طراحی آرایه‌ای پروب‌های مغناطیسی برای اندازه‌گیری میدان مغناطیسی توکامک الوند

هنرمند،الناز(۱) – صادقی،یحیی(۲) – علی‌عسگریان،محمد(۳) – نوری،احسان‌الله(٤)

دانشگاه اصفهان، دانشکده علوم و فناوری‌های نوین، گروه مهندسی هسته‌ای

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

چکیده:

به طور کلی میدان‌های قطبی (θ) و شعاعی (r) و مشتقات زمانی آن‌ها نقش بسیار مهمی در تعیین شرایط تعادل و پایداری توکامک‌ها ایفا می‌کنند. متداول‌ترین روش برای اندازه‌گیری میدان‌های قطبی و شعاعی، استفاده از آرایه‌ای از پروب‌های مغناطیسی از نوع پیچه‌های پیکاپ[1] است. برای اندازه‌گیری این میدان‌ها در توکامک الوند، آرایه‌ای از چهار پروب مغناطیسی طراحی شده است که محل قرار گیری آنها بر روی محفظه‌ی خلاء می‌باشد. از آنجایی که ولتاژ خروجی پروب مغناطیسی که بر اثر جریان القایی حاصل از میدان مغناطیسی متغیر ایجاد می‌شود متناسب با مشتق زمانی میدان است، برای به دست آوردن مقدار B باید از ولتاژ خروجی انتگرال‌گیری نمود. به این منظور مدارات انتگرال‌گیر پروب طراحی گردید. سپس برای تحلیل خروجی پروب‌های مغناطیسی و در نتیجه استفاده از مقدار میدان مغناطیسی اندازه‌گیری شده، با طرح آزمایشی ضریب کالیبراسیون این پروب‌ها به‌دست آمد. در پایان نتایج اولیه‌ی به دست آمده از تست پروب‌های مغناطیسی در چند شات نمونه‌ای توکامک و تحلیل سیگنال‌های گرفته شده از آن‌ها ارائه شده است.

کلیدواژه: پروب مغناطیسی-پیچه‌ی پیکاپ-توکامک الوند-انتگرال‌گیر-کالیبراسیون-میدان مغناطیسی پلاسما

مقدمه:

میدان مغناطیسی یکی از مهم‌ترین مشخصه‌های پلاسما است و اطلاع از آن برای فهم رفتار پلاسما مورد نیاز است. به اندازه‌گیری‌هایی که بر اساس دریافت مستقیم میدان مغناطیسی در قسمت‌های مختلف بیرونی و درونی پلاسما، با استفاده از پروب‌های مغناطیسی صورت می‌گیرد تشخیص مغناطیسی[2] گفته می‌شود. یکی از ساده‌ترین روش‌ها برای اندازه‌گیری میدان مغناطیسی در مجاورت یک نقطه در فضا، توسط یک پیچه‌ی کوچک شامل تعدادی دور سیم می‌باشد [۱،۲،۳]. پیچه‌ی مغناطیسی پیکاپ از انواع دستگاه‌های تشخیصی پلاسما است که امکان طراحی و ساخت آن برای توکامک الوند قابل بررسی است. مطالعات مربوط به تعادل پلاسما یکی از اساسی‌ترین مسائل مربوط به محصورسازی مغناطیسی پلاسما است. به عبارت دیگر کنترل موقعیت پلاسما نقش اساسی در محصورسازی پلاسما و به دست آوردن عملکرد بهینه‌ی پلاسمای توکامک دارد. به دلیل وابستگی موقعیت پلاسما و توزیع جریان پلاسما

[1] Pick-Up Coils
[2] Magnetic Diagnostic

به توزیع میدان مغناطیسی اطراف پلاسما، پروب‌های مغناطیسی پیکاپ می‌توانند اطلاعاتی در مورد موقعیت پلاسما و یا پارامتر شفرانوف[3] به دست دهند که از جمله مهم‌ترین کاربردهای این دسته از پروب‌های مغناطیسی می‌باشند.

