

## طراحی بهینه، ساخت و راه اندازی دستگاه پلاسمای کانونی

### دانشگاه صنعتی امیرکبیر

رضا امراللهی؛ مرتضی حبیبی\*؛ محمد مهدی عطاران

دانشکده مهندسی هسته ای و فیزیک و پژوهشکده پرتو فرآیند، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

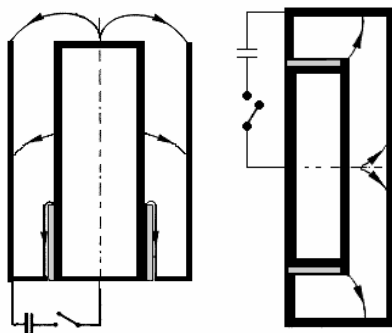
### چکیده

دستگاه پلاسمای کانونی امیرکبیر ( $C_0=36\mu f, V_0=16kV, L_0=110mH$ ) از نوع مدر در دانشگاه صنعتی امیرکبیر طراحی و ساخته شده است. طراحی سیستم را با بهینه سازی مدل سه فازی حرکت لایه جریان پلازما در فاز شعاعی عملکرد پلاسمای کانونی انجام داده و اجزاء مکانیکی و الکترونیکی آن طراحی و ساخته شده اند و در آزمایشات فراوانی که در ولتاژها و فشارهای مختلف گاز آرگن صورت گرفت، محدوده فشار و ولتاژ بهینه سیستم که به شدت بیشینه پینچ می انجامد، تعیین شد.

کلید واژه ها: پلاسمای کانونی نوع مدر- پینچ پلازما- سیستم کنترل- اسپارک گپ- پی-چه روگوفسکی

### ۱- مقدمه

دستگاه پلاسمای کانونی شتابدهنده مگنتو هیدرو دینامیکی (MHD) با الکترودهای هم محور بوده که بخشی از انرژی الکتریکی اعمال شده بین الکترودها به عنوان عامل رانش لایه جریانی پلازما در امتداد دو الکتروتود، در فاز چگالش سریع (پینچ Z) منجر به شتابگیری پوسته جریان پلازما به سمت محور در نزدیکی نوک الکتروتود مرکزی دستگاه (آند)، می گردد [۱]. این سیستم بطور مستقل توسط مدر و فیلپوف پایه گذاری شد و در شکل (۱) شمایی از این دو ساختار نشان داده شده اند.



شکل (۱): ساختار پلاسمای کانونی نوع مدر و

فیلپوف، ۱-عایق، ۲-آند، ۳-کاتد، ۴-سوئیچ

اسپارک گپ ۵-خازن ولتاژ بالا، ۶-لایه جریان

پلازما

در این مقاله ابتدا براساس دینامیک سیستم پلاسمای کانونی به طراحی مفهومی دستگاه پلاسمای کانونی از نوع مدر ( $C_0=36\mu\text{f}, V_0=16\text{kV}, L_0=110\text{nH}$ ) پرداخته شده و پس از ارائه مراحل ساخت و تست اجزاء سیستم، نتایج تجربی منجر به عملکرد بهینه سیستم در شرایط مختلف کاری ارائه و تحلیل گردیده است.

#### طراحی براساس مدل‌سازی سه فازی سیستم پلاسمای کانونی

مدل‌های مختلفی برای تحلیل عملکرد دستگاه پلاسمای کانونی از نوع مدر پیشنهاد شده اند [۲ و ۳ و ۴]. در این مقاله بهینه‌سازی مدل سه فازی حرکت لایه جریان پلاسمای با توجه به قابلیت‌های خاص آن انتخاب شده است [۵]. در مدل سه فازی طراحی پلاسمای کانونی [۵] پارامترهای مقیاس بدون بعد (از قبیل

