طراحی و ساخت سامانه تشخیص مغناطیسی توکامک الوند

INC29-1082

فرید الدین صدیقی، یحیی صادقی، حسین رسولی، میرمحمدرضا سیدحبشی

پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، صندوق پستی: ۱۳۳۹-۱۴۱۵۵، تهران، ایران.

چکیده:

پارامترهای اصلی در آزمایش‌های پلاسمای توکامک شامل جریان‌ها، میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در داخل و خارج از حجم پلاسما می‌باشد. جهت تحلیل تغییرات شکل در پلاسمای توکامک با استفاده از داده‌های تجربی، اندازه‌گیری‌های میدان مغناطیسی ضروری می‌باشد. برای این کار از آرایه پروب مغناطیسی که سطح مقطع محفظه را در برگرفته و هنگام جابه‌جایی ستون پلاسما در ناحیه میدان مغناطیسی کم و زیاد، تغییرات میدان مغناطیسی متفاوتی را ثبت می‌کند، استفاده می‌شود. آرایه پروب‌های مغناطیسی بر روی کمربندی از جنس مایلار ثابت شده و درنهایت، این آرایه‌های ساخته‌شده بر روی سطح مقطع توکامک الوند نصب و سامانه تشخیص مغناطیسی پلاسما طراحی و ساخته گردید.

کلیدواژه‌ها: سامانه تشخیصی پلاسما، اندازه‌گیری مغناطیسی، پارامترهای پلاسما، توکامک الوند.

Design and Construction of Magnetic Diagnostic System for Alvand Tokamak

F. Sedighi, Y. Sadeghi, H. Rasouli, M.M.R SeyedHabashi

Plasma and nuclear fusion research school, Nuclear science and technology research institute (NSTRI), 14155-1339 Tehran, Iran.

Abstract:

The main parameters in tokamak plasma experiments include currents, electric and magnetic fields inside and outside the plasma volume. It is necessary to use experimental data of magnetic measurements to analyze the shape changes of tokamak plasma. For this purpose, an array of magnetic probe which covers the cross section of the chamber is used to demonstrate changes of magnetic field as the plasma column moves in the low and high magnetic field region. The array of magnetic probes was fixed on a Mylar belt, and finally, the arrays were mounted on the cross section of the Alvand tokamak and a magnetic diagnostic system was designed and constructed.

Keywords: Plasma diagnostic system, Magnetic measurements, Plasma parameter, Alvand tokamak.

۱. مقدمه

پروب‌های مغناطیسی برای اندازه‌گیری یک یا چند مؤلفه از میدان مغناطیسی موضعی در پلاسما استفاده می‌شوند. اندازه‌گیری‌های مغناطیسی، برخی اطلاعات را در مورد ویژگی‌های داخلی پلاسما و عدم تقارن‌های ناشی از ناپایداری‌های مگنتوهیدرودینامیک، به دست می‌دهد. میدان مغناطیسی چنبره‌ای خارج از پلاسما توسط پیچه‌های میدان خارجی تعیین شده و معمولاً توسط پیچه‌های آشکارساز، اندازه‌گیری می‌شود. نتیجه‌ی این اندازه‌گیری‌ها می‌تواند در تعیین پارامترهای پلاسمای توکامک مورداستفاده قرار گیرد[۱-۴]. منابع میدان مغناطیسی در توکامک‌ها انواع مختلفی دارند. جریان‌های تولیدشده توسط منبع تغذیه، جریان‌های ایجادشده در محفظه توسط ولتاژ القایی و جریان پلاسما، باعث ایجاد میدان مغناطیسی در جهت قطبی و چنبره‌ای در توکامک می‌شود. با اندازه‌گیری این میدان‌ها با سامانه‌های تشخیص مغناطیسی می‌توان چگالی جریان پلاسما، جریان پلاسمای کل، موقعیت پلاسما، شکل پلاسما، رسانایی پلاسما، محتوای انرژی کل و اطلاعاتی درباره ناپایداری‌های مگنتوهیدرودینامیک به دست آورد[۵].

