



دانشکده فیزیک و مهندسی هستهای

پایاننامه کارشناسی ارشد اتمی و مولکولی

تأثیر فشار و نوع گاز بر زمان پینچشدگی در دستگاه پلاسما کانونی

نگارنده: پروین عنایتی

استاد راهنما

دکتر مهدی مومنی

بهمن ۹۶

باسمەتعالى	PD
	مديريت تحصيلات تكميلى

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

شماره: تاريخ:

> با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای پروین عنایتی با شماره دانشجویی.۹۴۱۲۸۲۴ رشته فیزیک گرایش اتمی و مولکولی تحت عنوان بررسی تأثیر فشار و نوع گاز بر زمان پینچ شدگی در دستگاه پلاسما کانونی که در تاریخ ۹۶/۱۱/۹ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

			عردود 🗌	قبول (با درجه: ليلي (ب) 2
			عملی 🔽	نوع تحقيق: نظرى 🗌
	أعضاء	مرتبة علمي	نام ونام خانوادگی	عضو هيأت داوران
	even	استاديار	دکتر مهدی مومنی	۱_ استادراهنمای اول
		-	-	۲- استادراهنمای دوم
		-	-	۳ - استاد مشاور
	X	دانشيار	دکتر محمدرضا شجاعی	۴ – نماینده تحصیلات تکمیلی
	7	استادیار	دکتر سید ایمان حسینی	۵- استاد ممتحن اول
<	No.	دانشيار	دکتر حسین توکلی عنبران	۶_ استاد ممتحن دوم

نام و نام خانوادگی رئیس دانشگیره دکتر معدی 11 10 مر الم 20 مايد (دفاع تاريخ و امضاء ولمهر دانشك تبصره در صورتی که کسی مردود شود حداکثر بکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) این تواند از بایان

مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

تقدیم به سرمایه کمی زندگیم ؛ بدر و مادر م سکیه گاه استوارم ؛ سرادر م وہمہ آنہایی کہ می خواہند بیشز بدانند

سياس

پروردگار یکتا که نعمت آموختن را به من عطا فرمود.کسی که در تنگناهای زندگی همواره پرتو پرمهرش را از من و خانوادهام دریغ ننموده است. ذات بیهمتایی که از ابتدا راه عشقورزی و دانشاندوزی را بر من رهنمون شد. تو را سپاس میگویم نه بدان جهت که همه چیز را به من دادهای، بلکه از آن جهت که آنچه ندادهای نیز مصلحت آن است.

بدینوسیله قدردانی می کنم از پدر و مادر فداکارم، دو سرو قامتی که گوهر وجودشان، نسیم کلامشان، باران محبتشان را همواره بی هیچ منت و ادعا مرهمی نمودند بر خستگی هایم، آنان که راستی قامتم در شکستگی قامتشان تجلی یافت و ققنوس جوانیشان به پای روشنایی حیات من سوخت. در وجود گرامیشان زانوی ادب بر زمین مینهم و با دلی مملو از عشق و محبت بر دستان پر مهرشان بوسه می زنم. از برادر عزیزم، همراه واقعی زندگیم، صمیمانه قدردانی و تشکر می کنم. از جناب آقای دکتر مهدی مومنی که در نهایت حسن اخلاق، لطف و سعه صدر در تمام مراحل اجرا و تنظیم پایاننامه، اینجانب را ارشاد فرموده و مرا رهین محبتها و راهنماییهای خویش ساختهاند، تشکر می نمایم.

پروین عنایتی بهمن ۹۶

## تعهد نامه

اینجانب **پروین عنایتی** دانشجوی کارشناسی ارشد رشته **فیزیک فیزیک و مهندسی هستهای** دانشگاه صنعتی شاهرود، نویسنده پایاننامه با عنوان **تأثیر فشار و نوع گاز بر زمان پینچشدگی در دستگاه پلاسما کانونی**، تحت راهنمایی **مهدی مومنی** متعهد میشوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای دیگر پژوهش گران، به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب این پایان نامه، تا کنون توسط خود، یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک
   یا امتیازی در هیچجا ارایه نشده است.
- حقوق معنوی این اثر، به دانشگاه صنعتی شاهرود تعلق دارد، و مقالات مستخرج با نام
   \*\* دانشگاه صنعتی شاهرود \*\* یا \*\* Shahrood University of Technology \*\* به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آوردن نتایج اصلی پایان نامه تاثیرگذار بوده اند،
   در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در تمام مراحل انجام این پایاننامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها)
   استفاده شده است، ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در تمام مراحل انجام این پایاننامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته (یا استفاده شده است)، اصل رازداری و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

#### پروین عنایتی بهمن ۹۶

### مالکیت نتایج و حق نشر

- تمام حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامههای رایانهای، نرمافزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود میباشد. این مطلب باید به نحو مقتضی، در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در این پایاننامه بدون ذکر منبع مجاز نمی باشد.

چکیدہ

برای دستیابی به انرژی ناشی از واکنش های هم جوشی هسته ای و ایجاد شرایط مناسب برای این واکنش ها نیاز به ساخته شدن دستگاه های پلاسمای کانونی ایجاد شد که به عنوان یک مولد پالسی ایکس، نوترون و ذرات باردار سال هاست که در مرکز تحقیقاتی و صنعتی مورد استفاده قرار می گیرد. تولید اشعه ایکس و نوترون در این دستگاه مستلزم وقوع پینچ در سیستم است. بهترین بهره از محصولات تولیدی دستگاه زمانی حاصل می شود که علاوه بر همزمانی رخداد پینچ و بیشینه جریان، پینچی متقارن وتکین در سیستم اتفاق افتد. در این پژوهش به بررسی تأثیر فشار و نوع گاز بر زمان پینچ شدگی در دستگاه پلاسما کانونی می پردازیم. تحلیل نمودارها و آزمایش ها نشان از افزایش زمان پینچ بر اثر افزایش فشار و کاهش ولتاژ را داشته و همچنین نوع گاز انتخابی تأثیر به سزایی در زمان پینچ دارد.

كلمات كليدى: پلاسما كانونى، عوامل مؤثر بر پينچ، زمان پينچ، جريان تخليه، نوع گاز

فهرست مطالب

م	صاوير	رست تا	ھە
س	مداول	رست ج	فھ
١	م اوليه	مفاهي	١
١	مقدمه	١.١	
١	معرفي پلاسما	۲.۱	
۲	پارامترهای پلاسما	۳.۱	
٣	۱.۳.۱ دما		
٣	۲.۳.۱ حفاظ دبای		
۴	۳.۳.۱ فرکانس پلاسما		
۴	معیارهای پلاسما	۴.۱	
۵	تنگش پلاسما	۵.۱	
۶	۱.۵.۱ فیزیک تنگش		
٧	محصورسازی پلاسما	۶.۱	
٨	ناپایداریهای پلاسما	۷.۱	
٩	۱.۷.۱ ناپایداری سوسیسی (m=0)		
٩	۲.۷.۱ ناپایداری تابی (m=1) ۲.۷.۱		
١٥	۳.۷.۱ ناپایداری ریلی۔تیلور		
۱۱	۴.۷.۱ ناپایداری ریز و تربولانس		
۱۳	اه پلاسما کانونی و دینامیک آن	دستگ	۲
۱۳	معرفي دستگاه پلاسما كانوني	۱.۲	
۱۵	اصول عملكرد دستگاه پلاسما كانونى	۲.۲	
۱۷	کاربردهای دستگاه پلاسما کانونی	۳.۲	
۱۸	عوامل تأثيرگذار بر تنگش پلاسما	۴.۲	

۱٨	۱.۴.۲ اجزای هندسی دستگاه		
۲۲	۲.۴.۲ مشخصات گاز کاری		
74	۳.۴.۲ ولتاژ دستگاه		
۲۵	ديناميک پلاسما کانونی	۵.۲	
۲۵	۱.۵.۲ فاز شکست		
78	۲.۵.۲ فاز محوری		
۲۷	۳.۵.۲ فاز شعاعی		
۲۹	پارامتر رانش	۶.۲	
٣٥	دینامیک نظری براساس مدل لی ۲۰۰۰، ۲۰۰۰، ۲۰۰۰، ۲۰۰۰،	۷.۲	
٣٥	۱.۷.۲ مقدمه		
۳۱	۲.۷.۲ فاز محوری		
٣۴	۳.۷.۲ فاز شعاعی		
۳۸	نسبت گرمایی ویژهی پلاسماهای داغ	٨.٢	
٣٩	مراحل انتقال انرژی	۹.۲	
	=		
47	ان ازمایش و ابزار اندازه کیری	۲ چیدم	~
42	مقدمه	۱.۳	
	~		
47	ساختار کلی و Setup آزمایش	۲.۳	
44 44	ساختار کلی و Setup آزمایش	۲.۳ ۳.۳	
44 44 44	ساختار کلی و Setup آزمایش	7.T T.T F.T	
47 44 44 40	ساختار کلی و Setup آزمایش	7.T T.T F.T	
44 44 44 40 48	ساختار کلی و Setup آزمایش	۲.۳ ۳.۳ ۴.۳	
44 44 44 45 45 47	ساختار کلی و Setup آزمایش	۲.۳ ۳.۳ ۴.۳	
fm ff ff fg fg fy fy	ساختار کلی و Setup آزمایش	۲.۳ ۳.۳ ۴.۳	
47 44 46 46 48 49 47 48	ساختار کلی و Setup آزمایش	۲.۳ ۳.۳ ۴.۳	
<ul> <li>۴٣</li> <li>۴</li> <li></li> <li></li></ul> <li></li> <li> <li></li> <li> <li></li> <li></li> <li> <li></li> <li></li> <li> <li></li> <li> <li></li> <li> <li></li> <li></li> <li> <li></li> <li></li> <li> <li></li> <li><!--</th--><td>ساختار کلی و Setup آزمایش</td><td>۲.۳ ۳.۳ ۴.۳</td><td></td></li></li></li></li></li></li></li></li></li></li></li></li></li></li></li></li></li></li></li></li></li></li></li></li></li></li></li></li></li></li></li></li></li></li></li></li></li></li></li></li></li></li>	ساختار کلی و Setup آزمایش	۲.۳ ۳.۳ ۴.۳	
<ul> <li>۴۳</li> <li>۴۶</li> <li>۴۵</li> <li>۴۶</li> <li>۴۶</li> <li>۴۸</li> <li>۴۸</li> <li>۴۸</li> <li>۴۸</li> <li>۴۸</li> <li>۴٩</li> </ul>	ساختار کلی و Setup آزمایش	۲.۳ ۳.۳ ۴.۳	
<ul> <li>FT</li> <li>FF</li> <li>FA</li> <li>FA</li> <li>FA</li> <li>FA</li> <li>FA</li> <li>FA</li> <li>FA</li> <li>FA</li> <li>FA</li> <li>Ao</li> </ul>	ساختار کلی و Setup آزمایش	۲.۳ ۳.۳ ۴.۳	
<ul> <li>FT</li> <li>FF</li> <li>FA</li> <li>FA</li> <li>FA</li> <li>FA</li> <li>FA</li> <li>FA</li> <li>FA</li> <li>FA</li> <li>Ao</li> <li>Ao</li> </ul>	ساختار کلی و Setup آزمایش	۲.۳ ۳.۳ ۴.۳	
<ul> <li>FT</li> <li>FF</li> <li>FA</li> <li>FA</li> <li>FA</li> <li>FA</li> <li>FA</li> <li>FA</li> <li>FA</li> <li>FA</li> <li>Ao</li> <li>Ao</li> <li>Ao</li> </ul>	ساختار کلی و Setup آزمایش	۲.۳ ۳.۳ ۴.۳	
<ul> <li>FT</li> <li>FF</li> <li>FA</li> <li>FA</li> <li>FA</li> <li>FA</li> <li>FA</li> <li>FA</li> <li>FA</li> <li>A00</li> <li>A01</li> <li>A1</li> </ul>	ساختار کلی و Setup آزمایش	۲.۳ ۳.۳ ۴.۳	
<ul> <li>FT</li> <li>FF</li> <li>FA</li> <li>FA</li> <li>FA</li> <li>FA</li> <li>FA</li> <li>FA</li> <li>FA</li> <li>FA</li> <li>A00</li> <li>A01</li> <li>A11</li> <li>A11</li> </ul>	ساختار کلی و Setup آزمایش	т.т т.т ۴.т ۵.т	
<ul> <li>FT</li> <li>FF</li> <li>FA</li> &lt;</ul>	ساختار کلی و Setup آزمایش	т.т т.т ۴.т	

۵۶	روش انجام آزمایش	۷.۳	
۵۹	ں و نتایج	تحليل	۴
۵۹	مقدمه	۱.۴	
<b>%</b> °	اندازه گیریهای پایهای	۲.۴	
<b>%</b> °	۱.۲.۴ سیگنالهای مربوط به جریان، مشتق جریان و ولتاژ		
87	تأثیر فشار و ولتاژ بر روی زمان پینچ برای گاز آرگون	۳.۴	
۶۵	تأثیر فشار و ولتاژ بر روی زمان پینچ برای گاز نیتروژن	۴.۴	
۶٨	مقایسه نتایج پژوهش با کارهای گذشته	۵.۴	
γ٥	تأثير نوع گاز بر روی زمان پينچ	۶.۴	
۷۵	نتیجهگیری	۷.۴	
۷۵	پیشنهادات	۸.۴	

۷۷

مراجع

# فهرست تصاوير

٣	حفاظ دبای	۱.۱
۵	طرح شماتیک دستگاه تاریخی تنگش زد	۲.۱
۶	(۱) تنگش زد، (۲) تنگش تتا	۳.۱
١٠	ناپايدارى سوسيسى	۴.۱
١٥	ناپایداری کینک	۵.۱
۱۱	ناپایداری ریلی۔ تیلور	۶.۱
14	نمایی از شماتیک دستگاه پلاسما کانونی مدر و فیلیپوف	۱.۲
18	نمایی سه بعدی از دستگاه پلاسما کانونی	۲.۲
۱٩	آندهایی با شعاع انتهای متفاوت [۳۲]	۳.۲
۲۰	آندهایی با شکل انتهای متفاوت [۳۵]	۴.۲
21	تغییر انحنای لایه جریان بر اثر تغییرات طول عایق [۳۸]	۵.۲
77	سیگنال مشتق جریان برای گاز نئون و دوتریم [۶۷]	۶.۲
۲۳	اثر فشار بر جریان تخلیه در ولتاژهای متفاوت در دستگاه NX2 [۶۷]	۷.۲
۲۳	اثر فشار بر زمان پینچ در ولتاژهای متفاوت در دستگاه NX2 [۶۷]	٨.٢
74	اثر ولتاژ بر جریان تخلیه در فشارهای متفاوت در دستگاه NX2 [۴۲]	٩.٢
۲۵	اثر ولتاژ بر زمان پینچ در فشارهای متفاوت در دستگاه NX2 [۴۲]	۱۰.۲
78	دینامیک لایه جریان در دستگاه پلاسما کانونی نوع مدر	11.7
٣٥	مراحل فشرده سازی پلاسما در دستگاه UNU/ICTP PFF	17.7
۳۱	شماتیک دینامیک مدل نظری	۱۳.۲
٣٢	پلاسمادر فاز محوری	14.7
٣٣	مدار معادل پلاسما كانونى	10.7
34	شماتیک فاز شعاعی	18.7
۳۵	پلاسما در فاز شعاعی	۱۷.۲
٣٧	پلاسما در فاز شعاعی	۱۸.۲
۳۸	پلاسما در فاز شعاعی	19.7

41	خلاصهای از انتقال انرژی در پلاسما کانونی	۲۰.۲
44	شماتیک ساختار کلی آزمایش	۱.۳
40	محفظه خلاء دستگاه پلاسما كانوني شاهرود	۲.۳
49	نمایی از صفحه پایه دستگاه پلاسما کانونی شاهرود	۳.۳
41	پمپ روتاری دومرحلهای مدل VE280N	۴.۳
41	گیج پیرانی فشارسنج و نمایشگر دیجیتال	۵.۳
۴۸	(۱) گاز آرگون (۲) گاز نیتروژن	۶.۳
49	ترانسفرماتور دستگاه پلاسما کانونی شاهرود	۷.۳
49	نمایی از بانک خازنی دستگاه پلاسما کانونی شاهرود	۸.۳
۵۰	اسپارک گپ	۹.۳
۵١	اتصال به زمین	۱۰.۳
۵۲	اسيلوسكوپ مدل GPS-1204C	۱۱ <b>.</b> ۳
۵۳	پیچه روگوفسکی	۱۲.۳
۵۴	خروجی پیچه رو گوفسکی پس از انتگرال گیری	۱۳.۳
۵۵	نمایی از شماتیک پروب ولتاژ	14.4
۵۶	سيگنال ثبت شده توسط پروب ولتاژ	۱۵.۳
<b>%</b> °	سيگنال ثبت شده توسط پروب ولتاژ	۱.۴
۶١	سيگنال ثبت شده توسط پروب ولتاژ	۲.۴
۶١	سيگنال ثبت شده توسط پروب ولتاژ	۳.۴
97	تغییرات زمان برحسب فشار در ولتاژ ۱۰ کیلوولت برای گاز کاری آرگون	۴.۴
۶۳	تغییرات زمان برحسب فشار در ولتاژهای متفاوت گاز کاری آرگون	۵.۴
94	تغییرات زمان برحسب ولتاژ در فشار ۱ تور، گاز آرگون ۲۰۰۰ .۰۰۰	۶.۴
۶۵	تغییرات زمان برحسب ولتاژ در فشارهای متفاوت برای گاز کاری آرگون	۷.۴
۶۵	تغییرات زمان برحسب فشار در ولتاژ ۱۰ کیلوولت برای گاز کاری نیتروژن .	۸.۴
99	تغییرات زمان برحسب فشار در ولتاژهای متفاوت برای گاز کاری نیتروژن	۹.۴
۶۷	تغییرات زمان برحسب ولتاژ در فشار ۱ تور گاز نیتروژن	۱۰.۴
۶٨	تغییرات زمان برحسب فشار در ولتاژهای متفاوت، گاز نیتروژن	11.4
۶٩		17.4
۶٩		۱۳.۴
۷۲	تغییرات زمان برحسب فشار برای گازهای <sub>N</sub> r و Ar	14.4
۷۴	تغییرات زمان برحسب فشار برای گازهای N <sub>۲</sub> و N <sub>۲</sub>	۱۵.۴

# فهرست جداول

٨	تقسی <sub>م</sub> بندی دستگاههای مختلف گداخت	۱.۱
۴۵	ویژگیهای دستگاه پلاسما کانونی	۱.۳
۵۷	شرايط انجام آزمايش	۲.۳
Y٥	مشخصات فیزیکی و شیمیایی گازهای کاری مورد آزمایش	۱.۴

# فصل مفاهيم اوليه

#### ۱.۱ مقدمه

پلاسما حالت چهارم ماده است که امروزه کاربردهای فراوانی در صنعت، محیط زیست و ... دارد. با کمک محصورسازی پلاسما میتوان در واکنشهای گداخت هستهای از پلاسما استفاده کرد؛ به این صورت که اگر پلاسمای داغ و چگال داشته باشیم انرژی اولیه برای غلبه بر سد کولنی ذرات سبک تأمین میشود و از این راه میتوان به انرژی پاک دست یافت به این منظور ما ابتدا به طور مختصر پلاسما را معرفی خواهیم کرد سپس به معرفی دستگاه پلاسما کانونی و کاربردهای آن خواهیم پرداخت.

# ۲.۱ معرفی پلاسما

از لحاظ تاریخی در دههی ۱۹۲۰ [۶]، یک شیمیدان و مهندس جوان به نام ایروین لانگمویر<sup>۱</sup> در حالی که مشغول به کار در شرکت جنرال الکتریک بود، مجذوب پدیده تخلیه الکتریکی روی گازها شد و برای اولین بار نام پلاسما را روی این گازهای تغییر یافته گذاشت. لانگمویر واژه پلاسما را از علم پزشکی قرض گرفت! زیرا پلاسما در علم پزشکی مادهای است ناپایدار، که تقریباً عمر آن و رفتار آن شبیه به مواد یونیزه شده است.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Irving Langmuir

واژه پلاسما به حالت چهارم ماده بعد از حالتهای جامد، مایع و گاز اشاره دارد که با افزایش دما به دلیل افزایش انرژی بین مولکولی، حالت ماده تغییر کرده و گازی از اتمها شکل می گیرد که ذرات باردار، الکترونها و یونهای مثبت آزادانه در آن حرکت می کنند، این حالت از ماده را حالت پلاسما می گویند.

تعریف دیگری نیز برای پلاسما وجود دارد، پلاسما گاز شبه خنثای متشکل از ذرات باردار و خنثی است که رفتار دسته جمعی از خود ارائه می دهد [۶۳]؛ شبه خنثی بودن پلاسما یعنی آنقدر خنثی که بتوان چگالی الکترون و یون و پلاسما را تقریباً با هم برابر در نظر گرفت ( $n = n_e = n_i$ ) نه آنقدر خنثی که تمام نیروهای الکترومغناطیسی مورد توجه حذف شوند، و منظور از رفتار دسته جمعی حرکاتی است که نه تنها به شرایط موضعی بلکه به حالت پلاسما در مناطق دور نیز بستگی دارد.

نیروهای وارد بر یک گاز خنثی مثلاً هوا را در نظر بگیرید چون مولکول های آن خنثی هستند هیچ نیروی الکترومغناطیسی خالصی بر آنها وارد نمی شود و مولکول ها بدون مزاحمت حرکت می کنند تا با مولکول دیگر برخورد کنند، همین برخوردها هستند که حرکت ذرات را تعیین می کند اما پلاسما دارای ذرات باردار است که با حرکتشان میتوانند تجمع موضعی بادهای مثبت و منفی ایجاد کنند که موجب پیدایش میدان الکتریکی می شود و با حرکت بارها، جریان و در نتیجه میدان مغناطیسی ایجاد می شود؛ این میدانها بر روی حرکت ذرات باردار در نقاط دور نیز تأثیر می گذارد. پلاسماهای موجود را براساس منشاء تولید می توان به دو دسته طبیعی و مصنوعی تقسیم کرد:

- پلاسما طبیعی: تقریباً ٪۹۹ جهان را پلاسما تشکیل میدهد، بطورکلی برای پلاسما طبیعی میتوان بادهای خورشیدی، رعد و برق، کمربند وانآلن اطراف کره زمین، نبولا (ابرهای عظیم مابین فواصل ستارگان راه شیری) و یونسفر زمین [۱] را نام برد.
- پلاسما مصنوعی: تولید و نگهداری پلاسما در آزمایشگاه و دستگاههای صنعتی کار چندان سادهای نیست. بشر در تولید پلاسماهای آزمایشگاهی برای کاربردهای مختلف از جمله احتمال استفاده در همجوشی هستهای، سنتز حرارتی هستهای، علوم الکترونیک، لیزر و ... به موفقیتهای چشمگیری دست یافته است. اکثر سختافزارهای کامپیوتری و همچنین تلویزیونهایی با صفحههای بزرگ و بسیار نازک که امروزه بسیار مورد توجه مردم قرار گرفتهاند براساس تکنولوژی پلاسما ساختهشدهاند.

# ۳.۱ پارامترهای پلاسما

مشخصات قابل اندازه گیری در پلاسماها از اهمیت بالایی برخورداراند؛ به وسیله آنها میتوان تعیین کرد که آیا گاز یونیزه شدهای که در اختیار داریم پلاسماست یا خیر. در صفحه بعد بهطور مختصر نحوه محاسبه و استفاده از آنها را بیان میکنیم.

