجدول 3.3 البارامترات الحركية التي تم الحصول عليها بدلالة الضغط لجهاز APF. نلاحظ من الجدول 3.3 أن I_{peak} يزداد بارتفاع الضغط من 162 kA إلى 204 kA وذلك بسبب انخفاض المقاومة الديناميكية (المتصلة في معدل التغير في تحريضية البلازما والذي ينتج عنها مقاومة ديناميكية مكافئة لـ $0.5 dl/dt$) والتي تحدث بسبب انخفاض سرعة غمد التيار. إن زيادة الضغط تؤدي إلى زيادة الكتلة التي يتم جرفها بواسطة غمد تيار البلازما وبالتالي انخفاض سرعة الغمد في الطورين المحوري والقطري. ومع ذلك، فإن I_p يزداد مع ارتفاع الضغط حتى يصل إلى قيمة عظمى تقترب من 93 kA عند 5 Torr، وبعد ذلك ينخفض قليلاً. يعود السبب في هذا السلوك إلى انزياح زمن حدوث التضيق ليصبح أقرب إلى زمن وصول تيار تفريغ بنك المكثفات إلى ذروته ويحدث هذا بسبب تباطؤ حركة غمد التيار تدريجياً مع زيادة الضغط نتيجة لزيادة الكتلة التي يتم جرفها بواسطة غمد تيار البلازما. تجدر الإشارة إلى أنه من المهم أن يتزامن أقصى انضغاط لعمود البلازما مع ذروة تيار التفريغ للحصول على تسخين فعال لعمود البلازما وبالتالي زيادة مردود الإصدار وتحقيق أفضل كفاءة ممكنة [85].

الجدول 3.3: يبين البارامترات الحركية المحسوبة عددياً بدلالة ضغط غاز النيون لجهاز APF.

p_o (Torr)	I_{peak} (kA)	I_p (kA)	T_p ($10^6 K$)	v_a (cm/ μs)	v_s (cm/ μs)	v_p (cm/ μs)	r_p (cm)	z_p (cm)	n_i ($10^{23}/m^3$)
1.0	162	77	6.3	13.5	29.2	20.2	0.10	1.39	1.3
1.5	174	82	4.9	12	27.1	18.1	0.09	1.38	2.0
2.0	182	85	4.0	11	26.0	16.9	0.09	1.36	2.8
2.5	187	88	3.4	10	25.4	16.4	0.09	1.35	3.7
3.0	191	90	3.0	9.5	25.3	15.9	0.08	1.33	4.9
3.5	194	91	2.6	9.0	24.8	15.5	0.08	1.31	6.3
4.0	195	92	2.4	8.6	23.1	15.1	0.07	1.32	8.6
4.5	196	92.5	2.1	8.2	21.7	14.8	0.07	1.33	11.9
5.0	197	92.8	1.9	7.9	20.6	14.4	0.06	1.34	14.7
5.5	198	92.7	1.8	7.6	19.6	14.1	0.06	1.33	15.3
6.0	199	92.4	1.6	7.4	18.9	13.8	0.07	1.32	14.8
7.0	201	92.3	1.4	6.9	17.3	12.9	0.07	1.31	16.4
8.0	202	91.3	1.2	6.5	15.9	12.3	0.07	1.30	20.5
9.0	203	90	1.0	6.2	14.8	11.7	0.06	1.28	24.4
10.0	203	89	0.9	5.9	13.9	11.1	0.06	1.27	28.5
11.0	204	87	0.8	5.7	13.2	10.5	0.06	1.25	32.7

12.0	204	85	0.7	5.4	12.6	9.9	0.06	1.24	36.8
------	-----	----	-----	-----	------	-----	------	------	------

نلاحظ من الجدول 3.3 أيضاً أنه عند الضغط الأمثل $p_o = 5$ Torr أن البارامترات الأخرى تأخذ القيم

$$n_i = 14.7 \times 10^{23}/\text{m}^3 \text{ و } T_p = 1.92 \times 10^6 \text{ K و } v_a = 7.9 \text{ cm}/\mu\text{s و } r_p = 0.06 \text{ cm و } z_p = 1.34 \text{ cm}$$

وكما هو متوقع، عند زيادة ضغط الغاز تستمر قيم السرعتين المحورية والقطرية في الانخفاض نتيجة لزيادة الكثافة.

تلعب كل من هاتين السرعتين دوراً مهماً في تحقيق المردود الأعلى للأشعة السينية اللينة الصادرة من البلازما

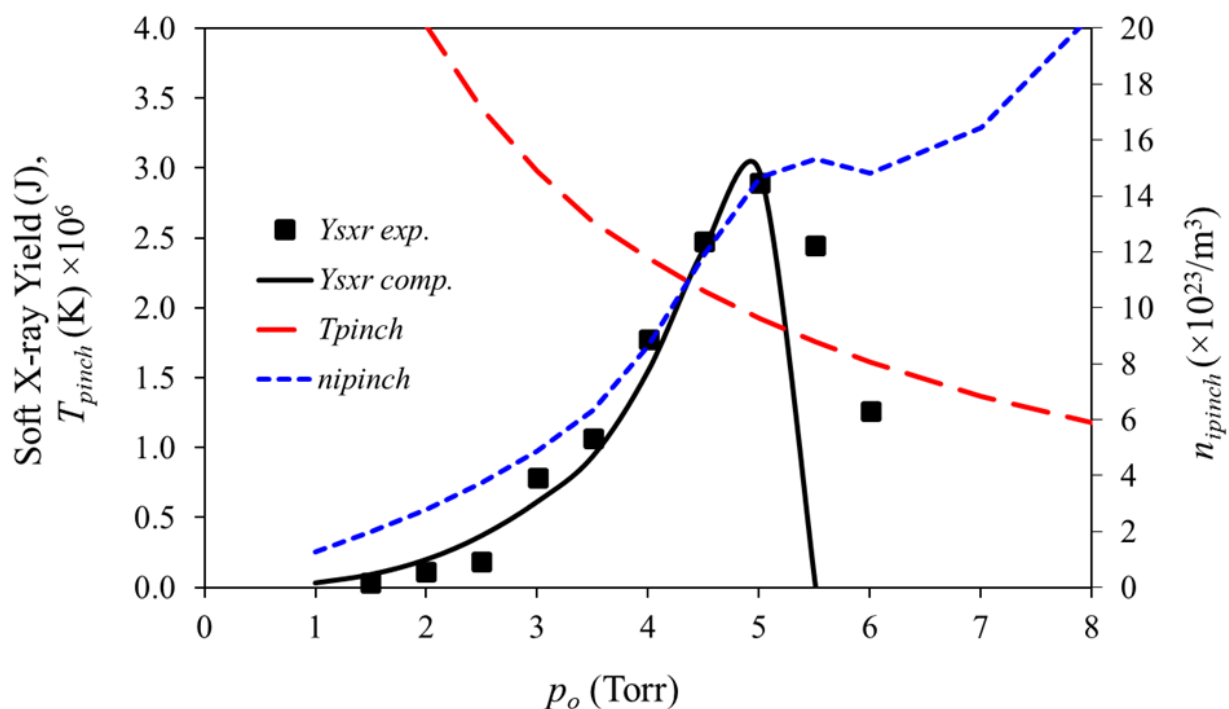
المحرقة، حيث يتطلب تشكيل عمود بلازما متضيق طاقة كافية للوصول إلى حالات التأين العالية (التأين الشبيه

باليهيليوم والتأين الشبيه بالهيدروجين) مما يستلزم قيمة محددة للسرعة القطرية [15].

يعرض الشكل 2.3 مقارنة لكل من القيم التجريبية والمحسوبة لمردود الأشعة السينية اللينة التي تم

الحصول عليها عند جهد تشغيل 13 kV لجهاز APF [83]، بالإضافة إلى الكثافة العددية لأيونات البلازما

ودرجة حرارة عمود البلازما المتضيق بدلالة ضغط غاز التشغيل.



الشكل 2.3: يوضح المردود التجريبي والمحسوب لإصدار الأشعة السينية اللينة، وكذلك كثافة عدد الأيونات ودرجة حرارة عمود البلازما المتضيق بدلالة ضغط غاز النيون لجهاز APF.

من الشكل 2.3 نلاحظ أن الكثافة العددية لأيونات سوف تزداد بزيادة الضغط إلى أن تصل إلى قيمة

حدية تصبح عندها الكثافة تقريباً ثابتة، ثم تنخفض قليلاً (حيث أن الكثافة العددية لأيونات تعتمد على حجم عمود

البلازما) وذلك لأن زيادة الضغط تسبب زيادة في الكثافة العددية للأيونات ضمن عمود البلازما المتضيّق وعندما نصل إلى ضغط التوازن تصبح كثافة الأيونات ثابتة تقريباً وزيادة الضغط إلى قيم أعلى تؤدي إلى زيادة عدد ذرات الغاز ضمن عمود البلازما وبالتالي إلى زيادة نصف قطره (أي زيادة في حجم عمود البلازما والذي يؤدي إلى نقصان الكثافة وبالتالي انخفاض المردود)، إن زيادة الكثافة تستمر بعد زيادة الضغط عند قيمة أعلى من 6 Torr وذلك لأن الإصدار الإشعاعي مستمر ولكن هذا الإصدار لا يمثل إصدار أشعة سينية لينة حيث نهتم بسلوك الكثافة ضمن نافذة درجة الحرارة التي تصدر عندها الأشعة السينية اللينة فقط.

من الجدول 3.3 والشكل 2.3، يمكن ملاحظة أن أعلى قيمة لـ Y_{sxr} التجريبية والمحسوبة بلغت 3.06 J تقريباً عند ضغط 5 Torr، وبالتالي نلاحظ توافق جيد بين النتائج التجريبية والمحسوبة وهذه التوافق يعزز من مصداقية التجارب العددية التي تم إجراؤها، كما يمكن ملاحظة أن قيمة المردود الأعظمي تقابل أصغر نصف قطر لعمود البلازما المتضيّق 0.06 cm وكثافة أيونات $14.7 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$.

نلاحظ من الشكل 2.3 أنه عند الضغوط الأقل من الضغط الأمثل تكون قيم Y_{sxr} منخفضة نتيجة لانخفاض كثافة عمود البلازما نسبياً إضافة إلى انخفاض سرعة انضغاط البلازما، بينما عند زيادة ضغط الغاز يزداد Y_{sxr} حتى يصل إلى قيمته العظمى ثم يبدأ بالتناقص التدريجي ويعود هذا الانخفاض إلى انخفاض درجة حرارة عمود البلازما إلى ما دون الحد المطلوب لتوليد الأيونات الشبيهة بالهيليوم والهيدروجين وذلك بسبب انخفاض التسخين بالصدمة. وبالتالي يمكن القول إن هناك ضغطاً مثالياً يقابل أعلى مردود للأشعة السينية اللينة وذلك عندما تكون درجة حرارة عمود البلازما المتضيّق قريبة من نافذة درجة الحرارة المطلوبة لإصدار الأشعة السينية من غاز النيون (200 - 500 eV) وتكون كثافة عمود البلازما مرتفعة بما فيه الكفاية وتصل كفاءة جهاز البلازما المحرقة إلى حدها الأقصى أي عندما يحدث التضيّق عند ذروة تيار التفريغ. بصورة عامة، يتزامن أعلى مردود للأشعة السينية اللينة مع الضغط الأمثل المطلوب لنقل أعلى قدر من الطاقة إلى عمود البلازما المتضيّق وذلك عن طريق I_p .

يعتمد أصغر نصف قطر لعمود البلازما المتضيّق على تأثيرات نسبة الحرارة النوعية بالإضافة إلى أقصى معدلات الفقد الإشعاعي [85]. في هذه الحالة، يتم إصدار جزء كبير من الطاقة الحرارية لعمود البلازما المتضيّق

مما يؤدي إلى تبريد إشعاعي كبير وتعزيز عملية الانضغاط قطرياً حيث يصل نصف قطر عمود البلازما المتضيق إلى قيمته الدنيا بينما تبلغ كثافة الطاقة في عمود البلازما المتضيق حدها الأقصى.

من الجدير بالذكر أن العلاقة بين مردود الأشعة السينية اللينة والضغط يتم تحديدها من خلال التفاعل

بين التأثيرات المتنافسة لكل من T_p ، n_i ، r_p ، I_p وفقاً للمعادلة 13.2.

تم إجراء دراسة تفصيلية على أجهزة بلازما محرقية أخرى وذلك باستخدام نفس منهجية المواءمة. قمنا

بدراسة سلوك مردود الأشعة السينية اللينة بدلالة ضغط غاز التشغيل والحصول على المردود الأعظمي المقابل

للضغط الأمثل من أجل كل جهاز من أجهزة البلازما المحرقية المدروسة. تم تلخيص النتائج لجميع الأجهزة

المدروسة في هذا العمل فيما يتعلق بحركية البلازما وبارامترات عمود البلازما المتضيق بالقرب من الضغط الأمثل

في الجدول 4.3.

الجدول 4.3: ملخص بارامترات عمود البلازما المتضيق بدلالة الضغط لأجهزة البلازما المحرقية المدروسة.

Device	E_o (kJ)	p_o (Torr)	I_{peak} (kA)	I_p (kA)	T_p (10 ⁶ K)	v_a (cm/μs)	v_s (cm/μs)	v_p (cm/μs)	r_p (cm)	z_p (cm)	n_i 10 ²³ /m ³
NX2 [10] $V_o = 11.5$ kV $z_o = 4$ cm	1.9	5.7	416	191	2.9	5.8	24.6	16.3	0.22	2.60	3.3
		6	418	188	2.6	5.6	24.4	15.9	0.20	2.61	4.3
		7	421	182	2.1	5.3	22.0	15.1	0.16	2.67	7.5
INTI [81] $V_o = 12$ kV $z_o = 16$ cm	2.2	2	145	101	2.8	7.4	24.8	15.7	0.08	1.35	7.6
		2.5	146	97	2.1	6.7	21.4	14.7	0.06	1.38	14.7
		3	148	93	1.8	6.1	18.6	13.7	0.07	1.36	14.6
UNU/ICTP [82] $V_o = 14$ kV $z_o = 16$ cm	2.9	2.7	180	124	2.6	6.2	24.8	15.5	0.07	1.38	14.0
		3	180	120	2.2	5.8	22.3	14.9	0.06	1.40	20.5
		3.5	182	112	1.6	5.4	19.1	13.9	0.07	1.38	19.0
APF [83] $V_o = 13$ kV $z_o = 14.8$ cm	3.0	4.5	196	92.5	2.1	8.2	21.7	14.8	0.07	1.33	11.9
		5	197	92.8	1.9	7.9	20.6	14.4	0.06	1.34	14.7
		5.5	198	92.7	1.8	7.6	19.6	14.1	0.06	1.33	15.3
NX1 [10]	3.1	9	379	231	3.1	6.2	24.7	16.3	0.15	2.10	10.4

$V_o = 14 \text{ kV}$		10.5	381	222	2.4	5.8	23.5	15.5	0.12	2.14	18.0
$z_o = 5.4 \text{ cm}$		12	383	213	2.0	5.4	21.0	14.6	0.13	2.12	17.4
PF7 [84]		0.3	338	153	3.5	6.4	25.3	16.8	0.29	4.05	1.0
$V_o = 12 \text{ kV}$	3.9	0.4	342	147	2.5	5.7	23.5	15.4	0.24	4.10	1.9
$z_o = 7 \text{ cm}$		0.5	345	140	1.9	5.1	19.9	14.1	0.17	4.27	4.7

تم إجراء مقارنة بين Y_{sxr} المحسوبة والتجريبية لأجهزة البلازما المحرقة الستة المدروسة بالقرب من الضغط الأمثل لأعلى مردود وقد وجد أن هناك توافقاً جيداً كما هو موضح في الجدول 5.3. نلاحظ أيضاً أن أكثر معلمات المواءمة دقة (خاصة في الطور القطري f_{mr} و f_{cr}) لكود نموذج لي (أحدث إصدار RADPFV5.16) المستخدم في هذا العمل يعطي قيم للمردود أكثر قابلية للمقارنة مع القيم التجريبية من تلك القيم المنشورة المحسوبة سابقاً لأجهزة NX2 و INTI و UNU/ICTP (الجدول 5.3).