در سال ۱۹۸۰ الوند IIC، با سطح مقطع دایره‌ای ساخته شد و در ادامه‌ی کارهای پژوهشی، این توکامک به الوند U ارتقا یافت. توکامک الوند U، یکی از توکامک‌های تحقیقاتی اندازه کوچک با سطح مقطع دایره‌ای می‌باشد. این توکامک اولین توکامک ساخته‌شده در کشور بوده و فعالیت‌های علمی صورت گرفته بر روی این توکامک، بیشتر از نوع مطالعات ناپایداری‌های پلاسما می‌باشد. توکامک الوند U دارای محفظهٔ خلأ از جنس استیل ضدزنگ غیرمغناطیس ۳۱۶ با شعاع کوچک ۱۲٫۶ سانتی‌متر و شعاع بزرگ ۴۵٫۵ سانتی‌متر است و دارای ۱۱ دریچه مختلف جهت دسترسی به پلاسما می‌باشد. مهم‌ترین کاربرد توکامک الوند در برنامه‌های آموزشی و تربیت دانشجویان بوده است. مشخصات فنی این توکامک به شرح جدول ۱ می‌باشد.

جدول ۱. مشخصات فنی توکامک الوند.

پارامتر	مقدار
شعاع اصلی	۴۵٫۵ سانتی‌متر
شعاع فرعی	۱۲٫۶ سانتی‌متر
شدت میدان مغناطیسی چنبره‌ای	۰٫۶-۰٫۹ تسلا
بیشینه جریان پلاسما	~ ۵۰ کیلو آمپر
بیشینه چگالی پلاسما	۲٫۲۵ ×۱۰^{۱۹}m^{-3}
متوسط دمای یون	۴۰ الکترون‌ولت
متوسط دمای الکترون	۸۰ الکترون‌ولت
حداکثر زمان حضور پلاسما	~ ۹ میلی‌ثانیه

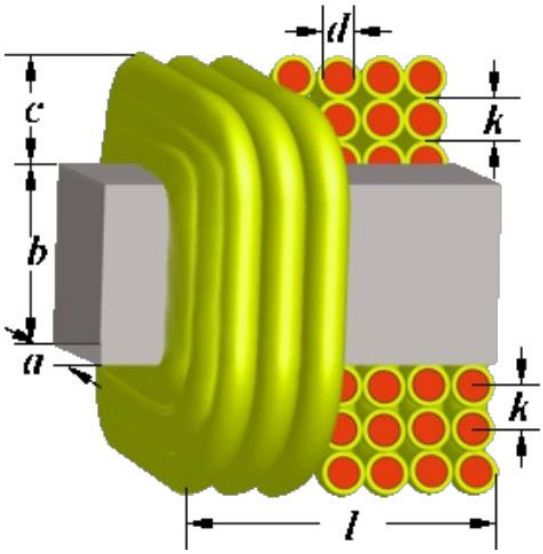
۲. روش کار

سامانه پروب‌های مغناطیسی شامل پیچه یا آرایه‌ای از پیچه‌ها، پونیت انتگرال گیر و سامانه داده‌گیری و ثبت داده‌ها می‌باشد. در سامانه داده‌گیری و ثبت داده‌ها، در کانال‌های متفاوت داده گیری داده‌های اندازه‌گیری شده ثبت می‌گردند.

