



اندازه‌گیری جریان پلاسمای توکامک دماوند با استفاده از پروب‌های مغناطیسی به عنوان پیچه روگوفسکی گسسته

فاطمه شاکری^۱، چاپار رسولی^{۲*}

۱. دانشکده‌ی فیزیک، دانشگاه کاشان، صندوق پستی: ۸۷۳۱۷-۵۳۱۵۳، کاشان- ایران

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

*Email: crasouli@aeoi.org.ir

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۴/۱۵ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۱۱/۲۷

چکیده

در این مقاله مجموعه پروب‌های مغناطیسی توکامک دماوند که برای اندازه‌گیری میدان مغناطیسی قطبی موضعی به کار می‌روند، در یک ساختار جدید، به‌عنوان یک پیچه روگوفسکی گسسته نصب شده در داخل محفظه خلأ مورد استفاده قرار گرفتند. مزیت مهم این کار، عدم تأثیرپذیری پیچه روگوفسکی جدید از میدان‌های مغناطیسی ایجاد شده توسط پیچه‌های میدان خارجی نظیر پیچه اهمی و پیچه تعادلی است. مبانی نظری برای محاسبه میدان‌های مغناطیسی در فضای میان دو پروب مورد بحث و بررسی قرار گرفته و با داده‌های آزمایشگاهی راستی‌آزمایی شد. کم‌ترین خطا در روش محاسباتی المان محدود با مرتبه دوم، برای استفاده از قانون مداری آمپر از حالت پیوسته (انتگرال) به جمع‌بندی گسسته (سیگما) حاصل گردید. هم‌چنین پایداری جریان‌های اندازه‌گیری شده در حضور خطای اندازه‌گیری میدان مغناطیسی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. با توجه به نتایج حاصل، مشخص گردید که مجموعه پروب‌های مغناطیسی توکامک دماوند می‌توانند با روش محاسباتی المان محدود مرتبه دوم و با دقت بسیار بهتر از پیچه روگوفسکی اصلی توکامک دماوند، به‌عنوان یک پیچه روگوفسکی گسسته مورد استفاده قرار گیرند.

کلیدواژه‌ها: توکامک، جریان پلازما، پروب‌های مغناطیسی، پیچه روگوفسکی

Measurement of plasma current in damavand tokamak using magnetic probes assembly as a discrete rogowski coil

F. Shakeri¹, C. Rasouli^{2*}

1. Physics Department, Kashan University, P.O.Box: 53153-87317, Kashan - Iran

2. Plasma and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 14399-51113, Tehran - Iran

Research Article

Received 6.7.2019, Accepted 16.2.2020

Abstract

In this paper, the magnetic probes assembly of Damavand tokamak which is being used for measurement of local magnetic fields, were utilized as a discrete Rogowski coil inside the vacuum vessel. An important advantage of this approach is the insensitivity of the new Rogowski coil to magnetic fields created by the external ohmic and equilibrium coils. The theoretical basis for the calculation of magnetic fields in the space between two probes was discussed and verified with experimental data. The lowest error was obtained in the second-order finite element computational method for discretizing Ampere's Law Integral. Moreover, the stability of measured currents considering error for magnetic field measurement was investigated. According to the results, it was found that Damavand Tokamak magnetic probes with the finite element second-order calculation method could be used as a more accurate discrete Rogowski coil than the machine main Rogowski coil.

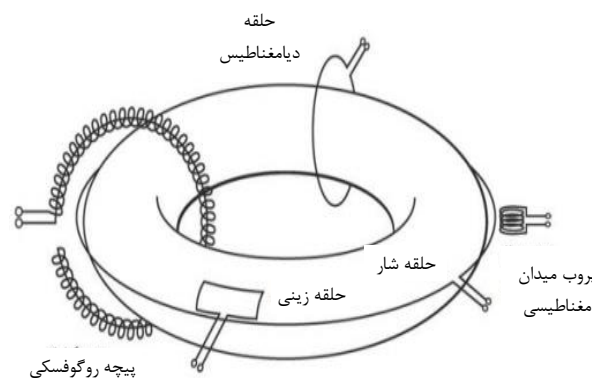
Keywords: Tokamak, Plasma current, Magnetic probes, Rogowski coil



۱. مقدمه

اندازه‌گیری پارامترهای پلازما رویکردی برای افزایش دانش ما از عملکرد پلازما برای ساخت و راه‌اندازی ماشین‌های گداخت به‌شمار می‌آید. سامانه اندازه‌گیری میدان مغناطیسی، یکی از روش‌های تشخیصی بنیادی برای توکامک یا دیگر ماشین‌های حاوی پلاسمای محصور شده توسط میدان مغناطیسی محسوب می‌شوند [۱]. حسگرهای القایی عنوان یک ابزار تشخیصی ساده، ارزان و قابل اطمینان در ماشین‌های توکامک به‌شمار می‌روند. انواع گوناگون آن‌ها عبارتند از: حلقه‌های شار، پروب‌های مغناطیسی، حلقه‌های زینی شکل، حلقه‌های دیامغناطیس و پیچه روگوفسکی. برخلاف تنوع کاربرد این ابزار، اصول عملکرد تمام آن‌ها بر پایه قانون القای فارادی استوار است. معمولاً تفاوت حسگرهای القایی در هندسه حلقه‌ها و محل نصب آن‌ها بر روی توکامک می‌باشد. در شکل ۱ نمونه‌ای از این حسگرها مشاهده می‌شود. توکامک دماوند از دسته توکامک‌های اندازه کوچک (شعاع اصلی ۳۶ سانتی‌متر) با بیشینه زمان پلازما ۲۲ ms است. تاکنون آزمایشات گسترده‌ای در راستای اندازه‌گیری پارامترهای فیزیکی مختلف پلاسمای این توکامک صورت گرفته است.

جریان پلازما در توکامک‌ها توسط پیچه روگوفسکی اندازه‌گیری می‌شود. برای این کار، یک پیچه روگوفسکی در جهت قطبی پیرامون جریان پلازما قرار گرفته و جریان پلازما را نظیر شکل ۱ احاطه می‌کند. پیچه روگوفسکی می‌تواند درون محفظه خلأ یا بیرون آن نصب شود، اما در مواردی که این پیچه بیرون محفظه خلأ قرار دارد، میدان‌های مغناطیسی حاصل از سیم‌پیچ‌های دیگر می‌توانند در اندازه‌گیری آن خطا ایجاد کنند.