الجدول 5.3: مقارنة قيم مردود الأشعة السينية اللينة التجريبية والمحسوبة في هذا العمل والتجريبية والمحسوبة مسبقاً بدلالة ضغط غاز النيون لأجهزة بلازما محرقة ذات طاقات مختلفة.

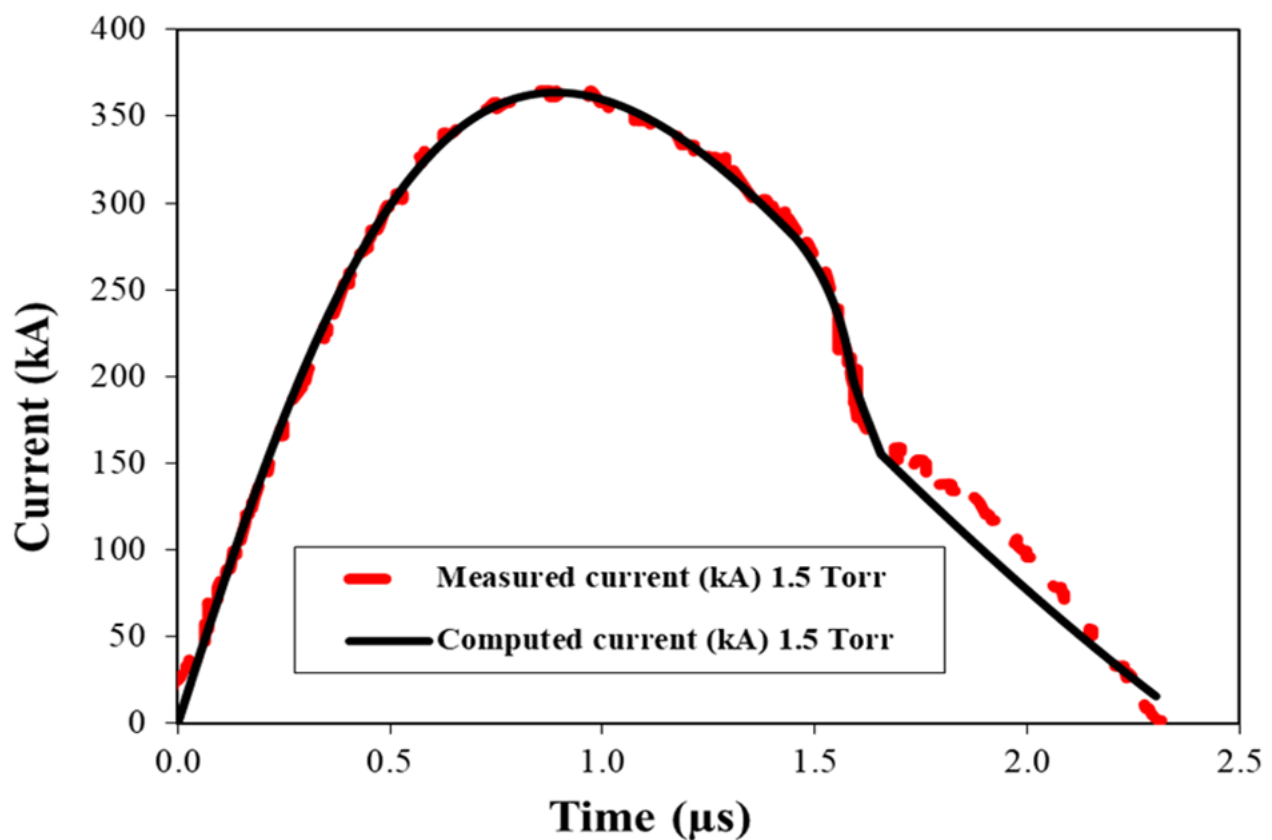
Device	E_o (kJ)	p_o (Torr)	$Y_{sxr \text{ exp.}}$ (J)	$Y_{sxr \text{ comp.}}$ (J)	$Y_{sxr \text{ comp.}}$ (J)
NX2 [10]	1.9	5.7	17.1	12	-
		6	17.5	17.5	42.6 [13]
		7	16.7	14	-
INTI [81]	2.2	2	2.5 ± 0.5	1.3	-
		2.5	3.1 ± 1	3.1	2.7 [18]
		3	3 ± 1	2	-
UNU/ICTP [82]	2.9	2.7	3.7 ± 0.4	3.5	-
		3	5.4 ± 0.1	5	3.9 [15]
		3.5	4.1 ± 0.7	2.4	-
APF [83]	3	4.5	2.5	2.4	-
		5	3	3	-
		5.5	2.4	2.6	-
NX1 [10]	3.1	9	49 ± 7	23	-
		10.5	52 ± 8.5	37	37 [13]
		12	42 ± 6	5	-
PF7 [84]	3.9	0.3	-	3	-
		0.4	10	10	-
		0.5	-	8	-

من الجدولين 4.3 و 5.3 يمكن استنتاج أنه بالنسبة لأعلى مردود لكل جهاز من الأجهزة المدروسة تتراوح القيم المحسوبة لـ v_a عند الضغوط المثلى المقابلة لأعلى مردود من $5.6 \text{ cm}/\mu\text{s}$ (لـ NX2 عند 6 Torr) إلى $7.9 \text{ cm}/\mu\text{s}$ (لـ APF عند 5 Torr) (القيمة المتوسطة لـ $v_a = 6.3 \text{ cm}/\mu\text{s}$)، وتتراوح القيم المحسوبة لـ v_s من $20.6 \text{ cm}/\mu\text{s}$ (لـ APF عند 5 Torr) إلى $23.5 \text{ cm}/\mu\text{s}$ (لـ NX1 عند 10.5 Torr) (القيمة المتوسطة لـ $v_s = 22 \text{ cm}/\mu\text{s}$ للأجهزة المدروسة)، إن هذه القيم المتوسطة المحسوبة قابلة للمقارنة بالقيم التجريبية المنشورة (v_a $= 6 - 7 \text{ cm}/\mu\text{s}$ و $v_s = 21.5 \text{ cm}/\mu\text{s}$) [9, 32]. يمكن أيضاً ملاحظة أنه بالنسبة للمردود الأعلى فإن مجال v_a واسع من $5.6 - 12 \text{ cm}/\mu\text{s}$ بينما مجال v_s أضيق بكثير من $20.6 - 23.5 \text{ cm}/\mu\text{s}$ ، ويعود ذلك لأن v_s هي المؤشر الأفضل من أجل الحصول على المردود الأعلى، حيث أن لهذه الكمية صلة كبيرة بدرجة حرارة التضيق ويشير هذا المجال $20.6 - 23.5 \text{ cm}/\mu\text{s}$ إلى السرعة التي تصل عندها درجة الحرارة إلى القيمة المطلوبة للحصول على مردود جيد.

2.1.2.3. دراسة مردود الأشعة السينية اللينة بدلالة ضغط غاز التشغيل عند جهود تشغيل مختلفة:

(Study of Y_{SXR} Versus Operating Pressure at Different Operating Voltages):

تم إجراء مواءمة للأجهزة APF, NX2 (4,7 cm), UNU/ICTP, NX1 لدراسة مردود الأشعة السينية اللينة بدلالة الضغط من أجل جهود تشغيل مختلفة، تم إجراء المواءمة بين منحنيات التيار التجريبية والمحسوبة لكل جهاز بلازما محرقية. يوضح الشكل 3.3 منحنى المواءمة لجهاز NX2 والذي يعمل بطول مصعد 7 cm كنموذج من منحنيات المواءمة للأجهزة المدروسة.



الشكل 3.3: مواءمة منحنى التيار التجريبي مع منحنى التيار المحسوب لجهاز البلازما المحرقية (11.5 kV) NX2 ذي المصعد الأسطواني عند جهد 11.5 kV وضغط تشغيل 1.5 Torr وطول المصعد 7 cm.

يوضح الجدول 6.3 بارامترات التشغيل وبارامترات النموذج لجميع أجهزة البلازما المحرقية المدروسة.

الجدول 6.3: بارامترات الإدخال وبارامترات نموذج لي المستخدمة لمحاكاة مردود الأشعة السينية اللينة بدلالة الضغط عند جهود تشغيل مختلفة ولجميع الأجهزة المدروسة.

Device	E_o (kJ)	V_o (kV)	p_o (Torr)	L_o (nH)	r_o (mΩ)	f_m	f_c	f_{mr}	f_{cr}
APF ($z_o = 1.84$ cm) [83]	2.2	11	4	136	0.7	0.02	0.7	0.11	0.58

	2.6	12	4	142	1	0.01	0.5	0.10	0.55
	3	13	4	128	0.8	0.01	0.5	0.10	0.48
NX2 ($z_o = 4$ cm) [10]	1.3	9.5	5	16.8	1.8	0.02	0.5	0.07	0.70
	1.6	10.5	5	16.2	1.3	0.04	0.6	0.06	0.65
	1.9	11.5	5	15.8	1.4	0.05	0.7	0.07	0.71
NX2 ($z_o = 7$ cm) [10]	1.9	11.5	1.5	15	4.4	0.16	0.7	0.16	0.8
	2.3	12.5	1.5	15	4.4	0.16	0.7	0.16	0.8
	2.6	13.5	1.5	15	4.4	0.16	0.7	0.16	0.8
UNU/ICTP ($z_o = 16$ cm) [9, 82]	2.5	13	2.8	106	14	0.03	0.7	0.32	0.77
	2.9	14	2.8	108	12	0.05	0.7	0.26	0.85
NX1 ($z_o = 5.4$ cm) [10]	1.6	10	9	21.5	10.5	0.04	0.6	0.06	0.85
	2.2	12	9	21.9	8	0.06	0.7	0.09	0.84
	3.1	14	9	20	10	0.07	0.7	0.09	0.85

بعد إجراء المواءمة للأجهزة المدروسة عند كل قيمة لجهد التشغيل، تم إجراء حسابات بتغيير ضغط الغاز

من أجل كل جهد تشغيل وذلك لإيجاد الضغط الأمثل المقابل لأعلى مردود، تم تلخيص النتائج التي تم الحصول

عليها عند الضغط الأمثل عند جهود تشغيل مختلفة في الجدول 7.3.

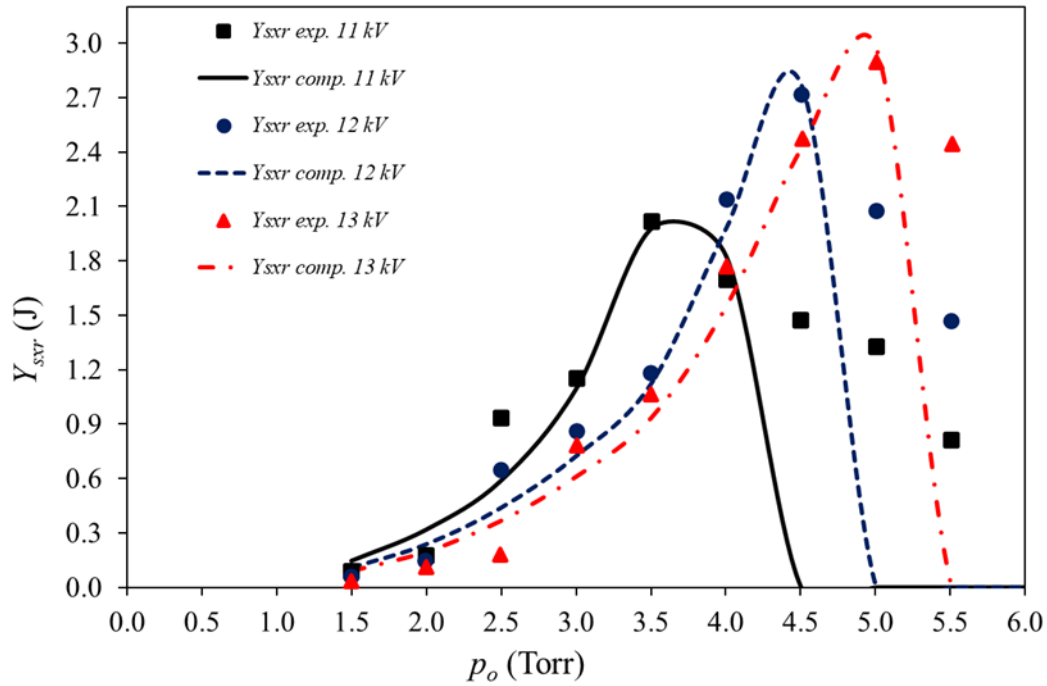
الجدول 7.3: مقارنة بين النتائج التجريبية والمحسوبة لمردود الأشعة السينية اللينة كتابع للضغط عند جهود تشغيل مختلفة (تم عرض النتائج عند الضغط الأمثل المقابل لأعلى مردود).

Device	E_o (kJ)	V_o (kV)	p_o (Torr)	Y_{sxr} exp. (J)	Y_{sxr} comp. (J)	I_{peak} (kA)	I_p (kA)	T_p (10^6 K)	n_i $10^{23}/m^3$
APF ($z_o=14.8$ cm) [83]	2.2	11	3.5	2	2	154	87	2.14	10.2
	2.6	12	4.5	2.7	2.7	173	93	2.05	13.3
	3	13	5	3	3	199	93	1.92	14.7
NX2 ($z_o=4$ cm) [10]	1.3	9.5	4	8.7	8.6	324	161	2.60	3.1
	1.6	10.5	5	10	10	363	165	2.59	3.3
	1.9	11.5	6	17.5	17.5	398	188	2.55	4.5
NX2 ($z_o=7$ cm) [10]	1.9	11.5	1.5	6.7	6.8	364	138	2.4	2.0
	2.3	12.5	1.7	-	9	395	151	2.5	2.4
	2.6	13.5	2.0	-	10	426	166	2.6	2.7
UNU/ICTP	2.5	13	1.87	3 ± 0.5	3.3	160	105	2.23	15.0
($z_o=16$ cm) [9, 82]	2.9	14	3	5.4 ± 0.1	5	180	120	2.20	20.5

NX1 ($z_o=5.4$ cm) [10]	1.6	10	7.5	12 ± 3.2	6.4	268	153	2.71	4.7
	2.2	12	9	33 ± 4.1	29	331	201	2.40	15.5
	3.1	14	10.5	52 ± 8.5	37	379	231	3.06	10.3

كما يُلاحظ من الجدول 7.3، يزداد مردود الأشعة السينية اللينة مع زيادة جهد التشغيل وذلك لأن جهد التشغيل يرتبط بشكل مباشر بالطاقة المخزنة في بنك المكثفات [10]، فعند رفع جهد الشحن يزداد مقدار الطاقة المشاركة في عملية التفريغ، مما يؤدي إلى تعزيز عملية الانضغاط وتسخين البلازما، وذلك بسبب زيادة الطاقة المدخلة إلى عمود البلازما المتضيق. ينتج عن ذلك ارتفاع درجة الحرارة وازدياد الكثافة العددية للأيونات في العمود مما يعزز التصادمات بين الجسيمات، وبالتالي زيادة مردود إصدار الأشعة السينية اللينة. يوجد سبب آخر لزيادة المردود بزيادة جهد التشغيل وهو أن التضيق ينشأ عند الحد الأقصى لتيار التفريغ، حيث يكون انتقال الطاقة إلى عمود البلازما المتضيق أعظمي [10]. بصورة عامة، فإن تأثير جهد التشغيل على المردود مرتبط أيضاً بتشكيل الإلكترونات وبارامترات تشغيل جهاز البلازما المحرقة.