بر اساس قانون القای فارادی، ولتاژ خروجی پیچه‌ی مغناطیسی که بر اثر جریان القایی حاصل از میدان مغناطیسی متغیر ایجاد می‌شود به صورت زیر می‌باشد:

$$V = \frac{n\, d\varphi}{dt} = nA\, \frac{dB}{dt} \qquad (۱)$$

که V ولتاژ پیچه‌ی مغناطیسی، n تعداد دورها، A سطح مقطع پروب بر حسب m^2 و dB/dt سرعت تغییر میدان مغناطیسی بر حسب T/S می‌باشد. از آنجایی که ولتاژ خروجی پروب متناسب با dB/dt می‌باشد برای به دست آوردن مقدار B باید از ولتاژ خروجی انتگرال‌گیری نمود تا یک سیگنال متناسب با میدان به دست آید:

$$V_0 = \frac{nAB}{RC} \qquad (۲)$$

که RC ثابت زمانی انتگرال‌گیر است و باید حداقل ۱۰ برابر از زمان مشاهده‌ی سیگنال بزرگتر باشد تا انتگرال‌گیری به طور صحیح انجام شود.در طراحی پروب‌های مغناطیسی باید دقت لازم به عمل آید تا پروب مغناطیسی از حساسیت قابل قبولی برخوردار باشد چرا که خروجی آن به قدری باید بزرگ باشد که به راحتی از نویزهایی که بر اثر تأثیر قسمت‌های دیگر سیستم ایجاد می‌شوند، قابل تفکیک باشد. همچنین ساختار و اندازه‌ی پروب به گونه‌ای باشد که کمترین اختلال ممکن را در سیستم ایجاد نماید. علاوه بر این‌ها پاسخ فرکانسی پروب باید بالا بوده و پاسخگوی تغییرات سریع سیستم باشد. پاسخ فرکانسی پروب با رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$\tau = \frac{L}{R_0} \qquad (۳)$$

که نشان دهنده‌ی کوچک‌ترین فاصله زمانی در تغییر پلاسما است که پروب می‌تواند آن را تفکیک کند. در اینجا L اندوکتانس پروب و R_0 مقاومت مدار خارجی پروب مغناطیسی است [٤]. بنابراین در ساخت پروب حالت بهینه‌ای که همه‌ی شرایط مذکور را در حد قابل قبولی دارا باشد، مدنظر می باشد.

توکامک الوند:

توکامک الوند یکی از توکامک‌های سایز کوچک تحقیقاتی است که دارای پلاسمای با سطح مقطع دایروی می‌باشد. این توکامک اولین توکامک ساخته شده در ایران است و در حال حاضر واقع در مرکز تحقیقات پلاسما و گداخت

[3] Shafranov Parameter

سازمان انرژی اتمی می‌باشد. از این توکامک برای اندازه‌گیری پارامترهای پلاسما و تحقیق در مشخصات فیزیکی آن استفاده شده است. مشخصات فنی این توکامک به شرح جدول (۱) می‌باشد.

جدول شماره (۱) مشخصات فنی توکامک الوند

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
شعاع اصلی	٤٥/٥ cm	دمای الکترون	۸۰ ~ ۱۰۰ ev
شعاع فرعی	۱۲/٦ cm	دمای یون	۸ ~ ۱۰ ev
میدان مغناطیس چنبره‌ای	۰/٦ ~۰/۹ T	جریان پلاسما	۲۵ ~ ۳۰ KA
مدت زمان تخلیه	٦ ~ ۸ ms	تعداد سیم‌پیچ‌های میدان چنبره‌ای	۲٤

طراحی و ساخت پروب‌های مغناطیسی:

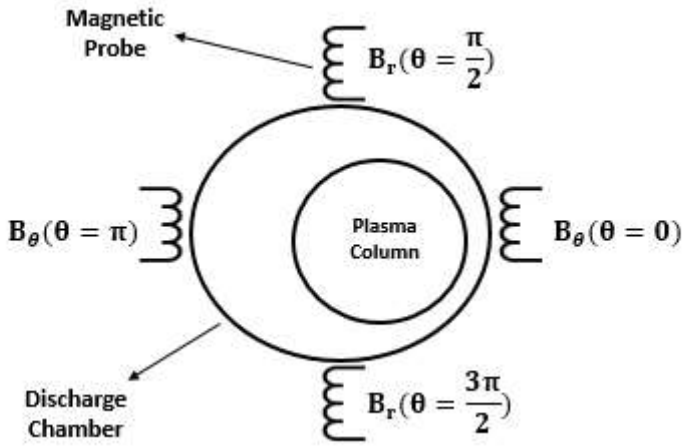
برای اندازه‌گیری میدان مغناطیسی در توکامک الوند، از چهار پیچه‌ی مغناطیسی که از نوع پیچه‌ی چند لایه با هسته‌ی هوا هستند[4] استفاده می‌شود. این دسته از پیچه‌ها بستگی به یک ماده‌ی فرومغناطیس برای دریافت اندوکتانس معین خود ندارند و بخش مرکزی چنین پیچه‌هایی که سیم‌ها به دور آن پیچیده شده‌اند، تنها متشکل از هوا می‌باشد. برای طراحی هر کدام از پیچه‌های مغناطیسی از ۵۸۰ دور سیم به قطر ۰/۱٦ mm استفاده شده است که پیچه‌های حاصل شده دارای ضخامت یا طول ۵ mm، قطر بیرونی ۱۸ mm و قطر داخلی ۱۰ mm می‌باشند. در جدول (۲) پارامترهای پروب‌های طراحی شده با توجه به محل قرارگیری آن‌ها برروی چنبره‌ی خلأ نشان داده شده است. پروب‌های قرار گرفته در زوایای ۲/π و ۳π/۲ به منظور اندازه‌گیره مولفه‌ی شعاعی میدان مغناطیسی و پروب‌های قرار گرفته در زوایای ۰ و π به جهت اندازه‌گیری مولفه‌ی قطبی میدان مغناطیسی درنظر گرفته شده‌اند.

جدول شماره (۲) موقعیت قرارگیری و پارامترهای پیچه‌های طراحی شده

شماره پروب	زاویه محل قرارگیری پروب نسبت به سطح مقطع چنبره	**مقاومت** (Ω)	**اندوکتانس** (mH)
۱	$\pi/2$	۲٦	٤/۰۹
۲	π	۲۵/٦	٤/۱۷
۳	$3\pi/2$	۲٦	٤/۱۵
٤	0	۲۵/۵	۳/۹۵

شکل (۱) شماتیک محل قرارگیری پروب‌ها را بر روی محفظه‌ی خلأ نشان می‌دهد.

[4] Multilayer Air Core Coil



شکل شماره (۱) : شماتیک محل قرارگیری چهار پروب مغناطیسی بر روی سطح بیرونی چنبره‌ی توکامک الوند

طراحی مدار انتگرال‌گیر:

از آنجایی که ولتاژ خروجی پیچه‌ی مغناطیسی با توجه به قانون القای فارادی متناسب با dB/dt می‌باشد، برای به دست آوردن مقدار B باید از ولتاژ خروجی انتگرال‌گیری نمود. در شکل (۲) شماتیک مدار انتگرال‌گیر پروب به همراه مدار تقویت کننده آن مشاهده می‌شود. به دلیل تضعیف در خروجی، از یک مدار تقویت کننده مجزا استفاده شده است. نحوه‌ی محاسبه‌ی بهره در طبقه اول مدار به صورت معکوس می‌باشد که مطابق با رابطه زیر می‌باشد:

$$Gain = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{-R(f)}{R(in)} \qquad (٤)$$

