

بررسی نظری اثر پارامترهای اولیه بر زمان تنگش و جریان تخلیه در دستگاه پلاسمای کانونی دنا

محمد- امیر حمزه تفرشی

چکیده: این اولین باری است که مدل نظری ML به طور کامل در یک مقاله توضیح داده می‌شود. سپس نتایج حاصل از بررسی نظری تاثیر ولتاژ تخلیه، نوع گاز و فشار گاز بر زمان تنگش و جریان تخلیه در دستگاه پلاسمای کانونی دنا ارائه می‌گردد. نتایج این بررسی چگونگی و میزان تاثیر تغییرات در سه پارامتر فوق را نشان می‌دهد. به صورت کلی می‌توان گفت که افزایش فشار گاز، منجر به افزایش جریان و زمان تنگش می‌شود. افزایش ولتاژ تخلیه، منجر به افزایش جریان اما کاهش زمان تنگش و استفاده از گاز سنگین تر منجر به افزایش جریان و افزایش زمان تنگش می‌شود.

واژه های کلیدی: پلاسمای، تنگش، کانونی، فیلیپوف، نوترون، گداخت.

۱- مقدمه

دستگاه های پلاسمای کانونی بر اساس تخلیه الکتریکی تپی در گازها عمل می نمایند. جریان الکتریکی حاصل از تخلیه منجر به یونیزه شدن گاز و تولید لایه ای از پلاسمای می شود. پلاسمای تولید شده توسط میدان مغناطیسی ناشی از خود جریان محاصره می شود. ساختار هندسی سیستم به گونه ای است که پلاسمای محاصره شده به سمت یک نقطه رانده شده و در آن به شدت تحت فشار قرار می گیرد. این فشار به حدی است که منجر به تولید پلاسمای داغ و چگال با طول عمری حدود ۵۰ نانو ثانیه می شود. پلاسمای فشرده شده می تواند باعث تولید پرتوهای ایکس و یونی پرنانژی و نیز انجام گداخت هسته ای و به دنبال آن آزاد شدن نوترون های پرنانژی شود. سهولت نسبی ساخت، ارزانی قیمت، شار زیاد، تنوع پرتوها، شدت زیاد و نیز زمان کم پرتو دهی،

سیستم های پلاسمای کانونی را مستعد کاربردهای نسبتا زیادی در زمینه های پژوهشی مثل گداخت هسته ای، فیزیک پلاسمای، فیزیک تنگش و یا زمینه های کاربردی به عنوان چشمه پرتوهای ایکس نرم، ایکس سخت، نوترون، و یون می نماید. با توجه به نکات فوق، در دهه های اخیر تحقیقات نظری و عملی گسترده ای در گوشه و کنار دنیا در رابطه با سیستم های پلاسمای کانونی صورت گرفته و ادامه دارد.

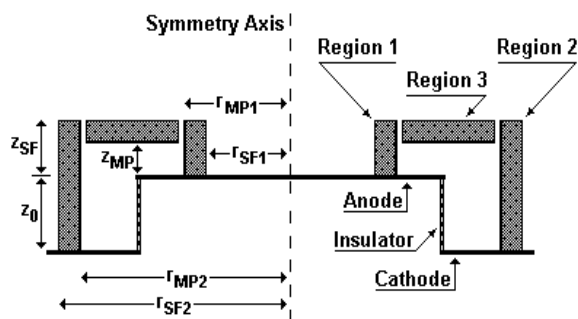
اولین دستگاه پلاسمای کانونی [۱]، در سال ۱۹۶۲ در کشور شوروی آن زمان توسط پژوهشگری به نام فیلیپوف ساخته شد و به نام دستگاه نوع فیلیپوف شهرت یافت. در سال ۱۹۶۴ نیز در آمریکا توسط پژوهشگری به نام مدر^۲، نوع دیگری از دستگاه پلاسمای کانونی ساخته شد [۲] که به نام نوع مدر شهرت یافت. علیرغم متفاوت بودن شکل محفظه گاز این دو نوع، در هر دوی آن ها پلاسمای کانونی شده و تحت فشار قرار می گیرد. در بهار سال ۱۳۷۹، اولین دستگاه پلاسمای کانونی ایران به اسم دنا در سازمان انرژی اتمی ایران راه اندازی شد [۳] و به دنبال آن با

محمد- امیر حمزه تفرشی: (دانشیار) پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، پژوهشکده فیزیک پلاسمای و گداخت هسته ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران، صندوق پستی ۱۳۳۹-۱۴۱۵۵، mtafreshi@aeoi.org.ir