$c = \frac{b}{a}$  که  $b$  و  $a$  به ترتیب شعاع الکتروود مرکزی و الکتروود بیرونی هستند و  $s = (I_0/a)/\sqrt{\rho}$  که  $I_0$  جریان تخلیه بیشینه و  $\rho$  چگالی گاز سیستم می‌باشند)، بر اساس نتایج تجربی منجر به عملکرد بهینه سیستم به عنوان شرایط مرزی مسئله در نظر گرفته شده و کمیت‌های طول الکتروود مرکزی ( $Z_0$ ) و  $a$  و  $b$  به عنوان نتایج طراحی بدست می‌آیند. مقادیر ولتاژ، ظرفیت خازن و اندوکتانس کل سیستم به ترتیب برابر با  $P=3\text{torr}$ ،  $C_0=36\mu\text{f}$ ،  $V_0=16\text{kV}$  و  $L_0=110\text{nH}$  در نظر گرفته شده است. همچنین با در نظر گیری فشار  $P=3\text{torr}$  برای گاز دوتریم به عنوان گاز کاری فرضی سیستم ( $\gamma = \frac{5}{3}$ )، این پارامترها را به عنوان مقادیر ورودی برنامه طراحی در نظر گرفته و قید‌هایی تجربی را برای محاسبه ابعاد مشخصه سیستم برحسب معادلات فازهای شتاب‌گیری محوری لایه جریان و فاز حرکت شعاعی لایه جریان<sup>۱</sup> و همچنین معادلات مداری سیستم، در برنامه لحاظ می‌کنیم. این قیدها عبارتند از: فاکتور  $S$ ،  $c = \frac{b}{a}$ ، محدوده سرعت لایه جریان، همسازي پیک اول جریان تخلیه و رسیدن لایه جریان به نوک الکتروود آند، محدوده تجربی

$$t_0 = \sqrt{L_0 C_0}, \quad \beta = \frac{f_c \mu (\ln c) z_0}{2\pi L_0} \quad \text{و} \quad \alpha = t_0 / \left\{ \left[ \frac{z_0^2}{(I_0/a)^2} \right] (f_m/f_c)^2 \left[ 4\pi^2 \rho_0 (c^2 - 1) / \mu \ln c \right] \right\}^{1/2}$$

$f_m$  کسر جرم جاروب شده گاز موجود در محفظه در جهت محوری و  $f_c$  کسر جریان  $I_0 = V_0 / \sqrt{L_0/C_0}$  اعمال شده در پیستون مغناطیسی در حال حرکت هستند و برنامه‌ای براین اساس توسط نرم افزار مطلب نوشته ایم.

#### مدلسازی بهینه و طراحی مفهومی جامع

نتایج تجربی نشان داده اند که طول بهینه عایق اثر قابل توجهی بر عملکرد سیستم‌های پلاسمای کانونی داشته و از طرفی در نظر گیری پارامتر ثابت  $C$  به محدودیت ویژه‌ای در طراحی ابعاد مشخصه سیستم خواهد

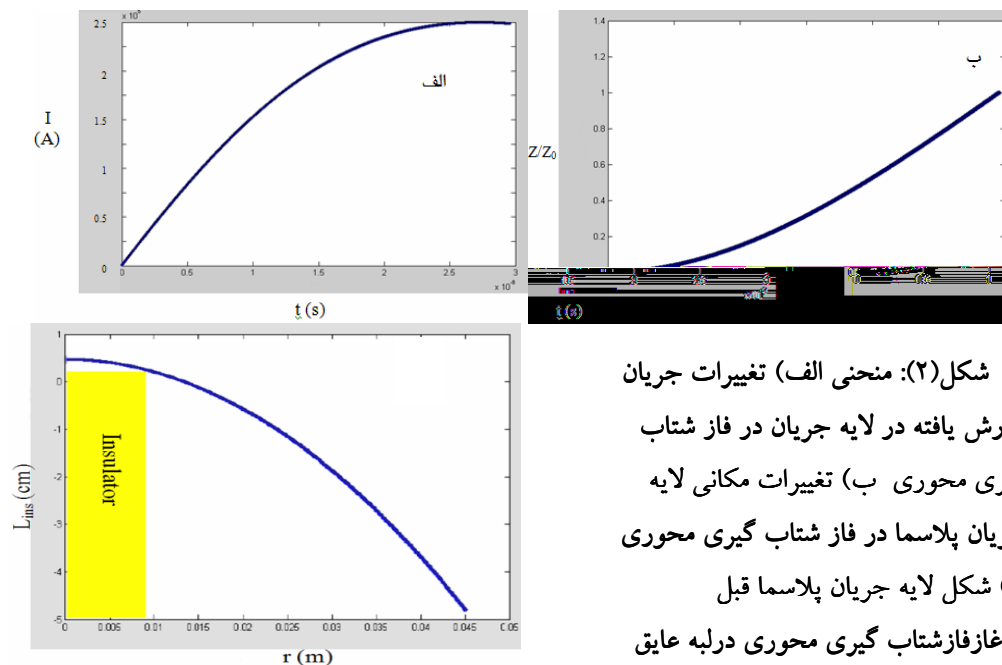
انجامید. معادله پوسته جریان سهموی شکل در حین فاز شتاب گیری محوری از معادله زیر پیروی می کند [۶]:

$$Z(r) = \frac{-a}{2\psi} \left\{ x(x^2 - \psi^2)^{\frac{1}{2}} - (1 - \psi^2)^{\frac{1}{2}} - \psi^2 \operatorname{Ln} \left( \frac{x + (x^2 - \psi^2)^{\frac{1}{2}}}{1 + (1 - \psi^2)^{\frac{1}{2}}} \right) \right\}$$

که  $x = r/a$  و  $\psi = \left( \frac{\mu_0 I^2}{8\pi^2 a^2 \rho_0 V_{CS}} \right)^{\frac{1}{2}}$  بوده و  $r$  فاصله لایه جریان از آند،  $\rho_0$  چگالی گاز سیستم،  $I$  جریان پوسته پلاسما و  $V_{CS}$  سرعت پوسته جریان پلاسماست. با توجه به ساختار بهینه ایجاد لایه جریان اولیه بین دو الکترود آند و کاتد سیستم، وقتی  $r = b$  باشد،  $x = c$  و  $Z(r) = L_{opt}$  خواهد شد که  $L_{opt}$  طول بهینه عایق است که با قراردادن متغیرهای آن در برنامه، مقدار آن بدست می آید. این نتایج در جدول (۱) نشان داده شده اند.

زمان فاز محوری: $2/85 \mu s$	فاکتور S: ۹۰/۴	سرعت لایه جریان فاز محوری: $824 \text{ cm} / \mu s$	شعاع آند (b): $1/41 \text{ cm}$	مقدار بهینه شده $c = \frac{b}{a}$ : $3/13$
مقدار بهینه شده $\beta$ : ۰/۲۸	مقدار بهینه شده $1/59 : \alpha$	جریان پیک فاز محوری: $250.3395 \text{ kA}$	شعاع کاتد (b): $4/42 \text{ m}$	ارتفاع آند ( $Z_0$ ): $14/32 \text{ cm}$

جدول (۱): نتایج برنامه بهینه سازی شده



شکل (۲): منحنی الف) تغییرات جریان شارش یافته در لایه جریان در فاز شتاب گیری محوری ب) تغییرات مکانی لایه جریان پلاسما در فاز شتاب گیری محوری ج) شکل لایه جریان پلاسما قبل از آغاز فاز شتاب گیری محوری در لبه عایق

منحنی های تغییرات جریان شارش یافته در لایه جریان، تغییرات مکانی لایه جریان پلاسما در فاز شتاب گیری محوری و همچنین شکل لایه جریان پلاسما قبل از آغاز فاز شتاب گیری محوری در لبه



عایق (طول  $L_{opt}$ ) در شکل (۲) شبیه سازی شده اند. در مرحله دوم، برنامه فاز شتابگیری محوری را توسعه داده و با توجه به معادلات فاز حرکت شعاعی لایه جریان پلاسما تا چگالش محوری [۶] و قرارداد نتایج عددی فاز محوری به عنوان داده های ورودی، پارامترهای این فاز را براساس مدل اسلاگ [۷] که علاوه بر لایه جریان پلاسما، یک جبهه موج شوکی را نیز در جلوی خود در نظر می گیرد، مدل سازی نموده و نتایج حاصله در جدول (۲) ارائه شده است. پس از تخریب پینچ چگال، شارشی از پلاسما ایجاد می شود که در راستای محور دستگاه شتاب می گیرند. لذا نتایج فاز قبل را اگر بر اساس معادلات فاز شتاب گیری محوری حل نمائیم، تحولات این مرحله (فاز محوری ستون پلاسما انبساط یافته) هم بررسی خواهد شد.

