

## کنترل مکان عمودی پلاسمای توکامک دماوند در مسیر متغیر قابل برنامه‌ریزی و تهیه پایگاه داده جهت شناسایی مدل مکان

رسولی، حسین\*؛ فاتحی، علیرضا<sup>۲</sup>؛ رسولی، چاپار<sup>۱</sup>؛ حفظ‌الصحه، علیرضا<sup>۱</sup>؛ حبیبی، حسن<sup>۱</sup>  
<sup>۱\*</sup> پژوهشکده فیزیک پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای؛ دانشگاه صنعتی خواجه  
نصیرالدین طوسی

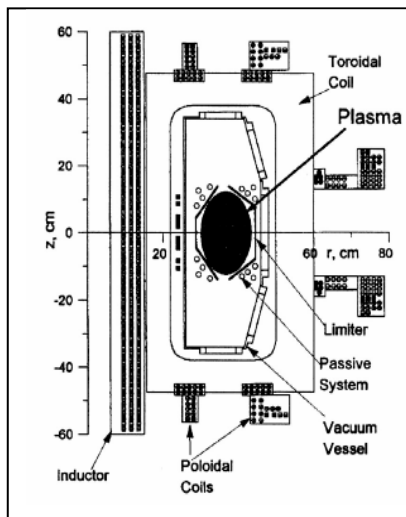
### چکیده

در این مقاله به معرفی ویژگی جدید و حائز اهمیت برای سیستم کنترل عمودی مکان پلاسما در توکامک دماوند پرداخته شده است که به کمک آن موفق به کنترل جابجایی پلاسما برای مسیر متغیر برنامه‌ریزی شده در مدت زمان تخلیه الکتریکی شدیم. با بکارگیری این تکنیک برای جابجایی پلاسما و استفاده همزمان از سایر سیستمهای اندازه‌گیری، می‌توان پارامترهای پلاسما را در محدوده‌های زمانی گوناگون از یک تخلیه جهت سایر پژوهشها مورد مطالعه قرار داد. برای کامل شدن معادلات سیستم حلقه بسته، توابع راه‌انداز جریان و ولتاژ در پیچ‌های کنترل عمودی را مشخص نمودیم و با تکمیل شدن حلقه (بجز مدل مکان پلاسما) و انجام آزمایشهای لازم، حرکت پلاسما برای سطوح مختلف بررسی گردید و پایگاه داده‌ای مربوط به ۱۵۰ تخلیه الکتریکی توکامک به جهت استفاده در تکنیک شناسایی سیستم برای مدل‌سازی مکان عمودی پلاسما تهیه شد.

کلمات کلیدی: توکامک، کنترل مکان پلاسما، شناسایی سیستم

### مقدمه

یکی از امیدهای بشر رسیدن به گداخت هسته‌ای با استفاده از محصورسازی مغناطیسی در دستگاه توکامک می‌باشد [۱]. در این میان طراحی و عملکرد کنترل مکان پلاسمای چنبره در مدت زمان تخلیه از مباحث مهم محسوب می‌شود. برای این منظور ابزار اندازه‌گیری سریعی برای مکان و شکل پلاسما لازم است که معمولاً از پروب‌های مغناطیسی (Magnetic Probes) و حلقه‌های زینی (Saddle Loops) در نزدیکی دیواره چنبره توکامک استفاده می‌شود [۲].