سانتیمتر، بانک خازنی ۲۸۸ میکروفاراد با حدود ۴۰ نانو هانری اندوکتانس و بیشینه ولتاژ ۲۵ کیلوولت. در ایران، در سال ۱۳۸۴ مدلی نظری تحت عنوان مدل ML جهت تعریف رفتار پلاسما در سیستم‌های پلاسما کانونی نوع فیلیپوف طراحی شده و به مجامع بین المللی معرفی گردید [۴]. مدل ML رفتار پلاسما در سیستم‌های پلاسما کانونی نوع فیلیپوف را به صورت نظری تعریف می‌نماید. در این مقاله با استفاده از مدل ML و پارامترهای ساختاری سیستم دنا، تاثیر نوع گاز، ولتاژ تخلیه و فشار گاز بر زمان رویدادن تنگش و نیز جریان کل مدار دنا، مورد بررسی قرار گرفته است. ضمن آن که برای اولین بار محاسبات دقیق چگونگی طراحی مدل ML نیز ارائه می‌گردد.

۲- روش محاسبه

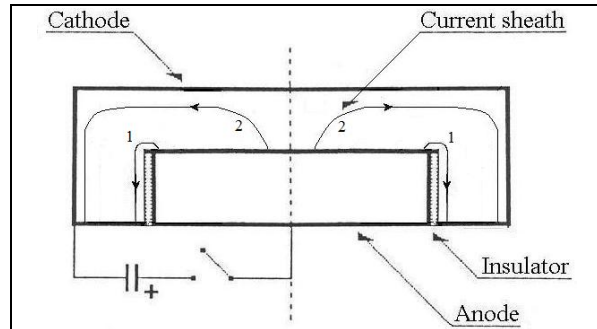
۲-۱- مدل ML



شکل ۲- نمای شماتیک لایه پلاسما در مدل ML.

مدل ML برای بررسی رفتار پلاسما در دستگاه‌های پلاسما کانونی نوع فیلیپوف تعریف شده است. پس از شروع تخلیه الکتریکی، شکست گاز در کل سطح عایق استوانه ای اتفاق می‌افتد و لایه ای متقارن از جریان الکتریکی I_{cs} تشکیل می‌شود. تشکیل لایه جریان، منجر به تولید یک میدان مغناطیسی سمتی می‌شود که از پشت به لایه جریان فشار آورده و قسمت های مختلف آن را به حرکت وامیدارد. در این حالت، لایه جریان به مانند یک پیستون مغناطیسی

توجه به این که دستگاه دنا از نوع فیلیپوف است، پژوهش در زمینه سیستم های پلاسما کانونی نوع فیلیپوف شدت گرفت.



شکل ۱- نمای شماتیک دستگاه های پلاسما کانونی نوع فیلیپوف.

شکل (۱) نمای شماتیک دستگاه‌های پلاسما کانوی نوع فیلیپوف و نیز لایه جریان آن ها را نشان می دهد. با بسته شدن کلید، ولتاژ بانک خازن (در حد چند کیلو ولت) به الکترودها اعمال می‌گردد. اعمال این ولتاژ باعث پیدایش میدان الکتریکی در فضای بین الکترودها می‌شود. در اثر این میدان، تخلیه الکتریکی در گاز داخل محفظه و از روی سطح عایق شروع شده و لایه‌ای از جریان در مجاورت سطح عایق تشکیل می‌شود (شکل ۱، وضعیت ۱). پس از تشکیل شدن، لایه جریان شروع به حرکت کرده و در حین حرکت پلاسما محصور شده را تحت فشار قرار می‌دهد (شکل ۱، وضعیت شماره ۲). حرکت لایه به قدری ادامه می‌یابد تا پلاسما در یک نقطه در روی سطح آند جمع شده و به شدت تحت فشار قرار گیرد. به این ترتیب پلاسما داغ و چگالی به وجود آید که منشا تولید پرتوهای پر قدرت می‌باشد.

مشخصات دستگاه دنا [۳] عبارتند از: آند صفحه‌ای مدور از جنس مس و به قطر ۵۰ سانتیمتر، عایق استوانه‌ای توخالی از جنس سرامیک به ارتفاع ۱۲ سانتیمتر و قطر خارجی ۴۸ سانتیمتر، دیواره‌های کاتد از جنس فولاد ضد زنگ با قطر داخلی ۷۱/۵

$$p_m = \frac{B^2}{2\mu_0} = \frac{\mu_0}{8\pi^2} \cdot \frac{I_{CS}^2}{r_p^2} \quad (۳)$$

در طول حرکت لایه جریان، بخشی از جریان روی سطح عایق باقی می ماند. بنابراین جریان لایه، قسمتی از جریان کل مدار I می شود. به عبارت دیگر $I_{CS} = f_i I$ ، که پارامتر $f_i < 1$ فاکتور جریان موثر نامیده می شود.

