مجله علوم و فنون هسته‌ای، دوره ۴۴، شماره ۴، جلد ۱۰۶، زمستان ۱۴۰۲

Journal of Nuclear Science and Technology
Vol. 44 (1), Serial Number 106, 2024

توسعه سامانه نمایش شکل و مکان پلاسما برای اتاق کنترل توکامک دماوند

داود ایرجی*[۱]، حسین رسولی[۲]، چاپار رسولی[۲]، بنفشه پورشهاب[۲]

۱. دانشکده فیزیک و مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، صندوق پستی: ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵، تهران - ایران

۲. پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۵۱۱۱۳-۱۴۳۹۹، تهران- ایران

*Email: iraji@aut.ac.ir

مقاله‌ی فنی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۴/۶ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۷/۲

چکیده

تعیین پروفایل میدان مغناطیسی برای مطالعه سطوح شار، کشیدگی، مرز پلاسما و چگونگی کنترل زمان- واقعی آن‌ها در توکامک‌ها از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. در این کار تحقیقاتی سامانه محاسبه و نمایش شکل، مکان و مرز پلاسما برای اتاق کنترل توکامک دماوند به منظور تعیین پروفایل میدان مغناطیسی و سطوح شار در فاصله زمانی بین دو شات متوالی توسعه یافته است. این سامانه براساس اندازه‌گیری با حس‌گرهای تشخیصی پروب‌های مغناطیسی و حلقه‌های شار مغناطیسی به همراه حل معادلات ریاضی مبتنی بر فیزیک مسأله پیاده‌سازی شده است. به منظور محاسبه پروفایل میدان مغناطیسی و شکل پلاسما، پس از تهیه و جمع‌آوری داده‌ها از طریق سیستم داده‌گیری، ابتدا توسط یک کد توسعه یافته نسبت به پیش‌پردازش داده‌ها از قبیل حذف نویز، حذف داده‌های اضافی و . . . اقدام می‌گردد. سپس با استفاده از کد دیگری پارامترهای سطح مقطع مانند شکل، مکان و مرز پلاسما محاسبه گردیده و در اتاق کنترل توکامک نمایش داده می‌شوند. کلیه کدهای این سامانه در محیط نرم‌افزار متلب و در قالب رویه رابط کاربر گرافیکی نوشته شده‌اند به طوری که یک دسترسی آسان و سریع به اپراتور توکامک جهت مشاهده نتایج پس از هر شات داده می‌شود. این سامانه در حال حاضر در اتاق کنترل توکامک دماوند مورد نصب و بهره‌برداری قرار گرفته است.

کلیدواژه‌ها: توکامک دماوند، روش رشته جریان، رابط کاربر گرافیکی، شکل و مکان پلاسما، مرز پلاسما

Development of a plasma shape and position display system for damavand tokamak control room

D. Iraji*[1], H. Rasouli[2], Ch. Rasouli[2], B. Pourshahab[2]

1. Faculty of Physics and Energy Engineering, Amirkabir University of Technology, P.O.Box:15875-4413, Tehran-Iran
2. Plasma and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O. Box: 14399-51113, Tehran - Iran

Technical Paper

Received 27.6.2022, Accepted 24.9.2022

Abstract

Determining the magnetic field profile is very important for studying flux surfaces, elongation, plasma boundaries, and real-time control in tokamaks. In this research, a system for calculating and displaying the shape, position, and boundary of plasma for Damavand Tokamak control room has been developed. This system determines the magnetic field profile and flux surfaces in the time interval between two consecutive shots. This software is implemented based on measurements with the probes' sensors and electromagnetic flux loops. It also solves mathematical equations based on the physics of the problem. In order to calculate the magnetic field profile and the plasma shape, after preparing and collecting the data from the data acquisition system, a developed code is used to pre-process the data, such as noise reduction, removing unnecessary data, etc. Then, using another code, the cross-section parameters such as shape, position, and plasma boundary are calculated and displayed in the tokamak control room. All the codes of this system are written in MATLAB software and as a graphical user interface procedure. This is so the tokamak operator has easy access to the results after every shot. This system is currently installed and operated in the Damavand tokamak control room.

Keywords: Damavand tokamak, Current filament method, Graphical user interface, Plasma shape and position, Plasma boundary

۱. مقدمه

از زمان طراحی و ساخت اولین توکامک، یکی از اصلی‌ترین موضوعات در زمینه تحقیقات توکامک تعیین پروفایل میدان مغناطیسی در محفظه توکامک و در شرایط عملکرد دستگاه بوده است. این موضوع برای مطالعه سطوح شار، کشیدگی و مرز پلاسما و از همه مهم‌تر چگونگی کنترل زمان واقعی[1] آن‌ها در توکامک از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است، به‌طوری‌که یکی از مسایل ضروری و اساسی در عملکرد ماشین‌های توکامک فعلی محسوب می‌شود. یکی از این روش‌ها حل معادله گراد- شافرانف[2] می‌باشد. اگر چه از حل معادله گراد- شافرانف علاوه بر تعیین پروفایل مغناطیسی، شکل، مرز و پارامترهای دیگری از پلاسما نیز به صورت نظری قابل استخراج می‌باشد، ولی وجود یک ابزار آزمایشگاهی مبتنی بر روش‌های عددی ضروری به نظر می‌رسد. توسط این ابزار می‌توان در حین آزمایش و در زمان بین دو شات شکل و مکان پلاسمای تولید شده را به‌دست آورده و برای تنظیم شدت میدان‌های مغناطیسی، میزان گرمایش اهمی، تعیین مکان و شکل مورد انتظار پلاسما در شات بعدی مورد استفاده قرار داد.

برای تعیین شکل و مرز پلاسما تاکنون کارهای متنوعی در دنیا انجام شده و روش‌های گوناگونی پیشنهاد شده است که در مراجع [۱-۴] می‌توان اطلاعات بیش‌تری در این زمینه به‌دست آورد. یکی از پرکاربردترین روش‌ها استفاده از مدل رشته جریان[3] و تقریب زدن ستون پلاسما با این رشته جریان‌ها است [۲]. این روش در توکامک دماوند نیز برای تخمین شکل و مکان پلاسما و هم‌چنین برای تعیین موقعیت ستون الکترون‌های گریزان به‌کار رفته است [۵-۷]، به‌گونه‌ای که ستون پلاسما با چند تک‌رشته سیم حامل جریان مدل‌سازی می‌شود و مجموع جریان این رشته‌ها برابر با جریان پلاسما خواهد بود. تعداد رشته جریان‌ها برای مدل‌سازی پلاسما در کاربردهای مختلف، متفاوت است. بدیهی است که با افزایش تعداد رشته جریان‌ها دقت تعیین مکان و مرز پلاسما نیز افزایش می‌یابد، البته پیش‌نیاز این امر این است که بتوان بیش‌ترین تعداد پارامترهای پلاسما را در حین آزمایش اندازه‌گیری کرد که توسط آن‌ها جریان هر یک از رشته جریان‌ها تخمین زده می‌شود. به عبارت دیگر دقت بالا در اندازه‌گیری شکل و مکان مستلزم تعداد بالایی از اندازه‌گیری‌های فیزیکی شار و میدان مغناطیسی پلاسما است.

روند کلی تخمین به این ترتیب است که پروب‌های مغناطیسی[4] و حلقه‌های شاری[5] که بر روی دیواره داخلی و بیرونی توکامک نصب شده‌اند، در طول زمان حضور پلاسما میدان و شار مغناطیسی محلی را در نقاط متعددی اندازه‌گیری می‌کنند. این میدان یا شار مغناطیسی، حاصل از ستون پلاسما، سیم‌پیچ‌های میدان مغناطیسی خارجی یا سیم‌پیچ‌های غیرفعال[6] است. میدان مغناطیسی و شار حاصل از سیم‌پیچ‌های خارجی را می‌توان مطابق با روابط مربوطه تعیین نمود زیرا جریان، تعداد دور و موقعیت قرارگیری آن‌ها نسبت به پروب‌های مغناطیسی یا حلقه‌های شار کاملاً مشخص است. تنها متغیر نامعلوم، سهم حاصل از ستون پلاسما بر روی پروب‌ها است که با محاسبه آن‌ها توسط روش‌هایی نظیر کم‌ترین مربعات خطا[7]، می‌توان شکل، مکان و سطوح شار ستون پلاسما را محاسبه و تعیین نمود.