شکل ۱. طرحی از یک پلاسمای چنبره‌ای که انواع حسگرهای القا شونده بر روی آن نصب شده است: حلقه‌های شار، پروب‌های مغناطیسی، حلقه‌های زینی شکل، حلقه‌های دیامغناطیس و پیچه روگوفسکی.

هم‌چنین در لحظاتی نظیر شروع جریان پلازما یا در لحظات گسیختگی و یا ناپایداری [۲] مقداری جریان بر روی محفظه خلأ القا می‌گردد. برای بررسی و اندازه‌گیری میزان جریان خالص پلازما و هم‌چنین مقدار جریان القا شده بر روی محفظه خلأ معمولاً از دو پیچه روگوفسکی در داخل و بیرون محفظه خلأ استفاده می‌شود [۳]. به دلیل عدم نصب پیچه روگوفسکی داخلی در توکامک دماوند، تاکنون امکان اندازه‌گیری‌های مربوط به داخل محفظه وجود نداشته است، لذا در این مقاله به دنبال رهیافتی هستی‌م تا از پروب‌های مغناطیسی قطبی نصب شده در داخل محفظه خلأ توکامک دماوند به صورت پیچه روگوفسکی گسسته درون محفظه استفاده نماییم.

مجموعه‌ای از پروب‌های مغناطیسی گسسته، که مماس با یک مسیر بسته در اطراف جریان قرار گرفته‌اند، می‌توانند به عنوان یک تقریب منطقی برای پیچه روگوفسکی عمل کنند. بدیهی است دقت اندازه‌گیری این وسیله از یک پیچه پیوسته کم‌تر بوده و لذا لازم است با بررسی خطای روش‌های مختلف، روشی با کم‌ترین خطا معرفی گردد تا در اندازه‌گیری‌های بعدی قابل اطمینان باشد. استفاده از پروب‌های مغناطیسی در آرایش پیچه روگوفسکی گسسته برای اندازه‌گیری جریان پلازما روشی است که در توکامک TCV^۱ مورد آزمایش قرار گرفته [۴] و در طراحی توکامک ایتر پیشنهاد گردیده است [۵]. در توکامک TCV برای محاسبه میدان در فاصله مابین پروب‌های مغناطیسی از روش المان محدود درجه یک استفاده می‌شود.

در این مقاله به طراحی اولیه، انجام محاسبات و به‌کارگیری پروب‌های مغناطیسی توکامک دماوند به‌عنوان پیچه روگوفسکی برای اندازه‌گیری جریان پلازما در توکامک دماوند پرداخته شده است. در بخش دوم، به معرفی ساختمان و انواع پیچه‌های روگوفسکی شده است، سپس در بخش سوم و چهارم، پروب‌های مغناطیسی و چیدمان آن‌ها در توکامک دماوند معرفی می‌شوند. در بخش پنجم، مبانی ریاضی استفاده از پروب‌های مغناطیسی به عنوان پیچه روگوفسکی گسسته بیان می‌شود. در بخش ششم، اعتبارسنجی محاسبات مورد بحث قرار می‌گیرد و در بخش هفتم مراحل داده‌گیری و تحلیل

1. Tokamak á configuration variable



ناخواسته‌ی اطراف به‌صورت دو حلقه درخلاف جهت پیچیده شده‌اند. در این روش اگر سیم‌پیچ‌ها یکسان باشند، ولتاژ القایی خروجی پیچه روگوفسکی ناشی از رسانای (های) داخل دو برابر می‌شود. این حالت نسبت به حالت تک‌لایه دارای سری خود القایی، مقاومت‌های سری و خازن‌های پراکندگی بیش‌تری می‌باشند و باید این پارامترها در انجام اندازه‌گیری‌های فرکانس بالا و جابه‌جایی فاز کم در نظر گرفته شوند.

در مقایسه با پیچه‌های روگوفسکی کلاسیک، روش پیچه‌های گسسته مزیت‌هایی دارد. به‌عنوان مثال، این پیچه‌ها کوچک‌تر بوده و برای فضاهای قابل دسترس کوچک مناسب‌ترند و از سوی دیگر این طرح از اتصال دایره‌ای سیم پیچ‌های گسسته با چگالی دور ثابت تشکیل می‌شود و در نتیجه تولید آن نسبت به سیم پیچ روی هسته چنبره‌ای پیوسته آسان‌تر است نمونه‌ای از این پیچه در شکل ۲ نشان داده شده است [۹]. منظور از گسسته به معنای عدم اتصال نیست، بلکه آخرین دور از یک پیچه (ماسوره) با سیم به اولین دور از پیچه بعدی متصل می‌شود.

در این طرح تعداد دورها بر واحد طول در کل سیم پیچ ثابت نمی‌باشد و در نتیجه ضریب القای متقابل بین این وسیله و مدارهای بیرونی صفر نیست و اثر میدان الکترومغناطیسی خارج از حلقه اصلی نسبت به طرح‌های پیچه روگوفسکی پیوسته بیش‌تر است و با افزایش تعداد ماسوره‌ها و نزدیک کردن آن‌ها می‌توان اثر میدان‌های خارجی را کاهش داد.

طرح و مشخصات دو پیچه روگوفسکی گسسته مسطح در مرجع [۱۰] معرفی شده است. در این روش از صفحات مدار چاپی برای ایجاد پیچه روگوفسکی استفاده می‌شود. شکل ۳ طرحی از یک پیچه روگوفسکی با سیم‌پیچ‌های گسسته تکه‌ای مستقیم، که روی PCB^۳ (صفحه مدار چاپی) به‌صورت یک سری دایروی شکل به‌کار رفته‌اند را نشان می‌دهد. پیچه روگوفسکی توکامک دماوند از نوع منعطف بوده که در زاویه‌ی ۶۳ درجه، در جهت قطبی نصب شده است. ضریب سنج‌بندی این پیچه ۱۰ kA/V است.

داده معرفی شده و در بخش هشتم پایداری نتایج در حضور خطای اندازه‌گیری میدان‌های مغناطیسی مورد بحث قرار می‌گیرد.

۲. پیچه روگوفسکی

طراحی و ساخت سیم پیچ انعطاف‌پذیر و بلند متشکل از سیم پیچیده شده بر روی میله پلاستیکی اولین بار در سال ۱۸۸۷ توسط پروفیسور Chattock از دانشگاه بریستول پیشنهاد شد. در سال ۱۹۱۲، Rogowski و Steinhaus برای بررسی قابل اعتماد بودن اندازه‌گیری‌های پیچه، آزمایش‌های مبتکرانه زیادی انجام دادند. اساس اندازه‌گیری جریان با استفاده از پیچه روگوفسکی، قانون القای فارادی است.

