

بررسی وابستگی زمان تنگش به فشار گاز
در دستگاه‌های پلاسمای کانونی نوع فیلیپوف

محمد امیرحمزه تفرشی، داریوش رستمی فرد و علی نصیری

پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی

**Investigation of the pinch-time dependence to the gas pressure,
in Filippov type plasma focus devices**

M. A. Tafreshi, D. Rostamifard, A. Nasiri

Institute of Nuclear Science and Technology, AEOI, P.O. Box 14155-1339, Tehran, Iran

PACS Number: ۵۰ و ۲۹ و ۸۹

شماره های تماس موبایل:

- ۱- دکتر تفرشی: ۰۹۱۲-۸۱ ۸۵ ۹۶۵
- ۲- مهندس رستمی فرد: ۰۹۱۲-۸۳ ۰۱ ۱۸۷
- ۳- مهندس نصیری: ۰۹۳۵-۲۴ ۸۹ ۷۳۶

شماره های تماس در محل کار:

- ۱- دکتر تفرشی: ۰۲۱ - ۸۲ ۰۶ ۳۸ ۳۸
- ۲- مهندس رستمی فرد: ۰۲۱ - ۸۲ ۰۶ ۲۳ ۳۸
- ۳- مهندس نصیری: ۰۲۱ - ۸۲ ۰۶ ۳۸ ۴۲

آدرس های ایمیل:

- ۱- Dr. Tafreshi: m_a_tafreshi@yahoo.com and mtafreshi@aeoi.org.ir
- ۲- M.Sc. Rostamifard: dariush_rostami@yahoo.com
- ۳- B.S. Nasiri: nasiri_plasma@yahoo.com

چکیده

این مقاله با استفاده از داده‌های تجربی و شبیه سازی شده دو دستگاه پلاسمای کانونی نوع فیلیپوف با اندازه‌های کوچک و بزرگ، تهیه شده است. در قسمت اول مقاله، موضوع کانونی شدن پلاسمای مطرح گردیده و پارامترهای دو دستگاه معرفی شده‌اند. پس از آن نتایج بررسی‌های تجربی در زمینه وابستگی زمان تنگش پلاسمای به فشار گاز ارائه شده است. در قسمت بعدی مبانی نظری مدل ام-ال مرور شده و سپس نتایج حاصل از کاربرد این مدل در شبیه‌سازی دو دستگاه ارائه شده است. هم نتایج تجربی و هم نتایج شبیه‌سازی نشان دادند که در دستگاه بزرگتر، حساسیت زمان تنگش پلاسمای به تغییرات فشار گاز بوضوح بیشتر است. این پژوهش همچنین نشان داد که احتمالاً پیش بینی‌های مدل ام-ال، برای دستگاه بزرگتر، دقیق‌تر از پیش‌بینی‌های آن برای دستگاه کوچکتر است.

واژه‌های کلیدی: پلاسمای کانونی، فیلیپوف، مدل ام-ال، فشار گاز، زمان تنگش

Abstract:

This paper has been prepared by using experimental and simulated data due to a large and a small Filippov type plasma focus devices. In the first part of the paper, the plasma-focusing phenomenon is introduced and the parameters of the devices are presented. Then the results of empirical studies of the pinch-time dependence to the gas pressure are provided. In the next part, the theoretical basis of the *ML*-model is reviewed and the results of applying this model to simulate the two devices are presented. Both simulated and experimental results showed that in the larger device, the pinch time is clearly more sensitive to the pressure variations. The study also showed that probably the model predictions for larger device are more accurate than the predictions for the smaller device.

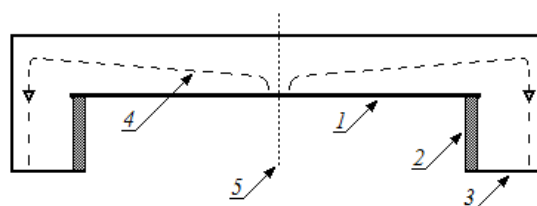
Keywords: Plasma focus, Filippov, ML model, gas pressure, pinch time