در این پژوهش یک سامانه نمایش شکل، مکان و مرز پلاسما برای دسترسی سریع به اطلاعات هر شات و برنامه‌ریزی برای شات بعدی جهت بهره‌برداری در اتاق کنترل توکامک دماوند توسعه یافت. از مهم‌ترین ویژگی این سامانه می‌توان به تحلیل و نمایش شکل، مکان و سایر پارامترهای سطح مقطع پلاسما در بازه زمانی بسیار کوچک (حدود ۱۸۰-۲۰۰ ثانیه زمان بین دو شات) اشاره کرد. این سامانه اخیراً در اتاق کنترل توکامک دماوند مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. هم‌چنین زیر ساخت نرم‌افزاری آن به گونه‌ای است که می‌تواند به راحتی توسعه داده شود و برای کاربری‌های خاص پلاسما مورد استفاده قرار گیرد.

در این مقاله به بیان بخش‌های نرم‌افزاری این سامانه و نحوه کار آن پرداخته شده است. در بخش دوم الگوریتم تعیین پروفایل میدان مغناطیسی در توکامک دماوند با استفاده از پروب‌های مغناطیسی مورد بحث قرار می‌گیرد. سپس در بخش سوم پیش‌پردازش و نمایش داده‌ها در اتاق کنترل توکامک دماوند شرح داده می‌شود. در بخش چهارم نیز تعیین پروفایل شار مغناطیسی و شکل پلاسما و نمایش آن در اتاق کنترل و خروجی آن‌ها برای دو نوع سطح مقطع پلاسمای دایروی و کشیده مورد بررسی قرار می‌گیرد.

1. Real Time
2. Grad-Shafranov
3. Current Filament Model
4. Pickup Coil
5. Flux Loop
6. Passive Coils
7. Least Square Error

۲. الگوریتم تعیین پروفایل میدان‌مغناطیسی در توکامک دماوند با استفاده از پروب‌های مغناطیسی

هدف این بخش تهیه الگوریتم تخمین سطوح شار مغناطیسی و در نهایت شکل پلاسما است. به طور خلاصه در الگوریتم مذکور توزیع جریان پلاسما با چند رشته سیم حامل جریان تقریب زده می‌شود. میزان جریان هر یک از این رشته سیم‌ها با روش کم‌ترین مربعاتِ خطا و با به کارگیری اندازه‌گیری‌های مغناطیسی تخمین زده می‌شود. مرکز این رشته سیم‌ها موقعیت افقی و عمودی پلاسما را نشان می‌دهد. با محاسبه بیشینه مقدار شار مغناطیسی ناشی از این چند رشته سیم در فضای روی محدودکننده[1] می‌توان به طور تقریبی اولین نقطه‌ی برخورد پلاسما با محدودکننده را محاسبه کرد. برای بازسازی مرز پلاسما باید نقاطی که مقدار شار پلاسما در آن‌ها برابر با شار نقطه‌ی برخورد است پیدا شده و مجموعه این نقاط به عنوان کانتور[2] مرز پلاسما معرفی شوند. نهایتاً پارامترهای هندسی سطح مقطع پلاسما از جمله کشیدگی، مثلث گونگی و . . . از روی کانتور به دست آمده محاسبه می‌شوند [۱، ۵]. توسعه زمانی الگوریتم تخمین جریان و شکل پلاسما در توکامک دماوند به شرح زیر خواهد بود:

۱. خواندن داده‌های ورودی: داده‌های مربوط به جریان سیم‌پیچ‌های خارجی (پیچه‌های تعادلی، کشیدگی، کنترل افقی، کنترل عمودی و کنترل کشیدگی)، جریان پلاسما ($[I_p]$) و میدان نقطه‌ای در محل نصب پروب‌های مغناطیسی قطبی ($[MP_۶, MP_۸,\ldots,MP_{۲۲}, MP_{۳۰},MP_{۳۲},\ldots, MP_{۴۶}]$) از سیستم داده‌گیری دریافت می‌شود.

۲. پیش‌پردازش روی داده‌ها: مقادیر آفست[3] سیگنال‌ها و نویز مربوط به پیچه‌های روگوفسکی و پروب‌های مغناطیسی براساس فیلترهای قابل تنظیم حذف می‌شوند. ضرایب کالیبراسیون اندازه‌گیری‌های مربوط به پیچه‌های روگوفسکی و پروب‌های مغناطیسی اعمال می‌گردند. داده‌های جریان در این مرحله به یکای آمپر و داده‌های میدان مغناطیسی به یکای تسلا می‌رسند.

۳. تخمین جریان پلاسما: ماتریس‌های محاسبه شده از توابع گرین شامل توابع گرین میدان سیم‌پیچ‌های خارجی و رشته جریان‌های پلاسما در محل پروب‌های مغناطیسی، از فایل‌هایی که قبلاً محاسبه و ذخیره شده‌اند، خوانده می‌شوند. محاسبات مربوط به تخمین کم‌ترین مربعات خطا روی داده‌ها انجام شده و جریان‌های مجهول محاسبه می‌گردند [۸، ۹].

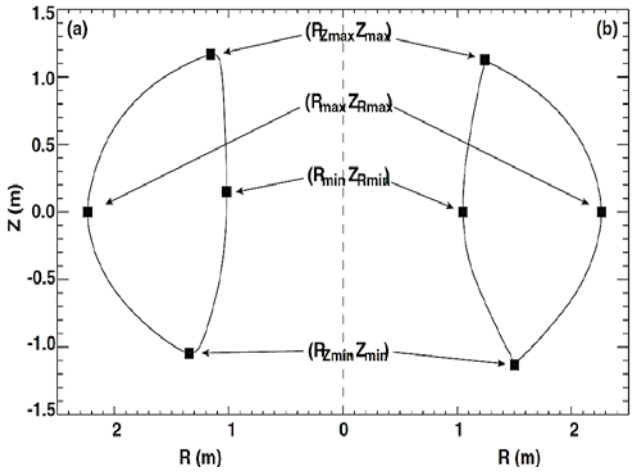
۴. تخمین موقعیت عمودی و افقی پلاسما: مختصات رشته جریان‌ها از جدول جستجو[4] خوانده می‌شود و با استفاده از رابطه ممان‌های جریان پلاسما و تخمین محاسبه شده در مرحله ۳، موقعیت عمودی و افقی مرکز پلاسما تخمین زده می‌شود.

۵. محاسبه بیشینه شار در مختصات محدودکننده‌ها: مختصات نقاط از پیش تعیین شده روی محدودکننده و ماتریس ضرایب مربوط به توابع گرین شار رشته جریان‌ها در مختصات محدودکننده از جدول جستجو خوانده می‌شود. مقدار شار ناشی از جریان همه رشته‌ها در محل محدودکننده و بیشنیه‌ی آن محاسبه می‌گردد.

۶. رسم کانتور مرز: مختصات نقاط از پیش تعیین شده در محفظه خلأ و ماتریس ضرایب مربوط به توابع گرین شار رشته جریان‌ها در مختصات محفظه از جدول جستجو خوانده می‌شود. شار در تمام نقاط محفظه محاسبه می‌شود. کانتور متناظر با شار ثابت و برابر با مقدار شار بیشینه که در مرحله‌ی ۵ محاسبه شد، تعیین می‌گردد.

۷. محاسبه‌ی پارامترهای شکل پلاسما: برای کانتور محاسبه شده در مرحله ۶ پارامترهای شعاع بزرگ، شعاع کوچک، کشیدگی، مثلث‌گونگی و نسبت منظر مطابق شکل ۱ و روابط ۱ تا ۶ محاسبه می‌شود [۸].