پیچه روگوفسکی شامل سیم پیچیده شده بر روی یک هسته چنبره‌ای، در مواردی غیرمغناطیسی و با سطح مقطع ثابت است که برای اندازه‌گیری جریان یک رسانا، آن را دربر می‌گیرد [۶]. خروجی این مبدل ولتاژ-جریان، پس از انتگرال‌گیری توسط یک مدار انتگرال‌گیر، جریان رسانا را به‌دست می‌دهد. برای به‌دست آوردن یک ابزار اندازه‌گیری ایده‌آل، نیاز به طراحی و ساخت دقیق پیچه وجود دارد. برای این‌که پیچه از قانون آمپر به خوبی پیروی کند، باید سطح مقطع و تعداد حلقه‌ها در واحد طول پیچه، حتی با وجود انحنای پیچه، ثابت باقی بماند [۷]. دقت اندازه‌گیری پیچه روگوفسکی به سطح مقطع یکنواخت وابسته است، هر فاصله بین دورهای سیم در پیچه موجب خطا شده و حساسیت به موقعیت رسانای داخل را افزایش می‌دهد [۸]. آرایش‌های مختلف از پیچه روگوفسکی به شرح زیر می‌باشند.

۱.۲ آرایش‌های متنوع پیچه روگوفسکی

طرح‌های گوناگونی برای پیچه روگوفسکی نظیر آرایش تک‌لایه^۱ یا چندلایه^۲ و صلب یا انعطاف‌پذیر موجود است. در آرایش تک‌لایه، پیچه حاوی دو حلقه است که حلقه اول به‌صورت سیم پیچیده شده و حلقه دوم به‌صورت سیم بازگشتی از وسط یا نزدیک پیچه می‌باشد. نوع چندلایه شامل دو حلقه از سیم پیچیده شده است، که برای کم کردن اثر میدان‌های

3. Printed Circuit Board

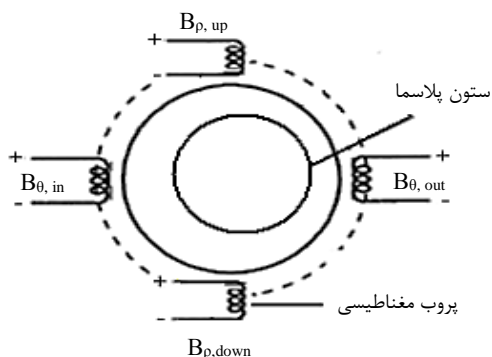
1. Single-Layer
2. Multi-Layer



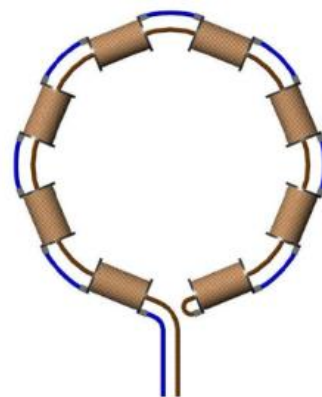
شعاعی وظیفه اندازه‌گیری مؤلفه شعاعی میدان مغناطیسی را برعهده دارند. توکامک دماوند در مجموع دارای ۴۸ پروب مغناطیسی می‌باشد که برای اندازه‌گیری میدان‌های مغناطیسی شعاعی و قطبی به کار می‌روند. این پروب‌ها در داخل دو کانال مسطح از جنس استیل جهت حفظ خلأ و هم‌چنین برای جلوگیری از برخورد مستقیم با پلاسما قرار گرفته‌اند. هر دو نوع پروب به صورت یک در میان و پشت سر هم داخل این کانال‌ها نصب شده‌اند. از این ۴۸ پروب تعداد ۳۸ پروب (۱۸ پروب قطبی و ۲۰ پروب شعاعی) به دور پلاسما و بقیه در فضاهای بالا و پایین ستون پلاسما نصب شده‌اند. البته برای جلوگیری از برخورد مستقیم پلاسما با کانال‌های حاوی پروب‌ها، این پروب‌ها از لحاظ فضایی نسبت به پلاسما عقب‌تر از محدودکننده قرار گرفته‌اند. ضریب سنج‌بندی پروب‌های مغناطیسی با تقویت‌کننده با بهره ۵ مقدار $232/52$ گوس بر ولت می‌باشد.

۴. توکامک دماوند

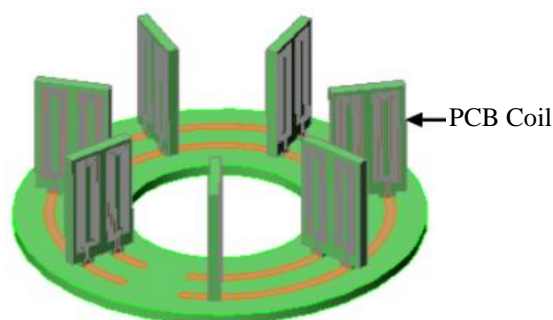
توکامک دماوند، یکی از توکامک‌های تحقیقاتی مهم ایران، از دسته توکامک‌های کوچک با سطح مقطع غیر دایروی است که به منظور پژوهش‌های فیزیک پلاسما طراحی و ساخته شده است. این توکامک، دارای شعاع اصلی 36 cm، شعاع فرعی 7 cm و کشیدگی سطح مقطع پلاسما $1/4-1$ می‌باشد. پهنای زمانی جریان پلاسما حدود 22 ms، بیشینه جریان پلاسما حدود $35-40$ kA و بیشینه میدان مغناطیسی چنبره‌ای $1/2$ T می‌باشد.



شکل ۴. پروب‌های مغناطیسی برای اندازه‌گیری مؤلفه‌ی قطبی و شعاعی جریان پلاسما.



شکل ۲. اتصال سری از سیم‌پیچ‌های گسسته به شکل دایره.



شکل ۳. اتصال دایروی فیبرهای مدار چاپی بر روی صفحه اصلی.

پیچه روگوفسکی توکامک دماوند از نوع منعطف بوده که در زاویه‌ی 63 درجه، در جهت قطبی نصب شده است. ضریب سنج‌بندی این پیچه 10 kA/V است.