۲-۲- بررسی حرکت پلاسمای ناحیه ۱

فشار بین دو طرف لایه اسلاگ (بین پیستون مغناطیسی و جبهه موج ضربه) یکنواخت فرض می شود. به عبارت دیگر فرض می شود که $p_m = p_s = p$ و بنابراین با استفاده از روابط ۱ و ۳ می توان سرعت موج ضربه را بدست آورد.

$$\dot{r}_{s1} = - \frac{f_i I}{4\pi r_{p1}} \left[\frac{\mu_0(\gamma+1)}{f_m \rho_0} \right]^{1/2} \quad (۴)$$

در رابطه فوق پارامتر $f_m < 1$ فاکتور موثر جرم نامیده می شود. استفاده از فاکتور موثر جرم به این دلیل می باشد که جرم محاصره شده در داخل لایه اسلاگ، می تواند کمتر از مقدار مورد انتظاری باشد که از چگالی اولیه گاز به دست می آید. وجود علامت منفی در رابطه فوق نیز به دلیل جهت حرکت موج ضربه است که به سمت محور می باشد. مشتق از قانون انبساط بی دررو ($PV^\gamma = cte$) منجر به رابطه زیر می شود:

$$v^\gamma dp + p\gamma v^{\gamma-1} dv = 0$$

و تقسیم رابطه فوق بر v^γ خواهد داد:

$$\frac{dp}{p} + \gamma \frac{dv}{v} = 0 \quad (۵)$$

در این رابطه v حجم اسلاگ و γ نسبت ظرفیت گرمایی ویژه می باشد. برای استفاده از رابطه ۵، باید مقادیر $\frac{dp_1}{p_1}$ و $\frac{dv_1}{v_1}$ تعیین شوند. با استفاده از روابط ۱ و ۳، مقدار $\frac{dp_1}{p_1}$ به صورت زیر بدست می آید:

عمل کرده و در حین حرکت پلازما را نیز در جلوی خود جمع آوری می کند.

همانطور که در شکل (۲)، نشان داده شده است، از نظر نوع حرکت، می توان لایه جریان را به سه ناحیه تقسیم کرد. ناحیه ۱ که حرکتی شعاعی به سمت محور دارد. این حرکت موجب فشردگی پلازما به طرف محور دستگاه می شود. ناحیه ۲ که حرکتی شعاعی به سمت خارج دارد و ناحیه ۳ که حرکتی محوری در طول محور Z دارد. در شکل (۲)، موقعیت لایه جریان (یا پیستون مغناطیسی) با Z_p, r_{p2}, r_{p1} مشخص شده است (اندیس های ۱، ۲ و ۳ نواحی مختلف را مشخص می نمایند).

از طرف دیگر، به دلیل افزایش نسبتاً سریع میدان مغناطیسی، موجی ضربه ای تشکیل می شود که در پیشاپیش پیستون مغناطیسی در محفظه پیش می رود. این موج با سرعتی بیشتر از سرعت پیستون مغناطیسی حرکت کرده و به ذرات در پیش روی خود انرژی می دهد. به ترتیب فوق لایه ای از پلازما بین پیستون مغناطیسی و جبهه موج ضربه شکل می گیرد که به آن لایه اسلاگ^۱ می گویند. در شکل (۲)، موقعیت جبهه موج ضربه با r_{s2}, r_{s1} و Z_s مشخص شده است. با استفاده از تئوری موج ضربه، فشار ناشی از موج ضربه را می توان محاسبه کرد [۴]:

$$p = \frac{2}{\gamma+1} \rho_0 \dot{r}_s^2 \quad (۱)$$

در رابطه فوق r_s شعاع جبهه موج ضربه، چگالی اولیه گاز و γ ظرفیت گرمایی ویژه می باشند. میدان مغناطیسی ناشی از پیستون مغناطیسی (یا لایه جریان، I_{CS}) نیز برابر می شود با:

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi r_p} I_{CS} \quad (۲)$$

با استفاده از رابطه فوق، می توان فشاری که پیستون مغناطیسی بر لایه اسلاگ وارد می کند p_m را به دست آورد:

^۱ - Slug

با استفاده از رابطه مربوط به حجم اسلاگ و جایگذاری عبارات ۶ و ۷ در عبارت ۵، سرعت پیستون مغناطیسی نیز به صورت زیر بدست می آید:

$$\dot{r}_{p1} = \left(\frac{2r_{s1}}{(\gamma+1)r_{p1}} \dot{r}_{s1} - \frac{r_{p1}}{\gamma l} \left(1 - \frac{r_{s1}^2}{r_{p1}^2} \right) i \right) * \left[\frac{\gamma-1}{\gamma} + \frac{r_{s1}^2}{\gamma r_{p1}^2} \right]^{-1} - \frac{r_{p1}}{(\gamma+1)z_s} \left(1 - \frac{r_{s1}^2}{r_{p1}^2} \right) \dot{z}_s * \left[\frac{\gamma-1}{\gamma} + \frac{r_{s1}^2}{\gamma r_{p1}^2} \right]^{-1} \quad (۸)$$

به این ترتیب روابط (۴ و ۸) بیان کننده سرعت موج ضربه و سرعت پیستون مغناطیسی (یا سرعت لایه جریان) در ناحیه ۱ می باشند.

۲-۳- بررسی حرکت پلاسمای ناحیه ۲

طی روندی مشابه روند مربوط به ناحیه ۱، سرعت موج ضربه در این ناحیه نیز به صورت زیر دست می آید.

$$\dot{r}_{s2} = \frac{f_i I}{4\pi r_{p2}} \left[\frac{\mu_0(\gamma+1)}{f_m \rho_0} \right]^{1/2} \quad (۹)$$

با در نظر گرفتن Z_0 به عنوان ارتفاع عایق (شکل ۲)، می توان حجم اسلاگ، افزایش موثر حجم، و سرعت پیستون مغناطیسی را به ترتیب زیر به دست آورد.

$$v_2 = \pi(r_{s2}^2 - r_{p2}^2)(Z_0 + z_s) \\ dv_2 = -2\pi \left[\left(r_{p2} dr_{p2} - \frac{2r_{s2}}{\gamma+1} dr_{s2} \right) * (Z_0 + z_s) + \frac{r_{p2}^2 - r_{s2}^2}{\gamma+1} dz_s \right] \quad (۱۰)$$

$$\dot{r}_{p2} = \left(\frac{2r_{s2}}{(\gamma+1)r_{p2}} \dot{r}_{s2} - \frac{r_{p2}}{\gamma l} \left(1 - \frac{r_{s2}^2}{r_{p2}^2} \right) i \right) * \left[\frac{\gamma-1}{\gamma} + \frac{r_{s2}^2}{\gamma r_{p2}^2} \right]^{-1} - \frac{r_{p2}}{(\gamma+1)z_s} \left(1 - \frac{r_{s2}^2}{r_{p2}^2} \right) \dot{z}_s * \left[\frac{\gamma-1}{\gamma} + \frac{r_{s2}^2}{\gamma r_{p2}^2} \right]^{-1} \quad (۱۱)$$

۲-۴- بررسی حرکت پلاسمای ناحیه ۳

در این حالت، به دلیل روند افزایشی $(r_{p1}-r_{p2})$ پهنای این ناحیه افزایش می یابد. این افزایش پهنای

$$\frac{dp_1}{p_1} = \left[\frac{2\rho_0}{\gamma+1} (2\dot{r}_{s1}) d\dot{r}_{s1} \right] * \left(\frac{2\rho_0}{\gamma+1} \dot{r}_{s1}^2 \right)^{-1} \\ = 2 \frac{d\dot{r}_{s1}}{\dot{r}_{s1}}$$

$$\frac{d\dot{r}_{s1}}{\dot{r}_{s1}} = \frac{-1}{4\pi} \left[\frac{\mu_0(\gamma+1)}{f_m \rho_0} \right]^{1/2} * \left(\frac{r_{p1} dI_{cs} - I_{cs} dr_{p1}}{r_{p1}^2} \right) * \left\{ -\frac{1}{4\pi} \left[\frac{\mu_0(\gamma+1)}{f_m \rho_0} \right]^{1/2} \frac{I_{cs}}{r_{p1}} \right\}^{-1}$$

$$\frac{dp_1}{p_1} = 2 \left(\frac{dI_{cs}}{I_{cs}} - \frac{dr_{p1}}{r_{p1}} \right) \quad (۶)$$

حال با توجه به رابطه (۵) باید ترم $\frac{dv_1}{v_1}$ محاسبه شود. مقدار dv_1 با مشتق گیری از رابطه زیر (مربوط به حجم لایه اسلاگ) بدست می آید.

