

کاربرد دستگاه پلاسمای کانونی امیر کبیر به عنوان سیستم مولد نیروی پیشرانس پلاسمایی و برآورد جرم لایه جریان پلازما در فازهای عملکرد سیستم

رضا امراللهی؛ مرتضی حبیبی*

دانشکده مهندسی هسته‌ای و فیزیک و پژوهشکده پرتو فرایند، دانشگاه صنعتی امیر کبیر

Mortezahabibi@aut.ac.ir

چکیده

در این مقاله بهره‌گیری از دستگاه پلاسمای کانونی به عنوان مولد نیروی پیشرانس تحلیل شده است و از نتایج برنامه

شبیه‌سازی مدل سه‌فازی طراحی دستگاه پلاسمای کانونی از نوع مدر ($16kV, 36\mu f, 110nH$) که در دانشگاه

صنعتی امیرکبیر ساخته و راه‌اندازی شده است، استفاده نموده ایم. گرچه کاربری این سیستم به عنوان مولد نیروی

پیشرانس پلاسمایی کاربردهای صنعتی قابل توجهی را به دنبال خواهد داشت، اما پژوهش‌های اندکی در این زمینه

صورت پذیرفته است. جهت محاسبه نیروی کل پیشرانس پلاسمایی در این سیستم، از معادلات دینامیک لایه جریان

در فازهای عملکرد این سیستم استفاده شده است. جرم لایه جریان پلازما براساس نتایج شبیه‌سازی عددی و تعیین

نیروی پیشرانس برآورد گردیده است.

کلید واژه‌ها: دستگاه پلاسمای کانونی - پیشرانس پلاسمایی - مدل سه‌فازی عملکرد سیستم - پینچ پلازما

۲- مقدمه

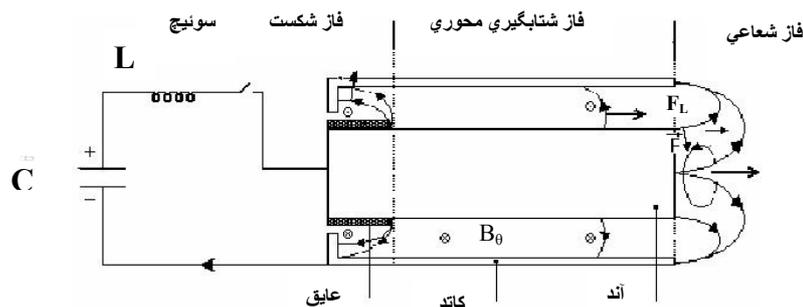
در سیستم‌های پلاسمای کانونی (مدل مدر و فیلیپوف) انرژی الکتریکی اعمال شده از بانک خازنی (از محدوده انرژی ۱kJ تا ۱MJ) به صورت انرژی مغناطیسی در پشت لایه جریان پلازما تبدیل شده و در اثر نیروی لورنتس، بخشی از این انرژی در فاز چگالش سریع لایه جریان به سمت محور الکتروود مرکزی و در مجاورت نوک آند منجر به ایجاد پلاسمایی داغ و چگال ($10^{19} / cm^3$) و با طول عمر