بهره در مدار انتگرال‌گیر اولیه برابر با ۱ فرض شده زیرا در صورت افزایش بهره در طبقه‌ی اول، با اشباع خروجی مواجه خواهیم شد. لذا تقویت خروجی توسط مدار تقویت کننده‌ی مجزایی صورت گرفت. مقاومت R(offset) برای از بین بردن جریان آفست انتخاب شده است که در صورت برابر بودن مقدار آن با مقاومت ورودی، بیشترین جریان کشی آفست به زمین را خواهیم داشت. همچنین خازن‌های استفاده شده در مدار نقش تثبیت ولتاژ خروجی، انتگرال-گیری و جلوگیری از تضعیف سیگنال خروجی را ایفا می‌کنند. فرکانس کاری این انتگرال‌گیر متناسب با فرکانس توکامک درنظر گرفته شده است لذا عملکرد آن در فرکانس‌های پایین خواهد بود.

کالیبراسیون پروب مغناطیسی:

برای تحلیل خروجی پروب‌های مغناطیسی و در نتیجه استفاده از مقدار میدان مغناطیسی اندازه‌گیری شده، به دست آوردن ضریب کالیبراسیون این پروب‌ها امری ضروری می‌باشد. بنابراین آزمایشی برای این منظور طراحی شده است[۵]. مطابق قانون فارادی میدان مغناطیسی متغیر عبوری از مرکز سیم پیچ، ولتاژی را در آن القا می‌کند و از آنجایی

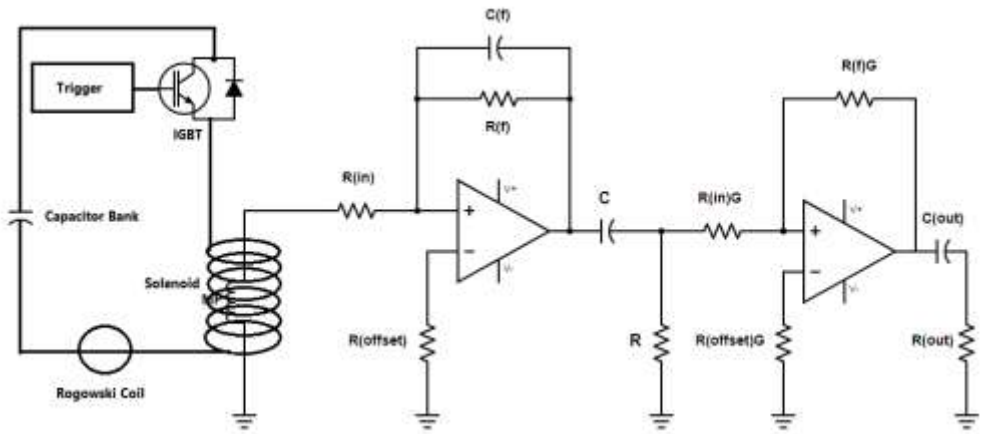
که پروب‌های مغناطیسی خود سیم پیچ هستند، رابطه خروجی آن‌ها با میدان گذرنده از مرکزشان مطابق رابطه زیر است که در آن B میدان در مرکز سیم پیچ، V ولتاژ القا شده در سیم پیچ، N تعداد دور و A سطح مقطع سیم پیچ است.

$$B = -\frac{1}{NA}\int V.dt \qquad (۵)$$

با مشخص شدن ضرایب این رابطه می‌توان میدان‌های قطبی و شعاعی در اطراف پلاسما را به صورت محلی و نقطه‌ای با استفاده از این پروب‌ها تعیین نمود. برای تعیین این ضرایب، مداری که شماتیک آن در شکل (۲) آورده شده است، طراحی شد که در آن جریان متغیری توسط بانک خازنی و سوئیچ IGBT ایجاد گردیده و از سیملوله با ابعاد مشخص عبور داده می‌شود. طبق قانون آمپر میدان مغناطیسی تولید شده در مرکز سیملوله متناظر با جریان عبوری از آن است و می‌توان مقدار آن را با استفاده از رابطه زیر به دست آورد:

$$B = \mu_0 n I \qquad (۶)$$

که در آن μ_0 ضریب نفوذپذیری، n تعداد دور بر واحد طول و I جریان گذرنده از سیملوله می‌باشد، برای اندازه‌گیری جریان I از کویل روگوفسکی استفاده می‌شود.