$v_1 = \pi(r_{p1}^2 - r_{s1}^2)z_s$ که در آن Z_s ارتفاع لایه اسلاگ است. چون سرعت موج ضربه بیشتر از سرعت پیستون مغناطیسی است، بنابراین همزمان با پیشرفت موج ضربه، حجم اسلاگ نیز افزایش می یابد. از طرف دیگر اضافه شدن جرم جدید به لایه اسلاگ نیز موجب افزایش حجم اسلاگ خواهد شد. بنابراین افزایش حجم فقط به تغییرات شعاع موج ضربه dr_s بستگی نداشته بلکه به میزان افزایش جرم اسلاگ نیز بستگی پیدا می کند. برای منظور کردن این موضوع، می توان به جای dr_s یک افزایش شعاع موثر $\frac{2dr_s}{\gamma+1}$ را در نظر گرفت [۵ و ۶]. به این ترتیب مشتق گیری از حجم اسلاگ منجر به رابطه زیر می شود:

$$dv_1 = 2\pi \left[\left(r_{p1} dr_{p1} - \frac{2r_{s1}}{\gamma+1} dr_{s1} \right) z_s + \frac{r_{p1}^2 - r_{s1}^2}{\gamma+1} dz_s \right] \quad (۷)$$

شدنش می‌باشد [۷]. به این ترتیب می‌توان رابطه زیر را برای سرعت موج ضربه منعکس شده تعریف کرد.

$$\dot{r}_{sr} = -0.3 \dot{r}_{s1} |_{on-axis} \quad (17)$$

پس از انعکاس موج ضربه، لایه جریان همچنان به حرکتش به سمت داخل ادامه می‌دهد. که البته در تناقض با مدل اسلاگ می‌باشد، چون در مدل اسلاگ، موج ضربه در پیشاپیش پیستون مغناطیسی باید حرکت کند.

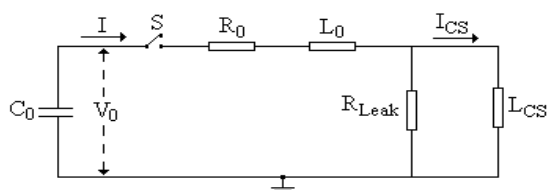
در این حالت همانند مدل Lee می‌توان عمل کرد. به این ترتیب که فرض کنیم که پیستون مغناطیسی به طور آزادانه حرکت می‌کند تا با ضربه منعکس شده برخورد کند. به عبارت دیگر سرعت پیستون مغناطیسی مستقل از سرعت موج ضربه می‌شود [۵] و [۶]. به همین دلیل در رابطه ۸، سرعت موج ضربه را لحاظ نکرده (صفر در نظر می‌گیریم) و به این ترتیب، سرعت لایه جریان در این مرحله به صورت زیر به دست می‌آید.

$$\dot{r}_{p1} = \left[\frac{\gamma r_{p1}}{(\gamma + 1) z_s} \dot{z}_s + \frac{r_{p1}}{I} \dot{I} \right] \left(\frac{r_{s1}^2}{r_{p1}^2} - 1 \right) *$$

$$\left(\gamma + \frac{r_{s1}^2}{r_{p1}^2} - 1 \right)^{-1} \quad (18)$$

بعد از مدتی موج ضربه منعکس شده با لایه جریان برخورد می‌کند. کمترین شعاع تنگش، شعاعی است که موج ضربه منعکس شده با لایه جریان برخورد می‌کند.

۲-۶- محاسبه جریان الکتریکی



شکل ۳- مدار الکتریکی معادل دستگاه پلاسمای کانونی نوع فیلیپوف.

باعث کاهش پیوسته فشار مغناطیسی p_3 می‌شود. به منظور حل این مشکل، از میانگین فشار در این ناحیه و رابطه ۳ استفاده می‌شود.

$$\bar{p}_3 = \frac{1}{\pi(r_{p2}^2 - r_{p1}^2)} \int_{r_{p1}}^{r_{p2}} p_3 \cdot dr$$

$$\bar{p}_3 = \frac{\mu_0 I_{CS}^2}{4\pi^2(r_{p2}^2 - r_{p1}^2)} \ln \frac{r_{p2}}{r_{p1}} \quad (12)$$

استفاده از رابطه ۱ برای این ناحیه، عبارت زیر را برای فشار به دست می‌دهد:

$$p_3 = \frac{2}{\gamma + 1} \rho_0 \dot{z}_s^2 \quad (13)$$

با استفاده از روابط ۱۲ و ۱۳ سرعت محوری موج ضربه را می‌توان به صورت زیر بدست آورد.

$$\dot{z}_s = \frac{f_{il}}{\pi} \left[\frac{\mu_0(\gamma + 1)}{8f_m \rho_0(r_{p2}^2 - r_{p1}^2)} \ln \frac{r_{p2}}{r_{p1}} \right]^{1/2} \quad (14)$$