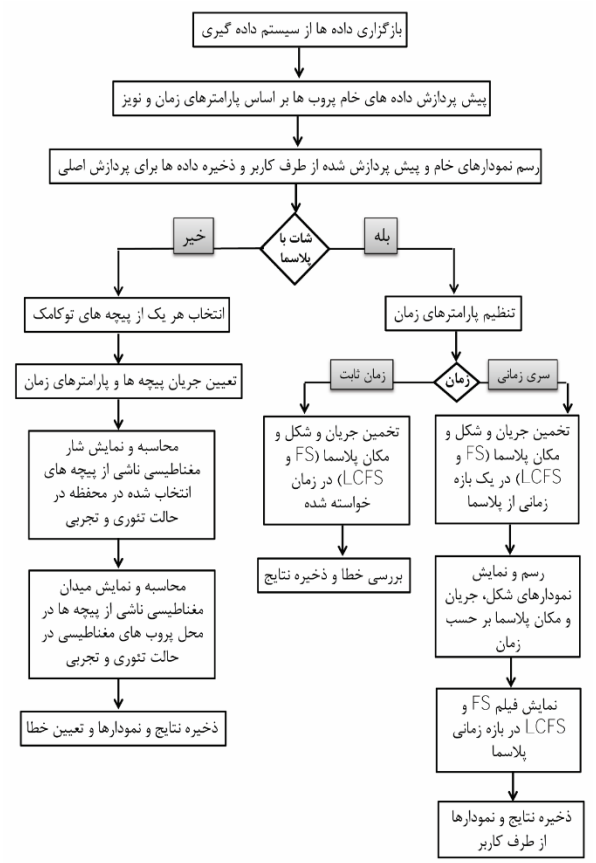
مراحل کد توسعه یافته که در قالب فوق شرح داده شد، به صورت یک فلوچارت نیز به طور خلاصه در ادامه نمایش داده شده است.



شکل ۱. سطح مقطع پلاسما.

1. Limiter
2. Contour
3. Offset
4. Lookup Table

ضمیمه



$$Major\ radius\ R = \frac{R_{max} + R_{min}}{۲} \quad (۱)$$

$$Minor\ radius\ a = \frac{R_{max} + R_{min}}{۲} \quad (۲)$$

$$Aspect\ ratio = \frac{R}{a} \quad (۳)$$

$$Elongation\ k = \frac{z_{max} - z_{min}}{۲a} \quad (۴)$$

$$Upper\ triangularity\ \delta_u = \frac{R - Rz_{max}}{a} \quad (۵)$$

$$Lower\ triangularity\ \delta_l = \frac{R - Rz_{min}}{a} \quad (۶)$$

۳. پیش‌پردازش و نمایش داده‌ها در اتاق کنترل

همان‌طور که در بخش بیان الگوریتم محاسباتی مطرح گردید، در ابتدا لازم است خروجی حسگرها که شامل ۱۸ پروب مغناطیسی و ۶ پیچه روگوفسکی اندازه‌گیر جریان هستند پس از داده‌برداری از فیلتر پایین‌گذر (با پهنای باند حدود ۵۰۰kHz) عبور کرده و خطای بایاس آن‌ها به صورت تطبیقی در هر شات حذف گردد و سپس با اعمال ضرایب کالیبره آن‌ها، برای استفاده در محاسبات تعیین مرز پلاسما آماده پردازش شود. برای اجرای کیفی و سریع این پیش‌پردازش یک رابط کاربر گرافیکی[1] در محیط متلب[2] توسعه یافت که برای دریافت داده با سیستم داده‌گیری فعلی توکامک دماوند تطابق لازم را دارد. این کد توسعه یافته هم‌چنین برای پیش‌پردازش برون- خط[3] در تعیین شکل پلاسما و یا نمایش و تحلیل سیگنال بعد از شات در اتاق کنترل توکامک دماوند قابل استفاده است. در شکل ۲ نمایی از رابط کاربر گرافیکی تهیه شده، نشان داده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود پارامترهای شماره شات و فرکانس نمونه‌برداری سیستم داده‌گیری، مرتبه و نوع فیلتر و هم‌چنین فرکانس نمونه‌برداری، زمان شروع و پایان پلاسما و جدول ضرایب کالیبره‌ها در این برنامه قابل تنظیم و اعمال است. از دیگر ویژگی‌های این رابط کاربری می‌توان به قابلیت فعال کردن حذف نویز، حذف بایاس، رسم نمودارهای لازم و ذخیره داده پس از اعمال پیش‌پردازش اشاره نمود.

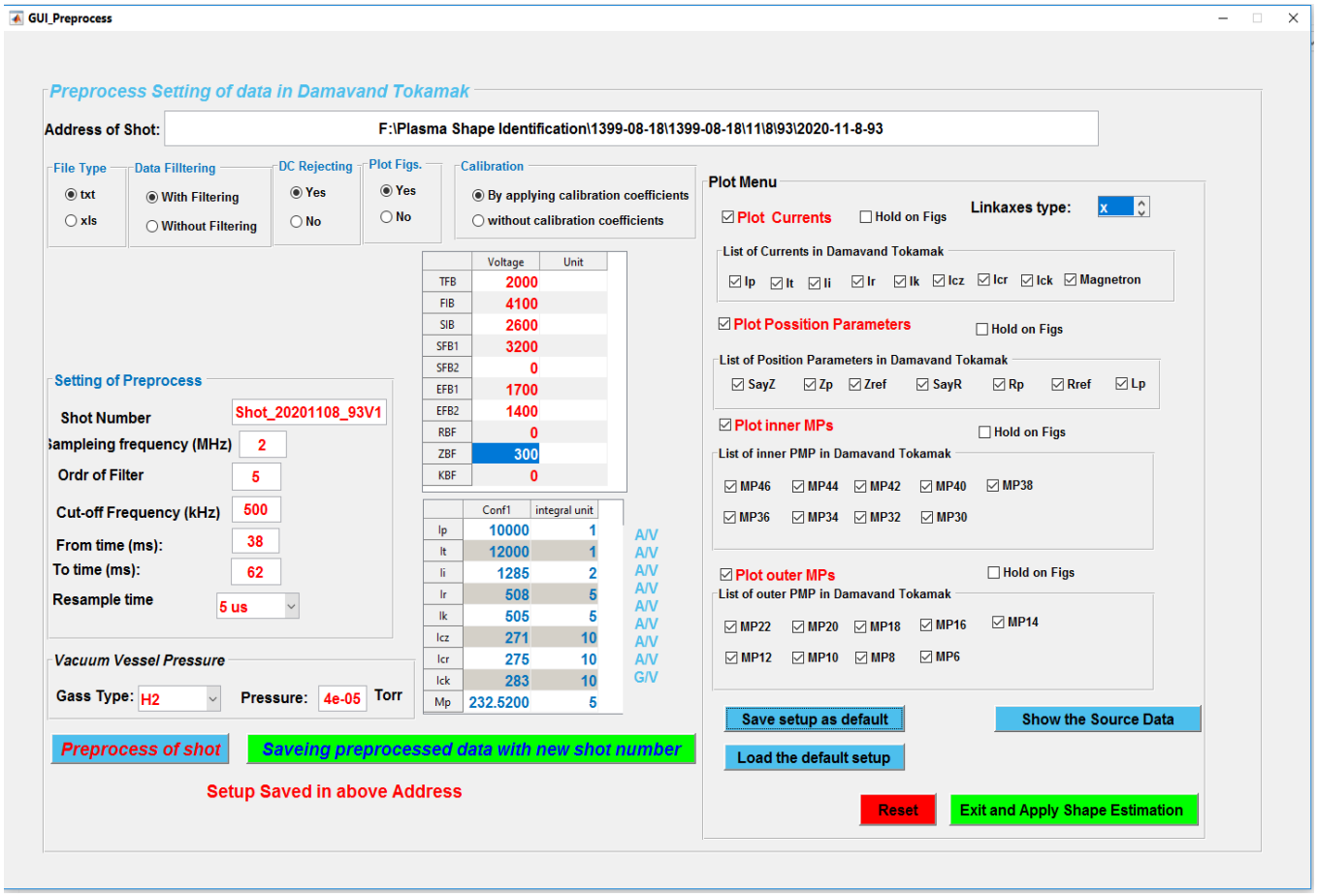
با اجرای این برنامه کلیه سیگنال‌های مورد نیاز برای تعیین مرز پلاسما پیش‌پردازش شده و در نمایشگرهای اتاق کنترل نمایش داده می‌شود و سپس کلیه اطلاعات شات مربوطه در یک فایل با شماره استاندارد در سامانه داده‌گیری توکامک دماوند ذخیره می‌شود که از آن برای تعیین پروفایل سطوح شار و شکل سطح مقطع پلاسما استفاده می‌گردد. هم‌چنین از این برنامه کاربردی به منظور پیش‌پردازش سریع داده‌ها در توکامک دماوند، نمایش آن‌ها در حین شات و تحلیل و ذخیره داده‌ها با حجم کم در اتاق کنترل استفاده خواهد شد.