۳. پروب‌های مغناطیسی

همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است پروب‌های مغناطیسی سیم‌پیچ‌های بسیار کوچکی هستند که برای اندازه‌گیری میدان مغناطیسی موضعی به کار می‌روند، البته فقط یک مؤلفه از میدان که عمود بر سطح پروب است و برای اندازه‌گیری سایر مؤلفه‌ها باید از چند پروب استفاده شود [۱]. پروب‌های مغناطیسی سیم‌پیچ‌های بسیار کوچکی هستند که برای اندازه‌گیری میدان مغناطیسی موضعی به کار می‌روند. این پروب‌ها سیم‌پیچ‌هایی هستند که در داخل محفظه توکامک دماوند نصب شده و خروجی آن‌ها پس از انتگرال‌گیری، میدان مغناطیسی توکامک را در نقطه نصب شده نشان می‌دهد [۱۱]. شکل ۵ دو نوع پروب مغناطیسی نصب شده در توکامک دماوند برای اندازه‌گیری میدان شعاعی و قطبی را نشان می‌دهد. پروب‌های قطبی وظیفه اندازه‌گیری میدان قطبی و پروب‌های



۵. مبانی ریاضی

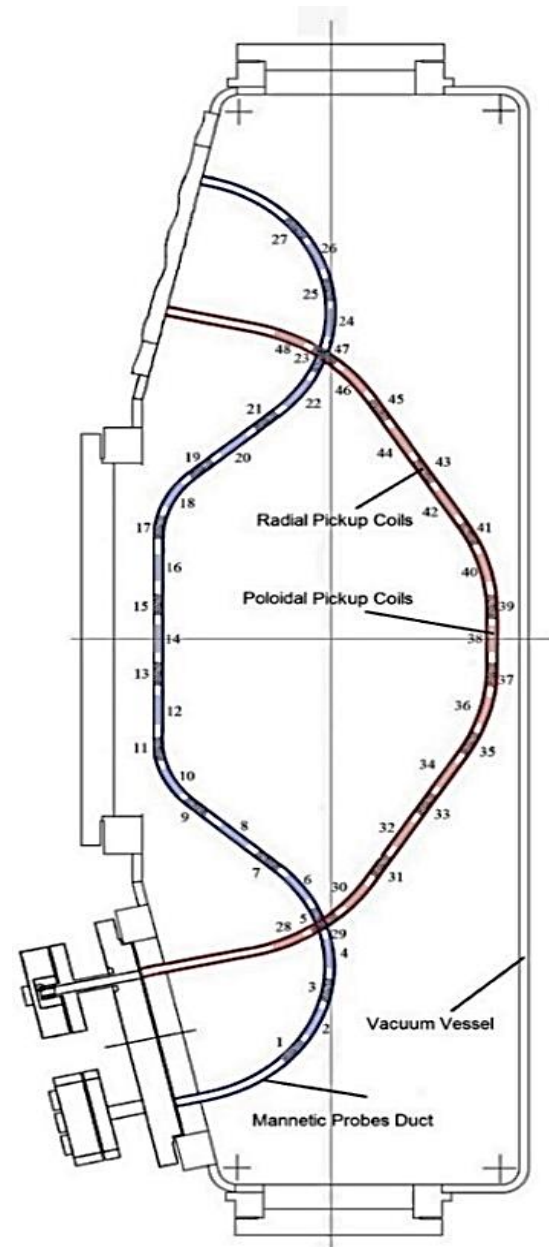
اساس فیزیکی اندازه‌گیری جریان از طریق پروب‌های مغناطیسی به قانون مداری آمپر برمی‌گردد. به‌منظور به‌کارگیری پروب‌های مغناطیسی به‌عنوان یک پیچیده روگوفسکی گسسته لازم است تا قانون مداری آمپر از حالت پیوسته (انتگرال) به جمع‌بندی گسسته (سیگما) تبدیل شود. مجموعه‌ای از پروب‌های میدان مغناطیسی قطبی، که محورهایشان به‌صورت مماس بر یک مسیر بسته در اطراف جریان قرار گرفته‌اند، می‌توانند میدان مغناطیسی در محل پروب و در راستای مسیر را اندازه‌گیری کنند. بنابراین، با معلوم بودن میدان مغناطیسی در یک مسیر بسته اطراف جریان و برطبق قانون مداری آمپر، می‌توان جریان را محاسبه کرد. از طرفی چون پروب‌های مغناطیسی قطبی و شعاعی یکی در میان در محفظه خلأ توکامک دماوند نصب شده‌اند (شکل ۵)، در فضای بین هر دو پروب قطبی، میدان مغناطیسی در راستای مسیر نامعلوم است (شکل ۶ الف). لذا لازم است تا روشی برای تعیین میدان مغناطیسی در این فضا به‌کار گرفته شود تا امکان محاسبه قانون آمپر فراهم گردد. برای محاسبه قانون مداری آمپر باید روش‌های ریاضی برای تعیین میدان مغناطیسی در فضای بین دو پروب قطبی به‌کار رفته و خطای حاصل از این روش‌ها با یک‌دیگر مقایسه گردد و در نهایت روشی با کم‌ترین خطا انتخاب شود.

۱.۵ روش تفاضل محدود

در این روش میدان مغناطیسی در فاصله معینی در اطراف هر پروب، ثابت فرض می‌شود. بازه‌ای که میدان مغناطیسی در آن ثابت فرض می‌شود براساس فاصله هر پروب با پروب مجاور تعیین می‌گردد. در این روش مطابق رابطه (۱) مساحت مستطیل‌ها جمع‌بندی شده و ضربی از جریان حاصل می‌شود (شکل ۶ ب).

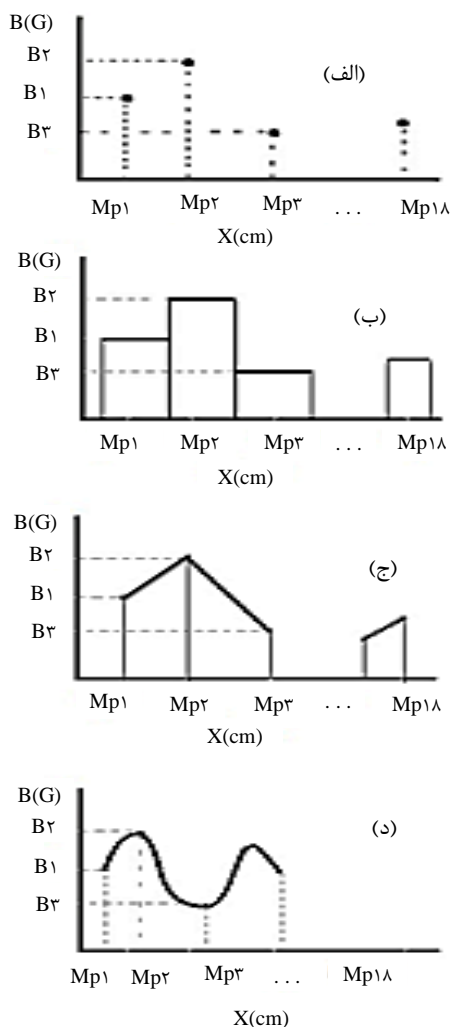
$$\sum_{i=1}^{18} B_i d_i = \mu_0 I \quad (1)$$

اندیس i مربوط به پروب‌های مغناطیسی قطبی پیرامون جریان می‌باشد.