۱. مقدمه

دستگاه پلاسمای کانونی، ابزاری پژوهشی در زمینه فیزیک پلاسمای می‌باشد که قادر به گسیل پرتوهای نوترون، الکترون، یون، و ایکس نرم و سخت است. قسمت اصلی این دستگاه، بانک انرژی و محفظه گاز است که آند، کاتد و عایق دیواره‌های آن را تشکیل می‌دهند (شکل ۱). با اعمال اختلاف پتانسیل نسبتاً زیاد (در حد چند کیلوولت) بین آند و کاتد، گاز موجود در داخل

محفظه دچار شکست شده و به دنبال آن لایه‌ای از پلاسما تشکیل می‌شود. این لایه توسط نیروی لورنتس، به سمت محور دستگاه رانده شده و نهایتاً در وسط آند متراکم می‌شود (شکل ۱). این پلاسما متراکم شده که به پلاسما کانونی شده و یا پلاسما تنگیده معروف است، چشمه نسبتاً کوچکی از پرتوهای پرانرژی ایکس، یون و الکترون می‌باشد. در صورت مناسب بودن شرایط، کانونی شدن و یا تنگش پلاسما می‌تواند منجر به انجام گداخت هسته‌ای و گسیل نوترون‌های پرانرژی نیز بشود.

دستگاه‌های پلاسما کانونی در دو مدل تحت عناوین مدل‌های فیلیپوف و مدر طراحی و ساخته می‌شوند که اصول کار هر دو، یکسان، ولی شکل هندسی آنها متفاوت است [۱ و ۲]. تفاوت شکل دو مدل در این است که در نوع فیلیپوف، نسبت منظر (نسبت قطر آند به ارتفاع آن) بیشتر از یک و در نوع مدر کمتر از یک است. این تفاوت باعث می‌شود که در این دو مدل، شکل و مسیر حرکت لایه پلاسما (یا لایه جریان)، متفاوت باشد. قابلیت‌های دستگاه‌های پلاسما کانونی، باعث شده، تا این دستگاه‌ها مورد توجه پژوهشگران رشته‌های مختلف قرار بگیرند [۳]. نمونه‌هایی از این گونه پژوهش‌ها عبارتند از: پژوهش‌های مرتبط با فیزیک پایه، اختر فیزیک و فیزیک موج ضربه [۴ و ۵]، گداخت هسته‌ای با روش محصورسازی لختی [۶]، تامین سوخت سفینه‌های فضائی [۷ و ۸]، پرتونگاری معروف به چاپ سنگی [۹ و ۱۰]، بررسی خواص مواد [۱۱ و ۱۲]، لایه نشانی [۱۳ و ۱۴]، فشرده سازی مواد [۱۵]، و بالاخره بررسی‌های نظری و تجربی در راستای طراحی و ساخت دستگاه‌های پلاسما کانونی بهینه [۱۶-۱۸]. شکل ۱، طرحواره‌ای از دستگاه پلاسما کانونی نوع فیلیپوف را نشان می‌دهد.



شکل ۱- طرحواره‌ای از یک دستگاه پلاسما کانونی نوع فیلیپوف و لایه جریان آن شماره‌های ۱، آند، ۲ عایق، ۳ کاتد، ۴ لایه جریان، و ۵ محور تقارن می‌باشند.

یکی از مهمترین پارامترهای کانونی شدن پلاسما، زمان تنگش پلاسما (یا زمانی که طول می‌کشد تا پلاسما تنگیده شود) است. اهمیت زمان تنگش در آن است که معرف سرعت حرکت لایه پلاسما می‌باشد. کمتر بودن این زمان، نشان‌دهنده سرعت بیشتر حرکت لایه پلاسما و به دنبال آن رویدادن برخورد های قویتر ذرات پلاسما است. این مقاله با استفاده از داده

های تجربی دو دستگاه پلاسمای کانونی تحت عناوین FTPF-۵ و دنا و نیز مدل نظری ام-ال^۱، تهیه شده و در آن رابطه زمان تنگش پلاسمای با فشار گاز، به صورت تجربی و نظری مورد بررسی قرار گرفته است.

۲. معرفی دستگاه‌ها و نتایج تجربی

دستگاه پلاسمای کانونی دنا از روسیه خریداری شده و در سال ۲۰۰۰ در سازمان انرژی اتمی ایران نصب و راه‌اندازی شده است. دستگاه FTPF-۵ نیز در سازمان انرژی اتمی ایران (آزمایشگاه دنا) طراحی و ساخته شده و در سال ۲۰۱۲ راه‌اندازی شده است. جدول ۱، پارامترهای اصلی دو دستگاه را نشان می‌دهد.

