

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

محمد امیر حمزه تفرشی، داریوش رستمی فرد و علی نصیری

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

پست الکترونیکی: mtafreshi@acoi.org.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۷/۲۸؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۵/۰۸/۱۶)

### چکیده

این مقاله با استفاده از داده‌های تجربی و شبیه‌سازی شده دو دستگاه پلاسمای کانونی نوع فیلیپوف با اندازه‌های کوچک و بزرگ، تهیه شده است. در قسمت اول مقاله، موضوع کانونی شدن پلاسما مطرح گردیده و پارامترهای دو دستگاه معرفی شده‌اند. پس از آن نتایج بررسی‌های تجربی در زمینه وابستگی زمان تنگش پلاسما 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 پلاسما به تغییرات فشار گاز به وضوح بیشتر است. این پژوهش همچنین نشان داد که احتمالاً پیش‌بینی‌های مدل ام-ال، برای دستگاه بزرگ‌تر، دقیق‌تر از پیش‌بینی‌های آن برای دستگاه کوچک‌تر است.

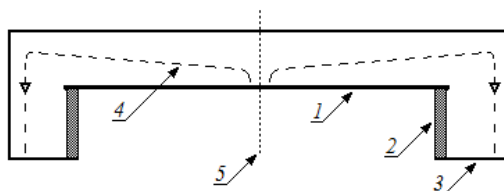
واژه‌های کلیدی: پلاسمای کانونی، فیلیپوف، مدل ام-ال، فشار گاز، زمان تنگش

### ۱. مقدمه

سمت محور دستگاه رانده شده و نهایتاً در وسط آند متراکم می‌شود (شکل ۱). این پلاسمای متراکم شده که به پلاسمای کانونی شده و یا پلاسمای 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 پلاسمای کانونی در دو مدل تحت عناوین مدل‌های فیلیپوف و مدر طراحی و ساخته می‌شوند که اصول

دستگاه پلاسمای کانونی، ابزاری پژوهشی در زمینه فیزیک پلاسما 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 کیلو ولت) 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



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

جدول ۱. پارامترهای دستگاه‌های FTPF-۵ و دنا.

عنوان	شعاع آند	شعاع کاتد	ارتفاع مؤثر عایق	جنس عایق	ظرفیت بانک خازنی	اندوکتانس مدار	دوره تناوب تخلیه	بیشینه ولتاژ کاری	بیشینه انرژی
پارامتر	$r_c$ (cm)	$r_c$ (cm)	$h_{ins}$ (cm)	-----	$C_0$ ( $\mu F$ )	$L_0$ (nH)	T ( $\mu S$ )	$V_{max}$ (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

حرکت لایه پلاسمای می‌باشد. کمتر بودن این زمان، نشان دهنده سرعت بیشتر حرکت لایه پلاسمای و به دنبال آن روی دادن برخوردهای قوی‌تر ذرات پلاسمای است. این مقاله با استفاده از داده‌های تجربی دو دستگاه پلاسمای کانونی تحت عناوین FTPF-۵ و دنا و نیز مدل نظری ام-ال، 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.

شکل ۲ نیز تصویر دو دستگاه دنا و FTPF-۵ را نمایش می‌دهد. شکل ۳، دو سیگنال مشتق جریان مربوط به تخلیه‌های ۱۶ کیلو ولتی در گاز آرگون را نشان می‌دهد. در تخلیه

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 مدار کمتر از یک است. این تفاوت باعث می‌شود که در این دو مدل، شکل و مسیر حرکت لایه پلاسمای (یا لایه جریان)، متفاوت باشد. قابلیت‌های دستگاه‌های پلاسمای 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، فیزیک موج ضربه [۴ و ۵]، گداخت هسته‌ای با روش محصور سازی لختی [۶]، تامین سوخت سفینه‌های فضائی [۷ و ۸]، پرتو نگاری 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 پلاسمای کانونی بهینه [۱۶-۱۸]. شکل ۱، طرح‌واره‌ای از دستگاه پلاسمای کانونی نوع فیلیپوف را نشان می‌دهد.