در برنامه مذکور، قابلیت بارگذاری و مشاهده داده‌های اصلی قبل از اعمال پیش‌پردازش نیز وجود دارد، زیرا کاربر بر اساس رویت و تحلیل سیگنال‌ها قادر به تصمیم‌گیری جهت به‌کارگیری برنامه پیش‌پردازش برای تعیین پروفایل شار و شکل پلاسما در حالت برون- خط می‌باشد و سپس نسبت به ذخیره داده‌ها اقدام می‌نماید. هم‌چنین سیگنال‌های مورد نیاز برای تحلیل و نمایش بر اساس ماهیت آن‌ها طبقه‌بندی و تفکیک شده‌اند به‌طوری‌که نمایش و یا عدم نمایش سیگنال‌ها، با تنظیم نمایش مجزا و یا گروهی، برای جریان پیچه‌ها، پارامترهای کنترل افقی و عمودی و پروب‌های مغناطیسی دیواره داخلی و خارجی مطابق شکل ۳ انجام می‌شود.

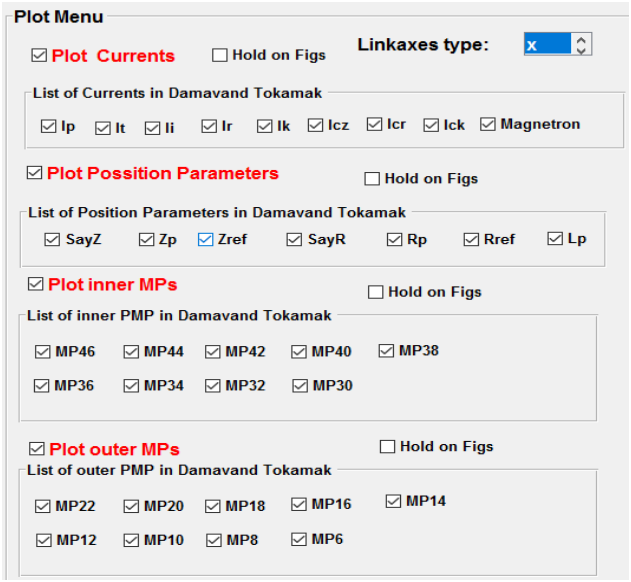
در شکل‌های ۴ تا ۶، نمایی از داده‌های گرفته شده برای شات ۲۸ با مشخصه *Shot _۲۰۱۳۰۷۱۶_۲۸V۱* نشان داده شده است. لازم به ذکر است که در این بخش تحلیل هر کدام از سیگنال‌های شات مد نظر نیست و این نمودارها فقط به منظور بیان مراحل الگوریتم و خروجی کد توسعه یافته نشان داده شده‌اند.

1. Graphical User Interface

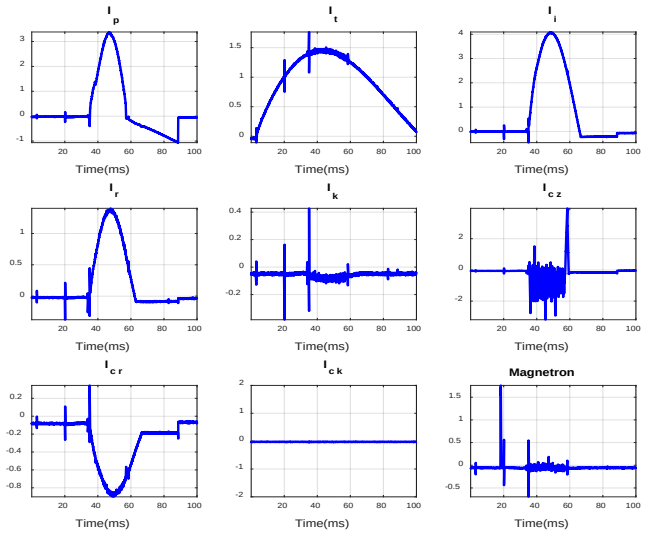
2. MATLAB
3. Offline



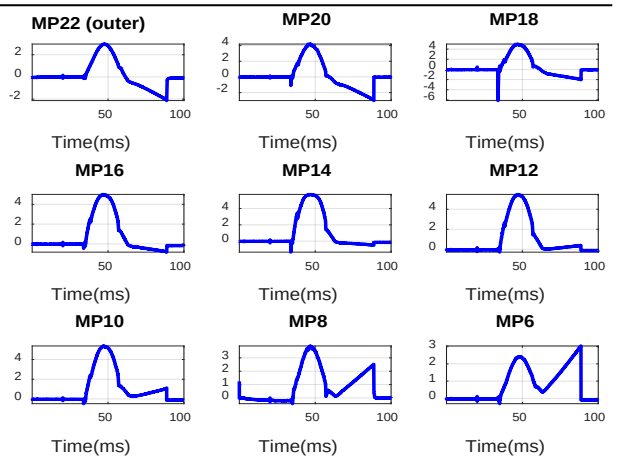
شکل ۲. نمایی از رابط کاربر گرافیکی توسعه یافته جهت اعمال تنظیمات پیش‌پردازش برای شات و هم‌چنین نمایش سیگنال‌ها در اتاق کنترل و ذخیره داده‌ها برای تعیین سطوح شار و شکل سطح مقطع پلاسما.



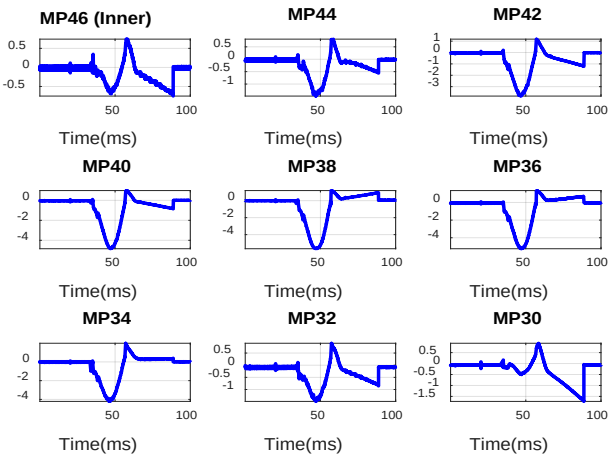
شکل ۳. نمایی از برنامه رابط گرافیکی برای انتخاب سیگنال‌های مورد نظر و نوع نمایش آنها.



شکل ۴. نمایش سیگنال‌های جریان پیچه‌ها، جریان پلاسما و مگنترون توکامک دماوند قبل از پیش‌پردازش برای شات ۲۸.



شکل ۵. نمایش سیگنال‌های پروب‌های دیواره خارجی قبل از پیش‌پردازش برای شات ۲۸.



شکل ۶. نمایش سیگنال‌های پروب‌های دیواره داخلی قبل از پیش‌پردازش برای شات ۲۸.

برای پیش‌پردازش داده‌های خام حاصل از شات، ابتدا چهار مورد انتخابی نظیر شکل ۷ در نظر گرفته شده است که به ترتیب از سمت چپ، انتخاب برای اعمال فیلتر، حذف خطای بایاس DC سامانه داده‌گیری، نمایش سیگنال‌ها بعد از اعمال پیش‌پردازش و اعمال ضرایب کالیبراسیون می‌باشند.

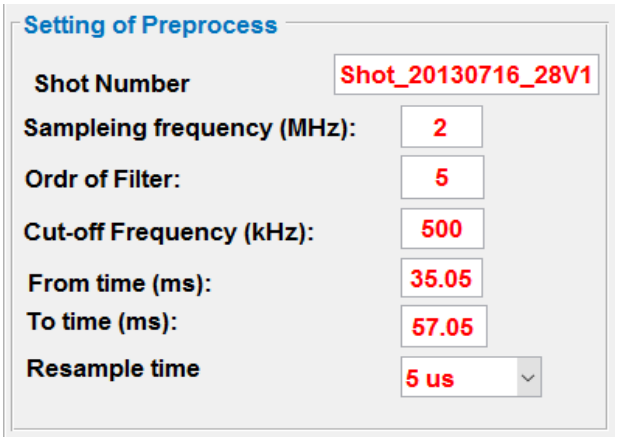
سپس مطابق شکل ۸ پارامترهای قابل تغییر برای پردازش اولیه داده‌ها با توجه به موارد زیر تنظیم می‌گردد:

- فرکانس نمونه‌برداری سیستم داده‌گیری که بر اساس آن داده‌برداری اولیه انجام شده است.
- تنظیم مرتبه فیلتر و فرکانس قطع[1] که یک فیلتر IIR[2] بدون تغییر فاز داده می‌باشد.
- پردازش با در نظر گرفتن زمان شروع و اتمام سیگنال‌ها و با دقت زمانی ۰٫۵ میکروثانیه (با توجه به نمونه‌برداری ۲ MSample/s)
- زمان نمونه‌برداری مجدد از داده‌ها که موردهای ۵، ۱۰، ۱۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میکروثانیه برای آن در نظر گرفته شده است.
- ویرایش اسم، شماره و سایر مشخصات شات

بعد از اعمال تنظیمات و پیش‌پردازش، سیگنال‌ها به صورت گروهی نمایش داده می‌شوند که قابل انتقال به مانیتورهای مختلف در توکامک دماوند و آماده ذخیره‌سازی برای پردازش اصلی هستند. پس از این مرحله، ذخیره داده‌ها در قالب فایل‌های متلب انجام می‌شود که برای پردازش شکل و کاهش حجم داده‌ها مؤثر است. با توجه به شدت و فرکانس نویز در داده‌های خام توکامک دماوند انتخاب مناسب برای پارامتر فرکانس قطع ۵۰۰ kHz و با مرتبه ۵ هست.