يوضح الشكل 4.3 القيم التجريبية والمحسوبة لمردود الأشعة السينية اللينة بدلالة ضغط غاز التشغيل عند جهود تشغيل مختلفة لجهاز APF، يُلاحظ أنه بالنسبة لجميع الجهود المطبقة يكون السلوك العام لمنحني المردود بدلالة الضغط هو نفسه، ويتم إزاحة قيم الضغوط المثلى للمردود الأعظمي إلى قيم أعلى مع زيادة جهد التشغيل وذلك بسبب انزياح زمن حدوث التضيق ليصبح أقرب إلى زمن وصول تيار تفريغ بنك المكثفات إلى ذروته.



الشكل 4.3: المردود التجريبي والمحسوب لإصدار الأشعة السينية اللينة الصادرة من جهاز APF بدلالة ضغط غاز التشغيل عند جهود تشغيل مختلفة.

من الجدير بالذكر أن الشكلين 2.3 و 4.3 يظهران توافقاً جيداً بين النتائج التجريبية والمحسوبة عند الضغوط المنخفضة، مما يعني أن النموذج العددي نجح في التنبؤ بسلوك البلازما والإشعاع الصادر بدقة. لكن عند الضغوط المرتفعة تنخفض قيم المردود المحسوبة بمعدل أسرع مقارنةً بالقيم التجريبية. وهذا يعود لعدة أسباب منها: 1- يمكن أن يواجه فلتر الأشعة السينية اللينة بعض أوجه عدم الدقة في نظامه، مثل عدم الدقة في سمك المرشح، والذي يؤدي إلى امتصاص غير متوقع لبعض الفوتونات، وعدم الدقة في سمك الطبقة الميتة (Dead layer)، والتي تمنع الفوتونات المنخفضة الطاقة من الوصول إلى الكاشف وعدم الدقة في القياسات (قراءات الكاشف) نتيجة زيادة الضغط والذي يسبب زيادة في الضجيج الإلكتروني. 3- إن رصد الأشعة السينية اللينة من مصادر البلازما النبضية مثل البلازما المحرقة الكثيفة يُعد أمراً معقداً بسبب ضغط غاز التشغيل المستخدم في هذا الجهاز، حيث أنه عند الضغوط المرتفعة قد يكون الامتصاص الذاتي للأشعة السينية اللينة داخل الغاز ذو تأثير ملحوظ، مما يؤدي إلى زيادة نسبة الخطأ في تحليل نتائج الأشعة السينية اللينة وبالتالي تقليل دقة القياسات

التجريبية عند الضغوط المرتفعة. 4- قد تُعزى هذه الفروقات أيضاً إلى حقيقة أن النموذج العددي المستخدم في المحاكاة لا يأخذ في الاعتبار جميع الظواهر المعقدة التي تحدث داخل البلازما قصيرة العمر تجريبياً [86].

3.1.2.3. دراسة مردود الأشعة السينية اللينة بدلالة ضغط غاز التشغيل عند أطوال مختلفة للمصعد:

(Study of Y_{SXR} Versus Operating Pressure at Different Anode Lengths):

تم إجراء تجارب عديدة إضافية باستخدام كود نموذج لي على جهازي NX1 و NX2 لدراسة تأثير الاختلاف في طول المصعد على إصدار الأشعة السينية اللينة مع تثبيت جميع البارامترات الأخرى. تم استخدام قيم بارامترات الموame في العمليات الحسابية كما هو موضح في الجدول 8.3.

الجدول 8.3: بارامترات الإدخال وبارامترات نموذج لي لجهازي NX1 و NX2 المستخدمين في عملية المحاكاة من أجل حساب مردود الأشعة السينية اللينة بدلالة الضغط عند أطوال مصعد مختلفة.

Device	z_o (cm)	p_o (Torr)	L_o (nH)	r_o (m Ω)	f_m	f_c	f_{mr}	f_{cr}
NX2 ($V_o=11.5$ kV) [10]	4	2	17.1	2.1	0.06	0.5	0.07	0.84
	5	2	16.3	2.2	0.09	0.6	0.11	0.77
	7	2	15.7	5.1	0.14	0.8	0.18	0.80
NX1 ($V_o=12$ kV) [10]	3.5	9	23.5	6.0	0.12	0.7	0.11	0.76
	4.3	9	24.0	6.4	0.07	0.7	0.10	0.85
	5.4	9	21.9	8.0	0.06	0.7	0.09	0.84

بعد إجراء الموame للجهازين المدروسين من أجل أطوال مصعد مختلفة، تم إجراء حسابات لدراسة تأثير

طول المصعد على مردود الاشعة السينية اللينة.

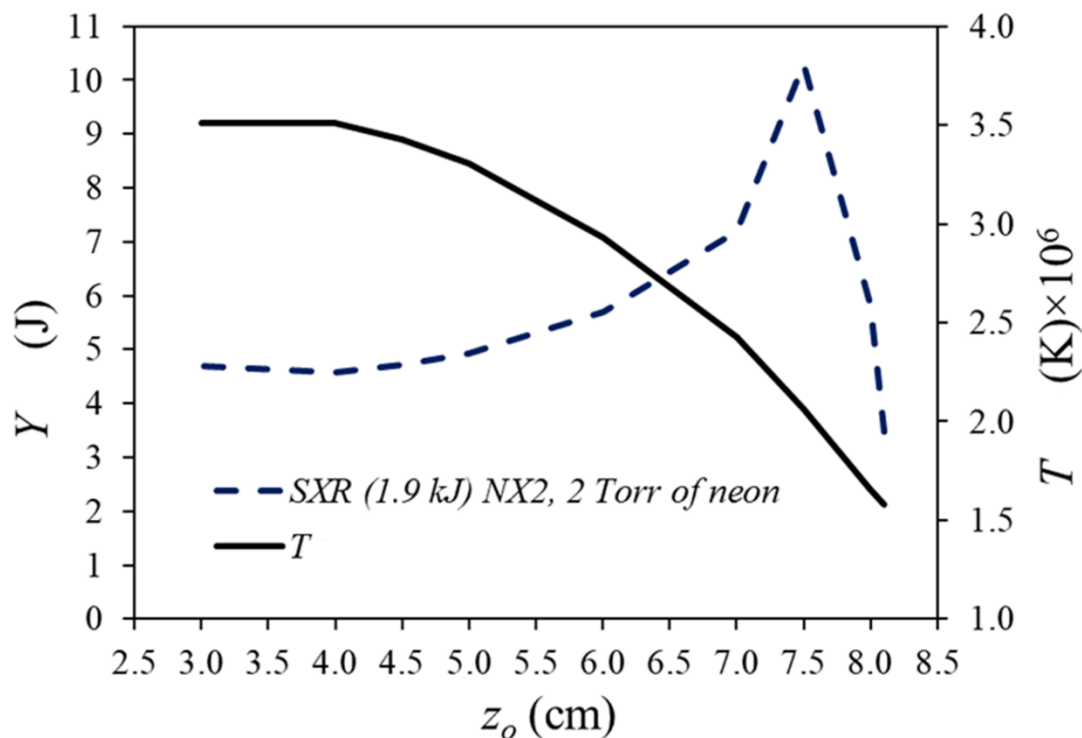
يبين الشكلان 5.3 و 6.3 أن التيار ودرجة الحرارة ضمن عمود البلازما المتضيق تتخفف مع زيادة طول

المصعد بينما تزداد الكثافة العددية للأيونات ويزداد مردود الاشعة السينية اللينة من 4.7 J عند الطول 3 cm وذلك

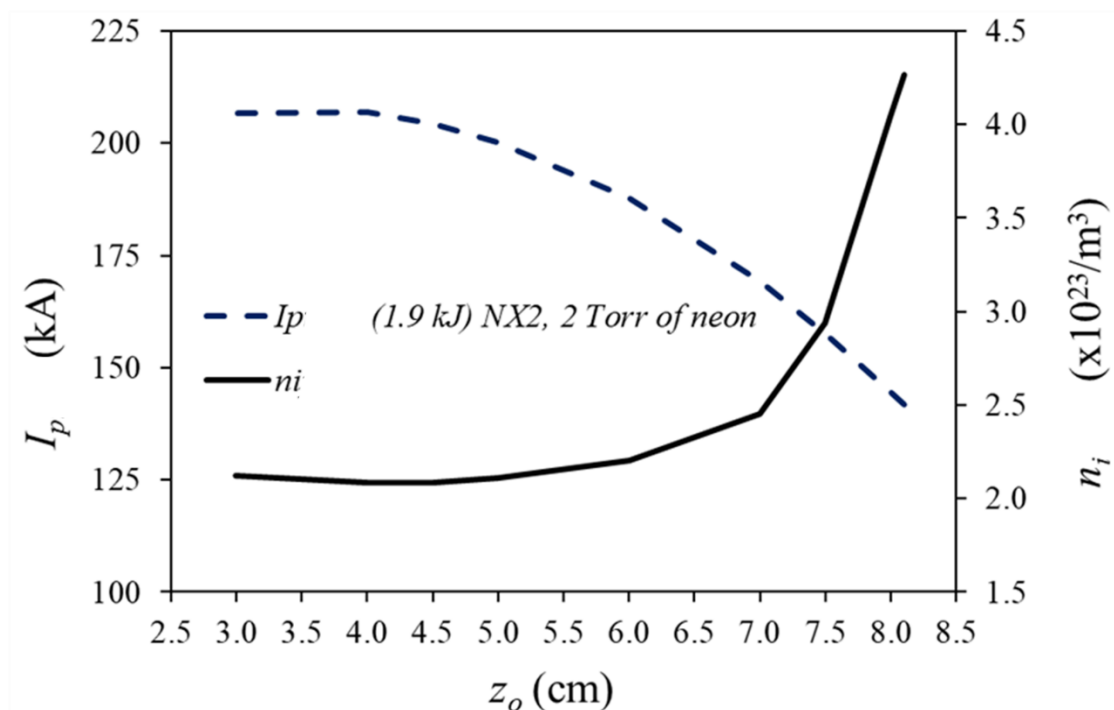
مع زيادة طول المصعد حتى يصل إلى قيمة عظمى 10.5 J عند الطول 7.5 cm وبعد ذلك ينخفض المردود

بانخفاض طول المصعد. عند القيمة المثلى لطول المصعد وجد أن تيار عمود البلازما المتضيق هو 160 kA

ودرجة حرارة التضييق حوالي 2×10^6 K والكثافة العددية للأيونات في عمود البلازما المتضيق هي $3 \times 10^{23}/m^3$.



الشكل 5.3: مردود الأشعة السينية اللينة المحسوب ودرجة حرارة عمود البلازما المتضيق بدلالة طول المصعد لجهاز NX2 عند ضغط 2 Torr.

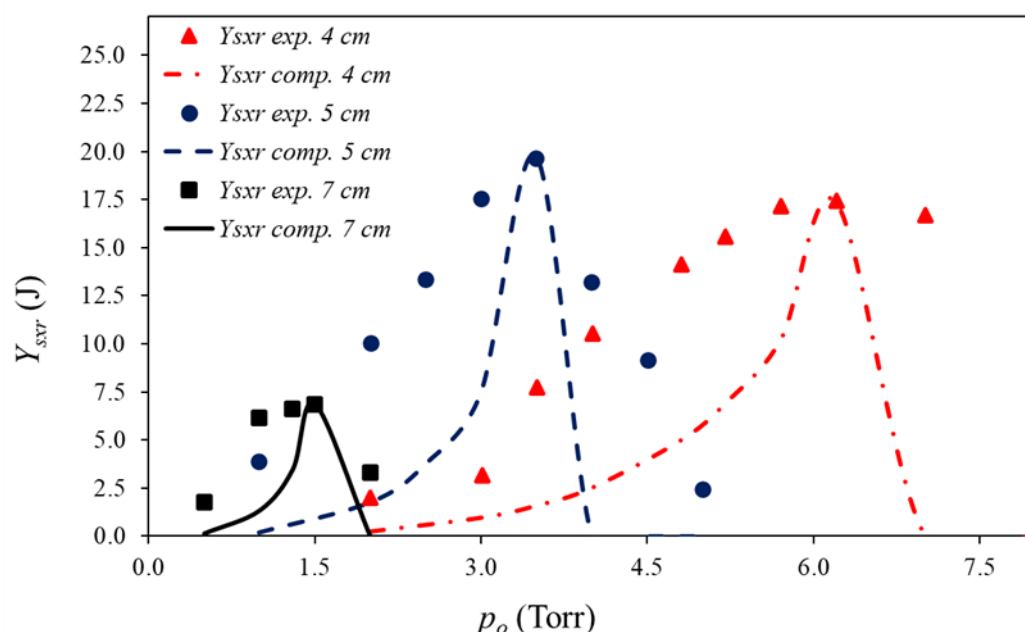


الشكل 6.3: سلوك تيار عمود البلازما المتضيق والكثافة العددية للأيونات بدلالة طول المصعد لجهاز NX2 عند ضغط 2 Torr.

أُجريت تجارب عددية إضافية عند ضغط 3 Torr وقد وجد أن مردود الأشعة السينية اللينة له نفس السلوك مع قيمة عظمى تساوي 19 J والمقابلة لطول المصعد 5 cm. تؤكد النتائج التي تم الحصول عليها أن

هناك توليفة مثلى لكل من طول المصعد وضغط الغاز وتيار عمود البلازما المتضيق والكثافة العددية للأيونات ودرجة حرارة عمود البلازما المتضيق للحصول على أعلى مردود لإصدار الأشعة السينية اللينة (إصدار الأيونات H-like و He-like).

لمقارنة النتائج التجريبية المتاحة مع حساباتنا المتعلقة بمردود الأشعة السينية اللينة الصادرة من جهاز البلازما المحرقة NX2 والذي يعمل بغاز النيون من أجل قيم مختلفة لطول المصعد (4, 5, 7 cm) [10]، تم إجراء تجارب عددية أخرى بدءاً من طول المصعد 4 cm عند ضغط 2 Torr وباستخدام بارامترات المواءمة المذكورة في الجدول 8.3. بعد ذلك، تم تغيير ضغط غاز التشغيل من 2 Torr إلى 7 Torr للحصول على أعلى مردود للأشعة السينية اللينة والتي تبلغ 17.3 J عند ضغط 6 Torr. تم تكرار هذه التجارب العددية على جهاز NX2 لأطوال المصعد 5 cm و 7 cm. يوضح الشكل 7.3 مردود الأشعة السينية اللينة التجريبية والمحسوبة الصادرة من جهاز NX2 بدلالة ضغط الغاز من أجل أطوال مختلفة للمصعد وبجهد تشغيل ثابت 11.5 kV، ويلاحظ أنه بالنسبة لأطوال المصعد الثلاثة المختلفة فإن السلوك العام لمردود الأشعة السينية اللينة بدلالة الضغط هو نفسه، حيث يوجد ضغط أمثل يعطي أعلى مردود من أجل كل طول للمصعد، يبلغ أعلى مردود لجهاز NX2 تقريباً 20 J ويكون عند الطول 5 cm وضغط 3.5 Torr، تتطابق قيم مردود الأشعة السينية اللينة التجريبية جيداً مع القيم المحسوبة عند الضغط الأمثل. ومع ذلك، عند الضغوط الأعلى من الضغط الأمثل تكون التناقضات كبيرة.



الشكل 7.3: مقارنة بين المردود التجريبي والمحسوب لإصدار الأشعة السينية اللينة بدلالة ضغط غاز التشغيل لجهاز NX2 عند ثلاثة أطوال مختلفة للأنود 4, 5, 7 cm وجهد تشغيل ثابت 11.5 kV.