شکل ۱: سطح مقطع توکامک دماوند

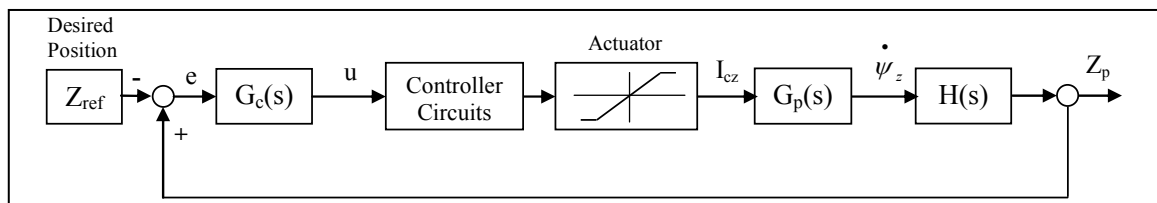
شکل ۱ سطح مقطع مجموعه تحقیقاتی توکامک دماوند را که برای پژوهش در زمینه گداخت هسته‌ای طراحی شده، نشان می‌دهد. پارامترهای اصلی توکامک دماوند عبارتند از شعاع اصلی چنبره  $R=36\text{cm}$ ، حداکثر شدت میدان چنبره‌ای  $B_T=1/2\text{T}$ ، دمای الکترون  $T_e=300\text{eV}$ ، دمای یون  $T_i=150\text{eV}$ . در این توکامک پلاسمای هیدروژن خالص با چگالی یونی  $3 \times 10^{19}\text{m}^{-3}$  شدت جریانی در حدود  $35\text{kA}$  در مدت زمان  $21\text{ms}$  تولید

می‌شود. پلاسمای تولید شده تحت فشار هیدرودینامیکی و فشار مغناطیسی قرار دارد که تعادل میان این دو فشار به پلاسمایی متعادل منجر می‌شود. در این سیستم حرکت عمودی ستون پلاسمای ناپایدار بوده و می‌تواند سبب برخورد پلاسمای به دیواره اول و آشفته‌گی آن گردد. لذا برای پایداری مکان پلاسمای و جابجایی سریع و دقیق آن، از پیچ‌های چهار قطبی در داخل چنبره به عنوان کنترل کننده غیر فعال (Passive)، و پیچ‌های قطبی خارجی در بیرون چنبره به عنوان کنترل کننده فعال (Active) استفاده می‌شود. [۲] کنترل کننده فعال اتوماتیک با عبور جریان کنترل شده از پیچ‌های مربوطه باعث ایجاد میدانهای قطبی و در نهایت اعمال نیروی مغناطیسی کنترل شده به جریان پلاسمای می‌شود. [۳]

توکامک دماوند به دلیل سطح مقطع D شکل و قابلیت کنترل کننده فعال آن، از اهمیت مهمی در زمینه تحقیقات روی پارامترهای پلاسمای توکامک برخوردار می‌باشد. با این فعالیت یک ابزار مهم برای مطالعه روی پارامترهای پلاسمای توکامک، با استفاده از سیستم کنترل عمودی پلاسمای افزوده شده است و آن کنترل مکان پلاسمای در مسیر برنامه‌ریزی شده (Target Tracking) می‌باشد. این موضوع در بخش دوم بیان می‌شود و در بخش سوم نحوه تولید پایگاه داده با بکارگیری از این ویژگی جهت شناسایی مدل مکان آورده شده و در آخر نتایج ارائه می‌گردد.

### کنترل جابجایی عمودی پلاسمای

سیستم کنترل عمودی مکان پلاسمای در توکامک دماوند، متشکل از Saddle Loop برای اندازه‌گیری جابجایی، مدار یکسوساز جریان در محرک (Actuator)، منبع انرژی خازنی (با ظرفیت ۲۰ mF، ولتاژ حداکثر ۱ kV و حداکثر جریان ۸۰۰ A)، مدارات کنترل و کنترل کننده آنالوگ PD می‌باشد. [۵]



شکل ۲: بلوک دیاگرام کنترل مکان عمودی پلاسمای در توکامک دماوند.