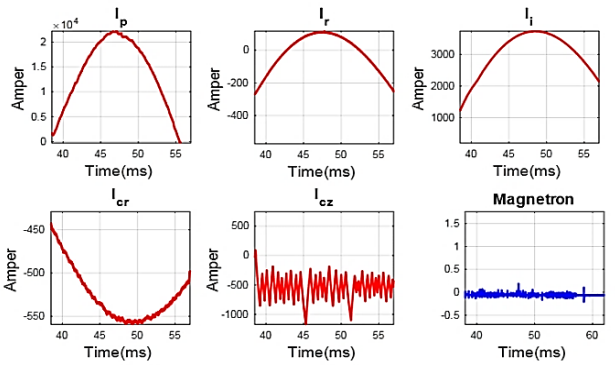
در شکل‌های ۹ تا ۱۱، نمونه‌ای از داده‌ها برای شات ۲۸ پس از پیش‌پردازش با فیلتر ۵۰۰ kHz از مرتبه ۵ بدون ایجاد تأخیر فاز، به همراه اعمال ضرایب کالیبراسیون، حذف بایاس، نمایش سیگنال در محدوده آن، تنظیم زمان شروع تا پایان پلاسما (۳۵ ms تا ۵۷ ms) نشان داده شده است.

شکل ۷. نمایی از انتخاب گزینه‌های برنامه برای پیش‌پردازش.

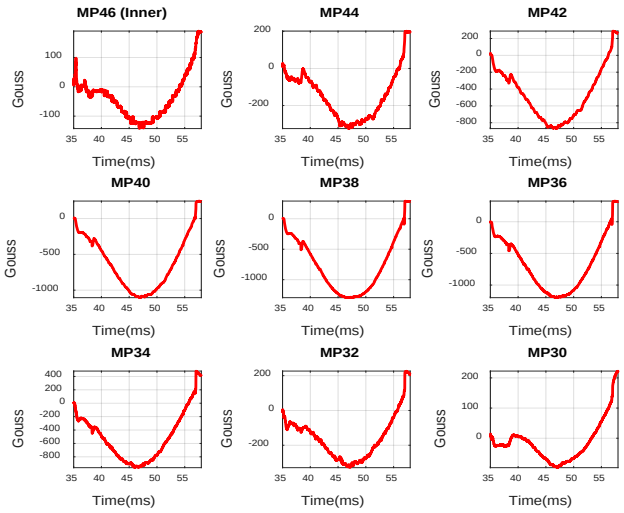


شکل ۸. نمایی از کد کاربر گرافیکی برای تنظیم فیلتر و نمونه‌برداری مجدد داده‌ها و تغییر مشخصه شات.

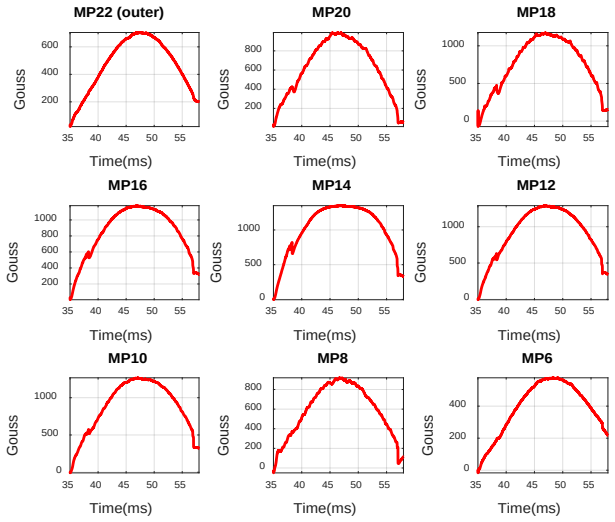
1. Cutoff Frequency
2. Infinite Impulse Response



شکل ۹. نمایش سیگنال‌های جریان پیچه‌ها، جریان پلاسما و مگنترون توکامک دماوند بعد از اعمال پیش‌پردازش برای شات ۲۸.



شکل ۱۰. نمایش سیگنال‌های پروب‌های مغناطیسی دیواره داخلی بعد از اعمال پیش‌پردازش برای شات ۲۸.



شکل ۱۱. نمایش سیگنال‌های پروب‌های مغناطیسی دیواره خارجی بعد از اعمال پیش‌پردازش برای شات ۲۸.

۴. تعیین پروفایل شار مغناطیسی و شکل پلاسما و نمایش آن در اتاق کنترل

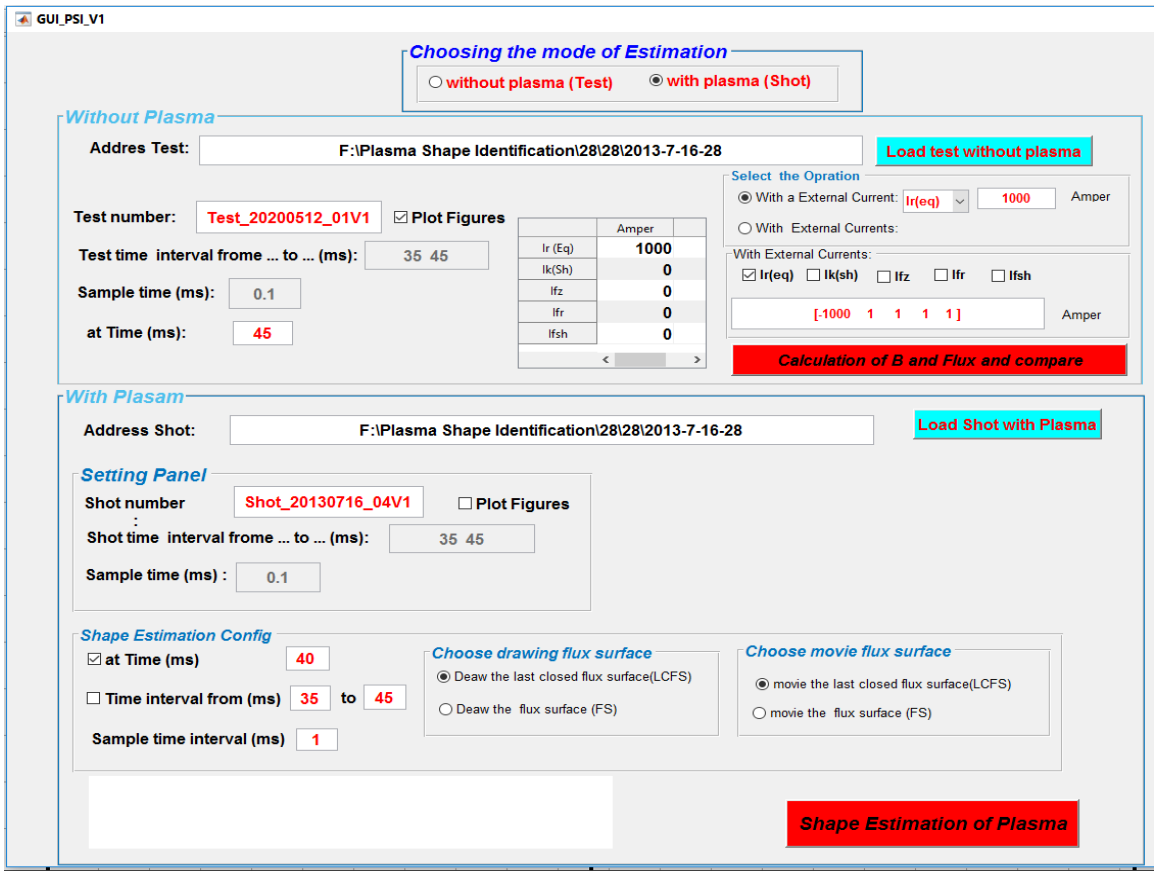
برای پردازش اصلی پروفایل شار و تعیین شکل پلاسما رابط گرافیکی دیگری توسعه یافت که خروجی برنامه قبلی به عنوان ورودی این بخش مورد استفاده قرار می‌گیرد. نحوه تنظیمات کلی این بخش در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل قابل مشاهده می‌باشد، این برنامه شامل دو مجموعه مجزای با پلاسما و بدون پلاسما می‌باشد. در قسمت بالای آن، مد تخمین قابل انتخاب برای شات با پلاسما و یا تست بدون پلاسما جهت تخمین سطوح شار و میدان مغناطیسی در نظر گرفته شده است. هر دو مد به‌صورت مجزا کار می‌کنند و با انتخاب هر یک از آن‌ها پارامترهای مد دیگر غیر فعال می‌شود.

