



## روشی نوین در بررسی اثر تغییرات اندوکتانس سیستم در پینچ پلازما توسط نرم

### افزار MATLAB

حسین جعفری - مرتضی حبیبی - رضا امراللهی

دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی هسته ای و فیزیک، گروه مهندسی گداخت هسته ای

### چکیده

این مقاله، روش نوینی را برای مدلسازی تخلیه ی الکتریکی در یک دستگاه پلاسمای کانونی ارائه می کند. در این روش با استفاده از پیاده سازی فازهای مختلف دینامیک پلازما در قالب المان های الکتریکی که مقادیرشان وابسته به زمان هستند، اقدام به شبیه سازی مدار تخلیه الکتریکی دستگاه می شود. برای بدست آوردن ورودی های این مدار، از پارامترهای فیزیکی یک دستگاه پلاسمای کانونی بسیار کوچک ۳ ژول که اقدام به طراحی و ساخت آن گردیده شده است، استفاده می شود. در مرحله ی اول شبیه سازی، سیگنال های منطقی و مطابق با نتایج تجربی حاصل شد، سپس به بررسی اثر تغییر اندوکتانس های ثابت و متغیر دستگاه در شکل موج های ولتاژ و جریان تخلیه پرداخته شد

واژه های کلیدی: پلاسمای کانونی، مدار تخلیه ی الکتریکی، اندوکتانس پلازما

### مقدمه

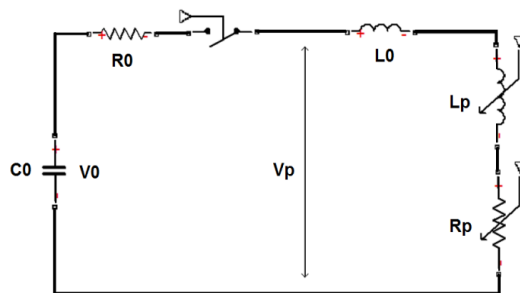
دستگاه پلاسمای کانونی یک چشمه ی پالسی شدیدی از باریکه های الکترونی، یونی، اشعه ایکس و نوترونی (در صورت استفاده از گاز دوتریوم به عنوان گاز کاری) است که برپایه ی واکنش های گداخت گرما هسته ای و باریکه-هدف عمل می کند. این دستگاه قادر است تا با عبور یک جریان بسیار بالا از یک گاز کم فشار و تشکیل یک پلاسمای تنگیده شده در انتهای آند، یک پلاسمای داغ (حدودا ۱ keV) و چگال (حدودا  $10^{20} \text{m}^{-3}$ ) با نیمه عمر کوتاه (در محدوده ی ۱۶-۳۰۰ nsec) [۱] تولید کند. تشکیل این پلاسمای بسیار چگال نیاز به تغییر آنی و بسیار شدید در اندوکتانس پلازما دارد [۲]. این پدیده در طی فازهای مختلف دینامیک پلازما صورت می گیرد. تاکنون هیچ روش خاصی مبتنی بر مدلسازی های شماتیکی یا عددی، به منظور تحلیل چگونگی اثرگذاری تغییرات اندوکتانس دستگاه (اندوکتانس ثابت و اندوکتانس متغیر) بروی سیگنال های ولتاژ و جریان تخلیه ارائه نشده است. اهمیت بررسی این موضوع از آنجا نشأت می گیرد که در طراحی دستگاه های پلاسمای کانونی با انرژی های بسیار پایین، بایستی اندوکتانس قسمت های مختلف دستگاه، بطور بسیار دقیقی پیش بینی شوند تا در هنگام ساخت دستگاه این مقادیر لحاظ گردند، زیرا اولین گام در طراحی یک دستگاه پلاسمای کانونی، تخمین دقیق اندوکتانس کل دستگاه ضروری است تا در نهایت ابعاد دستگاه درست محاسبه شوند. در این مقاله، از پارامترهای الکتریکی و هندسی یک دستگاه پلاسمای کانونی بسیار کوچک با انرژی

۳,۶ ژول، که قبلا طراحی شده است، به منظور یافتن پارامترهای ورودی مدار تخلیه‌ی الکتریکی که قصد شبیه سازی آن می رود، استفاده می شود.

## مدلسازی مدار شبیه سازی

در باتدای مدلسازی، مدار تخلیه‌ی الکتریکی یک دستگاه پلاسمای کانونی که مطابق شکل ۱ می باشد،

نظر گرفته می شود [۳].