#### ۱.۳.۱ دما

همانطور که میدانیم دما به انرژی جنبشی ذرات و در نتیجه به سرعت آنها وابسته است. برای یک گاز در سه بعد میتوان نوشت:

$$E_{av} = \frac{\Upsilon}{\Upsilon} KT \tag{1.1}$$

با توجه به خطی بودن رابطهی بین دما و انرژی، در فیزیک پلاسما رایج است که دما را برحسب انرژی بیان کنند:

$$KT = 1eV = 1/\mathscr{F} \times 1^{\circ-19} \qquad 1eV = 11\mathscr{F}^{\circ\circ}K^{\circ} \qquad (7.1)$$

برای بعضی از پلاسماها در یک زمان چندین دما اندازه گیری می شود اغلب این اتفاق زمانی رخ می دهد که الکترونها و یونها دارای توزیعهای ماکسولی جداگانهای با دماهای مختلف  $T_i$  و  $T_i$  و  $T_i$  و  $T_i$  و باشد، یعنی آهنگ برخورد بین خود یونها و خود الکترونها با یکدیگر بیشتر از آهنگ برخورد یک الکترون و یک یون است. در حضور میدان مغناطیسی B، حتی ذرات هم جنس مثلاً یونها می توانند دو نوع دما داشته باشد بنابراین مؤلفههای مربوط به سرعت عمود بر میدان مغناطیسی  $(V_{\perp})$  و موازی با میدان مغناطیسی  $(V_{\perp})$  و موازی با میدان مغناطیسی  $(T_{\perp})$  ممکن است به توزیعهای ماکسولی متفاوتی با دماهای موازی با میدان مغناطیسی  $(T_{\perp})$  و موازی ا

#### ۲.۳.۱ حفاظ دبای

یکی از مشخصات اساسی رفتار پلاسما توانایی آن برای رفع پتانسیلهای الکتریکی اعمال شده به آن است، این خاصیت به دلیل رفتار جمعی الکترونها و یونها است.



شکل ۱.۱: حفاظ دبای

با وارد کردن دو گلوله متصل به یک باتری، یک میدان الکتریکی درون پلاسما بوجود میآید

(شکل ۱.۱). این گلولهها بارهای مخالف خود را جذب میکنند و ابری از الکترونها اطراف گلوله مثبت و ابری از یونها اطراف گلوله منفی را میگیرند. اگر پلاسما سرد باشد و هیچگونه حرکت حرارتی نداشته باشد مقدار بار ابر با مقدار بار گلوله برابر میشود و در این صورت حفاظ کامل خواهد بود؛ اما چنانچه دما متناهی باشد ذراتی که در لبهی ابر قرار گرفتهاند (جایی که میدان ضعیف است) انرژی لازم برای فرار از چاه پتانسیل الکترواستاتیک را بدست میآورند، پس لبهی ابر در شعاعی قرار دارد که در آن انرژی پتانسیل تقریباً با انرژی حرارتی حرارتی ار برابر برابر است در این صورت حفاظ کامل نیست [۶۳]. (۳.۱)

طول دبای نامیده میشود.  $\lambda_D$ 

## ۳.۳.۱ فرکانس پلاسما

اگر الکترونها در یک توزیع یکنواخت یونی جابجا شوند میدانهای الکتریکی در جهتی بوجود خواهند آمد که با کشاندن الکترونها به مکانهای نخستینشان خنثایی پلاسما را دوباره برگردانند، الکترونها به دلیل لختی جلوتر میروند و حول مکانهای تعادل خود با بسامد مشخصهای که بسامد پلاسما نامیده میشود نوسان میکنند [۶۳].

$$\omega_p = \frac{n_o e^{\mathsf{r}}}{m\epsilon_o} \tag{F.1}$$

# ۴.۱ معیارهای پلاسما

برای اینکه یک گاز را پلاسما بنامیم باید دارای چندین ویژگی خاص باشد که در این بخش به معرفی آنها میپردازیم. شرط اول اگر ابعاد سیستم گازی و یونیده ما I باشد، زمانی این سیستم را میتوان پلاسما در نظر گرفت که آنقدر چگال باشد که  $\lambda_D$  خیلی کوچکتر از I شود.( $I \gg \infty$ ) این تعریف زمانی معتبر است که ذرات در ابر باردار به تعداد کافی وجود داشته باشند، واضح است که اگر دو یا چند ذره در محیط غلاف وجود داشته باشند حفاظ دبای از لحاظ آماری مفهوم معتبری نخواهد داشت. با استفاده از رابطه ی (۳.۱) می توان تعداد ذرات را در کره دبای محاسبه نمود:

$$N_D = \frac{\mathbf{f}}{\mathbf{v}} n \pi \lambda_D^{\mathbf{v}} \tag{(a.1)}$$

.  $N_D \gg 1$  بنابراین علاوه بر  $L \gg \lambda_D$ ، رفتار دسته جمعی پلاسما ایجاب می کند که داشته باشیم  $\lambda_D \ll N_D$ . شرط سوم به برخوردها مربوط است. اگر  $\omega$  بسامد نوعی نوسانهای پلاسما و au زمان متوسط بین برخوردها با اتمهای خنثی باشد، برای آنکه گاز مانند پلاسما (نه یک گاز خنثی) رفتار کند Vلازم است شرط ۱ $\propto w$  برقرار باشد[۶۳].

# ۵.۱ تنگش پلاسما

فشرده شدن پلاسما در جهت عرضی، بهوسیله میدان مغناطیسی ناشی از جریان پلاسما (در هنگام تخلیه الکتریکی) به اثر تنگش معروف است. به عبارت دیگر تراکم الکترومغناطیسی پلاسما تنگش نامیده می شود. در سال ۱۹۳۴ با در نظر گرفتن پدیده تنگش جریان الکتریکی، توسط میدان مغناطیسی خودش، مطالعات و تحقیقات زیادی انجام شد که در نهایت منجر به ساخت سیستمهای تخلیه الکتریکی چون تنگش تتا ۲ ، تنگش زد ۳ و پلاسما کانونی شده است ([۳]]. تنگیده شدن پلاسما علاوه بر تولید پرتوهای ایکس نرم، ایکس سخت، یونی و الکترونی، در صورت استفاده از گاز مناسب، می تواند منجر به وقوع پدیده گداخت هستهای و آزاد شدن در صورت استفاده از m و تنگیده شدن پلاسما، عمده می معرون ایکس نرم، ایکس سخت، یونی و تاکترونی، ساخت سیستمهای تخلیه الکتریکی چون تنگش تا ۲ ، تنگش زد ۳ و پلاسما کانونی شده است می نواند منجر به وقوع پدیده گداخت هستهای و آزاد شدن در صورت استفاده از گاز مناسب، می تواند منجر به وقوع پدیده گداخت هستهای و آزاد شدن ناپایداری سوسیسی m = m پلاسما می باشد.

اولین دستگاهی که می توان آن را دستگاه تنگش زد نامید، در سال ۱۷۹۰ در کشور هلند ساخته شد (شکل ۲.۱). این وسیله توسط شخصی بنام مارتینوس ون ماروم <sup>۴</sup> طراحی شد. دستگاه در واقع یک بانک انرژی متشکل از یکصد خازن با انرژیی در حدود ۱*kj* بود، که در سیمی به طول یک متر تخلیه میشد. [۷].



شکل ۲.۱: طرح شماتیک دستگاه تاریخی تنگش زد

<sup>¢</sup>Martinus van Marum

<sup>&</sup>lt;sup> $\gamma$ </sup> $\theta$ -pinch

<sup>&</sup>lt;sup>w</sup>z-pinch

در دستگاه تنگش تتا جریان پلاسما در جهت سمتی، یک میدان مغناطیسی محوری بوجود میآورد؛ در حالی که در دستگاه تنگش زد جریان پلاسما در جهت محوری، یک میدان مغاطیسی در جهت سمتی ایجاد میکند که قادر است سطح مقطع پلاسما را متراکم کند.در شکل ۳.۱ تنگش تتا و زد نشان داده شده است .خطوط زرد راستای جریان را نشان میدهد و خطوط بنفش نشان دهنده جهت میدان است.



شکل ۳.۱: (۱) تنگش زد، (۲) تنگش تتا

#### ۱.۵.۱ فیزیک تنگش

دستگاههای تنگش زد شامل آند و کاتد است و دارای تقارن استوانهای است، با اتصال به اختلاف پتانسیل نسبتاً زیاد بین آند و کاتد، گاز موجود در این قسمت یونیزه شده و به این ترتیب حجمی استوانهای از پلاسما تولید میشود و جریانی الکتریکی در امتداد محور استوانه (محور*z*) بوجود میآید. جریانی که در این سیستم بوجود میآید تابع شعاع استوانه است با توجه به موضوع تقارن استوانهای میتوان رابطهی جریان را به صورت زیر تعریف کرد (۶.۱)  $I(r) = \Upsilon \pi \int_{0}^{r_a} r J_z \, dr$ در رابطه فوق  $r_a$  شعاع بیشنه استوانهی پلاسما محصور شده و z چگالی جریان است.

$$B_{\theta}(r) = \frac{\mu \circ I(r)}{\Upsilon \pi r} \tag{Y.1}$$

بر هم کنش چگالی جریان  $(\overrightarrow{f})$  با میدان مغناطیسی  $(\overrightarrow{B})$  نیروی شعاعی  $(\overrightarrow{f})$  به سمت داخل ستون پلاسما تولید می کند.

$$\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B} \tag{A.1}$$

که در دستگاه مختصات استوانهای شکل آن به صورت زیر است

$$F_r \hat{r} = -J_z B_\theta \, \hat{r} \tag{9.1}$$

این نیرو در نهایت پلاسما را تا حد شعاع حداقل و یا به عبارت دیگر شعاع تنگش  $r = r_a$  متراکم می کند، بنابراین می توان گفت که شعاع پلاسما به شرطی که جریان از یک حد بحرانی بیشتر باشد، تا حد شعاع حداقل که شعاع تنگش نامیده می شود  $r = r_a$  کاهش می یابد.

# ۶.۱ محصورسازی پلاسما

همجوشی (گداخت) هستهای فرآیندی عکس شکافت هستهای است که طی آن هستههای سبک مانند هیدروژن، دوتریوم و تریتیوم با یکدیگر وارد همجوشی هستهای شده و هستههای سنگینتر و انرژی تولید میشود. محتملترین واکنش گداخت شناخته شده، واکنش بین هستههای دوتریم و تریتیم است که طی معادله زیر به وقوع می پیوندد.

 $D+T \rightarrow n+\alpha + \mathrm{W/S}\,MeV$ 

برای بوجود آوردن شرایط مورد نیاز برای همجوشی، هستههای واکنشدهنده باید دارای انرژی جنبشی کافی ۱۰ یا بیش از ۱۰۰ میلیون (KeV) درجه کلوین باشند تا بر نیروی دافعهی الکترواستاتیکی هستهها فائق آیند.

اولین گام برای دستیابی به واکنش گداخت هستهای، گرمایش اتمهای واکنش دهنده تا دمای <sup>۸</sup> کلوین می باشد. از این رو لازم است پلاسما با یک چنین دمای بالایی محصور شود که دو روش محصور سازی مغناطیسی ( MCF <sup>۵</sup>) و لختی ( ICF <sup>۶</sup>) برای آن شناخته شده است. محصورسازی مغناطیسی، ذرات باردار در یک میدان مغناطیسی محصور می شوند. محصورسازی لختی، ذرات کپسول سوخت، با سرعت فوق العاده ای متراکم و گرم می شوند و قبل از اینکه فرصتی برای گریز داشته باشند، به شرایط لازم برای گداخت می رسند. مدت زمان لازم محصور سازی پلاسما با  $\tau$  نشان داده می شود. پلاسمای محصور شده انرژی مرارتی خود را از طریق تابش ترمزی از دست می دهد و با افت انرژی و دما روبرو می شود. برای پایداری شرایط مورد نیاز جهت واکنش گداخت هسته ای، لازم است اتلاف انرژی از طریق تابش روابط نظری، این تعادل هنگامی برقرار می شود که شرط زیر که به عنوان معیار لاوسون <sup>۷</sup> شناخته می شود برقرار باشد [۶۴].

$$n\tau > 1/\Delta \times 1^{\circ}$$
 (10.1)

که n چگالی پلاسما و ד زمان محصورسازی آن میباشد. معیار لاوسون نشان میدهد که برای تولید انرژی توسط واکنشهای گداخت، پلاسما باید

<sup>&</sup>lt;sup><sup>Δ</sup>Magnetic Confinement Fusion</sup>

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup>Inertial Confinement Fusion

<sup>&</sup>lt;sup>V</sup>Lawson Criterion

چگالی و دمای بالای خود را برای مدتی حفظ کند؛ بنابراین افزایش دمای پلاسما تا دمای ۱۰*KeV* به عنوان هدف عملی است و دومین هدف این است که پلاسما با دمای بالا در فضای محدودی محصور شود، البته چنین محفظهای وجود ندارد. با این وجود در جدول ۱.۱ دستگاههای مختلف گداخت براساس روشهای محصورسازی نمایش داده شده است:

نوع عملكرد	آرایش میدان مغناطیسی	روش محصورسازی	دستگاه
شبه پيوسته	چنبرهای	مغناطيسي	توكامك
پيوسته	چنبرهای	مغناطيسي	استلاراتور
پيوسته	چنبرهای	مغناطيسي	هليترون
پالسى	چنبرهای	مغناطيسي	پينچ $ heta$
پالسى	انتهای باز	مغناطيسي	آینهای
پالسى	انتهای باز	مغناطيسي	پينچ z
پالسى	انتهای باز	مغناطيسي	پلاسما كانوني
پالسى	ندارد	لختى	ليزر
پالسى	ندارد	لختى	پرتو الکترون نسبی
پالسى	ندارد	لختى	پرتو يون سنگين

جدول ۱.۱: تقسیم بندی دستگاه های مختلف گداخت

# ۷.۱ ناپایداریهای پلاسما

در دستگاههای مربوط به مطالعه همجوشی هستهای کنترل شده باید گاز را تا دمای بالاتر از دمای سطح خورشید گرم کرد، پلاسما ایجاد شده باید توسط میدان مغناطیسی محصور شود تا بتوان از آن انرژی هستهای زیادی را بدست آورد. ناپایداریهای پلاسما یکی از موانع برای همجوشی هستهای کنترل شده بشمار میرود. جریانی که توسط ستون پلاسما ایجاد میشود باعث محصورسازی پلاسما شده و آن را از دیوارهها جدا می کند وجود ناپایدارهای ریز که در بعضی از آزمایشات گزارش شده است باعث اعمال محدودیت بر روی زمان محصورسازی شده و همچنین باعث فروریزش ستون پلاسما خواهد شد.

اگر تنگش می توانست به نحو پایداری منقبض شود، این عمل تا جایی ادامه می یافت که

فشار مغناطیسی در ناحیه خارج با فشار شاره در داخل تخلیه برابر شود. B<sup>۲</sup>(r)

$$\frac{B^{+}(r)}{\Upsilon\mu_{\circ}} = NKT$$

با توجه به اینکه تنگش پدیدهای ناپایدار است. فشار مغناطیسی روی مرز تخلیه به شعاعتخلیه و به جزئیات هندسی آن بستگی دارد. اگر تغییرات فشار ناشی از اختلالات کوچک چنان باشد که باعث افزایش آنها شوند آن اختلالات رشد خواهند کرد و چینهای کوچک روی سطح احاطه کننده تخلیه، همچنین تابها جزو این گروه از اختلالات هستند که باعث بوجود آمدن ناپایداریهای مرسوم به سوسیسی <sup>۸</sup> و تابی <sup>۹</sup> در پلاسما تنگیده می شود [۲] که در زیر به طور مختصر به شرح آنها می پردازیم:

### (m=0) ناپایداری سوسیسی (m=0)

هنگامی که جریان محوری در پلاسما وجود دارد میدان مغناطیسی سمتی ناشی از این جریان باعث ایجاد فشار مغناطیسی شده و موجب تنگش ستون پلاسما می شود، اگر ستون پلاسمایی به شکل استوانهای باشد میدان مغناطیسی ناشی از جریان به صورت

$$B_{\theta}(r) = \frac{\mu_{\circ}I(r)}{\Upsilon\pi r}$$

#### (m=1) ناپایداری تابی (T.V.1

اعمال میدان مغناطیسی محوری باعث رفع ناپایداری سوسیسی می شود. اما این خود باعث ایجاد یک ناپایداری دیگری بهنام n = n (ناپایداری تابی) می شود. هنگامی که یک انحنا در ستون پلاسما وجود داشته باشد ناپایداری تابی خودش را نشان می دهد خطوط میدان مغناطیسی در بخش داخلی قسمت خمیده دارای تراکم بیشتری می باشند و در قسمت خارجی خمش، چگالی این خطوط کمتر است. قسمت داخلی شار مغناطیسی بیشتری نسبت به بخش خارجی دارد. درنتیجه باعث می شود نیروی بیشتری به قسمت درونی وارد شود و سبب

<sup>&</sup>lt;sup>A</sup>Sausage instability

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup>king instability



شکل ۴.۱: ناپایداری سوسیسی

فروریزش ستون پلاسما شود (شکل ۵.۱). برای رفع ناپایداری m = 1 یک میدان مغناطیسی در راستای محور ستون پلاسما به آن داده می شود. این میدان از لحاظ بزرگی باید بیش از میدان سمتی که عامل ناپایداری است، باشد [۴].



شکل ۵.۱: ناپایداری کینک

### ۳.۷.۱ ناپایداری ریلی - تیلور

پلاسما دارای گرادیان چگالی یا یک مرز مشخص است، و از این رو یکنواخت نیست. بهعلاوه یک نیرو غیرالکترومغناطیسی خارجی بر پلاسما اعمال میشود،این نیرو ناپایداری را تحریک میکند. بهعنوان تشبیه میتوان یک لیوان آب واژگون را در نظر گرفت، اگرچه سطح مشترک آب و هوا در حال تعادل است زیرا هوا فشار ناشی از وزن آب را تحمل میکند اما این تعادل ناپایدار است، این نوع ناپایداری را ریلی۔تیلور <sup>۱</sup> مینامند [۶۳]. در محصورسازی پلاسما، میدان مغناطیسی همانند سیال سبک عمل می کند (هوا) که سیالی سنگین (آب) مانند پلاسما را نگه داشته است؛ بنابراین سیال سنگین تمایل به تعویض جا با سیال سبک دارد که درنتیجه همانند شکل ۰.۱ زیر ناپایداری در پلاسما را منجر می شود.



شکل ۶.۱: ناپایداری ریلی۔تیلور

## ۴.۷.۱ ناپایداری ریز و تربولانس

این ناپایداری باعث شتاب گرفتن ذرات در هنگام تنگش میشود [۸] اثرات ناپایداری ریز و تربولانس بر دینامیک لایه جریان در دستگاه پلاسما کانونی در تعداد زیادی از آزمایشات مشاهده شده است؛که میتوان موارد زیر را نام برد: پراکندگی غیر عادی نور لیزر هنگام مطالعه لایه جریان مقاومت غیر عادی در ستون پلاسما تابش غیر حرارتی در ناحیه میکروموج

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>°Rili-Taylor instability

# فصل

# دستگاه پلاسما کانونی و دینامیک آن

# ۱.۲ معرفی دستگاه پلاسما کانونی

دستگاه پلاسما کانونی شتابدهنده مگنتوهیدرودینامیکی (MHD) با الکترود هم محور است که به خانواده (Z – Pinch) دینامیکی تعلق دارد و بهصورت پالسی کار می کند .

دستگاه پلاسما کانونی اولین بار به طور مستقل و با هندسهای متفاوت در سال ۱۹۶۵ در ایالات متحده آمریکا توسط مدر <sup>۱</sup> [۹] و در اتحاد جماهیر شوروی سابق توسط فیلیپوف <sup>۲</sup> [۱۰] ساخته شد. از آن به بعد تاکنون دستگاههای پلاسما کانونی بسیاری توسط محققین در سراسر دنیا ساخته شده است که تفاوتهای زیادی در اندازه فیزیکی دارند و گستره انرژی آنها از زیر کیلو تا مگا ژول است ولی همه آنها بگونهای شبیه به دومدلی است که توسط مدر و فیلیپوف ساخته شده بودند، بنابراین میتوان دستگاه پلاسما کانونی را به دو گروه، نوع مدر و نوع فیلیپوف ساخته شده است تا ولی همه آنها بر فیلیپوف ساخته شده بودند، بنابراین میتوان دستگاه پلاسما کانونی را به دو گروه، نوع مدر آنها در هندسه و نسبت سطح (نسبت قطر به طول آند) میباشد این نسبت در دستگاه نوع فیلیپوف معمولاً بزرگتر از ۵ و قطر آند بین ۵۰ تا ۵۰۰ سانتیمتر میباشد و در دستگاه مدر فیلیپوف معمولاً بزرگتر از ۵ و قطر آند بین ۱۰۰ تا ۵۰۰ سانتیمتر میباشد و در دستگاه مدر زبانک خازنی (از محدوده *LI*) مالا تا *LI*) به گازی با فشار کم که بین دو الکترود هم محور از بانک خازنی (از محدوده *LI*) این *ا*) به گازی با فشار کم که بین دو الکترود هم محور

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Mather

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup>Filipov



شکل ۱.۲: نمایی از شماتیک دستگاه پلاسما کانونی مدر و فیلیپوف

دستگاه (آند و کاتد که با عایقی استوانهای از هم جدا شدهاند) قرار گرفته، اعمال می شود که بین آند و کاتد تخلیه الکتریکی آغاز می شود. در صورت بهینه بودن شرایط، تخلیه از روی سطح استوانه ای شکل عایق شروع شده و به دنبال آن لایه ای متقارن از جریان الکتریکی شکل می گیرد. این لایه تحت تأثیر نیروی لورنتس به سمت الکترود مرکزی حرکت می کند، در حین حرکت ذرات یونیزه شده گاز را نیز در جلوی خود جاروب می کند و به سمت محور می راند. نهایتاً ذرات در نقطه ای بر روی محور جمع شده و تحت فشار قرار می گیرد (تنگش پلاسما) که می گیرد (تا می به ایم ای متقارن از جریان الکتریکی شکل می می گیرد. این لایه تحت تأثیر نیروی لورنتس به سمت الکترود مرکزی حرکت می کند، در حین نهایتاً ذرات یونیزه شده گاز را نیز در جلوی خود جاروب می کند و به سمت محور می راند. می ته ایتا در ای در نقطه ای بر روی محور جمع شده و تحت فشار قرار می گیرد (تنگش پلاسما) که منجر به ایجاد پلاسمایی داغ و چگال ( $^{-7}$  دا<sup>7</sup> م)</sup> و با طول عمر بسیار کوتاه ( $^{-7}$  دار).

اشاره به این نکته ضروری است، که تفاوت در نسبت آند به کاتد در مدلهای ذکر شده، باعث ایجاد تفاوت در شکل لایه جریان آنها میشود [۱۲] .

دستگاه پلاسما کانونی با محدوده انرژی از چند کیلوژول تا مگا ژول قادر به تولید یونهای پر انرژی با طیف وسیعی(از چند صدها KeV تا ده ها/MeV) میباشند [۱۳] و همچنین چشمه نقطهای پرتوهای گوناگونی همچون: پرتوهای ایکس نرم <sup>۳</sup> و سخت <sup>۴</sup>، الکترونی و (در صورت استفاده از گاز کاری دوتریم) نوترون میباشد؛ پس میتوان اهمیت استفاده از دستگاه پلاسما کانونی را بهصورت زیر بیان کرد:

 ۲. توانایی تولید ترکیبی از پالس های پر شدت مثل پلاسمای داغ، نوترون، الکترونهای سریع، پرتوهای یونی.