زمان فاز شعاعی: ۰/۰۱۳۰ $\mu$ S	ارتفاع ستون پینچ پلاسما ( $Z_F$ ): ۱/۰۳ cm	حداقل شعاع ستون پلاسما: ۰/۱۵ cm
جریان فاز شعاعی: ۰/۷۸ kA	حداقل شعاع ستون جبهه شوکی: ۰/۰۵ cm	نسبت شعاع پلاسما چگال به شعاع آند ( $r_p/a$ ): ۰/۱

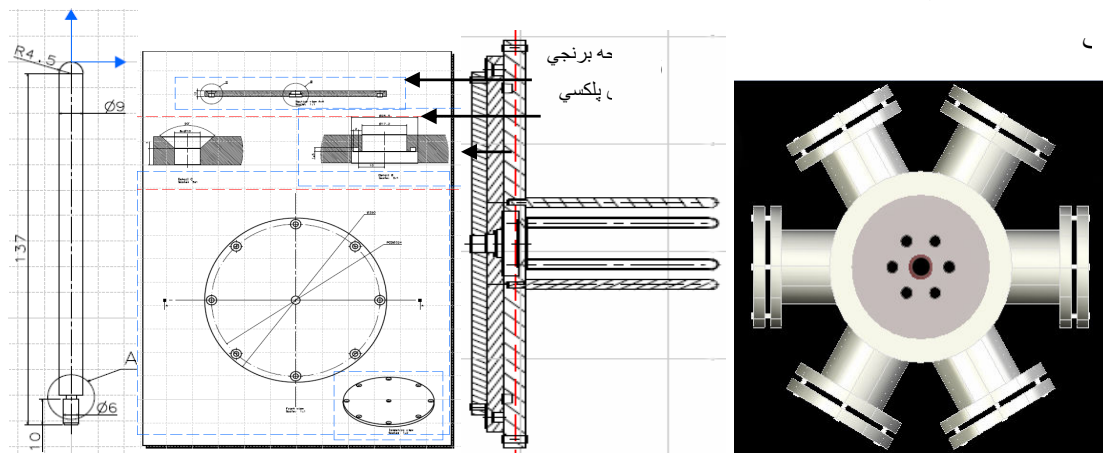
جدول (۲): نتایج برنامه فاز شعاعی

نتیجه این فاز به همراه فازهای شتاب گیری محوری و حرکت شعاعی لایه جریان با استفاده از محاسبات انجام شده توسط نرم افزار مطلب در شکل (۵) ارائه شده و همچنانکه مشاهده می شود، تغییرات جریان در سه مرحله تخلیه و ایجاد پینچ چگال در پیک جریان، قطع جریان در اثر وقوع ناپایداری های MHD و سپس تشکیل دوباره لایه جریان در فاز محوری ستون پلاسما انبساط یافته نشان داده شده است. این منحنی نشانگر کیفیت مناسب پارامترهای طراحی می باشد، زیرا همچنانکه انتظار خواهیم داشت، افت ناگهانی جریان در نقطه پیک جریان اتفاق افتاده است.