جدول ۱- پارامترهای دستگاه‌های FTPF-۵ و دنا.

عنوان	شعاع آند	شعاع کاتد	ارتفاع موثر عایق	جنس عایق	ظرفیت بانک خازنی	اندوکتانس مدار	دوره تناوب تخلیه	بیشینه ولتاژ کاری	بیشینه انرژی
پارامتر	r_a (cm)	r_c (cm)	h_{ins} (cm)	----	C (μF)	L (nH)	T (μs)	V_{max} (kV)	E_{max} (kJ)
FTPF-۵	۵/۳	۸/۳	۱/۹	پیرکس	۲۲/۴	۸۲±۴	۸/۵	۲۲	۵/۴
دنا	۲۵	۳۵/۵	۱۱	سرامیک	۲۸۸	۴۱±۲	۲۱/۶	۲۰	۵۷/۶

شکل ۲ نیز تصویر دو دستگاه دنا و FTPF-۵ را نمایش می‌دهد.



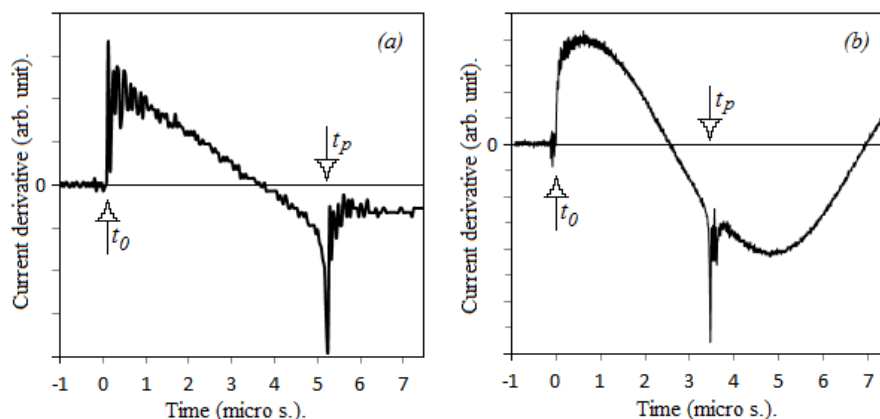
ب- دستگاه FTPF-۵



الف- دستگاه دنا

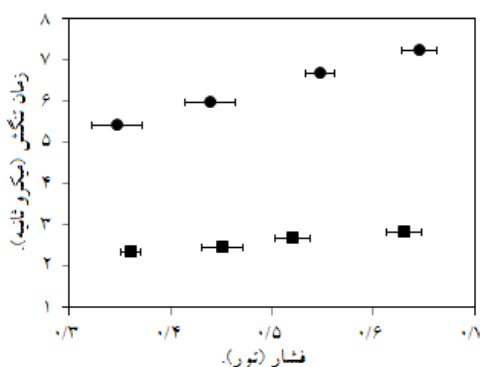
شکل ۲- تصویر دستگاه‌های دنا و FTPF-۵.

شکل ۳، دو سیگنال مشتق جریان مربوط به تخلیه‌های ۱۶ کیلوولتی در گاز آرگون را نشان می‌دهد. در تخلیه الکتریکی مربوط به دستگاه FTPF-۵، فشار گاز ۰/۳۹ تور و در تخلیه الکتریکی مربوط به دستگاه دنا، فشار گاز ۰/۴۴ تور بوده‌اند. این سیگنال‌ها با استفاده از پیچه‌های مغناطیسی بدست آمده‌اند. در سیگنال‌های این شکل، دو زمان t_p و t_0 مشخص شده‌اند که t_0 معرف زمان شروع تخلیه الکتریکی و t_p معرف زمان تنگش پلازما است.



شکل ۳- دو سیگنال نوعی مشتق جریان تخلیه در دو دستگاه دنا (شکل a) و FTPF-۵ (شکل b).

شکل ۴، نتایج حاصل از بررسی سیگنال‌های مشتق جریان مربوط به تعداد نسبتاً زیادی تخلیه الکتریکی در گاز آرگون را نشان می‌دهد. در تمامی این آزمایش‌ها، ولتاژ تخلیه دستگاه FTPF-۵ و دنا به ترتیب، ۲۲ kV و ۱۶ kV بوده است. هر یک از اعداد (و یا نقاط) نشان داده شده در این شکل، میانگین ناشی از نتایج حدود ۱۰ تخلیه الکتریکی هستند.