شکل ۵. پروب مغناطیسی توکامک دماوند برای اندازه‌گیری میدان شعاعی و قطبی.

محفظه خلأ توکامک دماوند با سطح مقطع D شکل و حجم حدود ۰.۳ متر مکعب از چهار قسمت مجزا، دو قسمت دارای طول ۳۶ درجه چنبره‌ای و دو قسمت دیگر دارای طول ۱۴۴ درجه چنبره‌ای، تشکیل شده است که با پیوند این بخش‌ها محفظه خلأ تکمیل می‌گردد. در این مقاله از خروجی ۱۸ پروب مغناطیسی قطبی به دور ستون پلازما برای انجام آزمایش‌ها و محاسبات استفاده شده است.



شکل ۶. الف) نمودار میدان مغناطیسی هر پروب بر حسب فاصله، ب) روش تفاضل محدود، ج) روش المان محدود درجه یک، د) روش المان محدود درجه دو.

سطح زیر نمودار تابع میدان مغناطیسی، با انتگرال‌گیری محاسبه می‌شود:

$$S_i = \int_{x_i}^{x_{i+1}} B dx = \frac{1}{6} \frac{2d_i^3 + d_i d_{i+1} - d_{i+1}^3}{d_i} B_i + \frac{1}{6} \frac{(d_i + d_{i+1})^3}{d_i d_{i+1}} B_{i+1} + \frac{1}{6} \frac{(d_i + d_{i+1})(2d_{i+1} - d_i)}{d_{i+1}} B_{i+2} \quad (10)$$

در نتیجه قانون آمپر در این حالت به صورت زیر خواهد بود:

$$\sum_{i=1,3,5}^{18} S_i = \mu_0 I \quad (11)$$

۳.۵ روش المان محدود درجه یک

در روش المان محدود مرتبه اول، میدان مغناطیسی بین هر دو پروب به صورت خطی تغییر می‌کند.

$$B = ax + b \quad (2)$$

در این حالت:

$$\begin{bmatrix} B_i \\ B_{i+1} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} x_i & 1 \\ x_{i+1} & 1 \end{bmatrix}}_A \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = A^{-1} \begin{bmatrix} B_i \\ B_{i+1} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$S_i = \int_{x_i}^{x_{i+1}} B dx = \frac{d_{i-1}}{2} (B_i + B_{i+1}) \quad (5)$$

که در آن

$$d_{i-1} = x_{i+1} - x_i \quad (6)$$

لذا باید مساحت ذوزنقه‌های ایجاد شده توسط میدان هر دو پروب متوالی در مسیر بسته جمع‌بندی شوند. در این روش میدان مغناطیسی دو پروب با فاصله آن دو از یکدیگر مرتبط می‌شوند شکل (۶ ج).

$$\sum_{i=1}^{18} S_i = \mu_0 I \quad (7)$$

۳.۵ روش المان محدود درجه دو

در وضعیتی دیگر می‌توان میدان مغناطیسی سه پروب قطبی را با دو فاصله مرتبط کرد. رفتار میدان همانند تابع درجه دو در نظر گرفته می‌شود:

$$B = ax^2 + bx + c$$

$$\begin{bmatrix} B_i \\ B_{i+1} \\ B_{i+2} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ d_i^2 & d_i & 1 \\ (d_i + d_{i+1})^2 & (d_i + d_{i+1}) & 1 \end{bmatrix}}_A \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = A^{-1} \begin{bmatrix} B_i \\ B_{i+1} \\ B_{i+2} \end{bmatrix} \quad (9)$$



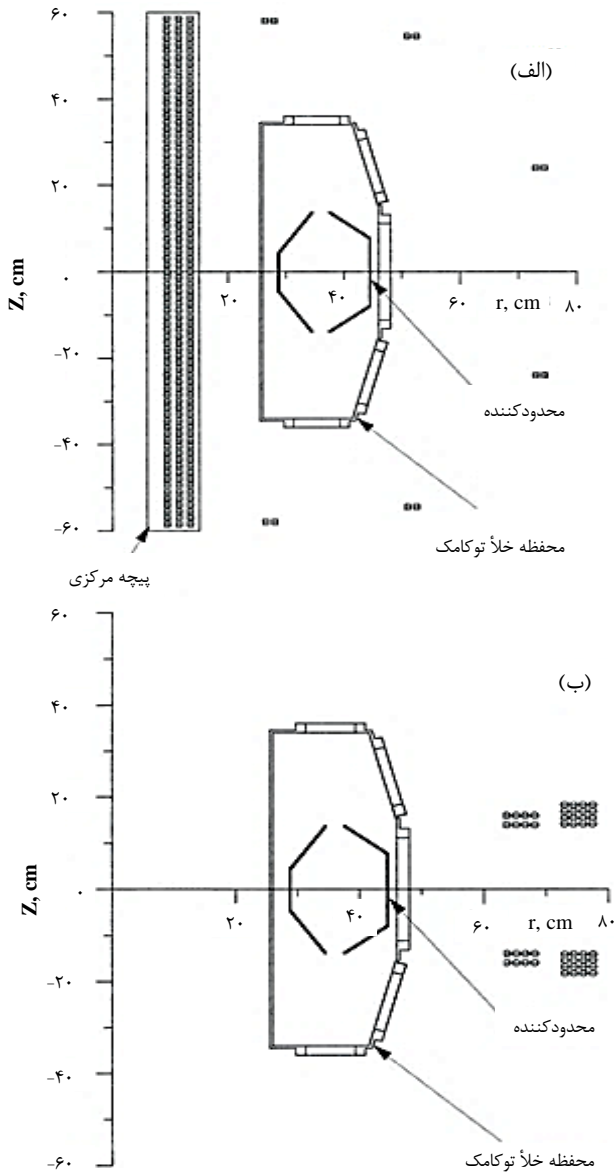
۶. اعتبارسنجی روش‌ها

در هر تخلیه الکتریکی توکامک، بانک‌های خازنی مختلف با اهداف گوناگون شارژ و تخلیه می‌شوند. در توکامک دماوند برای جلوگیری از افزایش شعاع پلاسما یک میدان مغناطیسی عمودی به پلاسما اعمال می‌شود. این وظیفه برعهده چهار سیم پیچ (تعادلی) است که دو به دو و متقارن نسبت به خط استوای توکامک نصب شده‌اند و تعداد دور کل آن‌ها ۵۲ دور است.