يظهر الجدول 9.3 القيم التجريبية والمحسوبة لمردود الاشعة السينية اللينة بدلالة الضغط الأمثل عند أطوال مصعد مختلفة، بالإضافة إلى بارامترات v_a و v_s و ID و SF لأجهزة NX2 و NX1. وكما هو موضح في الجدول 9.3 فإن قيم المردود المحسوبة تتفق بشكل معقول مع القيم التجريبية باستثناء قيمة واحدة لـ NX1 بطول 4.3 cm ذات مردود تجريبي عالي جداً ويعتقد بأن هذا الاختلاف يعود إلى شكل حجرة الجهاز NX1 كما هو موضح في الشكل 2.1 في الفصل الأول حيث أن شكل الحجرة يساعد على جرف كمية أكبر من الكتلة على طول المصعد وبالتالي زيادة الكتلة والتيار المشاركين في تضيق عمود البلازما، أما في الكود فلا يتم أخذ شكل حجرة الجهاز بعين الاعتبار، بينما نلاحظ أيضاً التوافق الجيد في قيم البارامترات v_a و v_s و ID و SF .

الجدول 9.3: ملخص القيم التجريبية والمحسوبة لمردود الأشعة السينية اللينة والسرعة المحورية لغمد التيار ومعامل السرعة (SF) وكثافة التيار (ID) لأطوال مصعد محتلة عند الضغط الأمثل لأعلى مردود.

Device	z_o (cm)	p_o (Torr)	$v_a \text{ exp.}$ (cm/ μ s)	$v_a \text{ comp.}$ (cm/ μ s)	$SF \text{ exp.}$ [kA/(cm. Torr ^{1/2})]	$SF \text{ com.}$ [kA/(cm. Torr ^{1/2})]	$ID \text{ exp.}$ (kA/cm)	$ID \text{ comp.}$ (kA/cm)	$Y_{sxr} \text{ exp.}$ (J)	$Y_{sxr} \text{ comp.}$ (J)
NX2 ($V_0=11.5$ kV) [10]	4	6	3.1	4.0	88	86	215	213	17.5	17.5
	5	3.5	3.6	5.4	113	109	210	204	20	20
	7	1.5	4.2	6.8	150	147	184	180	7	7
NX1 ($V_0=12$ kV) [10]	3.5	7.5	3.1	4.4	83	84	230	230	25 $\pm$ 6	25
	4.3	9.75	3.6	4.9	72	72	226	226	85 $\pm$ 16	34
	5.4	9	3.6	5.9	74	74	223	221	33 $\pm$ 4	29

تظهر البيانات في الجدول 9.3 أن المردود الأعظمي لجهاز NX2 يبلغ تقريباً 20 J عند الضغط الأمثل 3.5 Torr وطول مصعد 5 cm، بينما بالنسبة لجهاز NX1 فإن المردود الأعظمي يبلغ 34 J عند ضغط 9.75 Torr وطول مصعد 4.3 cm، حيث أنه عند الضغط الأمثل، والمقابل للمردود الأعلى، يتزامن طور التضيق مع زمن وصول تيار تفريغ بنك المكثفات إلى ذروته، وبالتالي نحصل على تضيق فعّال، أما عند الضغط المنخفض وطول المصعد الطويل نسبياً سيبدأ طور التضيق قبل وصول التيار إلى ذروته بالإضافة إلى انخفاض عدد الأيونات المطلوبة لحدوث التأين الكامل، مما يؤدي إلى تقليل مردود الأشعة السينية اللينة، كما يمكن أن تتسبب السرعات الأعلى أيضاً في فصل المكبس المغناطيسي عن غمد تيار البلازما في نهاية الطور المحوري. من الضروري التنويه إلى أنه ليس بالضرورة أن يؤدي تقليل طول المصعد إلى تحسين المردود، وذلك لأن السرعة المحورية تنخفض وبالتالي يبدأ طور التضيق بعد أن تنخفض قيمة ذروة التيار [10]. لذا، فإن هناك توليفة مثلى لكل من ضغط غاز التشغيل وطول المصعد لكل جهاز تعطي أعلى مردود للأشعة السينية اللينة. إن مردود إصدار الأشعة السينية اللينة لجهاز NX2 أقل بكثير من NX1، ويعزى هذا إلى أن قيمة معامل السرعة لجهاز NX1 أقل منها لجهاز NX2 فضلاً عن الاختلافات في مواد الإلكترودات والعازل وشكل حجرة التفريغ [10].

2.2.3. دراسة مردود الأشعة السينية اللينة من أجل مصعد مدبب:

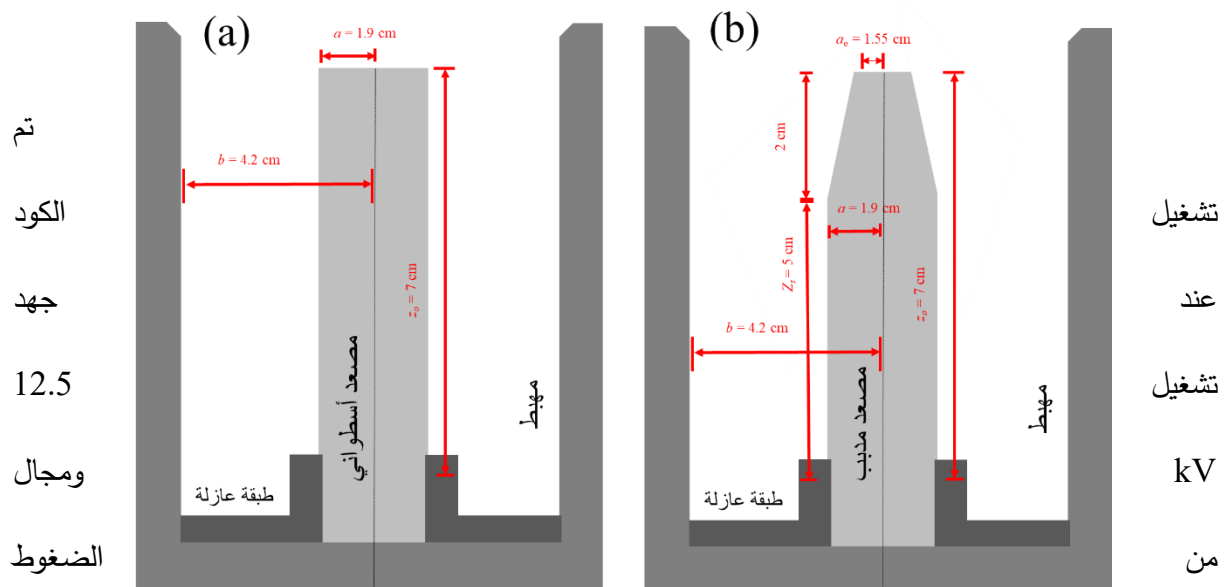
(Study of Y_{SXR} For Tapered Anode):

تم إجراء تجارب عديدة باستخدام كود نموذج لي على جهاز البلازما المحرقة NX2 بالاعتماد على منحنيات التيار التجريبية بهدف دراسة مردود الأشعة السينية اللينة بدلالة الضغط عند جهود تشغيل مختلفة وذلك من أجل مصعد مدبب، كما تم إجراء تجارب عديدة إضافية لأمثلة شروط التدبب ودراسة تأثير تعديل شروط التدبب على مردود الأشعة السينية اللينة.

1.2.2.3. دراسة مردود الأشعة السينية اللينة بدلالة ضغط غاز التشغيل عند جهود تشغيل مختلفة:

(Study of Y_{SXR} Versus Operating Pressure at Different Operating Voltages):

يتكون نظام الإلكترونيات لجهاز NX2 من مصعد نحاسي مركزي أسطواني يبلغ قطره 3.8 cm وطوله 7 cm [26]، في البداية تم تشغيل كود نموذج لي للعمل كجهاز NX2 بمصعد أسطواني عند جهد تشغيل 11.5 kV وضغط 1.5 Torr [10] كما هو موضح في الفقرة 2.1.2.3 في الشكل 3.3 حيث تم عرض بارامترات النموذج المقابلة لأفضل مواعمة في الجدول 6.3. فيما بعد تم تعديل نظام الإلكترونيات للجهاز ليتكون من مصعد نحاسي مركزي مدبب بقطر 3.1 cm وطول 7 cm [25] كما هو موضح في الشكل 8.3.



الشكل 8.3: رسم تخطيطي لجهاز NX2، (a) المصعد الأسطواني و (b) المصعد المدبب

5.25 Torr بالطريقة السابقة نفسها. يبين الشكل 9.3 المواءمة بين منحنى التيار التجريبي والمحسوب لأربعة ضغوط تشغيل مختلفة 3, 3.75, 4.5, 5.25 Torr. كما يبين الجدولان 10.3 و 11.3 قيم بارامترات التشغيل وبارامترات النموذج لهذا الجهاز.

الجدول 10.3: بارامترات تشغيل جهاز البلازما المحرقة NX2 ذو مصعد مدبب.

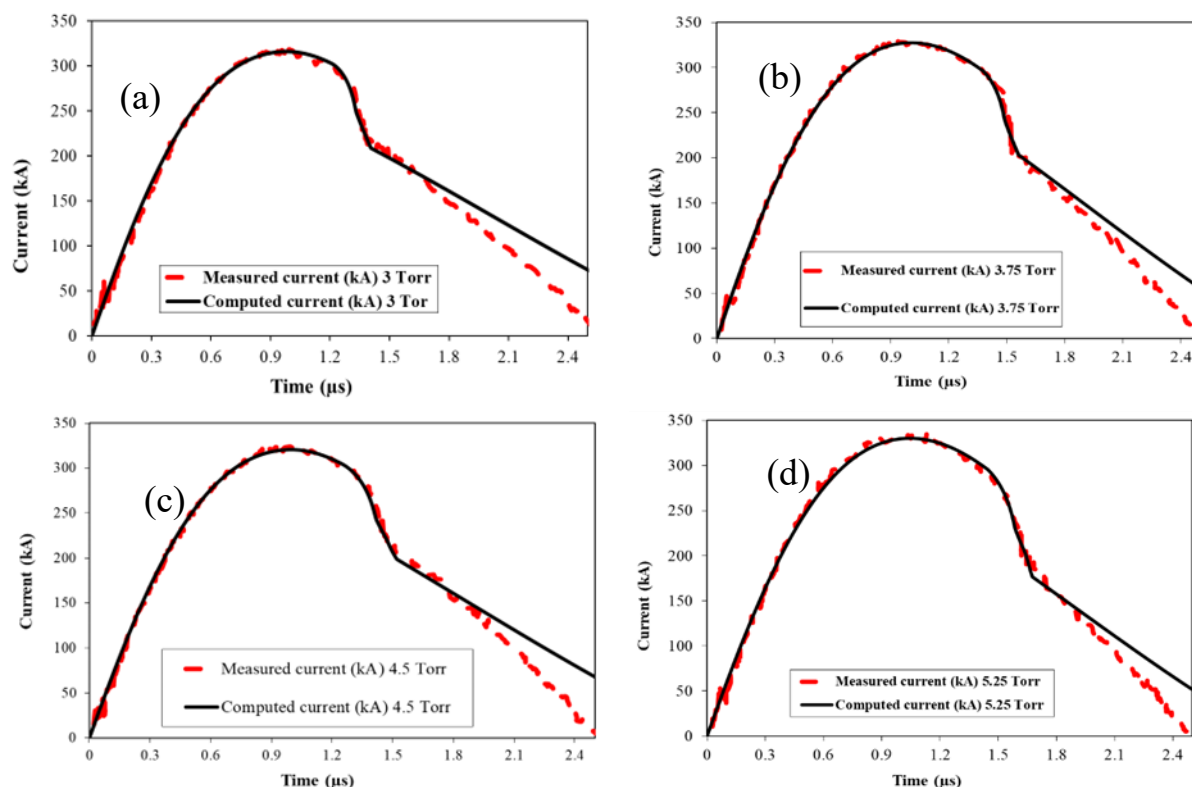
E_o (kJ)	V_o (kV)	C_o (μ F)	b (cm)	a (cm)	a_e (cm)	z_o (cm)	z_s (cm)
2.3	12.5	29	4.2	1.9	1.55	7	5

الجدول 11.3: بارامترات المواءمة الخاصة بكود نموذج لي المستخدمة في عملية محاكاة جهاز البلازما المحرقة NX2 ذو مصعد مدبب عند ضغوط تشغيل مختلفة.

p_o (Torr)	L_o (nH)	r_o (m Ω)	f_m	f_c	f_{mr}	f_{cr}
3	19.8	7.2	0.035	0.72	0.1	0.7
3.75	19.7	7.8	0.033	0.64	0.14	0.78
4.5	20	6.9	0.031	0.75	0.12	0.85
5.25	20.5	6.7	0.029	0.67	0.1	0.8

يوضح الشكل 9.3 التطابق الجيد بين منحنيات التيار التجريبية والمحسوبة باستخدام كود نموذج لي

لجهاز البلازما المحرقة NX2 ذو مصعد مدبب.



الشكل 9.3: مقارنة منحنى التيار التجريبي مع منحنى التيار المحسوب لجهاز البلازما المحرقية NX2 ذو مصعد مدبب عند جهد 12.5 kV و ضغوط تشغيل مختلفة (a) 3 Torr، (b) 3.75 Torr، (c) 4.5 Torr، (d) 5.25 Torr من أجل مصعد مدبب.

بعد عملية الموازنة تم إجراء تجارب عددية باستخدام كود نموذج لي للحصول على معلومات حول حركية وبارامترات عمود البلازما المتضيق لجهاز NX2 ذو المصعد المدبب. في البداية وبهدف معرفة تأثير تغيير شكل المصعد على مردود الاشعة السينية اللينة تم إجراء دراسة على جهاز NX2 والذي يعمل بنفس شروط تشغيل الجهاز بمصعد أسطواني، ولكن باستخدام مصعد مدبب، تم العمل عند جهود تشغيل مختلفة ضمن مجال 11.5 – 13.5 kV وضغوط تشغيل مختلفة لغاز النيون بالنسبة للمصعد الأسطواني تم تغيير ضغط التشغيل ضمن مجال 0.5 – 2.5 Torr وبالنسبة للمصعد المدبب تم تغيير الضغط ضمن مجال 0.5 – 6.5 Torr.

عُرضت نتائج الدراسة العددية من أجل مصعد الأسطواني في الفقرة 2.1.2.3 في الجدول 7.3. يبين

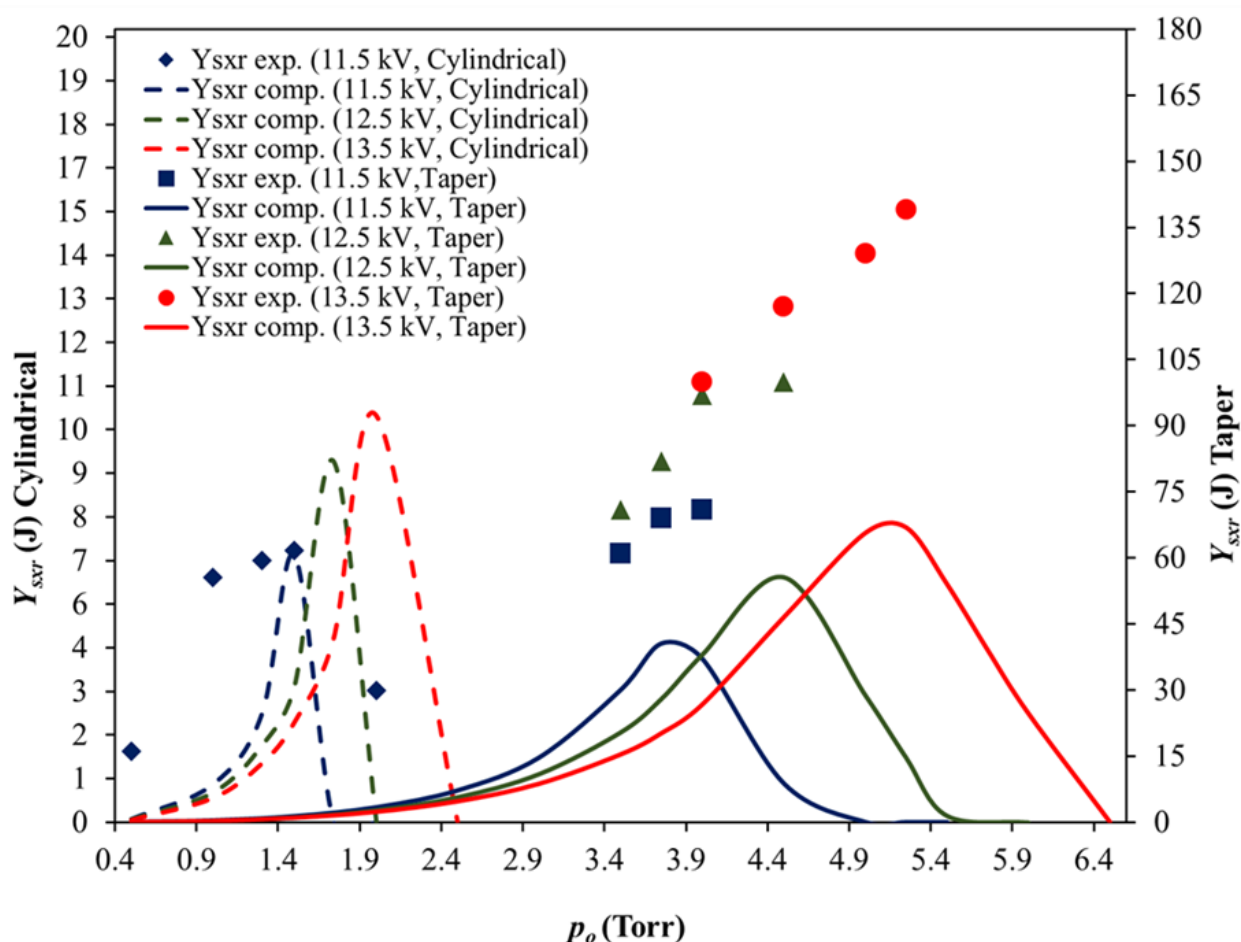
الجدول 12.3 نتائج الدراسة العددية.