شکل (۲): مدار طراحی شده به منظور محاسبه ضریب کالیبراسیون پروب‌های مغناطیسی پیکاپ

از طرفی با قرار دادن پروب مغناطیسی در داخل سیملوله برای اندازه‌گیری میدان ایجاد شده در مرکز آن و عبور سیگنال خروجی پروب از انتگرال‌گیر و تقویت کننده با بهره قابل تنظیم G، میدان اندازه‌گیری شده در مرکز پروب مغناطیسی که با توجه به تنظیمات، همان مرکز سیملوله می‌باشد، مطابق رابطه زیر است:

$$B = \frac{1}{RCNA} \times \frac{V_{out}}{G} \qquad (۷)$$

که در آن V_{out} خروجی تقویت کننده است. با جایگذاری رابطه (٦) در رابطه (٧) خواهیم داشت:

$$\frac{1}{RCNA} = \frac{\mu_0 \, n \, I \, G}{V_{out}} \qquad (٨)$$

مقدار $\frac{1}{RCNA}$ ضریب کالیبراسیون K نامیده می شود که با معلوم بودن μ_0 ، n، I، G و V_{out} ضریب کالیبراسیون تعیین می‌گردد. آزمایش طراحی شده چندین مرحله با دو سیملوله مختلف از نظر ابعاد هندسی و با مقادیر مختلف ولتاژ اولیه بانک خازنی که منجر به جریان‌های بیشینه مختلفی می‌شود، انجام شد. سیملوله اول دارای شعاع ۲ cm، طول ٤٧/٧ cm و تعداد دور ۱۱۰ بوده است. شعاع سطح مقطع، طول و تعداد دور سیم لوله دوم نیز به ترتیب ٦ cm، ٤٧ cm، ۱۱۰ انتخاب شده اند. همچنین بازه‌ی ولتاژهای اولیه بانک خازنی از ٥٤ تا ۲۰ ولت در نظر گرفته شده است. در هر نمونه‌ی آزمایش ضریب کالیبراسیون (K) محاسبه می‌شود و با توجه به انحراف معیار که با رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} (K_i - \overline{K})^2} \qquad (٩)$$

داده‌هایی که در محدوده $\overline{K} \pm \sigma$ قرار نداشته باشند حذف شده و میانگین محاسبه می‌گردد. این عمل تا جایی که داده‌ها در محدوده مورد نظر باشند ادامه می‌یابد و در نهایت ضریب کالیبراسیون به دست می‌آید. همچنین خطای اندازه گیری ضریب کالیبراسیون از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$e = \frac{\sqrt{\overline{K}}}{\sqrt{N}} \qquad \text{درصدخطا} = \frac{e}{k} \times 100 \qquad (١٠)$$

در کالیبراسیون پروب‌های مغناطیسی به روش ایجاد میدان یکنواخت، باید درنظر داشت که نیاز به میدانی کاملاً مشخص با فرکانسی نزدیک به فرکانس سیستم مورد آزمایش (در اینجا توکامک) می‌باشد. علاوه بر این میدان کالیبراسیون مورد نظر باید کاملاً یکنواخت بوده و در یک ناحیه‌ی به اندازه کافی بزرگ ایجاد شود تا حضور پروب مغناطیسی در داخل آن تاثیری روی آن نداشته باشد. همچنین قدرت میدان مغناطیسی باید به میزان کافی باشد تا یک سیگنال قابل اندازه گیری از پروب مغناطیسی فراهم کند. بنابراین به منظور افزایش دقت و درستی ضریب کالیبراسیون پروب‌های مغناطیسی ساخته شده، و همچنین فراهم نمودن میدان مغناطیسی کاملا یکنواخت و با فرکانسی مطابق با فرکانس توکامک الوند، از پیچه‌های مولد میدان مغناطیسی عمودی در توکامک الوند، به منظور فراهم نمودن میدان کالیبراسیون استفاده شده است. به این منظور سیگنال خروجی اندازه‌گیری شده توسط پروب‌های مغناطیسی در یک شات نمونه‌ای توکامک، تحت شرایط عدم حضور پلاسما و در حضور مقدار مشخصی از میدان مغناطیسی عمودی