در این کد تمام پارامترهای مختصات، تعداد دور و سطح مقطع تمام پیچه‌ها و همچنین مختصات محدودکننده و پروب‌های مغناطیسی و محفظه خلأ توکامک دماوند مطابق شکل ۱۳ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود پروب‌های مغناطیسی با دایره‌های سبزرنگ، پیچه‌های تعادلی با رنگ قرمز، پیچه‌های کشیدگی با مستطیل‌هایی به رنگ سبز، پیچه‌های کنترل افقی با رنگ آبی، پیچه‌های کنترل عمودی با رنگ صورتی و پیچه‌های کنترل کشیدگی با رنگ سیاه مشخص شده‌اند.

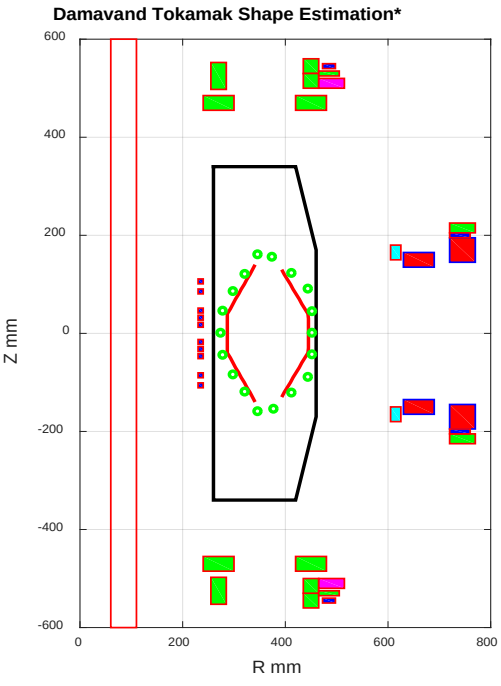
قابل ذکر است که توابع گرین میدان مغناطیسی به ازای یک آمپر از هرکدام از پیچه‌ها در محل هر کدام از پروب‌های مغناطیسی محاسبه شده و برای استفاده در محاسبات از قبل ذخیره می‌شود. هم‌چنین توابع شار مغناطیسی به ازای جریان واحد از هر کدام از پیچه‌ها در کل محفظه در فضای افقی (از ۲۶۰ mm تا ۴۶۰ mm) و عمودی (از ۳۴۰- mm تا ۳۴۰ mm) محاسبه شده و برای استفاده در محاسبات برخط[1] ذخیره می‌شود و سپس بر اساس وابستگی خطی نسبت به جریان پیچه‌ها، در محاسبات زمان واقعی پس از اندازه‌گیری جریان پیچه‌ها مقدار آن‌ها در تابع گرین مربوطه ضرب می‌گردد تا شار (و یا میدان مغناطیسی) ناشی از جریان پیچه در محفظه (و یا پروب مغناطیسی) حاصل گردد.

برنامه تست بدون پلاسما، جهت شبیه‌سازی و بررسی میدان مغناطیسی ناشی از جریان تک‌تک پیچه‌ها و یا ترکیبی از آن‌ها می‌باشد.

1. Online



شکل ۱۲. نمایی از رابط گرافیکی دوم که جهت تنظیم و تعیین پارامترهای شکل پلاسما در توکامک دماوند توسعه یافته است.



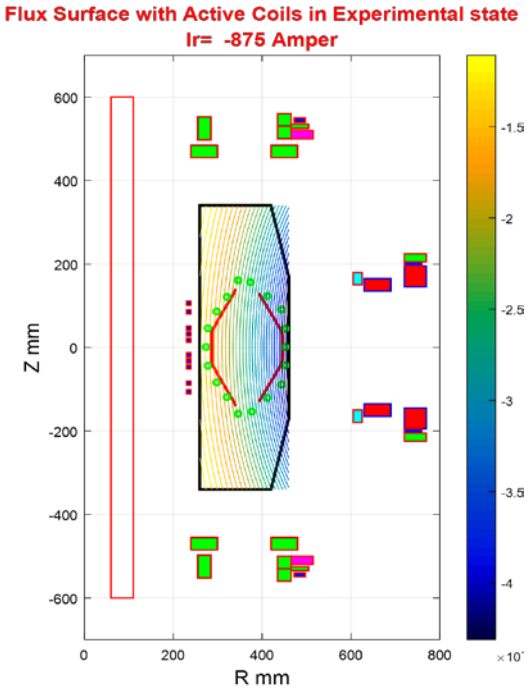
شکل ۱۳. نمایی از محیط پیچه‌ها و محفظه خلأ، پروب‌های مغناطیسی و محدودکننده‌ها در توکامک دماوند.

میدان مغناطیسی ناشی از جریان پیچه‌ها در محل پروب-های مغناطیسی توکامک دماوند به صورت ریاضی و بر اساس توابع گرین محاسبه می‌گردد و سپس سطوح شار مغناطیسی آن‌ها نمایش داده می‌شود. هم‌چنین می‌توان از این قسمت برای بررسی شبیه‌سازی و مقایسه با نتایج تجربی میدان‌های مغناطیسی ناشی از عبور جریان در هر یک از پیچه‌ها و یا ترکیبی از آن‌ها استفاده نمود.

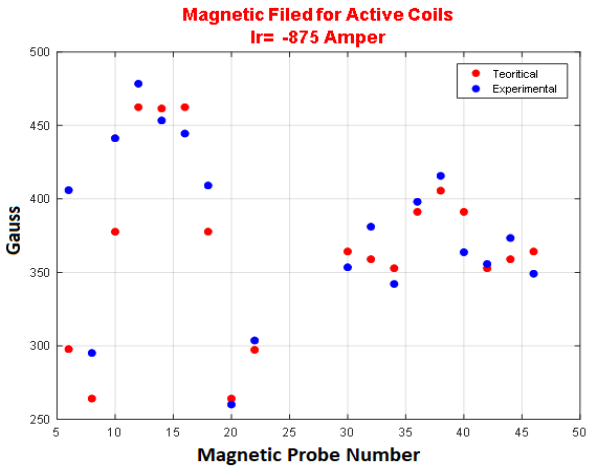
برای مثال در صورتی که فقط بانک‌های خازنی EFB۱ و EFB۲ شارژ شوند و میدان مغناطیسی ناشی از عبور جریان در پیچه I_r در محل پروب‌های مغناطیسی اعمال شود، در این صورت با بارگذاری شات مربوطه در کد توسعه یافته نمودار داده‌های آن نشان داده خواهد شد. برای یک زمان دلخواه مثلاً ۵۲ ms که جریان در پیچه تعادلی حدود ۸۷۵ آمپر می‌باشد، با وارد کردن این عدد برای I_r در بخش شبیه‌ساز و انتخاب گزینه "Calculation of B and Flux and compare" نتایج محاسبات و مقایسه با داده‌های تجربی در نمودارها نشان داده می‌شوند. در شکل ۱۴ شار مغناطیسی ناشی از جریان ۸۷۵ آمپر در پیچه تعادلی نشان داده شده است. لازم به ذکر است که

جهت خطوط میدان مغناطیسی برای میدان پیچه‌های تعادلی فقط در راستای عمودی است.