الجدول 12.3: بارامترات عمود البلازما المتضيق ومردود الأشعة السينية اللينة بدلالة الضغط عند جهود تشغيل مختلفة من أجل مصعد مدبب لجهاز NX2.

E_o (kJ)	V_o (kV)	p_o (Torr) Optimum	I_{peak} (kA)	I_p (kA)	n_i ($10^{23}/m^3$)	Y_{sxr} (J) maximum
1.9	11.5	3.8	294	163	12	41
2.3	12.5	4.5	320	177	18	56
2.6	13.5	5.3	345	191	21	67

يوضح الشكل 10.3 المقارنة بين مردود الأشعة السينية اللينة التجريبي والمحسوب بدلالة ضغط غاز

التشغيل عند جهود تشغيل مختلفة للمصعد الأسطواني والمصعد المدبب.



الشكل 10.3: مقارنة بين مردود الأشعة السينية اللينة التجريبي والمحسوب بدلالة الضغط عند جهود تشغيل مختلفة (11.5 , 12.5 , 13.5 kV) لجهاز NX2 في حالة المصعد الأسطواني وحالة المصعد المدبب.

كما هو ملاحظ من الجدول 12.3 والشكل 10.3، فإن قيم المردود الأعظمي والمقابل للضغط الأمثل

يزداد مع زيادة جهد التشغيل وأن قيم الضغوط المثلى تتزاح نحو قيم أعلى مع زيادة جهد التشغيل وتم شرح سبب

هذا السلوك لمنحني المردود بدلالة الضغط عند جهود تشغيل مختلفة في الفقرة 2.1.2.3. يُلاحظ أيضاً أن السلوك العام للمردود بدلالة الضغط لجميع جهود التشغيل المطبقة هو نفسه في حالة المصعد الأسطواني والمصعد المدبب. بمقارنة مردود الأشعة السينية اللينة من أجل مصعد مدبب وأسطواني، وجدنا أنه في حالة المصعد المدبب يكون مردود الأشعة السينية اللينة أكبر بحوالي 5 مرات مما هو عليه في حالة المصعد الأسطواني (وهو ما يتفق مع النتائج التجريبية [25])، وهذا يعود إلى الانخفاض التدريجي في نصف قطر نهاية المصعد والذي يترافق بالآثار الآتية:

- زيادة الضغط المتولد عن الحقل المغناطيسي مما يؤدي بدوره إلى زيادة الكثافة الناتجة عن صغر نصف قطر عمود البلازما المتضيق (حيث أن شدة الحقل المغناطيسي تتناسب عكساً مع مربع نصف قطر عمود البلازما) ويحدث هذا مصحوباً بزيادة I_p في بداية الطور القطري وزيادة معدل التمدد المحوري للعمود المتضيق [25].
- يساعد هذا الانخفاض التدريجي في نصف قطر نهاية المصعد أيضاً على تجنب التغيرات السريعة في حركة غمد تيار البلازما عند الانتقال من طور التسريع المحوري إلى طور الانضغاط القطري، وهذا يزيد من تجانس غمد التيار وتفاعله مع المصعد وبالتالي انخفاض معاوقة البلازما في الطور المحوري مما يزيد من I_{peak} وهذا يسبب زيادة في I_p [27, 87].
- يحدث انخفاض مفاجئ في تحريضية البلازما في بداية الطور القطري عند استخدام المصعد المدبب، وذلك بسبب الانخفاض السريع في نصف قطر عمود البلازما في بداية الطور القطري (يتميز المصعد المدبب بنصف قطر صغير مقارنة بالمصعد الأسطواني في الطور القطري) مما يتسبب في حدوث قفزة في تيار التفريغ في بداية الطور القطري وبالتالي إصدار أكثر كثافة [26, 27].
- يؤثر التناقص التدريجي في نصف قطر نهاية المصعد أيضاً على كمية الكتلة التي يتم جرفها على طول المصعد مما يؤثر أيضاً على تيار التفريغ. هناك زيادة في كل من جزء الكتلة التي تم جرفها في الطور المحوري (خسارة كتلة أقل)، والجزء المدخل في طور التضييق، وأخيراً زيادة عمر البلازما قبل حدوث عدم الاستقرار [26, 87].

لاحظنا أيضاً من النتائج أن الضغط الأمثل في حالة المصعد المدبب ينزاح إلى قيم أعلى وذلك لأن أي تغيير في الأبعاد الهندسية للإلكترونيات في الجهاز يغير من زمن حركة غمد التيار إلى النهاية المفتوحة لجملة الإلكترونيات. لهذا السبب يزداد ضغط التشغيل الأمثل بحيث يتزامن وصول الغمد إلى الطور القطري مع زمن ذروة تيار تفريغ بنك المكثفات [88].

يمكن ملاحظة من الشكل 10.3 بالنسبة للمصعدين وجود توافق معقول بين النتائج التجريبية والمحسوبة لسلوك مردود الأشعة السينية اللينة (ليس بالقيم المطلقة) عند ضغوط مختلفة لجهد تشغيل معين. لكن وجدنا أنه من أجل جهود تشغيل مختلفة تبقى قيمة الضغط الأمثل هي نفسها من أجل كل من المردودين الأعظميين التجريبي والمحسوب. ويعود هذا التوافق المعقول في السلوك فقط دون القيم المطلقة إلى الافتراضات المختلفة التي يتم أخذها بعين الاعتبار في الصيغ المستخدمة في الحساب ضمن الكود مثل أن الذرات متأينة بالكامل، وأن شكل البلازما وحجمها وتوزيع الكثافة غير معروف [26]. بالإضافة إلى ذلك، لا يتضمن كود لي جميع الظواهر التي تحدث في البلازما المحرقة تجريبياً. اضطرابات البلازما داخل عمود البلازما وتأثيرات ذروة الكثافة في مركز العمود والمناطق المحلية ذات الكثافة ودرجة الحرارة العاليتين. يتم في الكود حساب متوسط الكثافة ودرجة الحرارة وربما تكون أقل بكثير من كثافة الذروة ودرجة الحرارة المقاسة [12].

يجب أن نذكر أنه بالنسبة للمصعد الأسطواني تتوفر نتائج تجريبية فقط عند التشغيل بجهد 11.5 kV [10]، أما بالنسبة للمصعد المدبب لم يتم إجراء أي تجارب عند ضغوط أعلى من الضغط الأمثل لأن هذا من شأنه أن يؤدي إلى انخفاض في الكفاءة الفعلية بسبب الامتصاص الذاتي العالي للأشعة السينية الموجودة في الغاز [26]. على العكس من ذلك، في التجارب العددية، استخدمنا مجموعة من الضغوط أعلى من الضغط الأمثل.

2.2.2.3. دراسة تأثير تغيير شروط التدبب على مردود الأشعة السينية اللينة الصادرة من جهاز NX2:

(Study the Effect of Changing the Tapered Conditions on the Y_{sxr} from the NX2 Device:):

بالاعتماد على منحنيات التيار وبثبيت بارامترات المواممة الموضحة في الجدول 12.3، تم إجراء تجارب عديدة لأمثلة شروط التدبب حيث تم تغيير كل من p_o و z_s و a_e (وهي كما عرفت سابقاً) وذلك بهدف تحسين مردود الاشعة السينية اللينة، تم اتباع الإجراءات الآتية:

عند p_o معينة تم تثبيت z_s و a_e عند القيم الأساسية للجهاز، ثم تم تغيير z_s بشكل دقيق حتى الوصول إلى أعلى مردود من أجل a_e محدد، بعد ذلك تم اختيار قيمة أخرى لـ a_e وتغيير z_s حتى الوصول إلى أعلى مردود عند p_o المحدد، بعد ذلك تم تغيير p_o وتكرار الخطوات السابقة نفسها للوصول إلى المردود الأعظمي عند الضغط الجديد، وهكذا حتى نحصل على التوليفة المثلى لـ p_o, z_s, a_e التي تعطي أعلى مردود للأشعة السينية اللينة. وكانت التوليفة المثلى تقابل $p_o = 7.4 \text{ Torr}, z_s = 6.5 \text{ cm}, a_e = 0.9 \text{ cm}$.

بناءً على النتائج السابقة تم إجراء تجارب عديدة لدراسة تأثير تغيير كل من z_s و a_e على مردود الأشعة السينية اللينة حيث تراوحت قيم z_s من 2 - 6.5 cm، و a_e من 0.7 - 1.6 cm، وتم اتباع الإجراءات الآتية:

في البداية، تم تثبيت كل من p_o و a_e (عند القيم التي تعطي أعلى مردود) وتغيير z_s لدراسة تأثير تغيير z_s على المردود ومن ثم تم تثبيت كل من p_o و z_s (عند القيم التي تعطي أعلى مردود) وتغيير a_e .

خلال جميع التجارب العددية السابقة، لاحظنا أن البارامترات الآتية ثابتة تقريباً لجميع الحالات المدروسة (أي أن هذه البارامترات لا تتأثر بشكل كبير بشروط التدبب) وهي:

$$I_{peak} = 330 - 332 \text{ kA}, v_a = 6 - 7 \text{ cm}/\mu\text{s}, v_s = 11 \text{ cm}/\mu\text{s}, v_p = 8 - 10 \text{ cm}/\mu\text{s}, z_p = 2 - 3 \text{ cm}, t_a = 1.5 - 1.6 \mu\text{s} \text{ and } SF = 64 - 66.$$

في حين أن الجدول 13.3 يُظهر البارامترات التي تتغير بشكل كبير عند تغيير شروط التدبب.

الجدول 13.3: البارامترات الحركية المحسوبة عددياً لعمود البلازما المتضيق الناتجة عن تعديل شروط التدبب a_e و z_s .

Pinch Parameters Tapered Conditions	Variable parameters	I_p (kA)	T_p (10^6 K)	r_p (cm)	τ (ns)	n_i ($10^{23}/\text{m}^3$)	Y_{sxr} (J) maximum
$z_s = 6.5$ (cm) $a_e = 0.9$ (cm)	p_o (Torr)						
	7.0	164	4.6	0.04	43	97	70
	7.2	162	4.4	0.04	46	93	73
	7.4	161	4.3	0.05	47	88	75
	7.6	159	4.1	0.05	48	81	73
$a_e = 0.9$ (cm) $p_o = 7.4$ (Torr)	z_s (cm)						
	6.5	161	4.3	0.05	47	88	75
	5.0	159	4.2	0.05	45	89	73
	3.5	158	4.2	0.04	44	92	72
	2.0	158	4.2	0.04	42	97	73
$z_s = 6.5$ (cm) $p_o = 7.4$ (Torr)	a_e (cm)						
	1.6	148	1.9	0.20	58	7	11
	1.2	156	2.5	0.10	49	25	24
	0.9	161	4.3	0.05	47	88	75
	0.7	165	6.7	0.07	29	26	18

نلاحظ من الجدول 13.3 أن المردود لا يرتبط بشكل كبير بـ z_s ، لأن البارامترات الأساسية لعمود البلازما

المتضيق T_p ، n_i ، r_p ، τ_p لا تتغير بشكل كبير بتغير z_s وبالتالي فإن I_{peak} و I_p تبقى ثابتة، في حين أن المردود

مرتبط إلى حد كبير بـ a_e ، وللحصول على أعظم مردود يجب أن تملك a_e قيمة مثالية حيث تكون درجة الحرارة

قريبة من نافذة درجة الحرارة اللازمة لتوليد الأيونات الشبيهة بالهيدروجين والأيونات الشبيهة بالهيليوم و r_p أصغر

ما يمكن و n_i هو أعظم ما يمكن و τ_p طويل نسبياً.

3.2.3. دراسة مردود الأشعة السينية اللينة المحسوب الصادرة من جهاز PF24 من أجل مصعد أسطواني

ومدبب:

(Study of Y_{sXR} from PF24 Device for Cylindrical and Tapered Anode):

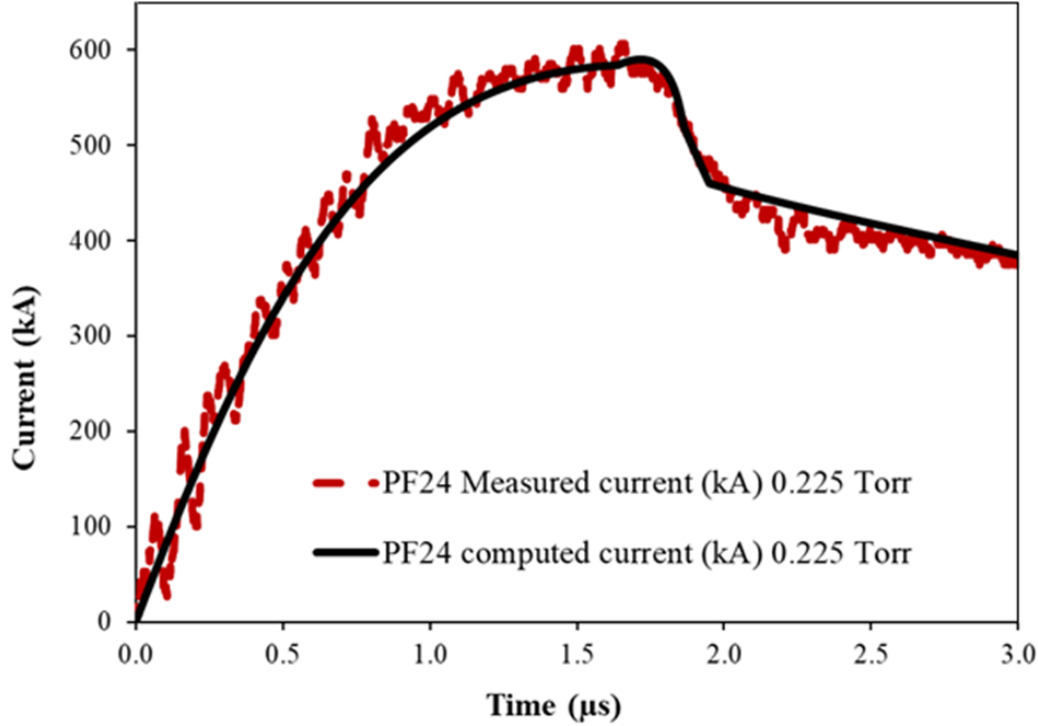
بناءً على النتائج السابقة المعروضة في القسم 1.2.3 و 2.2.3 والتي تعطي موثوقية لكود لي المستخدم في هذه الدراسة فيما يتعلق بتقارب سلوك النتائج التجريبية والمحسوبة لمردود الأشعة السينية اللينة الصادرة من أجهزة بلازما محرقية تعمل بمصعد أسطواني ومدبب، تم إجراء تجارب عددية لجهاز البلازما المحرقية PF24 عند جهد تشغيل 17 kV وضغوط تشغيل مختلفة لغاز النيون، وتم إجراء تجارب إضافية لأمثلة نظام الإلكترونات من أجل مصعد أسطواني بهدف تحسين مردود الأشعة السينية اللينة والاستفادة من هذه النتائج في حالة المصعد المدبب وعند استخدام الجهاز تجريبياً.