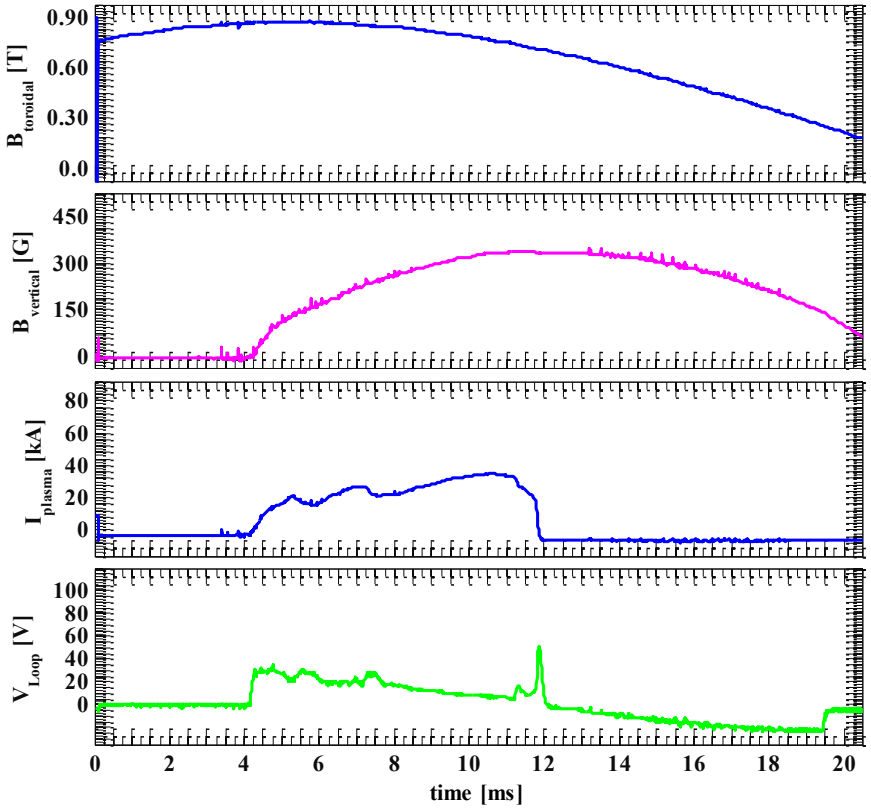
اندازه‌گیری شد و در نهایت ضریب کالیبراسیون K محاسبه گردید. در شکل (۵) سیگنال گرفته شده از پروب مغناطیسی در حضور میدان مغناطیسی عمودی B_v نشان داده شده است.

نتایج:

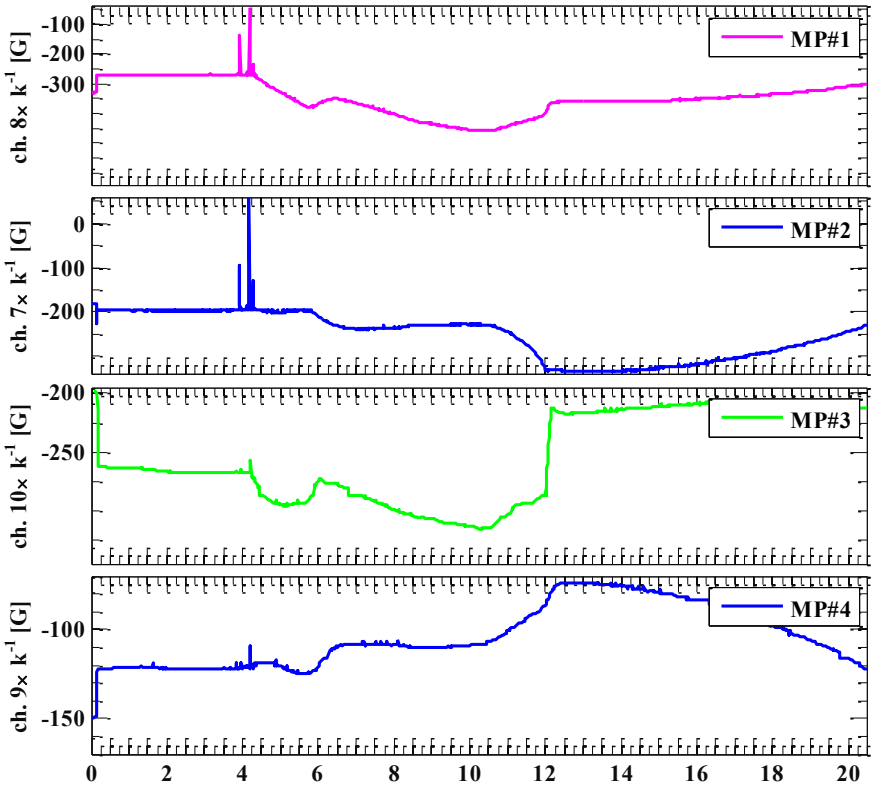
پروب‌های مغناطیسی پس از طراحی و ساخت و قرارگیری آن‌ها بر روی چنبره‌ی خلاء، در شرایط حضور پلاسما تست شدند. در شکل (۳) نتایج حاصل از یک شات نمونه‌ای توکامک الوند نشان داده شده است. در شکل (٤) نتایج اولیه‌ی به دست آمده از تست پروب‌های مغناطیسی آرایه مشاهده می‌شود؛ و در شکل (۵) نیز سیگنال‌های به‌دست آمده از جریان پلاسما و حسگر حلقه ولتاژ[5] در شرایط حضور پلاسمای برابر با ۳ میلی ثانیه نشان داده شده است و همچنین سیگنال‌های گرفته شده از پروب مغناطیسی و میدان مغناطیسی عمودی توکامک برای تعیین ضریب کالیبراسیون پروب‌ها در شرایط عدم حضور پلاسما (بعد از ۳ میلی ثانیه) مشاهده می‌شود. پس از آماده سازی خلاء و تمیز نمودن محفظه سیستم توکامک، داده‌های تجربی توکامک الوند جهت تست پروب‌های مغناطیسی آرایه ساخته شده با شرایط زیر به‌دست آمد:

میزان میدان چنبره‌ای ۱۹۵۰ ولت، میزان ولتاژهای عمودی سریع ۱۱۵۰ ولت، ولتاژهای عمودی کند ۱۸۰۰ ولت، گرمایش اهمی سریع و کند به ترتیب ۳۸۰۰ و ۲۲۰۰ ولت، خلاء سیستم ٤×10^{-٥} تور و میزان ولتاژ پیش یونش ۲/۵ کیلو ولت می‌باشد و نتیجه آزمایش برای این شات با زمان پلاسمای برابر با ۹ میلی ثانیه به‌دست آمد [٦].