حجم اسلاگ این ناحیه به صورت زیر می‌باشد:

$$v_3 = \pi(r_{p2}^2 - r_{p1}^2)(z_s - z_p) \quad (15)$$

با استفاده از رابطه ۵ و روندی که در نواحی دیگر بکار بردیم، سرعت محوری لایه جریان (یا پیستون مغناطیسی) نیز به صورت زیر بدست می‌آید.

$$\dot{z}_p = \frac{z_s - z_p}{\gamma} \left[\frac{2(\gamma - 1)(r_{p2} \dot{r}_{p2} - r_{p1} \dot{r}_{p1})}{r_{p2}^2 - r_{p1}^2} + \left(\frac{\dot{r}_{p2}}{r_{p2}} - \frac{\dot{r}_{p1}}{r_{p1}} \right) \left(\ln \frac{r_{p2}}{r_{p1}} \right)^{-1} + 2 \frac{\dot{I}}{I} \right] + \frac{2\dot{z}_s}{\gamma + 1} \quad (16)$$

۲-۵- اثر بازتاب موج ضربه:

در ناحیه ۱، وقتی موج ضربه به محور تقارن برخورد می‌کند (یعنی Γ_{S1} برابر صفر شود)، به عقب منعکس می‌شود و به این ترتیب یک موج ضربه شعاعی به سمت خارج تشکیل می‌شود. تراکم یون‌های در پیش روی موج ضربه منعکس شده، باعث کاهش سرعت آن می‌شود به نحوی که سرعت موج ضربه منعکس شده کسری (حدود ۰/۳) از سرعت آن در حالت جمع

$$L_{CS} = L_1 + L_2$$

$$L_{CS} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(Z_0 \ln \frac{r_{p2}}{a} + Z_p(t) \ln \frac{r_{p2}}{r_{p1}} \right) \quad (19)$$

در طول حرکت لایه جریان، اندوکتانس آن (L_{CS}) افزایش می یابد. این افزایش، روی جریان مدار و بنابراین سایر پارامترهای لایه جریان اثر می گذارد. با صرف نظر کردن از R_0 و R_{CS} و به کار بردن قانون دوم کیرشهف رابطه زیر بدست می آید:

$$-V_0 + \frac{1}{C_0} \int_0^t Idt + L_0 \frac{d}{dt} I + \frac{d}{dt} L_{CS} I_{CS} = 0 \quad (20)$$

با استفاده از روابط ۱۷ و ۱۸ و همچنین $I_{CS} = f_i I$ می توان رابطه زیر را بدست آورد:

$$i = \left[\frac{2\pi V_0}{\mu_0} - \frac{2\pi}{\mu_0 C_0} \int_0^t Idt - \frac{Z_0 f_i I}{r_{p2}} \dot{r}_{p2} - f_i I Z_p \left(\frac{\dot{r}_{p2}}{r_{p2}} - \frac{\dot{r}_{p1}}{r_{p1}} \right) - f_i I Z_p \ln \frac{r_{p2}}{r_{p1}} \right] * \left[\frac{2\pi L_0}{\mu_0} + f_i Z_0 \ln \frac{r_{p2}}{a} + f_i Z_p \ln \frac{r_{p2}}{r_{p1}} \right]^{-1} \quad (21)$$

به ترتیب فوق روابط (۴، ۸، ۹، ۱۱، ۱۴، ۱۶، ۱۷، ۱۸ و ۲۱) روابط اصلی مدل ML بوده و این مدل را تعریف می نمایند.

۲-۷- شبیه سازی لایه پلاسمای دستگاه دنا

در این قسمت با استفاده از مدل ML، تاثیر پارامترهای اولیه تخلیه (نوع گاز، فشار اولیه گاز و ولتاژ تخلیه) بر کل جریان تخلیه و زمان وقوع تنگش، بررسی می شود. شبیه سازی با فرض استفاده از سه فشار اولیه مختلف (۰/۲، ۰/۶ و ۱ تور)، دو ولتاژ تخلیه متفاوت (۱۲ و ۱۶ کیلوولت) و سه نوع گاز متفاوت (دوتریم، نئون و آرگون) صورت گرفته است. جدول (۱)، شرایط اولیه شبیه سازی را نشان می دهد.

شکل ۳، مدار الکتریکی معادل دستگاه پلاسمای کانونی را نشان می دهد. در این شکل L_0 ، C_0 و R_0 به ترتیب اندوکتانس، ظرفیت و مقاومت دستگاه، R_{CS} ، L_{CS} مقاومت و اندوکتانس لایه جریان و R_{leak} مقاومت نشستی می باشند V_0 نیز ولتاژ بانک خازن است. برای محاسبه اندوکتانس لایه جریان، آن را به دو قسمت تقسیم نموده، اندوکتانس هر قسمت را محاسبه کرده و در نهایت با هم جمع می کنیم.