بلوک دیاگرام کنترل مکان عمودی پلاسمای برای توکامک دماوند در شکل ۲ نشان داده شده است. که در آن  $G_p(s)$  بیانگر عملکرد مکان پلاسمای و  $G_c(s)$  کنترل کننده PD، با معادله (۱)  $G_c(s) = \frac{(k_p + k_d)s + 10^4}{s + 10^4}$  است [۴]. در این مقاله، معادلات یکسوساز جریان و ولتاژ برای محرک (Actuator) با توجه به مقادیر المانهای پیچ‌ها ( $R_{Lcz} = 0.1 \Omega$  و  $L_{cz} = 280 \mu H$ )، بانک خازنی ( $C_{cz} = 20 mF$ )، ولتاژ اولیه خازنها ( $V_o$ ) و عملگر یکسوساز به صورت زیر محاسبه گردید که در آن  $I_{cz}$  جریان و  $V_{cz}$  ولتاژ پیچ‌های کنترلی است و

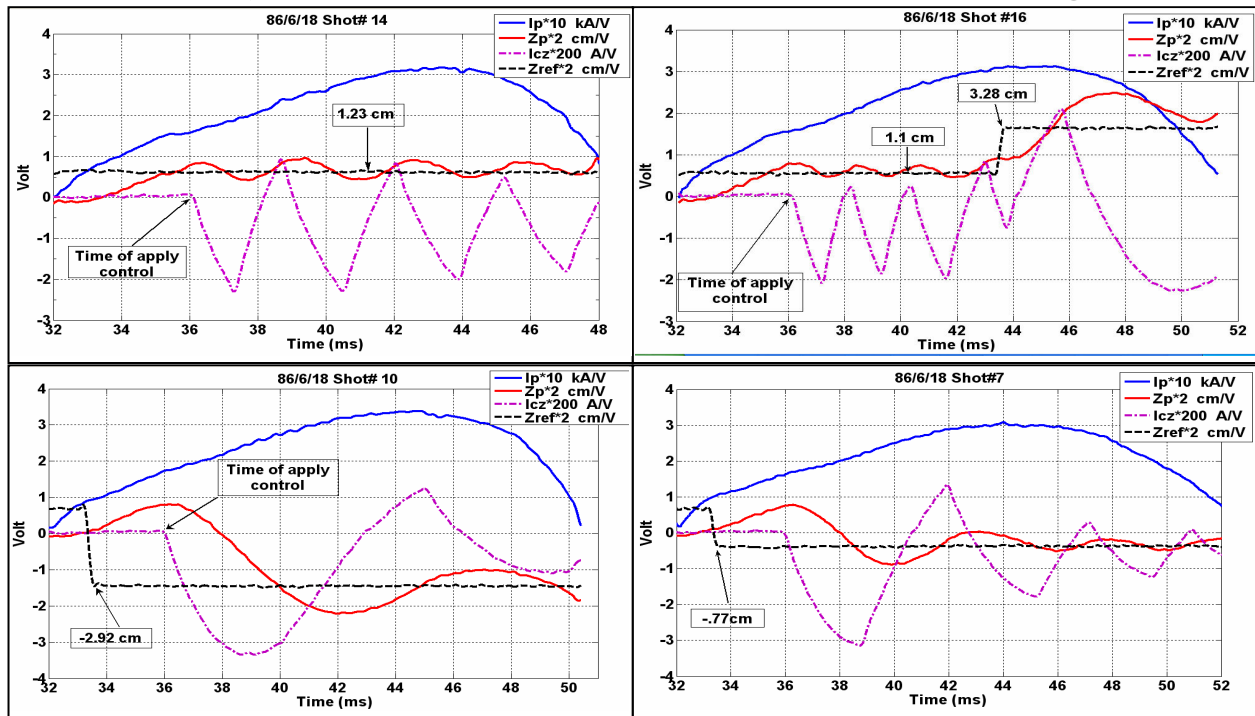
محدود کننده جریان برای  $I_{cz} = 800 \text{ A}$  تنظیم شده است.

$$V_o = \begin{cases} +V_o & u > 0 \\ -V_o & u < 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$H(s) = k \frac{1010}{s+1.377} \quad (4) \quad V_{cz} = \frac{(s+357)V_o}{s^2 + 357s + 178.58 \times 10^3} \quad (3) \quad I_{cz} = \frac{3.57 \times 10^3 V_o}{s^2 + 357s + 178.58 \times 10^3}$$

همچنین تابع انتگرال گیر در مسیر اندازه‌گیری ( $H(s)$ ) با توجه به عملکرد آن به صورت رابطه (۵) محاسبه گردید.