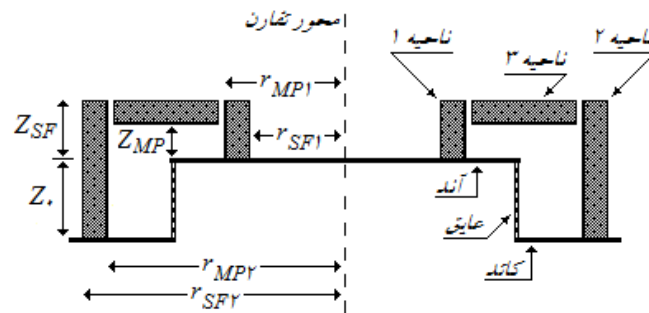


شکل ۴- وابستگی تجربی زمان تنگش به فشار گاز. مربع‌های توپر، مربوط به FTPF-۵ و دایره‌های توپر مربوط به دنا می‌باشند.

شکل ۴، نشان می‌دهد که در هر دو دستگاه افزایش فشار گاز باعث افزایش تقریباً خطی زمان تنگش شده است، ضمن آن که شیب داده‌های دنا ۳/۴ برابر بیشتر از شیب داده‌های FTPF-۵ می‌باشد. شکل همچنین نشان می‌دهد که در فشار ۰/۳۵ تور، زمان تنگش در FTPF-۵ و دنا به ترتیب برابر $2/2 \mu s$ و $5/6 \mu s$ (تقریباً یک چهارم دوره تناوب تخلیه) می‌باشد.

۳. مروری بر مبانی نظری مدل ام-ال

برای تعریف رفتار پلاسما در دستگاه‌های پلاسمای کانونی نوع فیلیپوف، مدل نظری ام-ال طراحی شده است [۱۷]. طبق این مدل، بلافاصله پس از شروع تخلیه، لایه جریان شکل گرفته و باعث پیدایش یک میدان مغناطیسی سمتی و متعاقباً یک جبهه موج ضربه می‌شود. این موج ضربه در هنگام حرکت، گاز سر راهش را یونیزه کرده و به این ترتیب باعث پیدایش لایه‌ای از پلاسما می‌شود که در جلوی آن موج ضربه و در عقب آن لایه جریان (مانند یک پیستون مغناطیسی) قرار دارند. شکل ۵، نمای شماتیک از برش مقطعی پلاسما در مدل ام-ال را نشان می‌دهد. در این شکل، Z ارتفاع آند از کف کاتد، r_{SF} شعاع جبهه موج ضربه، Z_{SF} ارتفاع جبهه موج ضربه از سطح آند، و r_{MP} شعاع پیستون مغناطیسی (یا لایه جریان) می‌باشند. اندیس‌های ۱ تا ۳ نیز به ترتیب معرف سه ناحیه مختلف پلاسما می‌باشند که عبارتند از ناحیه تراکم شعاعی به سمت محور تقارن (ناحیه ۱)، ناحیه گسترش شعاعی (ناحیه ۲)، و ناحیه محوری یا بالارونده (ناحیه ۳).



شکل ۵- نمای شماتیک از برش مقطعی پلاسما در مدل ام-ال.

با در نظر گرفتن فشاری که میدان مغناطیسی به پلاسما وارد می‌کند، تئوری موج ضربه، و فرض یکنواخت بودن فشار داخلی پلاسما، می‌توان سرعت موج ضربه ناحیه تراکم شعاعی (ناحیه ۱ در شکل ۵)، را به صورت زیر به دست آورد [۱۷].

$$\dot{r}_{SF1} = -\frac{f_i \cdot I}{4\pi \cdot r_{MP1}} \left[\frac{\mu \cdot (\gamma + 1)}{f_m \cdot \rho} \right]^{\frac{1}{\gamma}} \quad (1)$$