شکل ۱: مدار معادل تخلیه‌ی الکتریکی یک پلاسمای کانونی [۳].

سپس با توجه به این نکته که اندوکتانس کل دستگاه از دو اندوکتانس ثابت و متغیر (پلاσμα) تشکیل شده است استفاده می شود و مقادیر ورودی مدار شبیه سازی را بدست می آوریم. اندوکتانس پلاσμα با تغییر موقعیت پلاσμα منجر به ایجاد فازهای مختلف دینامیک پلاσμα می شود. فاز اول دینامیک پلاσμα، فاز پیش-شکست می باشد. این فاز مربوط به ولتاژی است که قبل از وقوع شکست الکتریکی در سیگنال ولتاژ دیده می شود. از سویی دیگر، بدلیل اینکه در عمل تنها کسری از جریان ماکزیمم از پلاσμα عبور می کند، مدار شکل ۱ بایستی توسط یک مقاومت موازی (مقاومت بای-پس) با امپدانس متغیر اصلاح شود [۳]. در صورتی که فاکتور جریان ۰,۶ برای این دستگاه در نظر گرفته شود، مقاومت بای-پس برابر ۲,۲۸ اهم خواهد شد. در فاز بعدی که با عنوان فاز شکست الکتریکی شناخته می شود سه پدیده‌ی شکست الکتریکی، تشکیل پوسته‌ی پلاσμα و نهایتا جدا شدن پوسته از روی عایق اتفاق می افتند. مدت زمانی که طول می کشد تا پوسته‌ی پلاσμα از سطح عایق جدا شود، طبق محاسبات برابر ۱۷ نانو ثانیه محاسبه شد. لازم به ذکر است در هنگام شروع این فاز فضای اطراف آند به شدت یونیزه شده که باعث می شود تا مقاومت الکتریکی پلاσμα سریعاً افت نماید. مقاومت پلاσμα در این فاز با کمک رابطه‌ی زیر قابل محاسبه است [۴]:

$$R_{\text{breakdown}} = \eta_{\text{spitzer}} \frac{L_{\text{ins}}}{\pi(\Delta^2 + \gamma R_{\text{ins}} \Delta)} \quad (3)$$

که  $R_{ins}$  و  $\Delta$  به ترتیب مقاومت اشپایترز، شعاع خارجی عایق دور آند و ضخامت پلاسما در این فاز می باشد. در صورتی که پلاسما دوتریوم در دمای  $2\text{eV}$  کاملاً یونیزه شود، مقاومت پلاسما حدوداً  $1,06$  اهم بدست خواهد آمد. بدلیل میدان مغناطیسی ایجاد شده در اثر عبور جریان الکتریکی از مسیر پلاسما، پوسته ی پلاسما تشکیل شده دارای اندوکتانس در حدود  $17$  نانو هانری می شود که در واقع با توجه به طول کل آند و ابعاد صفحات آند و کاتد تعیین شده است. در طول فاز سوم یعنی فاز محوری، بانک خازنی در حال تخلیه شدن از طریق پوسته ی پلاسما می باشد. بنابراین پوسته ی پلاسما تشکیل شده توسط نیروی لورنتس به سمت انتهای باز آند حرکت داده می شود. در طی این مسیر، با توجه به ابعاد الکترودها، پلاسما دارای اندوکتانس با مقدار  $1,75$  نانو هانری خواهد شد. مدت زمانی که طول می کشد تا این فاز به اتمام برسد، با توجه به سرعت پلاسما [۵] در این فاز و طول آند، برابر  $46,5$  نانو ثانیه محاسبه می شود. مقاومت پلاسما نیز در فاز شتابگیری محوری، می تواند توسط رابطه ی (۴) محاسبه شود [۴]:

$$R_{axial} = \eta_{spitzer} \frac{\ln(r_{out}/r_{in})}{2\pi\Delta} \quad (4)$$

که در آن  $r_{in}$  و  $r_{out}$  به ترتیب شعاع داخلی کاتد و شعاع خارجی آند می باشند. با جاگذاری مقادیر محاسبه شده در رابطه ی (۴)، مقاومت پلاسما در فاز محوری برابر با  $0,55$  اهم بدست می آید. زمانیکه پوسته ی پلاسما به انتهای آند رسید، انتهای باز آند مانع از پیشروی بیشتر پلاسما به سمت بالا می شود که نشان از شروع فاز فروپاشی شعاعی است. در این صورت نیروی  $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$  منجر به منقبض شدن ستون پلاسما می شود [۶]. زمانیکه ستون پلاسما به حداقل مقدار شعاع خود می رسد، در واقع یک ستون پلاسما تنگیده شده ی بسیار داغ و چگال شده است. نتایج آزمایشگاهی از عملکرد دستگاه های پلاسما کانونی حاکی از آن هستند که طول و شعاع ستون پینچ به ترتیب از مرتبه ی  $0,8a$  و  $0,12a$  می باشند [۶]. تحت این شرایط، می توان مقاومت ستون پینچ را با استفاده از رابطه ی (۵) محاسبه نمود که مقداری در حدود  $0,9$  اهم می شود [۴].

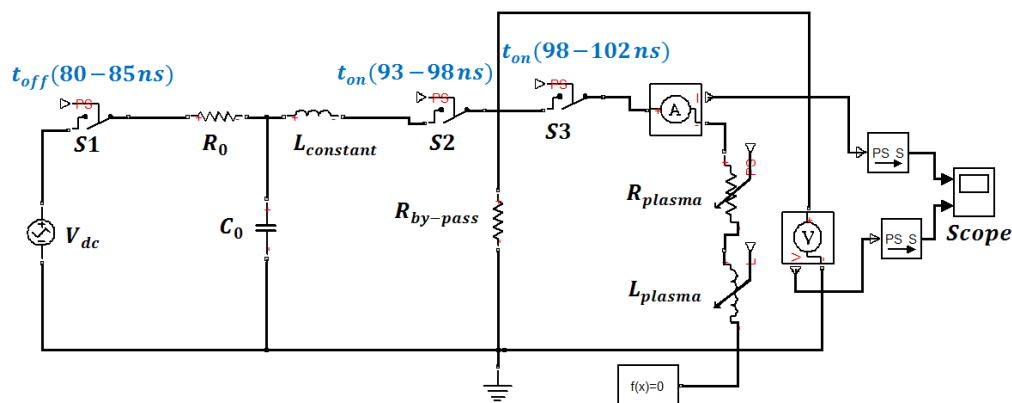
$$R_{pinch} = \eta_{spitzer} \frac{z_{pinch}}{\pi(r_{pinch})^2} \quad (5)$$

با توجه به سرعت پلاسما [۵] در فاز شعاعی، و همچنین ابعادی که ستون پلاسما به خود می گیرد، مدت زمان فاز فروپاشی شعاعی و مقدار اندوکتانس که ستون پلاسما بدست می آورد به ترتیب برابر با  $6,3$  نانو ثانیه و  $1,5$  نانو هانری خواهند شد. در نهایت، ستون پینچ پلاسما در اثر بروز ناپایداری های سوسیسی و کینک دچار پارگی می شود. بعد از هم پاشیدگی ستون پلاسما، یک ابر بسیار داغ و بزرگی حاصل می شود. محاسبات نشان دادند که این اتفاق منجر به کاهش مقاومت الکتریکی پلاسما به مقداری برابر با مقاومت فاز شکست خواهد شد. اندوکتانس پلاسما نیز در نیم سیکل بعدی تخلیه، حدوداً  $4,5$  نانو هانری خواهد شد. به

منظور شبیه سازی مدار تخلیه الکتریکی این دستگاه در محیط **Simulink**، بایستی مقادیر بدست آمده از محاسبات بالا در شبیه سازی اعمال شوند. جهت رسیدن به این مهم، ابتدا بایستی اندوکتانس هر فاز را توسط دو بلوک تابع شیب تعریف نمود. سپس توسط یک بلوک جمع کننده، مقادیر این توابع شیب ها جمع شوند. خروجی بلوک جمع کننده توسط یک بلوک مبدل اطلاعات سیمولینک به اطلاعات فیزیکی به یک اندکتور متغیر متصل می شود. در این صورت، این بلوک بیانگر اندوکتانس متغیر پلاسما خواهد بود. تابع عملکرد این اندکتور متغیر، برپایه ی معادله ی (۶) تعریف شده است، بدیهی است که این المان الکتریکی براحتی می تواند مدلی از عملکرد الکتریکی پلاسمای تولید شده در پلاسمای کانونی باشد. مقاومت متغیر پلاسما نیز به همین ترتیب مدلسازی می گردد.

$$V(t) = L(t)\left[\frac{di(t)}{dt}\right] + i(t)\left[\frac{dL(t)}{dt}\right] \quad (6)$$

مدار خلاصه شده ی مربوط به مدار تخلیه ی الکتریکی که در نرم افزار **Simulink** شبیه سازی شده است، در شکل (۲) مشاهده می شود. مقادیر اعمال شده در مدار شبیه سازی، در جدول ۲ لیست شده اند.