سیم‌پیچ مرکزی، دومین گروه از سیم‌پیچ‌های مهم توکامک، وظیفه القای جریان در ستون پلاسما را دارد. سیم‌پیچ مرکزی توکامک دماوند از یک سیم‌پیچ استوانه‌ای سه‌لایه و شش سیم‌پیچ مجزای دیگر تشکیل شده است. بخش مرکزی ۲۳۷ دور و هر یک از سیم‌پیچ‌های مجزا دارای ۲ دور هستند. شکل ۷ نحوه چیدمان این سیم‌پیچ‌ها را در توکامک دماوند نشان می‌دهد.

در این پژوهش به‌منظور بررسی دقت پیچه روگوفسکی گسسته داخلی و یافتن روش محاسباتی دقیق‌تر، دو نوع شات خاص مورد بررسی قرار می‌گیرند. با توجه به هدف این پژوهش، شات نوع اول در شرایطی است که فقط سیم‌پیچ‌های تعادلی شارژ و تخلیه خواهند شد و سایر سیم‌ها خاموش هستند و در شات نوع دوم، تنها سیم‌پیچ‌های گرمایش اهمی فعال می‌شوند.

با توجه به عدم تزریق گاز به محفظه خلأ و در نتیجه عدم امکان تشکیل پلاسما، در این دو نوع شات، پیچه‌های روگوفسکی خارجی و داخلی باید در حالت ایده‌آل جریان صفر را اندازه‌گیری کنند. اما به‌دلیل گسسته‌بودن پروب‌های مغناطیسی در روگوفسکی داخلی و نزدیک‌بودن روگوفسکی خارجی به سیم‌پیچ‌های مولد میدان، شارهای بیرونی به سطح پیچه‌ها نفوذ می‌کنند. جریان اندازه‌گیری شده توسط پیچه روگوفسکی خارجی که در نمودار با I_p نشان داده شده است و جریان اندازه‌گیری شده توسط پیچه روگوفسکی داخلی با تفاضل محدود و المان محدود با مرتبه اول و دوم، در شکل ۸ نشان داده شده‌اند.



شکل ۷. چیدمان پیچه‌های اهمیک و تعادلی توکامک دماوند. الف) پیچه‌های اهمیک و تصحیح، ب) پیچه‌های تعادلی.

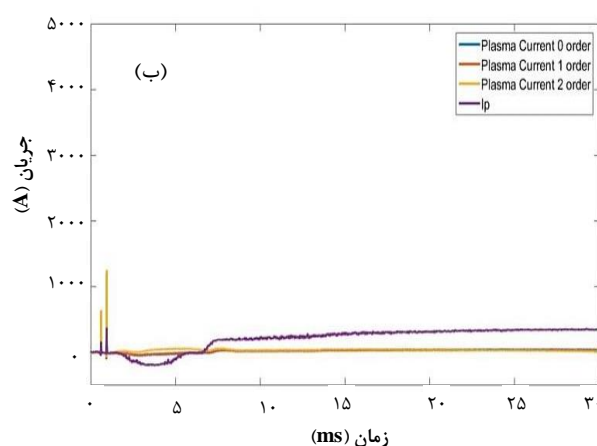
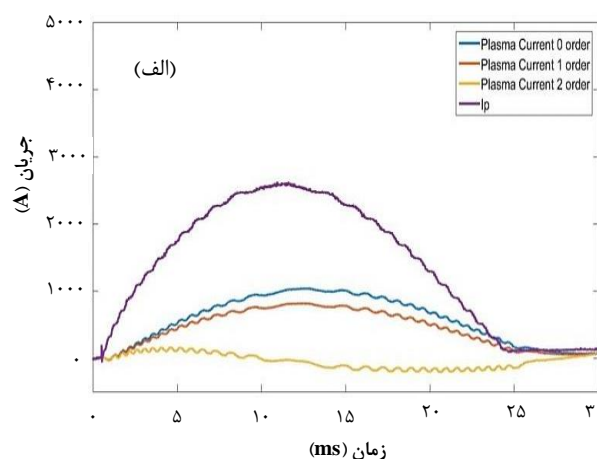


همان‌طور که از شکل نیز مشخص است، پیچه روگوفسکی گسسته با تمامی روش‌های محاسباتی، جریانی نزدیک به صفر را اندازه‌گیری می‌کند، در حالی که پیچه روگوفسکی خود توکامک جریانی در حدود ۳۰۰ آمپر را اندازه می‌گیرد. با معلوم بودن جریان هر دور سیم پیچ اصلی و تعداد دور کل آن، می‌توان خطای نسبی حاصل از هر روش را محاسبه و نمودار مربوطه را ترسیم کرد. خطای نسبی حاصل از این اندازه‌گیری در لحظات مختلف از هرشات برای هر روش بدین صورت است:

$$\text{خطای نسبی} = \frac{|I_{method}|}{N \times I_{coil}} \quad (12)$$

که در آن I_{method} جریان اندازه‌گیری شده توسط پیچه روگوفسکی با هر یک از روش‌ها، I_{coil} جریان سیم‌پیچ‌های اصلی و N تعداد دور هر پیچه است که در هر شات با تخلیه بانک خازنی مورد نظر ایجاد می‌شود. این خطا میزان نفوذ نسبی جریان پیچه‌های بیرونی به درون محفظه را نشان می‌دهد که می‌توان به کمک آن روش دقیق‌تر محاسباتی را برای یافتن یک پیچه روگوفسکی گسسته تعیین نمود.

شکل ۹ الف، خطای نسبی جریان اندازه‌گیری شده توسط پیچه روگوفسکی خارجی که در نمودار با I_p نشان داده شده است و خطای نسبی جریان اندازه‌گیری شده توسط پیچه روگوفسکی داخلی با تفاضل محدود (المان محدود با مرتبه صفر) و المان محدود با مرتبه اول و دوم را در لحظات مختلف از شات نوع اول نشان می‌دهد. روند حاصل نشان می‌دهد که با افزایش درجه از صفر به دو، خطای اندازه‌گیری روش‌ها کاهش یافته و دقت اندازه‌گیری بالا می‌رود. مقدار خطای نسبی برای حالتی که فقط سیم‌پیچ اهمی روشن است (شکل ۹ ب)، از مرتبه دهم درصد می‌باشد، اما باز هم در مقایسه، مقادیر جریان اندازه‌گیری شده توسط مرتبه‌های محاسباتی مختلف پیچه گسسته، کوچک‌تر و نزدیک‌تر به صفر هستند. در حالتی که فقط پیچه تعادلی روشن است، بیش‌ترین خطای اندازه‌گیری مربوط به پیچه روگوفسکی اصلی توکامک و کم‌ترین خطا مربوط به مرتبه دوم المان محدود است.