سیستم الکتریکی کنترل مکان پلاسما در توکامک دماوند در مرجع [۴] و [۵] بطور کامل آورده شده است که با توجه به آن مکان مطلوب در تمام مدت زمان تخلیه الکتریکی (Shot) برابر صفر بوده ( $Z_{ref}=0$ ) و این فقط جهت کنترل و پایداری مطلوب پلاسما در مرکز چنبره مناسب می‌باشد. [۴] در این پژوهش با تغییر و اضافه کردن مدارات و استفاده از تقویت کننده‌ها و فیلترهای لازم، سیگنال  $Z_{ref}$  برنامه‌ریزی شده‌ای تولید کردیم که با بکارگیری آن، در هر لحظه از زمان تخلیه، می‌توان ستون پلاسما را در کل سطح مقطع عمودی ( $12\text{cm}$  تا  $12\text{cm}$ ) جابجا کرد. با استفاده از سیگنال  $Z_{ref}$  در سیستم حلقه بسته، موفق به کنترل حرکت عمودی پلاسما برای سطوح عمودی از قبل برنامه‌ریزی شده و متغییر در مدت زمان تخلیه الکتریکی شدیم.



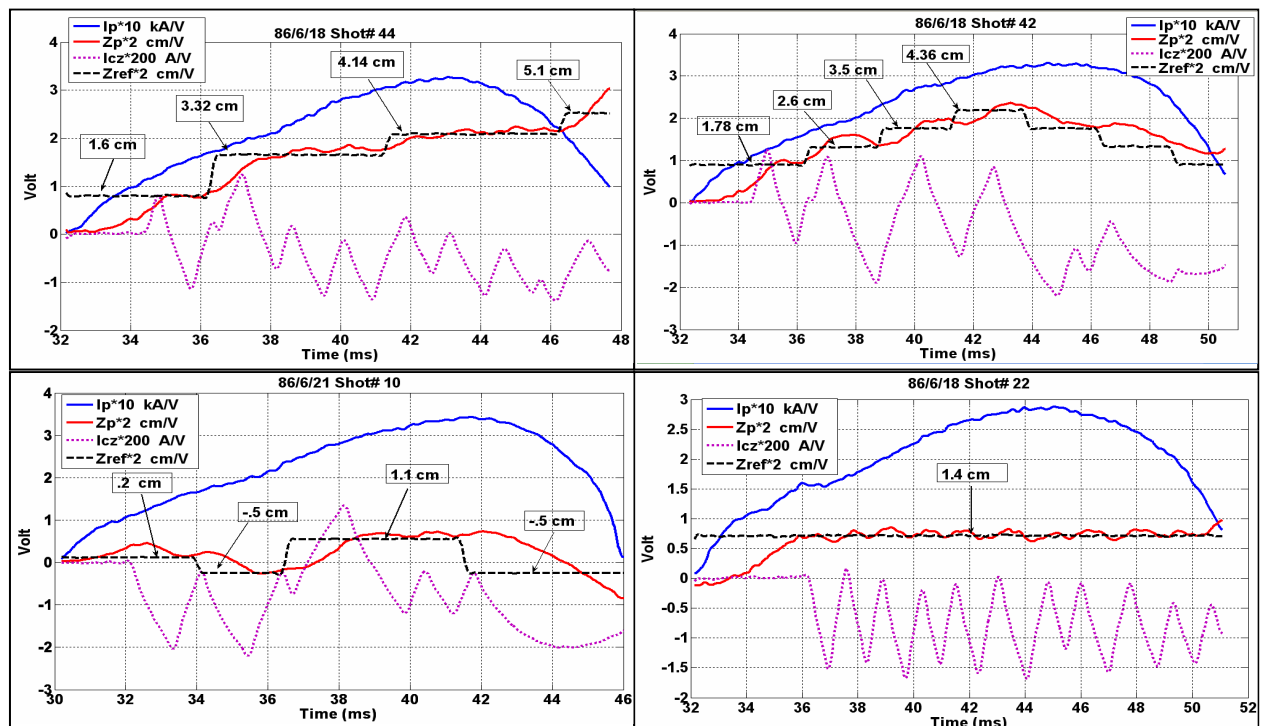
شکل ۳: کنترل مکان عمودی پلاسما در مسیر تنظیم شده برای حالت بدون کنترل کننده ( $k_p=k_d=0$ ).