بسیار کوتاه ($200\text{ns} - 50$) می‌گردد [۱]. علت توجه ویژه به این ساختار مولد پلاسمایی دارا بودن $n\tau$ بالا (چگالی پلاسما و τ زمان محصورسازی می‌باشد) و در نتیجه ایجاد واکنش‌های گداخت در این دستگاه و همچنین در صورت استفاده از دوتریم، تولید نوترون فراوان است [۲]. کاربرد پیش‌رانش پلاسمایی از حدود بیست و پنج سال قبل تا کنون در فضاپیماها و ساختارهای ویژه با فن آوری بالا مورد مطالعه و استفاده قرار گرفته است. سیستم پلاسمای کانونی را می‌توان جدا از در نظرگیری منع پربازدهی از تابش‌های متنوع گسیلی، یک تفنگ هم‌محور پلاسمایی محسوب کرد که باریکه‌های پرنرژی گازهای یونیزه را در طی هر پالس کاری با شتاب بسیار بالا به سمت بیرون از محفظه پرتاب می‌کند و دارای شباهت‌های زیادی با ساختارهای متداول پیش‌ران‌های پلاسمایی می‌باشند. از این رو در نظرگیری این ساختار به عنوان مولد نیروی پیش‌ران پلاسمایی در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است [۳]. در این مقاله از نتایج برنامه MATLAB طراحی مفهومی دستگاه پلاسمای کانونی ساخته شده در دانشگاه صنعتی امیرکبیر و پارامترهای شبیه‌سازی شده آن استفاده کرده ایم و امکان‌پذیری استفاده از این دستگاه را به عنوان چشمه نیروی پیش‌ران بررسی نموده ایم. سپس سرعت لایه جریان پلاسما را براساس نتایج در نظرگیری این سیستم به عنوان مولد نیروی پیش‌ران بدست آورده و با محاسبات نظری حاصله از شبیه‌سازی دستگاه مورد بررسی قرار گرفته است.

۳- فازهای عملکرد دستگاه پلاسمای کانونی و محاسبه عددی پارامترهای اساسی آن

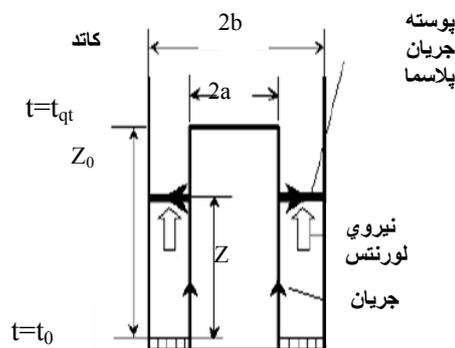
دینامیک پلاسمای کانونی را می‌توان در سه مرحله کلی فاز شکست، فاز شتاب‌گیری محوری و فاز شعاعی تقسیم بندی نمود. این سه فاز را برحسب تحولات جریان و ولتاژ در شکل (۱) نشان داده ایم.



شکل (۱): فازهای حاکم بر عملکرد دستگاه پلاسمای کانونی

وقتی ولتاژ اولیه بالایی بین الکترودها اعمال می‌شود، شکست الکتریکی اولیه‌ای در امتداد عایق پس از تاخیر زمانی چند نانو ثانیه‌ای ایجاد می‌شود. پس از اتمام فاز شکست و در بازه زمانی $300\text{ns} - 100$ جریان بطور متقارن از آند به کاتد شارش یافته فاز شتاب‌گیری محوری آغاز می‌شود و پوسته جریان پلاسما که توسط

نیروی لورنتس هل داده می‌شود، با سرعت فراصوتی حرکت می‌کند. فاز شتابگیری محوری معمولاً بین $1-4\mu\text{s}$ بطول می‌انجامد که معمولاً یک چهارم دوره تناوب تخلیه مدار سیستم است. معمولاً جریان تخلیه خیلی بالا (چند صد kA تا MA) و فشار گاز کاری بسیار پائین (چندین mbar) است. در انتهای فاز شتاب گیری محوری پوسته جریانی در حول الکتروود داخلی (عموماً آند) جاروب می‌شود و سرانجام در نتیجه نیروی به سمت داخل $J*B$ ستون چگالی را تشکیل می‌دهد. این ستون بین $200-50\text{ns}$ (بسته به مشخصات دستگاه) به طول می‌کشد. فاز شعاعی با چگالش سریع پوسته قیفی شکل که تقارن سمتی دارد، به سمت محور دستگاه در اثر نیروی لورنتس شروع می‌شود. فرایند چگالش ستون پلاسما وقتی به اتمام می‌رسد که ستون به شعاع کمینه ($r=r_{\min}$) و در نتیجه چگالی بیشینه (10^{19}cm^{-3}) برسد [۴]. مشخصات خازن مورد نظر ما برای شارژ این دستگاه $L=110\text{nH}$ ، $V=16\text{kV}$ ، و $C=36\mu\text{f}$ است. مقادیر بهینه طراحی (ارتفاع الکتروود مرکزی (Z)، ارتفاع عایق (L)، شعاع آند (a) و فاصله مرکز الکتروود مرکزی از الکتروود جانبی دستگاه (b))، را با حل معادلات فازهای محوری و شعاعی با استفاده از نرم افزار MATLAB محاسبه نموده ایم و مقادیر عددی حاصله در جدول (۱) نشان داده شده‌اند. شمایی از ساختار دستگاه را در شکل (۲) نشان داده ایم. در این جدول P و T ، I_{\max} ، t_{qt} ، t_0 ، r_{pinch} به ترتیب شعاع کمینه ستون پینچ، زمان رسیدن جریان به پیک نخست، جریان بیشینه در انتهای فاز محوری، دمای تقریبی ستون پلاسما چگال و فشار اعمال شده می‌باشند.