خلال المشروع الذي يهدف إلى تشغيل جهاز PF24 الذي يعمل بمزيج من غازي D2-Ne [89] لدراسة حركات البلازما والإصدار النيوتروني، تم تسجيل منحنيات تيار تجريبية لـ 8 انقراغات لغاز النيون النقي في مجال من الضغوط 0.08 - 0.25 Torr. خلال هذه التجارب لم يكن بالإمكان تسجيل تطور تضيق عمود البلازما في اللحظة المناسبة، ولم تكن البيانات التجريبية لإصدار الأشعة السينية اللينة متاحة. لذلك، بناءً على منحنيات تيار التفريغ التجريبية التي تم الحصول عليها من PF24 (16.8 kJ) تم إجراء العديد من التجارب العددية باستخدام كود نموذج لي للحصول على بعض المعلومات حول إصدار الأشعة السينية اللينة من هذا الجهاز، يوضح الجدول 14.3 بارامترات التشغيل وبارامترات النموذج لجهاز PF24.

الجدول 14.3: بارامترات التشغيل والمواءمة لكود نموذج لي المستخدمة في محاكاة جهاز PF24 باستخدام مصعد أسطواني.

E_o (kJ)	V_o (kV)	C_o (μ F)	b (cm)	a (cm)	z_o (cm)	
16.8	17	116.12	4.9	3.1	15.6	
p_o (Torr)	L_o (nH)	r_o (m Ω)	f_m	f_c	f_{mr}	f_{cr}
0.225	20.9	9.2	0.27	0.7	0.75	0.48

يوضح الشكل 11.3 التوافق الجيد بين منحنى التيار التجريبي ومنحنى التيار المحسوب عند إجراء المواءمة باستخدام كود نموذج لي لجهاز البلازما المحرقية PF24.



الشكل 11.3: مواءمة منحنى التيار التجريبي مع المحسوب لجهاز البلازما المحرقية PF24 عند 17 kV، 0.225 Torr من أجل مصعد أسطواناني.

1.3.2.3. نظام الإلكتروودات الأساسي لجهاز PF24:

(The Original Electrode System of the PF24 Device):

من أجل نظام الإلكتروودات الأساسي والذي يستخدم مصعد أسطواناني، تم إجراء تجارب عديدة بتغيير ضغط الغاز من 0.11 – 0.44 Torr حيث تبين أنه بالنسبة للضغوط الأعلى من 0.44 Torr تكون درجة الحرارة منخفضة للغاية وخارج نافذة درجة الحرارة اللازمة لتوليد الأشعة السينية اللينة بمرودود عالي. أما بالنسبة للمصعد المدبب، فمجال الضغط المطبق 1 – 1.5 Torr حيث أنه بالنسبة للضغوط الأقل من 1 Torr تكون درجة الحرارة مرتفعة للغاية وخارج نافذة درجة الحرارة اللازمة لتوليد الأشعة السينية اللينة بمرودود عالي. تم إجراء العديد من التجارب العددية بيّنت أن هناك توليفة مثلى لبارامترات التدبب تعطي أعلى مردود للأشعة السينية اللينة وهي $z_s = 14$ cm و $a_e = 1$ cm، يبين الجدولين 15.3 و 16.3 النتائج التي تم الحصول عليها.

الجدول 15.3: بعض بارامترات عمود البلازما المتضيق بدلالة الضغط لجهاز PF24 باستخدام مصعد أسطواني ومدبب قبل الأمثلة.

Pinch Parameters Anode Shapes	p_o (Torr)	I_{peak} (kA)	I_p (kA)	T_p (10^6 K)	v_a (cm/ μ s)	v_s (cm/ μ s)	v_p (cm/ μ s)
Cylindrical anode	0.11	536	215	6.1	18.3	30	20.
	0.33	611	235	2.6	12.7	24	15.4
	0.36	616	235	2.3	12.2	23	15.0
	0.38	618	235	2.2	12.0	22	14.8
	0.40	620	235	2.1	11.8	21	14.6
	0.44	626	235	1.9	11.4	20	14.2
Tapered anode	1.0	671	219	6.9	8.5	14	10.0
	1.1	676	216	6.1	8.2	13	9.6
	1.2	680	213	5.6	7.8	12	9.1
	1.3	684	209	5.3	7.5	11	8.7
	1.4	688	206	5.0	7.2	11	8.3
	1.5	691	201	4.6	7.0	10	7.9

الجدول 16.3: بعض بارامترات عمود البلازما المتضيق ومردود الأشعة السينية اللينة بدلالة الضغط لجهاز PF24 باستخدام مصعد أسطواني ومدبب قبل الأمثلة.

Pinch Parameters Anode shapes	p_o (Torr)	r_p (cm)	z_p (cm)	τ_p (ns)	n_i ($10^{23}/m^3$)	t_a (μ s)	SF [kA/(cm. Torr $^{1/2}$)]	Y_{sxr} (J)
Cylindrical anode	0.11	0.37	5.7	30	1	1.3	521	2
	0.33	0.27	5.5	35	4	1.8	346	58
	0.36	0.21	6.0	41	7	1.9	331	122
	0.38	0.20	6.0	42	8	1.9	324	91
	0.40	0.19	6.2	43	9	1.9	318	64
	0.44	0.19	6.1	44	10	2.0	306	2
Tapered anode	1.0	0.03	5.1	40	425	2.6	217	280
	1.1	0.03	6.9	42	468	2.7	208	357
	1.2	0.03	7.6	44	404	2.8	200	376
	1.3	0.03	7.8	47	345	2.8	194	370
	1.4	0.04	7.7	49	288	2.9	187	340
	1.5	0.04	7.2	52	235	3.0	182	296

نلاحظ من النتائج الموضحة في الجدولين 15.3 و 16.3 أن قيمة المردود تزداد عند استخدام المصعد المدبب مقارنة مع المردود في حالة المصعد الأسطواني، وهو ما تم الحصول عليه من أجل جهاز NX2 (تجريبياً وعددياً). وكما ذكرنا في الفقرة 1.2.3.3 إن الزيادة في قيمة المردود تعود إلى الانخفاض التدريجي في نصف القطر النهائي للمصعد.

2.3.2.3. أمثلة نظام الإلكترودات لجهاز PF24:

(The Optimization Electrode System of the PF24 Device):

باستخدام بارامترات النموذج الموضحة في الجدول 14.3 أعلاه لجهاز PF24، تم إجراء المزيد من التجارب العددية لأمثلة نظام الإلكترودات بهدف تحسين مردود الأشعة السينية اللينة وذلك عن طريق تغيير كل من z_o و a و b و p_o مع الحفاظ على $c = b/a$ ثابتاً عند $c = 1.581$. حيث تم تغيير القيم ضمن المجالات الآتية:

$z_o = 14 - 16$ cm و $a = 2.9 - 3.1$ cm و $p_o = 0.37 - 0.42$ Torr. أجريت التجارب العددية بإتباع الإجراءات الآتية [19]:

عند قيمة معينة لـ z_o معين تم تثبيت a عند قيمة معينة ومن ثم تم تغيير الضغط p_o للوصول إلى أعلى مردود لقيم a و b . بعد ذلك، أدخلنا قيمة أخرى لـ a و b مع تغيير قيمة p_o للوصول إلى أعلى مردود حتى الحصول على التوليفة المثلى لقيم a و b و p_o التي تعطي أعلى مردود عند z_o المعينة. بعد ذلك جرى أخذ قيمة أخرى لـ z_o وتكرار الإجراء السابق حتى التوصل إلى التوليفة المثلى لـ a و b و p_o المقابلة لهذه القيمة الجديدة لـ z_o . كررت هذه الإجراءات حتى الحصول على التوليفة المثلى لـ z_o و a و b و p_o والتي تعطي أعلى مردود للأشعة السينية اللينة.

كانت التوليفة المثلى هي ($z_o = 14.4$ cm, $a = 3.05$ cm, $b = 4.82$ cm) والتي تعطي أعلى مردود، لاحظنا تحسناً في المردود من 122 J عند ضغط مثالي 0.36 Torr إلى 135 J عند ضغط مثالي 0.38 Torr. اعتماداً على التحسين السابق، أجريت المزيد من التجارب العددية على نوعين من المصاعد لتحسين المردود. تم الحفاظ على نفس التوليفة المثلى بالنسبة للمصعد الأسطواني والمدبب مع تثبيت شروط التدبب $z_s = 14$ cm و $a_e = 1$ cm. يوضح الجدولين 17.3 و 18.3 النتائج التي تم الحصول عليها.

الجدول 17.3: بعض بارامترات عمود البلازما المتضيق ومردود الأشعة السينية اللينة بدلالة الضغط لجهاز PF24 للمصدر الأسطواني والمدبب بعد الأمثلة.

Pinch Parameters Anode shapes	p_o (Torr)	I_{peak} (kA)	I_p (kA)	T_p (10^6 K)	v_a (cm/ μ s)	v_s (cm/ μ s)	v_p (cm/ μ s)
Cylindrical anode	0.11	530	214	6.2	18.2	30.0	20.8
	0.33	611	237	2.7	12.7	24.4	15.6
	0.36	617	237	2.4	12.3	23.1	15.2
	0.38	620	238	2.3	12.0	22.4	15.0
	0.40	622	238	2.2	11.9	22.0	14.8
	0.44	626	238	2.0	11.5	20.9	14.4
Tapered anode	1.0	670	231	7.7	8.4	14.7	10.6
	1.1	675	229	6.9	8.0	13.5	10.0
	1.2	679	226	6.2	7.7	13.1	9.7
	1.3	683	224	5.7	7.4	12.2	9.2
	1.4	686	221	5.3	7.2	11.9	8.9
	1.5	689	218	5.0	6.9	11.4	8.6

الجدول 18.3: بعض بارامترات عمود البلازما المتضيق ومردود الأشعة السينية اللينة بدلالة الضغط لجهاز PF24 للمصدر الأسطواني والمدبب بعد الأمثلة.

Pinch Parameters Anode shapes	p_o (Torr)	r_p (cm)	z_p (cm)	τ_p (ns)	n_i ($10^{23}/\text{m}^3$)	t_a (μ s)	SF [kA/(cm. Torr $^{1/2}$)]	Y_{sxr} (J)
Cylindrical anode	0.11	0.37	5.6	30	1	1.3	524	2
	0.33	0.28	5.4	34	3	1.7	352	51
	0.36	0.22	5.8	40	6	1.8	337	103
	0.38	0.20	6.0	41	8	1.8	330	135
	0.40	0.19	5.9	41	9	1.8	324	103

	0.44	0.19	6.1	43	10	1.9	311	40
Tapered anode	1.0	0.07	4.0	37	52	2.4	220	115
	1.1	0.02	5.5	40	491	2.5	211	329
	1.2	0.03	6.7	41	476	2.6	203	374
	1.3	0.03	7.5	44	423	2.6	196	404
	1.4	0.03	7.6	45	367	2.7	190	387
	1.5	0.04	7.5	47	315	2.8	185	360

نلاحظ من الجدولين 16.3 و 18.3 أن المردود للمصعد المدبب ارتفع من 376 J عند الضغط الأمثل

1.2 Torr إلى 404 J عند الضغط الأمثل 1.3 Torr.

3.3. الخاتمة (Conclusion):

تم في هذا الفصل إجراء تجارب عديدة باستخدام كود نموذج لي إصدار RADPFV5.16 لمحاكاة أجهزة البلازما المحرقة NX2، INTI، UNU/ICTP، APF، NX1، PF7، PF24 والتي تعمل بغاز النيون كغاز تشغيل ومن أجل شروط تشغيل مختلفة (ضغط التشغيل، جهد التشغيل، طول المصعد، وشكل المصعد). تم مواءمة منحنيات التيار التجريبية لهذه الأجهزة بشكل جيد مع منحنيات التيار المحسوبة عند الضغط التجريبي وتم الحصول على بارامترات النموذج لأفضل مواءمة.

في المرحلة الأولى من العمل، تم إجراء تجارب عديدة على أجهزة بلازما محرقة ذات مصعد أسطواني لدراسة تأثير تغير الضغط على مردود الأشعة السينية اللينة ولاحظنا أن المردود له نفس السلوك لجميع الأجهزة، اعتماداً على النتائج التي حصلنا عليها يمكن الاستنتاج أن مردود الأشعة السينية اللينة يزداد بزيادة الضغط حتى يصل إلى قيمة عظمى تقابل الضغط الأمثل ثم يعود إلى الانخفاض عند الضغوط الأعلى. ومن ثم تغيير جهد التشغيل وطول المصعد لدراسة تأثيرهما على مردود الأشعة السينية اللينة بدلالة ضغط الغاز. وقد تم ملاحظة أن الزيادة في جهد التشغيل تسبب زيادة في المردود وهذا السلوك متشابه لجميع الأجهزة المدروسة. علاوة على ذلك، بالنسبة لطول المصعد تم التأكيد على وجود طول مصعد مثالي يكون عنده المردود أعظمي. وتم إجراء مقارنات

بين النتائج التجريبية والمحسوبة للبارامترات v_s و v_a و SF و ID (للأجهزة NX1 و NX2) وتم الحصول على توافق جيد بين النتائج التجريبية والمحسوبة.

أظهرت النتائج العددية أن مردود الأشعة السينية اللينة يعتمد بشدة على كل من ضغط وجه التشغيل وطول المصعد وتشكيل الإلكتروودات كما يتعلق أيضاً بدرجة الحرارة وأبعاد عمود البلازما المتضيق والسرعات المحورية والقطرية والكثافة العددية للأيونات، حيث أن التفاعل بين هذه التأثيرات المتنافسة هو ما يحدد الضغط الأمثل المقابل للقيمة العظمى للمردود.

في المرحلة الثانية من هذا العمل، تم إجراء تجارب عددية على جهاز NX2 ذو مصعد مدبب لدراسة المردود بدلالة الضغط عند جهود تشغيل مختلفة وكان سلوك المردود مشابه للسلوك المعروف للأجهزة ذات المصعد الأسطواني. تم أيضاً مقارنة المردود الناتج من جهاز NX2 ذو مصعد مدبب مع المردود الناتج من نفس الجهاز ولكن مع مصعد أسطواني، لوحظ أن المردود زاد بمقدار 5 مرات عند التبديل من المصعد الأسطواني إلى المدبب. تم إجراء مقارنة بين النتائج التجريبية والمحسوبة لنوعي المصاعد وتم العثور على تشابه في السلوك بينهما. بالإضافة إلى ذلك، أجريت تجارب عددية لدراسة تأثير تغيير شروط التدبب على مردود الأشعة السينية اللينة وتم التوصل إلى نتائج مثيرة للاهتمام حيث أن المردود لا يرتبط بـ z_s ولكنه مرتبط إلى حد كبير بـ a_e حيث يوجد a_e مثالي والذي يعطي أعلى مردود.