۲. ۱. طراحی پیچه‌های مغناطیسی

جهت انجام محاسبات مرتبط با پیچه‌ها از نرم‌افزار Coil64 و یا Coil32 استفاده شد. این نرم‌افزار امکان محاسبه گونه‌های مختلف پیچه‌ها را فراهم می‌کند. در صورت معلوم بودن اندوکتانس امکان محاسبه تعداد دورهای پیچه وجود دارد. پیچه‌ها می‌توانند تک لایه، چندلایه، دارای هسته و یا بدون هسته باشند. با تغییر پارامترها می‌توان مقادیر بهینه در محاسبات مرتبط با پیچه را به دست آورد. می‌توان طول سیم مورد نیاز برای پیچاندن یک‌لایه، سیم‌پیچ چندلایه و سیم‌پیچ بر روی حلقه فریت و یا هسته هوا را تخمین زد و نتایج محاسبات را در یک فایل ذخیره و یا چاپ کرد. در

شکل ۱ شماتیک پیچه قطبی طراحی‌شده با سطح مقطع مستطیل نشان داده شده است. پارامترهای پیچه مغناطیسی قطبی در شبیه‌سازی قطر سیم(d)، قطر سیم با عایق(k)، تعداد دور سیم(N)، تعداد لایه(n)، مقاومت پیچه(R)، قطر هسته(b)، ضخامت هسته(a)، ضخامت سیم‌پیچ در پیچه(c) و طول سیم(l) می‌باشند.



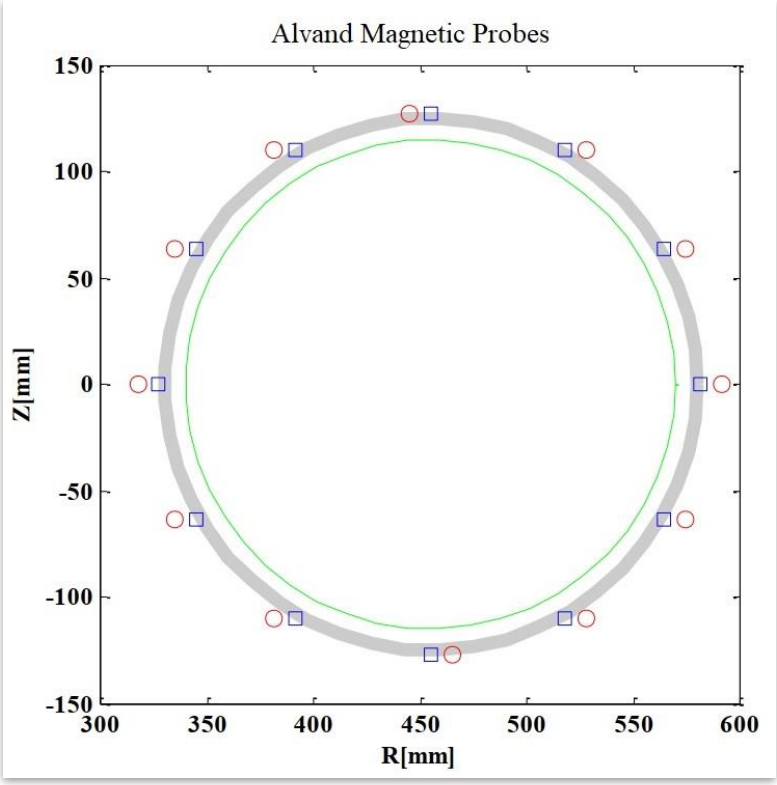
شکل ۱. شماتیک پیچه قطبی طراحی‌شده با سطح مقطع مستطیل.

در ادامه نمونه‌های اولیه پیچه‌های مغناطیسی، با توجه به ملاحظات طراحی آرایه پروب‌های مغناطیسی ساخته شد. شکل‌های ۲ و ۳ به ترتیب آرایه پروب مغناطیسی قطبی و شعاعی را نشان می‌دهند.

شکل ۲. آرایه پروب مغناطیسی قطبی ساخته‌شده.

شکل ۳. آرایه پروب مغناطیسی شعاعی ساخته‌شده.

پس از طراحی و ساخت پیچه‌های مغناطیسی امپدانس آن‌ها اندازه‌گیری گردید و موقعیت مکانی آن‌ها بر روی سطح مقطع توکامک الوند تعیین گردید. شکل ۴ موقعیت مکانی پیچه‌های قطبی و شعاعی را بر روی توکامک الوند نشان می‌دهد. همچنین، امپدانس پیچه‌های مغناطیسی به همراه موقعیت مکانی آن‌ها در جدول‌های ۲ و۳ نشان داده شده است.