در شکل ۳ نمونه‌ای از این سیگنالهای تجربی البته بدون کنترل کننده PD آورده شده است که در آنها پلاسما مسیر هدف را با سرعت کمتر، تاخیر، خطا و فراجش (Overshoot) نسبتا بالایی دنبال می‌کند. با تغییر دامنه پله در هدف ( $Z_{ref}$ ) و تغییر زمان اعمال آن، پاسخ سیستم ( $Z_p(t)$ ) به شدت فرق می‌کند و این نشان از غیر

خطی بودن دینامیک حرکت پلاسما است. با انجام این آزمایشها پیچیدگی دینامیک کنترل کننده عمودی پلاسما جهت پروژه‌های بعدی در توکامک مشخص گردید.

سیستم جابجایی مکان ( $G_p(s)$ ) به شدت جریان پلاسما ( $I_p$ )، ولتاژ اولیه بانک خازنی ( $V_0$ )، شدت جریان در پیچه‌های کنترلی ( $I_{cz}$ )، سرعت تغییر جهت  $I_{cz}$  و همچنین به مسیر یا هدف برنامه‌ریزی شده ( $Z_{ref}$ ) وابسته است و به دلیل وابستگی آنها به زمان، در حالت کلی سیستم غیرخطی و تغییرپذیر با زمان می‌باشد.

در هر حال برای اینکه پلاسما هدف یا مسیر برنامه‌ریزی شده را به صورت مطلوب دنبال کند باید پاسخ آن برای پله‌های متفاوت، تاخیر، زمان‌خیز، فراجش و خطای حالت ماندگار کمتری داشته باشد. در این سیستم، با افزایش دامنه ورودی، پاسخ آن زمان‌خیز، فراجش و خطای زیادی دارد. تنها پارامتر قابل تغییر، افزایش ولتاژ اولیه بانک خازنی است. با این کار سرعت جابجایی زیاد شده (تاخیر و زمان‌خیز کم) ولی فراجش افزایش یافته در نتیجه خطا نیز بیشتر می‌شود. البته با افزایش زیاد ولتاژ خازن ( $V_0$ )، شدت جریان در پیچه‌ها ( $I_{cz}$ ) بدلیل محدودکننده‌های محرک اشباع شده و لذا مفید نخواهد بود. (افزایش بیش از حد آن باعث سوختن ترستورهای محرک می‌شود)



شکل ۴: کنترل مکان عمودی پلاسما در مسیر تنظیم شده همراه با کنترل کننده  $PD(k_p=1, k_d=5)$ .