قسمت اول، اندوکتانس لایه جریان استوانه ای به شعاع داخلی a ، شعاع خارجی r_{p2} و ارتفاع Z_0 (شکل ۲) است که با فرض این که ϕ شار میدان مغناطیسی، و dl جزئی از محیط دایره به شعاع r باشد، به صورت زیر محاسبه می گردد.

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I \rightarrow B = \frac{\mu_0}{2\pi r} I$$

$$\phi = \int B \cdot ds = \iint_{r_{p2}} B \cdot dr \cdot dz$$

$$\phi = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \int_0^{Z_0} dz \int_a^{r_{p2}} \frac{dr}{r}$$

$$\phi = \frac{\mu_0 I}{2\pi} Z_0 \ln \frac{r_{p2}}{a}$$

با توجه به این که اندوکتانس نسبت شار میدان مغناطیسی به جریان می باشد، بنابراین:

$$L_1 = \frac{\mu_0 Z_0}{2\pi} \ln \frac{r_{p2}}{a}$$

قسمت دوم اندوکتانس لایه جریان استوانه ای به شعاع داخلی r_{p1} شعاع خارجی r_{p2} و ارتفاع Z_p (شکل ۲) است که مشابه حالت قبل، به صورت زیر تعریف می شود.

$$\phi = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \int_0^{Z_p(t)} dz \int_{r_{p1}}^{r_{p2}} \frac{dr}{r}$$

$$\phi = \frac{\mu_0 I}{2\pi} Z_p(t) \ln \frac{r_{p2}}{r_{p1}}$$

$$L_2 = \frac{\mu_0}{2\pi} Z_p(t) \ln \frac{r_{p2}}{r_{p1}}$$

بنابراین اندوکتانس کل برابر می شود [۴] با:

ه- صحت موارد فوق به تجربه هم دیده شده‌اند، منتهی نظر به ماهیت این گونه آزمایش‌ها، تعیین دقیق وابستگی‌ها به علت پراکندگی نتایج تجربی به سادگی قابل تشخیص نمی‌باشند.

جدول ۱- شرایط اولیه شبیه سازی.

فاکتور کیفی جرم	$f_m = 0.15$
فاکتور کیفی جریان	$f_i = 0.7$
ظرفیت سیستم	$C_o = 288 (MF)$
اندوکتانس سیستم	$L_o = 37.7 (nH)$
ولتاژ کار	$V_o = 12, 16 (KV)$
فشار اولیه گاز	$P_o = 0.2, 0.6, 1.0 (torr)$
دمای اولیه	$T_1 = 0.026 (ev)$
گام زمانی	$dt = 10 (ns)$
شعاع آند	$a = 25 (cm)$
ارتفاع عایق	$z_0 = 12 (cm)$
جریان اولیه	$I_0 = 4000 (A)$