۲. زمان نسبتاً کم تولید پرتو در حدود ۱۰۰*ns*.

<sup>w</sup>Soft-x ray

<sup>¢</sup>Hard-x ray

۳. اندازه نسبتاً کوچک چشمه تولید پرتو در ابعاد <sup>۳</sup>(mm) (چشمه های نقطهای).

۴. ارزان قیمت تر و از نظر زیست محیطی تمیز در مقایسه با سیستمهای مشابه .

با این حال در مرجع [۱۴] فعالیتهای پژوهشی بیشتری از دستگاه کانونی ذکر شده است. در هر دو نوع این دستگاهها الکترودهای آند و کاتد بهصورت هم محور قرار گرفتهاند و عایقی بر روی الکترود آند قرار گرفته است. الکترودها را معمولاً از جنس مس یا استیل زد زنگ می سازند الکترود داخلی را آند می نامند و معمولاً به صورت استوانه ای توپر یا لوله استوانه ای می سازند به این منظور که از گسیل پرتو ایکس سخت که به وسیله بمباران الکترون در سطح آند ایجاد می شود جلوگیری شود . مجموعه الکترودهای بیرونی که اغلب کاتد نامیده می شوند ، از ۶ الی ۲۴ میله که بر روی یک صفحه هم جنس خودش به طور متقارن قرار گرفته اند تشکیل شده است که اطراف آند قرار می گیرد. عایق هم به صورت استوانه ای تو خالی و از جنس پیرکس، شیشه، آلومینیوم یا سرامیک ساخته می شود که آند را محاط می کند. در شکل ۱.۲ شماتیک وار دستگاه پلاسما کانونی نشان داده شده است.

# ۲.۲ اصول عملکرد دستگاه پلاسما کانونی

همانطور که در بخش پیشین ذکر شد دستگاه پلاسما کانونی متشکل از دو استوانه تودرتوی هم محور است که به عنوان الکترودهای آندی و کاتدی مورد استفاده قرار می گیرند. این دو الکترود از یک انتها توسط یک لایه عایق استوانه ای شکل از هم جدا می شوند دستگاه پلاسما کانونی در حالت کلی از سه بخش زیر تشکیل شده است:

- ۱. بانک خازنی <sup>۵</sup> که منبع تأمین انرژی برای ایجاد تخلیه الکتریکی در گاز میباشد.
  - ۲. محفظه تخلیه که شامل دو استوانه هم محور و عایق بین آنهاست.
- ۳. اسپارک گپ <sup>و</sup>که کلید ولتاژ بالای سریعی است که بانک خازنی را به الکترودها وصل می کند.

ابتدا بین این دو استوانه را تخلیه کرده و خلاء نسبی ایجاد میکنند؛ سپس محفظه را با گاز مورد نظر و فشار دلخواه پر میکنند. بانک خازنی توسط کلید اسپارک گپ به آند و کاتد متصل است، بنابراین هنگامی که اسپارک گپ عمل میکند اختلاف پتانسیلی بین آند و کاتد بهوجود آمده و باعث ایجاد میدان میدان الکتریکی در فضای بین الکترودها میشود؛

با توجه به این که میدان الکتریکی با فاصله رابطه عکس دارد این میدان در قسمت پایین الکترود ها چون فاصله کمتر است، بیشتر بوده و باعث میشود یک تخلیه الکتریکی در قسمت

 $<sup>^{\</sup>Delta}$ Capacitor Bank

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup>Espark Gap



شکل ۲.۲: نمایی سه بعدی از دستگاه پلاسما کانونی

پایینی الکترودها درون گاز اتفاق بیافتد و گاز یونیزه شود و جریانی در نزدیکی سطح عایق شکل بگیرد، این لایه جریان به اضافه آند را میتوان شبیه به یک چنبره در نظر گرفت. در نتیجه میدان مغناطیسی درون این سیملوله شکل می گیرد که جهتش سمتی است در اثر نیروی لورنتس  $B \times F = J$ ، این میدان سمتی لایه جریان به همراه گاز کاری را نخست در راستای محور آند (در جهت Z+) می راند.

در نوع مدر حرکت لایه جریان از سطح عایق تا رسیدن به محور تقارن آند در طی دو مرحله انجام می شود

مرحله اول: حرکت رانشی (محوری) است که در جهت محور آند (محور z) اعمال می شود و با رسیدن به لبهی آند خاتمه مییابد. در این مرحله باتوجه به اینکه جریان شعاعی  $J_r$  و میدان مغناطیسی  $B_{\theta}$  نیروی لورنتس  $F_z = J_r B_{\theta}$  را در راستای محور تقارن ایجاد می کنند. لذا لایه جریان به سمت بالا رانده می شود.

مرحله دوم: مرحله حرکت شعاعی میباشد، با فرض اینکه لایه جریان بین آند و کاتد در راستای محور z حضور دارد و میدان مغناطیسی همچنان سمتی است. نیروی لورنتس  $F_r = J_z B_{\theta}$  در راستای شعاعی و سمتی وارد میشود که باعث جمع شدن لایه جریان در راستای شعاع و به اصطلاح تنگش شعاعی میشود.

در نوع فیلیپوف به دلیل اینکه قطر آند در مقایسه با طول آن زیاد است، این دو مرحله با هم ادغام میشوند و حرکت شعاعی لایه جریان بلافاصله پس از تشکیل لایه جریان و همزمان با حرکت محوری صورت می گیرد.

لایه جریان به محور تقارن میرسد. ستونی از پلاسمای گرم و متراکم حول محور تقارن آند و در بالای آند تشکیل میشود؛ در این مرحله است که انواع پدیدههای فیزیکی از جمله گداخت هستهای، انتشار پرتوهای ایکس و باریکههای ذرهای یونی، الکترونی، نوترونی رخ میدهند. این ستون پلاسما ناپایدار بوده و در مدت کوتاهی در حدود ۱۰۰ نانوثانیه فرومیپاشد.

# ۳.۲ کاربردهای دستگاه پلاسما کانونی

دستگاه پلاسما کانونی در لیتوگرافی پرتو الکترونی [۱۵، ۱۶]، رادیوگرافی نمونههای بیولوژیک [۱۶]، پوشش فلز با اسپری شدن یون [۱۷]، میکروسکوپ تماسی [۱۸] استفاده شده است. این دستگاه همچنین ابزار مناسبی برای مطالعه فرآیندهای پلاسما [۱۹] و درک مفاهیم بنیادی در زمینههای مختلف بهویژه پلاسما، ترمودینامیک، الکترومغناطیس، اسپکتروسکپی، فیزیک اتمی و فیزیک هستهای میباشد.

ویژگیهای خاص پرتوهای گسیل شده از دستگاه باعث کاربرد متنوع و وسیع این دستگاه در فیزیک کاربردی و فیزیک بنیادی شده است. برخی از این شاخههای متنوع عبارتند از: فیزیک انرژی بالا (شبیه ساری پدیدههای اختر شناسی)، راکتورهای شکافت، لیتوگرافی، علم مواد، طیف نگاری با پرتو ایکس.

در زیر به برخی از زمینههای کاربردی محصولات دستگاه پلاسما کانونی می پردازیم:

- چشمه تولید یون: پرتونهای سریع یا بهعبارتی یونهای تولید شده توسط دستگاه پلاسما کانونی دارای انرژی بیشتر از ۳MeV هستند. از این یونها برای کاشت یونی، تهیه فیلمهای نازک بر روی زیر لایهها و همچنین برای آمورفیزه کردن کریستال سیلیکون استفاده می شود. در سالهای اخیر، پرتوهای یونی تولید شده توسط دستگاههای پلاسما کانونی برای پردازش مواد مورد استفاده قرار گرفته اند [۲۰، ۲۱].
- چشمه تولید الکترون: یکی دیگر از خروجیهای دستگاه پلاسما کانونی، الکترونهای پرانرژی هستند که برای لیتوگرافی استفاده میشوند [۶۵].
- چشمه نوترون: همان طور که قبلاً بیان شد در صورتی که از گاز کاری دوتریم استفاده شود دستگاه به عنوان چشمه نوترون کار می کند، که از آن می توان در فعال سازی نوترونی، آنالیز مواد و تولید رادیوایزوتوپها استفاده نمود.
- بهعنوان چشمه اشعه ایکس: از دیگر خروجیهای دستگاه، اشعه ایکس است که برای میکرولیتوگرافی [۲۲]، رادیوگرافی نمونه های زیستی [۲۳] و همچنین با توجه به پالسی بودن چشمه اشعه ایکس تولید شده برای عیبیابی اجسام سریع نیز استفاده می شود.

در حال حاضر پرتوهای پرقدرت پلاسما (ذرات باردار با طول عمر میکرو و نانو ثانیه) در زمینه علم فیزیک رادیویی، حالت جامد و برای کاربردهای مختلف استفاده می شوند [۲۴، ۲۵، ۲۶]. به عنوان مثال فناوری کروم پلاسما (HEVPA) با انرژی بالا در صنعت هواپیما برای طراحی پوشش های ضد آتش با هدف محافظت از تیغه های توربین از تأثیرات خارجی استفاده می شود [۲۷].

در صنعت انرژی هستهای اثرات پرتو تابشی، به ویژه جریان پلاسمای پالسی با درجه حرارت بالا (HTPP) برای اصلاح وضعیت فاز ساختاری لایههای سطحی مواد مورد استفاده در راکتورهای هستهای استفاده می شود [۲۸، ۲۹]. با کمک پلاسما فشار بالا با فرکانس بالا می توان یک لایه نانولوله اصلاح شده در سطح تحت درمان نمونه هایی که از فولاد و آلیاژهای تیتانیوم ساخته شده اند استفاده کرد؛ که باعث تقویت سطح و افزایش مقاومت در برابر خوردگی می شود [۳۰].

# ۴.۲ عوامل تأثیرگذار بر تنگش پلاسما

#### ۱.۴.۲ اجزای هندسی دستگاه

مشخصات خازن

با توجه به میزان انرژی سیستم، مشخصات هندسی دستگاه تعیین می شود. مهم ترین عوامل تأثیرگذار بر انرژی سیستم و محاسبات مربوط به هندسه دستگاه، عبارتنداز : ظرفیت خازن، اندوکتانس خازن و ماکزیمم ولتاژ قابل تحمل توسط خازن [۶۷] با توجه به رابطه (۱.۲) برای انتقال بیشتر جریان به پلاسما کافیست خازنی با ظرفیت بالا و اندوکتانس پایین انتخاب شود. برای بهبود عملکرد و افزایش بهره تابشی سیستم، با توجه به رابطه مستقیم جریان و ولتاژ اعمالی بایستی از خازنی با ولتاژ کاری بالا استفاده کرد.

$$I = \frac{V}{\sqrt{\frac{L}{C}}} \tag{1.7}$$

با توجه به نکاتی که در بالا ذکر شد، کاهش اندوکتانس سبب افزایش جریان و درنتیجه افزایش سرعت تخلیه انرژی و نهایتاً تخلیه همگن و یکنواختی را ایجاد خواهد کرد؛ مرسوم است برای افزایش ظرفیت خازن یا کاهش اندوکتانس از چند خازن موازی استفاده شود که تنها مشکل ایجاد شده تخلیه همزمان خازنها است.

مشخصات آند

• طول یکی از عوامل مهم و تأثیرگذار بر تنگش پلاسما طول آند میباشد [۳۱]. زمانی که جریان در بیشینه مقدار خودش باشد بهترین تنگش رخ خواهد داد. با توجه به اینکه لایه جریان برای رسیدن به سر آند باید طول آند را بپیماید، بهتر است فاز محوری در نزدیکی بیشینه جریان به پایان برسد. اگر طول آند از طول بهینه کمتر باشد، تنگش خیلی زودتر از اینکه بیشیینه جریان رخ دهد ایجاد میشود و انرژی کافی جهت تراکم مناسب پلاسما به پیستون مغاطیسی انتقال نخواهد یافت؛ و اگر طول آند برای انرژی مشخص بیشتر از طول بهینه باشد، تنگش بعد از بیشینه جریان رخ خواهد داد که در این حالت هم انرژی کمتری به پیستون مغناطیسی منتقل خواهد شد. لذا از زمان صعود طول پالس جریان برای محاسبه طول بهینه آند استفاده می شود.

#### • شعاع

شعاع آند یکی پارامترهای مؤثر بر میزان تراکم شعاعی، کشیدگی ستون پلاسما و چگونگی وقوع تنگش میباشد. محاسبات وآزمایشات نشان میدهد زمان تراکم، زمان تنگش، شعاع ستون پلاسما و بیشینه کشیدگی ستون پلاسما به مقدار شعاع آند وابسته است. بازه بین کمینه شعاع ستون پلاسما تا زمان بروز ناپایداری، زمان تنگش معرفی می شود. پینچی مناسبتر است که بیشترین کشیدگی و فشردگی را داشته باشد. برای تراکم



شکل ۳.۲: آندهایی با شعاع انتهای متفاوت [۳۲]

بیشتر ستون پلاسما باید شعاع آند را به حداقل ممکن رساند و از طرف دیگر برای داشتن ماکزیمم کشیدگی باید شعاع آند را افزایش داد با توجه به اینکه این دو شرط بهطور همزمان تحقق پذیر نیست برای آند شعاع بهینه در نظر گرفته میشود که با استفاده از پارامتر حرکت مشخص میشود. در شکل ۳.۲ هرچه به سمت انتهای آند شماره ۲ پیش میرویم شعاع آن کاهش مییابد باید فشار گاز افزایش یابد تا زمان بیشینه جریان با زمان رسیدن لایه جریان به انتها باهم برابر شود [۳۲].

• جنس

الکترود مرکزی از جنسهای متفاوتی چون گرافیت، آلومنیوم، تیتانیوم، آهن، مس، نقره و تنگستن ساخته میشودو فشار بهینه دستگاه پلاسما کانونی برای یک انرژی مشخص، بهشدت به جنس مواد استفاده شده برای ساخت آند وابسته است. در برخورد الکترونها با سطح آند و همچنین به دلیل بالا بودن دما، ذرات از سطح آند کنده میشوند و بر روی عایق مینشینند، این ناخالصیها علاوهبر آنکه در تخلیههای بعدی وارد پلاسما میشوند، سبب افزایش جریان نشتی از سطح عایق خواهند شد. در بین الکترودها آلومینیوم بیشترین جریان نشتی و تنگستن کمترین جریان نشتی

۲۰ دستگاه پلاسما کانونی و دینامیک آن

از سطح عایق را دارند. با توجه به هزینههای ساخت، از مس برای ساخت الکترودها استفاده می شود.

• ساختار انتها

پلاسما در انتهای فاز شعاعی تشکیل میشود بنابراین پارامترهایی که در فاز شعاعی دخالت دارند در خصوصیات پلاسمای تشکیل شده نیز سهیم هستند. تغییر در شکل آند مشخصههای پلاسما از جمله سرعت لایه جریان و شکل لایه را تغییر می دهد. آندهای مورد استفاده به صورت کلی به شکلهای کروی نیم مخروطی و تخت می باشد [۳۳]. نتایج تحقیقات محمدی و همکارانش بر روی آندهای مختلف [۳۴] نشان می دهد فاصله لایه جریان از سطح آند، برای آندهای شبه مخروطی کمترین مقدار و برای آندهای تخت بیشترین مقدار است.

در آزمایشاتی که بر روی تأثیر ساختار انتهای آند بر روی اشعه ایکس گسیلی از دستگاه



شکل ۴.۲: آندهایی با شکل انتهای متفاوت [۳۵]

پلاسما کانونی امیر کبیر [۳۵] انجام شده است دریافتند که بیشترین شدت گسیل اشعهی ایکس به آند مخروطی با سر مسطح مربوط میباشد در حالی که کمترین شدت گسیل این اشعه در آند استوانهای با سر توخالی مشاهده شده است. دلیل افزایش شدت اشعهی ایکس مربوط به دینامیک لایه جریان است. کاهش تدریجی در انتهای آند (شکل ۲.۲ )، در هندسهای با سر مخروطی، باعث افزایش جرم جمعآوری شده توسط لایهی جریان در فاز محوری میشود. بنابراین برای این آندها طی گذار از فاز شتاب گیری محوری به فاز واپاشی شعاعی جرم بیشتری از گاز برای تشکیل ستون پلاسما مصرف میشود؛ و در هنگام فروپاشی آن الکترون و یون و در نتیجه اشعهی ایکس بیشتری تولید می گردد.

مشخصات عايق

• طول از عوامل تأثیرگذار بر رفتار دینامیکی دستگاه پلاسما کانونی طول عایق است [۳۶]. فاز شکست در ابتدای تخلیه الکتریکی بر روی سطح عایق ایجاد می شود، که تشکیل

پلاسمای چگال با دمای زیاد به این فاز وابسته است. تولید انواع تابشها در دستگاه پلاسما کانونی وابسته به شکل گیری همگن لایه جریان در فاز شکست است [۳۷]. لایه جریان توسط بار موجود در فضای نزدیک به سطح عایق ایجاد می شود که عواملی چون طول عایق، شکل لبه صفحه کاتد در شکل گیری آن مؤثر است. در واقع طول عایق دارای یک مقدار بهینه است که این طول بهینه سبب ایجاد یک لایه جریان متقارن و همگن می شود [۳۷].

در شکل ۵.۲ انحنای لایه جریان را برای عایقهایی با طولهای متفاوت نشان میدهد. به این صورت که اگر طول عایق از مقدار بهینه کمتر باشد، سرعت فاز محوری کاهش



شکل ۵.۲: تغییر انحنای لایه جریان بر اثر تغییرات طول عایق [۳۸]

مییابد، برای همزمان شدن بیشینه جریان با زمان رسیدن لایه جریان به بالای آند باید فشار گاز را کاهش داد؛ که این عمل سبب کاهش چگالی در نتیجه کاهش میزان تولید اشعه ایکس و نوترون (در صورت استفاده از گاز دوتریم) خواهد شد. اگر طول عایق بیشتر از مقدر بهینه باشد زمان فاز محوری کاهش مییابد، در این حالت برای همزمانی بیشینه جریان با زمان رسیدن لایه جریان به نوک آند باید فشار گاز افزایش یابد؛ که سبب کاهش دمای پلاسما و در نتیجه باعث کاهش میزان برهمکنش پرتو هدف در گاز دوتریم و نهایتاً کاهش تولید نوترون می شود. با توجه به آزمایشات انجام شده در رابطه با تأثیر طول عایق بر زمان پینچ، با افزایش طول از مقدار بهینه زمان پینچ افزایش می یابد و با کاهش طول از مقدار بهینه بازهم زمان افزایش مییابد یعنی در طول بهینه ما کمترین زمان پینچ را خواهیم داشت [۲۸].

• جنس

در دستگاه پلاسما کانونی از عایقهایی با جنسهای مختلف پیرکس آلومینا، کوارتز، تفلون و شیشه استفاده میشود [۳۹]. تحقیقات بسیاری در راستای تأثیر جنس عایق بر میزان تابشهای حاصله از دستگاه پلاسما کانونی انجام شده است که نشان میدهد فشار بهینه پینچ و متناظر با آن میزان بهره نوترون و اشعه ایکس به جنس عایق و آند وابسته است.

در دستگاه پلاسما کانونی با عایقهای سرامیکی (شیشه، کوارتز، آلومینا) شاهد ایجاد
لایه جریانی یکنواخت خواهیم بود اما استفاده از عایقهای غیر سرامیکی باعث می شود لایه جریانی غیر یکنواخت تشکیل شود. کوهستانی و همکارانش اثر طول عایق بر میزان اشعه ایکس سخت را مورد بررسی قرار دادند [۴۰].

#### ۲.۴.۲ مشخصات گاز کاری

• نوع

با توجه به این نکته که برای بررسی تأثیر نوع گاز بر زمان پینچ باید تمامی پارامترها را ثابت نگه داشت؛ تنها پارامتر نشان دهنده نوع گاز، چگالی جرمی است. حتی با یکسان در نظر گرفتن چگالی جرمی برای گازهای مختلف بازهم در دینامیک دستگاه تفاوتهایی دیده میشود شکل ۶.۲ سیگنال مشتق جریان برای دو گاز دوتریم ونئون با چگالی جرمی یکسان نشان داده شده است.



شکل ۶.۲: سیگنال مشتق جریان برای گاز نئون و دوتریم [۶۷]

همانطور که از شکل پیداست سیگنال مربوط به دو گاز در فاز محوری تقریباً یکسان است اما در ابتدای فاز شعاعی مشتق جریان برای دوتریم سریعتر افت می کند این امر بالاتر بودن سرعت رو به داخل پلاسما را در گاز دوتریم نشان می دهد. بالاتر بودن سرعت تراکم در دوتریم ناشی از فرایند یونیزاسیون در دینامیک پلاسما می باشد. سرعت جبهه موج با  $\gamma$  (نسبت گرمای ویژه) رابطه مستقیم دارد. فرایند یونیزاسیون سبب کاهش  $\gamma$  در نتیجه کاهش سرعت جبهه موج خواهد شد؛ همچنین فرایند یونیزاسیون موجب اتلاف انرژی و کاهش دما می شود. اگر در فاز شعاعی دما پایین باشد سرعت انتقال انرژی از پیستون به جبهه موج کاهش می ابد. فرایند یونیزاسیون سبب تولید ذرات ثانویه (الکترونها) می شود. افزایش چگالی ذرات موجب کاهش دما پلاسما خواهد شد. تعداد ذرات تولید شده در اثر یونیزاسیون کامل گاز نئون در فشار ۵*mbar* تقریباً نصف ذرات تولید شده در فشار ۳*mbar* دوتریم است. [۶۷]

• فشار

برای بررسی اثر فشار بر زمان پینچ باید دیگر پارامترهای سیستم ثابت نگه داشتهشوند. شکل ۲.۲ اثر فشار بر جریان تخلیه را در ولتاژهای ۸، ۹، ۱۰ و ۱۱ کیلوولت نمایش میدهد. در یک ولتاژ مشخص با افزایش فشار اینرسی ناشی از جرم افزایش مییابد و باعث کاهش سرعت لایه پلاسما میشود. کاهش سرعت لایه پلاسما، آهنگ افزایش اندوکتانس را کم میکند و جریان سریعتر افزایش مییابد [۶۷]. زمان فاز شعاعی،



شکل ۷.۲: اثر فشار بر جریان تخلیه در ولتاژهای متفاوت در دستگاه NX2 [۶۷]



شکل ۸.۲: اثر فشار بر زمان پینچ در ولتاژهای متفاوت در دستگاه NX2 [۶۷]

مربوط به شروع و پایان فرورفتگی در سیگنال جریان است. افزایش فشار باعث تأخیر در زمان وقوع فاز شعاعی میشود یعنی فاز محوری افزایش یافته است که این افزایش را میتوان بر اساس پارامتر حرکت به صورت زیر توجیه کرد. افزایش فشار باعث افزایش چگالی گاز میشود که این خود باعث کاهش سرعت لایه جریان شده و نهایتاً زمانهای مربوط به فاز محوری و شعاعی افزایش مییابد. در شکل ۸.۲ تأثیر فشار بر زمان پینچ نمایش دادهشدهاست؛ براساس توضیحات بالا همانطور که انتظار داشتیم با افزایش فشار اینرسی ناشی از جرم افزایش یافته و مدت زمان فاز شعاعی و محوری نیز افزایش یافته است در نتیجه افزایش زمان پینچشدگی را بهدنبال داشته است.