شکل ۸. جریان اندازه‌گیری شده توسط پیچه روگوفسکی خارجی (I_p) و جریان اندازه‌گیری شده توسط پیچه روگوفسکی داخلی با روش‌های محاسباتی مختلف الف) پیچه‌های تعادلی و ب) پیچه‌های اهمی.

همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است، در حالتی که فقط پیچه‌های تعادلی روشن هستند، جریان پلازما وجود ندارد، اما پیچه روگوفسکی توکامک دماوند که در بیرون محفظه نصب شده و در شکل با I_p نشان داده شده است، جریانی در حدود ۳ کیلوآمپر را اندازه‌گیری می‌کند. در این شرایط، پیچه روگوفسکی گسسته حاصل از پروب‌های مغناطیسی برای روش تفاضل محدود و المان محدود درجه اول حدود ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ آمپر را اندازه‌گیری می‌کنند. مقدار جریان اندازه‌گیری شده در روش المان محدود درجه دوم در حدود ۲۰۰ آمپر می‌باشد. با توجه به نتایج، دقت اندازه‌گیری المان محدود درجه دوم از تمامی روش‌های دیگر و هم‌چنین پیچه روگوفسکی خارجی توکامک بیش‌تر است.

همین فرایند برای شات نوع دوم یعنی پیچه‌های اهمی روشن نیز تکرار شد که در شکل ۸ ب نشان داده شده است.

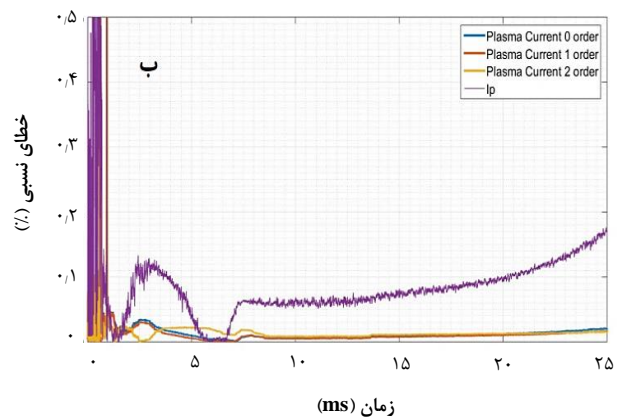
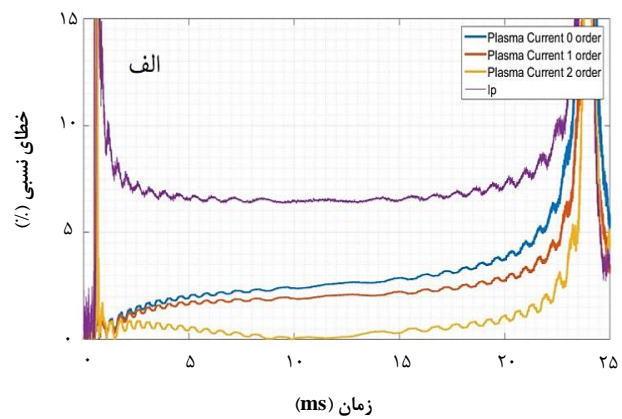


و عدم کارکرد ایده‌آل مدارهای تقویت‌کننده به‌وجود می‌آیند، حذف گردند. لذا بعد از عملیات داده‌برداری برای پردازش داده‌ها ابتدا آفست‌گیری آن‌ها انجام می‌شود. سپس داده‌ها با روش محاسباتی منتخب پردازش شده و جریان پلازما محاسبه می‌گردد.

۸. پایداری نتایج

با توجه به این امر که بروز خطای اندازه‌گیری در روند یک آزمایش می‌تواند نتیجه کل آزمایش را تحت تأثیر قرار دهد، برای بررسی این‌که خطاهای ایجاد شده در اندازه‌گیری میدان‌های مغناطیسی موضعی تا چه اندازه می‌توانند مقدار جریان پلازما محاسبه شده را دست‌خوش تغییر نمایند، روند اضافه کردن خطا به‌صورت دستی به میدان‌های اندازه‌گیری شده توسط پروب‌های مغناطیسی انجام شد. بدین ترتیب که خطاهای ۲ تا ۵ درصد به‌صورت تصادفی (انتخاب تصادفی در علامت خطا) به میدان‌های مغناطیسی اندازه‌گیری شده توسط هر پروب اعمال گردید و سپس مقدار جریان توسط پیچ‌ه روگوفسکی گسسته با استفاده از روش المان محدود مرتبه دوم و پیچ‌ه‌های تعادلی روشن محاسبه شد. شکل ۱۰ جریان محاسبه شده توسط المان محدود مرتبه دوم با اعمال ۲ و ۵ درصد خطا به مقادیر اندازه‌گیری شده پروب‌های مغناطیسی و همچنین جریان اندازه‌گیری شده توسط پیچ‌ه روگوفسکی توکامک دماوند را نشان می‌دهد.

همان‌گونه که در شکل نیز مشخص است روش المان محدود مرتبه دوم جواب پایداری را حتی در صورت وجود خطا در اندازه‌گیری‌های پروب‌های مغناطیسی نشان می‌دهد. لذا می‌توان روش المان محدود برای محاسبه خروجی پروب‌های مغناطیسی در قالب یک پیچ‌ه روگوفسکی را به‌صورت یک سامانه تشخیصی برای اندازه‌گیری جریان پلازما در توکامک دماوند در نظر گرفت.



شکل ۹. خطای نسبی جریان اندازه‌گیری شده توسط پیچ‌ه روگوفسکی خارجی که در نمودار با I_p نشان داده شده است و جریان اندازه‌گیری شده توسط پیچ‌ه روگوفسکی داخلی با روش‌های محاسباتی مختلف (الف) پیچ‌ه‌های تعادلی و (ب) پیچ‌ه‌های اهمی روشن هستند.

با نگاهی به نمودار خطای نسبی سه روش مطرح شده در این دو شات می‌توان گفت، روش المان محدود درجه دو در هر دو حالت با دقت بالاتر نسبت به دو روش دیگر، پروب‌های گسسته را به آرایش یک پیچ‌ه روگوفسکی نزدیک می‌کند.