هم‌چنین نتیجه محاسبه میدان پروب‌های مغناطیسی در دو حالت محاسباتی و تجربی در شکل ۱۵ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود خطای پروب‌های مغناطیسی در بخش‌های انتهایی محفظه بیش‌تر است که ممکن است از خطا در ضرایب کالیبراسیون، زاویه نصب در داخل محفظه و یا موقعیت آن‌ها باشد. شبیه‌سازی و مقایسه آن با حالت تجربی می‌تواند برای هر یک از پیچه‌ها به‌صورت مجزا انجام گردد.



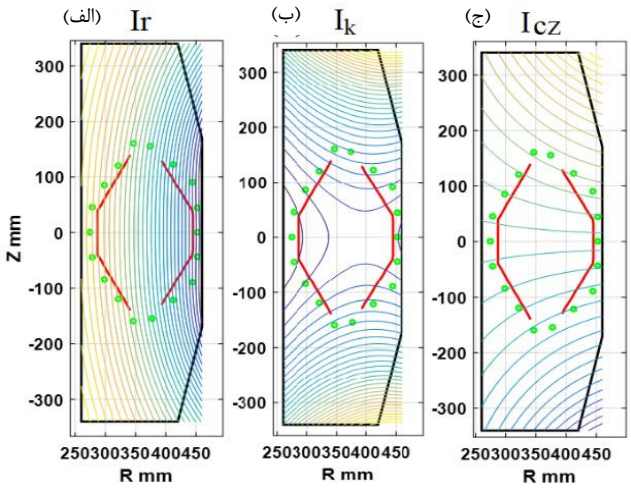
شکل ۱۴. شار مغناطیسی ناشی از جریان ۸۷۵ آمپر در پیچه تعادلی.



شکل ۱۵. نمایش میدان مغناطیسی ناشی از جریان ۸۷۵ آمپر در محل پروب‌های مغناطیسی در دو حالت محاسباتی و تجربی.

در شکل ۱۶ نتایج اجرای بخشی از الگوریتم نوشته شده برای محاسبه میدان مغناطیسی حاصل از پیچه‌های مختلف توکامک دماوند به ازای مقدار مشخص جریان و به‌طور مجزا آورده شده است تا بررسی و ارزیابی اولیه راجع به شکل خطوط میدان مغناطیسی صورت گیرد. براین اساس در شکل میدان مغناطیسی حاصل از پیچه میدان تعادلی، پیچه میدان کشیدگی و پیچه کنترل مکان عمودی پلاسما با جریان ۱۰۰۰ آمپر در داخل محفظه خلأ نشان داده شده است. با به‌کارگیری این بخش از برنامه می‌توان به تحلیل میدان مغناطیسی هر یک از پیچه‌ها و برایند آن‌ها پرداخت و هم‌چنین صحت سیگنال‌های پروب‌های مغناطیسی و خطای اندازه‌گیری آن‌ها را بررسی کرد.

در شکل ۱۷ تنظیمات مربوط به تعیین پروفایل شار و شکل پلاسما آورده شده است. برای تخمین رشته جریان با ۶ فیلامان، از روش کم‌ترین مربعات خطی مقید[1] با قیود حد بالا و پایین جریان پلاسما و هم‌چنین برابری جمع جریان رشته‌ها با جریان کلی پلاسما استفاده شده است. در اجرای برنامه توسعه یافته دو قابلیت وجود دارد. اول این‌که فقط در یک لحظه مشخص از مدت زمان یک شات، تخمین شکل و پارامترهای آن انجام می‌گیرد. قابلیت دیگر این‌که تخمین در یک بازه قابل تنظیم از t_1 تا t_2 با گام‌های قابل تنظیم Δt صورت می‌گیرد که در این حالت تخمین شکل در لحظات مورد نظر انجام شده و نتایج تحلیل آن در چندین نمودار بیان می‌گردد.



شکل ۱۶. شکل خطوط میدان مغناطیسی تولید شده در توکامک دماوند به ازای جریان در پیچه‌های مختلف (الف) تعادلی، (ب) کشیدگی و (ج) کنترل مکان عمودی پلاسما.

1. Constrained Linear Least-Squarer Method

در تخمین شار و شکل پلاسما جهت دسترسی سریع دو پنل مهم "Choose drawing flux surface" و "Choose movie flux surface" تدارک دیده شده است. برای رسم سطوح شار در کد توسعه یافته دو رویکرد رسم سطوح کامل شار یا رسم آخرین لایه بسته شار در نظر گرفته شده است.

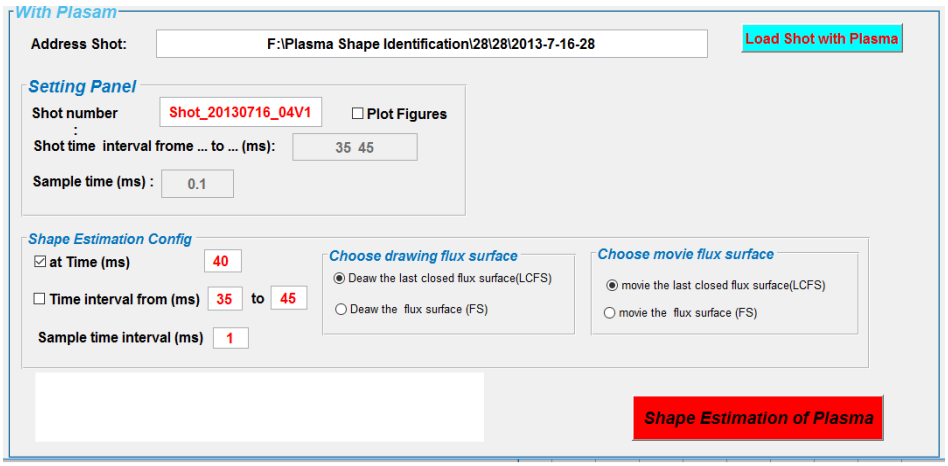
این پنل برای هر دو وضعیت تک لحظه و یا بازه زمانی قابل استفاده می‌باشد. پس از تخمین جریان هر یک از رشته جریان‌ها می‌توان با توجه به روابط ۱ تا ۶ مکان عمودی و افقی و شکل پلاسما را محاسبه کرد. در ادامه برای محاسبه مرز پلاسما و یا آخرین لایه بسته شار مغناطیسی که از محل برخورد با محدودکننده به دست می‌آید، ضروری است شار مغناطیسی ناشی از جریان پلاسما و جریان‌های پیچه‌های فعال در فضای (۲۶۰ mm تا ۴۶۰ mm) و (۳۴۰ mm- تا ۳۴۰ mm) با دقت حدود ۱ mm محاسبه گردد که با توجه به رابطه خطی بین شار و جریان، از حاصل‌ضرب جریان هر یک از پیچه‌ها و رشته جریان‌های پلاسما در ماتریس تابع گرین مربوطه و در نهایت حاصل جمع اثر آن‌ها به‌دست می‌آید. برای محاسبه سطوح شار لحظه‌ای پلاسما با دقت ۱ mm، در حدود ۱۳۶٫۰۰۰ جمع اعشار و ۱٫۴۹۶٫۰۰۰ ضرب اعشار لازم است که در مرحله پیاده‌سازی برخط، جهت تعیین مرز و شکل پلاسما و همچنین پیاده‌سازی کنترل شکل باید در نظر گرفته شود. در شکل‌های ۱۸ و ۱۹ تخمین شکل، مکان و مرز پلاسما در طول زمان پلاسما در توکامک دماوند برای دو حالت پلاسمای با سطح مقطع دایروی و کشیده با فاصله زمانی ۱ میلی‌ثانیه نشان داده شده است.