مشخصات كاتد

در یک دستگاه پلاسما کانونی، پلاسما حاصل از تخلیه در سرتاسر فازهای پینچ نشان میدهد ساختار کاتد تأثیر بسزایی در اتلاف انرژی و جریان دارد [۴۱] کاتد را معمولاً به شکل میلهای و یا استوانهای میسازند.

#### ۳.۴.۲ ولتاژ دستگاه

همان طور که گفته شد افزایش ولتاژ در دستگاه پلاسما کانونی بر طبق رابطه (۱.۲) سبب افزایش دامنهی جریان می شود. با افزایش ولتاژ در یک فشار مشخص، لایه جریان سریع تر طول آند را طی کرده و به بیشینه مقدار خود می رسد همگام با افزایش سرعت لایه ی جریان، اندو کتانس سیستم با آهنگ بالاتری افزایش می یابد؛ لذا آهنگ افزایش جریان کاهش می یابد. اما در کل اثر عامل انرژی برعامل اندو کتانس غالب است و افزایش ولتاژ سبب افزایش سریعتر لایه ی جریان می گردد [۶۷]؛ و زمان پینچ شدگی کاهش می یابد. در شکل ۹.۲ اثر ولتاژ بر جریان تخلیه در فشار Torr ۲۰۲ بر روی گاز کاری نئون نمایش داده شده است و همچنین در شکل ۲۰۰۲ تأثیر ولتاژ برزمان پینچ نشان داده شده است.



شکل ۹.۲: اثر ولتاژ بر جریان تخلیه در فشارهای متفاوت در دستگاه NX2 [۲۲]



شکل ۱۰.۲: اثر ولتاژ بر زمان پینچ در فشارهای متفاوت در دستگاه NX2 [۲۲]

فرورفتگی موجود در شکل نشان دهندهی فاز شعاعی است. همانطور که از شکل پیداست در ولتاژهای بالاتر فاز شعاعی زودتر رخ میدهد (فاز محوری سریعتر به پایان میرسد)؛ با افزایش ولتاژ بازه زمانی مربوط به فرورفتگی جریان (فاز شعاعی) کاهش مییابد.

# ۵.۲ دینامیک پلاسما کانونی

دینامیک دستگاه پلاسمای کانونی در هر دو سیستم مدر و فیلیپوف تقریباً یکسان است؛ با توجه به اینکه در این پروژه از دستگاه پلاسما کانونی نوع مدر استفاده شده است (شکل ۱۱.۲) ترجیحاً دینامیک نوع مدر مورد بررسی قرار خواهد گرفت. مطالعه دینامیک دستگاه پلاسما کانونی را میتوان به سه دسته تقسیم کرد:

- فاز شکست<sup>۷</sup>
- فاز شتاب گیری محوری یا رانش محوری<sup>۸</sup>
  - فاز شعاعی<sup>۹</sup>

#### ۱.۵.۲ فاز شکست

دستگاه با یک گاز معین تحت فشار مناسب (معمولاً چند میلیبار هیدوژن، هلیوم ، آرگون و...) پر شده است. هنگامی که یک پالس ولتاژ بالا بین الکترودهای دستگاه ایجاد شود یک تخلیه متقارن سمتی آغاز میشود. فاز فرو شکست الکتریکی که بهوسیله آن پلاسما اولیه شکل

<sup>&</sup>lt;sup>V</sup>Breakdown phase

<sup>&</sup>lt;sup>A</sup>Axial acceleration phase

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup>Radial phase



شکل ۱۱.۲: دینامیک لایه جریان در دستگاه پلاسما کانونی نوع مدر

می گیرد، بر تخلیه الکتریکی مقدم می شود و به همین دلیل جریان حاصل از تخلیه الکتریکی می تواند حرکت کند.

ایجاد تخلیه الکتریکی با جریان بالا به شرایط اولیه گاز [۳۱، ۴۲] ، پارامترهای هندسی الکترودها [۳۲] و عایق [۳۱، ۴۲، ۴۴، ۴۵] وابسته است.

بعد از مدت زمان ۵۰ الی ۵۰۰ نانوثانیه رسانش لایه ایجاد شده به اندازه کافی زیاد می شود و تخلیه الکتریکی به لایه پلاسمایی تبدیل می شود در حقیقت ساختار دو لایه، جبهه یونیزاسیون و پیستون مغناطیسی ایجاد می گردد [۴۶، ۴۷] ؛ در اینجا مرحله شکست به پایان می رسد.

#### ۲.۵.۲ فاز محوری

پوسته جریان تشکیل شده در انتهای فاز شکست توسط نیروی لورنتس  $(\overrightarrow{J} \times \overrightarrow{B})$  به سمت انتهای باز الکترود مرکزی شتاب می *گیرد.* مؤلفه شعاعی نیروی لورنتس، پوسته جریان را به سمت الکترود بیرونی هل میدهد و از سویی مؤلفه محوری این نیرو در نزدیکی آند (بهعلت تابعیت  $\frac{1}{r}$  چگالی جریان *I* و میدان *B*) قویتر است. این امر باعث می شود سرعت پوسته جریان در فواصل نزدیکتر به سطح الکترود مرکزی بیشتر شود و در نتیجه، این اختلاف سرعت شکل لایه جریان بصورت سهمی در میآید. در ادامه به دو نکته اساسی برای داشتن پلاسمای پر چگال و با دمای بالا که باید در فاز شتاب گیری محوری مورد توجه قرار گیرد اشاره میشود. اول آنکه پوسته جریان پلاسما باید تقریباً در زمانی که جریان تخلیه به نخستین پیک خود میرسد، به انتهای الکترود مرکزی (محور دستگاه) برسد، البته برقراری این شرط موجب انتقال بهینه انرژی از بانک خازنی به ستون پینچ پلاسماست، برای تمامی دستگاههای سازنده پینچ چگال الزامی است. دومین نکته برای داشتن پلاسما پرچگال این است که ساختار و موقعیت مکانی پوسته پلاسما باید دارای تقارن محوری باشد. با حرکت سریع این پوسته متحرک، یک جبهه شوک دینامیکی درجلوی آن تشکیل میشود که موجب گرمایش و تراکم گاز خنثی درجلوی آن می گردد. بنابراین پوسته دارای ساختاری پینچیده و حاوی مواد یونیزه داغ خواهد بود.

در انتهای این فاز، یک انتهای پوسته جریان در اطراف نوک آند و انتهای دیگرش در امتداد محفظه حرکت میکند. تنها کسری از پلاسما در انتهای فاز شتاب گیری محوری و آغاز فاز تراکم فاز تراکم شعاعی لایه جریان پلاسما مؤثر است. مدت زمان این فاز در حدود ۱ الی ۴ میکروثانیه است.

#### ۳.۵.۲ فاز شعاعی

در انتهای فاز محوری لایه جریان انتهای الکترود درونی را جاروب کرده در نتیجه بهعلت نیروی لورنتس  $\overrightarrow{B} \times \overrightarrow{D}$  رو به داخل (محور الکترودها) باعث تشکیل پلاسمای متراکم در مدت زمان ۵۰ الی ۲۰۰ نانوثانیه (بسته به مشخصات دستگاه) میشود. فاز شعاعی که باعث تشکیل پلاسمایی با چگالی بالا با مشخصههایی از قبیل گسیل اشعه ایکس، تولید ذرات باردار پرانرژی و همچنین گسیل نوترونهای پرانرژی (در صورت استفاده از گاز دوتریوم) میشود که از اهمیت فوق العادهای برخوردار است.

می شود. با توجه به اینکه جریان تخلیه در این مرحله ثابت است میدان الکتریکی از رابطه زیر بدست می آید:

$$E = I \frac{dL}{dt} \tag{(Y.Y)}$$

در رابطه فوق *I* جریان تخلیه و $\frac{L}{dt}$  میزان تغییرات زمانی اندوکتانس است. فاز شعاعی را به چهار قسمت زیر تقسیم کرده اند: ۱. فاز تراکم ۱۰ ۲. فاز شبه آرام ۱۱ ۳. فاز ناپایدار ۱۲ ۴. فاز واپاشی ۱۳

<sup>&</sup>lt;sup>1°</sup> comperession phase

<sup>&</sup>lt;sup>11</sup>quiescent phase

<sup>&</sup>lt;sup>17</sup>unstable phase

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup><sup>m</sup>decay phase

#### فازتراكم

این فاز (اولین قسمت فاز شعاعی) از فروریزش ناگهانی لایه جریان با تقارن شبه استوانهای (قیفی شکل) به سمت محور الکترودها به علت تأثیر نیروی لورنتس  $E = J \times B$  آغاز می شود. این حرکت انفجاری وقتی شعاع پلاسما به مینیمم مقدار و چگالی آن به مقدار ماکزیمم خود (۱۰<sup>۹۱</sup> $cm^{-7}$ ) می رسد پایان می یابد.

بازه سرعت لایه جریان در فاز فروریزش ناگهانی در محدوده ۷ الی ۶۰ سانتی متر بر میکروثانیه قرار دارد که به شرایط گاز کاری و شکل هندسی الکترودها و چگالی جریان و ساختار لایه جریان بستگی دارد. ستون پلاسما بصورت آدیاباتیک متراکم شده تا بصورت تنگش در بیاید. پیکوک و همکارانش مشاهده کردند که ناپایداری ریلی – تیلور در ۳۰ نانوثانیه قبل از انتهای این مرحله اتفاق میافتد. این نوع ناپایداری با کاهش سرعت شعاعی میرا میشود. در پایان این مرحله اتفاق میافتد. این نوع ناپایداری با کاهش سرعت شعاعی میرا میشود. در پایان این مرحله اتفاق میافتد. این نوع ناپایداری با کاهش سرعت شعاعی میرا میشود. در پایان این مرحله اتفاق میافتد. این نوع ناپایداری با کاهش سرعت شعاعی میرا میشود. در پایان این مرحله اتفاق میافتد. این نوع ناپایداری با کاهش سرعت شعاعی میرا میشود. در پایان میدان معناطیسی خیلی سریع به ستون پلاسما نفوذ خواهد کرد. با پخش سریع میدان به درون پلاسما افزایش خواهد کرد. با یخش سریع به ستون پلاسما نفوذ خواهد کرد. با یخش سریع میدان میدان می میدان معناطیسی خیلی سریع به ستون پلاسما نفوذ خواهد کرد. با یخش سریع می میدان به درون پلاسما افزایش خواهد یافت [۴۸] . پیک ایجاد شده در منحنی ولتاژ و همچنین مرورفتگی در منحنی جریان نشان میدهند که امپدانس پلاسما افزایش خواهد یافت آم۲] . پیک ایجاد شده در منحنی ولتاژ و همچنین برورفتگی در منحنی جریان نشان میدهند که امپدانس پلاسما افزایش عافته است. دمای نهایی الکترون ها تا حدود ۱ ای ۲ کیلوالکترون ولت افزایش خواهد یافت. مقادیر ماکزیمم پرورفتگی نور لیزر [۴۹] و دیگر روشها بدست میآید. اغلب از رابطه تعادلی بنت <sup>۱۹</sup> برای ناحیه پراکندگی نور لیزر [۴۶] و دیگر روشها بدست میآید. اغلب از رابطه تعادلی بنت <sup>۱۹</sup> برای ناحیه تنگش استفاده می شود براساس این رابطه دمای نهایی تنها به جریان I و چگالی N ( $\frac{7}{N}$ ) میراند می است.

#### فاز شبه آرام

این مرحله نشانگر آغاز گسترش ستون پلاسمای متمرکز است. دمای الکترونها تا حدود ۶۰۰ الی ۸۰۰ الکترونولت پایین میآید. و دمای یونها در حدود ۲۰۰ الکترونولت برآورد شده است [۴۶]. چگالی پلاسما همچنین تا حدود ۲–۱۰<sup>۱۸</sup>cm × ۲ پایین میآید. در طول این فاز ستون پلاسما در هر دو جهت شعاعی و محوری گسترش مییابد، میزان بسط یافتگی در راستای شعاعی به علت وجود فشار مغناطیسی کندتر میباشد. پلاسما در جهت محوری فوارهوار بدون هیچگونه مانعی گسترش مییابد.

تغییر شدید در اندوکتانس پلاسما (در فاز فشرده سازی آغاز شده) باعث ایجاد میدان الکتریکی در ستون پلاسما میشود. این میدان الکتریکی باعث شتاب گرفتن یونها و الکترونها در دو سوی مخالف میشود. سرعت سوقی نسبی بین الکترونها و یونها افزایش مییابد و تقریباً با سرعت حرارتی الکترونها برابر میباشد. این بهعنوان شرطی برای آغاز ناپایداریهای ریز از قبیل سیکلوترونی الکترون و شکلهای مختلفی از ناپایداری باریکه پلاسما است. در انتهای

<sup>16</sup>bennett

فاز آرام ناپایداری ( $\circ = m$ ) به علت افزایش ناگهانی دمای الکترون ها آغاز می شود. ستون پلاسما دوباره متراکم خواهد شد این متراکم شدگی به علت ناپایداری ( $\circ = m$ ) است. با استفاده از این نتیجه می توان مدت زمان پلاسما  $t_p$  را به عنوان زمان بین اولین تراکم و زمان آغاز ( $\circ = m$ ) تعریف کرد [۶۸].

#### فاز ناپايدار

فاز ناپایدار بهعلت تولید اشعه ایکس سخت و نرم، یونها و الکترونهای سریع و همچنین گسیل نوترونها و دوترونها در واکنش D – D غنیترین و مهمترین مرحله است.

به علت رشد ناپایداری (m = m) میدان الکتریکی القایی افزایش مییابد. این میدان باعث شتاب گیری الکترونها به سمت آند و یونها به سمت کاتد می شود. چگالی پلاسما در ناحیه تنگش دوباره تا ( $^{-m}cm^{-n}$ ) افزایش مییابد. از هم گسیختگی پلاسما تا زمانی که کل ستون از بین برود ادامه مییابد. چگالی پلاسما کم می شود، سرعت سوق الکترونها با استفاده از چگالی جریان در حدود ( $m^{s}m/s$ ) است که از سرعت حرارتی الکترونها یعنی ( $m^{s}m/s$ ) بیشتر است. با این توصیف انرژی قابل ملاحظهای به درون پلاسما تزریق شده که باعث افزایش بیشتر است. با این توصیف انرژی قابل ملاحظهای به درون پلاسما تزریق شده که باعث افزایش انرژی درون یا سما تریق شده که باعث افزایش انرژی درون یا سما تا زمانی که کل ستون بیشتر است. با این توصیف انرژی قابل ملاحظهای به درون پلاسما تریق شده که باعث افزایش انرژی درون یا تای می توان نتیجه گرفت که دمای انرژی درون تا حدود توان نتیجه گرفت که دمای

#### فاز واپاشی

آخرین مرحله از فاز شعاعی یا بهعبارت دیگر آخرین مرحله از دینامیک پلاسمای کانونی فاز واپاشی است. زمانی که چگالی پلاسما به کمتر از (<sup>۳</sup>–۱۰<sup>۷</sup> ۲) برسد این فاز شروع می شود. در طول فاز واپاشی ابر پلاسمایی نازک، داغ و بزرگی به علت از بین رفتن ستون پلاسما تشکیل می شود. این ابر مقدار زیادی اشعه ایکس نرم در اثر فرایند تابش ترمزی گسیل می کند. اشعه ایکس نرم خیلی سریع در طول این فاز گسیل می شود. پیک اشعه ایکس نرم به عنوان اولین پیک بعد از پیک مربوط به تنگش است که دارای پهنای زمانی ۳۰۰ نانوثانیه است [۵۰]. پالس نوترونی که از ابتدای فاز ناپایدار آغاز شد، در این فاز به اوج خود می رسد. در شکل زیر مراحل فشرده سازی پلاسما در دستگاه UNU/ICTP PFF برای گاز دوتریم در فشار ۴*mbar* 

# ۶.۲ پارامتر رانش

برای توصیف شدت نیروی رانش در پلاسما کانونی مفهوم پارامتر رانش ابتدا توسط لی پیشنهاد شد [۵۲]. پارامتر رانش بصورت زیر است:

$$S = \frac{I/a}{\sqrt{\rho}} \tag{(T.T)}$$

۳۰ دستگاه پلاسما کانونی و دینامیک آن



شکل ۱۲.۲: مراحل فشرده سازی پلاسما در دستگاه UNU/ICTP PFF

این پارامتر بصورت تجربی برای اندازه گیری سرعت که دارای مقدار بهینه برای هر گازی میباشد، به کاربرده شده است و همچنین از آن برای اندازه گیری فشار مغناطیسی بر واحد چگالی یا انرژی مغناطیسی بر واحد جرم استفاده می شود. پارامتر رانش به عنوان یک پارامتر با ارزش برای تخمین سریع حالت پلاسما یا شرط مورد نیاز برای مقدار کار در پلاسما کانونی و همچنین دیگر نیروهای رانش الکترومغناطیسی در سیستم پلاسما شناخته شده است.

# ۷.۲ دینامیک نظری براساس مدل لی

#### ۱.۷.۲ مقدمه

برای مطالعه دقیق پلاسما کانونی، مدل نظری پیشنهاد می شود که برای توصیف پدیدههایی که در آن پلاسماهای پرچگال و مغناطیده تولید می شود لازم است. نوشتن کدها، با چگونگی کوپل شدن پارامترهای الکترومغناطیس با پیکربندی الکترودها و برآورد شکل لایه جریان شروع شده و سپس به مراحل پیشرفته تری جهت برآورد خروجی دستگاه پلاسما کانونی تبدیل شد. اولین بار مدل مربوط به پلاسما کانونی توسط پروفسور سینگ لی <sup>۱۵</sup> [۵۳، ۵۳] ارائه شد. این مدل در ابتدا بهصورت یک کد مگنتوهیدرودینامیک ساده بود که بعداً توسط لیو ماح <sup>۱</sup>۶ [۶۷] [۶۹] و شان <sup>۱۱</sup> [۵۴] کامل شد. ویرایش اخیر مدل نهتنها چگونگی شکل وشتاب گرفتن پلاسما را شرح میدهد بلکه پدیدههایی که در فاز شعاعی و همچنین گسیل اشعه ایکس از پلاسمای پینچ شده را بیان میکند.

کد مدل لی، مدار الکتریکی، دینامیک پلاسماکانونی، ترمودینامیک و تابش را به یکدیگر متصل میسازد و امکان شبیه سازی واقع بینانه از تمام خواص فیزیکی نوری را فراهم می کند. مدل پایه، در سال ۱۹۸۴ توضیح داده شده است [۵۲]. این مدل داری ۵ مرحله است که بهطور مختصر به بیان آنها میپردازیم:



شکل ۱۳.۲: شماتیک دینامیک مدل نظری

#### ۲.۷.۲ فاز محوری

فاز محوری بعد از مرحله شکست آغاز می شود. در این مرحله لایه پلاسما به صورت لایه رسانای تخت که آند را به کاتد وصل می کند. این فاز به وسیله مدل برف روب <sup>۸۸</sup> و معادله حرکت که با معادلات مدار کوبل شده اند توضیح داده می شوند. پارامترهای معادله حرکت مدل فاز محوری عبارت انداز: فاکتورهای جرم و جریان به ترتیب  $f_m$  و  $f_n$ . مطابق شکل ۱۴.۲ لایه جریان کسری از جرم مولکول های برخوردی ( $f_m$ ) را از پایین تا بالای آند جاروب می کند. موری لایه  $z = z_0$ 

<sup>VV</sup>B.Shan

<sup>&</sup>lt;sup>\d</sup>Sing lee

<sup>&</sup>lt;sup>19</sup>M. Liu

<sup>&</sup>lt;sup>1A</sup>snow-plow model

یعنی طول آند ادامه می<br/>یابد. بنابراین جرم لایه پلاسما در zبصورت<br/>  $f_{m1} = n_\circ m_i z \pi (b^\intercal - a^\intercal)$ 

است. در رابطه اخیر  $n_{\circ}$  چگالی تعداد اتمها و  $m_i$  جرم اتمی گاز پر شده است a و b بهترتیب شعاع آند و کاتد هستند.



شکل ۱۴.۲: پلاسمادر فاز محوری

میزان تغییر شتاب در لایه جریان، موقعیت z برابر است با:  

$$\frac{d(mv)}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \left[ \rho_{\circ} \pi (b^{\mathsf{T}} - a^{\mathsf{T}})z \right] f_m \frac{dz}{dt} \right) = \rho_{\circ} \pi (c^{\mathsf{T}} - \mathsf{I})a^{\mathsf{T}} f_m \frac{d}{dt} (z \frac{dz}{dt})$$
(۴.۲)

میدان مغناطیسی حاصل از جریان  $I_p$  بصورت زیر میباشد. (ب. د)  $\mu$ 

$$B_{\theta} = \frac{\mu}{\Upsilon \pi} \times \frac{I_p}{r} \tag{(a.Y)}$$

در این عبارت  $I_p = If_c$  مقدار جریانی است که از پلاسما شارش مییابد و نیروی مغناطیسی  $(J \times B)$  وارد بر لایه پلاسما که باعث حرکت رو بالا آن می شود برابر است با:

$$F_{z\mathbf{N}} = \int_{a}^{b} \left[ \left( \frac{\mu I f_{c}}{\mathbf{Y} \pi r} \right)^{\mathbf{Y}} / \mu \right] \mathbf{Y} \pi r dr = \frac{\mu f_{c}^{\mathbf{Y}} I^{\mathbf{Y}}}{\mathbf{Y} \pi} \ln \left( \frac{b}{a} \right)$$
(8.1)

اندوکتانس تیوپ بصورت رابطه (۷.۲) است

$$L_{p1} = \frac{\mu}{\Upsilon \pi} z \ln(\frac{b}{a}) \tag{Y.\Upsilon}$$

باتوجه به دو رابطه (۴.۲) و (۶.۲) داریم:

$$\rho_{\circ}\pi(c^{\mathsf{Y}}-\mathsf{N})a^{\mathsf{Y}}f_{m}\frac{d}{dt}(z\frac{dz}{dt}) = \frac{\mu f_{c}^{\mathsf{Y}}}{\mathfrak{F}\pi}\ln(c)I^{\mathsf{Y}}$$
$$\frac{d^{\mathsf{Y}}z}{dt^{\mathsf{Y}}} = \left[\frac{f_{c}^{\mathsf{Y}}}{f_{m}}\frac{\mu\ln(c)}{\mathfrak{F}\pi^{\mathsf{Y}}\rho_{\circ}(c^{\mathsf{Y}}-\mathsf{N})}(\frac{I}{a})^{\mathsf{Y}} - (\frac{dz}{dt})^{\mathsf{Y}}\right]/z \qquad (\mathsf{A}.\mathsf{Y})$$

**معادلات مدار معادل** در مرحله تخلیه الکتریکی پلاسما کانونی را میتوان به عنوان مؤلفهای از مدار الکتریکی معادل



شكل ١٥.٢: مدار معادل پلاسما كانوني

در نظر گرفت. مدار الکتریکی معادل مربوط به پلاسما کانونی به صورت شماتیک در بالا رسم شده است.حلقه تخلیه الکتریکی بصورت مدار استاندارد RLC در نظر گرفته می شود. شده است.حلقه تخلیه الکتریکی بصورت مدار استاندارد RLC در نظر گرفته می شود. در شکل ۱۵.۲  $C_{\circ}$  ظرفیت بانک خازنی  $r_{p}$  و  $r_{p}$  به ترتیب مقاومت پلاسما و مدار می باشد. اندوکتانس بصورت دو قسمت  $(L_{\circ})$  مربوط به مدار و  $(L_{p})$  اندوکتانس ستون پلاسما نشان داده شده است.  $h_{L}$  مقاومت نشتی در تیوپ پلاسما که نشان دهنده نشتی در طول سطح عایق می باشد. بنابر قانون کیرشهف معادله مربوط به مدار را به صورت زیر نوشت:

$$\frac{1}{C_{\circ}} \int_{\circ}^{t} I dt - V_{\circ} + r_{\circ}I + \frac{d}{dt}(L_{\circ}I) + r_{p}I_{p} + \frac{d}{dt}(L_{p}I_{p}) = \circ$$
(9.7)

با استفاده از رابطهی (۲.۲) و در نظر گرفتن تقریب به صورت  $r_p \simeq r_p$  (صرف نظر از مقاومت پلاسما) خواهیم داشت:

$$\frac{d}{dt}[(L_{\circ} + L_{p}f_{c})I] + R_{\circ}I = V_{\circ} - \int \frac{Idt}{C_{\circ}}$$

$$(L_{\circ} + L_{p}f_{c})\frac{dI}{dt} + If_{c}\frac{dL}{dt} + r_{\circ}I = V_{\circ} - \int \frac{Idt}{C_{\circ}}$$

$$\frac{dI}{dt} = \left[V_{\circ} - \frac{\int Idt}{C_{\circ}} - r_{\circ}I - If_{c}\frac{\mu}{\mathbf{Y}\pi}(\ln c)\frac{dz}{dt}\right] / \left[L_{\circ} + \frac{f_{c}\mu}{\mathbf{Y}\pi}(\ln c)z\right] \qquad (1 \circ . \mathbf{Y})$$

معادلات (۸.۲) و (۱۰.۲) ، معادلات کلی مدل هستند که شامل فیزیک ساختار مدل می شود و معادله حرکت تحت تأثیر جریان الکتریکی قرار دارد. با نرمالایز کردن روابط بالا می توان مدت

زمان فاز محوری و سرعت را بدست آورد

$$t_a = \left[\frac{\mathbf{f}\pi^{\mathbf{f}}(c^{\mathbf{f}}-\mathbf{i})}{\mu\ln c}\right]^{\frac{1}{\mathbf{f}}} \frac{\sqrt{f_m}}{f_c} \frac{z_{\circ}}{(I_{\circ}/a)/\sqrt{\rho}}$$
(11.7)

$$v_{a} = \left[\frac{\mu \ln c}{\mathbf{f} \pi^{\mathsf{Y}}(c^{\mathsf{Y}} - \mathsf{I})}\right]^{\frac{1}{\mathsf{Y}}} \frac{f_{c}}{\sqrt{f_{m}}} \frac{(I_{\circ}/a)}{\sqrt{\rho}} \tag{17.7}$$

در این روابط  $\frac{(I_c/a)}{\sqrt{
ho}}$  به عنوان پارامتر رانش شناخته شده است [۵۲].