في المرحلة الأخيرة، تم الاستفادة من التوافق بين النتائج التجريبية والمحسوبة للأجهزة المدروسة لإجراء تجارب عددية على جهاز PF24 (والذي لا يوجد له نتائج تجريبية مسجلة لمردود الأشعة السينية اللينة) لإيجاد أعلى مردود للأشعة السينية اللينة والمقابل للضغط الأمثل لأشكال المصعد المختلفة الأسطوانية والمدبب، كما أجريت تجارب عددية لأمثلة الشروط الهندسية للمصعد الأسطواني من أجل الحصول على مردود أشعة سينية لينة أعظمي لاستخدام هذه النتائج عند إجراء تجارب عملية على جهاز PF24. ثم تم استخدام هذه النتائج لإجراء تجارب عددية إضافية للحصول على أعلى مردود ممكن لهذا الجهاز من أجل المصعد الأسطواني والمدبب، وقد تبين أن النتائج التي تم الحصول عليها لجهاز PF24 مماثلة للجهاز NX2.

الاستنتاجات

من خلال إجراء سلسلة شاملة من التجارب العددية باستخدام كود نموذج لي (RADPFV5.16) لمحاكاة عدد من أجهزة البلازما المحرقة الكثيفة ذات طاقات مختلفة، وباعتماد على غاز النيون كغاز تشغيل، أمكن استخلاص مجموعة من الاستنتاجات المتعلقة بسلوك إصدار الأشعة السينية اللينة والعوامل المؤثرة عليه، والتي يمكن تلخيصها وتفصيلها على النحو الآتي:

أظهرت النتائج العددية بوضوح أن مردود الأشعة السينية اللينة في أجهزة البلازما المحرقة ليس مستقلاً، بل هو ناتج عن تفاعل معقد بين مجموعة من بارامترات التشغيل والبارامترات الهندسية، وفي مقدمتها ضغط غاز التشغيل، جهد التشغيل، طول المصعد، وشكل وتصميم المصعد. وقد بينت الدراسة أن لكل جهاز بلازما محرقة توليفة مثلى من هذه البارامترات تؤدي إلى تحقيق أعلى مردود ممكن للأشعة السينية اللينة.

أظهرت التجارب العددية أن مردود الأشعة السينية اللينة يزداد مع زيادة ضغط غاز التشغيل حتى الوصول إلى قيمة عظمى تقابل ما يُعرف بالضغط الأمثل، وبعدها يبدأ المردود بالانخفاض عند الضغوط الأعلى. ويُعزى هذا السلوك إلى التوازن الدقيق بين زيادة الكثافة العددية للأيونات من جهة، وما يرافق الضغوط العالية من انخفاض في درجة حرارة الإلكترونات، وتغير في انضغاط عمود البلازما، وزيادة الخسائر الإشعاعية والتصادمية من جهة أخرى. وقد تبين أن هذا السلوك عام ومشترك بين جميع الأجهزة المدروسة، على الرغم من اختلاف طاقاتها وهندستها، مما يدل على وجود آلية أساسية تحكم هذا السلوك.

كما أظهرت الدراسة أن زيادة جهد التشغيل تؤدي إلى زيادة واضحة في مردود الأشعة السينية اللينة، ويعود ذلك إلى الزيادة في الطاقة المخزنة في النظام، وما يرافقها من ارتفاع في شدة التيار الأعظمي، وزيادة سرعة الانضغاط، وارتفاع درجة حرارة عمود البلازما المتضيق. وقد لوحظ أن هذا التأثير متشابه لجميع الأجهزة المدروسة، ما يشير إلى أن جهد التشغيل يُعد أحد أهم العوامل المتحكم في كفاءة تحويل الطاقة الكهربائية المخزنة إلى إصدار أشعة سينية لينة.

فيما يتعلق بطول المصعد، أكدت النتائج العددية وجود طول مصعد مثالي لكل جهاز، يكون عنده مردود الأشعة السينية اللينة أعظماً. ويُعزى ذلك إلى أنه عند هذا الطول يحدث توافق بين زمن حدوث التضيق وزمن وصول تيار تفريغ بنك المكثفات إلى ذروته. إن الابتعاد عن هذا الطول المثالي، سواء بالزيادة أو النقصان، يؤدي إلى انخفاض المردود نتيجة عدم التزامن بين زمن حدوث التضيق وذروة تيار التفريغ.

أظهرت المقارنات بين النتائج التجريبية والنتائج المحسوبة عددياً لعدد من البارامترات الفيزيائية المهمة مثل السرعة المحورية والقطرية لغمد التيار ومعامل السرعة وتيار عمود البلازما المتضيق توافقاً جيداً، لا سيما في الأجهزة NX1 و NX2. ويعزز هذا التوافق الثقة في كود لي وقدرته على تمثيل الفيزياء الأساسية لأجهزة البلازما المحرقة بدقة مقبولة.

بيّنت النتائج كذلك أن مردود الأشعة السينية اللينة يعتمد بشكل مباشر وقوي على خصائص عمود البلازما المتضيق، مثل درجة حرارة الإلكترونات، الكثافة العددية للأيونات، نصف قطر العمود، طوله، وزمن بقائه. وقد أظهرت الدراسة أن تراكب هذه البارامترات هو العامل الحاسم في تحديد القيمة العظمى للمردود، وليس أي منها بشكل منفرد.

في المرحلة الثانية من الدراسة، والتي خُصصت لدراسة تأثير شكل المصعد، تبين أن استخدام مصعد مدبب يؤدي إلى زيادة كبيرة في مردود الأشعة السينية اللينة مقارنة بالمصعد الأسطواني، حيث لوحظ في جهاز NX2 أن المردود ازداد بما يقارب خمس أضعاف عند استخدام المصعد المدبب. ويُعزى ذلك إلى التحسن في انضغاط عمود البلازما، وزيادة كثافة ودرجة حرارة العمود المتضيق.

كما أظهرت الدراسة أن مردود الأشعة السينية اللينة في حالة المصعد المدبب لا يعتمد بشكل كبير على المسافة المحورية التي يبدأ عندها التدبب، في حين يعتمد بشكل حساس على نصف قطر نهاية التدبب، حيث وُجد أن هناك قيمة مثلى لنصف قطر نهاية التدبب تعطي أعلى مردود. وتُعد هذه النتيجة ذات أهمية عملية كبيرة في تصميم مصاعد محسّنة لأجهزة البلازما المحرقة.

في المرحلة الأخيرة، وبالاعتماد على التوافق الجيد بين النتائج العددية والتجريبية للأجهزة المدروسة، تم تطبيق الكود على جهاز PF24 الذي لا تتوفر له نتائج تجريبية منشورة لمردود الأشعة السينية اللينة. وقد أظهرت

النتائج أن سلوك هذا الجهاز من حيث اعتماد المردود على الضغط وشكل المصعد مشابه لسلوك جهاز NX2، مما يوفر قاعدة موثوقة لتوجيه التجارب المستقبلية على هذا الجهاز.

التوصيات

استناداً إلى النتائج والاستنتاجات التي تم التوصل إليها في هذا البحث، يمكن اقتراح مجموعة من التوصيات العلمية والعملية التي من شأنها توسيع نطاق هذا العمل وتعزيز الفائدة العلمية والتطبيقية منه:

يوصى بإجراء دراسات تجريبية وعددية متكاملة لإصدار الأشعة السينية اللينة من أجهزة البلازما المحرقة التي تعمل في مجالات طاقة مختلفة، بدءاً من الأجهزة منخفضة الطاقة (من رتبة J) وصولاً إلى الأجهزة عالية الطاقة (من رتبة MJ).

يوصى بالاستفادة من النتائج العددية المتعلقة بجهاز NX2 ذي المصعد المدبب، ولا سيما شروط التدبب المثلى التي تم التوصل إليها، لإجراء تجارب عملية مخصصة تهدف إلى التحقق التجريبي من الزيادة الكبيرة في مردود الأشعة السينية اللينة.

كما يوصى باستخدام النتائج العددية المتعلقة بجهاز PF24 كأساس لتخطيط وتنفيذ تجارب عملية مستقبلية، بحيث يتم اختيار شروط التشغيل والهندسة المثلى للمصعد قبل تنفيذ التجربة، مما يقلل من عدد التجارب المكلفة ويزيد من كفاءة البحث التجريبي.

يوصى بتطوير كود لي المستخدم في هذا البحث ليشمل تأثيرات فيزيائية إضافية لم يتم تضمينها في النسخة الحالية، مثل تأثير طول الطبقة العازلة، وتأثير انحناء غمد البلازما، وكذلك دراسة تأثير أشكال مصاعد غير الأسطوانية وأكثر تعقيداً على مردود الأشعة السينية اللينة.

أخيراً، يوصى بتوسيع نطاق الدراسة ليشمل غازات تشغيل أخرى، أو مخاليط غازية، بهدف دراسة إمكانية تحسين مردود الأشعة السينية اللينة أو تغيير خصائص طيفها بما يتناسب مع التطبيقات المختلفة، سواء في فيزياء البلازما الأساسية أو في التطبيقات الطبية والصناعية.

References

- [1] J. W. Mather, "Formation of a high-density deuterium plasma focus," *The Physics of Fluids*, vol. 8, no. 2, pp. 366-377, 1965.
- [2] N. V. Filippov, T. I. Filippova and V. P. Vinogradov, "Dense high-Temperature Plasma in a Non-cylindrical Z-pinch Compression.," *Nuclear Fusion Supplement*, vol. 2, p. 577, 1962.
- [3] H. A. B. Bodin, A. A. Newton and N. J. Peacock, "Rapid compression heating of a plasma in the linear z-pinch.," *Nuclear Fusion*, vol. 1, no. 1, p. 54, 1960.
- [4] W. H. Bostick, V. Nardi and W. Prior, "X-ray fine structure of dense plasma in a co-axial accelerator.," *Plasma Physics*, vol. 8, no. 1, pp. 7-20, 1972.
- [5] R. A. Gutcheck and J. J. Muray, "Intense plasma source for x-ray microscopy.," *In High Resolution Soft X-Ray Optics*, vol. 316, pp. 196-202, 1982.
- [6] S. Lee, "Plasma focus model yielding trajectory and structure.," in *Radiation in plasmas: V.2. Reviews from 1983 college on plasma physics*, vol. 26, International Centre for Theoretical Physics, 1984, pp. 978-987.
- [7] S. Lee, B. C. Tan and A. C. Chew, *Laser and plasma technology*, Singapore, 1985. [Online]. Available:
<https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/6742642>
- [8] S. Lee, S. P. Moo, C. S. Wong, & A. C. Chew, "Twelve years of UNU/ICTP PFF—a review," ICTP OAA report, 1988.

- [9] M. H. Liu, "Soft x-rays from compact plasma focus.," Ph.D. dissertation, *National Institute of Education, Nanyang Technological University*, Singapore, 1996.
- [10] G. Zhang, "Plasma soft X-ray source for microelectronic lithography.," Ph.D. dissertation, *Nanyang Technological University*, Singapore, 1999.
- [11] S. Lee and C. S. Wong, "Initiating and strengthening plasma research in developing countries.," *Physics today*, vol. 59, no. 5, pp. 31-36, 2006.
- [12] S. Lee, "Plasma focus radiative model: Review of the Lee model code," *Journal of Fusion Energy*, vol. 33, no. 4, pp. 319-335, 2014.
- [13] A. Singh, "Comparative study of plasma focus machines.," Ph.D. dissertation, *Centre for Plasma Research, INTI International University*, Malaysia, 2015.
- [14] P. Gautam, R. Khanal, S. H. Saw and S. Lee, "Measurement of model parameters versus gas pressure in high-performance plasma focus NX1 and NX2 operated in neon.," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 45, no. 8, pp. 2292-2297, 2017.
- [15] M. A. Malek, M. K. Islam, M. Akel, M. Salahuddin, S. H. Saw and S. Lee, "Optimization of neon soft X-ray yield in a low-energy dense plasma focus device," *Modern Physics Letters B*, vol. 33, no. 07, p. 1950077, 2019.
- [16] S. Al-Hawat, M. Akel, S. H. Saw and S. Lee, "Experimental and numerical fitting of model parameters versus the gas pressure using six phase radiative Lee model in AECS PF-1, 2 and INTI PF for nitrogen, argon, and neon gases," *Contributions to Plasma Physics*, vol. 60, no. 7, p. e201900119, 2020.

- [17] H. A. El-Sayed, T. M. Allam, K. M. Ahmed and H. M. Soliman, "Dependence of Soft X-Ray Yield on Plasma Focus Parameters and Its Kinetic and Magnetic Pressures.," *Plasma Physics Reports*, vol. 49, no. 6, pp. 718-724, 2023.
- [18] S. H. Saw, P. C. K. Lee, R. S. Rawat and S. Lee, "Optimizing UNU/ICTP PFF plasma focus for neon soft X-ray operation," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 37, no. 7, pp. 1276-1282, 2009.
- [19] M. Akel, S. Al-Hawat and S. Lee, "Neon soft X-ray yield optimization from PF-SY1 plasma focus device," *Journal of fusion energy*, vol. 30, no. 1, pp. 39-47, 2011.
- [20] M. Akel, S. Lee and S. H. Saw, "Numerical experiments in plasma focus operated in various gases.," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 40, no. 12, pp. 3290-3297, 2012.
- [21] M. Niknam Sharak, S. Goudarzi, A. Raeisdana and M. Jafarabadi, "Numerical analysis of amirkabir plasma focus (APF) device for neon and argon gases.," *Journal of Fusion Energy*, vol. 32, pp. 258-262, 2013.
- [22] F. Jr Apilado Roy, "Investigation and Optimization of Neon Soft X-ray of the INTI Plasma Focus at 12 kV.," Ph.D. dissertation, *INTI International University*, 2015.
- [23] M. A. Malek, M. N. Huda, M. K. Islam and S. Lee, "Effect of atomic number and pressure on plasma pinch properties and characteristic soft x-ray emission in PF1000.," *Journal of Physics Communications*, vol. 6, no. 12, p. 125001, 2022.

- [24] H. Barati, "Effects of Electrode Geometric Parameters on Argon Soft X-Ray Radiation From Plasma Focus Machine: An Investigation by the Modified Lee Model.," *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2023.
- [25] D. Wong, A. Patran, T. L. Tan, R. S. Rawat and P. Lee, "Soft X-ray optimization studies on a dense plasma focus device operated in neon and argon in repetitive mode.," *IEEE Transactions on plasma science*, vol. 32, no. 6, pp. 2227-2235, 2004.
- [26] D. Wong, P. Lee, T. Zhang, A. Patran, T. L. Tan, R. S. Rawat and S. Lee, "An improved radiative plasma focus model calibrated for neon-filled NX2 using a tapered anode.," *Plasma Sources Science and Technology*, vol. 16, no. 1, p. 116, 2006.
- [27] H. Barati and M. Habibi, "The effect of the shape of the anode head on the nitrogen soft X-ray emission from a dense plasma focus device: A numerical investigation using the modified lee model code accompanied by experiments.," *Journal of Fusion Energy*, vol. 38, pp. 205-212, 2019.
- [28] H. Barati, "Investigation of nitrogen soft X-ray emission from dense plasma focus with anode with curved tip using the lee model.," *Journal of Fusion Energy*, vol. 42, no. 1, p. 1, 2023.
- [29] R. S. Rawat, "Dense Plasma Focus—High-Energy-Density Pulsed Plasma Device Based Novel Facility for Controlled Material Processing and Synthesis," in *In Plasma Science and Technology for Emerging Economies*, Singapore, Springer, 2017, pp. 39-112.
- [30] S. Wahbe, Y. Abou-Ali, M. Akel, S. Lee and L. Marciniak, "Numerical experiments on the total D–D fusion neutron yield versus deuterium pressure for different energy plasma focus devices using the Lee model code.," *Plasma Phys. Control. Fusion*, vol. 65, no. 5, p. 055022, 2023.