شکل (۲): ساختار دستگاه پلاسما کانونی نوع مدر

| | | |
|---------------------------|--------------------------|---|
| $L_0=110\text{NH}$ | $C_0=36\mu\text{F}$ | $V_0=16\text{KV}$ |
| $a=0.015\text{m}$ | $b=0.0471$ | $Z_0=0.15$ |
| $t_0\approx 250\text{ns}$ | $t_{qt}=2.84\mu\text{s}$ | $r_{\text{pinch}}\approx 0.001\text{m}$ |
| $P=3\text{torr}$ | $I_{\max}=0.25\text{MA}$ | $T\approx 2.0075 \times 10^8\text{ }^\circ\text{C}$ |

جدول ۱: پارامترهای محاسبه شده اساسی حاکم بر عملکرد دستگاه

۴- نیروی پیشران پلاسمایی در فاز شتاب گیری محوری

در این فاز لایه جریان پلازما از الکتروود مرکزی (آند) دستگاه به سمت کاتد حرکت کرده ($J(r)$) و میدان مغناطیسی حاصله ($B(\theta)$)، نیروی بالابری لورنتس را به وجود می آورد که موجب رانش پوسته جریان پلازما به سمت انتهای الکتروود آند می گردند. میدان مغناطیسی حاصل از چگالی جریان شعاعی به صورت $\vec{J} = J_0 \sin(\pi/2t_{qt}) e_r$ می باشد که t_{qt} زمان رسیدن لایه جریان پلازما به پیک اول حاصل از تخلیه خازن است. بنابراین نیروی لورنتس حاصل از $J(r)$ و $B(\theta)$ با استفاده از قانون بیو و ساوار و انتگرال گیری از زمان آغاز فاز محوری (زمان اتمام فاز شکست: t_0) تا t_{qt} برابر است با:

$$F_{1L} = \frac{\mu_0 J_0^2}{8\pi} \left\{ 1 - \frac{t_{qt}}{\pi(t_{qt} - t_0)} \sin\left(\frac{\pi t_0}{t_{qt}}\right) \right\} \quad (1)$$

از سوی دیگر نیروی حاصل از اختلاف فشار هیدرودینامیکی حرکت لایه جریان پلازما که در حین حرکت به سوی انتهای الکتروود مرکزی گاز درون محفظه دستگاه را جاروب و یونیزه می کند، به صورت زیر است:

$$F_{1p} = P \cdot \pi a^2 (c^2 - 1), c = b/a \quad (2)$$

که a, b به ترتیب شعاع الکتروود آند و کاتد هستند.

۵- نیروی پیشران پلاسمایی در فاز چگالش محوری

پس از رسیدن لایه جریان پلازما به انتهای الکتروود آند، نیروی لورنتس موجب تراکم پوسته جریان از $r = a$ تا شعاع پینچ پلازما (تراکم بیشینه ستون پلازما) $r = r_{pinch}$ می گردد. مشابه فاز محوری مقدار نیروی لورنتس حاصله از چگالی جریان در فاز چگالش محوری (J_{pinch}) و میدان مغناطیسی ($\vec{B} = \frac{\mu_0 J_{pinch}}{2\pi r}, (r_{pinch} < r < a)$) برابر است با:

$$F_{2L} = \frac{\mu_0 J_{pinch}^2}{4\pi(a - r_{pinch})} \{ a - r_{pinch} (\ln(b.r_{pinch}) + 1) \} \quad (3)$$