یکی از مهم‌ترین پارامترهای کانونی شدن پلاسمای، زمان تنگش پلاسمای (زمانی که طول می‌کشد تا پلاسمای تنگیده شود) است. اهمیت زمان تنگش در آن است که معرف سرعت

۱. Modified Lee's model

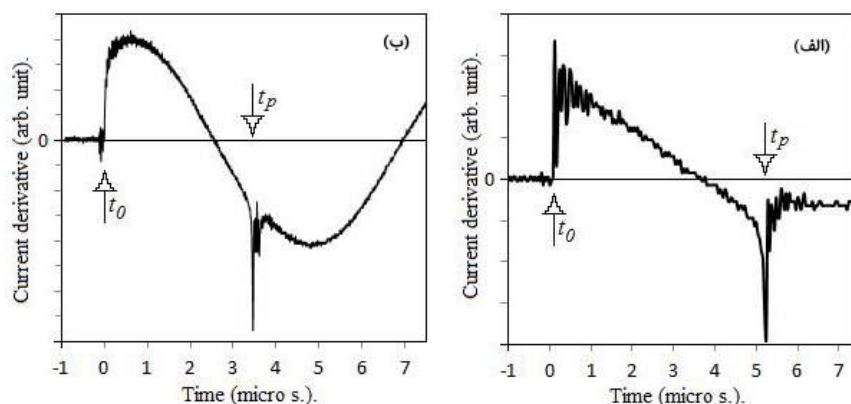


(ب) دستگاه FTPF-۵



(الف) دستگاه دنا

شکل ۲. (رنگی در نسخه الکترونیکی) تصویر دستگاه‌های: (الف) دنا و (ب) FTPF-۵.

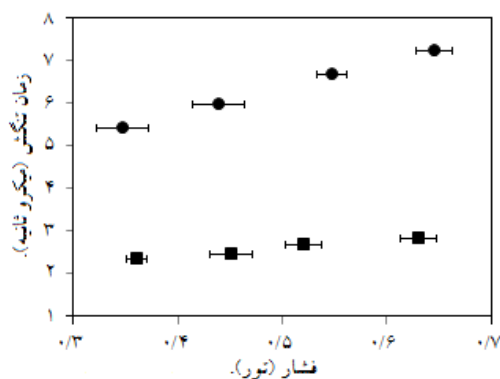


شکل ۳. دو سیگنال نوعی مشتق جریان تخلیه در دو دستگاه: (الف) دنا و (ب) FTPF-۵.

بوده‌اند. این سیگنال‌ها با استفاده از پیچ‌های مغناطیسی به دست 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 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، نشان می‌دهد که در هر دو دستگاه افزایش فشار گاز باعث افزایش تقریباً خطی زمان تنگش شده است، ضمن آن



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

الکتریکی مربوط به دستگاه FTPF-۵، فشار گاز ۰/۳۹ تور و در تخلیه الکتریکی مربوط به دستگاه دنا، فشار گاز ۰/۴۴ تور

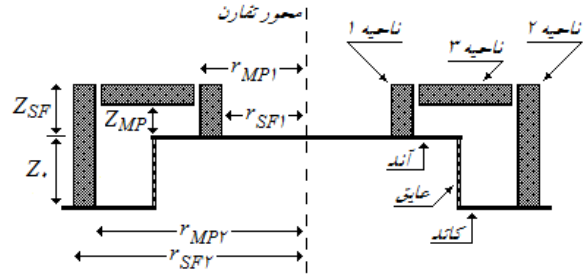
$$\dot{I}_{SF\gamma} = - \frac{f_i \cdot I}{4\pi \cdot r_{MP\gamma}} \left[ \frac{\mu_0 (\gamma + 1)}{f_m \cdot \rho_0} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