شکل ۴. شماتیک محل قرارگیری پروب‌های مغناطیسی قطبی (آبی) و شعاعی (قرمز) بر روی سطح مقطع توکامک.

جدول ۲. مشخصات آرایه پروب مغناطیسی قطبی.

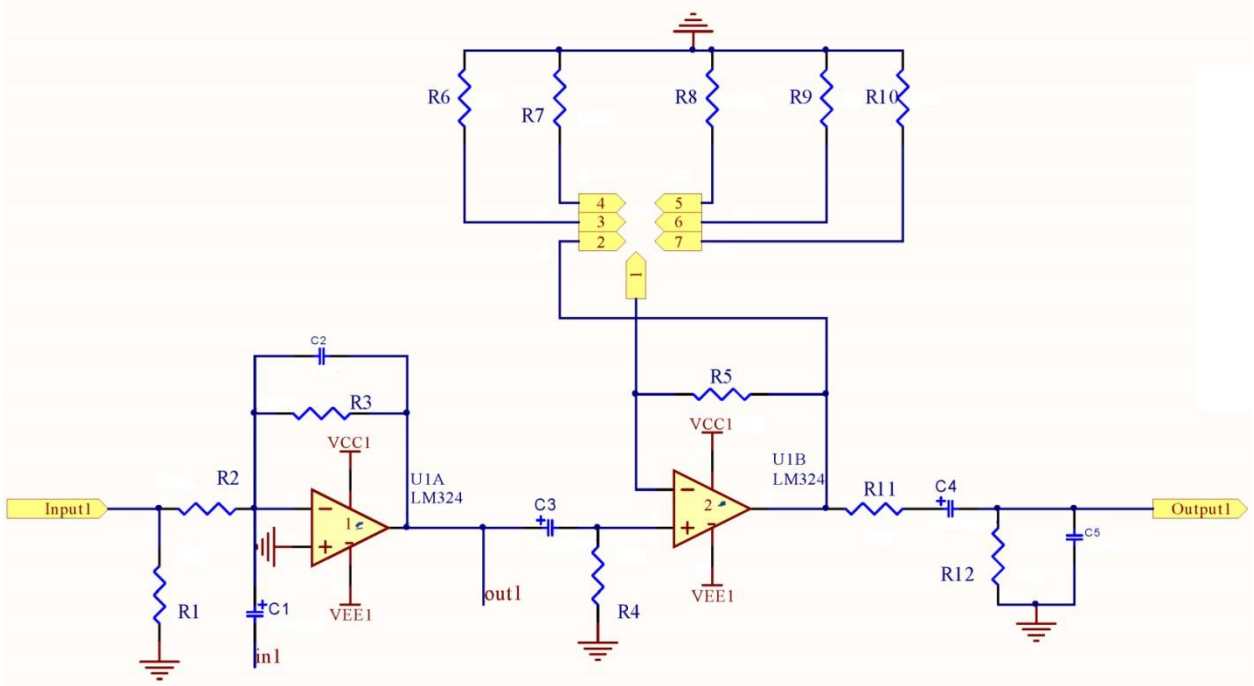
#	θ°	$R(\Omega)$	$L(\mu H)$
Pol#1	۰	۱۶٫۵۰۹	۱۳۳
Pol #2	۳۰	۱۷٫۰۸۶	۱۵۱
Pol #3	۶۰	۱۶٫۶۴۹	۱۳۳٫۷
Pol #4	۹۰	۱۷٫۰۷۱	۱۵۹٫۵
Pol #5	۱۲۰	۱۴٫۸۵۰	۱۱۶
Pol #6	۱۵۰	۱۶٫۳۰۸	۱۴۵٫۵
Pol #7	۱۸۰	۱۶٫۳۳۰	۱۵۳٫۱
Pol #8	۲۱۰	۱۶٫۵۳۱	۱۵۰/۴
Pol #9	۲۴۰	۱۵٫۵۶۶	۱۳۴/۲
Pol #10	۲۷۰	۱۶٫۰۲۰	۱۴۹٫۲
Pol #11	۳۰۰	۱۶٫۷۷۶	۱۴۱٫۱
Pol #12	۳۳۰	۱۶٫۰۸۹	۱۴۲٫۲

جدول ۳. مشخصات آرایه پروب مغناطیسی شعاعی.