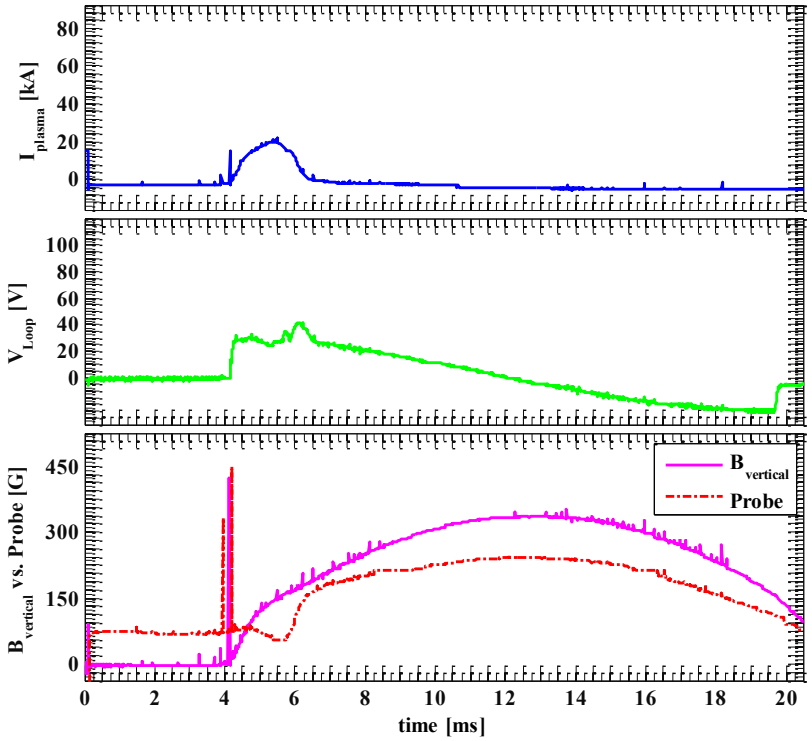
[5] Voltage Loop



شکل (۳): سیگنال‌های حاصل از حسگر حلقه ولتاژ، جریان پلاسما، میدان عمودی و میدان چنبره ای در یک شات نمونه ای توکامک



شکل (۴): نتایج اولیه به دست آمده از تست پروبهای مغناطیسی آرایه



شکل (۵): نتایج به دست آمده از پروب مغناطیسی و میدان مغناطیسی عمودی توکامک برای تعیین ضریب کالیبراسیون در شرایط عدم حضور پلاسما

بحث و نتیجه‌گیری:

در شکل (۵) با مقایسه‌ی رفتار سیگنال گرفته شده از پروب مغناطیسی و سیگنال حاصل از میدان عمودی توکامک، می‌توان دریافت که بعد از از بین رفتن پلاسما با توجه به افزایش منحنی میدان عمودی توکامک، میدان عمودی دریافت شده توسط پروب مغناطیسی نیز افزایش پیدا کرده است و با کاهش میدان عمودی، سیگنال دریافت شده توسط پروب نیز رفتاری مشابه نشان می‌دهد که در این صورت می‌توان صحت عملکرد پروب مغناطیسی را نتیجه گیری نمود. در ادامه‌ی این طرح پژوهشی با تحلیل و مقایسه‌ی نتایج حاصل از چهار پروب مغناطیسی و در نتیجه استفاده از مقدار میدان‌های مغناطیسی قطبی و شعاعی اندازه‌گیری شده، با استفاده از روشی تحلیلی به اطلاعاتی در مورد پارامتر شفرانوف و موقعیت پلاسمای توکامک دست خواهیم یافت.

مراجع:

[1] I. H. Hutchinson, Principles Of Plasma Diagnostics,Cambridge University Press,2005.

[2] W.Lochte-Holtgreven, Plasma Diagnostics, AIP Press, 1995.

[3] Slawomir Tumanski, Induction Coil Sensors, Institute of Electrical Theory & Measurment, 2007.

[4] H Bhuyan, S R Mohanty, N K Neog, S Bujarbarua, R K Rout, Magnetic probe measurement of current sheet dynamics in a coaxial plasma accelerator, Meas. Sci.Technol.14, 2003.

[۵] خیری فرد، م، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، شناسایی موقعیت عمودی پلاسما در توکامک دماوند با استفاده از حسگرهای مغناطیسی به عنوان اندازه‌گیر، دانشکده مهندسی برق و رباتیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، خرداد ۸۷.

[٦] دفتر ثبت اطلاعات آزمایشگاه توکامک الوند.