#### مراحل ساخت و تست سیستم

مدلسازی الکترودهای آند و کاتد، محفظه تخلیه سیستم شامل شش پنجره جهت نصب ابزار تشخیصی، درپوش بالایی همراه با پنج دریچه جهت قرارداد ابزار تشخیصی و سیستم تزریق گاز و خلاء توسط نرم افزارهای کتیا و اتوکد ترسیم گردیده که در شکل (۳) بخشی از آنها نشان داده شده اند. تصویرهایی از اجزاء اساسی سیستم در شکل (۴) نشان داده شده اند. الکترودهای آند و کاتد (شش میله) از جنس مس می باشند که الکتروود آند برای جلوگیری از اثرات تخریب تابشی و کاهش آلودگی محیط پلاسما کانونی توخالی شده است. عایقی از جنس پیرکس بین الکتروودها قرار داده شده و برای کاهش تنش های مکانیکی در اثر پالس های متعدد، ضربه گیری از جنس لاستیک مقاوم در صفحه کاتدی مسی تعبیه شده است. محفظه تحت خلاء سیستم از جنس فولاد ضد زنگ ساخته شده است. سیستم تزریق گاز طبق شکل با قابلیت تزریق گازهای ترکیبی طراحی و ساخته شده است و خروجی گیج خلاء دیجیتال آن در کنسول کنترلی دستگاه قرار داده

شده است. پمپ مورد استفاده در این سیستم قادر به خلاء نهایی  $10^{-3} \times 5 \times 10^{-3}$  Torr می باشد. محفظه تحت خلاء سیستم از جنس فولاد ضد زنگ ساخته شده است. سیستم تزریق گاز طبق شکل با قابلیت تزریق گازهای ترکیبی طراحی و ساخته شده است و خروجی گیج خلاء دیجیتال آن در کنسول کنترلی دستگاه قرار داده شده است. پمپ مورد استفاده در این سیستم قادر به خلاء نهایی  $10^{-3} \times 5 \times 10^{-3}$  Torr می باشد. میکروکنترلر مدار کنترلی دستگاه به گونه ای برنامه ریزی شده که پس از تنظیم سطح ولتاژ کاری به عنوان ولتاژ مرجع ورودی به آپ امپ، دستور شارژ یا قطع شارژ به رله داده شده و با انجام نمونه برداری های متعدد از خازن، به محض رسیدن ولتاژ شارژ به ولتاژ مرجع، رله شارژ دستگاه قطع و سیستم تریگر را فعال می سازد. برای افزایش ایمنی، از فیلتر فرکانس پائین در کلیدهای فرمان شارژ و آتش استفاده شده تا امکان شارژ یا تریگر نمودن در اثر ولتاژهای ناخواسته و نوفه ها عملی نشود. با استفاده از اپتوکوپلرهای مختلف در ورودی و خروجی سیستم کنترل و شارژ، عایق بندی کاملی جهت جلوگیری از آسیب به میکروکنترلر و مدارهای کنترل و شارژ انجام شده است.

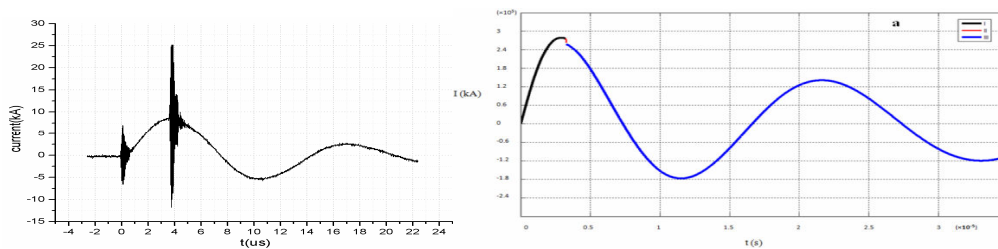


شکل (۳): طراحی الکتروود (الف) کاتد، (ب) صفحه کاتدی نگهدارنده الکتروودها، (ج) کاتد، صفحه های نگهدارنده و پلکسی، (د) محفظه تخلیه دستگاه، میله های کاتدی و پنجره های ابزار تشخیصی



شکل (۴): تصاویری از دستگاه پلاسمای کانونی امیرکبیر، (الف) صفحه کاتدی مسی، (ب) میله کاتدی (شش عدد)، (ج) الکتروود آند، (د) محفظه تخلیه و پنجره های آن، (ه) آند، کاتدها و عایق پیرکس، (و) اسپارک گپ ریلی