در این رابطه،  $I$  کل جریان تخلیه،  $\mu_0$  ثابت تراوایی،  $\gamma$  نسبت گرمای ویژه،  $\rho_0$  چگالی اولیه گاز، و  $r_{MP\gamma}$  شعاع پیستون مغناطیسی در ناحیه ۱، می‌باشد. وجود جریان‌های ناشی در مدار تخلیه، باعث می‌شود تا جریان مؤثر مقداری کمتر از کل جریان تخلیه باشد. برای جبران این موضوع، پارامتر فاکتور کیفی جریان  $f_i$ ، تعریف شده است که تعیین کننده جریان مؤثر  $I_{eff}$  است به طوری که  $I_{eff} = f_i \cdot I$  و  $f_i \leq 1$  می‌باشد. همچنین، با توجه به این که تعداد ذرات پلاسما محصور شده، کمتر و یا در حالت ایده آل برابر تعداد اتم‌های گاز می‌تواند باشد، بنابراین چگالی ذرات پلاسما محصور شده  $\rho_{eff}$ ، نیز قاعداً باید متفاوت با چگالی اولیه گاز  $\rho_0$ ، باشد. برای جبران این موضوع، اقدام به تعریف فاکتور کیفی چگالی  $f_m$ ، شده است به طوری که  $\rho_{eff} = f_m \cdot \rho_0$  و  $f_m \leq 1$  می‌باشد.

با فرض این که  $P$  فشار داخلی لایه پلاسما متراکم شونده و  $V$  حجم پلاسما این قسمت باشد، می‌توان با استفاده از رابطه (۱) و مشتق‌گیری از قانون تراکم بی‌دررو  $pv^\gamma = const.$  سرعت پیستون مغناطیسی ناحیه ۱ را نیز به صورت زیر به دست آورد [۱۷].

$$\dot{r}_{p1} = \left[ \frac{2r_{S1}}{(\gamma + 1)r_{p1}} \dot{r}_{S1} - \frac{r_{p1}}{\gamma I} \left( 1 - \frac{r_{S1}^2}{r_{p1}^2} \right) \dot{I} - \frac{2r_{p1}}{(\gamma + 1)Z_s} \left( 1 - \frac{r_{S1}^2}{r_{p1}^2} \right) \dot{Z}_s \right] \times \left[ \frac{\gamma - 1}{\gamma} + \frac{r_{S1}^2}{\gamma r_{p1}^2} \right]^{-1} \quad (2)$$

روابط ۱ و ۲، به ترتیب سرعت موج ضربه و سرعت پیستون مغناطیسی (یا لایه جریان) مربوط به ناحیه یک را تعریف می‌کنند. برای دو ناحیه دیگر نیز می‌توان به روش فوق ادامه داد و کلاً ۶ معادله به دست آورد که سه تای آنها، مربوط به سرعت حرکت موج ضربه در ۳ ناحیه فوق و سه‌تای دیگر مربوط به سرعت حرکت پیستون مغناطیسی (یا لایه جریان) در این سه ناحیه می‌باشد. استفاده از مدار الکتریکی دستگاه نیز معادله هفتم را در اختیار قرار می‌دهد. به این ترتیب مدل ام-ال متشکل از ۷ معادله دیفرانسیل جفت شده می‌شود [۱۷] که حل



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

که شیب داده‌های دنا ۳/۴ برابر بیشتر از شیب داده‌های ۵-FTPF می‌باشد. شکل همچنین نشان می‌دهد که در فشار ۰٫۳۵ تور، زمان تنگش در ۵-FTPF 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 پلاسما 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، طرح‌واره‌ای 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) می‌باشد. 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 بالا رونده (ناحیه ۳).

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].

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 نشان می‌دهد که:

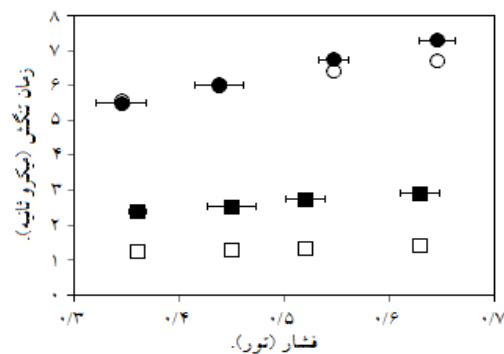
(الف) در داده‌های شبیه‌سازی شده نیز مانند داده‌های تجربی، افزایش فشار گاز باعث افزایش تقریباً خطی زمان تنگش شده است. ضمن آن که شیب داده‌های شبیه‌سازی شده دنا ۵/۶ برابر بیشتر از شیب داده‌های شبیه‌سازی شده FTPF-۵ است.