در این رابطه، I کل جریان تخلیه، μ ثابت تراوایی، γ نسبت گرمای ویژه، ρ چگالی اولیه گاز، و r_{MP1} شعاع پیستون مغناطیسی در ناحیه ۱، می‌باشند. وجود جریان‌های ناشی در مدار تخلیه، باعث می‌شود تا جریان موثر مقداری کمتر از کل جریان تخلیه باشد. برای جبران این موضوع، پارامتر فاکتور کیفی جریان f_i ، تعریف شده است که تعیین کننده جریان موثر I_{eff} است به طوری که $I_{eff} = f_i \cdot I$ و $f_i \leq 1$ می‌باشند. همچنین، با توجه به این که تعداد ذرات پلاسمای محصور شده،

کمتر و یا در حالت ایده آل برابر تعداد اتم های گاز می تواند باشد، بنابراین چگالی ذرات پلاسمای محصور شده ρ_{eff} ، نیز قاعدتا باید متفاوت با چگالی اولیه گاز ρ ، باشد. برای جبران این موضوع، اقدام به تعریف فاکتور کیفی چگالی f_m ، شده است به طوری که $\rho_{eff} = f_m \cdot \rho$ و $f_m \leq 1$ می باشند.

با فرض این که P فشار داخلی لایه پلاسمای متراکم شونده و V حجم پلاسمای این قسمت باشد، می توان با استفاده از رابطه (۱) و مشتق گیری از قانون تراکم بی دررو $PV^\gamma = const$ ، سرعت پیستون مغناطیسی ناحیه ۱ را نیز به صورت زیر بدست آورد [۱۷].

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

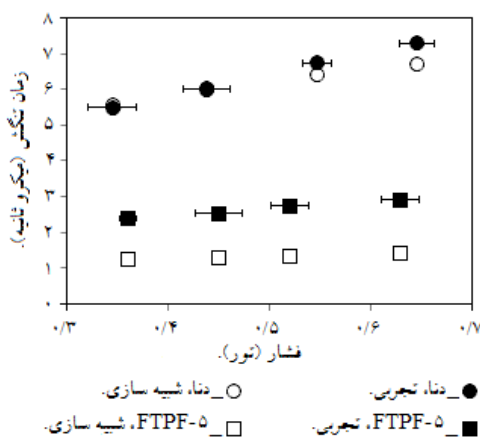
روابط ۱ و ۲، به ترتیب سرعت موج ضربه و سرعت پیستون مغناطیسی (یا لایه جریان) مربوط به ناحیه یک را تعریف می نمایند. برای دو ناحیه دیگر نیز می توان به روش فوق ادامه داد و کلا ۶ معادله بدست آورد که سه تای آنها، مربوط به سرعت حرکت موج ضربه در ۳ ناحیه فوق و سه تای دیگر مربوط به سرعت حرکت پیستون مغناطیسی (یا لایه جریان) در این سه ناحیه می باشند. استفاده از مدار الکتریکی دستگاه نیز معادله هفتم را در اختیار قرار می دهد. به این ترتیب مدل ام-ال متشکل از ۷ معادله دیفرانسیل جفت شده می شود [۱۷] که حل آنها، منجر به دستیابی به هفت پارامتر می شود که عبارتند از سرعت پیستون مغناطیسی \dot{r}_p در هر سه ناحیه، سرعت موج ضربه \dot{r}_s در هر سه ناحیه و کل جریان مدار I .

در اینجا لازم است به این نکته نیز اشاره شود که در ناحیه ۱ (ناحیه تراکم شعاعی)، فرض می شود، پس از آن که موج ضربه به محور رسید، با سرعتی معادل یک سوم سرعت برخورد با محور، به سمت عقب (به سمت پیستون مغناطیسی متراکم شونده) منعکس می شود [۱۷]. لحظه رسیدن موج ضربه منعکس شده به پیستون مغناطیسی در حال تراکم، لحظه پایان محاسبات مدل است.

به ترتیب فوق، با استفاده از مدل نظری ام-ال، می توان رفتار لایه پلاسمای در دستگاه های پلاسمای کانونی نوع فیلیپوف را پیش بینی کرد. البته **مطابقت** دقیق داده های شبیه سازی شده با داده های تجربی، دور از ذهن به نظر می رسد (به دلیل تقریب های که در مدل ام-ال وجود دارد) ولی با این اوصاف، این مدل می تواند تا اندازه نسبتا زیادی ارتباط بین پارامترهای پلاسمای را تعریف کند [۱۷ و ۱۹].