#	θ°	$R(\Omega)$	$L(\mu H)$
Rad #1	۰	۱۸٫۷۵۰	۷۰۹
Rad #2	۳۰	۱۸٫۱۲۰	۶۵۳
Rad #3	۶۰	۱۷٫۲۲۹	۶۲۲
Rad #4	۹۰	۱۷٫۵۷۳	۶۲۰
Rad #5	۱۲۰	۱۷٫۸۶۵	۶۸۳
Rad #6	۱۵۰	۱۷٫۱۸۰	۶۶۱
Rad #7	۱۸۰	۱۶٫۹۰۲	۶۴۱
Rad #8	۲۱۰	۱۷٫۴۲۰	۶۸۵
Rad #9	۲۴۰	۱۶٫۷۸۶	۶۵۳
Rad #10	۲۷۰	۱۶٫۵۱۲	۶۱۷
Rad #11	۳۰۰	۱۶٫۱۵۱	۵۹۲
Rad #12	۳۳۰	۱۶٫۰۷۳	۶۱۰

۲. ۲ . طراحی و ساخت یونیت انتگرال‌گیر

با توجه به مطالب ذکرشده پیرامون طراحی سامانه تشخیص مغناطیسی توکامک الوند، سامانه انتگرال‌گیری با استفاده از نرم‌افزار Altium Designer ، همان‌طور که در شکل ۵ قابل‌مشاهده است، طراحی شد. بخش‌های سامانه انتگرال‌گیری شامل بخش راه‌انداز و ایزوله، بخش انتگرال‌گیرنده، بخش تقویت‌کننده و بخش منبع تغذیه است. در شکل۶ نمای کلی از یونیت انتگرال‌گیر ساخته‌شده برای توکامک الوند مشاهده می‌شود.



شکل ۵. مدار انتگرال‌گیر طراحی‌شده برای سامانه تشخیص مغناطیسی.

شکل ۶. نمای کلی از یونیت انتگرال‌گیر ساخته‌شده برای توکامک الوند.

یونیت انتگرال گیر سامانه تشخیص مغناطیسی پس از طی نمودن مراحل طراحی و ساخت، در محل توکامک الوند نصب گردید. سامانه انتگرال‌گیری شامل ۵ ماژول است که هر ماژول ۸ سیگنال ورودی را انتگرال‌گیری و سپس تقویت می‌کند. برای هرکدام از واحدهای انتگرال‌گیر ضریب تقویت مجزایی از طریق سلکتور در شش سطح (۱، ۲، ۵، ۱۰، ۲۰ و ۵۰) در نظر گرفته شده است. در ادامه تکمیل سامانه تشخیص مغناطیسی توکامک الوند، آرایه‌های پروب‌های مغناطیسی قطبی و شعاعی ساخته‌شده بر روی سطح مقطع توکامک جایگذاری و نصب گردید. نگهدارنده و اتصال پیچه‌های مغناطیسی از جنس فیبر شاخی در اندازه‌های لازم تهیه و بر روی توکامک نصب گردید. سپس کابل‌های