(ب) شیب داده‌های تجربی FTPF-۵، 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، به مراتب دقیق‌تر از داده‌های شبیه‌سازی شده دستگاه FTPF-۵ 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 پلازما 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 ۳/۴ برابر بیشتر از شیب داده‌های تجربی FTPF-۵ است. در این مورد می‌توان به نقش بزرگ‌تر بودن شعاع آند دستگاه دنا (شعاع دنا ۴/۷ برابر بزرگ‌تر از شعاع FTPF-۵ 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 لایه جریان، در مسافت (و یا مدت زمان) بیشتری تأثیرگذار باشد و باعث کاهش بیشتر میانگین سرعت و یا افزایش چشمگیر زمان تنگش



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

آنها، منجر به دستیابی به هفت پارامتر می‌شود که عبارتند از: سرعت پیستون مغناطیسی  $\dot{r}_p$  در هر سه ناحیه، سرعت موج ضربه  $\dot{r}_p$  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 می‌شود، 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 می‌شود [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، می‌توان رفتار لایه پلازما در دستگاه‌های پلاسمای کانونی نوع فیلپوف را پیش‌بینی کرد. البته مطابقت دقیق داده‌های شبیه‌سازی شده با داده‌های تجربی، دور از ذهن به نظر می‌رسد (به دلیل تقریب‌هایی که در مدل ام-ال وجود دارد) ولی با این اوصاف، این مدل می‌تواند تا اندازه نسبتاً زیادی ارتباط بین پارامترهای پلازما 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 (FTPF-۵ و دنا)، نوع گاز، فشار گاز و ولتاژ تخلیه، دقیقاً مشابه آزمایش‌های تجربی بخش ۲، در نظر

۵-FTPF 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 ۵-FTPF و به دنبال آن کمتر شدن زمان تنگش در این دستگاه، باعث افزایش تأثیر این تقریب‌ها در شبیه‌سازی‌های مربوط به دستگاه ۵-FTPF 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.

شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در دستگاه‌های بزرگ‌تر (که شعاع آند بزرگ‌تری نیز دارند)، 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 ۵-FTPF است. داده‌های تجربی نشان می‌دهند که در فشار ۰/۳۵ تور، زمان تنگش در ۵-FTPF برابر  $۲/۹ \mu\text{S}$  و در دستگاه دنا، برابر بیشتر و برابر  $۵/۶ \mu\text{S}$  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 به دست داده‌اند، ضمن آن که نتایج شبیه‌سازی برای دستگاه بزرگ‌تر دنا، بهتر از نتایج مربوط به دستگاه کوچک‌تر

## مراجع

- and Plasma Physics, Praha, 29 June – 3 July. ECA **22** (1998) 2591.
11. V A Gribkov, *Nukleonika* **45** (2000) 149.
  12. L I Ivanov, et al., *Nukleonika*, **45** (2000) 203.
  13. R Chhay, et al., *Physics Letters A*, **239** (1998) 109.
  14. R S Rawat, et al., *Applied Surface Science*, **253** (2006) 1611.
  15. V I Krauz, et al., *Plasma Physics Reports*, **34** (2008) 43.
  16. S Lee, *Journal of Fusion Energy*, **33** (2014), 319.
  17. V Siahpoush, et al., *Plasma Phys. and Control. Fusion* **47** (2005) 1065.
  18. V Damideh, et al., *J. Fusion Energ.* **30** (2011) 462.
  19. T D Mahabadi and M A Tafreshi, *Plasma Phys. and Control. Fusion*, **49** (2007) 1447.
  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.
  4. N V Filippov, et al., *Czech. J. of Physics*, **50** (2000) 127.
  5. J O Pouzo and M M Milanese, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **6** (2003) 1237.
  6. R Gratton and A R Piriz, *Nuclear Fusion*, **26** (1986) 483.
  7. C K Choi, L T Cox, and G T Nakafuji, *Proc. of IEEE Symp. on Fusion Eng.*, 30 Sep. - 5 Oct., **2** (1995), 1251.
  8. B Temple, O Barnouin, and G H Miley, *Fusion Science and Technology*, **19** (1991) 846.
  9. Y Kato, et al., *J. Vac. Sci. Technol.* B **6** (1988) 195.
  10. S Lee, et al., ICPP&25<sup>th</sup> EPS Conf. on Contr. Fusion