۳- نتیجه گیری

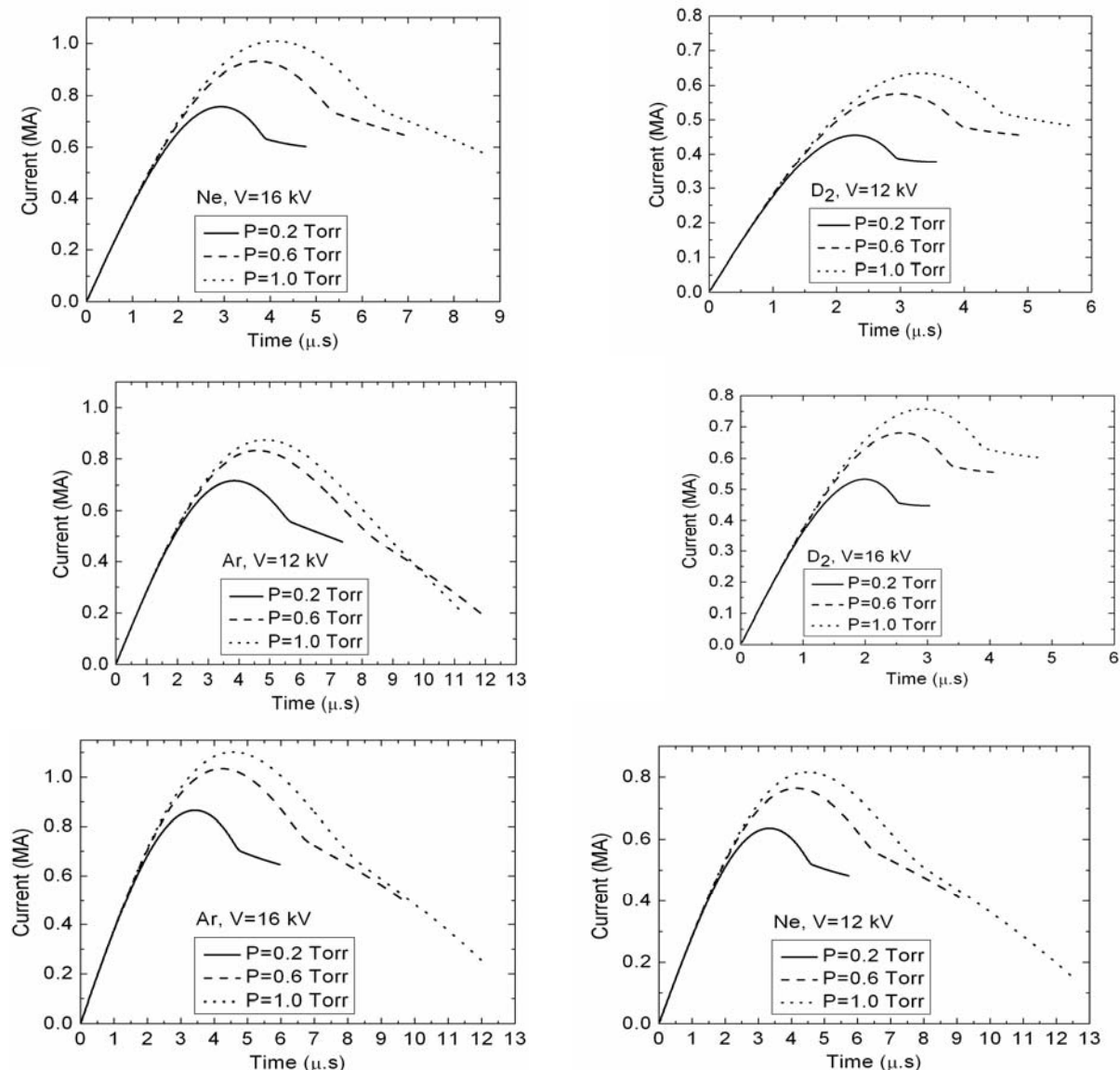
نتایج این بررسی در شکل ۴ نشان داده شده است. منحنی‌های جریان که در این شکل ارائه شده‌اند نشان می‌دهند که در یک لحظه در اواخر زمان تنگش، منحنی جریان دچار شکستگی می‌شود، این لحظه در واقع شروع زمان تنگش بوده و مترادف با لحظه‌ای است که شعاع موج ضربه جمع شونده صفر می‌شود. بررسی منحنی‌های موجود در این شکل نشان می‌دهد که:

الف- افزایش فشار گاز، منجر به افزایش جریان مدار و نیز افزایش زمان تنگش می‌شود.

ب- افزایش ولتاژ تخلیه، منجر به افزایش جریان مدار اما کاهش زمان تنگش می‌شود.

ج- استفاده از گاز سنگین تر منجر به افزایش جریان مدار و افزایش زمان تنگش می‌شود.

د- شکل ۴ همچنین چگونگی و میزان وابستگی‌ها را به وضوح نشان می‌دهد.



شکل ۴- مقایسه جریان های شبیه سازی شده دستگاه تحت سناریوهای مختلف.

مراجع

- [1] Filippov N. V., Filippova T. I., et. al., Nucl. Fusion Suppl. 2, 1962, pp. 77.
- [2] Mather J. W., Phys. Fluids Suppl. 7, 1964, pp. 28.
- [3] Tafreshi M. A., et. al., Dena, a new PF device, Nukleonika 46 (Suppl. 1) S85-7, 2001.
- [4] Siahpoush V., Tafreshi M. A., et. al., Adaptation of Sing Lee's model to the Filippov type plasma focuses geometry, Plasma Phys. Control Fusion 47, 2005, pp.1065.
- [5] Lee S., et. al., A simple facility for the teaching of plasma dynamics and plasma nuclear fusion, Am. J. Phys. 56(1), January 1988.
- [6] Lee S., Proc. 1984 Tropical College on Applied Physics: Laser and Plasma Technology ed. S Lee et al., (Singapore: World Scientific) 1985, pp 387.
- [7] Liu M. H. and Lee S., 25th EPS Conf. on Controlled Fusion and Plasma, Praha, 29 June -3 July 1998.