#### ۳.۷.۲ فاز شعاعی

مرحله شعاعی بصورت چهار مرحله تقسیم میشود: مرحله ضربه شعاعی فرودی، ضربه شعاعی منعکسه، تراکم آرام و گسترش ستون پلاسما. شماتیک فاز شعاعی در شکل ۱۶.۲ نمایش داده شده است.



شکل ۱۶.۲: شماتیک فاز شعاعی

**مرحله ضربه فرودی شعاعی <sup>۱۹</sup>** شکل ۱۷.۲ پلاسما در فاز شعاعی، مرحله ضربه فرودی را نشان داده است. در این مرحله پلاسما بصورت لوحهای با شعاع بیرونی r<sub>p</sub> (موقعیت پیستون)و شعاع درونی r<sub>s</sub> (جبهه ضربه)

<sup>19</sup>Radial Inward Shock Phase

و طول  $z_f$  در نظر گرفته می شود. لوحه به صورت شعاعی با استفاده از پیستون مغناطیسی متراکم می شود وکسر  $f_{mr}$  از گاز در مسیر توسط لوحه جمع آوری می شود (یعنی به درون لوحه منتقل می شود). فاز ضربه درونی در  $r_p = r_s = a$  آغاز شده و وقتی جبهه موج ضربه به محور آند  $r_s = \circ$  رسید تمام می شود.

این مرحله بهوسیله چهار معادله همبسته با استفاده از یک مدل ریزش طولانی ۲۰ توصیف شده



شکل ۱۷.۲: پلاسما در فاز شعاعی

است. معادله اول سرعت شعاعی درونی را از فشار مغناطیسی محاسبه می کند. معادله دوم سرعت گشیدگی ستون پلاسما را محاسبه می کند. معادله سوم با استفاده از تقریب آدیاباتیک سرعت لایه جریان (پیستون مغناطیسی) را محاسبه می کند، اجازه می دهد لایه جریان از جبهه شوک جدا شود. چهارمین معادله، معادله مدار است. اثرات ترمودینامیکی ناشی از یونیزاسیون و تحریک در این معادلات گنجانده شده است، این اثرات مخصوصاً برای گازهای غیر هیدروژنی و دوتریم بسیار مهم است. این معادلات در زیر بیان شدهاند. پارامترهای جرمی و جریان ( $f_{mr}$  و جریان (

$$\frac{dr_s}{dt} = \frac{-1}{\mathbf{F}\pi} \sqrt{\frac{\mu(\gamma+1)}{f_{mr}n_{\circ}m_i}} \left[\frac{I_p}{r_p}\right]$$
(17.7)

چون تراکم در جهت بالایی باز است انتظار داریم که ضربه در جهت z روبه سمت بالا انتشار یابد. علاوه بر این فرض شده است که تراکم فشار در جهت شعاعی همانند تراکم در جهت محوری میباشد. بنابراین طول لوحه zf در هنگام تراکم افزایش مییابد. پس داریم:

$$\frac{dz_f}{dt} = -\frac{\Upsilon}{\gamma + 1} \frac{dr_s}{dt} \tag{14.7}$$

براساس معادله Q میتوان معادله ترمودینامیکی گاز پلاسمایی را در  $\gamma p dV + V dp = (\gamma - 1) dQ$  براساس معادله و  $V = \pi (r_p^{\gamma} - r_s^{\gamma}) z_f$  است با کمک این روابط و

 ${}^{\gamma \circ} Slug \ Model$ 

رابطه (۵.۲) میتوان سرعت لایه جریان (پیستون مغناطیسی) را نوشت:

$$\frac{dr_p}{dt} = \frac{\frac{\Upsilon}{\gamma + \Upsilon} \frac{r_s}{r_p} \frac{dr_s}{dt} - \frac{r_p}{\gamma I} \left(\Upsilon - \frac{r_s^{\Upsilon}}{r_p^{\Upsilon}}\right) \frac{dI}{dt} - \frac{\Upsilon}{(\gamma + \Upsilon)} \frac{r_p}{z_f} \left(\Upsilon - \frac{r_s^{\Upsilon}}{r_p^{\Upsilon}}\right) \frac{dz_f}{dt}}{\frac{\gamma - \Upsilon}{\gamma} + \frac{\Upsilon}{\gamma} \frac{r_s^{\Upsilon}}{r_p^{\Upsilon}}}$$
(\\\Delta.\T)

نيروى اعمالى بر روى لوحه پلاسما (J imes B) كه بصورت شعاعى به سمت درون مىباشد، كه بوسيله رابطه (۵.۲) مىتوان نوشت:

$$F_{r\Upsilon} = \int_{\circ}^{z_f} I_p \times \frac{\mu I_p}{\Upsilon \pi r_p} dz = \frac{\mu I^{\Upsilon} z_f}{\Upsilon \pi r_p}$$
(19.7)

عبارت فوق نیروی حاصله از میدان مغناطیسی است که باعث می شود لوحه پلاسما متراکم شود. نیروی اعمالی بر لایه جریان که باعث ارتباط قسمت بالای لوحه به کاتد می شود و جهت آن به سمت بالا می باشد (در جهت محوری) بصورت زیر است:

$$F_{z\Upsilon} = \int_{r_p}^{b} I_p \times \frac{\mu I_p}{\Upsilon \pi r} dr = \frac{\mu I_p^{\Upsilon}}{\Upsilon \pi} \ln\left(\frac{b}{r_p}\right)$$
(1Y.Y)

اندوکتانس پلاسمای کل که از دو قسمت تشکیل یافته است یکی الکترودها که بصورت استوانه رسانا با ارتفاع  $z_{f}$  و شعاع خارجی  $r_{p}$  است که بصورت ای ارتفاع به ارتفاع رو شعاع خارجی  $r_{p}$  است که بصورت زیر نوشته می شود:

$$L_{p\Upsilon} = \frac{\mu}{\Upsilon \pi} \left( z_{\circ} \ln \left( \frac{b}{a} \right) + z_{f} \ln \left( \frac{b}{r_{p}} \right) \right)$$
(1A.Y)

با درنظر گرفتن این عبارت و معادله (۱۰.۲) معادله مدار بصورت زیر در میآید.  

$$\frac{dI}{dt} = \frac{V_{\circ} - \frac{1}{C_{\circ}} \int_{\circ}^{t} I dt - r_{\circ}I + \frac{\mu}{Y_{\pi}} f_{c}I \left(\frac{z_{f}dr_{p}}{r_{p}dt} - \ln\left(\frac{b}{r_{p}}\right)\frac{dz_{f}}{dt}\right)}{L_{\circ} + \frac{\mu}{Y_{\pi}} f_{c} \left(z_{\circ} \ln\left(\frac{b}{a}\right) + z_{f} \ln\left(\frac{b}{r_{p}}\right)\right)}$$
(19.7)

با بیبعد کردن معادلات، (۱۳.۲) ، (۱۴.۲) ، (۱۹.۲) ، (۱۹.۲) ، میتوان سرعت و مدت زمان این فاز را محاسبه کرد [۵۱] :

$$t_r = \frac{\mathbf{\mathfrak{F}}_{\pi}}{\left[\mu(\gamma+\mathbf{1})\right]^{\frac{1}{\gamma}}} \frac{\sqrt{f_{mr}}}{f_c} \frac{a}{(I_\circ/a)/\sqrt{\rho}} \tag{(\mathbf{Y} \circ . \mathbf{Y})}$$

$$v_r = a/t_r = \frac{\left[\mu(\gamma+1)\right]^{\frac{1}{Y}}}{\mathfrak{F}_{\pi}} \frac{f_c}{\sqrt{f_{mr}}} \frac{(I/a)}{\sqrt{\rho}}$$
(71.7)

مرحله ضربه شعاعی منعکسه (RS) <sup>۲۱</sup> وقتی جبهه موج ضربه به محور مرکزی رسید انرژی جنبشی ذرات در لوحه *E<sub>k</sub> به انرژی دورنی* پلاسما تبدیل میشود. این ضربه باعث افزایش دما و چگالی در مرکز خواهد بود. در شکل ۱۸.۲ بهصورت شماتیکوار نمایش داده شده است.

<sup>&</sup>lt;sup>71</sup>Radial Reflected Shock Phase



شکل ۱۸.۲: پلاسما در فاز شعاعی

پلاسما در این مرحله به دو قسمت تقسیم شده است قسمت مرکزی نسبتاً ساکن با ستون پلاسمایی داغ و پرچگال و قسمت بیرونی که خیلی سریع متراکم می شود. در این قسمت دما و چگالی پلاسما کمتر می باشد. مرزی که ستون مرکزی پرچگال و داغ را از پلاسمای بیرونی جدا می کند جبهه ضربه منعکسه نام دارد. وقتی که کل ذرات به ستون پلاسمای مرکزی پیوستند جبهه ضربه منعکسه و پیستون مغناطیسی همدیگر را در موقعیت شعاعی  $r_r = r_p$  ملاقات می کنند.

مرحله تراکم آرام <sup>۲۲</sup> شکل زیر دینامیک پلاسما را بهصورت شماتیک نشان میدهد. هنگامی که شوک منعکس کننده خروجی به سمت پیستون درونی حرکت می کند، فشردهسازی وارد فاز تراکم می شود که در آن برای گازهایی نظیر نئون، انتشار تابشها فشردهسازی را افزایش دهد [۵۵] .

<sup>۲۲</sup>Slow Compression

۳۸ دستگاه پلاسما کانونی و دینامیک آن



شکل ۱۹.۲: پلاسما در فاز شعاعی

در این مرحله ستون پلاسما شروع به متراکم شدن میکند تا زمانی که در اثر ناپایداریها از هم می پاشد.

**گسترش ستون پلاسما**<sup>۳۳</sup> برای شبیه سازی لایه جریان فراتر از این نقطه، اجازه می دهیم که ستون به طور ناگهانی به شعاع آند برسد و از انحطاط ستون گسترش یافته برای ادغام بیشتر استفاده شود. این فاز مهم نیست زیرا پس از تمرکز خرابی اتفاق می افتد [۵۵].

# ۸.۲ نسبت گرمایی ویژهی پلاسماهای داغ

نسبت گرمایی ویژهی پلاسماهای داغ را که با  $\gamma$  نشان میدهند به عنوان یکی از مهمترین پارامترهای تبدیل انرژی به حساب میآید. لی یک روش بسیار آسان برای محاسبهی نسبت گرمایی ویژه ارائه داد که در آن  $\gamma$  تابعی از دما میباشد [ $\Delta \beta$ ] مطابق با این تئوری که بر پایهی تعادل انرژی استوار است نسبت شعاعی  $\frac{q}{r_0}$  جریان ثابت پلاسما پینچ شده به مقدار  $\gamma$  پلاسمای پینچ شده بستگی دارد. مقدار  $\gamma$  را میتوان بر حسب آنتالپی بر واحد جرم (h) تعریف کرد:

$$h = \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{k_B T D}{m_i} \tag{(YY.Y)}$$

و ضریب جابهجایی را نیز میتوان بصورت زیر تعریف نمود:

$$D = \mathbf{1} + Z_{eff} = \mathbf{1} + \sum_{z=1}^{z_n} (z.\alpha_z)$$
 (۲۳.۲)

که در اینجا  $k_B$  ثابت بولتزمن و  $m_i$  جرم اتم یا یون و T دما و  $\alpha_z$  شکست پلاسما از حالت پایه تا Z مین حالت یونیزه شده است. آنتالپی پلاسما را بر حسب انرژیهای یونش و برانگیختگی

۲۳ Expanded Column Axial Phase

آن میتوان بصورت زیر نوشت:

$$h = \frac{\Delta}{\Upsilon} \left(\frac{r_{\circ}}{M}\right) TD + m_i^{-1} \sum_{z=1}^{z_n} (\alpha_z . I_z) + m_i^{-1} \sum_{z=1}^{z_n} (\alpha_z . E_z)$$
(Yf.Y)

در اینجا  $I_z$  انرژی کل لازم برای یونش از یک حالت یونیزه تاzمین حالت یونیزه میباشد و E مقدار میانگین انرژی برانگیختگی بر انرژی zمین حالت یونیزه است. حال با استفاده از  $E_z$  معادلات (۲۲.۲) و (۲۴.۲) میتوان  $\gamma$  را محاسبه نمود:

$$\frac{\gamma}{\gamma+1} = \frac{\Delta}{\Upsilon} + \sum_{z=1}^{z_n} \left( \alpha_z . I_z \right) + \sum_{z=1}^{z_n} \left( \alpha_z . E_z \right) . \frac{1}{k_B T_e D}$$
(YΔ.Y)

که با استفاده از مدلهای تعادلی پلاسمایی و با داشتن دمای پلاسما میتوان z را محاسبه نمود.

## ۹.۲ مراحل انتقال انرژی

در دستگاه پلاسما کانونی کل انرژی با استفاده از انرژی ذخیره شده در بانک خازنی تأمین میشود:

$$E_{total} = \frac{1}{\mathbf{Y}} C_{\circ} V_{\circ}$$

توان انتقال یافته به درون سیستم پلاسمایی در طول آزمایش بصورت زیر است.

$$P_{total} = I_p V = I_p L_p \frac{dI}{dt} + I_p^{\mathsf{Y}} \left( r_p + \frac{dL_p}{dt} \right)$$

از آنجایی که رابطه بین انرژی ذخیره شده و اندوکتانس با  $L_p I_p^{\intercal}$  داده می شود، توان انتقال یافته به درون پلاسما بصورت زیر بیان می شود:

$$P_{plasma} = P_{total} - \frac{d}{dt} \left( \frac{\mathbf{i}}{\mathbf{y}} L_p I_p^{\mathbf{y}} \right) = I_p^{\mathbf{y}} \left( r_p + \frac{\mathbf{i}}{\mathbf{y}} \frac{dL_p}{dt} \right)$$
(**Y9**.**Y**)

جمله اول این عبارت مربوط به گرمایش پلاسما به روش ژولی است. در حالیکه جمله دوم توان مربوط به دینامیک سیستم است (انرژی جنبشی و همچنین انرژی حرارتی و انرژی یونیزاسیون و غیره) جمله  $\frac{dL_p}{dt}$  بصورت مقاومت دینامیکی پلاسما در نظر گرفته می شود [۵۷]. بنابراین کل انرژی انتقال یافته به درون پلاسما به صورت زیر است.

$$EINP = \int_{\circ}^{t} I_{p}^{\mathsf{Y}} \left( r_{p} + \frac{\mathbf{Y}}{\mathbf{Y}} \frac{dL_{p}}{dt} \right) dt$$
 (YY.Y)

با قرار دادن معادلات (۲.۲) و (۱۸.۲) به درون این معادله انرژی انتقال یافته برای فازهای محوری و شعاعی به ترتیب بهصورت زیر خواهیم داشت:

$$EINP_{\gamma} = \int_{\circ}^{t} I_{p}^{\gamma} \left( r_{p} + \frac{\mu}{\Re \pi} \ln(\frac{b}{a}) \frac{dz}{dt} \right) dt$$
 (YA.Y)

۴۰ دستگاه پلاسما کانونی و دینامیک آن

$$EINP_{\Upsilon} = \int_{t_{\Upsilon}}^{t} I_{p}^{\Upsilon} \left( r_{p} + \frac{\mu}{\Im \pi} \ln \left( \frac{b}{r_{p}} \right) \frac{dz_{f}}{dt} - \frac{\mu}{\Im \pi} \frac{z_{f}}{r_{p}} \frac{dr_{p}}{dt} \right) dt$$
(Y9.Y)

در رابطه (۲۹.۲)  $t_{70}$  زمان آغاز فاز شعاعی است. به بیان دیگر میتوان کار انجام شده توسط پیستون مغناطیسی را بدست آورد. در فاز محوری نیروی اعمالی بر روی لایه پلاسما بصورت معادله (۶.۲) بیان میشود که در فاز محوری در جهت Z میباشد. بنابراین کار انجام شده توسط پیستون مغناطیسی  $F_{z1}$  بصورت زیر است.

$$W_{1} = \int_{\circ}^{z} F_{z1} dz = \int_{\circ}^{z} \frac{\mu I_{p}^{\Upsilon}}{\Upsilon \pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right) dz = \int_{\circ}^{t} I_{p}^{\Upsilon} \frac{dL_{p1}}{dt} dt \qquad (\Upsilon \circ .\Upsilon)$$

بطور مشابه می توان کار انجام شده توسط  $F_{zY}$  و  $F_{rY}$  را در فاز شعاعی به دست آورد.

$$W_{\Upsilon} = \int_{\circ}^{z_f} F_{z\Upsilon} dz_f = \int_{\circ}^{r_p} F_{r\Upsilon} dr_p$$
  
=  $\int_{t_{\Upsilon\circ}}^{t} \frac{\mu I_p^{\Upsilon}}{\Upsilon \pi} \left[ \ln \left( \frac{b}{a} \right) \frac{dz_f}{dt} + \frac{z_f}{r_p} \frac{dr_p}{dt} \right] dt = \int_{t_{\Upsilon\circ}}^{t} I_p^{\Upsilon} \frac{dL_{p\Upsilon}}{dt} dt$  (T1.7)

با مقایسه معادله (۲۷.۲) با (۳۰.۲) و (۳۱.۲) در مییابیم که جمله دوم EINP فقط نصف کار انجام شده توسط پیستون مغناطیسی میباشد در صورتیکه نصف دیگر بهصورت اندوکتانس سیلندر ذخیره شده است بنابراین با توجه به مطالب ذکر شده در بالا، برای انتقال انرژی به درون پلاسما دو روش وجود دارد یکی گرمایش ژولی و دیگری پپیستون مغناطیسی [۶۷] . بهطور کلی انرژی از سه مرحله (روش) زیر وارد تیوپ پلاسما کانونی میشود.که بهصورت شماتیکوار خلاصهای از مراحل انتقال انرژی در شکل ۲۰.۲ نشان داده شده است. امیدانس القایی

امپدانس القایی نشان دهندهی تغییر در انرژی ذخیره شده در  $L_p$  توسط تغییر در جریان تخلیه. کارپیستون

کار پیستون مسیر اصلی در انتقال انرژی به درون تیوپ پلاسما کانونی میباشد. نصف کار پیستون برای افزایش  $L_p$  (به علت به جلو راندن لایه پلاسما) صرف میشود در نتیجه موجب افزایش در انرژی ذخیره شده  $L_p$  خواهد شد. نصف بقیه به انرژی پلاسمایی تبدیل میشود. **گرمایش ژولی** 

گرم کردن به روش ژولی بهواسطه مقاومت پلاسما  $r_p$  و جریانی که از آن شارش مییابد ایجاد میشود. انرژی ذخیره شده در اندوکتانس  $(E_I)$  با استفاده از اندوکتانس و جریان بدست میآید. باید توجه کنیم که این انرژی از بین نمی ود بلکه هنگامی که جریان افت می کند به عنوان چشمه انرژی عمل می کند.



$E_{k} = \frac{1}{2} m_{i} N_{kon} \left( \frac{dr_{p}}{dt} \right)$	$U = \frac{3}{2} N_{ion} (1 + Z_{eff}) kT + PV$
Radiation Energy	Ionization & Excitation Energy
$Q_{rad} = \int_{t} (P_b + P_l + P_r) dt$	$E_{I} = N_{lon} \times \left[\sum_{z=1}^{Z_{z}} (\alpha_{z}I_{z}) + \sum_{z=1}^{Z_{v}} (\alpha_{z}E_{z})\right]$

شکل ۲۰.۲: خلاصهای از انتقال انرژی در پلاسما کانونی [۶۷]

# فصل 🌱

# چیدمان آزمایش و ابزار اندازه گیری

#### ۱.۳ مقدمه

در هر پژوهش با توجه به هدف، پارامترهای مورد بررسی و ابزار مورد نیاز برای آزمایش تعیین می شود. با توجه به اینکه هدف از انجام آزمایش ها در این پروژه اندازه گیری زمان پینچ شدگی و عوامل مؤثر بر آن در دستگاه پلاسما کانونی شاهرود است، در این فصل ابتدا مشخصات دستگاه پلاسما کانونی شاهرود را بیان می کنیم سپس به توضیح ساختار کلی و setup آزمایش می پردازیم و در ادامه فصل به شرح سیستم های تشخیصی و ابزار اندازه گیری و روش انجام آزمایش خواهیم پرداخت.

# ۲.۳ ساختار کلی و Setup آزمایش

ساختار کلی دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود شامل چهار بخش اصلی می باشد که در شکل ۲.۳ بصورت شماتیکی نمایش داده شده است. البته شایان به ذکر است که سیستمهای تشخیصی مورد استفاده در دستگاه توسط هدف آزمایش تعیین خواهند شد و قابل تعمیم هستند.