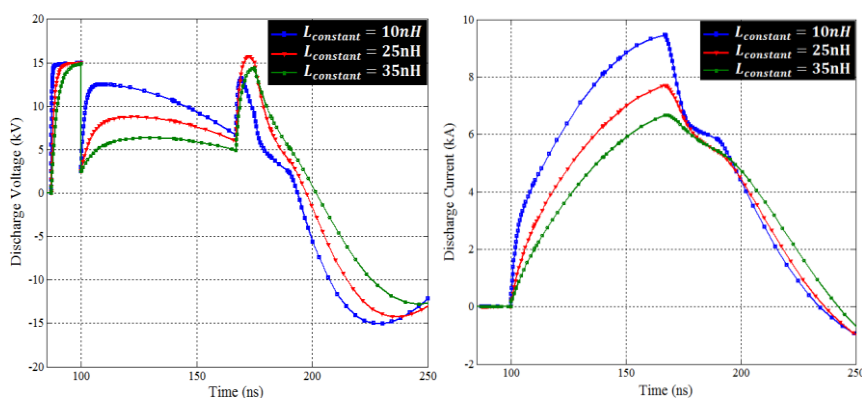


شکل ۲: مدار معادل الکتریکی تخلیه ی مربوط به دستگاه پلاسمای کانونی که در نرم افزار **Simulink** شبیه سازی شده است.

## نتایج شبیه سازی و بحث

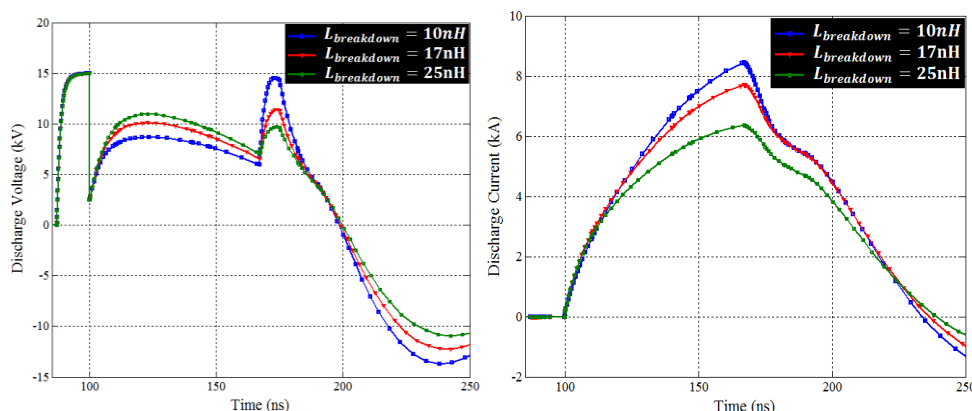
با توجه به دینامیک پلاسما و پارامترهای الکتریکی و هندسی یک دستگاه پلاسمای کانونی بسیار کوچک ۳,۶ ژول، مدلی جهت بررسی اثر تغییرات اندوکتانس سیستم ارائه گردید. شکل ۳ نتیجه ی حاصل از شبیه سازی را برای تغییر در اندوکتانس ثابت دستگاه را (مربوط می شود به اندوکتانس بانک خازنی، سوئیچ اسپارک گپ و اتصالات بین این دو) نشان می دهد. همانطور که از شکل ۳ مشاهده می شود، به ازای اندوکتانس ۱۰ نانوهانری، یک رشد سریعی در سیگنال جریان تخلیه ظاهر شده است که ناشی از کاهش امپدانس مدار می

باشد. سیگنال ولتاژ تخلیه نیز، در طول فاز فروپاشی شعاعی، دارای یک دامنه ی کمتری شده است که نشان از وقوع یک پینچ ضعیف می باشد. اما با افزایش اندوکتانس ثابت دستگاه تا مقدار ۲۵ نانو هانری، یک پینچ تیز بسیار مناسبی ایجاد شده است که نشان از افزایش بازدهی سیستم می باشد. زمانیکه اندوکتانس ثابت دستگاه به ۳۵ نانو هانری می رسد، علی رغم وقوع یک پینچ مناسب، دامنه ی جریان تخلیه، بدلیل افزایش امپدانس مدار کاهش چشمگیری می یابد که باعث کاهش بهره ی تابش های مختلف می شود. با مقایسه ی نتایج شکل ۳ با نتایج تجربی مشاهده شد که سیگنال هایی که از اندوکتانس ۲۵ نانو هانری در شبیه سازی بدست آمد، بسیار شبیه به نتایج تجربی است. بنابراین در طراحی دستگاه ۳،۶ ژول، بایستی اندوکتانس ثابت دستگاه در حدود ۲۵ نانو هانری تخمین زده شود.