نیروی حاصله از فشار هیدرودینامیکی در حین فاز چگالش محوری در اثر حرکت لایه جریان پلازما به سمت محور الکتروود و اختلاف فشار عقب و جلوی این لایه برابر است با:

$$F_{2p} = \frac{\pi P}{(a - r_{pinch})} \left\{ \frac{2a^3}{3} - a^2 r_{pinch} - \frac{r_{pinch}^3}{3} \right\} \quad (4)$$

۶- نیروی پیشران پلاسمایی پس از تشکیل پینچ چگال پلازما

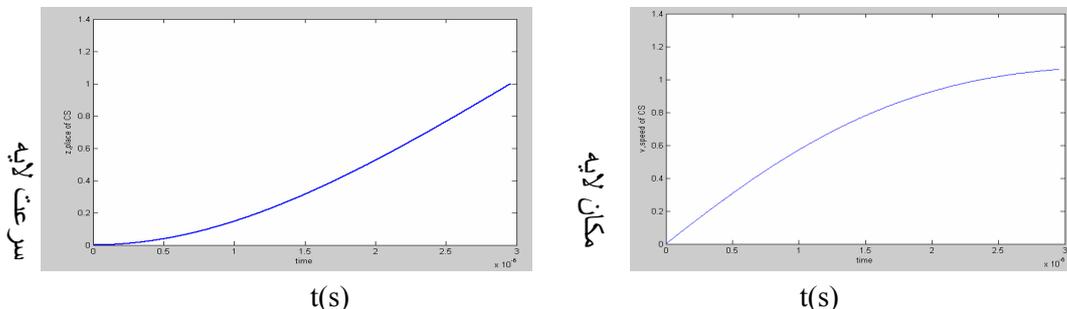
با توجه به اینکه تشکیل پینچ چگال پلاسمای کانونی در بازه زمانی بسیار کوتاهش از تحرک اندکی برخوردار است، از نیروی لورنتس حاصله می‌توان صرف‌نظر کرد. پس از تشکیل پینچ بر اساس معادله بنت برای پینچ پلاسمای چگال، نیروی حاصل از فشار هیدرودینامیکی پلازما برابر است با:

$$F_{3p} = NkT \quad (5)$$

که N چگالی و T دمای پلازما می‌باشد.

۷- محاسبه نیروی پیشران پلاسمایی فازهای عملکرد دستگاه

با استفاده از معادلات (۵-۱) و مقادیر حاصله در جدول (۱)، می‌توان نیروی پیشران هریک از فازها را محاسبه نمود. برای محاسبه معادله (۵) چگالی پلازما را داخل محفظه دستگاه $N=10^{20}/\text{cm}^3$ اختیار کرده ایم و برای محاسبه چگالی جریان (J) با توجه به شکل (۲) از رابطه $J = I_{\max} / \pi(b^2 - a^2)$ استفاده می‌کنیم. نیروی پیشران هریک از فازها را در جدول (۲) نشان داده ایم. در شکل (۳) منحنی شبیه سازی شده مکان و سرعت لایه جریان پلازما در هر پالس عملکرد سیستم را توسط نرم افزار MATLAB محاسبه و رسم نموده ایم.



شکل (۳): تحولات مکان و سرعت لایه جریان پلازما در فاز شتابگیری محوری بر حسب

پارامترهای بدون بعد (Z_0 و v_0) به ترتیب طول الکتروود آند و سرعت لایه جریان در پایان فاز

محوری هستند)

با استفاده از معادلات بدست آمده نیروی پیشران پلاسمایی در هریک از فازهای عملکرد سیستم را با استفاده از نرم افزار مطلب تعیین کرده ایم. البته با توجه به اینکه کل فرایند تخلیه ولتاژ در سیستم تا تخریب پینچ و تحرک نیروی پیشران در بازه زمانی بسیار کوتاهی به وقوع می‌پیوندد، می‌توان مسئله را مستقل از

زمان و میانگینی از تمامی پالس های کاری سیستم در نظرگرفت. مقادیر عددی بدست آمده برای هریک از فازها در جدول(۲) ارائه گردیده است.