برای ایجاد پالس های تیز حاصله از فرمان شارژ و تریگر، اشمیت تریگرهایی در مدارها نصب شده اند. انرژی الکتریکی توسط سوئیچ اسپارک گپ ریلی بین الکترودها تخلیه می شود. پس از فرمان تریگر، یک پالس منفی توسط مدار ضربه به دوسرالکترودهای اسپارک گپ اعمال می شود که به شکست هم زمان بین الکترودهای آن و کاهش زمان جیتز می انجامد. مقسم ولتاژ بین الکترودهای اسپارک گپ به گونه ای است که در فشار جو تا محدوده ولتاژ  $18kV$  بین الکترودها شکست الکتریکی صورت نپذیرد. پالس جریان توسط شانزده کابل اندوکتانس پائین بصورت همسانگرد بین صفحه های بالایی و پائینی سیستم تخلیه می شود. پس از نصب کامل اجزاء مختلف دستگاه پلاسمای کانونی امیرکبیر، تست های متعدد خلاء و بهینه سازی خلاء محفظه و سیستم تزریق گاز با استفاده از نشت یاب هلیوم صورت پذیرفته و پس از رفع عیوب سیستم، به نتایج مطلوب رسیده است. نمونه اولی‌ه ای از سیگنال جری‌ان تخلیه منجر به پینچ چگال (Ar, ) در شرایط  $(V=11.4kV, P=1.47Torr)$  به همراه سیگنال شبیه سازی شده جری‌ان تخلیه در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل (۵): تغییرات لایه جریان پلاسمای در سه مرحله شتابگیری محوری، شعاعی و تخریب پینچ چگال (چپ) (I) فاز شتابگیری محوری، (II) اغتشاش ستون پلاسمای و تشکیل پینچ چگال (III) فاز ستون پلاسمای انبساط یافته، سیگنال جری‌ان تخلیه با گاز آرگن در ولتاژ کاری  $11/4kV$  و فشار  $1/47Torr$

#### نتیجه گیری

در طراحی سیستم کنترل دستگاه، در اثر استفاده از اپتوکوپلرهای مختلف، عایق بندی الکتریکی کاملی برقرار شده و برنامه ریزی میکروکنترلر به گونه ای است که پس از فرمان شارژ، تمامی فرایندهای شارژ خازن، نمونه گیری های پی در پی جهت فهم زمان شارژ کامل، قطع رله شارژ با استفاده از مدار آپ امپ، فعال سازی کلید فرمان آتش و در نهایت اجرای دستور آتش در راستای هدف بهینه سازی فرایند کنترل و ایمنی سیستم پلاسمای کانونی بصورت خودکار انجام می گیرد. منحنی های منجر به پینچ چگال و وقوع افت جریان در پیک نخست، نشان دهنده طراحی موفق و راه اندازی مطلوب دستگاه پلاسمای کانونی امیرکبیر می باشد.



۵- مراجع

- J.W. Mather, "Investigation of the high energy acceleration mode in the coaxial gun," *Phys. Fluids Suppl.*, vol. 7, 1964 [۱]
- César Moreno, and etc, Conceptual Engineering of Plasma-Focus Thermonuclear Pulsors, IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, VOL. 28, NO. 5, OCTOBER 2000 [۲]
- A. Esaulov, V. Makhin, B. S. Bauer, R. Siemon, V. Sotnikov, I. Paraschiv, R. Presura, and etc, 2D MHD computer modeling of dense plasma focus accelerators, 0-7803-7915/03/17.00 Q2003IEEE [۳]
- S. Lee and etc, Dimensions and Life time of the plasma focus pinch, IEEE TRANSACTIONS OF PLASMA SCIENCE, VOL.24, NO.3, JUNE 1996 [۴]
- S.Lee and etc, TWELVE YEARS OF UNU/ICTP PFF- A REVIEW , October 30, 1998, Kuala Lumpur, Malaysia, university of Malaya [۵]
- H.R. Yousefi and etc, Effect of the insulator length on Mather-type plasma focus devices, *Physics Letters A*, 2007. 361(7) [۶]
- Lee Davison, and etc, Shock Wave and High Pressure Phenomena, ISBN-10 3-540-29314, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006 [۷]