شکل ۳: سیگنال های ولتاژ و جریان تخلیه مربوط به اندوکتانس های ثابت ۱۰، ۲۵ و ۳۵ نانو هانری.

اندوکتانس مهم دیگری که نقش مهمی در طراحی دستگاه دارد، اندوکتانس فاز شکست است. شکل ۴ نتایج شبیه سازی را برای اندوکتانس های شکست ۱۰، ۱۷ و ۲۵ نانو هانری نشان می دهد. همانطور که از شکل ۴ مشاهده می شود، به ازای اندوکتانس شکست ۱۰ نانو هانری، سیگنال جریان تخلیه در طول فاز فروپاشی شعاعی دچار یک ریزش بسیار شدیدی شده است که منجر به ایجاد یک افزایش بسیار خوبی در سیگنال ولتاژ تخلیه شده است. از آنجاییکه انرژی انتقالی به پلاسما با ولتاژ تخلیه رابطه ی مسقیم دارد، بنابراین این افزایش ولتاژ باعث افزایش بهره ی تابش های مختلف یعنی نوترون، الکترون و یون و اشعه ی ایکس می شود. اما با توجه به این نکته که ابعاد دستگاه منجر به اندوکتانس شکست ۱۵ تا ۲۵ نانو هانری می شود، اندوکتانس های در این حوالی نیز بررسی شدند. مشاهده می شود که با افزایش اندوکتانس جریان و ولتاژ تخلیه، هر دو در حال کاهش یافتن هستند که این مسئله در طراحی بایستی مدنظر قرار بگیرد. بنابراین، اندوکتانس شکست دستگاه ۳،۶ ژول نیز بایستی در محدوده ی ۱۰ تا ۱۵ نانو هانری انتخاب گردد.



شکل ۴: سیگنال های ولتاژ و جریان تخلیه مربوط به اندوکتانس های ثابت ۱۰، ۲۵ و ۳۵ نانو هنری.

## مراجع

[۱] L. Soto, P. Silva, J. Moreno, M. Zambra, W. Kies, R. E. Mayer, A. Clause, L. Altamirano, C. Pavez, and L. Huerta, "Demonstration of neutron production in a table-top pinch plasma focus device operating at only tens of joules," J. Phys. D, Appl. Phys., vol. ۴۱, no. ۲۰, p. ۲۰۵۲۱۵, Oct.

[۲] S. Lee and A. Serban, "Dimensions and lifetime of the plasma focus pinch," Plasma Science, IEEE Transactions on, vol. ۲۴, pp. ۱۱۰۱-۱۱۰۵, ۱۹۹۶.

[۳] A. Bernard, H. Bruzzone, P. Choi, H. Chuaqui, V. Gribkov, J. Herrera, K. Hirano, A. Krejci, S. Lee, and C. Luo, "Scientific status of plasma focus research," Journal-Moscow physical society, vol. ۸, pp. ۹۳-۱۷۰, ۱۹۹۸.

[۴] F. Veloso, A. Tarife no, C. Pavez, J. Moreno. M. Zambra. and L. Soto, "Plasma sheath kinematics and some implications on the modeling of very low energy plasma focus devices, " Plasma Phys. Control. Fusion ۵۴ (۲۰۱۲) ۰۹۵۰۰۷ (۸pp).

[۵] Soto, C. Pavez, M. Zambra, J. Moreno, A. Clause, and M. Barbaglia, "Nanofocus: An Ultra Miniature Pinch Focus Discharge Operating at ۰,۱ Joule," ۲۰۰۵, pp. ۱۳۶۸-۱۳۷۱.

[۶] S. Lee and A. Serban, "Dimensions and lifetime of the plasma focus pinch," Plasma Science, IEEE Transactions on, vol. ۲۴, pp. ۱۱۰۱-۱۱۰۵, ۱۹۹۶.