۴. مقایسه داده‌های تجربی و شبیه‌سازی شده

در این بخش مواردی که به صورت تجربی در بخش ۲ ارائه شده بودند، شبیه‌سازی شده و مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در هر دو مورد شبیه‌سازی (۵-FTPF و دنا)، نوع گاز، فشار گاز و ولتاژ تخلیه، دقیقاً مشابه آزمایش‌های تجربی بخش ۲، در نظر گرفته شده‌اند. مقادیر فاکتور کیفی جرم f_m و فاکتور کیفی جریان f_i ، نیز به ترتیب برابر ۰/۱۵ و ۰/۷ انتخاب شده‌اند. شکل ۶، نتایج حاصل از این شبیه‌سازی‌ها را به همراه نتایج تجربی (ارائه شده در بخش ۲) نشان می‌دهد.



شکل ۶- وابستگی تجربی و نظری زمان تنگش به فشار گاز.

شکل ۶ نشان می‌دهد که:

الف- در داده‌های شبیه‌سازی شده نیز مانند داده‌های تجربی، افزایش فشار گاز باعث افزایش تقریباً خطی زمان تنگش شده است. ضمن آن که شیب داده‌های شبیه‌سازی شده دنا ۵/۶ برابر بیشتر از شیب داده‌های شبیه‌سازی شده ۵-FTPF است
 ب- شیب داده‌های تجربی ۵-FTPF، ۲/۶ برابر بیشتر از شیب داده‌های شبیه‌سازی شده است ضمن آن که شیب داده‌های تجربی دنا نیز ۱/۶ برابر بیشتر از شیب داده‌های شبیه‌سازی می‌باشد. این شکل همچنین نشان می‌دهد که داده‌های شبیه‌سازی شده دستگاه دنا، بمراتب دقیق‌تر از داده‌های شبیه‌سازی شده دستگاه ۵-FTPF می‌باشند.

۵- بحث و نتیجه‌گیری

الف- هم داده‌های تجربی و هم داده‌های شبیه‌سازی شده، نشان دادند که افزایش فشار گاز باعث افزایش زمان تنگش می‌شود. علت را می‌توان در آن دید که افزایش فشار گاز منجر به افزایش چگالی گاز، افزایش چگالی پلاسما و بنابراین کاهش سرعت حرکت لایه و به تبع افزایش زمان تنگش، می‌شود. خطی بودن تقریبی این رابطه نیز موضوع مهمی است که می‌تواند جهت تهیه سناریوهای اولیه آزمایش با دستگاه‌های پلاسمای کانونی مورد استفاده قرار بگیرد.

ب- شیب داده‌های تجربی دنا $3/4$ برابر بیشتر از شیب داده‌های تجربی FTPF-5 است. در این مورد می‌توان به نقش بزرگتر بودن شعاع آند دستگاه دنا (شعاع دنا $4/7$ برابر بزرگتر از شعاع FTPF-5 است) اشاره کرد. افزایش فشار گاز، باعث کاهش شتاب لایه جریان می‌شود. از طرف دیگر، بزرگتر بودن شعاع آند دنا باعث می‌شود تا شتاب کاهش یافته جریان، در مسافت (و یا مدت زمان) بیشتری تاثیرگذار باشد و باعث کاهش بیشتر میانگین سرعت و یا افزایش چشمگیر زمان تنگش شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در دستگاه‌های بزرگتر (که شعاع آند بزرگتری نیز دارد)، حساسیت زمان تنگش به فشار گاز بیشتر است.

ج- هم داده‌های تجربی و هم داده‌های شبیه‌سازی شده، نشان می‌دهند که زمان تنگش در دستگاه دنا، بیشتر از زمان تنگش در دستگاه FTPF-5 است. داده‌های تجربی نشان می‌دهند که در فشار $0/35$ تور، زمان تنگش در FTPF-5 برابر $2/9 \mu s$ و در دستگاه دنا، $1/9$ برابر بیشتر و برابر $5/6 \mu s$ می‌باشد. طبیعتاً، مهمترین علت باید موضوع بزرگتر بودن شعاع آند (و یا مسیر حرکت شعاعی لایه جریان) در دستگاه دنا باشد.