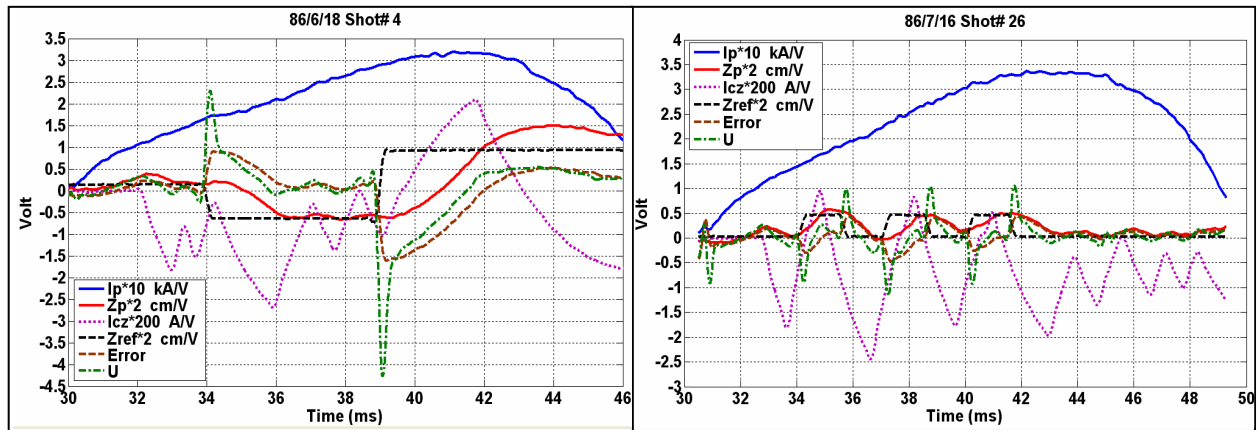
اقدام دیگر استفاده از کنترل کننده در مسیر حلقه بسته می‌باشد. با این کار هم سرعت جابجایی افزایش یافته و هم فراجش پاسخ کمتر شده است [۴]. از طرف دیگر به انرژی اولیه کمتری نیاز خواهیم داشت. کنترل

کننده بکار رفته در این تحقیق یک کنترل کننده PD با تابع تبدیل نشان داده شده در (۱) با ضرایب  $k_p=1$ ،  $k_d=5$  است. شکل (۴) جابجایی کنترل شده برای پله‌های مختلف را با این کنترل کننده نشان می‌دهد. واضح است که استفاده از این کنترل کننده مفید بوده ولی این کنترل کننده (PD آنالوگ)، برای کنترل پایدار پلاسما در مرکز چنبره ( $Z_{ref}=0$ ) بهینه شده است [۴]. به دلیل تغییر دامنه پله بعنوان مسیر حرکت ( $Z_{ref} \neq 0$ ) در مدت زمان تخلیه، ضرایب PD برای این پله‌ها (بخصوص پله‌های بزرگ) بهینه نمی‌باشد. در حالت کلی برای پله‌های با دامنه کم، سیستم در محدوده خطی عمل می‌کند و برای پله با دامنه زیاد به صورت غیر خطی عمل کرده که به دلیل بکارگیری کنترل کننده خطی در آن، خطا زیاد می‌شود.