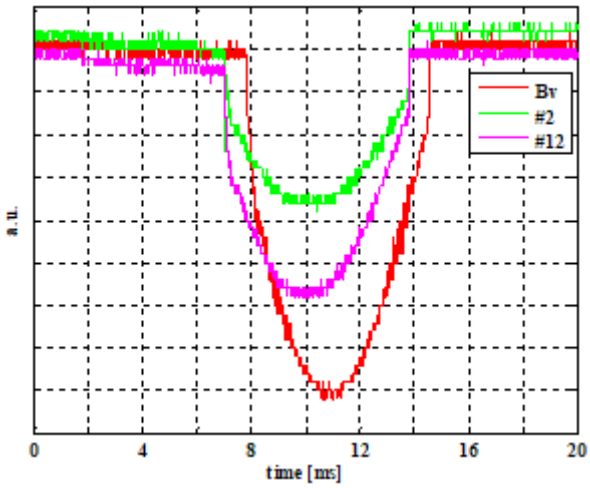
کواکسیال RG58AU با استفاده از BNC سربندی شده و ارتباط بین خروجی پیچه‌ها و یونیت انتگرال گیر برقرار گردید.

شکل۷. نصب و جایگذاری آرایه پروب‌های مغناطیسی قطبی و شعاعی در توکامک الوند.

۳.نتایج

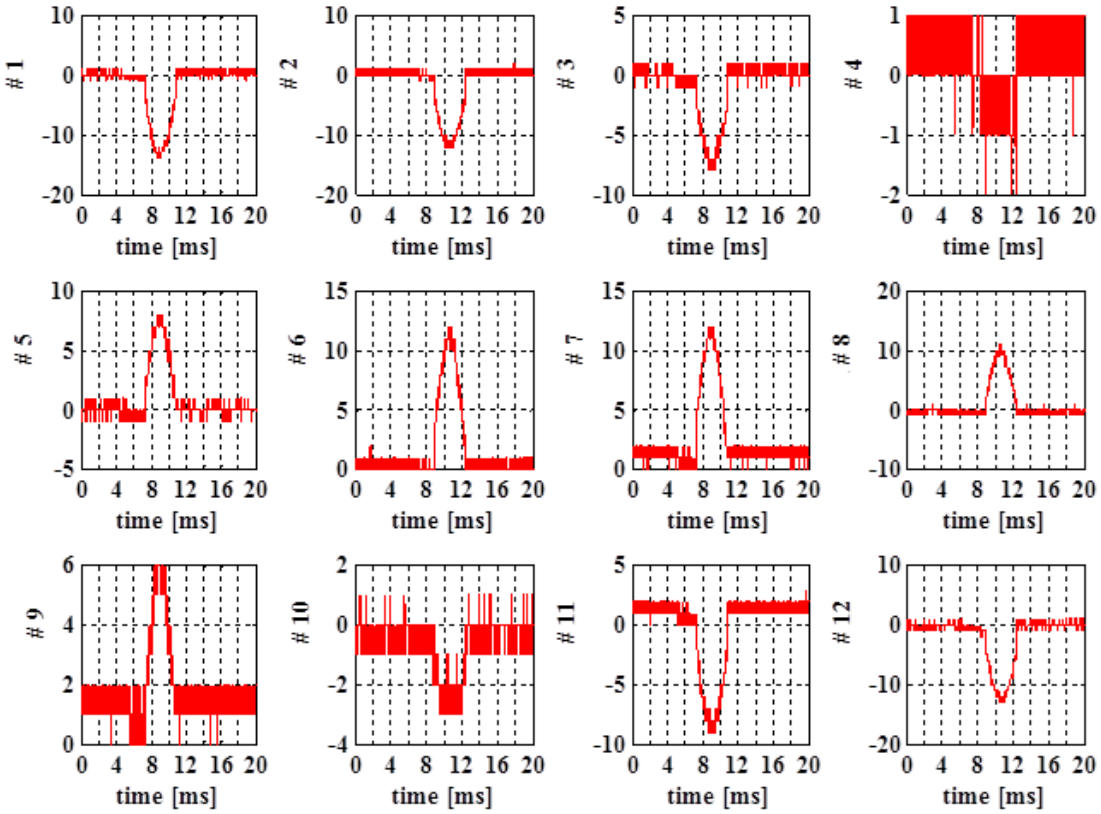
در ابتدا برای تست اولیه سامانه تشخیص مغناطیسی، مقادیر مختلفی به میدان‌های مغناطیسی چنبره‌ای و میدان عمودی اعمال گردید و عملکرد این سامانه تشخیصی در شرایط عدم حضور پلاسما مشخص شد. سپس عملکرد این سامانه در شرایط حقیقی محصورسازی مغناطیسی و با اعمال تمامی میدان‌های مغناطیسی در حضور پلاسما نیز انجام شد.