۵. نتیجه‌گیری

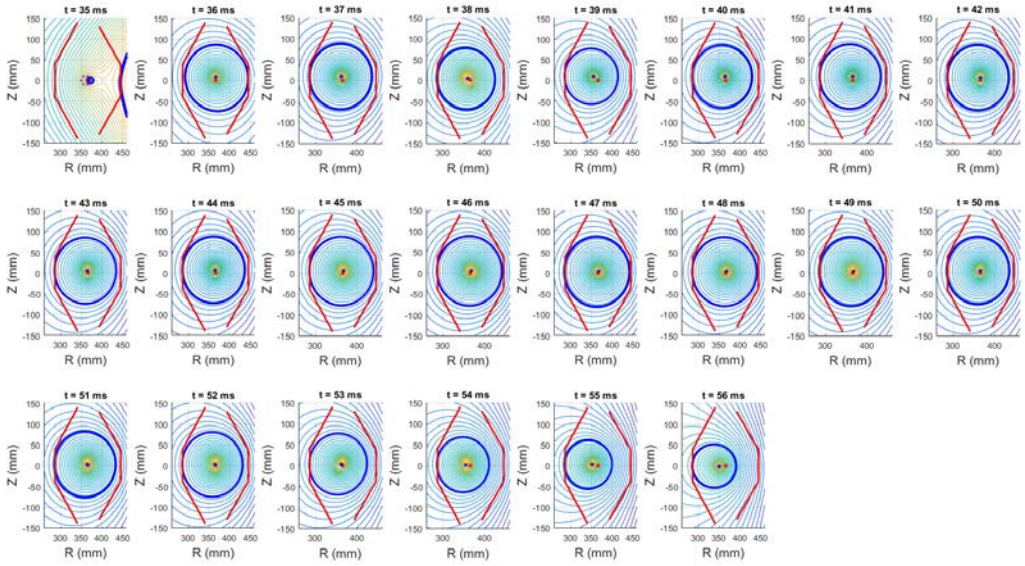
در این مطالعه یک زیرساخت نرم‌افزاری جهت تعیین و نمایش شکل، مکان و مرز پلاسما با استفاده از روش رشته جریان برای توکامک دماوند توسعه یافت. در این راستا به تشریح و بیان کد و رابط کاربر گرافیکی نوشته شده برای محاسبه و نمایش شکل، مکان و مرز پلاسمای توکامک دماوند بر اساس داده‌های پروب‌های مغناطیسی، جریان پیچه‌های مولد میدان مغناطیسی و جریان پلاسما پرداخته شد. کد توسعه یافته در دو بخش پیش‌پردازش و تخمین شکل و شار مغناطیسی پلاسما نوشته شده و برای تحلیل داده‌های آزمایش‌های واقعی و همچنین به‌کارگیری برای موارد آموزشی قابل استفاده می‌باشد. مهم‌ترین قابلیت‌های کد توسعه یافته عبارتند از:

- پیش‌پردازش داده‌های خام بر اساس پارامترهای مرتبه فیلتر نویز، فرکانس نمونه‌برداری، زمان داده‌ها
- نمایش داده‌های خام و داده‌های پردازش شده و ذخیره داده‌های پردازش شده
- محاسبه و نمایش شار مغناطیسی تئوری و عملی برای حالت بدون پلاسما با قابلیت تعیین جریان هر یک از پیچه‌های توکامک
- تنظیم پارامترهای زمان برای محاسبه شکل و جریان پلاسما در زمان ثابت یا سری زمانی
- تخمین جریان و شکل پلاسما (FS و LCFS) در زمان ثابت
- تخمین جریان و شکل پلاسما (FS و LCFS) در بازه زمانی پلاسما با فاصله زمانی خواسته شده
- نمایش نمودار و فیلم شکل و جریان پلاسما
- نمایش گرافیکی شار در فضای محفظه خلأ
- نمایش گرافیکی میدان مغناطیسی هر یک از از پروب‌ها
- نمایش خطا در هر یک از پروب‌ها

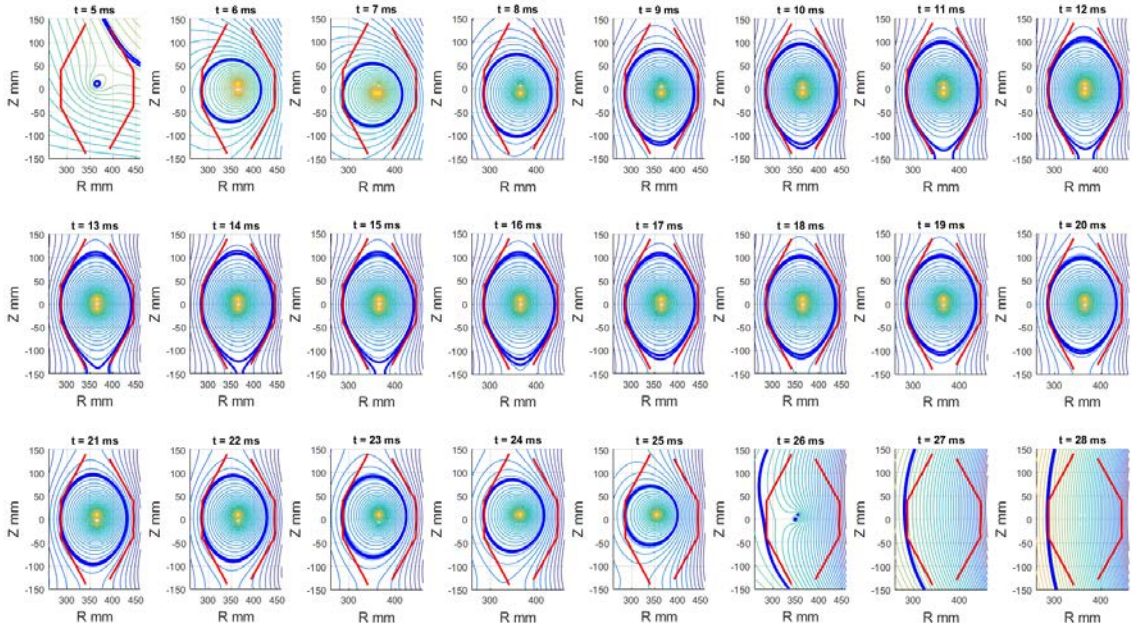
همچنین در این کار تحقیقاتی تنظیمات پایه‌ای مربوط به کد مذکور و نحوه بهره‌برداری از آن به تفکیک بیان گردیده و نتایج سامانه برای چندین شات با ساختار پلاسمای دایروی و کشیده نمایش داده شده است.



شکل ۱۷. نمایی از کد توسعه یافته جهت محاسبه سطوح شار و شکل پلاسما در زمان‌های مختلف.



شکل ۱۸. شکل، مکان و مرز برای پلاسمای توکامک دماوند با سطح مقطع دایروی شات شماره Shot_20130716_28V1.



شکل ۱۹. شکل، مکان و مرز برای پلاسمای توکامک دماوند با سطح مقطع کشیده شات شماره Shot_20130716_28V1.

مراجع

1. Ch. Rasouli, *Equilibrium restoration in Damavand tokamak using gridless computing method*, PhD Thesis, Shahid Beheshti University, (2015) (In Persian).
2. J.M. Moret, et al, *Tokamak equilibrium reconstruction code LIUQE and its real time implementation*, Fusion Eng. Des., **91**, 1 (2015).
3. K. Yasuda, et al, *Estimation of Tokamak Plasma Position and Shape in TOKASTAR-2 Using Magnetic Field Measurement, Plasma and Fusion Research*, Regular Articles, **13**, 3402072 (2018).
4. R. Lopez-Callejas, et al, *Plasma position measurement on the Novillo tokamak*, Fusion Engineering and Design, **54**, 21 (2001).
5. C. Rasouli, F. Abbasi Davani, *Identification of the plasma boundary shape and position in the Damavand tokamak*, Plasma Phys. Rep., **43**, 1 (2017).
6. B. Pourshahab, et al, *Temporal and spatial evolution of runaway electrons at the instability moments in Damavand tokamak*, Physics of Plasmas, **23**, 072501 (2016).
7. M. Fatahi, et al, *Optimal estimation of plasma boundary shape using magnetic probe measurements in Damavand tokamak*, Fusion Engineering and Design, **170**, 112519 (2021).
8. D.W. Swain, G.H. Neilson, *An efficient technique for magnetic analysis of non-circular, high-beta tokamak equilibria*, Nuclear Fusion, **22**, 1015 (1982).
9. F. Hofmann, G. Tonetti, *Fast identification of plasma boundary and X-points in elongated tokamaks*, Nuclear Fusion, **28**, 15 (1988).

COPYRIGHTS
©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.

استناد به این مقاله
داود ایرجی، حسین رسولی، چاپار رسولی، بنفشه پورشهاب (۱۴۰۲)، توسعه سامانه نمایش شکل و مکان پلاسما برای اتاق کنترل توکامک دماوند، ۱۰۶، ۱۷۰-۱۸۱

DOI: 10.24200/nst.2022.1143.1752 **Url**: https://jonsat.nstri.ir/article_1505.html