۴۴ چیدمان آزمایش و ابزار اندازه گیری



شکل ۱.۳: شماتیک ساختار کلی آزمایش

#### ۳.۳ مشخصات دستگاه SHUPF

دستگاه پلاسما کانونی شاهرود نوع مدر است و دارای خازنی با ظرفیت  $C_{\circ} = 18 \mu f$  و ماکزیمم ولتاژ  $V_{\circ} = 17 KV$  است. انرژی ماکزیمم دستگاه برابر است با  $V_{\circ} = 17 KV$  است. انرژی ماکزیمم دستگاه برابر است با  $V_{\circ} = 17 KV$ . در جدول ۱.۳ مشخصات کامل دستگاه ذکر شده است:

# ۴.۳ سیستم تخلیه و دمش گاز

طراحی سیستم های تخلیه و دمش گازیک سیستم خلا، مجموعهای متشکل از پمپ، فشارسنج، شیرها، اتصالات دائمی و غیر دائمی (فلنجها) و لولههای متصل کننده آنها به یکدیگر است. سیستم الکترودی پلاسمای کانونی در داخل یک محفظه خلاء قرار می گیرد. فشار اولیه این محفظه(فشار خلاء اولیه) معمولاً در حدود ۲-۱۰ تا ۳-۱۰ میلی بار است که این فشار با استفاده از یک پمپ روتاری تک مرحلهای یا دو مرحلهای یا پمپ توربو قابل دسترسی است.

پارامترها	مقادير	
امپدانس سیستم	$Z_{\circ} = \sqrt{\frac{L_{\circ}}{C_{\circ}}} = \circ/111$	
ماكزيمم ولتاژ	$V_{\circ} = \mathfrak{l} \mathfrak{r} K V$	
شعاع آند	$a = 1 \circ mm$	
شعاع کاتد	$b = \Delta mm$	
طول آند	$z_\circ = \mathbf{\mathcal{F}} \circ mm$	

جدول ۱.۳: ویژگیهای دستگاه پلاسما کانونی

#### 1.۴.۳ محفظه خلاء

محفظههای خلاء در دو نوع استیل ضد زنگ و شیشهای موجود هستند. در این پروژه از استیل ضد زنگ استفاده شده است. محفظه خلاء از سه قسمت اصلی زیر تشکیل شده اند: بدنه اصلی: استوانهای به ارتفاع ۲۵۰ میلیمتر، قطر ۱۶۰ میلیمتر و از جنس استیل زدزنگ <sup>۱</sup> است ضخامت استیل استفاده شده در بدنه ۴ میلیمتر است. ضخامت باید به گونهای باشد که بتواند نیرویی ناشی از اختلاف فشار درون محفظه و محیط بیرون را تحمل کند. این محفظه دارای چهار بازو می باشد که دوبه دو مقابل یکدیگر قرار دارند که برای اتصال سیستم سایه نگاری، تصویر برداری و ... استفاده می شود.



شكل ٢.٣: محفظه خلاء دستگاه پلاسما كانونى شاهرود

صفحه پایه: الکترودها بر روی این قسمت قرار گرفتهاند. در قسمت مرکزی آند از جنس مس به طول ۶ سانتیمتر با سطح مقطع دایره به قطر ۱۹ میلیمتر قرار دارد. میتوان آنرا با آندی از جنسهای مختلف جایگزین کرد. در اطراف آند، عایقی از جنس پیرکس به طول ۴ سانتیمتر است که قابلیت تعویض دارد. کاتد هم از شش میله برنجی به ارتفاع ۶ سانتیمتر و قطر ۱ سانتیمتر تشکیل شده است که بر روی صفحه دایروی برنجی ثابت شدهاند و در اطراف آند و روی صفحه پایه قرار می گیرد (شکل ۳.۳).



شکل ۳.۳: نمایی از صفحه پایه دستگاه پلاسما کانونی شاهرود

**دیواره فلانج دار:** این دیواره ها امکان نصب آسان سیستم های اندازه گیری اشعه ایکس ، سایه نگاری لیزری، فشارسنج، پمپ خلاء و ... بر روی دستگاه را به کاربر میدهد. طراحی ابعاد محفظه خلاء با توجه به نیاز محقق انجام می شود، به طوری که امکان نصب سایر قطعات و اتصالات استاندارد بر روی این محفظه ها وجود داشته باشد مثلاً با نصب پنجره دید روی بدنه صفحه پایه تعبیه می شوند به طوری که بتوان قطعات مورد نیاز از جمله فشارسنج، پمپ خلاء و سایر قطعات را نصب نمود. همانطور که در شکل ۲.۳ دیده می شود قسمت پایین محفظه خلاء به طور متقارن از طریق ۲۱ کابل هم محور به قطب منفی(زمین) خازن وصل شده است به عبارت دیگر بدنه محفظه خلاء به زمین متصل است با توجه به اینکه کاتد به محفظه متصل است می توان گفت کاتد به زمین وصل است.

#### ۲.۴.۳ پمپ خلاء

در دستگاههای پلاسمای کانونی برای تشکیل پینچ نیاز به ایجاد خلاء اولیه است. فشار اولیه این محفظه(فشار خلا اولیه) معمولاً در حدود ۲-۱۰ تا ۳-۱۰ میلیبار است که این فشار با استفاده از یک پمپ روتاری تک مرحله ای یا دو مرحله ای یا پمپ روتاری و پمپ توربو قابل

دسترسی است.



شکل ۴.۳: پمپ روتاری دومرحلهای مدل VE280N

پمپ اسنفاده شده از نوع روتاری دو مرحلهای مدل VE280N است ( شکل ۴.۳ ). پمپ توسط برق شهر تغذیه می شود و آهنگ تخلیهی آن حدود  $\frac{L}{min}$  ۲۲۶ است. با این نرخ تخلیه می توان به خلاءای در حدود  $10^{-7}Torr$  رسید.

## ۳.۴.۳ فشار سنج

همانطور که قبلاً بیان شد سیستم پلاسما کانونی در فشارهای پایین (از مرتبه چند تور) کار می کند باید ابتدا محفظه تا فشار های در حد میلی تور پایین بیاوریم و سپس گاز را تزریق کنیم برای اندازه گیری و مشاهده فشار داخل محفظه از گیج پیرانی و نمایشگر دیجیتالی استفاده می کنیم که در شکل ۵.۳ نمایش داده شده است.



شکل ۵.۳: گیج پیرانی فشارسنج و نمایشگر دیجیتال

#### ۴.۴.۳ کپسول گاز و شیر سوزنی

گازهای مورد استفاده در این پژوهش در شکل ۶.۳ نمایش داده شده است که داری خصوصیات زیر هستند:

- گاز آرگون، شرکت سپهر گاز کاویان سیلندر ۵۰ لیتری با خلوص ۹۹۹۸/۹۹٪
- گاز نیتروژن، شرکت سپهر گاز کاویان سیلندر ۴۴ لیتری با خلوص ۹۹۹/۹۹۹٪



(۲)

(ヽ)

شکل ۶.۳: (۱) گاز آرگون (۲) گاز نیتروژن

برای کنترل میزان گاز ورودی به داخل محفظه خلاء از شیر سوزنی استفاده میشود. شیر سوزنیاز یک طرف توسط لوله بسیار نازک مسی به ریگلاتور سر کپسول وصل شده است و از طرف دیگر توسط کلمب به محفظه خلاء متصل شدهاست رایجترین مصرف این نوع شیرها در حوزه ابزار دقیق میباشد و به راحتی میتوان میزا عبور گاز را کنترل کرد.

# ۵.۳ سیستم تغذیه الکتریکی

انرژی الکتریکی دستگاه پلاسمای کانونی توسط این سیستم تامین میشود بهطوری که بانک خازنی شارژ شده واز طریق اسپارک گپ این انرژی به محفظهی خلا انتقال مییابد.این سیستم شامل قسمتهایی است که درادامه به معرفی آنها خواهیم پرداخت.

#### ۱.۵.۳ ترانسفرماتور

برای شارژ خازن دستگاه از سیمپیچ ولتاژ بالا و یکسو کنندههایی استفاده شده که برق ۲۲۰ ولت شهر را به برق مستقیم تا نهایت ۱۲ کیلو ولت (ولتاژ خروجی قابل تغییراست) تبدیل میکنند در شکل ۲.۳ نمایی از ترانس استفاده شده در دستگاه نمایش داده شده است.



شكل ٧.٣: ترانسفرماتور دستگاه پلاسما كانوني شاهرود

ترانس استفاده شده در این سیستم همواره در داخل روغن مخصوص ولتاژ بالا نگهداری می شود.

#### ۲.۵.۳ بانک خازنی

خازن دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود (شکل ۸.۳)یک خازن ولتاژ بالا با ظرفیت ۱۶ $\mu f$  و ماکزیمم ولتاژ اعمالی ۱۲KV میباشد.با توجه به رابطهی  $CV^{7} = \frac{1}{2}CV^{7}$  ظرفیت خازن و V اختلاف پتانسیل دو سر خازن است، مقدار انرژی مربوط به این دستگاه ۱/۱۵KJ بدست میآید.



شکل ۸.۳: نمایی از بانک خازنی دستگاه پلاسما کانونی شاهرود

#### ۳.۵.۳ اسپارک گپ

بهمنظور انتقال سریع و متقارن انرژی ذخیره شده در بانک خازنی، در یک لحظه به دو سر آند و کاتد ازاسپارک گپ (سوئیچ سریع) استفاده می شود. سیستم اسپارک گپ از دو صفحه ی موازی برای انتقال جریان بالا با اندو کتانس پایین تشکیل شده است؛ که توانایی تحمل ولتاژهای بالا و قدرت انتقال جریان تا چند صد آمپر را دارد.جریان اعمالی از طریق یونیزه شدن هوای بین دو صفحه برقرار می شود.

اسپارک گپ بکار رفته شده در دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود از نوع تریگاترون میباشد



شکل ۹.۳: اسپارک گپ

(شکل ۹.۳). این نوع اسپارک گپ شامل دو الکترود A و B است که در فاصله ی b از یکدیگر قرار گرفتهاند. این الکترودها یا بوسیله ی پوشش C که از یک ماده ی عایق مانند تفلون ساخته شده است در یک محفظه ی بسته نگه داشته می شوند و یا بدون محافظ قرار می گیرند. الکترود سوم D، تریگر است. محل قرار گرفتن آن به طراحی اسپارک گپ بستگی دارد و نقش آن ایجاد شکست در هوای بین الکترودها و شروع تخلیه است.ولتاژ لازم به وسیله ی سیستم تریگر به الکترود D اعمال می شود. به این ترتیب فاصله ی b باید به گونه ای انتخاب شود که قبل از رسیدن شارژ خازن به مقدار مورد نظر، شکست رخ ندهد و عمل تخلیه الکتریکی به طور کاملاً کنترل شده آغاز شود. در ساختار اسپارک گپ تریگاترون، الکترود تریگر در داخل یکی از الکترودها قرار می گیرد و توسط عایق E از آن جدا می شود.نمایی شماتیک از ساختار داخلی اسپارک گپ در شکل ۹.۳

#### ۴.۵.۳ تریگر

برای انتقال جریان با ولتاژ بالا در بین دو قطب اسپارک گپ از سیستم تریگر استفاده می شود. با استفاده از تریگر یک پالس منفی(در حدود ۴۰*KV*) به الکترود میانی (D) اسپارک گپ اعمال می شود. تریگر به دو طریق دستی و اتوماتیک کار می کند. باتوجه به اینکه خازن باید بعد از مدتی شارژ، دشارژ شود و از طرفی باید بین هر دو تخلیه الکتریکی زمانی را برای تخلیه دستگاه در نظر بگیریم، لذا بهتر است که برای تریگ کردن از مد دستی استفاده شود.

#### ۵.۵.۳ اتصال به زمين

این سیستم به واقع بعد از عمل تریگ و تخلیه الکتریکی، دو سر خازن را بهم وصل مینماید و باقیمانده انرژی ذخیره شده در خازن را تخلیه می کند و بعد از آن خازن بطور کامل تخلیه می شود. نمایی از این سیستم را در شکل ۱۰.۳ نشان دادهایم. این سیستم از یک آهنربا تشکیل شده است که با اتصال کلید مربوطه میدان مغناطیسی در سیستم ایجاد می شود و اهرم مربوط به اتصال به زمین از مکان اولیه ش جدا می شود و یا به عبارت دیگر، دو سر خازن را از هم جدا می کند.در هنگام شارژ کردن خازن باید این سیستم روشن باشد تا با اعمال ولتاژ خازن شارژ شود. پس از عمل تریگ و دشارژ خازن باید بلافاصله این سیستم را خاموش نمود تا باقیمانده انرژی ذخیره شده در خازن تخلیه شود.در غیر این صورت خازن دچار اسیب می شود.



شکل ۱۰.۳: اتصال به زمین

#### ۶.۳ سیستم تشخیصی

در آزمایش ها برای اندازه گیری پارامتر های الکتریکی مثل ولتاژ، جریان، مشتق جریان از سیستم هایی استفاده کردهایم که در زیر به بیان آنها خواهیم پرداخت.

#### ۱.۶.۳ اسیلوسکوپ

دستگاهی الکترونیکی است که امکان مشاهده ولتاژ را فراهم میکند. غالباً مقدار ولتاژ به صورت نموداری دوبعدی نمایش داده می شود که محور افقی، زمان و محور عمودی آن ولتاژ است. از نوسان نما عموما اسیلوسکوپ برای نمایش دقیق موج استفاده می شود. علاوه بر دامنه، معمولاً قادر به اندازه گیری و نمایش دیگر پارامترها مانند عرض پالس، دوره تناوب و زمان بین دو حادثه (مانند وقوع دو پیک) هستند. [۶۶] اسیلوسکوپ مورد استفاده از نوع دیجیتال چهار کاناله که قابلیت ذخیره سازی نیز دارد استفاده شده است شکل ۱۱.۳



شكل ۱۱.۳: اسيلوسكوپ مدل GPS-1204C

#### ۲.۶.۳ پیچه روگوفسکی

پیچه روگوفسکی یکی از وسایل اندازه گیری جریان است که بر مبنای قانون آمپر کار میکند. سالهاست که از این وسیله برای آشکار سازی و اندازه گیری جریان استفاده میشود. ساختار پیچه همانطور که در شکل ۱۲.۳ نمایش داده شده است، یک پینچک با هستهی هوایی که به صورت چنبر پینچیده شدهاست و یک هادی حامل جریان از میان آن عبور میکند. جریان عبوری از هادی سبب القای ولتاژدر دترمینالهای خروجی پیچه می گردد، این ولتاژ متناسب با مشتق جریان عبوری از هادی است. اصلی ترین مزیت پیچه رو گوفسکی در مقایسه با ترانسفرماتور جریان هسته غیر مغناطیسی آن می باشد به این صورت که با استفاده از پیچه مشکل اشباع هسته از بین رفته است.



شکل ۱۲.۳: پیچه روگوفسکی

طرز کار پیچه روگوفسکی بر اساس قانون آمپر به صورت زیر تحلیل میشود:  
(۱.۳) 
$$\phi = NBA$$

$$V_{\circ} = -\frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}t} \tag{7.7}$$

$$V_{\circ} = -\frac{\mu_{\circ} NA}{\Upsilon \pi r} \frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}t}$$
(٣.٣)

رابطه فوق نشان میدهد که ولتاژ القا شده متناسب با نرخ تغییرات جریان میباشد، بنابراین مقدار کل جریان تخلیه را میتوان از اندازه گیری ولتاژ خروجی و انتگرال گیری از آن بدست آورد. سیگنال مشاهده شده بر روی اسیلسکوپ تا حدودی کمتر از سیگنال واقعی است که ممکن است این تضعیف در مسیر کابل ایجاد شده باشد.

پیچه رو گوفسکی استفاده شده در دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود دارای قطر اصلی ۱۶Cm و قطر فرعی ۱۱Cm میباشد. قطر سیم به کار رفته شده در این پیچه ۱/۵mm و تعداد دورهای آن ۲۸۰ میباشد.

#### كاليبراسيون روگوفسكى:

برای بدست آوردن مقدار مطلق جریان تخلیه لازم است پیچه روگوفسکی را کالیبره کنیم و برای این کار بهتر است از تست اتصال کوتاه در دستگاه پلاسما کانونی استفاده شود. جریان تخلیه از رابطه زیر محاسبه میشود:

$$I(t) = I_{\circ} \frac{t}{\sqrt{L_{\circ}C_{\circ}}} exp(-\frac{R_{\circ}t}{\Upsilon L_{\circ}})$$
(F.7)

در رابطه (۴.۳)  $C_{\circ}, R_{\circ}, L_{\circ}$  به ترتیب اندو کتانس و مقاوت مدار و ظرفیت خازن می باشد

رابطه بالا نشان دهنده یک موج سینوسی است که با گذشت زمان از دامنه آن کاسته می شود(موج سینوسی میرا شونده). ماکزیمم جریان تخلیه با استفاده از رابطه زیر بدست می]ید. [۵۸]

$$I_{\circ} = \frac{\omega}{\mathbf{Y}} C_{\circ} V_{\circ}(\mathbf{1} + f) \quad \Rightarrow \quad I_{\circ} = \frac{\pi C_{\circ} V_{\circ}(\mathbf{1} + f)}{T} \tag{(\Delta.7)}$$

در رابطه بالا  $\frac{V_1}{V_0} = f$ ، را نسبت تخلیه معکوس خازن مینامند. وقتی پیچه روگوفسکی برای اندازه گیری جریانهای میرای تخلیه خازنی مورد استفاده قرار گیرد رابطه (۵.۳) برای کالیبراسیون مورد استفاده قرار می گیرد. برای محاسبه پارامترهایدوره تناوب (T)، میانگین  $L_0, R_0$  از روابط زیر استفاده می شود [۵۹، ۱۰۹]

$$L_{\circ} = \frac{T^{\mathsf{Y}}}{\mathbf{\mathfrak{F}}_{\pi}^{\mathsf{Y}} C_{\circ}} \tag{(\textbf{F}.\textbf{W})}$$

$$R_{\circ} = -\frac{\Upsilon L_{\circ} ln(f)}{\pi C_{\circ}} \tag{(Y.\Upsilon)}$$

دوره تناوب (T) از میانگین سه دوره تناوب بدست میآید. f میانگین نسبت معکوسهای قلههای نمودار شکل (f) میباشد.

$$f_{\mathbf{F}} = \frac{V_{\Delta}}{V_{\mathbf{F}}}, \ f_{\mathbf{T}} = \frac{V_{\mathbf{F}}}{V_{\mathbf{T}}}, \ f_{\mathbf{T}} = \frac{V_{\mathbf{T}}}{V_{\mathbf{T}}}, \ f_{\mathbf{1}} = \frac{V_{\mathbf{T}}}{V_{\mathbf{1}}}, \qquad f = \frac{(f_{\mathbf{1}} + f_{\mathbf{T}} + f_{\mathbf{T}} + f_{\mathbf{F}})}{\mathbf{F}}$$
(A.T)



شکل ۱۳.۳: خروجی پیچه روگوفسکی پس از انتگرال گیری

ضریب کالیبراسیون ولتاژ نشان داده شده در دستگاه پلاسما کانونی بر روی اسیلوسکوپ  $U = 1/f \frac{v}{kv}$  است.به بیان دیگر ماکزیمم دامنه در خروجی اسیلوسکوپ را باید در عدد ۲۵. ضرب نمود تا جریان عبوری از پلاسما بر حسب کیلو آمپر به دست آید. پیچه روگوفسکی به دور یکی از سیمهای متصل به آند قرار گرفته است.

#### ۳.۶.۳ پروب ولتاژ

پروب ولتاژ مقدار اختلاف پتانسیل بین دو قسمت ولتاژ بالای سیستم پلاسما کانونی را اندازه گیری می کند. پروب والتاژ به صورت تقسیم کننده ولتاژ از نوع مقاومتی می باشد که مقدار ولتاژ را تا ۱۰۰ برابر کاهش می دهد، شکل ۱۴.۳ نمایی شماتیک از آن نشان داده شده است. در این شکل اجزای تشکیل دهنده این سیستم شامل ۱۰ عدد مقاومت ۵۱۰ اهمی و یک مقاومت شنت ۳ است.



شکل ۱۴.۳: نمایی از شماتیک پروب ولتاژ

این تقسیم کننده ولتاژ با یک لوله مسی پوشیده می شود که نقش کاهنده نویز را ایفا می کند.یکی از منحنی هایی که در تحلیل داده ها خیلی مهم است، سیگنال مربوط به ولتاژ الکتریکی است که توسط اسیلوسکوپ ثبت می گردد.در شکل ۱۵.۳ نمونه ای از این منحنی را مشاهده خواهید کرد که پیک اول بیانگر مرحله شکست (اولین مرحله در دستگاه پلاسما کانونی) می باشد و پیک دوم نمایانگر مرحله شعاعی(زمانی که پلاسما تنگیده می شود) است فاصله زمانی بین دو پیک نشانگر مدت زمانی است که لایه جریان در فازهای شعاعی و محوری سپری کرده است تا پلاسما تنگیده شود، به عبارتی زمان پینچ را نشان می دهد.در برخی موارد پیکهای دوم و سوم نیز تشکیل می شود که در این حالت پدیده چند پینچی رخ داده است.

<sup>7</sup>Resistive voltage divider

۳shunt





6 5

(oltage (a.u)

شكل ١٥.٣: سيگنال ثبت شده توسط پروب ولتاژ

# ۷.۳ روش انجام آزمایش

هدف از انجام این آزمایشها بررسی تأثیر، تغییر پارامترهای قابل اندازه گیری دستگاه از قبیل فشار، ولتاژ و نوع گاز بر روی زمان پینچشدگی است به منظور کاهش میزان خطا در آزمایشها مقدماتی وجود دارد که باید انجام شود و سپس سراغ آزمایشها اصلی بریم در زیر به طور مفصل به توضیح آنها خواهیم پرداخت.

در اثر آزمایشها قبلی سطح روی آند و کاتد و قسمتهای درونی چمبر بر اثر تخلیههای الکتریکی انجام شده کثیف شدهاند که ابتدای امر باید دستگاه باز شود و توسط سنباده بسیار نرم و استون تمیز شوند برای باز کردن سیستم باید خلاءای که از قبل در دستگاه ایجاد شده است شکسته شود و سپس پینچهای محفظه به صورت قرینه باز شوند تا دستگاه آسیب نبیند؛ برای شکستن خلاء باید کلمب سمت پمپ را به آرامی باز کرده و اجازه دهیم فشار داخل محفظه با فشار محیط برابر شود در حین تمیز کردن آند و کاتد باید دقت کافی داشت که پودر و برادههایی که بر اثر سنباده کشیدن از سطوح مختلف جدا میشوند بر روی دستگاه باقی نماند و کاملاً تمیز شود چون امکان جرقه زدن و افزایش خطا در آزمایش بالا میرود. اتصالات خلاء مثل واشرها را توسط گریس خلاء کاملاً گریسکاری کرده تا خلاءکامل و تمیزی بتوان ایجاد کرد.

پس از هر بار تمیز کردن دستگاه قبل از شروع آزمایش برای اینکه آلودگیهای موجود در سیستم خارج شوند تقریبا به مدت ۸ ساعت داخل محفظه را خلاء کرده و گاز مورد آزمایش تزریق میشود با این کار داخل چمبر از وجود ناخالصی پاک میشود و تاحد ممکن فقط گاز کاری مدنظر درون سیستم وجود خواهد داشت.