### نحوه تولید پایگاه داده‌ها

برای افزایش سرعت و دقت جابجایی عمودی لازم است، کنترل کننده‌های تطبیقی (Adaptive) و یا هوشمند طراحی شود که در آن برای پله‌های متفاوت، کنترل کننده به طور اتوماتیک در مدت زمان تخلیه ضرایب بهینه را محاسبه و اعمال می‌کند. البته تعیین توابع  $G_p(s)$  برای طراحی این نوع کنترل کننده‌ها ضروری است. استفاده از این ویژگی جدید اضافه شده، به دو صورت می‌تواند به این عمل (تعیین  $G_p(s)$ ) کمک کند. اول اینکه، اگر مدل‌سازی مکان بر اساس نوشتن روابط فیزیکی باشد اعتبار این مدل ریاضی را می‌توان با این سیستم جدید در عمل سنجید. دوم اینکه، اگر مدل‌سازی بر اساس استفاده از تکنیک‌های شناسایی سیستم باشد، در آن صورت نیز با این قابلیت اضافه شده می‌توان با طراحی و پیاده‌سازی آزمایشی، پایگاه داده‌ای از سیستم را تهیه نمود که با کمک آن و استفاده از روش تکنیک شناسایی سیستم،  $G_p(s)$  را مدل‌سازی کرد. در ادامه شرایط لازم برای آزمایش و تهیه داده‌های تجربی به منظور شناسایی  $G_p(s)$  بیان می‌شود. اولین مرحله در شناسایی سیستم، طراحی آزمایش می‌باشد و موضوع مهم در آن انتخاب مناسب سیگنال ورودی است که باید کلیه مدهای سیستم را تحریک کند. بنابراین مسئله اول انتخاب محدوده فرکانسی و دامنه ورودی است. فرکانس ورودی محدود به پهنای باند سیستم از جمله محدودیت‌های فیزیکی نظیر سرعت سوئیچ مدار پل یکسوساز و دینامیک حرکت پلاسما می‌باشد. سیگنال ورودی انتخاب شده جهت شناسایی، PRBS بوده که حداکثر فرکانس آن ۱kHz و حداکثر دامنه ولتاژ آن برای جابجایی ۱۲cm- تا ۱۲cm+ است. با توجه به کوتاه بودن زمان ماندگاری پلاسما و محدودیت سخت افزاری در کنترل کننده آنالوگ موجود در توکامک دماوند، امکان اعمال کامل و یکباره سیگنال PRBS نمی‌باشد. لذا، در هر آزمایش بخشی از این سیگنال اعمال می‌شود. تعداد ۱۵۰ آزمایش برای تهیه پایگاه داده بر اساس ساختار شکل ۲ انجام شد که در آن کلیه سیگنال‌های  $Z_{ref}(t)$ ,  $e(t)$ ,  $u(t)$ ,  $Z(t)$ ,  $I_p(t)$ ,  $B_T(t)$  با نمونه‌برداری  $10\mu s$  ذخیره شده‌اند و با اعمال فیلتر ۳kHz جهت آماده‌سازی برای شناسایی ثبت شده‌اند. شکل ۵ نمونه‌ای از سیگنال‌های این آزمایش را نشان

می‌دهد. با در اختیار داشتن این پایگاه داده‌ها می‌توان در مراحل بعد به شناسایی مدل مکان پلاسما در توکامک پرداخت.



شکل ۵: نمونه‌ای از سیگنال‌های گرفته‌شده در سیستم حلقه بسته برای شناسایی  $G_p(s)$ .

## نتایج

در این مقاله با استفاده از تغییرات جدید در مدارات کنترل، حرکت عمودی پلاسما برای زمان تخلیه در مسیر متغیر قابل برنامه‌ریزی، کنترل گردید. سیستم به همراه کنترل کننده PD برای جابجایی کوچک، سرعت زیاد و خطای کمتری داشت و برای جابجایی بزرگ سرعت کم و خطای بیشتری داشت که لزوماً باید برای پروژه‌های بعدی از کنترل کننده‌های تطبیقی و یا هوشمند استفاده گردد. با توجه به شرایط لازم جهت شناسایی مدل مکان پلاسما، داده‌های تجربی لازم تهیه گردید. با قابلیت اضافه شده به سیستم کنترلی، برای توکامک دماوند امکان پژوهش‌های متنوع برای سایر سیستم‌های اندازه‌گیر پارامترهای پلاسما در محدوده زمانهای مختلف از یک تخلیه الکتریکی فراهم شده است.

## مراجع

- [1] J. Wesson and D. J. Ward; *Nucl. Fusion* 30 No.6 1011 (1990).
- [2] R.R.Khayrutdinov, V.E.Lukash” Studies of plasma equilibrium and transport in a Tokamak fusion device with the inverse-variable technique “ *Journal of Computational Physics* , V: 109 P: 193 – 201, Issue 2 (December 1993)
- [3].Kurchatof Institute of Atomic Energy, “*TOKAMAK DAMAVAND AEOP*”, Moscow, [1994].
- [4]. Rasouli, Hossein; Rasouli, Chapar ” Simulation of The Active- Feedback System of Damavand Tokamak” *Iranian Annual Physics Conference*, 29August - 1September 2005, Lorestan University, Khorram abad, Iran.
- [5]. گزارش علمی فنی، بررسی و بازسازی سیستم فیدبک توکامک دماوند، مرکز تحقیقات گداخت هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، مرداد ۱۳۸۲.