۷. داده‌گیری و تحلیل داده

در این آزمایش‌ها، سیستم داده‌گیری توکامک دماوند با نرخ نمونه‌برداری ۲ Msample/s، داده‌های پارامترهای مختلف را ثبت می‌کند. بنابراین برای هر کانال پروب‌های مغناطیسی، تعداد ۲۰۰ هزار داده برای ۱۰۰ میلی‌ثانیه در فایل‌های مجزا ذخیره شده و سپس داده‌های خام با ضرایب سنج‌بندی تبدیل به داده‌های واقعی می‌شوند.

به‌علت اتصال خروجی پروب‌های مغناطیسی به مدار انتگرال‌گیر، لازم است تغییراتی که در داده‌ها به‌دلیل ایجاد نویز

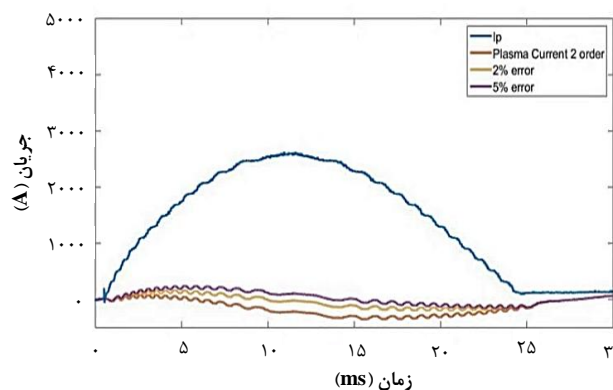


جریان خالص پلازما با کم‌ترین خطا در توکامک دماوند مورد استفاده قرار گیرد.

این سامانه تشخیصی جدید کم‌ترین تأثیرپذیری را از میدان‌های مغناطیسی خارجی توکامک داشته و همراه با پیچه روگوفسکی خارجی توکامک دماوند، می‌تواند برای مطالعه جریان‌های القایی بر روی محفظه خلأ و هم‌چنین جریان‌های به اشتراک گذاشته شده با دیواره محفظه خلأ در لحظات ناپایداری پلازما مورد استفاده قرار گیرد. هم‌چنین با توجه به اندازه‌گیری دقیق‌تر جریان پلازما با این سامانه، پارامترهایی نظیر مکان افقی و عمودی پلازما را نیز می‌توان با دقت بالاتری اندازه‌گیری کرد.

مراجع

1. E. Strait, *Magnetic diagnostic system of the DIII-D tokamak*, *Rev. Sci. Instrum*, **77**, 023502 (2006).
2. B. Pourshahab, et al., *Temporal and spatial evolution of runaway electrons at the instability moments in Damavand tokamak*, *Phys Plasma*, **23**, 072501 (2016).
3. B.A. Stevenson, *3D reconstruction of Plasma Equilibria using Magnetic Diagnostics on the Compact Toroidal Hybrid*, *PhD Thesis, Auburn University, Auburn, Alabama* (2011).
4. J.M. Moret, et al., *Magnetic measurements on the TCV Tokamak*, *Rev. Sci. Instrum*, **69**, 2333 (1998).
5. L. de Kock, et al., *Design of the magnetic diagnostic for ITER*, *Revi. Sci. Instrum*, **70**, 452 (1999).
6. D.A. Ward, J. La T. Exon, *Using Rogowski coils for transient current measurements*, *Eng. Sci. Educ. J.* **2**, 105 (1993).
7. L.A. Kojovic, et al., *Practical aspects of Rogowski coil applications to relaying*, *IEEE PSRC Special Report*, (2010).
8. E. Abdi-Jalebi, R. McMahon, *Simple and Practical Construction of High-Performance, Low-Cost Rogowski Transducers and Accompanying Circuitry for Research Applications*, *IEEE Instrum. Meas. Technol. Conf. Proc.* 354 (2005).
9. D.E. Shepard, D.W. Yauch, *An overview of Rogowski coil current sensing technology*, *LEM DynAmp Inc., Ohio, USA*, (2000).
10. C. Qing, et al. *Design and characteristics of two Rogowski coils based on printed circuit board*, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **55**(3), 939 (2006).
11. Tokamak Damavand, AEOI, *Technical Documentation. Moscow*, (1994).



شکل ۱۰. جریان محاسبه شده توسط المان محدود مرتبه دوم با اعمال ۲ و ۵ درصد خطا به مقادیر اندازه‌گیری شده پروب‌های مغناطیسی و هم‌چنین جریان اندازه‌گیری شده توسط پیچه روگوفسکی توکامک دماوند.

۹. نتیجه‌گیری

سامانه‌های اندازه‌گیری، از مهم‌ترین بخش‌ها در توکامک‌ها و سایر ماشین‌های تحقیقات گداخت هسته‌ای به‌شمار می‌روند. اصلی‌ترین نگرانی در طراحی و ساخت سامانه‌های تشخیصی نصب شده بر روی ماشین‌های توکامک، تأثیرپذیری آن‌ها از سایر قسمت‌های دستگاه و وجود خطا در پارامترهای اندازه‌گیری شده است. بنابراین طراحی و ساخت سامانه‌های تشخیصی با کم‌ترین تأثیرپذیری از محیط، در تحقیقات گداخت هسته‌ای از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از طرف دیگر، اندازه‌گیری بیرونی میدان‌های مغناطیسی اطراف پلاسمای داغ و محصور اطلاعات بسیار مهمی را راجع به دما، فشار، جریان، چگالی انرژی و غیره به‌دست می‌دهد. در واقع سامانه‌های تشخیصی مغناطیسی توکامک‌ها در عین حال که بسیار ارزان‌قیمت هستند، می‌توانند اطلاعات بسیار ارزشمندی راجع به پلازما در اختیار قرار دهند. در این مقاله، پروب‌های مغناطیسی توکامک دماوند که برای اندازه‌گیری میدان‌های مغناطیسی قطبی موضعی به‌کار می‌روند، در آرایش یک پیچه روگوفسکی گسسته مورد استفاده قرار گرفتند. مبانی ریاضی و هم‌چنین اعتبارسنجی آن با خروجی واقعی پروب‌های مغناطیسی مورد بررسی قرار گرفت و مشخص گردید که ساختار جدید همراه با روش محاسباتی المان محدود مرتبه دوم می‌تواند به‌عنوان یک پیچه روگوفسکی برای اندازه‌گیری