ولتاژ (KV)	فشار (Torr)	نوع گاز
۹ ۱۱ – ۹	۸.۰ _ ۱.۲	آرگون
۹ ۱۱ – ۹	۸.∘ _ ۲	نيتروژن

جدول ٢.٣: شرايط انجام آزمايش

برای شروع فرایند آزمایش ها با استفاده از پمپ روتاری درون چمبر را تا فشار ۲۰۰۳–۱۰۱×۱۰ خلاء می کنیم سپس گاز مورد نظر را از طریق لوله مسی متصل به کپسول گاز و شیر سوزنی در مسیر به داخل محفظه هدایت می کنیم با استفاده از فشارسنج پیرانی فشار گاز را تا میزان معینی بالا می بریم، برای ثابت نگه داشتن فشار درون سیستم باید شار گاز ورودی از طریق شیر سورنی به درون محفظه با شار گاز خروجی توسط پمپ روتاری با هم برابر شوند. سپس توسط سیستم شارژ، خازن را تا ولتاژ مورد نظر شارژ می شود ، انرژی ذخیره شده در خازن توسط یک کلید توان بالا از نوع گاف جرقهای به الکترودهای دستگاه منتقل شده و تخلیه الکتریکی میان آند و کاتد با زدن کلید تریگر انجام می پذیرد. تخلیه های اولیه به منظور آماده

مطابق جدول ۲.۳ شرایط آزمایش چیده شده است و زمان پینچ توسط منحنی مشتق جریان که بر روی سیلوسکوپ نمایش داده می شود محاسبه شده و اطلاعات مربوطه ذخیره می شوند. برای هر کدام از مجموعه شرایط (فشار، ولتاژ و گاز) حداقل ده مرتبه آزمایش ها تکرار می شود تا میزان خطا به حداقل برسد.

پس از هر بار انجام آزمایش زمانی که کار با سیستم به اتمام میرسد، برای خاموش کردن سیستم ابتدا باید شیر پمپ خلاء را بسته و سپس پمپ را خاموش کرد زیرا در غیر این صورت بهعلت اختلاف فشار روغن درون پمپ به سمت داخل محفظه حرکت خواهد کرد و سیستم را دچار مشکل میکند.
# فصل

# تحليل و نتايج

#### ۱.۴ مقدمه

در این فصل مشاهدات آزمایشگاهی از دستگاه پلاسما کانونی شاهرود (SHUPF) و همچنین تحلیل دادههای بدست آمده شرح داده شده است آزمایشها در شرایط کاری متفاوت از قبیل فشارهای مختلف و همچنین ولتاژهای متفاوت به ازای دو نوع گاز آرگون و نیتروژن صورت گرفته است.

قسمت اول آزمایشها با ولتاژ کاری ۹,۱۰,۱۱*KV* و فشارهای ۸/۰ الی ۱/۲ تور و با گاز کاری آرگون صورت پذیرفت. در قسمت بعدی آزمایشها با استفاده از همان ولتاژ و فشارهای ۸/۰ الی ۲*torr* و با استفاده از گاز نیتروژن صورت گرفت. در بخش اول اندازه گیریهای پایهای و روش محاسبه زمان پینچ با استفاده از سیگنالهای موجود بیان شده است. در بخش بعدی به بررسی تأثیر فشار و ولتاژ و نوع گاز بر روی زمان پینچ برای دو گاز آرگون و نیتروژن پرداخته شده است.

## ۲.۴ اندازه گیری های پایه ای

#### ۱.۲.۴ سیگنالهای مربوط به جریان، مشتق جریان و ولتاژ

برای آشکار کردن جریان عبوری از پلاسما و همچنین مشتق آن از پینچه روگوفسکی استفاده کردیم. این پیچه در اطراف آند قرار داده شده است. نمونه سیگنال حاصله از پیچه در شکل ۱.۴ نشان داده شده است.

نقطه  $I_{max}$  نشان داده شده در شکل زیر بیانگر ماکزیمم جریان عبوری است.  $I_p$  نشانگر مقدار جریانی است که در آن پینچ رخ داده است. این جریان هر چقدر بیشتر باشد انرژی بیشتری به ناحیه پلاسما منتقل میشود. در طراحی پلاسما کانونی سعی میکنند طوری پارامترها را انتخاب کنند که فاصله زمانی بین جریان ماکزیمم و جریان پینچ کمتر باشد. در فشار ثابت با افزایش ولتاژ فاصله بین  $I_{max}$  و  $I_p$  کاهش مییابد. که دلیل آن افزایش سرعت لایه جریان میباشد.



شکل ۱.۴: سیگنال ثبت شده توسط پروب ولتاژ

یکی دیگر از منحنیهایی که در سیستم پلاسما کانونی از اهمیت فوقالعادهای برخوردار است، منحنی مشتق جریان است. در شکل ۲.۴ نمونهای از این منحنی که با استفاده از دستگاه پلاسما کانونی بهدست آمده است، نشان داده شده است. با استفاده از منحنی مشتق جریان میتوان به محل وقوع پینچ از لحاظ زمانی پیبرد. در شکل ۲.۴ افت شدید در منحنی مشتق جریان بیانگر تشکیل پینچ است. در این حالت پلاسمای با دمایی در حدود یک کیلوالکترونولت با چگالی ۳<sup>-۳</sup>۰۰ تشکیل میشود. این افتادگی به علت تغییرات سریع اندوکتانس پلاسما میباشد که بنابر رابطه (۱۹.۲) باعث افت سریع منحنی مشتق جریان می شود. فاصله زمانی این نقطه و نقطه خیزش مشتق جریان (جریان) را زمان پینچ تعریف می کنند. زمان پینچ با ولتاژ کاری ارتباط معکوس دارد. یعنی با افزایش ولتاژ زمان پینچ کاهش می یابد.

از دیگر منحنی های که در تحلیل داده ها خیلی مهم است، سیگنال مربوط به ولتاژ الکتریکی



شكل ۲.۴: سيگنال ثبت شده توسط پروب ولتاژ

میباشد. این سیگنال در عمل توسط پروب ولتاژ بدست میآید. جزئیات مربوط به این دیاگنوستیک در فصل سوم شرح داده شده است. پروب ولتاژ مستقیماً به آند وصل شده است. منحنی مربوط به ولتاژ، بیشتر در دستگاهای نوع مدر بکار برده می شود. با استفاده از این اطلاعات می توان فاصله زمانی حرکت لایه جریان را در دو فاز محوری و شعاعی پیدا کرد.



شكل ٣.۴: سيگنال ثبت شده توسط پروب ولتاژ

در شکل ۳.۴ نمونهای از سیگنال مربوط به ولتاژ را میتوان مشاهده کرد. پیک اولیه در این شکل بیانگر مرحله شکست است که اولین مرحله در دستگاه پلاسما کانونی میباشد. فاصله زمانی بین دو پیک نشانگر مدت زمانی است که لایه جریان در فازهای شعاعی و محوری گذرانده تا پلاسما تنگیده شود. فاصله زمانی بین دو پیک زمان پینچ را نشان میدهد. در بعضی از حالات پیکهای سوم و چهارم نیز ظاهر میشود که بیانگر تشکیل یافتن پینچهای دوم و سوم میباشد.

# ۳.۴ تأثیر فشار و ولتاژ بر روی زمان پینچ برای گاز آرگون

**تأثیر فشار** برای بررسی تأثیر فشار بر روی زمان پینچ باید تمامی پارامترهای مورد آزمایش از قبیل ولتاژ، فشار خلاء اولیه قبل از تزریق گاز ثابت باشد. شکل ۴.۴ تغییرات زمان بر حسب فشار در ولتاژ ۱۰*KV* را نمایش میدهد.



شکل ۴.۴: تغییرات زمان برحسب فشار در ولتاژ ۱۰ کیلوولت برای گاز کاری آرگون

با توجه به شکل مشاهده می شود هرچه میزان گاز تزریقی به درون سیستم افزایش مییابد باعث افزایش زمان پینچ می شود که روند این تغییرات را می توان با استفاده از دینامیک دستگاه توجیه کرد که در زیر به بیان آن می پردازیم. با توجه به روابط سرعت در فازهای محوری و شعاعی، سرعت ها در دو فاز با چگالی و میزان

ب توجه به روابت سرعت در عرب ی سعوری و ست ی، سرعت در عو عرب چانی و میران جرم موثر در هر فاز رابطه عکس دارند، یعنی با افزایش (کاهش) چگالی و جرم سرعت حرکت لایه جریان کاهش (افزایش) مییابد.

$$v_a = \left[ \left[ \frac{\mu \ln c}{\mathbf{f} \pi^{\mathsf{Y}}(c^{\mathsf{Y}} - \mathsf{I})} \right]^{\frac{1}{\mathsf{Y}}} \frac{f_c}{\sqrt{f_m}} \frac{(I_\circ/a)}{\sqrt{\rho}} \qquad v_r = \frac{[\mu(\gamma + \mathsf{I})]^{\frac{1}{\mathsf{Y}}}}{\mathbf{f} \pi} \frac{f_c}{\sqrt{f_{mr}}} \frac{(I/a)}{\sqrt{\rho}} \right]$$

تأثیر فشار و ولتاژ بر روی زمان پینچ برای گاز آرگون ۶۳

و باتوجه به رابطه  $m \propto \rho \propto g$  چگالی با جرم رابطه مستقیم دارد با افزایش (کاهش) فشار میزان جرم گاز ورودی به سیستم افزایش (کاهش) مییابد. با توجه به اینکه سرعت با فاکتور جرم در مرحله شعاعی  $(f_{mr})$  و محوری  $(f_m)$  نسبت عکس دارد، افزایش فشار سبب افزایش  $\rho$  و  $f_m$  و  $f_{mr}$  میشود و در نهایت سبب کاهش سرعت لایه جریان میشود و مدت زمان بیشتری لازم است تا لایه جریان طول آند را طی کند و به انتهای آن برسد و در نتیجه زمان پینچ افزایش خواهد یافت؛ که این افزایش زمان در شکلها مشهود است.

گودرزی و همکارانش [۶۱] تأثیر فشار بر زمان پیج را برای دو گاز مختلف در دستگاه پلاسما کانونی امیرکبیر بررسی کردند و همچنین حبیبی و همکارانش [۶۲] زمان پینچ را برای درصدهای متفاوتی از مخلوط گازهای مختلف نیتروژن و نئون را انجام دادند و نتیجهای که ما در این بخش بدست آوردیم مطبق بر نتایج آزمایش آنهاست.

این آزمایش بهازای ولتاژهای ۹ و ۱۱ کیلوولت هم انجام شده است (شکل۵.۴) و شاهد افزایش زمان پینچ به ازای افزایش فشار برای تمام ولتاژها بودیم که در قسمت قبل به توضیح آن پرداختیم.

علاوهبر نتایج بالا، با توجه به بالاتر قرار گرفتن منحنی مربوط به ولتاژ ۹KV نسبت به ۱۰,۱۱K۷ میتوان نتیجه گرفت هرچه ولتاژ افزایش یافته زمان پینچ کمتر شده است.



شکل ۵.۴: تغییرات زمان برحسب فشار در ولتاژهای متفاوت گاز کاری آرگون

**تأثیر ولتاژ** در این مورد برای بررسی تأثیر ولتاژ، فشار سیستم را ثابت نگه داشتهایم. و آزمایشها را برای ولتاژهای ۹، ۱۰ و ۱۱ کیلوولت در فشارهای ثابت ۸/۰ تا ۱/۲ تور تکرار کردیم و برای هر مورد حدود ۱۰ شات زده شده است و میانگین گیری کردهایم.



شکل ۶.۴: تغییرات زمان برحسب ولتاژ در فشار ۱ تور، گاز آرگون

شکل ۶.۴ تغییرات زمان برحسب ولتاژ را در فشار ۱torr نشان میدهد. با توجه به نمودار همزمان با افزایش ولتاژ، زمان پینچ کاهش یافته است و این با توجه به دینامیک لایه جریان و رابطهی زیر کاملاً قابل توجیه است.

$$I = \frac{V}{\sqrt{\frac{L}{C}}} \tag{1.f}$$

با توجه به رابطهی ذکر شده افزایش ولتاژ در دستگاه سبب افزایش دامنه جریان میشود. با افزایش ولتاژ در یک فشار مشخص، جریان سیستم افزایش مییابد با توجه به رابطههای (۱۲.۲) و (۲۱.۲) سرعت لایه جریان با جریان نسبت مستقیم دارد. با افزایش (کاهش) جریان، لایه جریان سریعتر (کندتر) طول آند را طی می کند زمان پینچشدگی کاهش (افزایش) مییابد. این آزمایش را برای فشارهای ۸/۰ تا ۲/۲ تور با گام ۱/۰ انجام داده ایم نتایج بدست آمده را ثیت نموده ایم و در شکل ۲۰۴ منحنیهای مربوطه رسم شده اند. می بینیم که برای تمامی فشارها با افزایش ولتاژ زمان پینچ کاهش یافته است همچنین با توجه به مکان قرارگیری نمود ارها در فشارهای متفاوت درمی یابیم که افزایش فشار با کاهش سرعت متناسب است، دلیل آن این هم میتواند باشد که لایه جریان در فشارهای بالا حامل جرم بیشتری است در نتیجه فشار حاصله از میدان مغناطیسی ( $\frac{87}{7\mu}$ ) نسبت به فشار تولید شده از ذرات (*nKT*) کمتر شده در نتیجه نیروی جلو برنده کمتری به لایه جریان وارد شده که کاهش در سرعت را منجر می شود. در نتیجه با انرژی ثابت با افزایش فشار سرعت لایه جریان کاهش می در نیم می بود.



شکل ۲۰۴: تغییرات زمان برحسب ولتاژ در فشارهای متفاوت برای گاز کاری آرگون

# ۴.۴ تأثیر فشار و ولتاژ بر روی زمان پینچ برای گاز نیتروژن

**تأثیر فشار** برای بررسی تأثیر فشار در گاز نیتروژن بهازای ولتاژ ثابت در فشارهای ۸/۰ تا ۲*torr* آزمایشها انجام شد و گام افزایشی برای فشار را در این حالت ۲/۰ در نظر گرفتیم در شکل ۸.۴ نمودار تغییرات زمان بر حسب فشار در ولتاژ ۱۰*KV* نمایش داده شدهاست. بر طبق تغییرات منحنی زمان بر حسب فشار میتوان دریافت که، حالت افزایشی زمان بر اثر



شکل ۸.۴: تغییرات زمان برحسب فشار در ولتاژ ۱۰ کیلوولت برای گاز کاری نیتروژن

افزایش فشار برقرار است یعنی مانند گاز کاری آرگون میتوان با استفاده از دینامیک پلاسما کانونی افزایش زمان بر اثر افزایش فشار را توضیح داد. در بخش قبل روند افزایشی فشار بر حسب زمان را با استفاده از روابط سرعت فازهای محوری و شعاعی توجیه کردیم در اینجا میخواهیم تأثیر مستقیم افزایش فشار بر معادلات زمان در فازهای محوری و شعاعی بررسی کنیم.

$$t_a = \left[ \left[ \frac{\mathbf{f} \pi^{\mathbf{Y}}(c^{\mathbf{Y}} - \mathbf{i})}{\mu \ln c} \right]^{\frac{1}{\mathbf{Y}}} \frac{\sqrt{f_m}}{f_c} \frac{z_\circ}{(I_\circ/a)/\sqrt{\rho}} \qquad t_r = \frac{\mathbf{f} \pi}{\left[\mu(\gamma + \mathbf{i})\right]^{\frac{1}{\mathbf{Y}}}} \frac{\sqrt{f_m r}}{f_c} \frac{a}{(I_\circ/a)/\sqrt{\rho}}$$

با توجه به روابط، زمان با چگالی ( $\rho$ ) و فاکتورهای جرم ( $f_m$  و  $f_m$ ) نسبت مستقیم دارد با افزایش (کاهش) جرم مدت زمان هر فاز افزایش (کاهش) مییابد. در نتیجه با افزایش فشار میزان گاز کاری مورد آزمایش، افزایش مییابد که به دنبال آن مدت زمان هر کدام از فازها افزایش خواهد یافت و این به طور کاملاً واضح توسط نمودارها نمایش داده شدهاند.

این آزمایش برای ولتاژهای ۹,۱۱*KV* هم انجام شد(شکل ۹.۴) که باز هم شاهد افزایش زمان



شکل ۹.۴: تغییرات زمان برحسب فشار در ولتاژهای متفاوت برای گاز کاری نیتروژن

در ازای افزایش فشار هستیم. همانطور که از نمودارها پیداست علاوه بر تأثیر فشار، تأثیر ولتاژ را هم میتوان از روی منحنیها دریافت کرد، به این صورت که منحنی مربوط به ولتاژ ۱۱*KV* در پایینترین مکان و منحنی مربوط به ۹*KV* در بالاترین مکان قرار دارد و هرچه ولتاژ کاهش مییابد زمان پینچ افزایش مییابد. **تأثیر ولتاژ** در این حالت نیز مثل قبل برای بررسی پارامتر ولتاژ بایستی باقی پارامترهای تأثیرگذار بر تأثیر فشار و ولتاژ بر روی زمان پینچ برای گاز نیتروژن ۶۷

۹,۱۰,۱۱*KV* مسیستم را ثابت نگهداشت. در شکل ۱۰.۴ تغییرات زمان پینج بر حسب ولتاژهای ۹,۱۰,۱۱*KV* برای فشار ۱*torr* رسم شده است. برای فشار ۱*torr* رسم شده است. با توجه به رابطه V = RI ولتاژ و جریان نسبت به هم رابطه مستقیم دارند با افزایش ولتاژ، جریان افزایش مییابد و از آن جایی که سرعت لایه جریان در هر کدام از فازها با جریان رابطه مستقیم دارند می توان گفت سرعت لایه جریان در هر فاز با جریان تخلیه رابطه مستقیم دارد.

 $v_a, v_r \propto I \qquad V \propto I \qquad \Longrightarrow v_a, v_r \propto V$ 

این روابط حاکی از آن است که با افزایش ولتاژ میزان انرژی منتقل شده به گاز درون سیستم افزایش مییابد، در نتیجه جریان تخلیه افزایش خواهد یافت که سبب افزایش سرعت لایه جریان در فازهای محوری و شعاعی میشود. افزایش سرعت لایه جریان به این معنی است که لایه جریان مدت زمان کمتری را در فازهای محوری و شعاعی سپری می کند و سریعتر طول آند را می پیماید و درنتیجه مدت زمان فازهای محوری و شعاعی کاهش مییابد و در کل زمان پینچ کاهش خواهد یافت.



شکل ۴.۱۰: تغییرات زمان برحسب ولتاژ در فشار ۱ تور گاز نیتروژن

این حالت از آزمایش را برای فشارهای متفاوت بررسی کردیم که رنج تغییرات فشار از ۸torr، شروع می شود تا ۲torr، پس از ثبت مشاهدات نمودار تغییرات را برای تمامی فشارها رسم کردیم (شکل ۱۱.۴).



شکل ۱۱.۴: تغییرات زمان برحسب فشار در ولتاژهای متفاوت، گاز نیتروژن

سیامک هدیه و همکارانش [۵] با اندازه گیری سرعت لایه جریان بوسیله پروب مغناطیسی در فازهای محوری و شعاعی در ولتاژهای مختلف دستگاه پلاسما کانونی سهند دریافتند با افزایش ولتاژ میزان انرژی انتقالی به لایه پلاسما افزایش یافته و درنتیجه سرعت لایه افزایش مییابد. یا بهعبارت دیگر زمان رسیدن لایه جریان به نوک آند و زمان کانونی شدن پلاسما کاهش مییابد؛ با توجه به روند تغییرات زمان در این نمودار کاملاً واضح است که با افزایش ولتاژ سیستم زمان پینچ کاهش یافته است و مطابق با دینامیک است. از شکل ۱۱.۴ ، دو نتیجه مهم میتوان دریافت . اول همانطور که پیداست تغییرات زمان بر فشارهای مختلف (منحنی فشار ها نزولی است و دوم با توجه به مکان قرار گرفتن منحنی مربوط به فشارهای مختلف (منحنی فشار در بالاترین مکان و منحنی فشار *Therkor* در پایین ترین مکان) میتوان دریافت که هرچه فشار سیستم را افزایش می دهیم زمان پینچ نیز افزایش مییابد که

# ۵.۴ مقایسه نتایج پژوهش با کارهای گذشته

گودرزی و همکارانش [۶۱] تأثیر فشار بر زمان پینج را برای دو گاز مختلف نئون و آرگون در دستگاه پلاسما کانونی امیرکبیر بررسی کردند (شکل ۱۰.۴) دریافتند با افزایش فشار زمان پینچ افزایش مییابد.



شکل ۱۲.۴:

همچنین حبیبی و همکارانش [۶۲] زمان پینچ را برای درصدهای متفاوتی از مخلوط گازهای مختلف نیتروژن و نئون را انجام دادند (شکل ۱۳.۴ ) دریافتند با افزایش فشار در نسبتهای متفاوت از گازها زمان پینچ افزایش مییابد.



شکل ۱۳.۴:

سیامک هدیه و همکارانش [۵] با اندازه گیری سرعت لایه جریان بوسیله پروب مغناطیسی در فازهای محوری و شعاعی در ولتاژهای مختلف دستگاه پلاسما کانونی سهند دریافتند با افزایش ولتاژ میزان انرژی انتقالی به لایه پلاسما افزایش یافته و درنتیجه سرعت لایه افزایش مییابد. یا بهعبارت دیگر زمان رسیدن لایه جریان به نوک آند و زمان کانونی شدن پلاسما کاهش مییابد. با توجه به اینکه پژوهش ما در راستای آزمایشهای انجام شده در بالاست دریافتیم که نتایج حاصل از آزمایشها با بقیه کارها همخوانی داشته است.

# **۶.۴** تأثیر نوع گاز بر روی زمان پینچ

برای بررسی تأثیر نوع گاز بر زمان پینچ رعایت یکسری نکات ریز لازم است که تأثیر زیادی در نتیجه آزمایش خواهد داشت. قبل از تعویض گاز باید دستگاه را تمیز کرده و سپس بهوسیله تزریق مداوم گاز و تخلیه آن درون محفظه خلاء را کاملاً پاکسازی کرد تا هیچ اثری از گاز کاری قبلی در دستگاه باقی نماند.

در این بخش ابتدا تأثیر گاز آرگون و نیتروژن را در فشارهای متفاوت و ولتاژ ثابت بررسی میکنیم سپس تأثیر دو نوع گاز را در شرایط ولتاژ های متفاوت و فشار ثابت مورد بررسی قرار میدهیم.

قبل از شروع بررسی ها لازم است مشخصات هر گاز را به صورت جدول زیر بیان کنیم :

نسبت گرمای ویژه	انرژی يونش	عدد اتمی	چگالی جرمی	نوع گاز
$\frac{\Delta}{\nabla}$	1220/8	۱۸	1/776	آرگون
<del>۲</del>	1407/8	٧	1/201	نيتروژن

جدول ۱.۴: مشخصات فیزیکی و شیمیایی گازهای کاری مورد آزمایش

#### تأثیر نوع گاز در فشارهای متفاوت

شکل ۱۴.۴ تغییرات زمان پینچ برحسب فشار را برای دو نوع گاز در ولتاژهای ۹,۱۰,۱۱*KV* نمایش داده است. براساس این نمودارها میتوان دریافت افزایش زمان پینچ در اثر افزایش فشار رخ میدهد که در بخشهای قبل بهطور مفصل به شرح آنها پرداختیم.اما علاوه بر روند صعودی زمان برحسب فشار با دقت بیشتر در نمودارها میتوان دریافت منحنیهای مربوط به گاز نیتروژن در تمامی ولتاژها نسبت به گاز آرگون پایینتر هستند، یعنی زمان پینچ در تمام حالتها کمتر از گاز آرگون است . که این را میتوان به کمک مشخصههای نسبت گرمایی ویژه و چگالی جرمی گازها توجیه کرد.