د- داده‌های شبیه‌سازی شده، روند کلی تغییرات را به صورت قابل قبولی بدست داده‌اند، ضمن آن که نتایج شبیه‌سازی برای دستگاه بزرگتر دنا، بهتر از نتایج مربوط به دستگاه کوچکتر FTPF-5 بوده است. این موضوع می‌تواند به دلیل تقریب‌های مربوط به انتخاب اعداد پارامترهای شبیه‌سازی باشد و یا تقریب‌هایی که در طراحی مدل صورت گرفته است. به نظر می‌رسد که کوچکتر بودن شعاع آند دستگاه FTPF-5، و به دنبال آن کمتر شدن زمان تنگش در این دستگاه، باعث افزایش تاثیر این تقریب‌ها در شبیه‌سازی‌های مربوط به دستگاه FTPF-5 شده است. به عنوان مهمترین تقریب‌های مدل، می‌توان به تقریب کوتاه بودن مدت زمان لازم برای تشکیل لایه جریان و در نتیجه صرف‌نظر کردن از این زمان، اشاره کرد. این موضوع نشان می‌دهد که مدل ام-ال، برای تعریف روندها و حدود کلی اندازه پارامترها مناسب است، ولی برای کسب اطلاعات دقیقتر (خصوصاً برای دستگاه‌های کوچکتر)، نیاز به بازنگری تقریب‌ها و توسعه و تکمیل نظری دارد.

مراجع

- 1- N V Filippov, T I Filippova and V P Vinogradov, Nuclear fusion suppl. 2 (1962) 577.
- 2- J W Mather, Phys. Fluid suppl. 7 (1964) 5.
- 3- L. Soto, Plasma Control. Fusion, 47(2005) 361-381.
- 4- N.V. Filippov, et al., Czech. J. of Physics, 50 (2000) 127.

- ୧- J.O. Pouzo and M. M. Milanese, IEEE Trans. Plasma Sci., ୩ (୨୦୦୩) ୧୨୩୮- ୧୨୪୨.
- ୨- R. Gratton, A.R. Piriz, Nuclear Fusion, ୩୬ (୧୯୯୬) ୪୮୩.
- ୩- C.K. Choi, L.T. Cox, G.T. Nakafuji, Proc. of IEEE Symp. on Fusion Eng., ୩୦ Sep. - ୧ Oct., ୩ (୧୯୯୧), ୧୨୧୧-୧୨୧୩.
- ୪- B. Temple, O. Barnouin, and G.H. Miley, Fusion Science and Technology, ୧୯ (୧୯୯୧) ୮୪୬-୮୧୧.
- ୫- Y. Kato, et al., J. Vac. Sci. Technol. B ୩ (୧୯୮୮) ୧୯୦.
- ୬- S. Lee, et al., ICPP&୨୦th EPS Conf. on Contr. Fusion and Plasma Physics, Praha, ୨୯ June – ୩ July. ECA ୩୨ (୧୯୯୮) ୨୦୯୧-୨୦୯୬.
- ୭- V.A. Gribkov, Nukleonika ୪୦ (୨୦୦୦) ୧୬୯-୧୭୩.
- ୮- L.I. Ivanov, et al., Nukleonika, ୪୦ (୨୦୦୦) ୨୦୩-୨୦୮.
- ୯- R. Chhay, et al., Physics Letters A. ୨୩୯ (୧୯୯୮) ୧୦୯-୧୧୬.
- ୧୦- R.S. Rawat, et al., Applied Surface Science, ୨୦୩ (୨୦୦୬) ୧୬୧୧-୧୬୧୫.
- ୧୧- V.I. Krauz, et al., Plasma Physics Reports, ୩୬ (୨୦୦୮) ୬୩-୭୧.
- ୧୨- S. Lee, Journal of Fusion Energy, ୩୩ (୨୦୧୪), ୩୧୯-୩୩୦.
- ୧୩- V. Siahpoush, et al., Plasma Phys. and Control. Fusion ୪୮ (୨୦୦୧) ୧୦୬୦-୧୦୬୫.
- ୧୪- V. Damideh, et al., J. Fusion Energ. ୩୦ (୨୦୧୧) ୬୬୨-୬୬୫.
- ୧୫- T.D. Mahabadi and M.A. Tafreshi, Plasma Phys. and Control. Fusion, ୪୯ (୨୦୦୮) ୧୬୬୮-୧୬୭୫.