- [31] A. Altarabulsi, Y. Abou-Ali, S. A. Salo, M. Akel and S. Lee, "Deuteron beam fluence emitted from dense plasma focus: Comparative investigation and simulation.," *Journal of Applied Research and Technology*, vol. 22, no. 4, pp. 567-578, 2024.
- [32] S. Bing, "Comparative study of dynamics and X-ray emission of several plasma focus devices.," Ph.D. dissertation, *School of Science, Nanyang Technological University*, Singapore, 2000.
- [33] S. Goudarzi, R. Amrollahi, & R. Saberi Moghaddam, "A model based on lumped parameters for Filippov-type plasma focus devices.," *Journal of fusion energy*, vol. 27, no. 3, pp. 195-199, 2008.
- [34] S. Lee, P. Lee, G. Zhang, X. Feng, V. A. Gribkov, M. Liu and T. K. Wong, "High rep rate high performance plasma focus as a powerful radiation source.," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 26, no. 4, pp. 1119-1126, 1998.
- [35] R. Alibazi Behbahani, "Enhancement of charge particle emission from a plasma focus device.," Ph.D. dissertation, *University of saskatchewan*, saskatoon, canada, 2017.
- [36] S. Al-Hawat, "Axial velocity measurement of current sheath in a plasma focus device using a magnetic probe.," *IEEE transactions on Plasma Science*, vol. 32, no. 2, pp. 764-769, 2004.
- [37] S. Lee, T. Y. Tou, S. P. Moo, M. A. Eissa, A. V. Gholap, K. H. Kwek and M. Zakaullah, "A simple facility for the teaching of plasma dynamics and plasma nuclear fusion.," *American Journal of Physics*, vol. 56, pp. 62-68, 1988.

- [38] S. R. Chung, "Simulation and Characterization of a Dense Plasma Focus Device.," Ph.D. dissertation, *University of saskatchewan*, saskatoon, canada, 2018.
- [39] A. Donges, G. Herziger, H. Krompholz, F. Rühl and K. Schönbach, "The breakdown phase in a coaxial plasma gun.," *Physics letters A*, vol. 76, no. (5-6), pp. 391-392, 1980.
- [40] H. Krompholz, W. Neff, F. Rühl, K. Schönbach and G. Herziger, "Formation of the plasma layer in a plasma focus device.," *Physics Letters A*, vol. 77, no. 4, pp. 246-248, 1980.
- [41] W. Kies, "Power limits for dynamical pinch discharges.," *Plasma physics and controlled fusion*, vol. 28, no. 11, p. 1645, 1986.
- [42] S. H. Saw, S. Lee, F. Roy, P. L. Chong, V. Vengadeswaran, A. S. M. Sidik and A. Singh, "In situ determination of the static inductance and resistance of a plasma focus capacitor bank.," *Review of Scientific Instruments*, vol. 81, no. 5, 2010.
- [43] M. S. Rafique, P. Lee, A. Patran, R. S. Rawat and S. Lee, "Radiation emission correlated with the evolution of current sheath from a deuterium plasma focus.," *Journal of fusion energy*, vol. 29, pp. 295-304, 2010.
- [44] A. J. Toepfer, D. R. Smith and E. H. Beckner, "Ion heating in the dense plasma focus," *The Physics of Fluids*, vol. 14, no. 1, pp. 52-61, 1971.
- [45] R. A. Behbahani, A. Hirose and C. Xiao, "Plasma heating and emission of runaway charged particles in a plasma focus device.," *Europhysics Letters*, vol. 113, no. 5, p. 55001, 2016.
- [46] N. Majernik, S. Pree, Y. Sakai, B. Naranjo, S. Putterman and J. Rosenzweig, "Simultaneous ultra-fast imaging and neutron emission from

a compact dense plasma focus fusion device.," *Instruments*, vol. 2, no. 2, p. 6, 2018.

[47] A. Bernard, A. Coudeville, A. Jolas, J. Launspach and J. De Mascureau, "Experimental studies of the plasma focus and evidence for nonthermal processes.," *The Physics of Fluids*, vol. 18, no. 2, pp. 180-194, 1975.

[48] P. Choi, C. S. Wong and H. Herold, "Studies of the spatial and temporal evolution of a dense plasma focus in the X-ray region.," *Laser and Particle Beams*, vol. 7, no. 4, pp. 763-772, 1989.

[49] W. L. Harries, J. H. Lee and D. R. McFarland, "Trajectories of high energy electrons in a plasma focus.," *Plasma physics*, vol. 20, no. 2, p. 95, 1978.

[50] A. B. Bud'Ko, F. S. Felber, A. I. Kleev, M. A. Liberman and A. L. Velikovich, "Stability analysis of dynamic Z pinches and theta pinches.," *Physics of Fluids B: Plasma Physics*, vol. 1, no. 3, pp. 598-60, 1989.

[51] E. Skladnik-Sadowska, D. Zaloga, M. J. Sadowski, R. Kwiatkowski, K. Malinowski, R. Miklaszewski and K. Tomaszewski, "Research on soft x-rays in high-current plasma-focus discharges and estimation of plasma electron temperature.," *Plasma Physics and Controlled Fusion*, vol. 58, no. 9, p. 095003, 2016.

[52] S. Lee, S. H. saw, P. Lee and R. S. Rawat, "Numerical experiments on plasma focus neon soft X-ray scaling.," *Physics and Controlled Fusion*, vol. 51, no. 10, p. 105013, 2009.

[53] A. J. Toepfer, D. R. Smith and E. H. Beckner, "Ion heating in dense plasma focus.," *Bulletin of the American Physical Society*, vol. 14, no. 11, p. 1013, 1969.

- [54] R. S. Rawat, T. Zhang, C. B. L. Phua, J. X. Y. Then, K. A. Chandra, X. Lin and P. Lee, "Effect of insulator sleeve length on soft x-ray emission from a neon-filled plasma focus device.," *Plasma Sources Science and Technology*, vol. 13, no. 4, p. 569, 2004.
- [55] L. Soto, "New trends and future perspectives on plasma focus research.," *Plasma Physics and Controlled Fusion*, vol. 47, no. 5A, p. A361, 2005.
- [56] N. Qi, S. F. Fulghum, R. R. Prasad and M. Krishnan, "Space and time resolved electron density and current measurements in a dense plasma focus Z-pinch.," *IEEE transactions on plasma science*, vol. 26, no. 4, pp. 1127-1137, 1998.
- [57] T. Zhang, J. Lin, A. Patran, D. Wong, S. M. Hassan, S. Mahmood and R. S. Rawat, "Optimization of a plasma focus device as an electron beam source for thin film deposition.," *Plasma Sources Science and Technology*, vol. 16, no. 2, p. 250, 2007.
- [58] M. V. Roshan, S. V. Springham, A. Talebitaher, R. S. Rawat and P. Lee, "Magnetic spectrometry of high energy deuteron beams from pulsed plasma system.," *Plasma Physics and Controlled Fusion*, vol. 52, no. 8, p. 085007, 2010.
- [59] P. Lee, "Plasma Focus as a Multiple Radiation Source.," in *Institute for Plasma Focus Studies*, Bangkok, 2012.
- [60] T. Zhang, A. Patran, D. Wong, S. M. Hassan, S. V. Springham, T. L. Tan, P. Lee, S. Lee, & R. S. Rawat, "Electron beam emission characteristics from plasma focus devices," *In AIP Conference Proceedings*, vol. 808, no. 1, pp. 235-238, January 2006.

- [61] S. Lee and A. Serban, "Dimensions and lifetime of the plasma focus pinch.," *IEEE Transactions on plasma science*, vol. 24, no. 3, pp. 1101-1105, 1996.
- [62] A. Serba and S. Lee, "Soft X-ray emission from a small plasma focus operated in deuterium.," *Plasma Sources Science and Technology*, vol. 6, no. 1, p. 78, 1997.
- [63] E. P. Bogolyubov, V. D. Bochkov, V. A. Veretennikov, L. T. Vekhoreva, V. A. Gribkov, A. V. Dubrovskii and G. X. Zhang, "A powerful soft X-ray source for X-ray lithography based on plasma focusing.," *Physica Scripta*, vol. 57, no. 4, p. 488, 1998.
- [64] R. S. Rawat, T. Zhang, G. J. Lim, W. H. Tan, S. J. Ng, A. Patran and S. Lee, "Soft X-ray imaging using a neon filled plasma focus X-ray source.," *Journal of fusion energy*, vol. 23, pp. 49-53, 2004.
- [65] A. R. J. A. Federico, P. L. Chong and S. H. Saw, "Optimisation of Neon srx (Soft x-ray) Yield of the INTI Plasma Focus Machine at 12 kv," *Journal of Engineering Science and Technology*, vol. 10, no. 2, pp. 184-195, 2015.
- [66] M. Trunk, "Numerical parameter studies for the dense plasma focus.," *Plasma Phys.*, vol. 17, p. 237, 1975.
- [67] M. Krishnan, "The dense plasma focus: A versatile dense pinch for diverse applications," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 40, no. 12, pp. 3189-3221, 2012.
- [68] A. Bernard, H. Bruzzone, P. Choi, H. Chuaqui, V. Gribkov, J. Herrera, A. Hirano, A. Krejci, S. Lee and C. Luo, "Scientific status of plasma focus.," *JOURNAL-MOSCOW Phys. Soc.*, vol. 8, p. 93–170, 1998.

- [69] S. Lee, "A sequential plasma focus," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 19, pp. 912-919, 1991.
- [70] S. Lee and S. H. Saw, "A course on plasma focus numerical experiments," in: *Jt. ICTP-IAEA Work. Dense Magn. Plasmas Plasma Diagnostics, ICTP Trieste*, 2010.
- [71] J. H. Gonzalez, F. R. Brollo and A. Clausse, "Modeling of the dynamic plasma pinch in plasma focus discharges based in Von Karman approximations.," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 37, p. 2178–2185, 2009.
- [72] S. Lee, S. H. Saw, H. Hegazy, J. Ali, V. Damideh, N. Fatis, H. Kariri, A. Khabrani and A. Mahasi, "Some generalised characteristics of the electro-dynamics of the plasma focus in its axial phase: Illustrated by an application to independantly determine the drive current fraction and the mass swept-up fraction.," *J. Fusion Energy*, vol. 33, p. 235–241, 2014.
- [73] D. Potter, "The formation of high-density z-pinch.," *Nucl. Fusion*, vol. 18, p. 813, 1978.
- [74] K. H. Kwek, "Pinch structure of a plasma focus.," Ph.D. dissertation, *Faculty of Science, Universiti malaya, Kualalumpur, Malaysia*, 1989.
- [75] S. Lee, "Radius ratios of argon pinches," *Aust. J. Phys.*, vol. 36, p. 891–896, 1983.
- [76] S. Lee and S. H. Saw, "Plasma focus ion beam fluence and flux—Scaling with [63]," *Phys. Plasmas*, vol. 19, 2012.
- [77] S. Al-Hawat and S. Saloum, "Characterization of a 2.8 kJ small plasma focus using a five phase radiative model.," *Contributions to Plasma Physics*, vol. 49, no. 1-2, pp. 5-14, 2009.

- [78] "NIST Atomic Spectra Database Levels Data," 2009. [Online]. Available: <http://physics.nist.gov/>.
- [79] M. Akel, S. Al- Hawat and S. Lee, "Pinch Current and Soft X-Ray Yield Limitations by Numerical Experiments on Nitrogen Plasma Focus," *J. Fusion Energy*, vol. 29, p. 94–99, 2010.
- [80] S. Al-Hawat, M. Akel, S. Lee and S. H. Saw, "Model parameters versus gas pressure in two different plasma focus devices operated in argon and neon," *J. Fusion Energy*, vol. 31, p. 13–20, 2012.
- [81] F. A. Roy Jr, P. L. F. A and S. H. Saw, "Correlation of measured neon soft X-ray pulses of the INTI plasma focus with the reflected shock phase at 12KV.," *International Journal of Modern Physics: Conference Series*, vol. 32, p. 1460327, 2014.
- [82] "Institute for Plasma Focus Studies," [Online]. Available: <http://www.plasmafocus.net>. [Accessed 23 February 2023].
- [83] R. Baghdadi, G. R. Etaati, M. Habibi, R. Amrollahi and A. Roomi, "Comprehensive study of neon HXR and SXR emitted from APF plasma focus device," *Journal of fusion energy*, vol. 30, pp. 545-554, 2011.
- [84] P. G. Burkhalter, G. Mehlman, D. A. Newman, M. Krishnan and R. R. Prasad, "Quantitative x-ray emission from a DPF device," *Review of scientific instruments*, vol. 63, no. 10, pp. 5052-5055, 1992.
- [85] M. Akel, S. Ismael, S. Lee, S. H. Saw and H. J. Kunze, "PF1000 High-Energy Plasma Focus Device Operated With Neon as a Copious Soft X-Ray Source," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 45, no. 11, pp. 2979-2983, 2017.

- [86] P. Lee and S. M. Hassan, "X-ray Diagnostics of Pulsed Plasmas Using Filtered Detectors," in *Plasma Science and Technology for Emerging Economies: An AAAPT Experience*, 2017, pp. 233-268.
- [87] M. Mahtab and M. Habibi, "Nitrogen soft and hard X-ray emissions using different shapes of anodes in a 4-kJ plasma focus device.," *Plasma Physics Reports*, vol. 39, pp. 993-998, 2013.
- [88] N. Talukder, N. K. Neog and T. K. Borthkur, "Effect of anode shape on pinch structure and X-ray emission of plasma focus device," *Results in Physics*, vol. 3, pp. 142-151, 2013.
- [89] Ł. Marciniak, A. Wójcik-Gargula, A. Kulińska, J. Bielecki and U. Wiącek, "Diagnostic systems for the nuclear fusion and plasma research in the PF-24 plasma focus laboratory at the IFJ PAN," *Nukleonika*, vol. 61, no. 4, pp. 413-418, 2016.

Abstract

In this research, numerical experiments were conducted using the Lee code (RADPFV5.13) on Mather-type plasma focus devices with different energy to study the effect of changing operating conditions (working gas, charging voltage), anode geometry (anode length), and anode design (cylindrical anode and tapered anode) on the soft X-ray yield emitted from these devices, using neon as the working gas, along with a details and characteristics of soft X-ray emission based on the corona model. The mathematical structure of the Lee code used in this research was also presented. For the numerical experiments, the first step involved conducting numerical simulations for 6 different energy plasma focus devices (APF, UNU/ICTP, INTI, PF7, NX1, NX2) with cylindrical anodes. The aim was to study the effect of the operating gas pressure at different charging voltages and anode lengths on the computed soft X-ray yield and compared them with available experimental results. A good agreement was achieved between the computed and experimental results, and influencing factors on the yield were investigate. In the second step of this work, numerical experiments were conducted on NX2 plasma focus device with tapered anodes. We studied the effect of pressure on the soft X-ray for different charging voltages. The computed results were again compared with experimental results, showing good agreement, we have noted that the yield increases when a tapered anode is used. Numerical experiments were then conducted to determine the effect of varying the taper conditions on the soft X-ray yield, revealing that the yield increases when a tapered anode is used. Finally, taking advantage of the convergence between the computed and experimental results from the previous result, numerical experiments were conducted on the PF24 device based on the available experimental discharge current waveform. The effect of pressure on the soft X-ray yield was studied for a cylindrical and tapered anode. Optimisation of the

different geometrical configurations of the device anode were investigated to obtain the optimal configuration that provides the highest yield.



Department of Physics

Faculty of Science

Damascus University

**A Thesis Prepared to get Master's Degree on
Physics:**

**A Computational Investigation for Soft X-ray Emission from the
Plasma Focus Device Using Lee Model**

By:

Raghad Albahri

Supervisor

Dr. Yousef Abou-Ali

**Professor in Physics Department
Faculty of Science- Damascus
university**

Dr. Mohamad Akel

**Director of research, Plasma
Division, Physics Department,
Atomic Energy Commission of
Syria**

2025