وابستگی دینامیک پلاسما به پارامترهای گاز فقط در فاز شعاعی ایجاد شده است که در این فاز، دینامیک پلاسما توسط معادلات (۱۳.۲) و (۱۵.۲) محاسبه می شود. برای گازهای کاری مختلف دینامیک پلاسما متفاوت می باشد زیرا چگالی جرمی آنها یا به عبارت دیگر فشار آنها متفاوت است. فاکتور مهم دیگر اثرات دینامیک بر روی چاهک انرژی در پلاسما است که معمولاً شامل یونیزاسیون و دیگر فرایندهای گسیلی است. این مکانیزم وابستگی دمایی دارد، فرایند یونیزاسیون موجب اتلاف انرژی و کاهش دما می شود که برای گازهای مختلف متفاوت می باشد حتی اگر چگالی جرمی معین باشد. در رابطه دینامیکی جبهه موج، وابستگی به نوع گاز در نسبت گرمای ویژه  $\gamma$  میباشد. اگر فرایندهای یونیزاسیون و تحریک وجود داشته باشد  $\gamma$  کوچکتر خواهد شد. بنابراین سرعت جبهه موج در دمای یونیزاسیون با ثابت ماندن دیگر شرایط کوچکتر است [ $\gamma$ ].

به عبارت دیگر میتوان گفت یونیزاسیون با  $\gamma$  نسبت عکس دارد چون گرمایی ویژه معادل مقدار گرمایی که لازم است مقدار مشخصی از ماده دریافت کند تا دمای آن یک واحد افزایش یابد، زمانی که یونیزاسیون در گاز افزایش مییابد میزان انرژی لازم برای افزایش دما کاهش مییابد که بر این اساس میتوان نوشت:

$$\gamma = \frac{1}{\text{يونيزاسيون}} \tag{7.4}$$

$$\frac{dr_s}{dt} = \frac{-1}{\mathbf{f}_{\pi}} \sqrt{\frac{\mu(\gamma+1)}{f_{mr} n_{\circ} m_i}} \left[\frac{I_p}{r_p}\right] \tag{(Y.f)}$$

$$\frac{dr_p}{dt} = \frac{\frac{\Upsilon}{\gamma+1}\frac{r_s}{r_p}\frac{dr_s}{dt} - \frac{r_p}{\gamma I}\left(1 - \frac{r_s^{\Upsilon}}{r_p^{\Upsilon}}\right)\frac{dI}{dt} - \frac{1}{(\gamma+1)}\frac{r_p}{z_f}\left(1 - \frac{r_s^{\Upsilon}}{r_p^{\Upsilon}}\right)\frac{dz_f}{dt}}{\frac{\gamma-1}{\gamma} + \frac{1}{\gamma}\frac{r_s^{\Upsilon}}{r_p^{\Upsilon}}}$$
(F.F)

اثر دیگر سرعت جبهه ضربه پیستون (رابطه ۴.۴)است که به طور معکوس با ریشه دوم دما متناسب است وقتی لوحه پلاسما به محور نزدیک شد فشار پیستون خیلی سریع افزایش می ابد. بنابراین فشار حاصله از جبهه ضربه اغلب کمتر از فشار پیستون می باشد. بنابراین جبهه ضربه خیلی آرام حرکت می کند و جبهه ضربه پیستون سریعتر پلاسما را متمرکز می کند و در نهایت زمان فاز شعاعی کاهش می یابد.

باتوجه اینکه آرگون گاز نجیب است و تمایل به شرکت در واکنش کمتری نسبت به نیتروژن دارد و اینکه انرژی اولین یونش آگون بیشتر از نیتروژن است پس میزان یونیزاسیون نیتروژن بیشتر از آرگون است در نتیجه طبق رابطه ۲.۴ دما نیتروژن پایین تر خواهد بود و  $\gamma$  و درنتیجه  $\frac{dr_s}{dt}$  کوچکتر میشوند واز آنجایی که سرعت پیستون بشتر است نهایتاً سرعت در فاز شعاعی افزایش و زمان پینچ کاهش مییابد.



شکل ۱۴.۴: تغییرات زمان برحسب فشار برای گازهای <sub>N۲</sub> و Ar

**تأثیر نوع گاز در ولتاژهای متفاوت** شکل ۱۵.۴ تغییرات زمان پینچ بر حسب ولتاژهای متفاوت را برای دو گاز آرگون و نیتروژن در سه فشار ۸٫۱٫۱/۲*torr*، نشان میدهد. با توجه به نمودارها پر واضح است که با افزایش ولتاژ زمان پینچ کاهش یافته است و تغییرات به صورت نزولی هستند و این اتفاق برای تمام فشارها رخ داده است و مستقل از نوع گاز است. همچنین از شکل پیداست که در یک فشار ثابت منحنی مربوط به گاز نیتروژن پایین تر از گاز آرگون قرار گرفته است با توجه به چگالی جرمی گفت در فشار یکسان از دو گاز، جرم کمتری از نیتروژن کمتر از آرگون است. پس میتوان جریان ایجاد شده دارای چگالی (م) کوچکتری است و باتوجه به اینکه سرعتهای فاز محوری و شعاعی با چگالی نست عکس دارند به ازای چگالی کمتر سرعتها افزایش مییابد و در نتیجه زمان پینچ کمتر میشود.

$$v_a = \left[ \left[ \frac{\mu \ln c}{\mathbf{\mathfrak{F}}_{\pi}^{\mathsf{T}}(c^{\mathsf{T}} - \mathsf{I})} \right]^{\frac{1}{\mathsf{T}}} \frac{f_c}{\sqrt{f_m}} \frac{(I_\circ/a)}{\sqrt{\rho}} \qquad v_r = a/t_r = \frac{[\mu(\gamma + \mathsf{I})]^{\frac{1}{\mathsf{T}}}}{\mathbf{\mathfrak{F}}_{\pi}} \frac{f_c}{\sqrt{f_{mr}}} \frac{(I/a)}{\sqrt{\rho}}$$



شکل ۱۵.۴: تغییرات زمان برحسب فشار برای گازهای <sub>N۲</sub> و Ar

## ۷.۴ نتیجهگیری

در این پایاننامه تأثیر فشار و نوع گاز بر زمان پینچ پلاسما در دستگاه پلاسما کانونی شاهرود SHUPF بررسی شد. براساس نتایج بدست آمده زمان پینچ در اثر افزایش فشار گاز درون سیستم، افزایش مییابد و این روند افزایشی زمان پینچ در اثرافزایش فشار برای هر دو گاز آرگون و نیتروژن رخ داد.

با انجام آزمایشها در ولتاژهای ۹، ۱۰ و ۱۱ کیلوولت در فشار ثابت دریافتیم که با افزایش ولتاژ سیستم میزان دامنه جریان تخلیه درون سیستم افزایش یافته و در نتیجه انرژی بیشتری به گاز درون محفظه منتقل میشود و لایه جریان ایجاد شده سریعتر حرکت کرده و نهایتاً زمان پینچ کاهش مییابد؛ به عبارت دیگر با افزایش ولتاژ سیستم شاهد کاهش زمان پینچ برای هر دو گاز آرگون و نیتروژن بودیم.

زمانی که آزمایشها با گازهای کاری مختلف را با هم مقایسه کردیم دریافتیم با توجه به اینکه گازها در چگالی جرمی، انرژی یونش، الکترونگاتیوی و دیگر مشخصات فیزیکی و شیمیایی تفاوت دارند در درون سیستم رفتار متفاوتی از خود نشان میدهند در این پایاننامه از گاز نیتروژن که گازی مولکولی است و دارای انرژی اولین یونش و چگالی جرمی کمتری نسبت به گاز آرگون که گازی نجیب است استفاده شد.در نهایت زمانی که ولتاژ اعمال شد تفاوتهای بین دو گاز باعث شد زمان پینچ ایجاد شده توسط گاز کاری نیتروژن به نسبت گاز آرگون کوچکتر باشد.

#### ۸.۴ پیشنهادات

با توجه به مطالعه اثر نوع گاز بر زمان تشکیل و پینچ ایجاد شده برای انجام مطالعاتی در آینده موضوعات زیر پیشنهاد میشود.

- فیت خطی و تعیین ضرایب رگرسیون و تأثیر فشار و ولتاژ بر روی این ضرایب.
- بررسی تأثیر نوع گاز بر اشعه ایکس و نوترون تولید شده در دستگاه پلاسما کانونی.
  - اندازه گیری دما و چگالی پلاسما تولید شده و بررسی تأثیر نوع گاز بر آن.
- بررسی تأثیر شکل انتهای کاتد در شکل لایه جریان پلاسما ایجاد شده در دستگاه.
  - شناسایی عناصر تولیدی در پلاسما ایجاد شده توسط دستگاه PF.
    - انجام لايه نشاني توسط دستگاه پلاسما كانوني.

# مراجع

- [1] کارتونن ه، شاه علی غ، (۱۳۹۴)، "مبانی ستاره شناسی" ، انتشارات شاهچراغ، صفحه
  ۲۰۷
- [۲] میلفورد، ریتس، کریستس، صمیمی ج، **"مبانی نظریه الکترومغناطیس"** ویراست چهارم ، مرکز نشر دانشگاهی، تهران، صفحه ۴۱۷
- [۳] نصيري ف، (۱۳۸۹)، پاياننامه ارشد: ''بررسی ويژگی هاي تنگش پلاسما در دستگاه پلاسماي کانونی دنا''، دانشکده فيزيک، دانشگاه پيامنور،
- [۴] محمدی م، (۱۳۸۷)، رساله دکتری: ''مطالعه دستگاه پلاسمای کانونی با استفاده از سیستم سایهنگاری لیزری''، دانشکده فیزیک، دانشگاه تبریز،
- [۵] هدیه س، محمدی م.ع، سبحانیان ص. (۱۳۹۰)، اولین کنفرانس ملی تخلیههای الکتریکی، پلاسما و مهندسی پلاسما، "بررسی تجربی سرعت لایه جریان در فازهای شعاعی و محوری برای گازهای متفاوت در ولتاژهای مختلف در دستگاه پلاسما فوکوس سهند"، ص ۴۲
  - [6] Morozov A.I. (2012), "Introduction to plasma dynamics"
  - [7] Haines M.G., Lebedev S.V., Chittenden J.P., Beg F.N., Bland S.N. and Dangor A. E. (2000),"The past, present, and future of Z pinches" Physics of Plasmas, 7,5, pp 1672-1680
  - [8] Zhang T., Rawat R.S., Hassan S.M., Lin J.J., Mahmood S., Tan T.L. and Lee S. (2006), " Drive parameter as a design consideration for Mather and Filippov types of plasma focus" IEEE transactions on plasma science, 34,5, pp 2356-2362
  - [9] Mather J.W. (1965), "Formation of a high-density deuterium plasma focus" The Physics of Fluids, 8,2, pp 366-377
  - [10] Filippov N.V., Filippova T.I. and Vinogradov V.P. (1962), "Dense high-temperature plasma in a non-cylindrical Z-pinch compression" Nucl. Fusion, Suppl

- [11] Mather J.W. (1964), "Investigation of the High-Energy Acceleration Mode in the Coaxial Gun" The Physics of Fluids, 7,11, pp S28-S34
- [12] Filippov N.V., Filippova T.I., Filippov A.N., Karakin M.A., Khautiev E.Y., Krauz V.I. and Vinogradov V.P. (2000), "Experimental simulation of the collisionless shock wave by plasma focus" Czechoslovak Journal of Physics, 50, pp 127-135
- [13] Mather J.W. (1971), "15.Dense Plasma Focus" Methods in Experimental Physics, 9, pp 187-249
- [14] Soto L. (2005), "New trends and future perspectives on plasma focus research" Plasma Physics and Controlled Fusion, 47,5A, pp A361
- [15] Kato Y. and Be S.H. (1986), "Generation of soft x rays using a rare gas □ hydrogen plasma focus and its application to x-ray lithography" Applied physics letters, 48,11, pp 686-688
- [16] Castillo-Mejía F., Milanese M.M., Moroso R.L., Pouzo J. O. and Santiago M. A. (2001),
  "Small plasma focus studied as a source of hard X-ray" IEEE transactions on plasma science, 29,6, pp 921-926
- [17] Kelly H., Lepone A., Marquez A., Lamas D. and Oviedo C. (1996), "Coating on metallic samples produced by a small energy plasma focus" Plasma Sources Science and Technology, 5,4, pp 704
- [18] Lebert R., Neff W. and Rothweiler D. (1996), "Pinch plasma source for X-ray microscopy with nanosecond exposure time" Journal of X-ray science and technology, 6,2, pp 107-140
- [19] Zhang T., Lin X., Chandra K.A., Tan T.L., Springham S.V., Patran A., lee s., lee p. and Rawat R.S. (2005), "Current sheath curvature correlation with the neon soft x-ray emission from plasma focus device" Plasma Sources Science and Technology, 14,2, pp 368
- [20] Srivastava M.P., Mohanty S.R., Annapoorni S. and Rawat R.S. (1996), "Diode like behaviour of an ion irradiated polyaniline film" Physics Letters A, 215,1-2, pp 63-68
- [21] Rawat R.S., Srivastava M.P., Tandon S. and Mansingh A. (1993), "Crystallization of an amorphous lead zirconate titanate thin film with a dense-plasma-focus device" American Physical Society, 47,9, pp 4858

- [22] Lee S., Lee P., Zhang G., Serban A., Liu M., Liu X., Feng X., Springham S.V., Selvam C.S., Kudryashov V. and Wong T.K. (2003), "Application of plasma focus as a source of high energy electron" Singap. J. Phys, 173,9, pp 276
- [23] Hussain S., Zakaullah M., Shujaat A. and Waheed A. (2004), "Low energy plasma focus as an intense X-ray source for radiography" Plasma Science and Technology, 6,3, pp 2296
- [24] Kalin B.A. (2001), "Radiatsionno-puchkovyye tekhnologii obrabotki konstruktsionnykh materialov" Fizika i khimiya obrabotki materialov, 4, pp 5-16
- [25] Fortov V.E., Hoffmann D.H.H. and Sharkov B.Yu. (2008), "Intense ion beams for generating extreme states of matter" Physics-Uspekhi, 51,2, pp 109-131
- [26] Boiko V.I., Valyaev A.N. and Pogrebnyak A.D. (1999), "Metal modification by high-power pulsed particle beams" Physics-Uspekhi, 42,11, pp 1139-1166
- [27] Morozov E.V., Maslyaev S.A., Demin A.S., Pimenov V.N., Gribkov V.A., Dyomina E.V. and Sinitsyna O.V. (2016), "Deposition of multicomponent filmlike coating on metal substrate using plasma focus device" Inorganic Materials: Applied Research, 7,5, pp 796-803
- [28] Kalin B.A., Volkov N.V. and Yakushin V.L. (2006), "Formation of a Gradient Structural Phase State in Materials under a Radiation Beam Action" Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved., Fiz, 8, pp 202-206
- [29] Kalin B.A., Yakushin V.L., Dzhumaev P.S., Pol'skii V.I., Golovchanskii I.A., Fedotov V.T. and Suchkov A. N. (2011), "Development of a method for producing metal materials with a nanostructured surface layer by treatment with high-energy pulsed plasma" Inorganic Materials: Applied Research, 2,3, pp 218-223
- [30] Abdullin I.Sh., Zheltukhin V.S., Sagviev I.R. and Shaekhov M.F. (2007), "Modifikatsiya nanosloev v vysokochastotnoi plazme ponizhennogo davleniya (Modification of Nanolayers in the High-Frequency Low-Pressure Plasma), Kazan: Kazan" Gos. Tekhnol. Univ.
- [31] Donges A., Herziger G., Krompholz H., Rühl F. and Schönbach K. (1980), "The breakdown phase in a coaxial plasma gun" Physics Letters A, 76,5-6, pp 391-392
- [32] Zakaullah M., Ahmad I., Omar A., Murtaza G. and Beg M.M. (1996), "Effects of anode shape on plasma focus operation with argon" Plasma Sources Science and Technology, 5,3, pp 544

- [33] Lu M.F. (1996), "Different modes of plasma sheath motion in the radial compression and pinch phases in plasma focus" Journal of Physics D: Applied Physics, 29,3, pp 660
- [34] Mohammadi M.A., Sobhanian S., Wong C.S., Lee S., Lee P. and Rawat R.S. (2009), " The effect of anode shape on neon soft x-ray emissions and current sheath configuration in plasma focus device" Journal of Physics D: Applied Physics, 42,4, pp 045203
- [35] Habibi M. (2016), "Angular distribution of ion beam emitted from a 3.5 kJ plasma focus device using different shapes of anodes" Physics Letters A, 380,3, pp 439-443
- [36] Zakaullah M., Ahmad I., Murtaza G., Yasin M. and Beg M.M. (1994), "Effect of insulator sleeve contamination on the low energy plasma focus performance" Fusion engineering and design, 23,4, pp 359-365
- [37] Goudarzi S., Hoseinian S.M. and Raeisdana A. (2014), "Experimental results of breakdown in" Dena" plasma focus device" In Journal of Physics: Conference Series, 516,1, pp 012031
- [38] Yousefi H.R., Aghamir F.M. and Masugata K. (2007), "Effect of the insulator length on Mather-type plasma focus devices" Physics Letters A, 361,4, pp 360-363
- [39] Ivanova-Stanik I.M., Karpinski L. and Scholz M. (2003), "Influence of the insulator parameters on discharge in small Plasma Focus device" Acta Physica Slovaca, 53,6, pp 417-421
- [40] Koohestani S., Habibi M., Amrollahi R., Baghdadi R. and Roomi A. (2011), "Effect of quartz and pyrex insulators length on hard-X ray signals in APF plasma focus device" Journal of Fusion Energy, 30,1, pp 68-71
- [41] kashani m. and sato k. (2002), " cathode effect in plasma focus discharge"
- [42] Mahabadi T.D. and Tafreshi M.A. (2007), "An investigation of the plasma behaviour in a Filippov type plasma focus device" Plasma Physics and Controlled Fusion, 49,9, pp 1447
- [43] Krompholz H., Neff W., Rühl F., Schönbach K. and Herziger G. (1980), "Formation of the plasma layer in a plasma focus device" Physics Letters A, 77,4, pp 246-248
- [44] Kies W. (1986), "Power limits for dynamical pinch discharges" Plasma physics and controlled fusio, 28,11, pp 1645
- [45] Feugeas J.N. (1989), "The influence of the insulator surface in the plasma focus behavior" Journal of Applied Physics, 66,8, pp 3467-3471

- [46] Bernard A., Coudeville A., Jolas A., Launspach J. and De Mascureau J. (1975), "Experimental studies of the plasma focus and evidence for nonthermal processes" The Physics of Fluids, 18,2, pp 180-194
- [47] Mather J.W. (1971), "Methods of experimental physics" Plasma Physics, 9, pp 187-249
- [48] Chen Y.H. and Lee S. (1973), "Coaxial plasma gun in mode 1 operation" International Journal of Electronics, 35,3, pp 341-352
- [49] Bernstein M.J., Meskan D.A. and Van Paassen H.L.L. (1969), "Space, time, and energy distributions of neutrons and x rays from a focused plasma discharge" The Physics of Fluids, 12,10, pp 2193-2202
- [50] Neil G.R. and Post R.S. (1981), "Observation of overdense infrared scattering from a post pinch plasma focus" Plasma Physics, 23,5, pp 425
- [51] Lee S. (1988), "RADIATION ENHANCEMENT AND APPLICATIONS SCALING FROM THE UNU/ICTP PFF" In Invited Paper, in International Meeting on Frontiers of physics, Satellite Meeting, 12, pp 33-46
- [52] Lee S. and Serban A. (1996), "Dimensions and lifetime of the plasma focus pinch" IEEE Transactions on plasma science, 24,3, pp 1101-1105
- [53] Lee S. (1998), "Scaling of the Plasma Focus-Viewpoint from dynamics"
- [54] Liu M.H. and Lee S. (1998), "SXR radiation modelling for neon plasma focus"
- [55] Lee S. and Saw S.H. (2010), "Numerical experiments providing new insights into plasma focus fusion devices" Energies, 3,4, pp 711-737
- [56] Heard H.G. (1963), "Ultra-violet gas laser at room temperature" Nature, 200,4907, pp 667-667
- [57] Lee S. (1983), "Energy balance and the radius of electromagnetically pinched plasma columns" Plasma Physics, 25,5, pp 571
- [58] Ward D.A. and Exon J.L.T. (1993), "Using Rogowski coils for transient current measurements" Engineering Science & Education Journal, 2,3, pp105-113
- [59] Saw S.H. Lee S. Roy F. Chong P.L. Vengadeswaran V. Sidik A.S.M. Leong Y. W. and Singh A. (2010), "In situ determination of the static inductance and resistance of a plasma focus capacitor bank" Review of Scientific Instruments, 81,5, pp 053505

- [60] Lee S. Saw S.H. Abdou A.E. and Torreblanca H. (2011), "Characterizing plasma focus devices—Role of the static inductance—Instability phase fitted by anomalous resistances" Journal of fusion energy, 30,4, pp 277-282
- [61] Sharak M.N., Goudarzi S., Raeisdana A. and Jafarabadi M. (2013), "Numerical analysis of amirkabir plasma focus (APF) device for neon and argon gases" Journal of Fusion Energy, 32,2, pp 258-262
- [62] Roomi A. and Habibi M. (2012), "The Effect of Working Gas Admixture, Applied Voltage and Pressure on Focusing Time Parameter in the APF Plasma Focus Device" Journal of fusion energy, 31,3, pp 227-233
- [63] Chen F.F. (1984), "Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion", Plasma Physics,
- [64] Freidberg J.P. (2008), "Plasma physics and fusion energy", Cambridge university press,
- [65] Elliott D. (1986), "Microlithography: process technology for IC fabrication", McGraw-Hill,
- [66] Kularatna N. (2003), "Digital and analogue instrumentation: testing and measurement",
- [67] Bing S., (2000), PhD thesis, "Comparative study of dynamics and X-ray emission of several plasma focus devices", Nanyang Technological University,
- [68] Serban, Adrian.,(1995), PhD thesis, "Anode geometry and focus characteristics", Nanyang Technological University.
- [69] Liu M., (1996), PhD Thesis, "Soft X-rays from compact plasma focus", NIE/NTU.

#### Aabstract

The desire to reach the energy generated by nuclear reactions and the conditions governing it led to the creation of focal plasma devices. The focal plasma device is used as a pulse generator in producing x-rays, neutrons, and charged particles. The X-ray produced on this machine requires a pinch. Optimum conditions depend on Pinch synchronization with maximum current and symmetry of the plasma front.

In this study, we investigate the effect of pressure and type of gas on the time of pinching in the focal plasma system. The analysis of the diagrams and experiments shows that the pinch time is increased due to increased pressure and voltage reduction, and also the type of selected gas has a significant effect on the time of the pinch.

Keywords: Plasma Focus, Factors affecting Pinch, Pinch time, Discharge current, Type gas



Shahrood University of Technology

Faculty of Physics and Nuclear Engineering

M.Sc. Thesis in Atomic and Molecular physics

### Investigation of the effect of pressure and type gas on pinching time in plasma focus device

By: parvin Enayati

Supervisor

Mahdi Momeni

January 2018