| نیروی کل پیشران | فاز تشکیل پینچ چگال | فاز چگالش محوری | فاز شتابگیری محوری |
|------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| $F \approx 105803 \text{ N}$ | $F_3 \approx 938 \text{ N}$ | $F_2 \approx 73140 \text{ N}$ | $F_1 \approx 31725 \text{ N}$ |

جدول(۲): نیروی پیشران فازهای دستگاه پلاسمای کانونی

۸- جرم لایه جریان پلاسمای کانونی بر مبنای سیستم مولد نیروی پیشران

نیروی پیشران محاسبه شده در فازهای مختلف عملکرد سیستم را در رابطه $m = F\Delta t / \Delta v$ که Δv سرعت لایه جریان، Δt زمان حرکت و m جرم لایه جریان در هر پالس کاری می باشند، قرار داده و با توجه به محاسبه نظری سرعت لایه جریان در فازهای مختلف عملکرد سیستم، جرم لایه جریان را بدست می آوریم. در جدول (۳) مقادیر محاسبه شده سرعت لایه جریان و زمان استمرار هر یک از فازهای عملکرد سیستم که توسط نرم افزار MATLAB بدست آمده اند، درج شده است و با استفاده از جدول(۲)، جرم لایه جریان پلاسمای در هریک از فازها بدست آمده اند.

| فاز عملکرد | Δv (cm/ μ s) | Δt (μ s) | m (kg) |
|---------------------|-----------------------------|--------------------------|-------------|
| فاز شتابگیری محوری | 8.8072 | 2.84 | 1.023 e-6 |
| فاز چگالش محوری | 36.6217 | 0.0973 | 1.6436e-8 |
| فاز تشکیل پینچ چگال | 93.5593 | 0.0496 | 4.972 e-11 |

جدول(۳): برآورد جرم لایه جریان پلاسمای در هریک از فازهای عملکرد دستگاه

پلاسمای کانونی

۹- نتیجه گیری

نتایج حاصله از مولدهای متداول پلاسمایی به مقدار نیروی پیشران بیشتری می انجامد [۵]، ولی مزیت دستگاه پلاسمای کانونی آن است که نیروی حاصله را در بازه زمانی بسیار کوتاه تری نسبت به مولدهای متداول پلاسمایی بدست می دهد و با هر پالس کاری از دستگاه پلاسمای کانونی انتظار چنین نیروی پیشرانی

را داریم و طبق محاسبات انجام شده، امکان استفاده از این ساختار به عنوان مولد نیروی پیشران امکان پذیر می باشد. در سیستم مورد مطالعه ($V=16kV, L=110nH, C=36\mu f$) نیروی کل پیشران برابر با $F \approx 105803N$ در هر پالس کاری بدست خواهد آمد و برای صنعتی کردن این سیستم لازم است قابلیت تکرار شونده (آهنگ بالای PRF) عملکرد در آن افزایش داده شود. به علت کاربردی شدن دستگاه های پلاسمای کانونی به عنوان سیستم های مولد اشعه ایکس سخت، بهبود قابل توجهی در قابلیت تکرار شونده در عملکرد آنها صورت پذیرفته است. در پژوهش های آتی طراحی های ویژه ای با توجه به نیروی محرک مورد نیاز سیستم های مختلف ارائه خواهد گردید.

۱۰- مراجع

- [۱]- J.W. Mather, "Investigation of the high energy acceleration mode in the coaxial gun," *Phys. Fluids Suppl.*, vol. 7, 1964
- [۲] Leopoldo Soto; New trends and future perspectives on plasma focus Research; *Plasma Phys and Controlled Fusion*, 47 (2005) A361–A381, IOP Publishing
- [۳] R.Tomas, and etc; Advancements in DPF for Space propulsion; "Space Technology and Applications International Forum-STAIF2005 "
- [۴] S. Lee; A Sequential Plasma Focus; "IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE", VOL. 19, NO. 5, OCTOBER 1991
- [۵] E.J.Lerner, Plasma Propulsion in Space, "American Institute of Physics", october2000