لازم به ذکر است، شرایط کمینه میدان‌های مغناطیسی چنبره‌ای ۱۱۰۰ ولت، میدان عمودی سریع۷۰۰ ولت و کند۷۰۰ ولت و شرایط بیشینه میدان‌های مغناطیسی چنبره‌ای ۲۰۰۰ ولت، میدان عمودی سریع۱۸۰۰ ولت و کند۱۴۰۰ ولت می‌باشد (این مقادیر بسته به عملکرد سیستم‌های الکترونیکی، کنترولرها و رله‌های سیستم در هنگام آزمایش می‌تواند تغییر نماید). پس از آماده‌سازی خلأ و تمیز نمودن محفظه سیستم توکامک، داده‌های تجربی توکامک الوند جهت تست اولیه به دست آمد. شکل۸ نمونه‌ای از داده‌های تجربی را پس از انجام آزمایش نشان می‌دهد.



شکل ۸. نمونه خروجی پروب‌های مغناطیسی قطبی شماره ۲ و ۱۲ به همراه میدان مغناطیسی عمودی.

علاوه بر این، به‌طور نمونه داده‌های پروب‌های مغناطیسی در زوایای مختلف، برای یک شات عملی ثبت گردید این نتایج در شکل۹ قابل‌مشاهده است. لازم به ذکر است که ترتیب نام‌گذاری پروب‌ها برای زوایای صفر تا ۳۳۰ درجه به ترتیب با نام‌های ۱ الی ۱۲ نمایش داده شده است.



شکل ۹. نتایج پروب‌های مغناطیسی؛ اعداد ۱ الی ۱۲ به ترتیب زاویه قرارگیری پروب‌ها برای زوایای صفر الی ۳۳۰ درجه را نشان می‌دهد.

۴. نتیجه‌گیری

بهینه‌سازی و ارتقاء اندازه‌گیری پارامترهای پلاسمای توکامک الوند با استفاده از آرایه غنی‌تر پروب‌های مغناطیسی جهت اندازه‌گیری دقیق تغییرات میدان‌های مغناطیسی برای میدان‌های موجود در اطراف محفظه توکامک انجام گرفت. سامانه تشخیص مغناطیسی شامل آرایه‌های ۱۲عددی قطبی و شعاعی ساخته‌شده بر روی کمربندی از جنس مایلار

به‌صورت کمربند ثابت به همراه یونیت انتگرال‌گیر بر روی توکامک الوند نصب گردید. نتایج انجام آزمایش‌ها جهت تست سامانه مذکور در توکامک الوند نشان از صحت عملکرد سامانه دارد.

۶. مراجع

1 I. H. Hutchinson, "Principles of Plasma Diagnostics: Second Edition," *Plasma Physics and Controlled Fusion*, vol. 44, no. 12, pp. 2603-2603, 2002/11/22 2002.
2 W. Lochte-Holtgreven, "Plasma Diagnostics. AIP Press," 1995.
3 T. F. R. Equipe, "Tokamak plasma diagnostics," *Nuclear Fusion*, vol. 18, no. 5, p. 647, 1978.
4 M. Ariola and A. Pironti, *Magnetic control of tokamak plasmas*. Springer, 2008.
5 A. J. Wootton, "Measurements of plasma shape in a tokamak," *Nuclear Fusion*, vol. 19, no. 7, p. 987.۱۹۷۹ ,